

NEUE ENERGIEN 2020

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

22.11.2013

Projekttitel:

EHEV - Eco Drive for Hybrid Electric Vehicles

Projektnummer: 829966

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung NEUE ENERGIEN 2020
Projektstart	9.9.2010
Projektende	31.7.2013
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	35 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
AnsprechpartnerIn	Dipl.-Ing. Antonius Kies
Postadresse	TU Graz IVT, Inffeldgasse 19, 8010 Graz
Telefon	+43 316 873 30283
Fax	+43 316 873 30262
E-mail	kies@ivt.tugraz.at
Website	http://www.ivt.tugraz.at

EHEV

Eco Drive for Hybrid Electric Vehicles

Autoren:

TU Graz, IVT:

Kies A.

Dippold M.

Silberholz G.

Hausberger S.

Magna E-Car Systems

Doczy S.

TU Graz, ISV

Haberl M.

Fellendorf M.

Holding Graz Linien

Glaser R.

Amtmann G.

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	4
2	Einleitung	6
2.1	Danksagung des Erstautors	6
3	Inhaltliche Darstellung	7
3.1	Eco-Drive: Stand der Technik	8
3.2	Messungen an Fahrzeugen	12
3.2.1	Rollenprüfstandmessung am Mildhybrid- und Standard-Pkw	12
3.2.2	Mobile Emissionsmessung am Vollhybrid-Stadtbuss und konventionellen Stadtbuss	15
3.2.3	Rollenprüfstandmessung am Microhybrid Stadtbuss.....	20
3.2.4	Mobile Emissionsmessung am Vollhybrid-Pkw.....	21
3.3	Simulation von Fahrzeugen	23
3.3.1	Simulationsprogramm PHEM.....	24
3.3.2	Erzeugung von Eingabedaten aus den Messungen	26
3.3.3	Simulation des Hybridbusses.....	26
3.3.4	Hybrid-Pkw.....	29
3.4	Verkehrsflusssimulation	31
3.4.1	Aufbau und Kalibrierung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (VISSIM)	31
3.4.2	Untersuchte Variationen	33
3.4.3	Kalibrierung der Hybridbusse in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation	34
3.4.4	Ergebnisse	36
3.5	Effekte der Hybridisierung des Grazer Stadtverkehrs	37
3.5.1	Simulationsprogramm NEMO	37
3.5.2	Randbedingungen in den Szenarien.....	37
3.5.3	Hybridisierung der Stadtbussflotte.....	38
3.5.4	Hybridisierung der PKW-Flotte	39
3.6	Untersuchung der Batteriealterung	40
3.6.1	Mobile Messung der Batteriegrößen.....	41
3.6.2	Prüfstandsmessung der Batterie.....	43
3.6.3	Validierung der Batteriealterung	44
3.6.4	Einfluss der Fahrweise auf die Batteriealterung	45
3.7	Betriebserfahrung mit dem Hybridbus.....	48
3.7.1	Methoden zur Kontrolle des Busbetriebs	48
3.7.2	Hybridbusse im Alltagsbetrieb	51
3.7.3	Auswirkungen von Eco-Drive auf den Fahrplan.....	52
3.7.4	Wirtschaftlichkeit von Hybridbussen	53
3.8	Schulung von FahrerInnen im Eco-Drive Fahrstil.....	57
3.8.1	Schulung von Fahrern bei den HGL	57
3.8.2	Informationsveranstaltung am IVT	58

4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	59
5	Ausblick und Empfehlungen.....	60
6	Literaturverzeichnis.....	61
7	Anhang.....	66
7.1	Fahrzeugdaten.....	66
7.1.1	Mildhybrid-Pkw.....	66
7.1.2	Standard-Pkw.....	66
7.1.3	Vollhybrid-Stadtbus 12 m.....	67
7.1.4	Standard-Stadtbus 12 m.....	67
7.1.5	Microhybrid-Stadtbus 12 m.....	67
7.1.6	Vollhybrid-Pkw.....	68
7.2	Details Pedalampel.....	68
7.2.1	CANalyzer.....	68
7.2.2	C-Control.....	74
7.3	Rechengang zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Hybridbussen.....	76
8	Kontaktdaten.....	80

2 Einleitung

Das Ziel des Projektes EHEV - EcoDrive for Electric Hybrid Vehicles war es, einen Fahrstil zu finden, der sparsam sowohl in Bezug auf Kraftstoffverbrauch, Schadstoffausstoß als auch Batterieverschleiß ist.

Die Ermittlung einer Fahrweise, die diese Anforderungen erfüllt erfolgte mittels Simulation und Messung. Vermessen wurden auf dem Pkw- sowie Nfz-Rollenprüfstand und mit dem mobilen Emissionsmesssystem des IVT: 2 Hybrid Pkw, 1 konventioneller Pkw, ein Vollhybrid Stadtbuss, ein Microhybrid Stadtbuss und 1 konventioneller Stadtbuss. Ergänzt wurden die Messungen durch Simulationen des Energieverbrauchs der Einzelfahrzeuge, der Verkehrsflusssimulation des ISV eines Busmodells und der Berechnung der eingesparten Gesamt-Emissionen der Grazer Fahrzeugflotte.

Bei Magna E-Cars wurden während der Projektlaufzeit mit einer mobilen Messeinrichtung und Funkübertragung die relevanten Betriebsdaten des Batteriesystems im Linienbetrieb aufgezeichnet. Am Anfang, in der Mitte und am Ende der Projektlaufzeit wurde die Batterie ausgebaut und auf einem Prüfstand Referenzmessungen unterzogen. Dabei wurden die verbleibende Restkapazität und der Alterungszustand gemessen. Des Weiteren wurde mit den Messdaten der Algorithmus der Alterungssimulation besser abgestimmt.

Ebenfalls wurden die BusfahrerInnen der HGL und die Werkstatt nach ihren Erfahrungen mit dem Hybridbus befragt, sowie eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zur Amortisationsdauer dieses Bustyps gemacht.

Inhaltlich gehört das Projekt zum Themenfeld 'Energieeffiziente Fahrzeugkomponenten und -systeme' der 4. Ausschreibung 'Neue Energien 2020' des Klima- und Energiefonds.

Im folgenden Hauptabschnitt 'Inhaltliche Darstellung' werden nach einer Einführung in den Stand der Technik alle relevanten Ergebnisse des Projektes beschrieben. Im Anhang werden technische Daten, der Quelltext zu einem geschriebenen Programm und der detaillierte Rechengang der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung eines Hybridbusses gegeben.

2.1 Danksagung des Erstautors

Die vorliegende Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die engagierte Mitarbeit der Kollegen und Projektpartner *(in alphabetischer Reihenfolge)*

TU Graz, IVT-Emissionen: Jürgen Blassnegger, Mario Deutsch, Martin Dippold, Stefan Hausberger, Raphael Luz, Gerald Nöhrer, Martin Rexeis, Gérard Silberholz, Stephan Smode, Werner Stadlhofer, Thomas Vuckovic

TU Graz, ISV: Martin Fellendorf, Michael Haberl

Magna E-Car Systems: Stefan Doczy, Thomas Friedl

Holding Graz Linien: Gerhard Amtmann, Mario Doblreiter, Richard Glaser, Franz Steiner, Peter Trolp

Des Weiteren wurden wir von Volvo Buses Göteborg (Hr. Tuomivaara), Volvobus Österreich in Tribuswinkel (Hr. Kantor) und der Volvo Werkstatt Unterpemstätten (Hr. Mencinger) stets freundlich und großzügig mit Informationen, Daten und Hilfestellung versorgt.

3 Inhaltliche Darstellung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse präsentiert und beschrieben. Die technischen Daten der Messfahrzeuge sind im Abschnitt 7.1 aufgelistet, hier soll in Abbildung 1 nur eine Übersicht über den Hybridbus und die Struktur der Antriebsstränge gegeben werden.

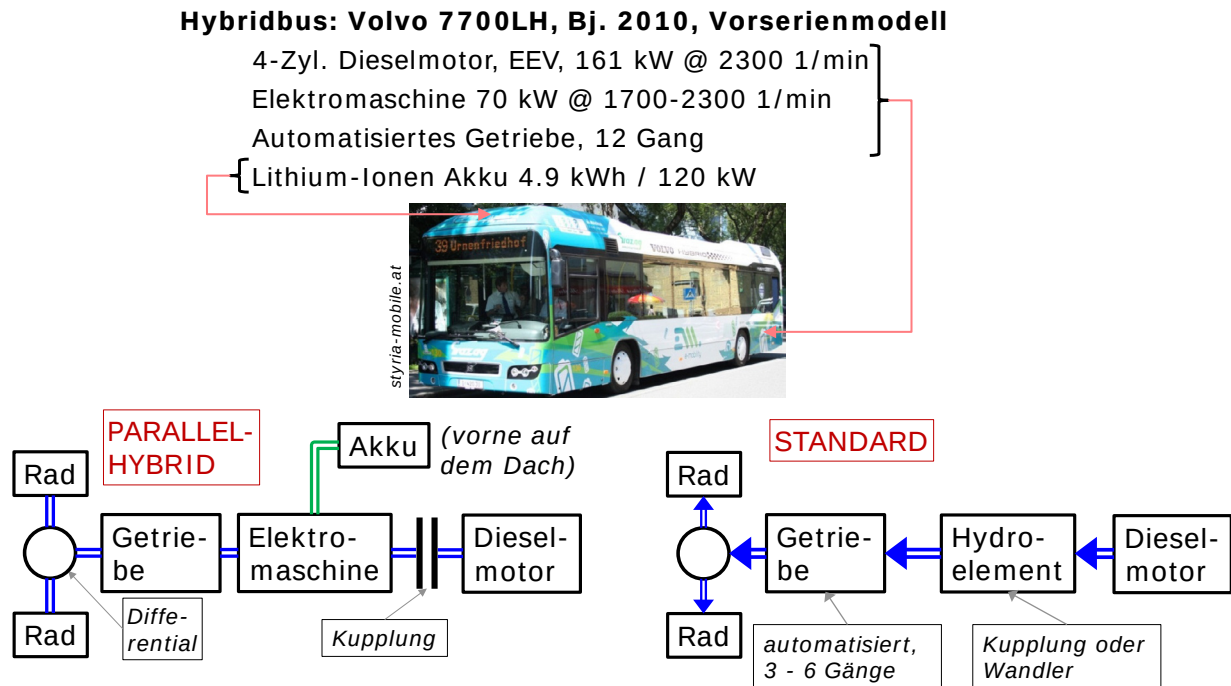


Abbildung 1: Hybridbus und Antriebsstrangstruktur von Parallelhybrid- und Standardbus

Die untersuchten Hybridfahrzeuge, ein Stadtbus und ein Pkw, hatten beide einen Antriebsstrang in paralleler Konfiguration. Das heißt, zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe sitzt die Elektromaschine auf der Getriebeeingangswelle, welche über eine Leistungselektronik mit dem Akku verbunden ist. Die Elektromaschine kann sowohl als Motor betrieben werden (Abgabe mechanischer Leistung à Vortrieb) oder als Generator (Aufnahme mechanischer Leistung à Bremsen), was ein typisches Merkmal von Elektromaschinen ist. Eine genaue Beschreibung der möglichen Betriebsmodi des parallelen Hybridantriebs ist in den Schulungsunterlagen gegeben. Zum Verständnis der Ergebnisse ist die Kenntnis dieser vier Betriebsarten wichtig:

- Anfahren mit Elektromaschine und Verbrennungsmotor
 - o Beide Maschinen treiben das Fahrzeug an. Dies ist bei Anfahren mit Vollgas der Fall.
- Anfahren nur mit Elektromaschine
 - o Der Verbrennungsmotor ist ausgekuppelt (und im Spezialfall des getesteten Hybridbusses im Leerlauf, sonst meist abgestellt), das Fahrzeug wird nur von der Elektromaschine angetrieben. Z. B. beim Volvo Bus wird dies nur beim Batterieladestand $\geq 41\%$, bis 17 km/h und zurückhaltendem Gas geben erreicht.
- Anfahren nur mit Verbrennungsmotor
 - o Der Verbrennungsmotor treibt die Antriebsachse an, der Elektromotor dreht ohne Moment mit. Beim getesteten Hybridbus war dieser Modus nicht vorgesehen (außer bei zu niederem Batterieladezustand).

- Bremsen nur mit Elektromaschine
 - o Der Fahrer betätigt das Bremspedal nur über geringen Pedalweg. Die Bremsleistung, welche sich aus der angeforderten Verzögerung ergibt, ist kleiner/gleich der maximalen Generatorleistung der Elektromaschine, und es wird nur mit dieser gebremst. Die freiwerdende Bewegungsenergie des Fahrzeugs kann abzüglich der Wandlungsverluste in die Batterie eingespeist werden.
- Bremsen mit Elektromaschine und Betriebsbremse
 - o Tritt der Fahrer stark auf das Bremspedal, wird gleichzeitig mit Elektromaschine und Betriebsbremse verzögert. Der Teil der Bremsleistung, der nicht von der Elektromaschine rekuperiert wird, geht an den Bremsscheiben in Abwärme an die Umgebung über, was einen Energieverlust darstellt. Dies sollte vermieden werden, wenn die Verkehrssituation es zulässt.

Diese Unterscheidung der Betriebsarten gilt für den Hybridbus wie für den Hybrid-Pkw gleichermaßen. Eine Besonderheit ist der ebenfalls untersuchte Stadtbus EURO VI, ein neuer Mercedes Benz Citaro. Dieser ist bereits ein Microhybrid und mit einem optionalen Superkondensator als Rekuperationsmodul ausgestattet. Bei Bremsvorgängen werden die 3 Lichtmaschinen des Busses voll zugeschaltet und speisen im Generatorbetrieb knapp 13 kW_{el} für ca. 7 s in den Kondensator ein.

3.1 Eco-Drive: Stand der Technik

Für konventionelle Fahrzeuge, d. h. solche ohne Hybrid-Antriebsstrang, sind seit langem Maßnahmen bekannt, um durch eine angepasste Fahrweise den Kraftstoffverbrauch zu verringern (Wengraf, 2012-08 p. vi) (<http://ecodrive.org>). Die wichtigsten werden im Folgenden aufgelistet:

1. Direkt nach dem Start des Motors losfahren und diesen nicht im Stand warmlaufen lassen
2. Sanfter Fahrstil ohne starke Beschleunigung, weil hierbei der Verbrauch besonders hoch ist
3. Fahrzeug bevorzugt bei konstanter Geschwindigkeit bewegen
4. Vorausschauende Fahrweise, z. B. bei Anfahrt auf eine rote Ampel Ausrollen statt aktiv Bremsen
5. Wenn möglich, eingekuppelt mit dem geschleppten Motor bremsen, weil dann kein Kraftstoff gefördert wird.
6. Frühes Hochschalten bei niedrigen Drehzahlen
7. Klimaanlage und elektrische Zusatzverbraucher wenig benutzen
8. Motor bei Stillstand abstellen
9. Fenster bei hohen Geschwindigkeiten geschlossen halten, um den Luftwiderstand nicht unnötig zu erhöhen

Zu Punkt 2. Ist anzumerken, dass es richtig wäre, eine Gaspedalstellung von ca. 75% beim Beschleunigen anzustreben, da dann der Verbrennungsmotor in einem günstigen Wirkungsgrad betrieben wird. Dann wird zwar mit höherer Leistung und damit höherem Verbrauch beschleunigt, aber dafür viel kürzer. Es sollten allerdings „unnötige“ Beschleunigungen vermieden werden, also speziell solche, die kurz danach wieder starkes Bremsen erforderlich machen.

Zu 8. Ist anzumerken, dass häufiges Motorabstellen ohne Start/Stop Automatik Batterie und Starter stark verschleißt, und daher nur bei absehbar langen Stehzeiten ein Motorabstellen sinnvoll ist.

Weitere Sparmöglichkeiten gibt es bereits vor Fahrtantritt:

- § Prüfen, ob der Fahrzeugbetrieb überhaupt notwendig ist und man nicht andere Verkehrsmittel benutzen könnte, wenn Zeit- und Streckenplan dies zulassen
- § Kurzstreckenfahrten vermeiden, weil bei kaltem Motor Verbrauch und Verschleiß höher sind.
- § Leichtlauföle verwenden und Ölstand regelmäßig kontrollieren
- § Reifendruck regelmäßig prüfen
- § Das Fahrzeuggewicht nicht mit Anbauteilen oder Zuladung unnötig erhöhen
- § Auf äußere Anbauteile wie Dachgepäckträger etc. nach Möglichkeit verzichten, um den Luftwiderstand nicht unnötig zu erhöhen.

Mit Ausnahme der Bremsweise gelten diese Regeln auch für Hybridfahrzeuge, wobei Schaltmanöver und Leerlaufabschaltung meistens automatisiert sind. Hersteller von Hybridautos wie VW oder Toyota weisen für diesen Fahrzeugtyp bereits auf die Besonderheit der vorausschauenden Nutzbremmung mit geringem Bremspedalweg hin (VW, 2012-12 pp. 204-205) (Kmiecik, 2013-02).

Je nach Wissen, Können und Motivation werden diese Maßnahmen bereits von den Fahrern angewendet, zusätzlich können Kurse gebucht werden ^{1) 2) 3)}.

Was die Motivation zum Eco-Drive angeht, so ist diese hauptsächlich finanzieller Natur. Lee et al. (Lee, 2010-04 p. 4257) haben bei einer Online-Umfrage unter südkoreanischen Fahrern des Kia Soul Folgendes herausgefunden: 64 % möchten die serienmäßige Eco-Signallampe (grün - gut, weiß - mittel, rot - schlecht) zur Einsparung von Kraftstoffkosten verwenden. Andere Gründe wie Fahrsicherheit (20 %) oder Umweltschutz (4 %) waren weiter hinten gereiht. Auch wenn diese Umfrage mit 60 Teilnehmern nicht repräsentativ ist, gibt sie doch einen Hinweis auf die Beweggründe zum Eco-Drive. Ebenfalls kann von einem erhöhten Umweltbewusstsein in europäischen Staaten ausgegangen werden. Bei Flottenbetreibern mit angestellten Fahrern ist der finanzielle Druck zur Kraftstoffeinsparung ebenfalls der Hauptgrund, eine sparsame Fahrweise zu schulen.

¹⁾ http://www.ecodrive.org/download/list_of_trainers/list_of_ecowill_trainers_austria.pdf

²⁾ <http://www.ecodrive.ch>

³⁾ <http://www.eco-drive-school.co.uk>

Bei allen Fahrern wird dieser Druck in Zukunft größer, für die Entwicklung der Kraftstoffpreise siehe Abbildung 2.

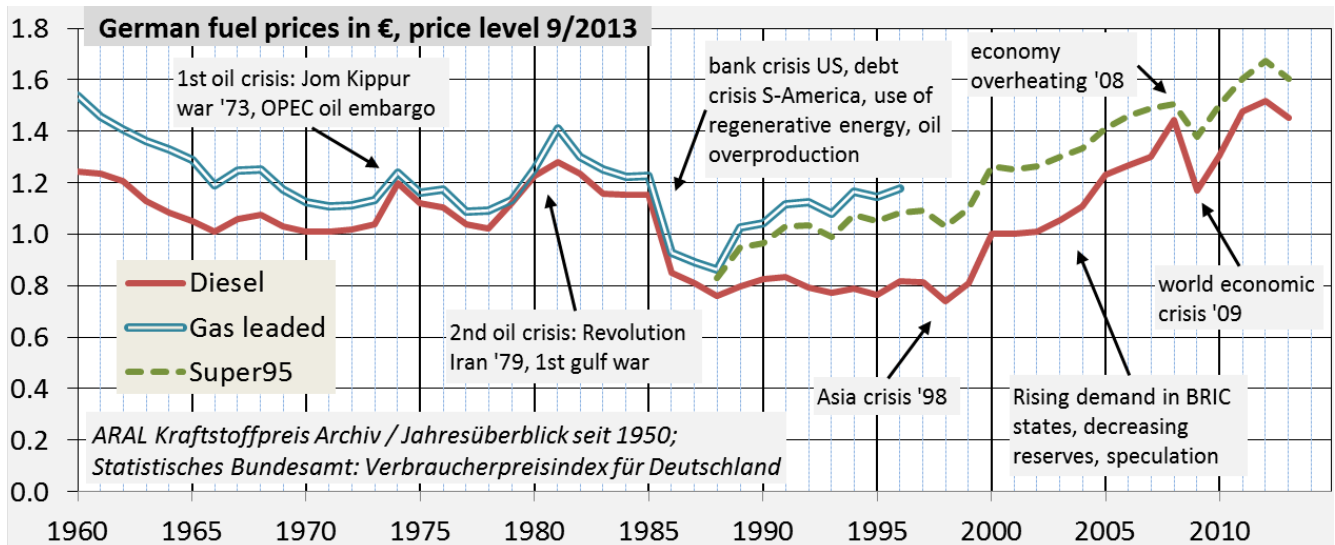


Abbildung 2: Verlauf der inflationsbereinigten Kraftstoffpreise in Deutschland seit 1960, Preisniveau 09/2013

Auch wenn die Rohöl- und damit Kraftstoffpreise stark von politischen und wirtschaftlichen Ereignissen beeinflusst werden können, ist es wahrscheinlich, dass sie in Zukunft weiter ansteigen werden. Dies wird durch die zunehmende Energieverbrauch in den Schwellenländern und das Aufbrauchen der konventionellen Erdöl-Lagerstätten verursacht.

Die Wirksamkeit der oben beschriebenen Maßnahmen für eine kraftstoffsparende Fahrweise wurde bereits häufig untersucht und bestätigt. Wengraf hat 25 Eco-Drive Studien aus den Jahren 1985 bis 2011 ausgewertet (Wengraf, 2012-08 p. 16/17). Im Mittel über alle Studienergebnisse wurden bei der Sparfahrt mit konventionellen Fahrzeugen ca. 12 % Kraftstoff im Vergleich zur Normalfahrt eingespart, bei einer Bandbreite von 3 % Mehrverbrauch bis ca. 40 % Minderverbrauch.

Das Resultat der Untersuchung von Baric et al. mit einem MAN 10 t Lkw auf einer 26 km langen Route in und um Zagreb ist, dass die Fahrer auch 3 Monate nach der Eco-Drive Schulung noch 32 % weniger Kraftstoff verbrauchen als vorher (Baric, 2013-05). Diese Einsparung ist vergleichsweise sehr hoch, lässt sich aber erreichen, wenn die "Normalfahrten" schnell und aggressiv sowie die Sparfahrten äußerst passiv vonstattengehen. Als Vergleichswert: Bei der Messung eines Honda Civic auf dem Pkw Rollenprüfstand des IVT wurde in einem passiven Zyklus eine Einsparung von 27 % gegenüber einer aggressiven Fahrt gemessen, siehe Abbildung 3. Gegenüber einem gemäßigten, normalen Fahrstil waren es nur noch 11 %.

Bezüglich des Eco-Drive bei Linienbussen wurden Vergleichsmessungen in Athen und einer schwedischen Großstadt durchgeführt (Zarkadoula, 2007-08) (Strömberg, 2013-07). Die erzielten Einsparungen waren mit 4 % und 7 % eher niedrig. Mögliche Ursachen dafür sind, dass die Busse aus Komfortgründen auch bei Normalfahrt im Linienbetrieb eher zurückhaltend betrieben werden, und die Berufskraftfahrer bereits für das Thema Kraftstoffverbrauch sensibilisiert waren.

Bei Hybridautos steht die Kraftstoffeinsparung generell stärker im Vordergrund als bei konventionellen Fahrzeugen, schließlich muss der Aufpreis gerechtfertigt werden.

Bereits Campbell et al. erarbeiten Anfang der 1960er Jahre heute noch gültige Simulationsergebnisse (Campbell, 1962-03 pp. 5, Fig. 5). Beim Modell eines 1.6 t schweren Pkw auf einem Stadtzyklus können unter Annahme von $(75\%)^2$ Wirkungsgrad eines Nutzbremssystems (Gebremste Räder $\rightarrow$ Wandlungsverluste $\rightarrow$ Speicher $\rightarrow$ Wandlungsverluste $\rightarrow$ angetriebene Räder) ca. 11 % der Antriebsarbeit eingespart werden. Dazu sei angemerkt, dass dieser Wert stark vom Fahrzyklus abhängig ist: Bei einem gleichmäßigen Überlandzyklus ist es weniger, bei einem sehr bremslastigen Innerorts-Zyklus mehr rekuperierbare Bremsarbeit. Für die Arbeit von Campbell wurde ein Rechenprogramm des Data Processing Department der GM Research Laboratories verwendet, welches auf dem IBM 7090 lief, einem Transistorrechner. Dies sind die Anfänge der Längsdynamiksimulation, siehe auch (Louden, 1960-01).

Gao et al. weisen auf die Bedeutung des Verhältnisses der max. Generatorleistung der Elektromaschine zur Gesamt-Bremsleistung hin (Gao, 1999-08 p. 1). Ergibt sich aus der vom Fahrer angeforderten Verzögerung eine Bremsleistung, welche die maximale Generatorleistung überschreitet, werden die Reibungsbremsen an den Rädern zugeschaltet, und Energie geht als Abwärme verloren.

Es gibt bereits erste Untersuchungen zum Einfluss der Fahrweise auf den Verbrauch von Hybridfahrzeugen, z. B. (Mensing, 2012-10) oder (Dib, 2012-09). Bei gegebenen Fahrzyklen und Simulationsmodellen von (Hybrid-) Elektrofahrzeugen wird mittels eines Optimierers der Zyklus innerhalb vorgegebener Grenzen für Beschleunigung und Verzögerung angepasst. Das Ziel ist die Reduzierung des Energieverbrauchs. Diese Art der Optimierung erfolgt rein virtuell, aber es können Hinweise für die spätere praktische Anwendung gegeben werden. In der Arbeit von Mensing wird das Einsparpotential für elektrische Hybridfahrzeuge durch Eco-Drive mit 10 % angegeben.

Vorarbeiten sind auch für die gekoppelte Simulation von Verkehrsfluss und Einzelfahrzeug für ganze Flotten vorhanden, siehe auch Abschnitt 3.4 für die Vorgehensweise. Hirschmann et al. haben den Einfluss der Schaltung von Verkehrslichtsignalanlagen (VLSA) auf Geschwindigkeitsprofil und Emissionen des Grazer Stadtverkehrs untersucht (Hirschmann, 2009-02). Das Ergebnis der Simulation ist, dass Verbrauch und CO₂ Emissionen der gesamten Flotte bei einer optimierten Verkehrslichtsignalschaltung durch die Vergleichmäßigung der Fahrt und Reduktion von Haltevorgängen um 8 % sinken (Hirschmann, 2009-02 pp. 66, Tab. 15). Eine ähnliche Arbeit haben Barth et al. für eine virtuelle Zubringerstraße mit 10 VLSA und dem Modell eines einzelnen Mittelklassewagens gemacht (Barth, 2011-06). Dort wurde allerdings eine einfache fahrzeugeigene Regelung simuliert, welche die Geschwindigkeit an die Grünphasen der VLSAs anpasst, um die Fahrt zu vergleichmäßigen. Die mögliche Einsparung liegt bei > 10 %.

Die Alterung eines Batteriesystems ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig, die je nach der verwendeten Zellchemie einen mehr oder weniger starken Einfluss zeigen. Neben der kalendarischen Alterung, die durch Lagerungstestversuche auf Zellbasis hinreichend genau abgebildet werden kann, ist die zyklische Alterung wesentlich für das über die Verwendung des Batteriesystems verfügbare Energiefenster und die Leistungsfähigkeit. Für den Einfluss eines Fahrzyklus auf die Alterung des

Systems gibt es verschiedene Ansätze die einen Alterungsfortschritt im Betrieb beschreiben. In der Literatur werden hierzu oft Zyklisierungsdaten mit konstanten Strömen mit unterschiedlichen Ladungsfenstern verwendet (Smith, 2012-06) (Dubarry, 2011-04). Der Vergleich mit realen Fahrzeugdaten ist aufgrund der grundsätzlich unterschiedlichen Datenlage schwierig. Die Umlegung eines nahezu beliebigen Fahrzyklus auf eine Referenzalterung stellt eine Herausforderung für das Batteriemanagement dar.

Neben dem Fahrzyklus haben auch Umgebungsparameter, im Besonderen die Temperatur, einen starken Einfluss auf die Alterung. In (Wood, 2012-05) werden geographische Einflüsse auf die Batteriealterung gezeigt, die aber vor allem mit einer kalendarischen Alterung korrelieren. Einfluss von Temperatur und mittlerem Ladungszustand werden in (Marano, 2009-09) untersucht.

Die Literatur bietet zu den verschiedenen Verfahren aber keine Ergebnisse mit über einen Zeitraum von mehreren Jahren im Fahrbetrieb aufgenommenen Daten und idealerweise Referenzmessungen zu diesen Daten.

3.2 Messungen an Fahrzeugen

Zur Emissions- und Verbrauchsmessung von (Nutz-) Fahrzeugen stehen am IVT das "Portable Emission Measurement System" (PEMS), eine mobile Kraftstoffmessanlage (KMA), ein Pkw-Zwillingssrollenprüfstand und ein Nutzfahrzeug-Zwillingssrollenprüfstand zur Verfügung. Für dieses Projekt wurden der Volvo Hybridbus 7700LH, ein Mercedes Benz Citaro EURO III Standardbus und ein VW Jetta Hybrid-Pkw mit dem PEMS gemessen, sowie ein Mercedes Benz Citaro EURO VI Standardbus auf der Nutzfahrzeugrolle.

3.2.1 Rollenprüfstandmessung am Mildhybrid- und Standard-Pkw

Am Anfang des Projektes wurden mit einem Mildhybrid-Pkw (Honda Insight) und einem konventionellen Pkw (Honda Civic) Messungen von verschiedenen Fahrstilen auf dem Pkw-Rollenprüfstand des IVT (IVT1, 2013-04) durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen und Simulationen sind auch in einer Diplomarbeit beschrieben (Glauninger, 2011-02). Die Fahrzeugdaten sind im Abschnitt 7.1 gegeben. Es wurden Teilzyklen von Straßenfahrten bei unterschiedlichen Fahrweisen und der NEFZ gemessen.

Die Teilzyklen waren repräsentative Abschnitte aus Straßenmessungen auf einer 6 km langen Innenstadttrunde in Graz, siehe auch Abbildung 13. Diese war im März und April 2010 mit einem Opel Zafira (1.54 t, 110 kW Dieselmotor) als konventionellem Pkw und einem Toyota Prius 3 Vollhybrid (1.42 t, 73 kW Ottomotor, 60 kW Elektromaschine) von drei Fahrern in drei verschiedenen Fahrstilen abgefahren und mit GPS gemessen worden. Die Fahrstile waren:

- § Aggressiv Die Fahrer sollten möglichst schnell sein. Beim Hybrid wurde der Power-Modus gewählt
- § Normal Es sollte der eigene, normale Fahrstil angewendet werden
- § Öko Ziel war ein möglichst geringer Kraftstoffverbrauch, z. B. mit sehr vorausschauender Fahrweise. Beim Hybrid wurde der Eco-Modus gewählt.

Als Resultat standen 3 • 6 Geschwindigkeitsverläufe, konventionelles Fahrzeug / aggressiv bis Hybridfahrzeug / Öko zur Verfügung. Um diese umfangreiche Datenbasis auf kurze Testzyklen für den

Rollenprüfstand zu reduzieren, wurden im Simulationsprogramm PHEM, siehe Kapitel 3.3.1, mit einem Modell eines durchschnittlichen EURO 4 Diesel-Pkw die Emissionen und bestimmte Fahrdynamik-Parameter gerechnet. Aus diesen Daten wurden mit einem statistischen Verfahren (Glauning, 2011-02 p. 37) (Zallinger, 2010-03 pp. 66-67) sechs Teilzyklen für jede Kombination Fahrzeug / Fahrstil ermittelt. Die Zyklen repräsentierten in Bezug auf diese Beurteilungsgrößen (Auszug)

§ mittlere Motorleistung, mittlere Motordrehzahl, Emissionen, mittlere/maximale

Beschleunigung/Verzögerung, mittlere/maximale Geschwindigkeit, Fahrdynamik-Parameter

die 3 Messungen einer Kombination Fahrzeug / Fahrstil am besten.

Die so ermittelten Rollenzyklen hatten alle eine Dauer von 8 min und eine durchschnittliche Strecke von 2.5 km, mit einer Bandbreite von 2.3 bis 3.1 km.

Die Ergebnisse der Rollenprüfstandmessungen von Honda Insight und Civic sind in Abbildung 3 zu sehen.

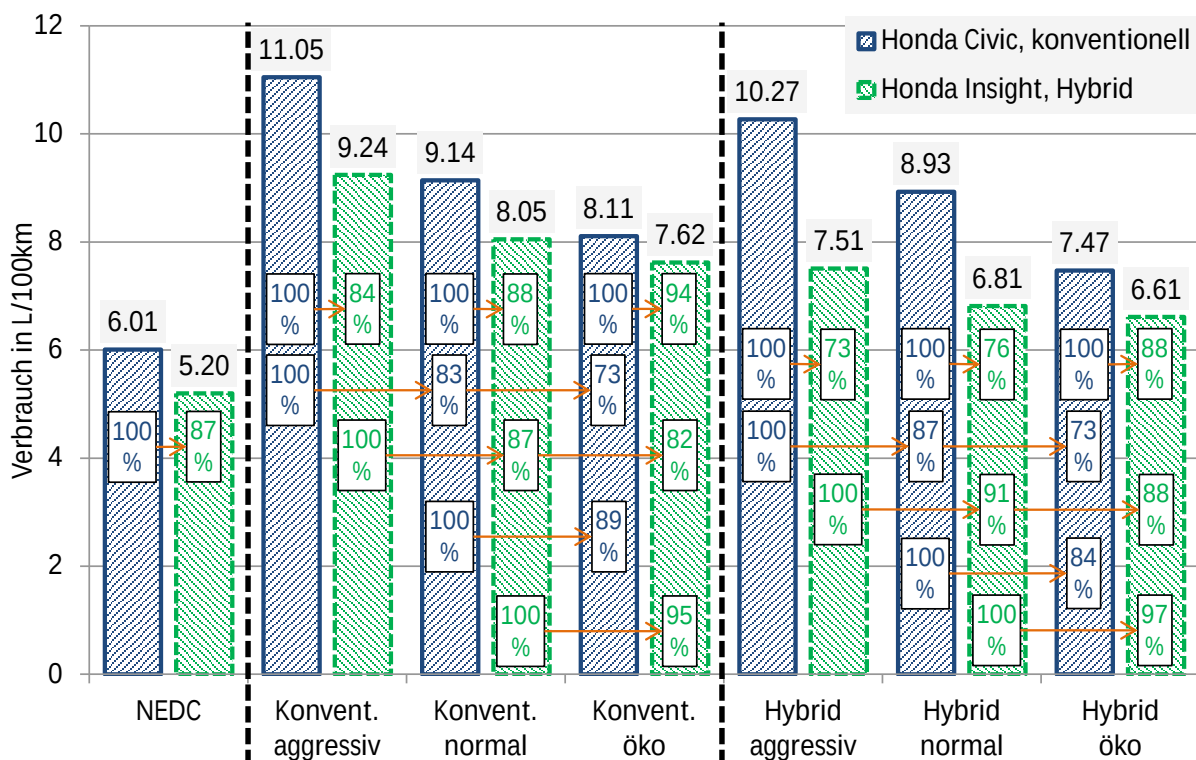


Abbildung 3: Ergebnisse für die Verbrauchsmessung von Honda Civic und Insight. Zyklen basierend auf Straßenmessung mit konventionellem und Hybrid-Fahrzeug (in Anlehnung an (Glauning, 2011-02 p. 50))

Als erstes fällt der große Einfluss des Fahrstils auf den Verbrauch beim konventionellen- und beim Hybridfahrzeug auf. Beim Civic variiert dieser auf den Straßenzyklen von 7.5 bis 11.1 L/100km, beim Insight Hybrid von 6.6 bis 9.2 L/100km. Bemerkenswert ist ebenfalls, dass der Fahrstil mit einem Hybridauto (rechter Block im Diagramm) insgesamt zurückhaltender als mit einem Standardwagen (mittlerer Block) ist, die Verbräuche sind hier alle niedriger.

Was bei den Ergebnissen überrascht, ist die Tatsache, dass der Hybrid im extra-sparsamen Ökofahrstil nur 3 bis 5 % weniger verbraucht als bei Normalfahrt, das konventionelle Fahrzeug hingegen 11 bis 16 % einspart. Dies lässt sich damit erklären, dass beim Hybridfahrzeug Bremsenergie rekuperiert werden kann, während diese beim konventionellen Kfz in den Bremsen in Wärme umgewandelt wird und

somit verloren ist. Da ein wesentlicher Verbrauchsvorteil von EcoDrive aus dem Vermeiden von Bremsverlusten stammt, ist das Ergebnis an sich logisch (siehe auch die Analysen im nachfolgenden Absatz). Allerdings zeigten die späteren Messfahrten, dass beim „normalen“ Fahren durchaus die maximal rekuperierbare Bremsleistung öfter überschritten werden kann (je nach Kfz unterschiedlich). Bei den ersten Messfahrten waren diese erst später ausgearbeiteten Effekte allerdings noch nicht explizit bekannt, die maximale Bremsleistung war kein analysierter Parameter in der Zyklenwahl, so dass die Ergebnisse eventuell nicht den realen Mittelwerten entsprachen.

Zum besseren Verständnis des Hybridautos wurde die Längsdynamikrechnung eines 1.3 t schweren, durchschnittlichen Mittelklasse-Pkw auf den gekürzten Rollenzyklen vorgenommen. Fahrzeugmasse und Fahrwiderstände entsprachen in guter Näherung dem Honda Insight. Für den Verlauf der Bremsleistung auf den Hybridauto-Zyklen siehe Abbildung 4.

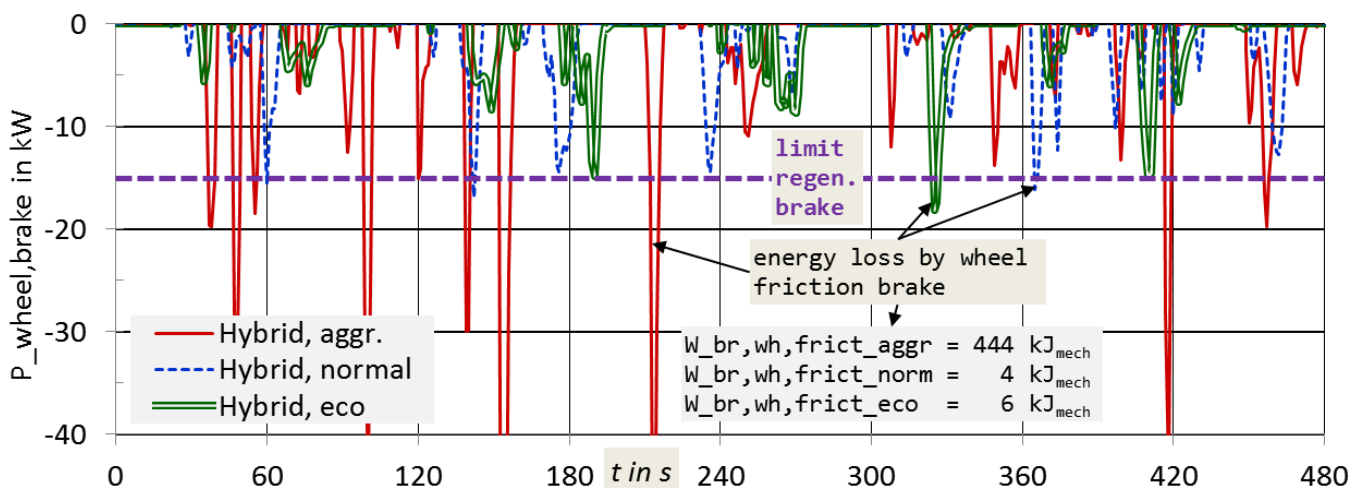


Abbildung 4: Bremsleistung Rad, Modell eines 1.3 t Mittelklasse Pkw auf den gekürzten Hybridauto-Rollenzyklen

Mit der Annahme eines Antriebsstrangwirkungsgrades von 90 % können beim Insight ca. $-15 \text{ kW}_{\text{mech}}$ an den Rädern rekuperiert werden. Die Bremsarbeit, die unter diesem Wert liegt, ist für die Rückgewinnung verloren und wird über die Reibungsbremsen hauptsächlich in Abwärme umgewandelt. Man sieht deutlich, dass es zwischen dem normalen und Öko-Zyklus fast keinen Unterschied in der verlorenen Bremsarbeit gibt. Die positive Antriebsarbeit des normalen zum Öko-Zyklus verhält sich 942 zu $811 \text{ kJ}_{\text{mech}}$. Das heißt, die Verbrauchseinsparung von 3 % des Insight im Öko-Zyklus gegenüber der Normalfahrt beruht nur auf dem generell sanfteren Fahren.

Bei den Zyklen, die aus den Straßenfahrten mit dem konventionellen Auto resultierten, war der Unterschied in der verlorenen Bremsarbeit vom normalen zum Öko-Zyklus 74 zu $26 \text{ kJ}_{\text{mech}}$, und in der Antriebsarbeit 1063 zu $855 \text{ kJ}_{\text{mech}}$. Im Vergleich zum Verbrauchsunterschied normal/Öko bei den Hybridfahrten würde dies eine größere Einsparung der Ökofahrt als die gemessenen 5 % erwarten lassen.

Einen Beitrag zu diesem Ergebnis leisten die Unterschiede im Hybridsystem des Toyota Prius 3, mit dem die Zyklen auf der Straße aufgenommen wurden, und dem Honda Insight, mit dem auf der Rolle gemessen wurde. Der Prius ist ein Vollhybrid mit leistungsverzweigtem Hybridsystem, 60 kW Elektromaschine und einer 1.31 kWh Batterie (NiMH, 202 V) (Gray, 2013-01 p. 1), der Insight hat als

paralleler Mildhybrid eine 10 kW Elektromaschine und eine 0.58 kWh Batterie (NiMH, 101 V) (Honda2, 2013-10). Des Weiteren kann der Prius elektrisch fahren, der Insight nur mit der Elektromaschine den Verbrennungsmotor beim Anfahren unterstützen ("Boosten").

Beide Hybridsysteme haben eine komplett unterschiedliche Regelung, die großen Einfluss auf den Verbrauch hat. Unter anderem wird davon das Batterieladen-/entladen und der Generatorbetrieb der Elektromaschine mit dem Verbrennungsmotor als Antrieb bestimmt. Es besteht die Möglichkeit, dass mit dem Insight entweder bei der Normalfahrt die Batterie für den Antrieb entladen wurde, was den Verbrauch absenkt, oder sie bei der Ökofahrt mit dem Ottomotor als Generatorantrieb aufgeladen wurde, was den Verbrauch erhöht. Welcher Zustand beim Insight während der Rollenmessungen auftrat, wurde bei diesen ersten Tests nicht gemessen.

è Die Messungen eines konventionellen und eines hybridisierten Mittelklasse-Pkw auf dem Rollenprüfstand bei unterschiedlichen Fahrstilen haben ergeben, dass die Fahrweise einen großen Einfluss auf den Verbrauch bei beiden Fahrzeugtypen hat. Die nachträgliche Untersuchung der Bremsleistung des Hybridfahrzeuges hat gezeigt, dass es wichtig für den Verbrauch ist, ob diese ganz oder nur teilweise kleiner/gleich der maximalen Generatorleistung der Elektromaschine ist. Ebenfalls hat die Betriebsstrategie des Hybridsystems einen entscheidenden Einfluss auf den Verbrauch. Am Anfang und Ende der Messung muss der Ladezustand der Batterie gleich sein, damit der Kraftstoffverbrauch vergleichbar ist.

3.2.2 Mobile Emissionsmessung am Vollhybrid-Stadtbus und konventionellen Stadtbus

Der Hybridbus und ein Standardbus wurden im Februar 2012 mit passivem und aggressivem Fahrstil im Straßenverkehr auf der Grazer Linie 31 vermessen, welche 20 km lang ist. Diese verläuft von der Wirtschaftskammer über Jakominiplatz, Don Bosco, Wetzelsdorf, Straßgang bis Webling und zurück und ist eine Kombination aus Innenstadt- und Vorortverkehr. Gemessen wurde mit dem PEMS (IVT2, 2013-05) (Merkisz, 2011-02) (Sensors, 2012-07). Bei diesem Messsystem wird die Abgas-Strömungsgeschwindigkeit mittels Blende und Differenzdrucksensor ermittelt sowie ein Teilstrom entnommen und bezüglich der stofflichen Zusammensetzung analysiert. Es wurden die Emissionen Kohlendioxid (CO₂), Stickoxid (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) ausgewertet. Über die Kohlenstoffbilanz und mit der Annahme idealer Verbrennung kann mittels Kohlenstoffbilanz aus den CO₂-, CO- und HC-Emissionen auf den Verbrauch zurückgerechnet werden: 1 kg-CO₂/km entspricht (bei üblicherweise sehr niederen CO- und HC-Emissionen) etwa 38.2 L-Diesel/100km oder 44.4 L-Benzin/100km. Der Messaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: PEMS Abgasstrecke (l.), Abgas-Analysegeräte (m.), Ballast (r.) (Blassnegger, 2012-11)

Zwei Lehrfahrer der HGL wurden gebeten, die Strecke sowohl im aggressiven Fahrstil möglichst schnell als auch sparsam/passiv abzufahren. Die Ergebnisse für CO₂ und die streckenbezogene Rolldauer (t_{v>0}, ohne Standphasen) sind in Abbildung 6 gezeigt.

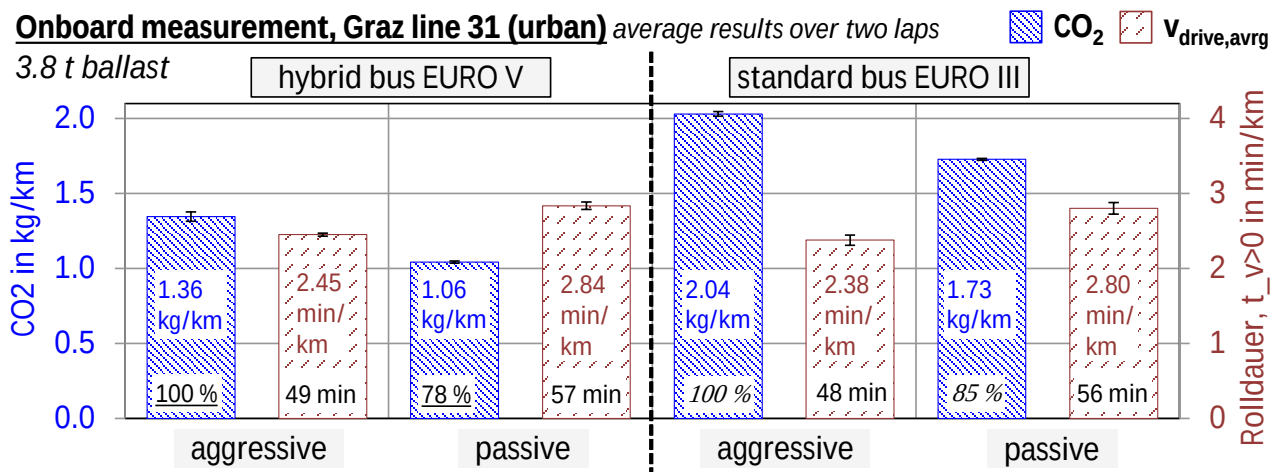


Abbildung 6: Busmessungen auf Linie 31 (1 kg-CO₂/km ≈ 38.2 L-Diesel/km) (Blassnegger, 2012-11)

Bei dieser Messung konnten mit dem Hybridbus bei passiver Fahrweise 22 % Diesel eingespart werden. Allerdings verlängerte sich die Rolldauer für einen Umlauf auf der 20 km langen Strecke von 49 auf 57 min., was für den Linienbetrieb nicht akzeptabel ist. Auf das Thema Geschwindigkeit und Fahrplan wird im Kapitel 3.7 näher eingegangen. Beim Standardbus werden im passiven Fahrstil 15 % Kraftstoff eingespart, der Zeitaufschlag ist mit 8 min. gleich wie beim Hybridbus. Es fällt auf, dass der Standardbus je nach Fahrweise 50 bis 66 % mehr verbraucht als der Hybridbus. Die Erklärung ist das Alter des gemessenen Mercedes Benz Citaro: Mit EURO III und einem Baujahr Anfang der 2000er war er knapp 10 Jahre älter als der Volvo 7700LH, Bj. 2010. Dieser erfüllte bereits die Abgasnorm EEV ("Enhanced Environmentally friendly Vehicle"), ein Zwischenschritt von EURO V zu EURO VI. Moderne Standardbusse verbrauchen wesentlich weniger, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ist.

Ebenfalls im Feb. 2012 wurde auf der Magna-Teststrecke in Graz-Thondorf ein künstlicher Buszyklus mit dem Hybridbus gemessen, bestehend aus Beschleunigen bis 40 km/h, kurzer Konstantfahrt und Stand über 20 Sekunden, siehe Abbildung 7.

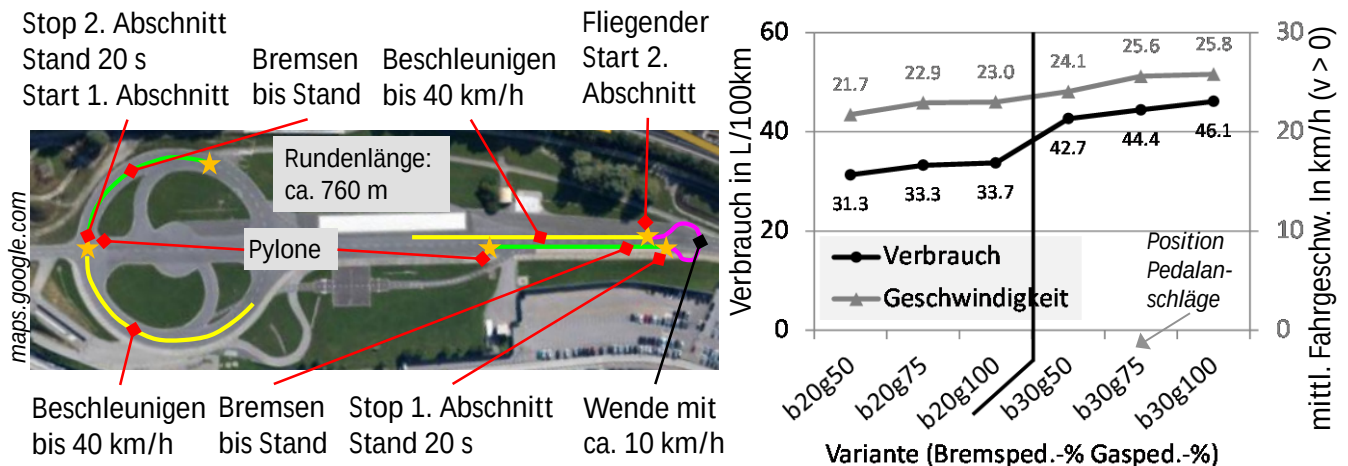


Abbildung 7: Teststreckenmessungen Hybridbus (Kies, 2013-02)

Die maximalen Pedalwege von Gas und Bremse wurden mit mechanischen Anschlägen fixiert. Das Ergebnis ist, dass der Bremspedalweg einen wesentlichen größeren Einfluss auf das Einsparpotential hat als der Gaspedalweg. Herstellerseitig wurde am Bremspedal bei 20 % Betätigung ein leichter Widerstand verbaut, den man spürt, aber übertreten kann. Bis dahin wird rein elektrisch gebremst, also die Bremsleistung voll rekuperiert. Darüber werden die mechanischen Radbremsen zugeschaltet.

Im März 2013 wurden 5 neue Busfahrer der HGL im Eco-Drive geschult. Die Schulung wird in Abschnitt 3.8.1 beschrieben, die Schulungsunterlagen sind als separate Broschüre gestaltet (Kies, 2013-07). Vor und nach der Unterweisung wurde eine ca. 11 km lange Testrunde im Grazer Westen gefahren. Bei ersten Mal sollten die Fahrer ihren eigenen Fahrstil anwenden, beim zweiten Mal möglichst viel von dem Gelernten umsetzen. Der Hauptunterschied beim EcoDrive war, dass die Fahrer bewusst und sehr weit vorausschauend die Nutzbremse betätigt haben. Ein zurückhaltendes Gasgeben war aufgrund des Zeitdruckes im nachgestellten Linienbetrieb nicht möglich.

Von der gefahrenen Teststrecke wurden nur die ersten 8.3 km ausgewertet. Der Grund ist, dass die letzten 2.5 km die Rückfahrt zur Busgarage waren und keine Haltestellen mehr angefahren wurden. Außerdem brauchte es aus technischen Gründen für die spätere Vergleichsmessung eines Microhybrid Stadtbusses auf dem Nfz-Rollenprüfstand des IVT einen max. 30 min langen Zyklus. Die Fahrstrecke ist in Abbildung 8 gezeigt.

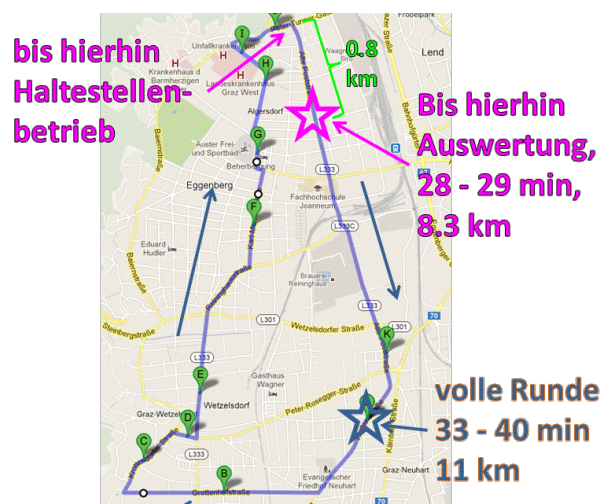


Abbildung 8: Teststrecke für die Schulungsfahrten im Grazer Westen

Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 9 gezeigt.

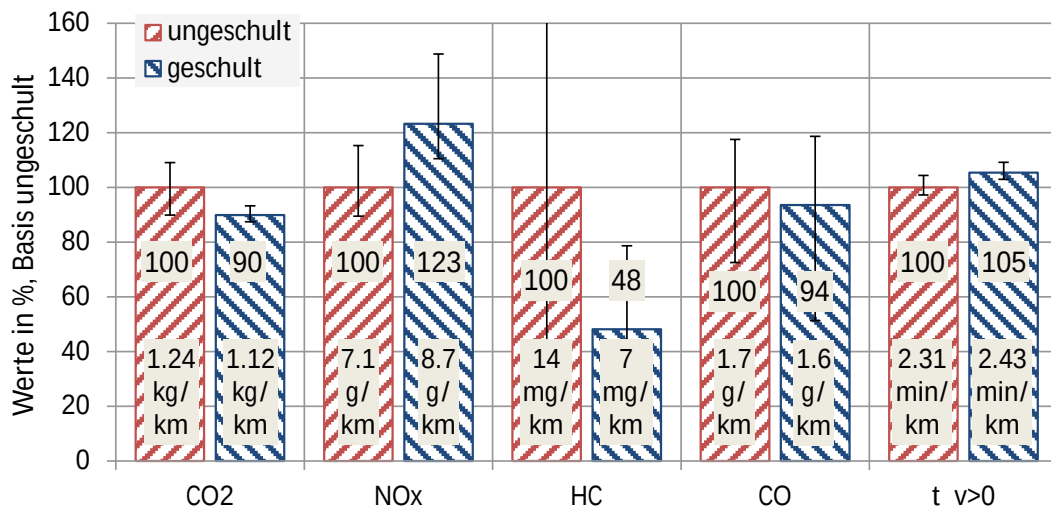


Abbildung 9: Messergebnisse Hybridbus vor/nach Schulung (Zuladung 0.7 t)
 1 kg-CO₂/km $\approx$ 38.2 L-Diesel/100km

Der Vorher/Nachher - Vergleich der Mittelwerte der 5 Fahrer ergibt, dass mit der EcoDrive Schulung 10 % Kraftstoff eingespart wurden.

Der Grund für die höheren NO_x Emissionen beim Eco-Drive ist, dass der SCR Katalysator eine niedrigere Temperatur und damit einen geringeren Entstickungsgrad als bei Normalfahrt hatte. Während der Nutzbremmung wird der Dieselmotor abgekuppelt und ist bei diesem Bus im Leerlauf, siehe Abbildung 10.

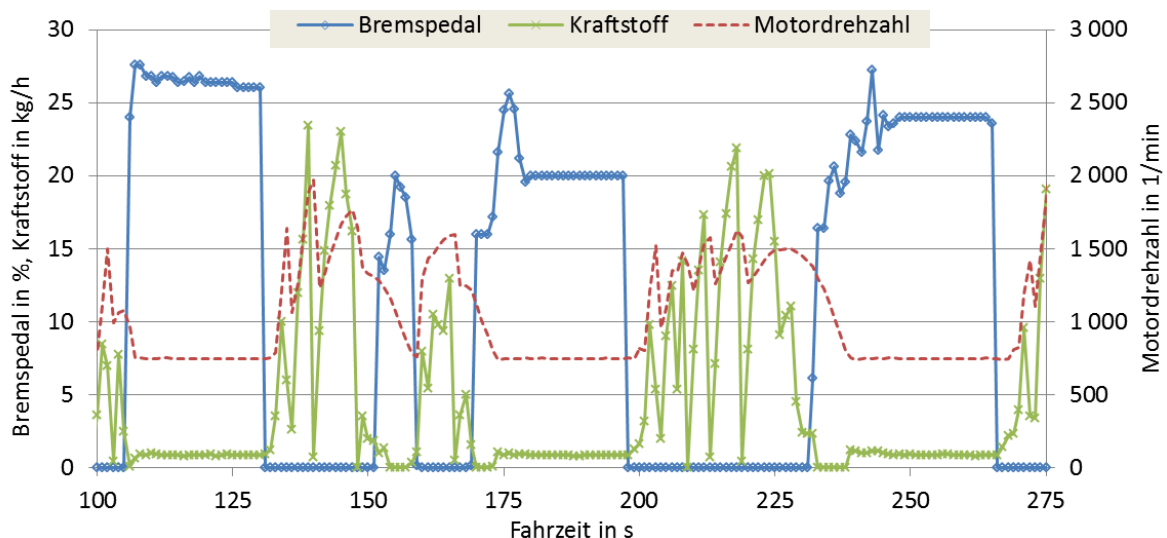


Abbildung 10: Betrieb des Dieselmotors während der Fahrt, konstante Leerlaufdrehzahl bei Nutzbremmung

Das Motorabgas im Leerlauf hat eine niedrigere Temperatur als im Fahrbetrieb. Bei der Schulung traten Nutzbremmung und damit Leerlauf öfter auf, die gemittelte Abgastemperatur lag mit ca. 200 °C um 15 °C unter dem Wert im ungeschulten Fall, siehe Abbildung 11. Bei den meisten Hybridfahrzeugen wird allerdings der Verbrennungsmotor im Schubbetrieb abgekuppelt und abgestellt, womit kein Abgas durch den Katalysator strömt. Das ist für das Halten der Betriebstemperatur von NO_x-Katalysatoren deutlich vorteilhafter als ein Schubbetrieb bei konventionellen Antrieben. Dass bei EcoDrive bei modernen Dieselmotoren, die auch bei Pkw ab EURO VI meist schon NO_x-Katalysatoren haben, gegenüber

normalem Fahrstil das Risiko steigt, dass der Katalysator unter Betriebstemperatur auskühlt, ist in Zukunft bei Schulungen und auch bei der Entwicklung von Emissions-Typprüfvorschriften zu beachten.

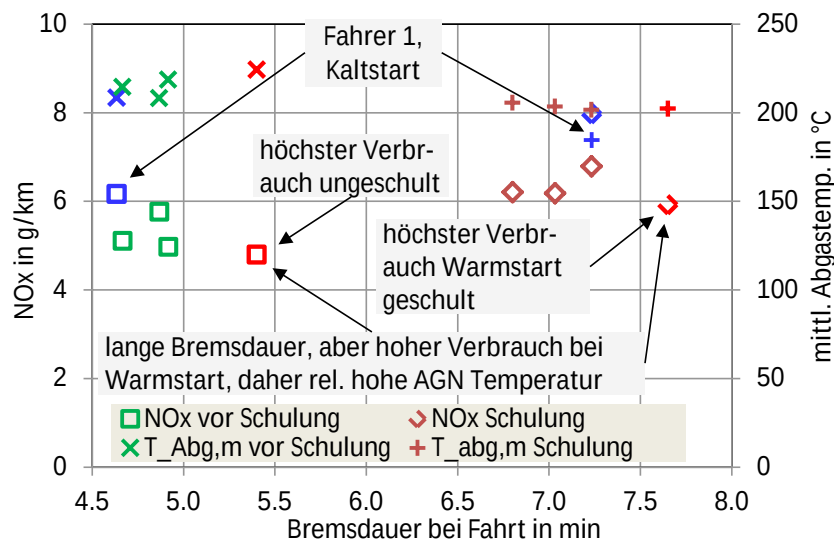


Abbildung 11: Zusammenhang von Bremsdauer, NOx und Abgastemperatur (volle Strecke 11 km)

Bei EURO VI Fahrzeugen ist das gesamte Emissionsniveau wesentlich niedriger als bei EEV/EURO V, vergleiche Abbildung 12 und auch das thermische Management für die SCR-Katalysatoren ist Dank angepasster Typprüftests deutlich verbessert, so dass das NOx-Problem beim Eco-Drive für neue Hybridbusse deutlich gemildert sein sollte.

Sehr wichtig ist auch, dass bei diesem Nutzbrems-EcoDrive die mittlere Zeit, in der das Fahrzeug in Bewegung ist, die Rolldauer ($t_{v>0}$), nur gering ansteigt, siehe Abbildung 9. Bei dieser Größe sind Verkehrseinflüsse auf die Gesamt-Umlaufdauer wie Ampeln oder Stoppschilder herausgerechnet. Alle 10 Fahrten fanden zudem bei ähnlichen Verkehrssituationen statt. Der Unterschied in der mittleren Rolldauer setzt sich also zusammen aus den unterschiedlichen Fahrstilen, eben mit oder ohne Nutzbremsen, und einem geringen verbleibenden Verkehrseinfluss. Umgerechnet auf eine 20 km lange Buslinie verlängert sich die Rolldauer beim EcoDrive um ca. 2.4 min.

è Durch die mobilen Emissionsmessungen am Hybrid- und Standardbus wurde für den Eco-Drive im Vergleich zur zügigen Normalfahrt ein Sparpotential von 9 bis 22 % gezeigt und die Wichtigkeit der sanften Bremsung bei vorausschauender Fahrweise belegt. Damit kann der Großteil der Bremsleistung zurückgewonnen werden. Weil sich durch die vorausschauende Bremsung der Anhalteweg deutlich verlängert und die Fahrtzeit erhöht, kann dies bei Linienbussen aus Fahrplangründen nicht immer konsequent angewendet werden. Daher ist bei der Einführung des EcoDrive unter Einhaltung des Fahrplans mit einer Einsparung von ca. 10 % zu rechnen. Beim untersuchten Hybridbus Volvo 7700LH entspräche dies mit aktuellen Dieselpreisen⁴ ca. 6 ct/km im Stadtverkehr.

Die oft geäußerte Befürchtung, beim EcoDrive den Fahrplan nicht mehr einhalten zu können, ist bei einem sinnvollen Kompromiss aus Einsparpotenzial und Fahrtzeit entschärft. Wenn man bewusstes Nutzbremsen mit zügigem Gasgeben kombiniert, verlängert sich auf einer 20 km langen Strecke die Rolldauer (ohne Standphasen) rechnerisch um 2.4 min.

⁴ Mittlerer Dieselpreis Tankstelle Q1 - Q3 2013: 1.36 €/L, siehe 7.3

3.2.3 Rollenprüfstandmessung am Microhybrid Stadtbus

Die Geschwindigkeitsverläufe des Fahrers Nr. 2 vor und nach Schulung, welcher mit Ausnahme der HC Emissionen repräsentativ für den Durchschnitt fuhr, wurden für den Nfz-Rollenprüfstand (IVT3, 2013-05) auf 30 min gekürzt und mit einem neuen Citaro EURO VI Stadtbus, Bj. 2013, nachgefahren. Dieser hatte bei normaler Fahrweise keinen, und im Eco-Drive nur ca. 9 % Mehrverbrauch im Vergleich zum Hybridbus EEV, Bj. 2010, siehe Abbildung 12.

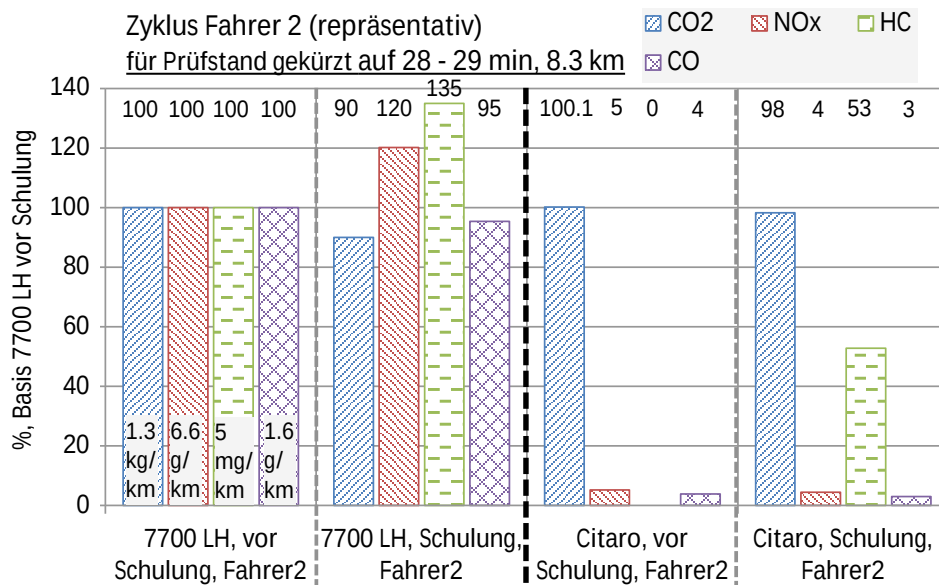


Abbildung 12: links Volvo 7700LH Vollhybrid, Straßenmessung; rechts MB Citaro Microhybrid, Rollenprüfstand⁵
Zuladung 0.7 t; 1 kg-CO₂/km ≈ 38.2 L-Diesel/100km

Der Grund für den geringen Verbrauchsunterschied ist, dass der Citaro eine Modellgeneration neuer als der 7700LH und bereits ein Microhybrid ist: Beim Bremsen werden die drei Lichtmaschinen voll zugeschaltet, welche zusammen knapp 13 kW_{el} rekuperieren und in einen Superkondensator einspeisen. Bei gezieltem Eco-Drive mit voller Nutzbremmung kann der Vollhybrid jedoch den bauartbedingten Vorteil der größeren Generatorleistung von 70 kW_{el} sowie die größere Speicherkapazität seiner Batterie ausspielen und deutlich mehr einsparen. Von den Schadstoffen NO_x, HC und CO emittiert der EURO VI Citaro wesentlich weniger als der EEV 7700LH, es gibt auch keinen großen NO_x-Unterschied mehr zwischen Normalfahrt und Eco-Drive. Die Schadstoffunterschiede sind hier keinesfalls auf die unterschiedlichen Marken zurückzuführen sondern ergeben sich aus dem Unterschied von EEV zu EURO VI.

⁵ Beim direkten Vergleich der Ergebnisse Vollhybrid (l.) und Microhybrid (r.) ist zu beachten, dass die eingesetzten Messsysteme unterschiedlich sind. Der Vollhybrid wurde mit dem PEMS im Strassenbetrieb gemessen, der Microhybrid mit der Emissionsmessanlage auf dem Nfz-Rollenprüfstand. Möglicherweise beeinträchtigt dies die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Jedoch wurden die Messsysteme nicht direkt abgeglichen, so dass dies nicht eindeutig festgestellt werden konnte. Allerdings ist aus PEMS-Messungen unter gleichen Bedingungen für die Wiener Linien 2010/2011 bekannt, dass der Verbrauchsunterschied zwischen Volvo 7700LH und einem anderen sehr sparsamen Standardbus kleiner 2 % ist, was den gezeigten Vergleich bestätigt. Eine weitere Bestätigung ist, dass der neue Citaro gleich viel/wenig wie der MAN Lion's City Hybrid verbraucht, wie die Messungen der dt. Fachzeitschrift lastauto omnibus ergeben haben (Unruh, 2013-07) (Unruh, 2012-09).

Bei den Vergleichsmessungen vom Hybridbus EEV Bj. 2010 mit einem verbrauchsoptimierten neuen Standardbus EURO VI Bj. 2013 wird die bauartbedingte Einsparung im Eco-Drive deutlich. Bei normaler Fahrweise verbraucht der Hybrid nicht weniger, aber im Eco-Drive sind es aufgrund der Nutzbremsung mit der Elektromaschine ca. 8 % Einsparung. Beim EURO VI Standardbus sind die Schadstoffemissionen allerdings deutlich geringer als beim älteren EEV Hybridbus.

3.2.4 Mobile Emissionsmessung am Vollhybrid-Pkw

Das Sparpotential des EcoDrive wurde ebenfalls an einem VW Jetta Hybrid untersucht, für die Fahrzeugdaten siehe Abschnitt 7.1. Der Pkw wurde mit dem PEMS ausgerüstet und von 4 FahrerInnen in Graz auf einer 6 km langen Innenstadttrunde gefahren, siehe Abbildung 13.



Abbildung 13: Abgasentnahme am Jetta und Messrunde in Graz

Für die Einweisung der FahrerInnen vor den Messfahrten wurde Bezug auf die Leistungsanzeige im Armaturenbrett genommen, welche in Abbildung 14 gezeigt wird.



Abbildung 14: Leistungsanzeige links im Armaturenbrett des VW Jetta Hybrid

Das linke Rundinstrument zeigt im blauen Bereich die Antriebsleistung in % und im grünen Bereich die rekuperierte Bremsleistung an. Die untere Grenze des grünen Bereiches zeigt dem Fahrer die Grenze bei 28 kW_{el} Generatorleistung. Wird beim Bremsen dieser Anschlag erreicht oder unterschritten, greifen die Radbremsen ein und es wird Energie verschwendet.

Die FahrerInnen wurden gebeten, 5 verschiedene Fahrstile auszuprobieren und auf die Leistungsanzeige zu achten, falls die Verkehrssituation dies zulässt:

1. Normal. Der individuelle Fahrstil mit einem Pkw im Stadtverkehr.
2. Vollgas / starkes Bremsen. Es sollte stark beschleunigt und spät gebremst werden, um möglichst schnell unterwegs zu sein.
3. 40 % Gasgeben / starkes Bremsen. Beim Gasgeben sollte die Leistungsanzeige bis max. 40 % ausschlagen ("Grenze Anfahren" in Abbildung 14). Das Bremspedal sollte spät und kräftig betätigt werden.
4. Vollgas / Hybridbremsen. Es sollte mit Vollgas angefahren werden, um schnell auf Geschwindigkeit zu kommen. Beim Bremsen sollte die Nadel der Leistungsanzeige höchstens bis zum unteren Rand des grünen Bereiches ausschlagen, jedoch nicht darunter ("Grenze Bremse" in Abbildung 14)
5. 40 % Gasgeben / Hybridbremsen. Es sollte bis 40 % Gas gegeben und bis zum unteren Rand des grünen Bereiches gebremst werden ("Grenze Anfahren" und "Grenze Bremse" in Abbildung 14).

Die Ergebnisse für Verbrauch und Durchschnittsgeschwindigkeit als Mittelwert über die 4 FahrerInnen sind in Abbildung 15 gezeigt.

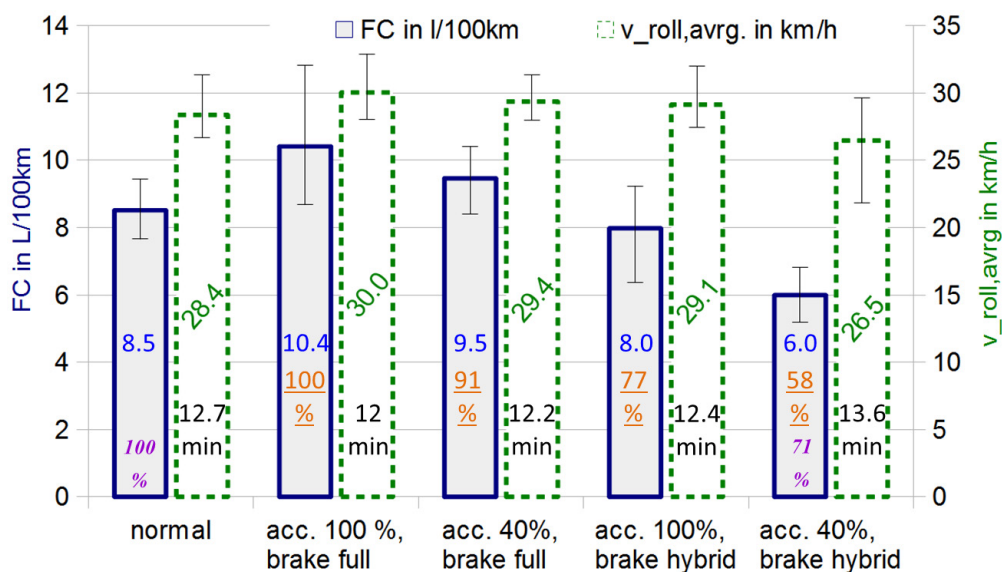


Abbildung 15: Messergebnisse Hybrid Pkw auf Stadtrunde Graz, Mittelwerte 4 FahrerInnen

1 Person + PEMS, $m_{Fzg} = 1.8 \text{ t}$; FC - Verbrauch, $v_{roll,avrg}$ - mittl. Fahrgeschwindigkeit ($v > 0$), acc. - Gaspedal, brake - Bremspedal
Ladebilanz der Batterie nicht ausgeglichen

Bei der Interpretation dieser Messergebnisse ist zu beachten, dass sowohl Verkehrs- als auch Fahrereinflüsse enthalten sind, wie man an der teilweise großen Streuung der Einzelwerte sehen kann. Der Einfluss der maximalen Pedalstellung konnte daher nicht isoliert gemessen werden wie bei den Busfahrten auf der Teststrecke mit fixen Pedalanschlägen, vergleiche Abbildung 7. Trotzdem wird deutlich, dass auch beim Hybrid-Pkw mit der zurückhaltenden Betätigung des Bremspedals ein größerer Spareffekt als mit sachtem Gasgeben erreicht werden kann. Sind die FahrerInnen bewusst sparsam unterwegs, verringert sich der Verbrauch gegenüber der aggressiven Variante (acc.100%; brake full) um ca. 40 % und im Vergleich zur Normalfahrt um ca. 30 %. Interessant ist, dass im Eco-Drive die reine Fahrdauer ohne Standphasen auf der 6 km langen Strecke nur ca. 1 min länger als bei der Normalfahrt

ist. Da Pkw Fahrer im Gegensatz zu Busfahrern keinen festen Fahrplan einhalten müssen, kann eine sparsame Fahrweise ohne Nachteile angewendet werden.

Nach der Messung der Stadtrunde wurden 7 Universitätsmitarbeiter im Eco-Drive geschult und gebeten, je zweimal eine 3.7 km Strecke im Grazer TU-Viertel zu fahren. Bei der ersten Runde sollten sie wie üblich ihren eigenen Fahrstil anwenden, und bei der zweiten Runde darauf achten, beim Beschleunigen nicht mehr als 40 % Antriebsleistung abzurufen und vor allem beim Bremsen nicht den unteren Anschlag auf der Leistungsanzeige zu erreichen, siehe Abbildung 14. Die Ergebnisse als Durchschnittswerte der sieben Fahrer sind in Abbildung 16 dargestellt.

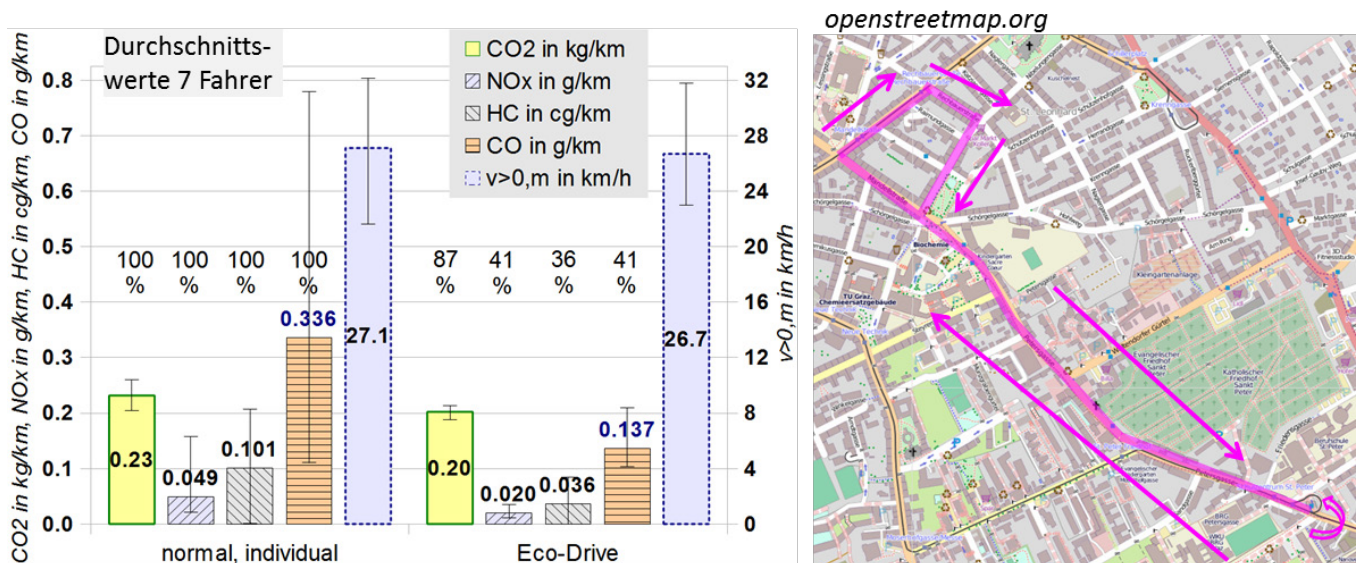


Abbildung 16: Ergebnisse Fahrerschulung Hybrid-Pkw, Testrunde im Grazer TU-Viertel
 7 Personen + PEMS, $m_{Fzg} = 1.9 \text{ t}$, $1 \text{ kg-CO}_2/\text{km} \approx 44.4 \text{ L-Benzin}/100\text{km}$

Bei dieser Fahrt im Eco-Drive Fahrstil wurden durchschnittlich 13 % weniger Kraftstoff verbraucht als bei Normalfahrt. Ebenfalls sank der Ausstoß der gemessenen Schadstoffe NO_x, HC und CO jeweils um ca. 60 %. Der Unterschied in der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit ($v_{Fzg} > 0$) war sehr gering, so dass auf der 3.7 km langen Testrunde die Fahrtdauer im Eco-Drive nur ca. 7 s länger war.

è Auch die Messungen am Hybrid-Pkw haben gezeigt, dass mit einem gezielten Eco-Drive Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch von über 10 % möglich sind. Die Fahrtdauer wird nur geringfügig länger, was im Stadtverkehr mit Pkw keine große Rolle spielt, so dass eine sparsame Fahrweise ohne Nachteile angewendet werden kann. Finanziell bedeutet dies bei aktuellen Benzinpreisen⁶ eine Ersparnis von ca. 2 ct/km im Stadtverkehr.

3.3 Simulation von Fahrzeugen

Zur Berechnung der zu erwartenden Verbrauchseinsparungen durch Hybridfahrzeuge wurden verschiedene Simulationen mit dem institutseigenen Programm PHEM sowohl für konventionelle Standardbusse als auch für Hybridbusse im Linien-Betrieb durchgeführt. Die Simulationen wurden

⁶ Richtpreis Super 95: 1.36 €/L, 08.11.2013

einmal vor Beginn der Messkampagnen durchgeführt, um die Effekte des Fahrstils besser verstehen zu können, und um in der Simulation schon vorab Fahrweisen auszusuchen, die in der Messkampagne untersucht werden sollen. Die Messdaten wurden dann verwendet, um die Modelle genauer zu parametrieren. Vor den Schulungen wurden mit den neu parametrierten Modellen noch einmal verschiedene Fahrstile simuliert, um in der Schulung möglichst nahe zum optimalen Fahrstil zu kommen. Dieser Teil des Kapitels basiert auf einer Veröffentlichung im Rahmen des 13. Internationalen Stuttgarter Symposiums 2013 (Kies, 2013-02). Ebenfalls wurde ein Hybrid-Pkw untersucht.

3.3.1 Simulationsprogramm PHEM

Das Programm PHEM (Passenger Car and Heavy Duty Emission Model) ist ein mikroskaliges Emissionsmodell, welches am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz entwickelt wurde (Hausberger, 2009-12) (Hausberger, 2011-07). Es berechnet für ein vorgegebenes Streckenprofil (d.h. Fahrzeuggeschwindigkeit und Steigung über Zeit) die benötigte Antriebsleistung und Drehzahl im Antriebsstrang für Zeitschritte von 1 Hz mittels einer Rückwärtsberechnung (von Rad zu Motor) nach den Gleichungen der Fahrzeug-Längsdynamik. Kraftstoffverbrauch und Rohemissionen werden aus den resultierenden Betriebspunkten des Verbrennungsmotors berechnet. Temperaturabhängige Effekte auf die Schadstoffkonvertierung im Abgasnachbehandlungssystem können mittels eines modularen Ansatzes berücksichtigt werden. Hierbei wird eine fahrzeugspezifische Abgasnachbehandlung mittels einzelner Module mit eigenen thermischen und katalytischen Eigenschaften simuliert.

Im Rahmen dieses Projektes wurde das Programm PHEM um die Simulation von elektrischen Hybridfahrzeugen (Hybrid Electric Vehicles - HEV) erweitert. Das HEV Berechnungsmodul enthält zusätzlich zu einem konventionellen Antriebsstrang folgende Komponenten:

- Elektrische Maschine (EM): Die abgegebene bzw. aufgenommene Leistung der EM ist durch eine drehzahlabhängige Vollastkurve, analog zum Verbrennungsmotor, begrenzt. Der Wirkungsgrad wird aus einem drehzahl- und lastabhängigen dreidimensionalen Kennfeld interpoliert.
- Batterie: Das Batteriemodell für PHEM wurde am Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik (IGTE) der TU Graz entwickelt. Es basiert auf einem einfachen Ersatzschaltkreis mit Gleichspannungsquelle und Innenwiderstand. Die Charakteristik der Batterie wird über analytische Funktionen abgebildet. Die Eingangsgröße in das Modell ist die abgegebene oder, im Fall von Rekuperation oder Lastpunktanhebung, aufgenommene Leistung der EM. Das Modell liefert Strom, Spannung und Ladezustand (State of Charge - SOC) der Batterie als Ausgangsgröße (Renhart, 2010-06).
- Betriebsstrategie: Diese definiert, wie das für den Fahrzeugantrieb erforderliche Drehmoment zwischen Verbrennungsmotor und EM aufgeteilt wird. Die verwendete Betriebsstrategie wird im weiteren Verlauf des Kapitels beschrieben.
- Elektrische Nebenverbraucher: Der elektrische Betrieb von Nebenverbrauchern ermöglicht das Abstellen des Verbrennungsmotors bei niedrigen Geschwindigkeiten oder bei Stillstand des Fahrzeuges.

Abbildung des Hybridbusses in PHEM

Der Antrieb des betrachteten Hybridbusses besteht aus einem parallelen Hybridsystem, siehe Abbildung 1. Verbrennungsmotor und EM sind auf derselben Welle angeordnet und werden bei geschlossener Kupplung mit der gleichen Drehzahl betrieben. Das summierte Drehmoment von Verbrennungsmotor und EM ist der Eingangsparameter für das automatisierte 12-Gang Schaltgetriebe. Das Modell kann alle grundlegenden HEV-Betriebsarten abbilden: Rein elektrisches Fahren, reiner Verbrennungsmotor-Betrieb, Assistieren mit der EM, Lastpunktanheben mit der EM und Rekuperieren von Bremsenergie mit der EM, vergleiche den Leitfaden. Ein Teil der Nebenverbraucher (mechanischer Luftpresser, hydrostatischer Lüfterantrieb) wird vom Verbrennungsmotor angetrieben, der Rest rein elektrisch (elektrischer Luftpresser, Klimaanlage, Lenkhilfpumpe, Kühlgebläse Batterie, Heizungsgebläse), für Details siehe (Kies, 2013-02). In PHEM werden die Nebenverbraucher mit konstanten Werten für deren mittleren mechanischen und elektrischen Leistungsbedarf berücksichtigt.

Betriebsstrategie des Hybridbusses in PHEM

Da die eigentliche Betriebsstrategie von Volvo nicht bekannt war, wurde versucht, aus Messdaten Rückschlüsse darauf zu ziehen und eine vereinfachte Antriebsstrangregelung für das Simulationsmodell abzuleiten. Hier soll angemerkt werden, dass das Ziel des Projektes nicht eine exakte Nachbildung der spezifischen Betriebsstrategie des Volvo Hybridbusses war, sondern nur ein typisches Betriebsverhalten für einen Stadtbuss mit parallelem Hybridsystem abgebildet werden sollte. Dadurch konnte mittels Simulation ein effizienter Fahrstil für Hybridbusse untersucht werden.

Die vereinfachte Betriebsstrategie wurde über ein Kennfeld realisiert, welches aus den Messdaten erzeugt wurde. Dieses definiert das Drehmoment der elektrischen Maschine in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie (SOC) und dem erforderlichen Gesamtdrehmoment am Getriebeeingang, siehe Abbildung 17.

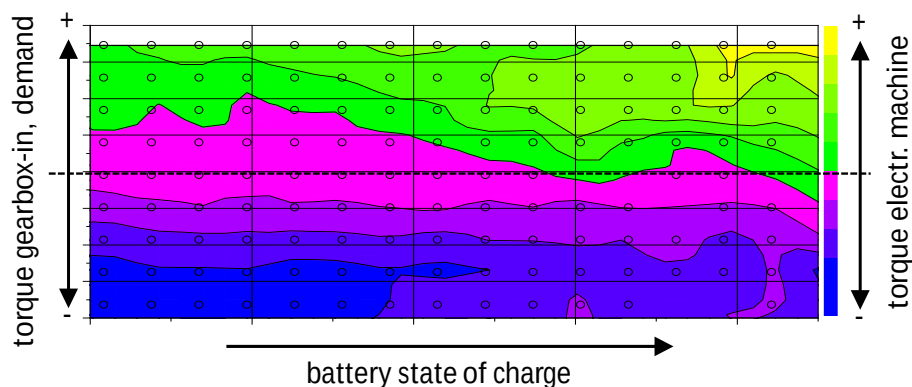


Abbildung 17: Kennfeld für die Betriebsstrategie des Hybridantriebs

Nachdem die rein kennfeldbasierte Betriebsstrategie keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, wurde diese um folgende Randbedingungen erweitert, welche die HEV Betriebsarten abhängig vom Ladezustand der Batterie und/oder der Fahrzeuggeschwindigkeit einschränken:

- Deaktivierung des Lastpunktanhebens oberhalb eines bestimmten SOC Wertes
- Deaktivierung des rein elektrischen Fahrens unterhalb eines bestimmten SOC Wertes
- Deaktivierung des rein elektrischen Fahrens ab einer bestimmten Geschwindigkeit
- Primär elektrisches Fahren bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit

- Begrenzung der elektrischen Leistungen der EM für die Betriebsarten Antrieb, Lastpunktanheben und Rekuperieren abhängig vom SOC Wert
- Abstellen des Verbrennungsmotors im Stillstand nur oberhalb eines bestimmten SOC Wertes

3.3.2 Erzeugung von Eingabedaten aus den Messungen

Da weder für den Verbrennungsmotor noch für die elektrische Maschine fahrzeugspezifische Wirkungsgradkennfelder verfügbar waren und auch keine detaillierten Batteriedaten, um das Modell zu parametrieren, wurden in einem ersten Schritt generische Daten verwendet. In einem weiteren Schritt wurden diese Daten und Kennfelder für jede einzelne Komponente bestmöglich an die aufgezeichneten Werte aus den Messungen auf der Teststrecke und der Straße angepasst. Zusätzlich wurde das Kennfeld für die Hybrid- Betriebsstrategie mehrmals überarbeitet und feinjustiert. Außerdem mussten die Parameter für die zusätzlichen Randbedingungen an die Messdaten angepasst werden, z. B. Anheben des Verbrennungsmotor-Lastpunktes abhängig vom SOC oder rein elektrisches Fahren abhängig von SOC und Geschwindigkeit.

Abbildung 18 zeigt die Abweichung vom simulierten zum gemessenen Kraftstoffverbrauch für verschiedene Messfahrten, die mit dem endgültigen Simulationsmodell nachgerechnet wurden.

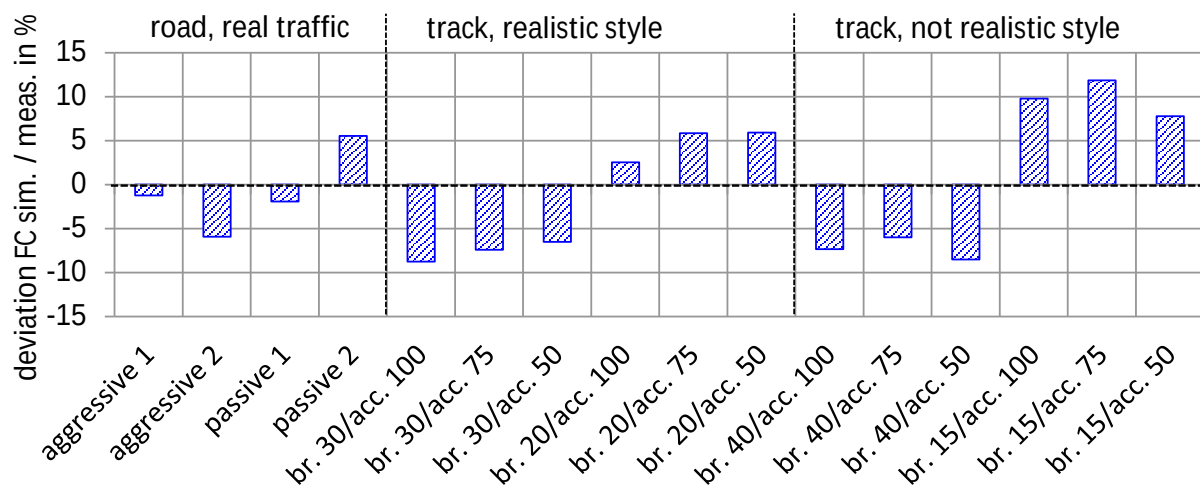


Abbildung 18: Vergleich von Kraftstoffverbrauch aus Simulation und Messung

Die Abweichungen sind teilweise recht hoch, können aber durch die unzureichende Genauigkeit des Wirkungsgradkennfeldes der elektrischen Maschine, des Verbrauchskennfeldes des Verbrennungsmotors sowie einer nicht exakten Abbildung der Betriebsstrategie erklärt werden. Für genauere Ergebnisse müssten spezifische Kennfelder aus der Vermessung der einzelnen Komponenten verfügbar sein.

3.3.3 Simulation des Hybridbusses

Mit dem kalibrierten PHEM-Modell des Hybridbusses wurden die Geschwindigkeitsverläufe von 25 verschiedenen Fahrstilen (Kombination aus Brems- und Gaspedalstellung) auf der Salzburger Buslinie 3 simuliert. Diese 25 Fahrzyklen sind mit der Verkehrsflusssimulation VISSIM berechnet worden, siehe Abschnitt 3.4.2. Die Kombination der Simulationsprogramme PHEM und VISSIM baute auf einer

vorangegangenen Untersuchung des Einflusses der Schaltung von Verkehrslichtsignalanlagen und Verkehrszeichen auf die Emissionen von Pkw auf (Kraschl-Hirschmann, 2011-06).

In einem weiteren Schritt wurden in PHEM reale Geschwindigkeitsverläufe für verschiedene Buslinien in Graz simuliert, um das Einsparungspotential im Kraftstoffverbrauch durch den Einsatz von Hybridbussen abzuschätzen. Dafür wurden mittels GPS-Messung die Geschwindigkeitsprofile von 17 Buslinien bestimmt, welche von der HGL im Grazer Stadtgebiet bedient werden, siehe Abbildung 19 und Abbildung 20.

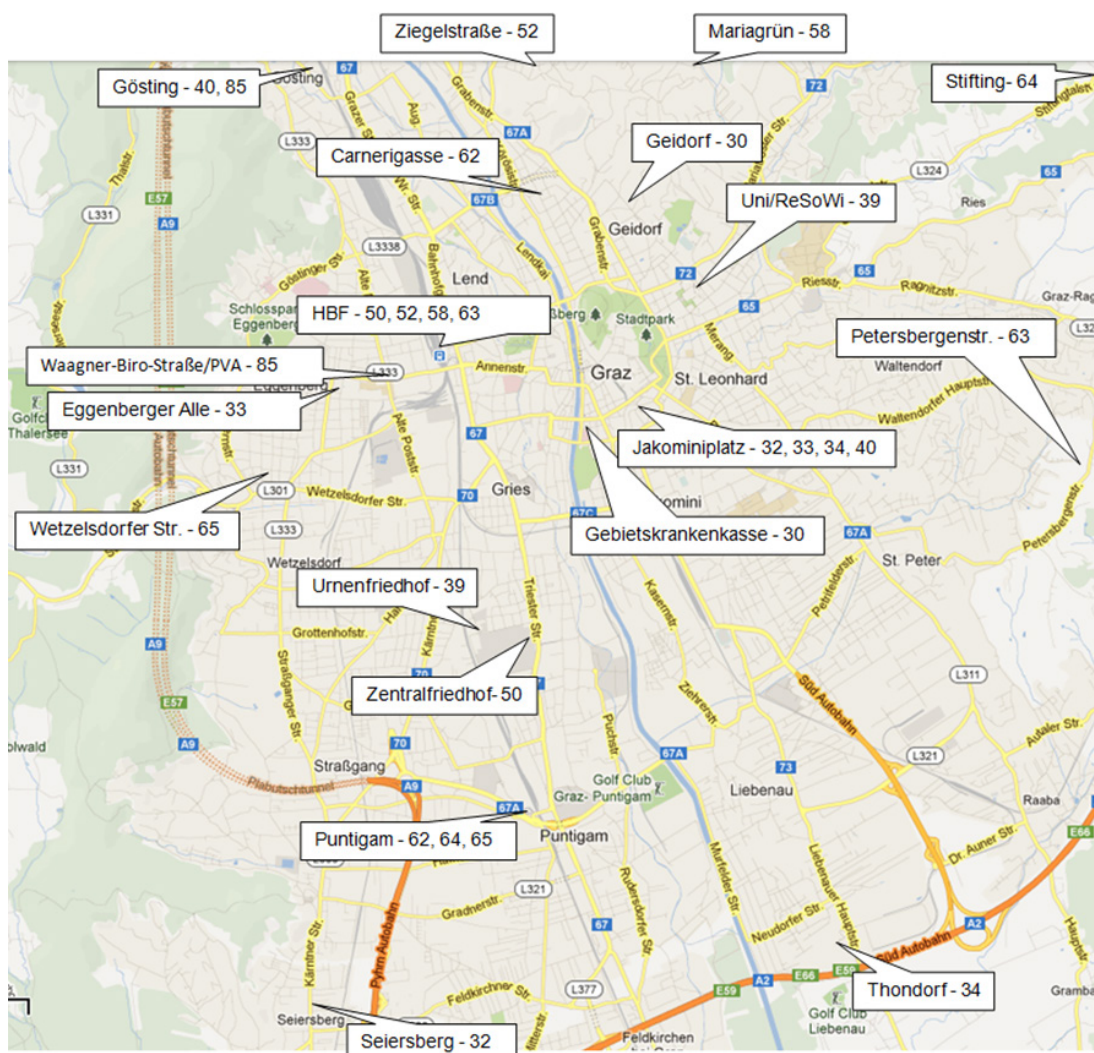


Abbildung 19 Start- und Endhaltestellen der simulierten Buslinien in Graz (Bruckner, 2013-06)

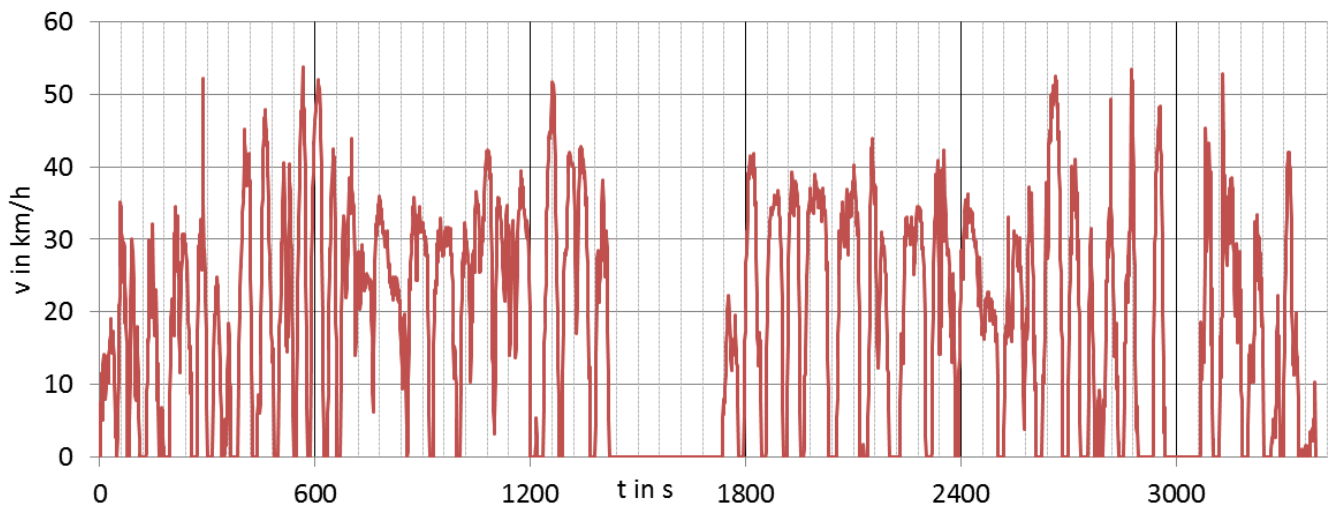


Abbildung 20: Beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf für die Buslinie 34 in Graz (Bruckner, 2013-06)

In PHEM wurden dann ein EURO V Standardbus (Hausberger, 2009-12) und der Volvo Hybridbus auf allen aufgezeichneten Linien simuliert und der resultierende Kraftstoffverbrauch berechnet. Abbildung 21 zeigt die errechneten Kraftstoffverbräuche für den Standardbus und den Hybridbus im Vergleich und gibt das mögliche Einsparungspotential an.

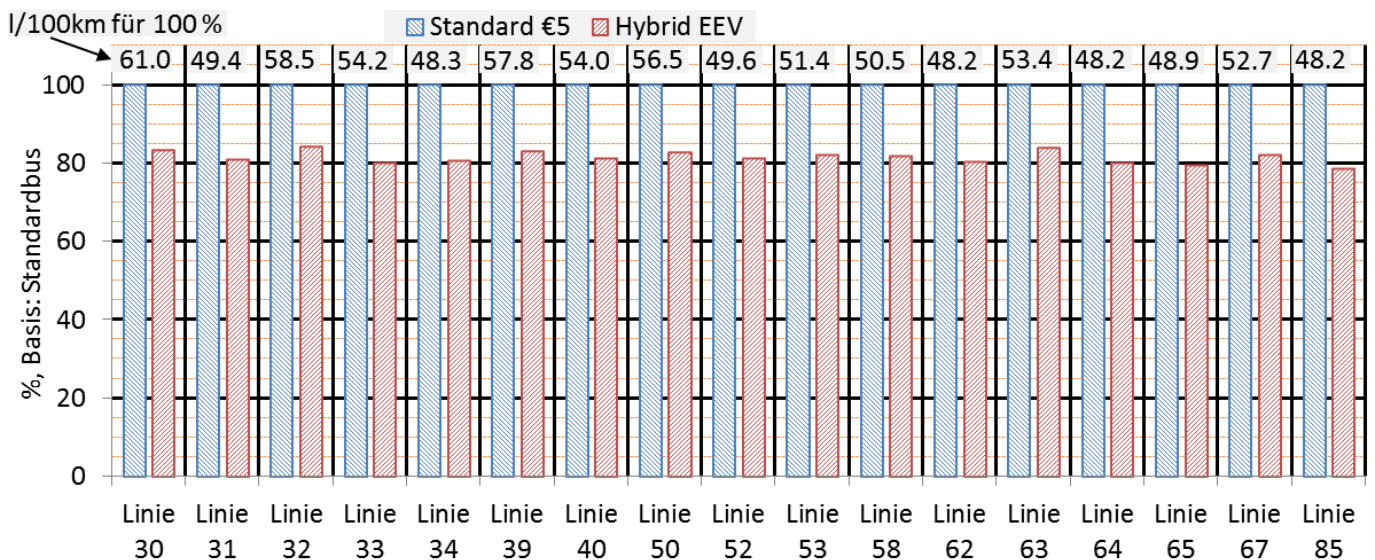


Abbildung 21: Kraftstoffverbrauch von EURO V Standardbus und Hybridbus im Vergleich für mehrere Buslinien in Graz

Das Einsparungspotential beträgt für alle betrachteten Routen jeweils rund 20 %. Bei einer Bandbreite von 16 bis 21 % der Kraftstoffersparnis ist der Einfluss der Streckenführung auf den Verbrauch relativ gering. Es muss noch erwähnt werden, dass diesen Simulationen ein Geschwindigkeitsverlauf bei einem Standard-Fahrstil zugrunde liegt, und keine besondere Aufmerksamkeit auf verbrauchssparende Fahrweise gelegt wurde. Bei einem auf Hybridfahrzeuge optimierten Eco-Fahrstil, siehe Abschnitt 3.4.4, sind deshalb noch größere Einsparungen zu erwarten.

3.3.4 Hybrid-Pkw

Mit PHEM wurde ebenfalls der Pkw VW Jetta Hybrid im Rahmen einer Diplomarbeit simuliert (Smode, 2013-11). Zu Beginn standen die Parametrierung des Modells und die Anpassung an den Normverbrauch im Prüfzyklus NEDC. Der von VW veröffentlichte Wert 4.1 L/100km konnte mit einer Abweichung von - 2.4 % nachsimuliert werden. Mit dieser Einstellung wurde der Einfluss der maximalen Beschleunigungs- und Bremsleistung auf den Verbrauch untersucht. Hierfür wurde ein achtminütiger Teilzyklus, der aus einer zügigen Stadtfahrt mit einem konventionellen Pkw entnommen war (Glauning, 2011-02 p. 42), in Beschleunigung oder Verzögerung begrenzt. Die Begrenzung erfolgte bei einer Längsdynamikrechnung des VW Jetta Hybrid auf dem Zyklus mittels der Vorgabe von maximaler oder minimaler mechanischer Leistung an der Getriebeeingangswelle. Dort sitzt im realen Fahrzeug die Elektromaschine, welche beim Antrieb auf + 20 kW_{el} und bei der Bremsung auf - 28 kW_{el} begrenzt ist. Mit der Leistungsbeschränkung wurde untersucht, wie der Verbrauch beeinflusst wird, wenn die Antriebs- / Verzögerungsleistung ganz oder nur teilweise im Bereich der maximalen Motor bzw. Generatorleistung der Elektromaschine liegt. Ein Beispiel für die Änderung des Geschwindigkeitszyklus bei Vorgabe verschiedener Leistungswerte ist in Abbildung 22 gezeigt:

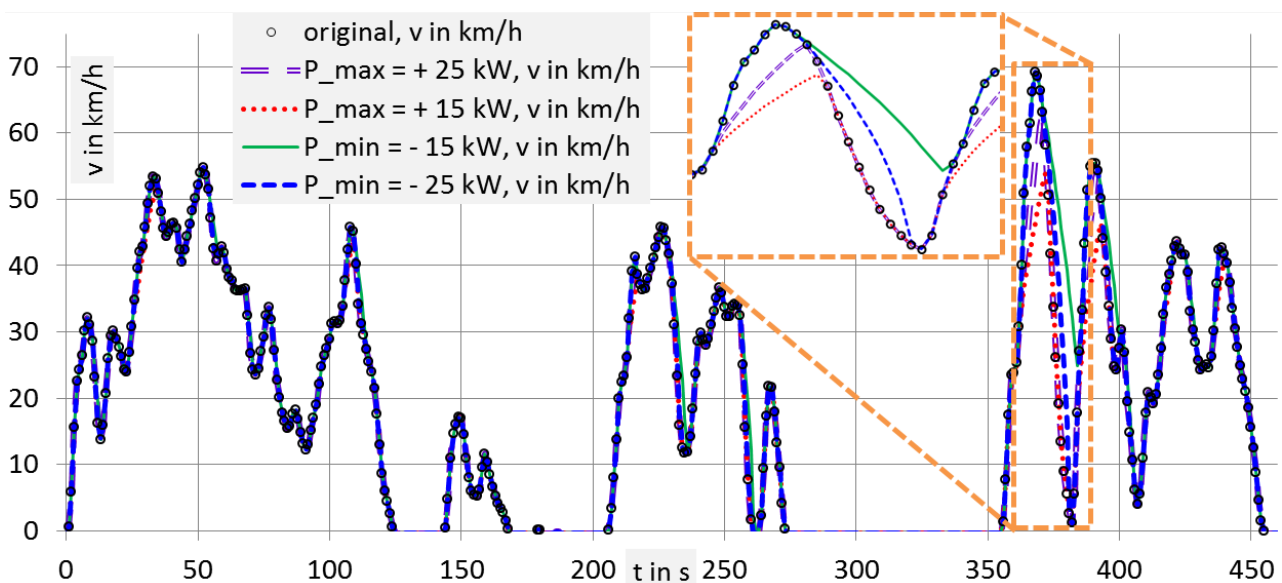


Abbildung 22: Änderung eines Geschwindigkeitszyklus bei Begrenzung der positiven / negativen Leistung an der Getriebeeingangswelle, Fahrzeugmodell VW Jetta Hybrid (in Anlehnung an (Smode, 2013-11))

Es wird deutlich, dass das Auto in der Simulation langsamer beschleunigt / verzögert, wenn man die Antriebs- / Bremsleistung an der Getriebeeingangswelle begrenzt. Dadurch ändern sich zwar der ganze Fahrzyklus und die zurückgelegte Strecke, aber für eine erste Abschätzung, ob die Begrenzung der Antriebs- oder Bremsleistung einen größeren Einfluss hat, ist diese Vorgehensweise zulässig. Wenn man das limitierte Beschleunigungs- bzw. Bremsverhalten auf einer fixen Strecke im Zusammenspiel mit anderen Fahrzeugen simulieren möchte, braucht man bereits eine Verkehrsflusssimulation, siehe Abschnitt 3.4.1. Mit der theoretischen Untersuchung eines einzelnen Fahrzeuges ist dies nicht möglich. Die Ergebnisse mehrerer Variationen der Leistungsbegrenzung für das Modell des Hybrid-Pkw und eines konventionellen Pkw mit gleicher Antriebsleistung sind in Abbildung 23 dargestellt.

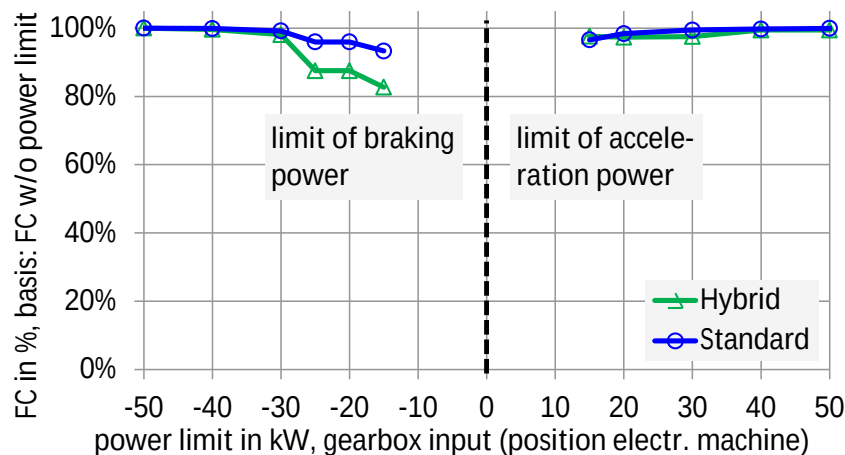


Abbildung 23: Variation der Begrenzung der Brems- oder Antriebsleistung, Modell VW Jetta Hybrid, Modell Standard-Pkw mit gleicher Masse und Antriebsleistung (Smode, 2013-11)

Man sieht, dass auch in der Simulation das zurückhaltende Bremsen beim Hybrid eine wesentlich größere Einsparung ermöglicht als das begrenzte Gasgeben. Im direkten Vergleich mit einem Standardfahrzeug gleicher Antriebsleistung zeigt sich, dass der Hybrid bei einer Begrenzung der Bremsleistung eine höhere Verbrauchsreduktion ermöglicht. Bei einer Beschränkung des Gasgebens sparen beide Fahrzeugmodelle in der Simulation gleich wenig ein. Dass das Bremsverhalten einen größeren Einfluss auf die Sparmöglichkeiten hat, wurde richtig vorhergesagt.

Diese theoretische Untersuchung wurde vor der Messung des Jetta Hybrid gemacht, um das Fahrprogramm festzulegen. Der Einfluss der Anfahr- und Bremsleistung wurde im Grazer Straßenverkehr bei 4 FahrerInnen gemessen, siehe Abbildung 15. Anschließend erfolgte die Anpassung des Simulationsmodells an die Messbedingungen. Z. B. war das Auto inkl. Messgeräten ca. 300 kg schwerer als bei der Simulation des NEDC, oder der Luftwiderstandsbeiwert musste erhöht werden, weil das PEMS Abgasrohr außen lag und mit offenen Fenstern gefahren wurde. Für den Vergleich zwischen den Messwerten und den simulierten Fahrten siehe Abbildung 24.

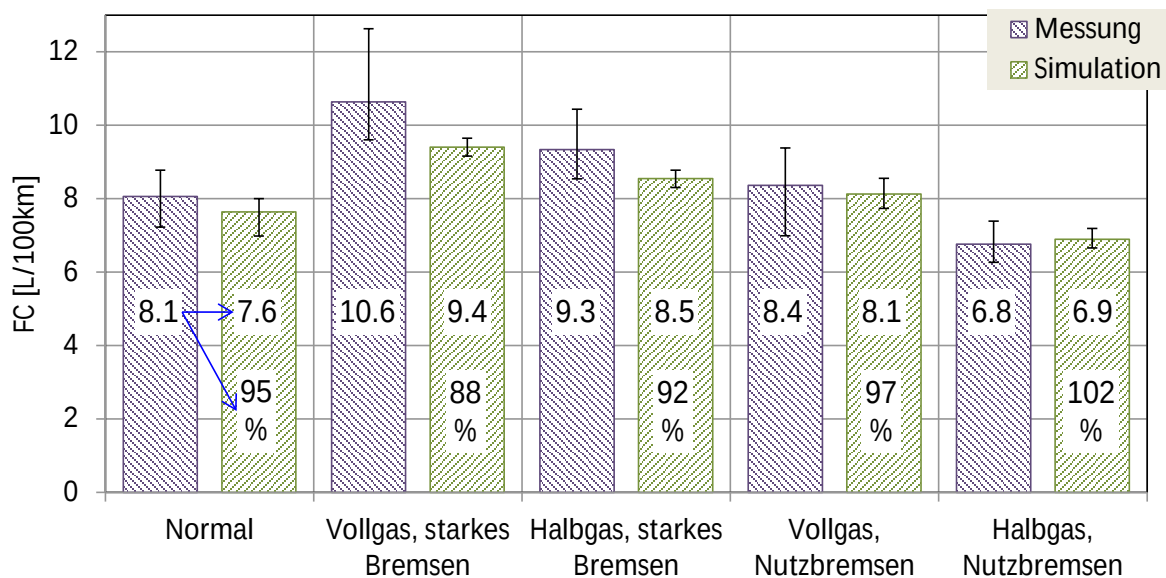


Abbildung 24: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen (Smode, 2013-11)
Kraftstoffverbrauch Messung rechnerisch auf ausgeglichene Batterie-Ladebilanz korrigiert, Simulationsergebnisse ebenfalls

Bei diesen Ergebnissen der Nachsimulation der Messung fällt auf, dass die Abweichung beim sehr aggressiven Fahrstil (Vollgas, starkes Bremsen) und bei der merkwürdigen Kombination "Halbgas, starkes Bremsen" mit 12 und 8 % am größten ist. Die Erklärung ist, dass die Schaltlogik des Automatikgetriebes im Jetta nicht bekannt war, ebenfalls gab es keine Daten für den Gesamtwirkungsgrad des elektr. Systems (Leistungselektronik, Elektromaschine, Batterie). In PHEM sind drei Schaltparameter für die normierte Drehzahl hinterlegt, mit denen die Schaltzeitpunkte für das Rauf- und Runterschalten bestimmt werden: Konstant, leistungsabhängig und geschwindigkeitsabhängig. Die elektr. Wirkungsgrade wurden im Kennfeld der Elektromaschine zusammengefasst. Für die Schaltparameter und den Wirkungsgrad wurden mehrere Variante gerechnet. Diejenige Einstellung wurde gewählt, bei der der Mittelwert der Beträge der einzelnen relativen Abweichungen Simulation/Messung $\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{Verbr}_{\text{Sim}} / \text{Verbr}_{\text{Mess}} - 1| \right)$ minimal war. Die beiden wichtigen Fahrstile "Normal" und "Halbgas/Nutzbremsen = EcoDrive" werden gut getroffen, die anderen drei Stile sind lediglich experimentell interessant und wenig praxistauglich.

3.4 Verkehrsflusssimulation

Mit Hilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen gelingt es, Fahrtverläufe von Kraftfahrzeugen nachzubilden, um daraufhin fahrzeugfeine Berechnungen von Abgasemissionen und Energieverbrauch zu ermöglichen, z.B. mit PHEM, siehe Abschnitt 3.3.1. Die wesentlichen Vorteile von Simulationen im Kontext der Evaluierung von ökologischen und ökonomischen Fahrstilen mit Hybridfahrzeugen sind unter anderem die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Diese werden zudem nicht von wechselnden Randbedingungen während der Messfahrten im Realbetrieb beeinflusst.

Das in diesem Projekt verwendete Verkehrsflusssimulationsprogramm VISSIM (Softwareprodukt der PTV-Group (Fellendorf, 2010)) ist ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes und verhaltensbasiertes Simulationsmodell. Neben dem Individualverkehr (IV) kann auch der schienen- und der straßengebundene öffentliche Personennahverkehr (ÖV) modelliert werden. Wesentlich für die Güte des Simulationssystems ist die Qualität des Verkehrsflussmodells, d.h. des Verfahrens, nach dem die Fahrzeuge im Netz bewegt werden. Im Gegensatz zu einfacheren Modellen, in denen weitgehend konstante Geschwindigkeiten und ein deterministischer Folgevorgang von Fahrzeugen vorausgesetzt werden, verwendet VISSIM das psycho-physische Wahrnehmungsmodell von Wiedemann (Wiedemann, 1974), Fahrtrajektorien können somit realistisch abgebildet werden.

3.4.1 Aufbau und Kalibrierung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (VISSIM)

Der innerstädtische Bereich der Stadt Salzburg, welcher zahlreiche Buslinien mit teilweise getrennten Busspuren enthält, dient als virtuelles Testgebiet für die mikroskopischen Simulationszyklen (Abbildung 25). Der mikroskopische Netzaufbau erfolgt über den ANM-Import eines existierenden kalibrierten makroskopischen Stundenmodells, welches für das Bundesland Salzburg erstellt wurde. ANM-Dateien enthalten ein abstraktes Netzmodell im XML-Format, welches aus Knoten und Kanten besteht, und dienen als Dateischnittstelle zum Datenaustausch mit anderen Modelltypen (VISUM, ptv-vision). Der ANM-Import bestimmt neben dem Streckennetz auch die Verkehrszuflussbelastungen und Routenverläufe (ANM-Routen) des Verkehrsflussmodells, womit reale Streckenbelastungen simuliert

werden können. Anhand von Luftbildern wurden die Streckenverläufe und genauen Knotengeometrien weiter feinjustiert.

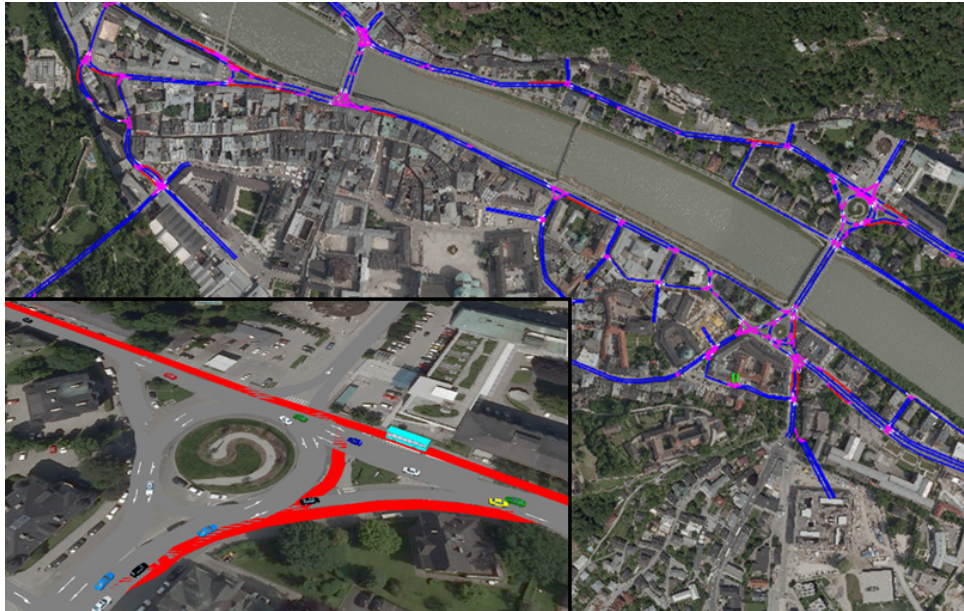


Abbildung 25: Simulationsgebiet des innerstädtischen Bereichs der Stadt Salzburg (Überblick und Detail)

Die Simulation wurde für die Morgenspitze zwischen 7 und 9 Uhr aufgebaut und enthält jegliche relevanten Verkehrsmodi (Pkw, Lkw, Stadtbus, Postbus, Fußgänger, Rad). Die der Verkehrsflusssimulation zugrundeliegenden Fahrverhaltensparameter (Beschleunigungsverteilung, Wunschgeschwindigkeiten, Verhaltensänderungen in Bezug auf Fahrstreifenwechsel und Annäherungen an Verkehrslichtsignalanlagen, etc.) von motorisierten Fahrzeugen wurden anhand von insgesamt 60 h umfassenden hochauflösenden (20 bis 100 Hz) GPS-unterstützten Messfahrten kalibriert. Dabei konnte anhand der Ergebnisse einer zwischengeschalteten PHEM-Analyse (mit den GPS-Trajektorien als Eingangsgrößen) durch manuelle Analysen auf Parameter geschlossen werden, welche zur Anpassung des lateralen und longitudinalen Bewegungsmodells (Spurwechselmodell und Fahrzeugfolgemodell) herangezogen wurden (siehe Abbildung 26).

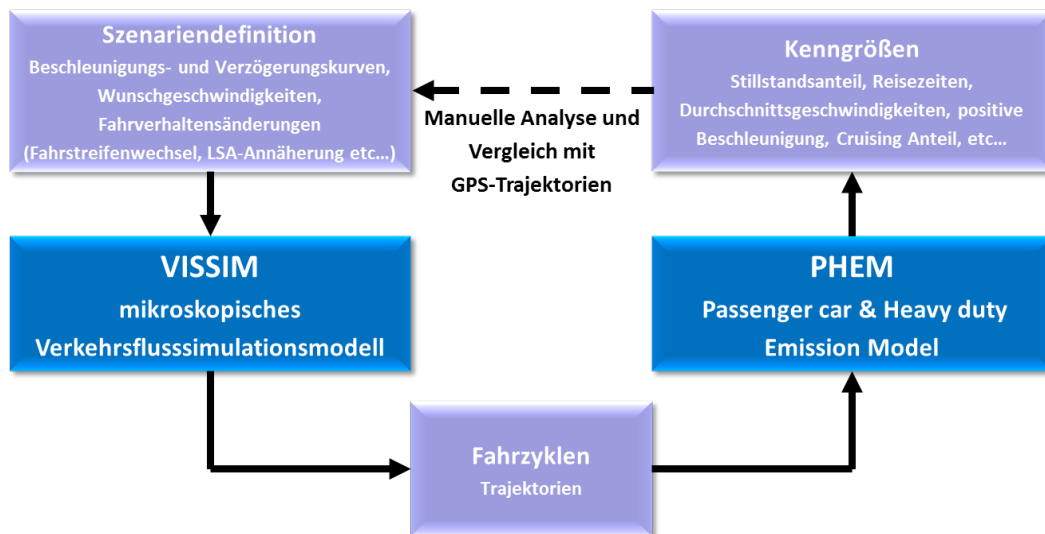


Abbildung 26: Iterativer Prozess der Anpassung des lateralen und longitudinalen Bewegungsmodells der Verkehrsflusssimulation

Zusätzlich wurden sämtliche Buslinien laut Fahrplan (Stand 2012) in das mikroskopische Simulationsmodell eingebettet und eine definierte Stadtbuslinie (Linie 3) für den Hybridbus gewählt. Die Hybridbuslinie 3 durchfährt das Simulationsnetz auf einer Länge von jeweils 3.5 km pro Fahrtrichtung im 10 Minutentakt und hält bei jeweils 5 Haltestellen, für die im Modell stochastische Aufenthaltszeiten der Busse hinterlegt sind. Die Kalibrierung des Hybridbusses in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation erfolgte gesondert und ist in Abschnitt 3.4.3 beschrieben.

3.4.2 Untersuchte Variationen

Aus den Messfahrten mit Arretierung des Gas- und Bremspedals auf der Teststrecke sowie aus den Messungen der Buslinie 31 im Realbetrieb in Graz, siehe Abschnitt 3.2.2, wurden 5 resultierende Beschleunigungskurven (acc.) sowie 6 resultierende Verzögerungskurven (br.) gebildet. Abbildung 27 zeigt die Mittelwerte der unterschiedlichen Beschleunigungs- und Verzögerungskurven in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Jede Kurve besitzt zudem eine obere und untere Schranke, um ein stochastisches Fahrverhalten in der Verkehrsflusssimulation abbilden zu können; diese Schranken sind hier nicht abgebildet. Es wurden insgesamt 25 unterschiedliche Fahrverhaltens-Variationen aus den vorliegenden Kurven gebildet, welche dem Hybridbusmodell in der Simulationsumgebung von Salzburg hinterlegt wurden. 24 Fahrverhalten setzen sich aus der Kombination von 4 Gaspedal- mit jeweils 6 Bremspedalarretierungen zusammen:

- o Gas 50 %
- o Gas 65 %
- o Gas 75 % (entspricht "EcoDrive". Beschleunigen im Realbetrieb)
- o Gas 100 % (entspricht aggressivem Beschleunigen im Realbetrieb)
- o Bremse 20 %
- o Bremse 23 %
- o Bremse 26 %
- o Bremse 30 % (entspricht aggressivem Bremsen im Realbetrieb)
- o Bremse passiv (br. pass.)
- o Bremse durchschnittlich (br. avrg.) aus den Bremswerten im Realbetrieb (br. aggr. und br. pass.)

Zudem wurde ein durchschnittliches Fahrverhalten (#25) simuliert, welches aus dem im Realbetrieb gemessenen Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten der aggressiven und passiven Fahrweise gemittelt wurde (acc. avrg./ br. avrg.). Die 25 Variationen sind auf der Abszisse der Abbildung 5 (Fahrverhaltensbezeichnung) ersichtlich.

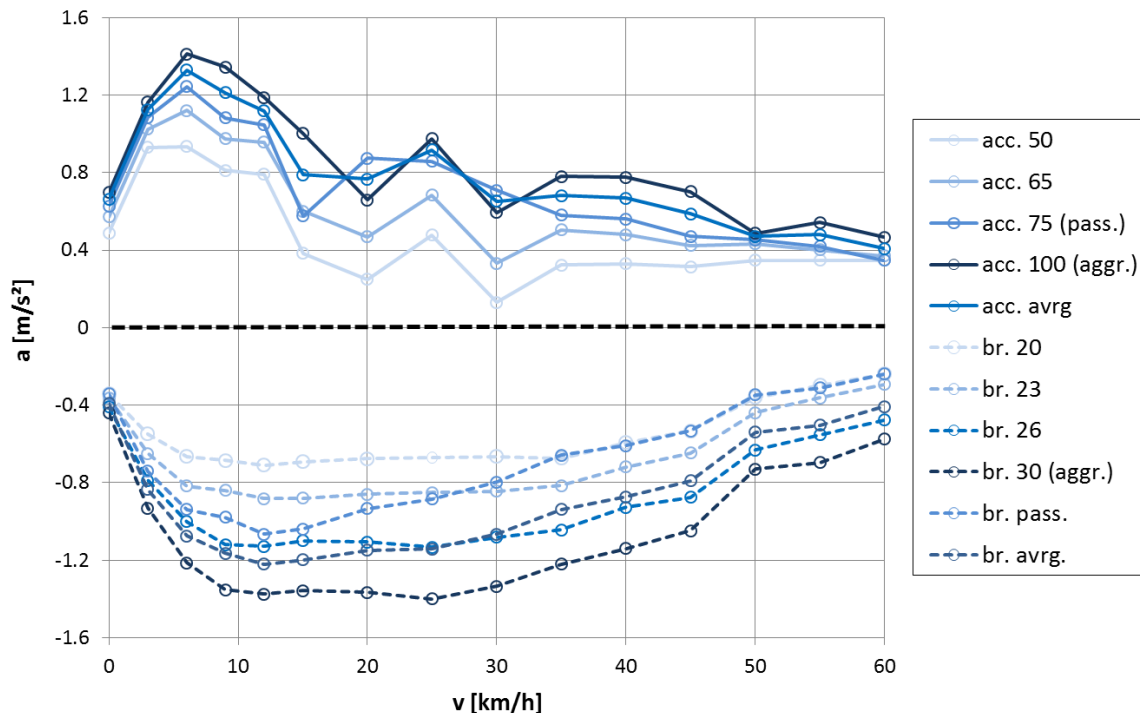


Abbildung 27: Beschleunigungs- und Verzögerungskurven über der Geschwindigkeit aus den Messfahrten

3.4.3 Kalibrierung der Hybridbusse in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation

Weiterer Kalibrierungsaufwand war notwendig, um die unterschiedlichen Fahrverhalten der Hybridbusse im mikroskopischen Verkehrsflussmodell in angemessener Genauigkeit zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk bei der Kalibrierung wurde auf die Abbildung der 25 unterschiedlichen Fahrverhalten gelegt, welche durch ihre Wunschgeschwindigkeitsverteilung und Beschleunigungs- sowie Verzögerungskurven charakterisiert werden. Auch Feinjustierungen der Fahrzeugfolgemodelparameter innerhalb des psychophysischen Fahrzeugfolgmodells Wiedemann 99 (Leonhardt, 2012-12) wurden unternommen.

Abbildung 28 zeigt für zwei Fahrverhalten die Häufigkeitsverteilungen der Beschleunigungs- und Verzögerungswerte über der Geschwindigkeit aufgetragen. Bei den gezeigten Fahrverhalten (#17 und #22) handelt es sich um die aggressive und passive Variante, welche im Realbetrieb auf der Buslinie 31 im Grazer Stadtgebiet gemessen wurden.

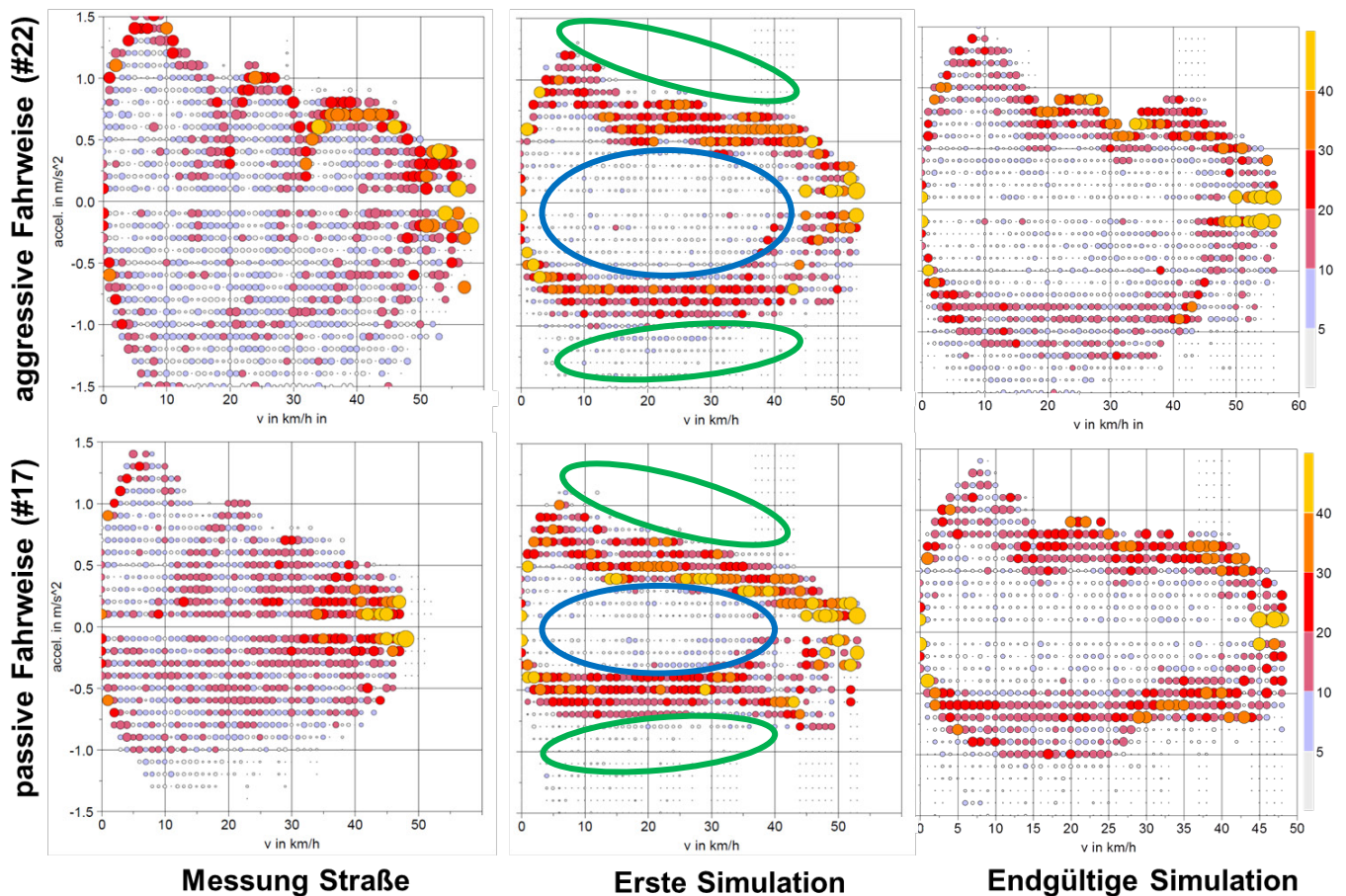


Abbildung 28: Kalibrierungsentwicklung des geschwindigkeitsabhängigen Beschleunigungs- und Verzögerungsverhaltens

Die zwei linken Diagramme repräsentieren die Häufigkeitsverteilung der eigentlichen Messung im Linienbetrieb und lassen die Schaltvorgänge klar erkennen. Bereits hier ist die weitreichendere Streuung des aggressiven Fahrstils gegenüber dem passiven ersichtlich. Die mittleren Diagramme zeigen die ersten Simulationsergebnisse, wobei hier die Begrenzungskurven (obere und untere Schranke) der stochastischen Verteilung der Wunschbeschleunigung und -verzögerung eine zu geringe Bandbreite widerspiegeln. Das ist sowohl an den fehlenden Häufigkeitspunkten bei Beschleunigungswerten gegen 0 m/s^2 (blaue Markierung), als auch an den fehlenden Häufigkeitspunkten der maximalen und minimalen Beschleunigungen zu erkennen (grüne Markierung).

Mehrere Kalibrierungsschritte analog des in Abbildung 26 dargestellten Systems führten zu den endgültigen Simulationsergebnissen auf der rechten Seite. Vergleiche des Kraftstoffverbrauchs zwischen den modellierten und gemessenen Ergebnissen zeigen, dass die relativen Abweichungen bei der hier erzielten Kalibrierungsqualität im Mittel bei rund 8% liegen.

Das mikroskopische Simulationsmodul VISSIM verfügt bis dato über kein Rekuperationsmodul, welches vorausschauende Nutzbremsungen von Hybridfahrzeugen berücksichtigen kann. Die Quantität des Kraftstoffverbrauchs bei den Messfahrten ist aufgrund der vorhandenen Nutzbremsung primär von der Verzögerung abhängig, die Beschleunigung spielt lediglich eine untergeordnete Rolle. Die Beschleunigungsparameter in VISSIM ergaben jedoch Unterschiede in den resultierenden Fahrzyklen, welche in PHEM eine größere Änderung im Verbrauch bewirkten, als es bei der Messung der Fall war. Während die simulationsgestützten Absolutwerte des Kraftstoffverbrauches also nicht genau die Realität

widerspiegeln können, so lassen sich dennoch Relativvergleiche der 25 simulierten Fahrverhalten untereinander anstellen (Abbildung 29).

3.4.4 Ergebnisse

Aus den Fahrtrajektorien der Hybridbusse mit den hinterlegten 25 unterschiedlichen Fahrverhalten, welche aus den mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen stammen, werden die Emissionen mittels PHEM berechnet. Dabei wurden mehrere mikroskopische Simulationsdurchläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen ausgeführt und deren Ergebnisse gemittelt, da ansonsten auf Grund des stochastischen Charakters der Simulation zufällige Schwankungen in den Ergebnissen der einzelnen Simulationsläufe auftreten würden. Abbildung 29 zeigt den Kraftstoffverbrauch als repräsentative emissionstechnische Kenngröße, dieser schwankt zwischen 37.6 und 48°L/100km.

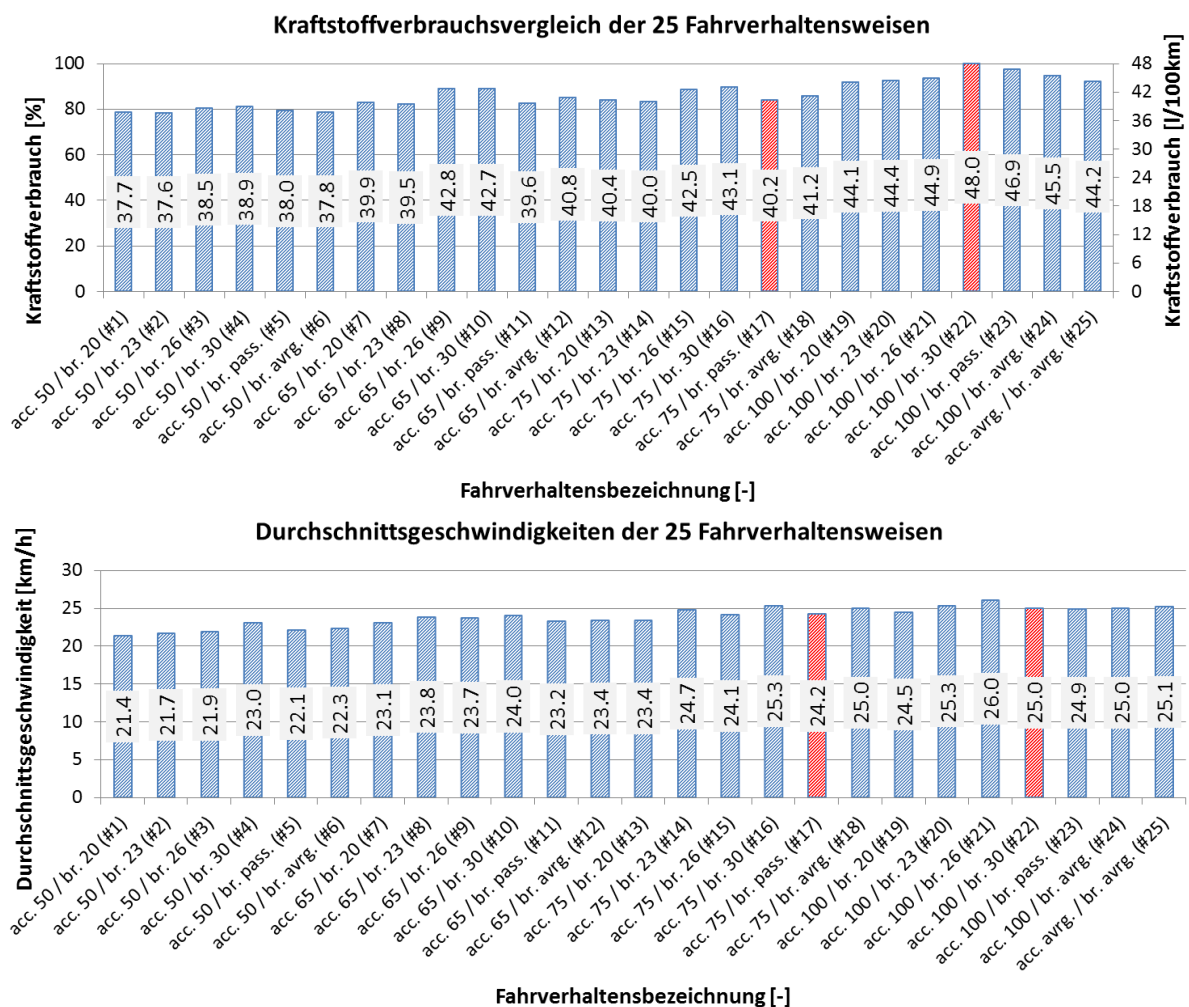


Abbildung 29: Simulationsergebnisse der Kraftstoffverbräuche und zugehöriger Durchschnitts-geschwindigkeiten der 25 Fahrverhalten (acc. - Gaspedalstellung in %, br. - Bremspedalstellung in %) für den Hybridbus

Die rot dargestellten Ergebnisbalken repräsentieren die Fahrverhalten der Messungen im Realbetrieb, siehe Abbildung 6, während die blauen Darstellungen Fahrverhalten aus den Messungen auf der Teststrecke mit festen Positionen für Gas- und Bremspedal zeigen, siehe auch Abbildung 7. Während PHEM speziell anhand der roten Säulen kalibriert wurde, wurden die Fahrverhaltenseinstellungen in VISSIM für jegliche Gas- bzw. Bremspedalstellungen variiert und abgestimmt. Die straßenseitig

gemessene aggressive Fahrweise (#22), welche auch im Realbetrieb als Standardfahrweise anzusehen ist, gilt als jene mit dem höchsten Kraftstoffverbrauch (48°L/100km). Die straßenseitig gemessene passive Fahrweise (#17), welche nicht dem Standard im Linienbetrieb entspricht, weist bereits ein Einsparungspotential von 16°% des Kraftstoffes gegenüber der aggressiven Fahrweise als Referenzwert auf. Beachtlich dabei ist, dass die mittlere Geschwindigkeit (ohne Stillstandzeiten) der untersuchten Hybridbusse jedoch lediglich um etwa 3°% sinkt. Dies ist insbesondere dann von Relevanz, wenn zu untersuchen ist, ob man den Fahrplan trotz adaptierten EcoDrive-Fahrverhaltens einhalten kann. Das maximale Einsparungspotential des Kraftstoffes entspricht etwa 22°% mit einhergehender Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeit von 13°% für das Fahrverhalten #2 mit Gaspedalarretierung von 50°% und Bremspedalarretierung von 23°%.

è Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen das Potential zur Kraftstoffverbrauchsreduktion von Hybridbussen bei entsprechend angepasstem Fahrverhalten und quantifizieren dieses mit rund 20°%. Unter Berücksichtigung betrieblicher Vorgaben der Verkehrsbetriebe, wie der Einhaltung der Fahrpläne, ist dieses Potential lediglich als obere Grenze anzusehen.

3.5 Effekte der Hybridisierung des Grazer Stadtverkehrs

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, das Einsparpotenzial bezüglich Kraftstoffverbrauch und Emissionen durch die Hybridisierung der Fahrzeugflotte am Beispiel des Stadtgebietes von Graz zu untersuchen. Dazu stehen Daten zum Straßennetz und Verkehrsaufkommen aus dem Emissionskataster Graz zur Verfügung. Die Berechnung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen erfolgt streckenaufgelöst mit dem Modell NEMO.

3.5.1 Simulationsprogramm 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 aktuellen Stand der wissenschaftlichen Methoden entwickelt. NEMO verknüpft eine detaillierte Berechnung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte mit fahrzeugfeiner Verbrauchs- und Emissionssimulation. Die Berechnungsmethodik umfasst alle in der Literatur als relevant eingestuft Mechanismen für Energieverbrauch und Emissionsausstoß des Straßenverkehrs („NEMO-Road“) und wurde bereits mehrfach publiziert (Dippold, 2012-11) (Rexeis, 2009-10). Zusätzlich beinhaltet es die Anwendungsbereiche der Verkehrssektoren Bahn („NEMO-Rail“) und Binnenschifffahrt („NEMO-Ship“). Eine vollständige Dokumentation des Modells NEMO wird am IVT derzeit im Rahmen einer Dissertation erarbeitet.

3.5.2 Randbedingungen in den Szenarien

Ausgangspunkt der Untersuchungen sind die mit NEMO simulierten Ergebnisse für Kraftstoffverbrauch und Emissionen am Streckennetz von Graz, für das Berechnungsjahr 2015. Dabei wurde im Basisszenario die Flottenzusammensetzung, d.h. die Aufteilung der gefahrenen Kilometer am Netz nach Antriebstechnologien und EURO-Klassen, gemäß aktuellen Daten aus der Österreichischen Luftschadstoffinventur (Schwingshackl, 2013-01) verwendet. In den berechneten Szenarien wurden

dann einzelne Flottensegmente durch hybride bzw. aktuelle nicht-hybride Antriebstechnologien ersetzt. Die Verkehrsmengen wurden in allen Szenarien gleich gelassen.

Für die Umlegung der Erkenntnisse des EHEV-Projektes auf die NEMO Berechnungen wurden die Verbrauchsunterschiede der verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeuggenerationen direkt ins Modell übernommen. Tabelle 1 zeigt die hinterlegten Unterschiede beim Kraftstoffverbrauch der in den Szenarien variierten Fahrzeugkonzepte. Bezüglich Schadstoffemissionen wurde vereinfacht angenommen, dass diese sich durch die Hybridisierung im gleichen Maße wie der Kraftstoffverbrauch verändern (im Vergleich zur gleichen EURO-Klasse).

Tabelle 1: Verbrauchsunterschiede Stadtbusse (SB) und Benzin PKW

Fahrzeug	Verbrauch im Vergleich zu konventionellem Referenzfahrzeug
Stadtbus EURO III konventionell (= Referenz)	100 %
Stadtbus EURO VI konventionell	70 %
Stadtbus EURO VI HEV (normaler Fahrstil)	64 %
Stadtbus EURO VI HEV (Fahrstil EcoDrive)	58%
PKW EURO VI konventionell (=Referenz)	100 %
PKW EURO VI Hybrid (normaler Fahrstil)	80 %
PKW EURO VI Hybrid (Fahrstil EcoDrive)	65 %

3.5.3 Hybridisierung der Stadtbusflotte

Im Szenario „Hybridisierung der Stadtbusflotte“ werden die Stadtbusse der EURO III Generation (Baujahre 2000 bis 2004) ersetzt. Gemäß Daten zur österreichischen Durchschnittsflotte werden im Jahr 2015 noch rund 21 % der von Stadtbussen gefahrenen Kilometer von EURO III Fahrzeugen zurückgelegt.⁷ Diese werden in den Berechnungen einmal durch konventionelle, d.h. nicht hybridisierte EURO VI Busse (Verbrauchs- und Emissionseinsparung gegenüber EURO III: ca. 30 %), sowie einmal durch EURO VI Hybridbusse ersetzt. Die Hybridbusse werden dabei einmal mit einem „normalen“ und einmal mit dem EcoDrive Fahrstil gefahren. Dadurch ergeben sich Verbrauchs- und Emissionseinsparungen gegenüber EURO III von ca. 36 % (normaler Fahrstil) bzw. von ca. 42 % (EcoDrive). Im Projektantrag war vorgesehen, in den Simulationsrechnungen zuerst Busse auf Linien mit hohem Einsparpotential durch Hybridfahrzeuge zu ersetzen. Da die Messungen und Simulationen jedoch ergeben haben, dass auf allen Linien ähnlich hohe Verbrauchs- und Emissionsminderungen durch Hybridisierung entstehen, siehe Abbildung 21, wurde in den Berechnungen nicht zwischen einzelnen Linien unterschieden.

⁷ Die in den Berechnungen verwendete Flottenzusammensetzung entspricht den Daten im österreichischen Durchschnitt und nicht der spezifischen Altersverteilung der im Grazer Stadtgebiet verkehrenden Busflotte. Bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von ca. 60 000km im Jahr kann man von 200 im Grazer Stadtgebiet eingesetzten Stadtbussen ausgehen. Damit müssten gemäß Annahme im Szenario 40 EURO 3 Busse ersetzt werden.

Tabelle 2 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Stadtbusszenarien. Durch das Erneuern von 40 EURO III Bussen durch hybridisierte EURO VI Busse ergeben sich, bei „normalem“ Fahrstil, in der Stadtbusflotte (200 Busse) Emissionsminderungen von rund 8.5 % bei CO₂, 10.5 % bei NO_x, knapp 14 % bei motorischen Partikeln sowie rund 3 % bei den PM10 Gesamtemissionen (inkl. Feinstaubemissionen durch Abrieb und Aufwirbelung). Bezogen auf die Gesamtemissionen des Straßenverkehrs in Graz sind dies Emissionsminderungen, bei „normalem“ Fahrstil, von 0.3 % bei CO₂, knapp 1 % bei NO_x und PM10 motorisch sowie 0.2% bei PM10 Gesamtemissionen. Durch die Nutzung des EcoDrive ergeben sich, im Vergleich zum „normalen“ Fahrstil, um 18% höhere Emissionseinsparungen. Ein Großteil der Emissionsminderungen lässt sich auch durch Beschaffung konventioneller EURO VI Busse erreichen.

Tabelle 2: Emissionswirkungen am Grazer Stadtgebiet in den Szenarien für 2015 (es wurden jeweils 40 EURO III Busse aus der Flotte von 200 Bussen ersetzt)

Beschreibung	CO ₂ [t/a]		NO _x [t/a]		PM10 motorisch [t/a]		PM10 Gesamt [t/a]	
	Stadt-busflotte	Straßen-verkehr gesamt	Stadt-busflotte	Straßen-verkehr gesamt	Stadt-busflotte	Straßen-verkehr gesamt	Stadt-busflotte	Straßen-verkehr gesamt
Basisszenario	9 183	280 315	78	885	1.25	22.73	5.75	82.37
EURO3 ersetzt durch EURO VI (konv.)	8 538	279 670	71	878	1.10	22.58	5.61	82.23
<i>Veränderung ggü Basis</i>	-7.0%	-0.2%	-8.8%	-0.8%	-11.7%	-0.6%	-2.5%	-0.2%
EURO3 ersetzt durch EURO VI HEV ("normaler Fahrstil")	8 409	279 541	70	876	1.07	22.56	5.58	82.20
<i>Veränderung ggü Basis</i>	-8.4%	-0.3%	-10.5%	-0.9%	-14.1%	-0.8%	-3.1%	-0.2%
EURO3 ersetzt durch EURO VI HEV ("EcoDrive")	8 271	279 403	68	875	1.04	22.52	5.55	82.17
<i>Veränderung ggü Basis</i>	-9.9%	-0.3%	-12.4%	-1.1%	-16.6%	-0.9%	-3.6%	-0.3%

3.5.4 Hybridisierung der PKW-Flotte

Gemäß Statistik Austria waren im Jahr 2011⁸ knapp 2 % aller neuzugelassenen Pkw mit Ottomotor hybridisiert. Diesel-HEV waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht am Markt. Im Basisszenario werden diese Werte als Vergleichswert fortgeschrieben. In den Berechnungen für die Auswirkung einer verstärkten Hybridisierung der Pkw-Flotte wird angenommen, dass in den Jahren 2014 und 2015 10 % aller neuzugelassenen PKW (sowohl Otto- als auch Dieselfahrzeuge) hybridisiert sind. Damit ergibt sich für Ende 2015 ein Fahrleistungsanteil von Hybridfahrzeugen an den Pkw-Kilometern von rund 2.5 %. In den Berechnungen wird zusätzlich zwischen den zwei Grenzfällen unterschieden, dass die Fahrer aller Hybridfahrzeuge (neu zugelassene und alte) den Eco-Drive nutzen bzw. den „normalen“ Fahrstil an den Tag legen. Gegenüber einem nicht-hybriden EURO VI PKW wurden dabei in den Berechnungen Verbrauchs und Emissionsreduktionen von 20 % (normaler Fahrstil) bzw. 35 % (EcoDrive) unterstellt.

Tabelle 3 zeigt die berechneten Auswirkungen auf die Emissionen im Grazer Stadtgebiet für das Jahr 2015. Bezogen auf die Gesamtemissionen des Verkehrs im Grazer Stadtgebiet, wurden CO₂-Einsparungen von 0.7 % („Eco-Drive“) bzw. 0.4 % bei „normalem Fahrstil“ berechnet. Bei NO_x bzw.-Partikelemissionen ergeben sich nur sehr geringfügige Reduktionen. Diese im Vergleich zu den Stadtbusszenarien relativ geringen Auswirkungen bei NO_x und PM kommen durch die Randbedingung zustande, dass bei Pkw die Hybridfahrzeuge im Zuge der natürlichen Flottenerneuerung angeschafft

⁸ Für 2012 liegen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch keine Daten vor.

werden, während bei Stadtbussen ein sofortiger Austausch aller EURO III Altfahrzeuge unterstellt wurde. Letzteres ist nur für Busflotten ein realistisches Szenario.

Tabelle 3: Verbrauch und Emissionen je eingesetzten PKW-Hybriden

Beschreibung	CO ₂ [t/a]		NO _x [t/a]		PM ₁₀ motorisch [t/a]		PM ₁₀ Gesamt [t/a]	
	PKW-flotte	Straßenverkehr gesamt	PKW-flotte	Straßenverkehr gesamt	PKW-flotte	Straßenverkehr gesamt	PKW-flotte	Straßenverkehr gesamt
Basisszenario	200 623	280 315	385.2	884.5	11.393	22.731	44.613	82.374
10% HEV-Anteil an Neuzul ("normaler Fahrstil")	199 812	279 504	384.5	883.9	11.386	22.724	44.606	82.366
Veränderung ggü Basis	-0.40%	-0.29%	-0.17%	-0.07%	-0.06%	-0.03%	-0.02%	-0.01%
10% HEV-Anteil an Neuzul ("EcoDrive")	199 204	278 896	384.0	883.4	11.381	22.719	44.600	82.361
Veränderung ggü Basis	-0.71%	-0.51%	-0.29%	-0.13%	-0.11%	-0.05%	-0.03%	-0.02%

3.6 Untersuchung der Batteriealterung

Die Verwendbarkeit eines elektrischen Energiespeichersystems (Batterie) in einem Hybridfahrzeug ist charakterisiert durch die zur Verfügung stehende Energie und die Leistungsfähigkeit des Systems. Als entsprechende elektrische Größen sind hierfür die Kapazität und der äquivalente Widerstand des Systems zu nennen. Beide Größen sind einem Alterungsverhalten unterworfen, das bei der Lagerung des Systems durch ein sogenanntes kalendarisches Altern und bei Betrieb des Systems durch ein sogenanntes zyklisches Altern beschrieben wird. Die Haupteinflussfaktoren bei der kalendarischen Alterung sind der Ladungszustand (State of Charge, SOC) und die Temperatur. Bei der in diesem Projekt verwendeten Zellchemie läuft die kalendarische Alterung schneller sowohl wenn der Ladungszustand höher ist, als auch wenn die Temperatur höher ist. Bei der zyklischen Alterung sind die Einflussfaktoren vielfältiger und müssen für die Möglichkeit einer Lebensdauerabschätzung im Rahmen von aufwändigen Versuchsreihen ermittelt werden (Doczy, 2010-09). Aus diesen Experimenten werden als Haupteinflussfaktoren

- die Temperatur
- der Ladungszustand
- die Leistung

abgeleitet. Auch hier gilt bei der verwendeten Zellchemie, dass jeweils höhere Werte den Alterungsfortschritt beschleunigen.

Der Alterungszustand (SOH, State of Health) des Systems, getrennt nach SOH_{cap} für die Kapazität, SOH_{cha} für den äquivalenten Ladewiderstand und SOH_{dcha} für den äquivalenten Entladewiderstand, wird im Fahrzeug durch einen Algorithmus ermittelt, der den Alterungsfortschritt anhand der aktuellen Verwendung des Systems berechnet. Hierfür wird ein zu betrachtendes Zeitfenster im Bereich von mehreren Minuten festgelegt, und darin werden die Mittelwerte der vorhin angeführten Haupteinflussfaktoren auf die Alterung ermittelt. Gegenüber von Referenzwerten mit einem Alterungsfaktor von 1 können aus Wertetabellen für Abweichungen von diesen Referenzwerten Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsfaktoren für den Alterungsfortschritt ermittelt werden (Doczy, 2010-09). Diese Faktoren werden miteinander multiplikativ verrechnet, wodurch ein übergeordneter Faktor entsteht, der in Verbindung mit dem festgelegten Zeitfenster aus Betriebsstunden die äquivalenten

Alterungsstunden ermittelt. Auf Basis dieser Alterungsstunden können wiederum aus einer Wertetabelle eine zu erwartende aktuelle Kapazität und die zu erwartenden Lade- bzw. Entladewiderstände abgelesen werden. Der Zusammenhang zwischen dem erwarteten Kapazitätsverlust bzw. dem äquivalenten Alterungszustand für die Kapazität SOH_{cap} kann Abbildung 30 entnommen werden. Das erwartete Lebensdauerende (End of Life, EoL) ist mit 15 000 Alterungsstunden (ageing hours) bei einem Kapazitätsverlust auf 50 % erreicht. D. h. die Kapazität vom Zeitpunkt der Produktion (Begin of Life, BoL) sinkt durch die Nutzung bis zum Lebensdauerende auf 50 % des Anfangswertes.

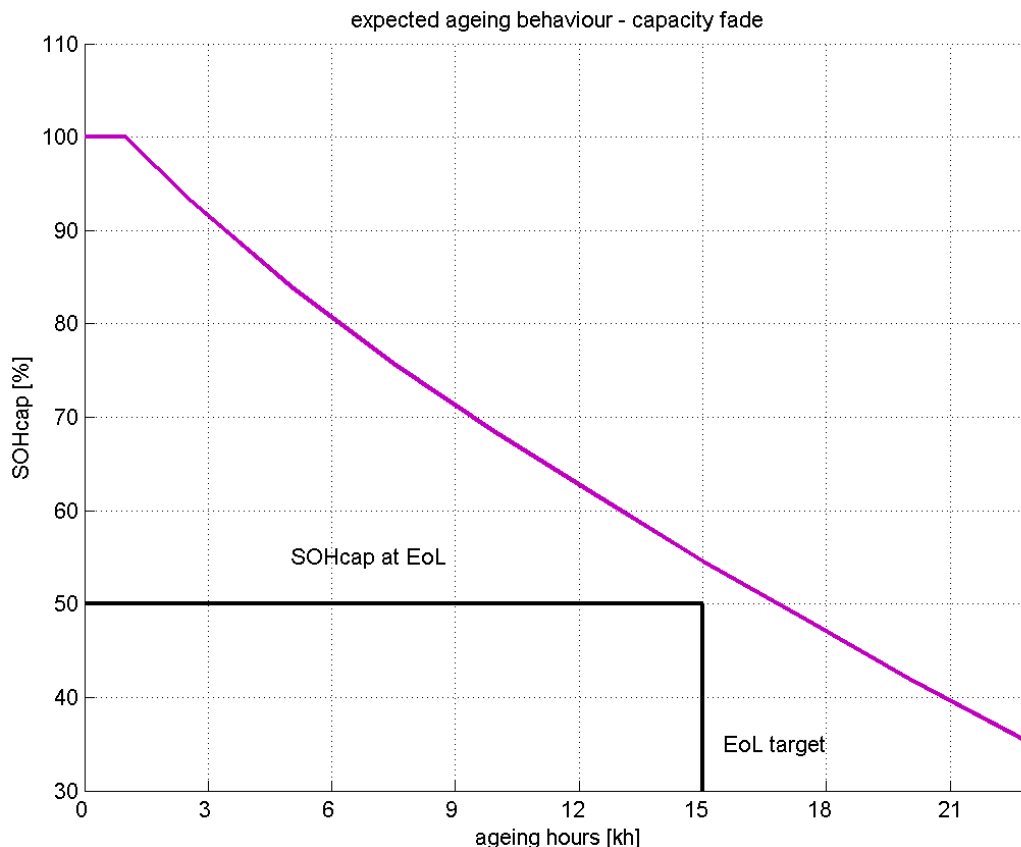


Abbildung 30: Referenzalterung - Kapazitätsverlust

Die Tatsache, dass die Kurve für die Referenzalterung beim EoL Ziel etwa 5 % über dem SOH_{cap} Wert von 50 % liegt, ist einer angenommenen Schwankungsbreite der Alterung unterschiedlicher Systeme geschuldet. Um für alle Systeme die gewünschte Kapazität gewährleisten zu können, wird dieser Abstand als ausreichend erachtet.

Im Betrieb des Fahrzeuges erfolgt die laufende messtechnische Erfassung der die Alterung beeinflussenden Faktoren, die aber aufgrund der großen Datenmengen im Serienbetrieb nicht gespeichert werden können. Durch die in diesem Projekt verfolgte mobile Messung der Batteriegrößen kann eine offline Validierung des SOH-Algorithmus durchgeführt werden (siehe 3.6.3).

Durch Referenzmessungen an der Batterie kann der erwartete mit dem realen Kapazitätswert verglichen werden (siehe Ergebnisse in 3.6.2).

3.6.1 Mobile Messung der Batteriegrößen

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Batterie mit einem Datenloggermodul ausgestattet (IPETRONIK M-LOG, <http://www.ipetronik.com>), das Daten im Betrieb aufnimmt und bei Stillstand des

Fahrzeuges an einen Server überträgt (Friedl, 2010-09). Zusätzlich zu den auch im Serieneinsatz der Batterie erhältlichen Daten wurden Temperatursensoren im Kühlmittelzufluss und -abfluss sowie Außentemperatursensoren und Feuchtigkeitsfühler verbaut. Die gesendeten Datenpakete entsprechen einzelnen Zündungszyklen, ein Zündungszyklus ist definiert vom Einschalten des Batteriesteuergerätes durch ‚Zündschlüssel ein‘ bis zum Abschalten des Batteriesteuergerätes nach ‚Zündschlüssel aus‘. In einem Datensatz sind neben der Batteriemessung auch Informationen zum Austausch zwischen dem Logger und dem Server vorhanden. Die übertragenen Daten werden in einer Datenbank nach Monaten sortiert abgespeichert. Über die Projektlaufzeit wurden etwa 4 000 Datensätze mit einem Volumen von etwa 20 GB aufgezeichnet.

3.6.1.1 Datenkonvertierung

Die am Server abgelegten Daten müssen vor der Verarbeitung konvertiert werden, um eine geschlossene Auswertung durchführen zu können. Dazu wurde das Matlab-Programmpaket *GvbDat2Mat* entwickelt, welches die Daten für die weiterführende Verwendung in Matlab aufbereitet. Hierzu werden unter anderem auch Programme verwendet, die vom Datenloggerhersteller zur Verfügung gestellt werden, z. B. IPEconverter (Friedl, 2010-09).

Während der gesamten Projektlaufzeit sind lediglich zwei Datensätze aufgetreten, die nicht konvertiert werden konnten. In diesen Fällen waren die Rohdaten beschädigt.

3.6.1.2 Zyklenanalyse

Als Zyklus wird ein Zündungszyklus am Fahrzeug betrachtet und analysiert (Definition Zündungszyklus siehe 3.6.1). Die Analyse klassifiziert einerseits den Stromverlauf und andererseits den Leistungsverlauf nach Kriterien, die aus der Erfahrung einen relevanten Einfluss auf die Alterung der Batterie haben. Der Stromverlauf muss für diese Analyse geeignet manipuliert werden, um eine saubere Trennung von Lade- und Entladepulsen zu ermöglichen. Dazu werden Ströme zwischen den Schranken $I_{0,min} < I < I_{0,max}$ durch 0 ersetzt. Bei der Analyse werden Lade- und Entladesituationen getrennt voneinander betrachtet, wobei beim Bremsen die Batterie geladen wird (positives Vorzeichen des Stromes) und beim Beschleunigen die Batterie entladen wird (negatives Vorzeichen des Stromes).

3.6.1.3 Dokumentation

Mit dem Matlab-Programmpaket *Evaluation* wird die Auswertung und Dokumentation der Batteriemessung durchgeführt. Beginnend bei jedem Zündungszyklus wird automatisiert ein Bericht im PDF-Format generiert, für den alle relevanten gemessenen Daten ausgewertet und Ergebnisse präsentiert werden. Dies sind Verläufe von z. B. Strom und Spannung über Zeit, aber auch die im Zyklus zurückgelegte Wegstrecke und der mit der Batterie erzielte Energiedurchsatz.

Ein Teil dieser Ergebnisse ist die oben angesprochenen Zyklenanalyse. Für jeden Tag, an dem Fahrten dokumentiert sind, werden die vorhandenen Zyklen zu einem Tagesbericht zusammengefasst. In dieser Tageszusammenfassung werden vor allem die Veränderungen zu dem jeweilig vorhergehenden Zyklus betrachtet. Für Versuchsfahrten am 26.3.2013 ist ein exemplarischer Tagesbericht Teil der übermittelten Ergebnisse (Doczy, 2013-06). In weiterer Folge werden Tageszusammenfassungen zu Monats- und Jahresberichten komprimiert, wobei schlussendlich ein Gesamtbericht entsteht, der die Ergebnisse über die gesamte Projektlaufzeit enthält. Diese Zusammenfassung ist ebenfalls Teil der übermittelten Ergebnisse (Doczy, 2013-07). Aus diesem Bericht ist zu entnehmen, dass das Fahrzeug im

Beobachtungszeitraum während 5 200 Betriebsstunden etwa 50 000 km gefahren ist und dabei etwa 60 000 kWh Energie über die Batterie umgesetzt wurden.

3.6.2 Prüfstandsmessung der Batterie

Das Prüfprogramm bei der Referenzmessung umfasst eine etwa 10-tägige Charakterisierung der Batterie, um bei unterschiedlichen Strömen und Temperaturen vor allem die Leistungsfähigkeit und die Kapazität bestimmen. Referenzmessungen wurden am Beginn, in der Mitte und am Ende des Projektes durchgeführt. Die genauen Daten und einige Parameter der Messungen sind in Tabelle 4 angeführt.

date	operating hours	ageing hours	SOHcap expected	capacity	SOHcap ref
	[h]	[h]	[%]	[Ah]	[%]
20101222	0,0	0,0	100,0	6,83	97,6
20120502	2344,5	2030,0	95,4	6,46	92,3
20130723	5251,4	4607,0	85,4	5,98	85,4

Tabelle 4: Referenzmessungen

Im Mai 2012 war ersichtlich, dass die Betriebsstunden unter den Erwartungen zurückgeblieben sind, daher wurde eine Verlängerung des Projektes auf Juli 2013 beantragt und bewilligt. Die Verlängerung bewirkte, dass zumindest ein Drittel der erwarteten Lebensdauer des Systems auch im Testbetrieb abgedeckt wurde.

Die Batterie war bis zum ersten Ausbau und der darauffolgenden Referenzmessung etwa 2 300 h im Einsatz. Dies entspricht nicht einer erwarteten Einsatzzeit von 4 000 h innerhalb der 10 Monate Betriebszeit der Batterie. Die ermittelten Alterungsstunden ergeben einen Wert von 2 030 h.

Die aufgenommenen Daten konnten für eine erste Analyse des Einsatzes der Batterie herangezogen werden und zeigen sehr deutlich, dass die für den als optimalen Betriebsbereich der Batterie definierten Temperaturen 25 °C bis 38 °C als auch der Ladungszustand 30 % SOC bis 45 % SOC mit der übergeordneten Fahrzeugregelung gut eingehalten werden.

Der Kapazitätstest bei 31 °C Kühlungseingangstemperatur zeigt eine Systemkapazität von 6.46 Ah. Laut Alterungsreferenzkurve wird für 2 030 h eine Kapazität von 6.68 Ah erwartet.

Eine Auswertung für die Leistungsfähigkeit bei 31 °C Kühlungseingangstemperatur zeigt bei 50 % Ladungszustand für 10 s eine Entladeleistungsfähigkeit von etwa 130 kW und eine Ladeleistungsfähigkeit von etwa 110 kW. Das bedeutet, dass die Begin of Life Anforderungen von 120 kW für Entladen und 90 kW für Laden auch nach 2 300 Betriebsstunden noch gewährleistet sind.

Bis zum zweiten Ausbau und der darauffolgenden Referenzmessung war die Batterie etwa 5 300 h im Einsatz. Die ermittelten Alterungsstunden ergeben einen Wert von 4 600 h. Der Betriebsbereich bezüglich Kühlmitteltemperatur und SOC-Fenster wurde wiederum eingehalten. Der Kapazitätstest ergab 5.98 Ah gegenüber einem angenommenen Wert von ebenfalls 5.98 Ah aus der Referenzkurve. Die max. Entladeleistung bei 31 °C Kühlmittel und 50 % SOC lag innert 10 s bei 130 kW, die max. Ladeleistung bei 105 kW. Somit konnten die BoL Anforderungen auch nach 5 300 Betriebsstunden noch eingehalten werden.

In Abbildung 31 wird die angenommene Alterungskurve mit den Messungen verglichen. Nach 4 600 Alterungsstunden sind prognostizierte und gemessene Kapazität annähernd gleich. Dies ergibt sich aber nicht durch ein exaktes Folgen der Alterung im Betrieb der Referenzkurve entsprechend, sondern durch Überlagerung zweier gegenläufiger Effekte. Auf der einen Seite wird die zyklische Alterung im Betrieb bei den auftretenden Bedingungen überbewertet. D. h. nach 4 600 Alterungsstunden sollte den realen Bedingungen entsprechend die prognostizierte Kapazität um einige Prozentpunkte höher liegen. Auf der anderen Seite wird durch die nicht berücksichtigte kalendarische Alterung und vor allem durch die geringere Anzahl der Betriebsstunden im untersuchten Zeitraum dieser Effekt exakt kompensiert.

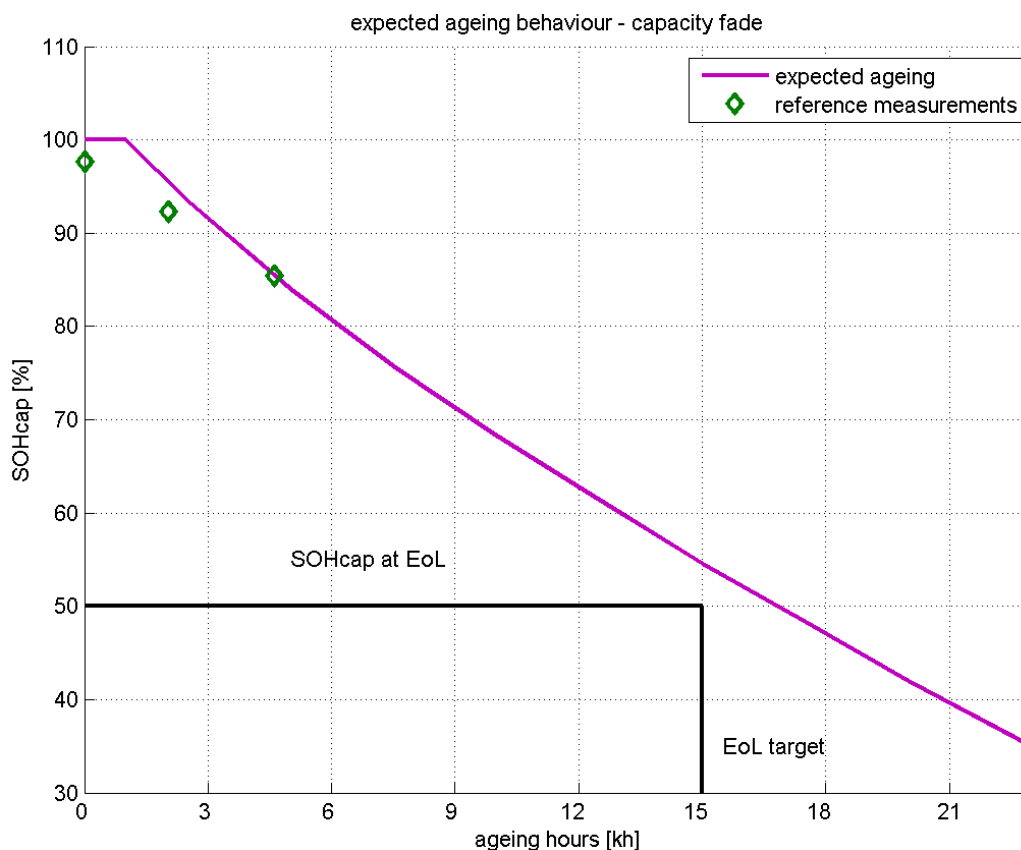


Abbildung 31: Vergleich Referenzalterung und Referenzmessung

Aus den in Abbildung 31 dargestellten Ergebnissen ist zu erwarten, dass bei Weiterführung der Messung der reale Kapazitätsverlauf einen verlangsamten Alterungsverlauf zeigen sollte. D. h. die Verwendung der Batterie im Fahrzeug zeigt ein langsames Alterungsverhalten als durch Referenzmessungen am Prüfstand festgestellt.

3.6.3 Validierung der Batteriealterung

Auf Basis der Messdaten wurde das Verhalten des SOH-Algorithmus offline validiert. Der zyklusbezogene Alterungsfortschritt wird mit den in 3.6 beschriebenen Beschleunigungsfaktoren wie erwartet berechnet und in dem die Alterung repräsentierenden SOH Wert widerspiegelt. Unterschiedliche Mittelwerte von Ladungszustand (SOC), Temperatur und mittlerer Leistung zeigen den erwarteten Einfluss auf die Berechnung der Alterungswerte. Die Validierung wurde nur exemplarisch an einigen Zyklen gezeigt und nicht auf den gesamten Datensatz angewendet.

3.6.4 Einfluss der Fahrweise auf die Batteriealterung

Der Einfluss der Fahrweise auf die Batteriealterung ergibt sich aus unterschiedlichen Fahrten, die im Rahmen des Projektes durchgeführt und gesondert analysiert wurden. Grundsätzlich wurde gezeigt, dass vor allem das Bremsen einen wesentlichen Einfluss auf das während der Fahrt verwendbare Energiefenster aufweist und bei geeigneter Anwendung auch zu einer Anhebung des Ladungszustandes verwendet werden kann.

3.6.4.1 Einfluss von unterschiedlichen Fahrstilen

Im Feber und März 2012 wurden im Stadtgebiet von Graz Versuchsfahrten mit unterschiedlichen Fahrstilen durchgeführt. Dabei wird zwischen einem passiven und aggressiven Fahrstil unterschieden. Für beide Fahrstile wurden für die Beurteilung hinsichtlich der Batteriealterung zwei Fahrten ausgewählt und folglich 4 Fahrten miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

	duration	temp_avg	SOC_avg	P_avg	energy	rel ageing
	[s]	[°C]	[%]	[kW]	[kWh]	[1]
pass_T1	5320	27,9	38,4	17,1	25,56	0,813
pass_T2	5050	32,1	38,8	18,8	26,61	0,956
aggr_T1	4870	33,2	37,9	23,3	31,75	1,120
aggr_T3	4625	31,2	37,4	23,5	30,28	1,062

Tabelle 5: Vergleich Fahrstile

Auf Basis der Bewertung der Haupteinflussfaktoren auf die Alterung können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der Fahrstil hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Systemtemperatur.
 - o Im ersten Zyklus ist das Aufwärmen ein Teil des Tests, daher liegt die Durchschnittstemperatur etwa 4°C unter den anderen Durchschnittstemperaturwerten.
- Der Fahrstil hat keinen wesentlichen Einfluss auf den durchschnittlichen Ladungszustand.
- Der Fahrstil hat einen wesentlichen Einfluss auf die durchschnittliche Leistung.
 - o Der aggressive Fahrstil führt zu einer um nahezu 25 % höheren durchschnittlichen Leistung im Fahrzyklus.
 - o Bezogen auf die durchschnittliche Leistung des Referenzzyklus für die Altersbestimmung ergeben sich folgende Abweichungen.
 - § Passiver Fahrstil -18 %
 - § Aggressiver Fahrstil +6 %

Auf Basis dieser Werte und unter der Annahme gleicher Temperatur und Ladungszustandsverhältnisse lässt sich folgende Lebensdauerabschätzung in Abhängigkeit vom Fahrstil darstellen:

- Der passive Fahrstil führt zu einer Verlängerung der Lebensdauer um 11 % oder 1 650 Betriebsstunden.
 - o Der über die Lebensdauer zu erwartende Energiedurchsatz des Systems liegt demzufolge bei etwa 300 MWh.
- Der aggressive Fahrstil führt zu einer Verkürzung der Lebensdauer um 7 % oder 1 050 Betriebsstunden.
 - o Der über die Lebensdauer zu erwartende Energiedurchsatz des Systems liegt demzufolge bei etwa 326 MWh.

In Abbildung 32 ist die vom Batteriesteuergerät ermittelte Alterung für die Testfahrten dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können werden die Daten um einen frei gewählten Zeitpunkt 0 gleichgesetzt.

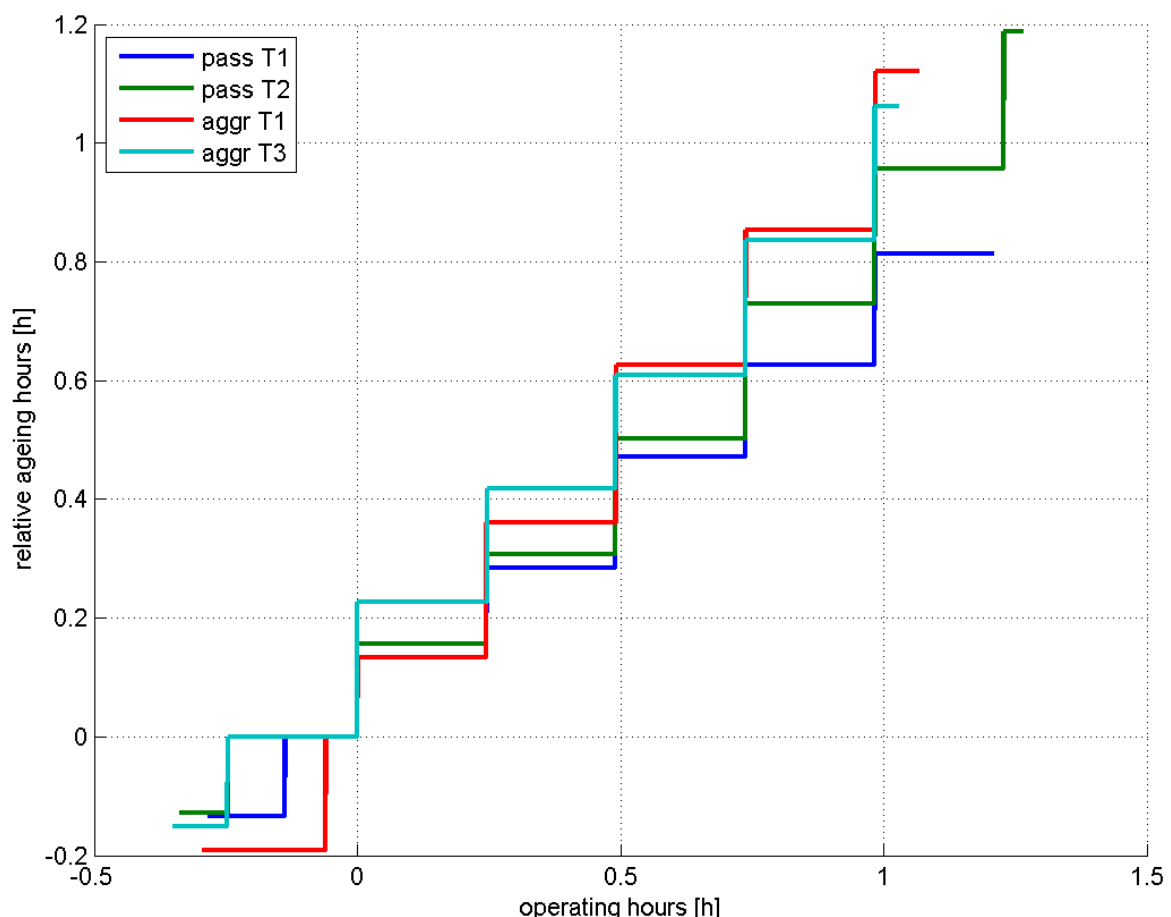


Abbildung 32: Ermittlung Alterungsstunden

Aus Tabelle 5 können die ermittelten Alterungsstunden zu Ende einer Betriebsstunde mit dem Wert *rel ageing* abgelesen werden. Dieser Wert gibt für eine Betriebsstunde den entsprechenden Alterungsstundenwert wieder, d. h. ein *rel ageing* Wert kleiner als 1 bedeutet einen gegenüber der Referenzalterung verlangsamten Alterungsverlauf, ein Wert größer als 1 bedeutet einen gegenüber der Referenzalterung beschleunigten Alterungsverlauf.

Die in Abbildung 32 dargestellten Ergebnisse spiegeln die Ergebnisse aus Tabelle 5 wieder. Der Einfluss des Fahrstils ist sowohl offline als auch online deckungsgleich.

3.6.4.2 Einfluss der durchgeführten Schulung

Im Rahmen des Projektes wird eine Schulung von fünf Busfahrern durchgeführt, die darauf abzielt, durch einen ökologischen Fahrstil einen möglichst geringen Kraftstoffverbrauch zu erreichen. Die Auswirkung dieser Schulung auf die Haupteinflussfaktoren für die Batteriealterung wird untersucht. Die Ergebnisse für die ungeschulten Fahrer sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

	duration	temp_avg	SOC_avg	P_avg	energy
	[s]	[°C]	[%]	[kW]	[kWh]
Driver 1	1574	29,1	36,0	20,8	9,11
Driver 2	1651	30,2	36,5	20,9	9,61
Driver 3	1606	30,1	36,1	22,5	10,04
Driver 4	1679	30,1	36,0	19,3	9,02
Driver 5	1720	30,0	36,9	19,1	9,13
Average	1646	29,9	36,3	20,5	9,38

Tabelle 6: Auswertung Schulungsfahrten Teil 1

Die Ergebnisse für die geschulten Fahrer sind aus Tabelle 7 ersichtlich.

	duration	temp_avg	SOC_avg	P_avg	energy
	[s]	[°C]	[%]	[kW]	[kWh]
Driver 1	1798	26,6	36,9	18,9	9,44
Driver 2	1728	30,0	37,0	20,0	9,60
Driver 3	1661	30,1	36,8	18,4	8,50
Driver 4	1680	30,1	37,3	21,0	9,78
Driver 5	1714	30,1	37,5	21,2	10,09
Average	1716	29,4	37,1	19,9	9,48

Tabelle 7: Auswertung Schulungsfahrten Teil 2

Die detaillierte Auswertung der Daten zeigt, dass hinsichtlich der Alterung kein wesentlicher Einfluss der Schulung festgestellt werden kann. Vergleicht man die über alle Fahrer gemittelten Werte aus Tabelle 6 und Tabelle 7 sind folgende Erkenntnisse darstellbar:

- Die Schulung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Systemtemperatur.
- Die Schulung hat keinen wesentlichen Einfluss auf den durchschnittlichen Ladungszustand.
- Die Schulung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die durchschnittliche Leistung.

Ein berechneter Unterschied in der zu erwartenden Lebensdauer auf Basis der Ergebnisse der Schulungsfahrten ist kleiner als 0.2 % oder 30 h, da der etwas niedrigere durchschnittliche Ladungszustand (+ 1.6 %) durch eine etwas höhere durchschnittliche Leistung (- 1.5 %) kompensiert wird. Da aber bezüglich des Kraftstoffverbrauches eine Einsparung von etwa 10 % darstellbar ist, kann gezeigt werden, dass die Schulung auf die Gesamteffizienz einen signifikanten, positiven Einfluss zeigt.

3.7 Betriebserfahrung mit dem Hybridbus

Der Hybridbus ist seit 6/2010 bei den HGL im Erprobungsbetrieb. Die Verwendung wechselte zwischen dem Linienbetrieb, technischen Versuchen und Messungen bei der TU Graz und bei Magna sowie der Präsentation auf Messen und Ausstellungen. In diesem Kapitel werden die praktischen und wirtschaftlichen Aspekte des Hybridbusses im Alltagsbetrieb erläutert. Dabei ist zu beachten, dass das untersuchte Fahrzeug Volvo 7700LH ganz vom Beginn der Serienfertigung ist und dieses Modell nicht mehr produziert wird.

Ende 2011 wurde der Nachfolger 7900LH vorgestellt und ab 2014 ist die 7900er Stadtbusrreihe nur noch mit Hybridantrieb erhältlich.

3.7.1 Methoden zur Kontrolle des Busbetriebs

Die HGL kontrollieren den Betrieb ihrer Busse und Straßenbahnen mit einem computergestützten Betriebsleitsystem (ITCS - Intermodal Transport Control System) von der Remise Steyrergasse aus. Der Betriebsfunk läuft über zwei Relaisstationen auf dem Schlossberg und Plabutsch, jedes Fahrzeug übermittelt kontinuierlich seine Position an die Betriebsleitstelle. Somit können Betriebsstörungen schnell erkannt und behoben werden.

Für das EHEV Projekt war der Verbrauch der Busse relevant. Für jeden Einzelbus wird pro Tag aufgeschrieben

- km Anfang, km Ende
- Tankmenge in Litern. Getankt wird täglich nach Dienstende.
- Personalnummern der FahrerInnen und Reihenfolge, in der diese den Bus gefahren haben. Pro Tag wird ein Bus von 3 bis 5 FahrerInnen gefahren, je nach Einsatzdauer.

Das heißt, dass der Streckenverbrauch eines Busses nur einer Fahrergruppe, nicht aber Einzelpersonen zugeordnet werden kann. Daher ist die Feststellung, ob einE FahrerIn mehr oder weniger konsequent Kraftstoff spart, nicht möglich. Des Weiteren sind teilweise Werkstatt- oder andere Dienstfahrten im Tankprotokoll enthalten, was aufgrund fehlender Bemerkungen nicht mehr rausgefiltert werden kann.

Für den Herbst 2021 wurden systematisch die Tankprotokolle für den Hybridbus Volvo 7700LH EEV und die Standardbusse Mercedes Benz Citaro Euro 3 ausgewertet, siehe Abbildung 33.

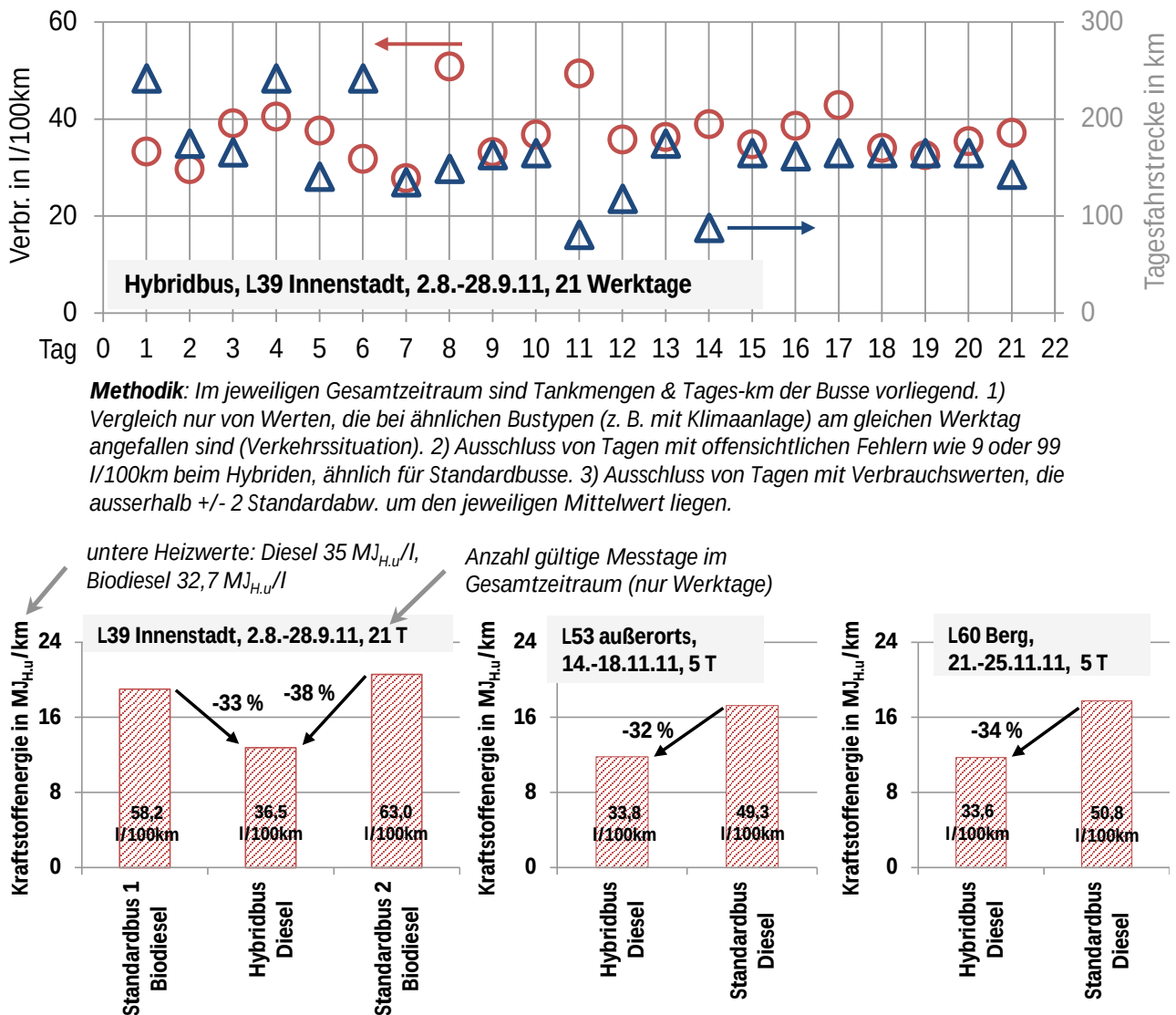


Abbildung 33: Tankdatenauswertung für Linie 39, 53 und 60
Vergleich zwischen Volvo 7700LH EEV und MB Citaro Euro 3 (Blassnegger, 2012-11)

Mit diesen Daten und der Auswertemethode kann zumindest zuverlässig der Unterschied zwischen zwei Bustypen beim mittleren Streckenverbrauch im realen Linienbetrieb ermittelt werden.

Um den Streckenverbrauch fahrerIngenau zuordnen zu können, ist die Technik bereits vorhanden. Alle modernen Linienbusse übermitteln per Datenfunk eine ganze Reihe von Betriebsdaten an die Hersteller, darunter auch Messdaten der Sensoren, die über den fahrzeuginternen CAN-Bus miteinander kommunizieren.

Für die Kontrolle des Streckenverbrauchs sind die Geschwindigkeit und der Kraftstoffdurchfluss interessant. Bei allen Schulungsfahrten mit dem Hybridbus, siehe Kapitel 3.2.2, wurde beiden mit PEMS und über den CAN-Bus mitgemessen. Für den Vergleich siehe Abbildung 34.

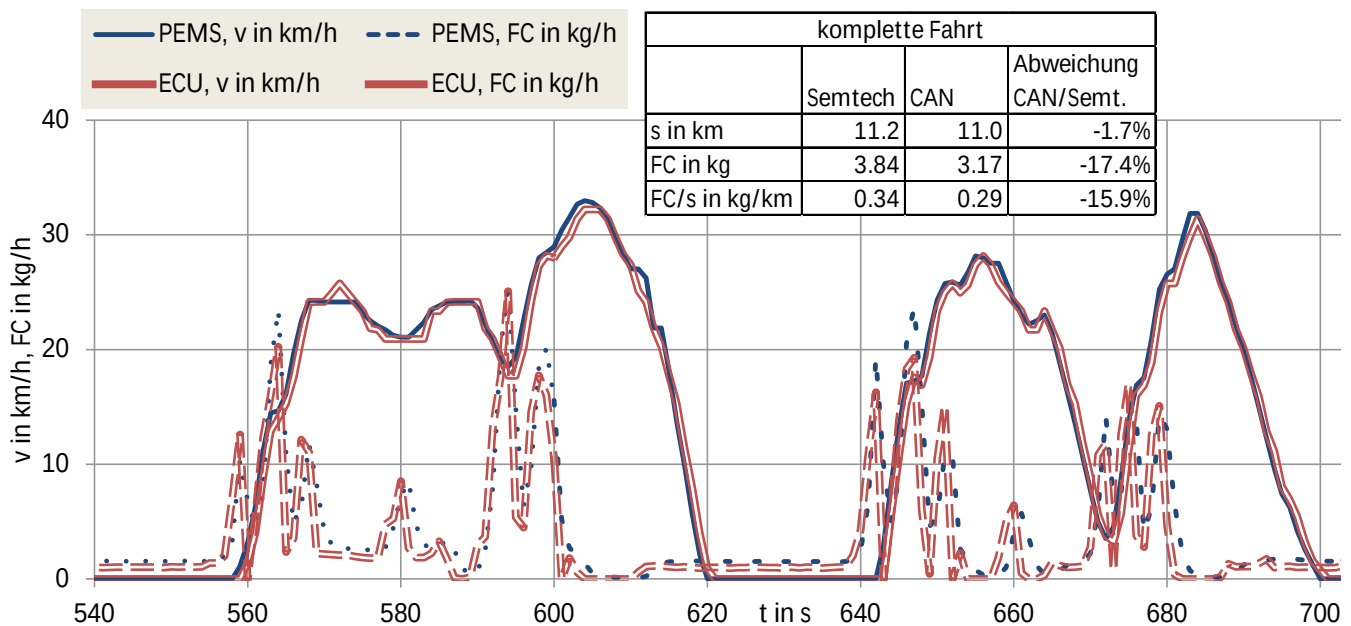


Abbildung 34: Vergleich zwischen PEMS und fahrzeugeigenen Messwerten aus dem CAN-Bus, Auszug aus einer Messfahrt.

Beim PEMS wird die Geschwindigkeit per Satellitennavigation gemessen, im Fahrzeug mit der Ausgabe der Drehzahlsensoren des ABS Systems berechnet. Beim Verbrauch fällt die große Abweichung zwischen PEMS und dem Motorsteuergeräte (ECU) auf. Der Hauptgrund dafür sind die unterschiedlichen Messverfahren, welcher Wert genauer ist, konnte nicht festgestellt werden.

Was die Wiederholbarkeit über 10 Messungen à 11 km angeht (5 Fahrer, jeweils zwei Fahrstile): Die Abweichung des Streckenverbrauchs vom CAN zum PEMS lag im Mittel bei - 15.9 % (min. - 16.5 %, max. - 15.2 %).

Der aus den fahrzeugeigenen Messwerten berechnete Streckenverbrauch sollte jedenfalls ausreichend genau sein, um bei *baugleichen Fahrzeugen mit identischen Steuergeräteprogrammen* den relativen Unterschied zwischen Einzelfahrten zu bestimmen.

Für die Vergleichsmessung zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen muss weiterhin mit einem externen, kalibrierten Messgerät gearbeitet werden, da die möglichen Störeinflüsse auf die borgeigenen Geräte in Form von Bauteilunterschieden, Programmständen oder gar händischen Eingriffen mannigfaltig sind.

Vom Bordrechner der Busse kann also der Verbrauch zur Leitstelle gefunkt werden, eventuell über den Umweg der Niederlassung des Herstellers.

Von Digitaltacho kommen die Fahrer Nummer und die Start- und Endzeiten der Einzelschichten.

Mit diesen Daten ist es möglich, pro Tag und Schicht den Streckenverbrauch fahrerInnen genau zuzuordnen. Die Technik ist vollständig vorhanden, es fehlt nur noch Übermittlung der Verbrauchsdaten an die Leitstelle. Ein Datenschutzproblem besteht vermutlich nicht, weil die Zuordnung von Fahrer Nummer und Verbrauch nur innerhalb der HGL möglich ist.

Eine Möglichkeit, die FahrerInnen zu einem sparsamen Fahrstil zu motivieren, wäre ein Bonussystem. Die besten FahrerInnen könnten z. B. einen Anteil dessen, was sie im Vergleich zum Mittelwert an Kraftstoffkosten einsparen, ausbezahlt bekommen. Um die Akzeptanz innerhalb der Belegschaft zu vergrößern, muss sichergestellt sein, dass alle FahrerInnen im Vergleichszeitraum unter gleichen

Bedingungen unterwegs sind. Z. B. falls ein Fahrer häufiger als andere Freitagnachmittags im stockenden Wochenendverkehr unterwegs ist, wird er immer viel verbrauchen, egal wie gekonnt er Hybridbus fährt. Ein möglicher Vergleichszeitraum wären die Werktage Di - Do außerhalb der Ferien. Mit der Annahme, dass innerhalb eines Quartals die FahrerInnen gleichmäßig auf Früh-, Mittag- und Spätschicht verteilt werden, sollten für alle gleiche Bedingungen herrschen, weil jedeR gleich viel inner- und außerhalb des Berufsverkehrs unterwegs wäre.

3.7.2 Hybridbusse im Alltagsbetrieb

Eine Befragung der Fahrer ergab positive und negative Kritik sowie Anregungen, die Handhabung des Hybridbusses zu verbessern.

Positive Erfahrungen

- o Die Möglichkeit, leise und schadstofffrei elektrisch zu fahren, was besonders in Wohngebieten wünschenswert ist.
- o Der kleine Wendekreis des 7700LH, was zu besserer Wendigkeit im Innenstadtverkehr führt.
- o Der Hybridbus ist zuverlässig. Wenn man ihn richtig bedient, fährt er genauso gut wie die bewährten Standardbusse.

Negative Erfahrungen

- o Der für das elektrische Fahren notwendige Mindest-Ladestand der Batterie wird nur selten erreicht.
- o Wenn nach dem elektrischen Anfahren auf VKM-Antrieb umgeschaltet wird, entsteht eine merkbare Beschleunigungspause. Dies führt dazu, dass nach der Abfahrt an einigen Ampeln "Grün" nicht mehr erreicht wird, was mit den Standardbussen jedoch möglich ist.
- o Die Bedienung ist komplizierter und weniger intuitiv als bei den Standardbussen. Für den Startvorgang nach Umlegen des Hauptschalters braucht es ein bestimmtes Prozedere, wann welcher Taster betätigt wird. Ansonsten startet der Verbrennungsmotor nicht, oder der Bus fährt nicht an. "Einschalten und los" funktioniert nicht.

Anregungen

- o Ein Retarderhebel unter dem Lenkrad für die elektrische Nutzbremse. Bisher wird auf den ersten 20 % des Bremspedalweges bis zu einem leichten Widerstand rekuperiert, wobei mit dem Fuß nicht exakt dosiert werden kann. Mit einem Retarderhebel hätten die Fahrer die Möglichkeit, die elektrische Bremse und den Ausrollvorgang vor Ampeln und Haltestellen besser zu kontrollieren.
- o Die Möglichkeit, häufig und bis 30 km/h elektrisch anzufahren, sowie die Umschaltung vom Elektro- zu Verbrennungsmotor mit dem Gaspedal zu kontrollieren. Nach dem bisher seltenen elektrischen Anfahren wird immer bei fix 17 km/h der VKM zugeschaltet und die Fahrer haben hierauf keinen Einfluss. Diese Umschaltung und die Gangwechsel selber lassen sich nicht mit der Gaspedalstellung steuern, wie das bei den meisten Automatgetrieben möglich ist

Von Seiten der Betriebswerkstatt der HGL gab es keine positiven oder negativen Besonderheiten des Hybridbusses zu berichten. Lediglich eine Türstörung ist aufgefallen. Bei Betriebsmitteln und

Verschleißteilen wie Motoröl, Frostschutz, AdBlue, Getriebeöl, Bremsbeläge und Bremsscheiben gab es keine auffälligen Unterschiede zu den Standardbussen.

Zum Fahrzeugverschleiß sei angemerkt, dass der Hybridbus nur von Mo bis Fr eingesetzt wurde, nicht permanent im Linienbetrieb war und zwischendurch für Messungen oder Präsentationen ausgeliehen wurde.

Des Weiteren wurde das Fahrzeug von der zuständigen Volvo Vertragswerkstatt in Unterpremstätten stets sehr zuvorkommend gewartet. Z. B. konnten die meisten Arbeiten am 600 V Hochspannungskreis nicht von den HGL selber gemacht werden, so dass der Bus öfter bei Volvo war.

Obwohl das untersuchte Fahrzeug weniger betrieben und besser gewartet wurde als Standardbusse, ist es wahrscheinlich, dass es auch im normalen Linienbetrieb keine negativen Auffälligkeiten geben wird.

3.7.3 Auswirkungen von Eco-Drive auf den Fahrplan

Am Anfang des Projektes war noch nicht klar, wie man Hybridfahrzeuge möglichst sparsam betreiben kann. Es wurde lediglich angenommen, dass eine zurückhaltende, passive Fahrweise zu weniger Kraftstoffverbrauch führen wird, ähnlich wie bei konventionellen Fahrzeugen. Die Vergleichsmessung auf der 20 km langen Linie 31 (Abbildung 6) zeigte zwar, dass man bei passiver Fahrt über 20 % Kraftstoff einsparen kann, die Rolldauer jedoch 8 min länger wird:

Das ist für den Linienbetrieb mit einem 10-minütigen Bustakt nicht akzeptabel, weil ein zusätzlicher Bus für eine gleichbleibende Transportleistung angeschafft werden müsste. Aufgrund dieser Forderung nach einer sanfteren, "gleitenden" Fahrweise wurde der Hybrid auch nicht auf den schnellen Linien eingesetzt.

Die Fahrer kennen den Zielkonflikt zwischen Pünktlichkeit und Sparsamkeit ebenfalls. In ihrer Fahrpraxis ist es so, dass sie die Abfahrtszeiten an den Haltestellen einhalten sollen, dies aber aufgrund der Verkehrssituation nicht immer möglich ist. Sie kennen ihre Minuszeit in Minuten, was einigen Druck aufbaut. Im Zweifel wird mehr Gas gegeben, um das Minus aufzuholen, was schlecht für den Verbrauch ist. Die vorgesehene Haltedauer an den Endhaltestellen ist neben der Pause auch dafür gedacht, Verspätungen von einigen Minuten ausgleichen zu können.

Im Falle größerer Verspätungen wird anders verfahren. Z. B. kommt es Mo-Morgen oder Fr-Nachmittag regelmäßig zu Staus wegen des Wochenendverkehrs, wo der Fahrplan nicht mehr annähernd eingehalten werden kann. Ist ein Bus so stark verspätet, dass der nachfolgende Wagen fast gleichauf ist, wird er aus der Linie genommen, wenn der Betrieb es zulässt. Dafür fährt an einer weiter vorne liegenden Haltestelle, z. B. dem Jakominiplatz, ein Ersatzbus pünktlich ab. Kommt der stark verspätete Bus dort an, ist die Fahrt zu Ende und die Passagiere steigen in den direkt folgenden Bus um, der besser im Fahrplan ist. Der verspätete Bus ist nun der Ersatzbus.

Jeder FahrerIn vermeidet, wegen eines sparsamen Fahrstils so langsam zu werden, dass man aus der Linie genommen würde.

Daher ist eine Kompromisslösung notwendig, die ein kleines Verhältnis von Verspätung zu Einsparung bietet. Diese wurde bei der Schulung gefunden. Mit der Vorgabe, Vollgas anzufahren und sanft zu bremsen, wurden auf der 8.3 km langen Teststrecke 10 % Kraftstoff eingespart, wobei sich die Rolldauer um 1 min verlängerte (Abbildung 9).

Auf einer 20 km langen Buslinie würde dies zu einer rechnerischen Verlängerung der Rolldauer von ca. 2.4 min führen, ohne Berücksichtigung von Verkehrseinflüssen wie Verkehrslichtsignalschaltungen etc.

Dies könnte den FahrerInnen zumutbar sein. Der Aufwand bei einer 20 km langen Linie ist eine Verlängerung der Umlaufdauer von wenigen Minuten, der Nutzen eine Einsparung an Diesel von ca. 0.78 €. Bei einer Jahresfahrstrecke von 80 tsd. km sind das 3120 € weniger Diesel pro Jahr und Bus.

3.7.4 Wirtschaftlichkeit von Hybridbussen

"Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen."⁹

Dieser Spruch beschreibt treffend das Problem, die Wirtschaftlichkeit von Hybridbussen im direkten Vergleich mit verbrauchsoptimierten Standardbussen zu berechnen: Man kann nicht 10 Jahre in die Zukunft schauen. Das müsste man aber können, um die korrekten Werte für den Kraftstoffpreis und den Batteriesystempreis beim Austausch einzusetzen.

Letztendlich ist die Anschaffung eines Hybridbusses eine Spekulation auf steigende Kraftstoff- und sinkende Batteriepreise, die aufgehen kann oder nicht.

Es sei angemerkt, dass alle Zahlen für diese Wirtschaftlichkeitsrechnung nach bestem Wissen vom IVT bei den HGL, Volvobus Österreich und Magna E-Car gesammelt und geprüft wurden. Die genauen Preise können aus Gründen der Vertraulichkeit nicht veröffentlicht werden, daher werden meist nur Preisunterschiede zwischen Hybrid- und Standardbus genannt. Der Rechengang wird in Abschnitt 7.3 detailliert beschrieben.

Mit Ausnahme der zukünftigen Kraftstoff- und Batteriepreise sind alle Kosten bekannt (Auszug):

- o Aufpreis Hybridbus
- o Zinssatz Fremdkapital für Investitionskosten
- o Aktueller Batteriepreis
- o Abschlag für Großkunden beim Dieselpreis, gegenüber Tankstellenpreisen
- o Kosten der Wartungsverträge für Hybrid- und Standardbus
- o Durchschnittliche Jahresfahrleistung der Busse
- o Durchschnittlicher Streckenverbrauch der Standardbusse

Für die unbekannten Kosten können nur begründete Annahmen getroffen werden. Um einen Eindruck von der möglichen jährlichen Entwicklung des Kraftstoffpreises zu bekommen, wurde der inflationsbereinigte Tankstellenpreis Diesel in Österreich ab 1990 untersucht, siehe Abbildung 35.

⁹ Zitat wird je nach Laune Karl Valentin, Mark Twain, Winston Churchill oder anderen beliebten Personen zugeschrieben.

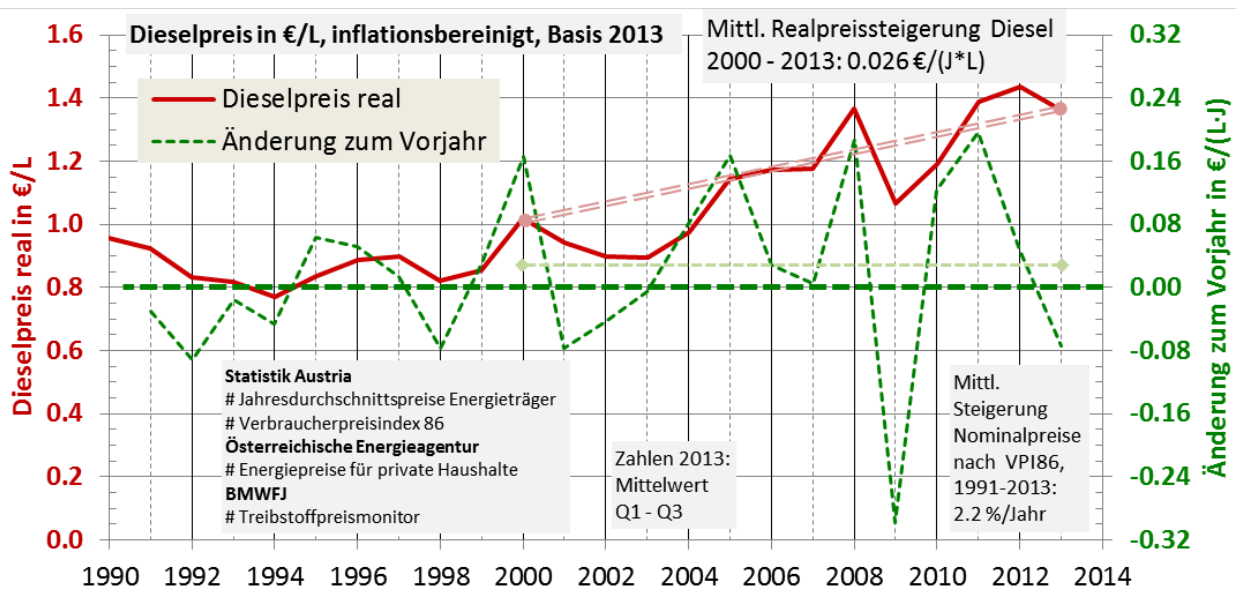


Abbildung 35: Inflationsbereinigter Tankstellenpreis Diesel, Österreich

Für den zukünftigen Verlauf des Batteriepreises wurde auf den "Electric Vehicle Battery Price Index" von Bloomberg zurückgegriffen, siehe Abbildung 36.

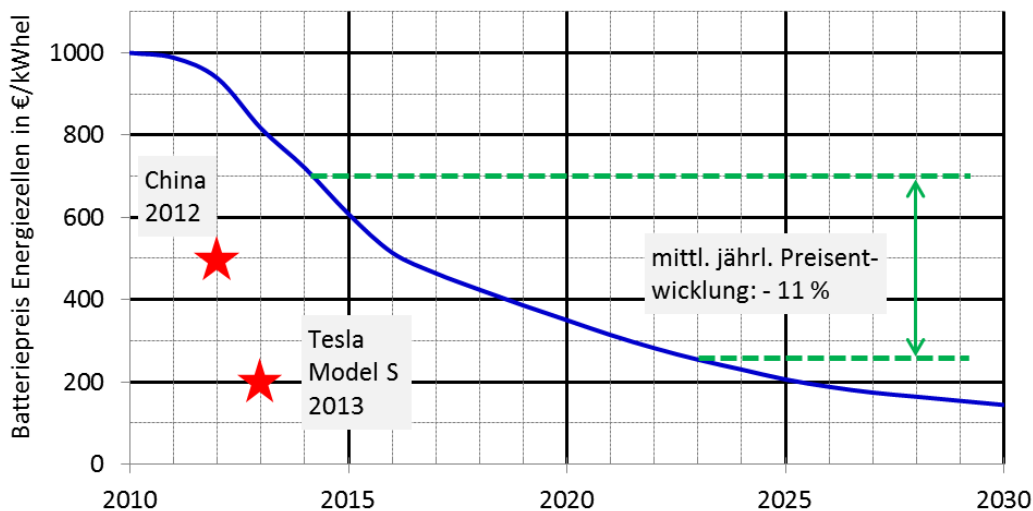


Abbildung 36: Abschätzung für den zukünftigen Batteriepreis (Hesser, 2012-05) (Cole, 2013-08)

Beim Batteriepreis ist zu beachten: Die dargestellten Werte betreffen Energiezellen mit einer hohen Energiedichte, wie sie für rein elektrische Fahrzeuge eingesetzt werden. Z. B. hat der aktuelle Tesla S ein Verhältnis der max. elektrischen Leistung der elektr. Maschine zur Batteriekapazität von

$$P_{EM,el,max} / E_{batt,max} = 270 \text{ kW} / 85 \text{ kWh} = 3.2 \text{ 1/h}$$

Der neue Volvo 7900LH kommt hingegen auf einen Wert von

$$P_{EM,el,max} / E_{batt,max} = 120 \text{ kW} / 4.8 \text{ kWh} = 25 \text{ 1/h}$$

Das heißt, dass die Leistungszellen des Volvos durch die hohe Stromstärke pro Zelle sehr viel mehr belastet werden, als die Energiezellen eines reinen Elektrofahrzeuges, weil dieses eine viel größere Batteriekapazität hat. Damit die Leistungszellen trotzdem eine akzeptable Lebensdauer haben, sind sie anders gefertigt und um ein Mehrfaches teurer als die Energiezellen. Außerdem wird beim Hybridbus bei Lebensdauerende der Zellen das komplette Batteriesystem gewechselt, inklusive Kiste, Kühlung und

Leitrechner. Es wurde mit der Annahme gerechnet, dass die Batterie nach fünf Betriebsjahren getauscht wird. Für neue, verbesserte Leistungszellen ist diese Annahme realistisch.

Für den zukünftigen Verlauf der Diesel- und Batterieprie wurden drei Szenarien gerechnet:

- o Mittel. Der Dieselpreis (Tankstelle) steigt pro Jahr um 2 ct/L an, der Batteriesystempreis entwickelt sich mit - 5 %/J.
- o Optimistisch. Dieselpreis + 6 ct/(J*L), Batteriesystempreis - 10 %/J
- o Pessimistisch. Dieselpreis - 2 ct/(J*L), Batteriesystempreis +/- 0 %/J

à In allen Szenarien wurde ein Batteriewechsel über 10 Jahre Laufzeit kalkuliert. Bei dem hier untersuchten Hybridbus erscheint diese Annahme nicht zu optimistisch. Inwieweit die Batteriebensdauer bei Hybridbussen generell in so einem Zeitraum liegt, ist offen.

Die resultierenden Verläufe sind in Abbildung 37 gezeigt.

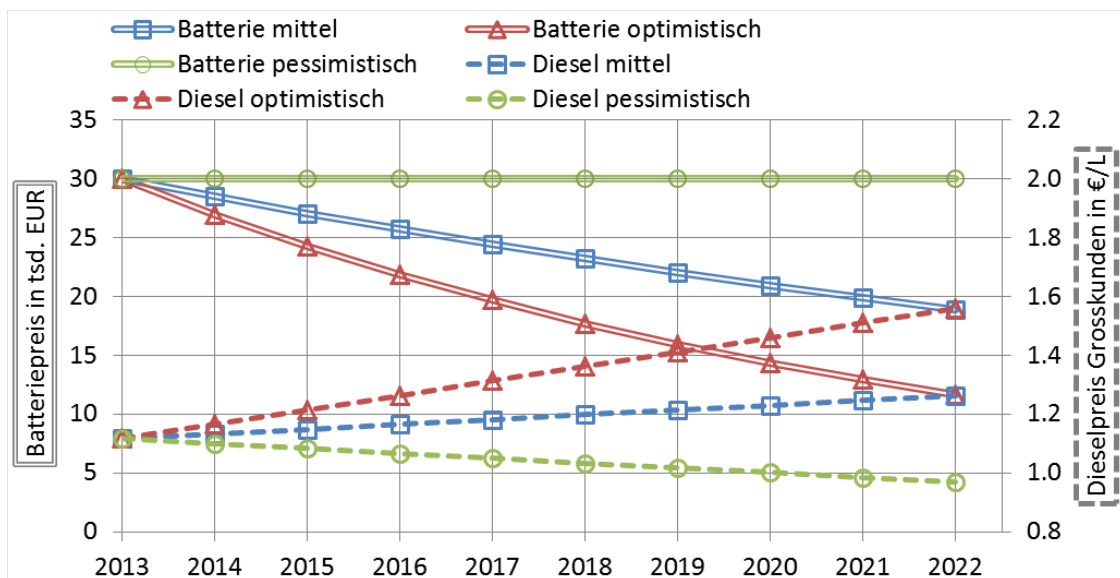


Abbildung 37: Annahmen für die zukünftige Entwicklung der Dieselpreise-Großkunden und des Batteriesystempreises

Für diese drei Szenarien wurde die Amortisationsdauer für einen Hybridbus im Vergleich zu einem Standardbus gerechnet, siehe Abbildung 38

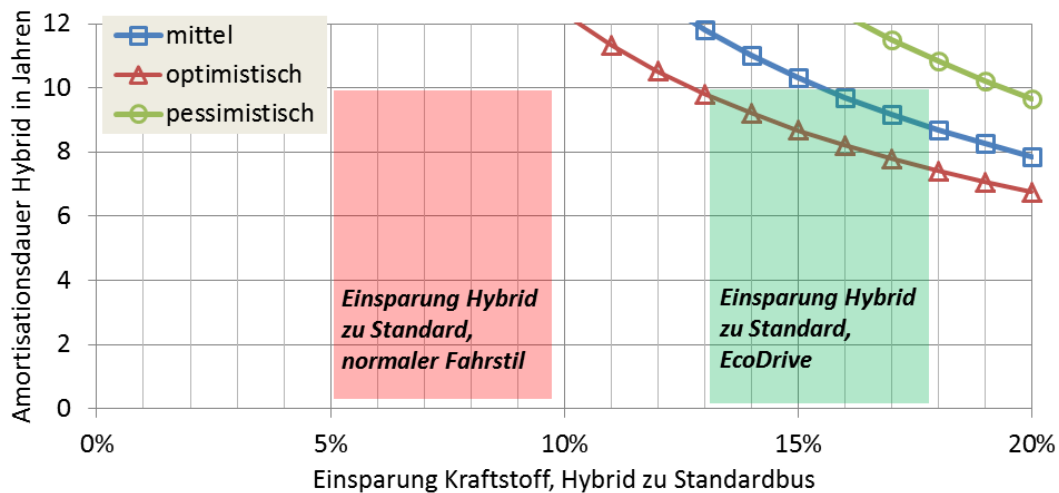


Abbildung 38: Amortisationsdauer eines neuen Hybridbusses gegenüber einem neuen, verbrauchsoptimierten Standardbus.

Was die erreichbare Kraftstoffeinsparung eines neuen Hybridbusses gegenüber einem neuen, sparsamen Standardbus angeht, so ist folgendes bekannt:

- o Im Vergleich mit einem sehr sparsamen Standardbus Euro VI mit Rekuperationsmodul hat der Volvo 7700LH im normal-zügigen Fahrstil keinen Verbrauchsvorteil, vergleiche 3.2.3, aber er spart beim gemäßigten Nutzbrems-EcoDrive 10 % Kraftstoff ein. Der Standardbus spart hier nur sehr wenig ein, weil die Rekuperationsfähigkeit aufgrund der kleinen elektr. Leistung wesentlich geringer ist.
- o Der Volvo 7900LH spart gegenüber dem 7700LH bei normal-zügigem Fahrstil zwischen 5 und 10 % Kraftstoff ein (PEMS-Vergleichsmessung für Wiener Linien 2011/2012; Info von Volvo Göteborg)
- o Daraus folgert, dass der 7900LH gegenüber einem neuem Standardbus bei Normalfahrt wahrscheinlich 5 bis 10 % und beim Nutzbremsen ca. 13 bis 18 % Diesel einsparen wird.
- o Für andere Hybridmodelle können deutlich andere Verhältnisse im Kraftstoffverbrauch möglich sein, so dass die hier durchgeführte Abschätzung der Amortisation nicht allgemein gültig gesehen werden sollte.

è Vor der Entscheidung für oder gegen den Kauf eines Hybridbusses sollte man in jedem Fall aktuelle Angebote einholen und eine eigene Amortisationsrechnung machen. In Abschnitt 7.3 sind die Eingangsgrößen und Formeln beschrieben.

Aus den Ergebnissen in Abbildung 38 folgt, dass bei einer vorsichtigen, mittleren Schätzung der zukünftigen Diesel- und Batteriepreise der EcoDrive Voraussetzung ist, damit sich der Hybridbus gegenüber einem sparsamen Standardbus wahrscheinlich knapp amortisiert, innerhalb der Abschreibungsdauer von 10 J.

Bei einer optimistischen Schätzung (Diesel wird schnell teurer, das Batteriesystem deutlich billiger), amortisiert sich der Hybrid beim EcoDrive wahrscheinlich sicher innerhalb der 10 Jahre.

Im Fall, dass der Diesel wieder billiger wird, z. B. aufgrund verstärkter Förderung von unkonventionellem Erdöl und Schiefergas, und das Batteriesystem gleich teuer bleibt, amortisiert sich der Hybrid gar nicht. In jedem Fall gilt: Ohne Nutzbrems-EcoDrive wird sich ein Hybridbus gegenüber einem sparsamen Standardbus deutlich später bzw. sehr wahrscheinlich nicht amortisieren. Wenn das Batteriesystem öfter als einmal innerhalb der 10 J getauscht werden muss, ist auch keine Amortisation möglich.

3.8 Schulung von FahrerInnen im Eco-Drive Fahrstil

Im März 2013 wurden Busfahrer und Lehrfahrer der HGL im Eco-Drive geschult und im Juli 2013 Mitarbeiter der TU Graz. Beide Male folgte auf die theoretische Erklärung des Nutzbremspotentials ein praktischer Teil, in dem die FahrerInnen das Gelernte im Straßenverkehr ausprobieren konnten. Besonders das langsame Verzögern und der deshalb wesentlich längere Bremsweg erfordern eine Umgewöhnung hin zu einer sehr vorausschauenden Fahrweise. Bei den Grazer Linienbussen kommt dazu, dass die FahrerInnen an feste Zeitvorgaben gebunden sind, weil die Busse im 10 min Takt fahren. In solchen Fällen besteht ein Zielkonflikt zwischen Pünktlichkeit und Kraftstoffeinsparung, weil die Fahrdauer einer Buslinie im Eco-Drive um mehrere Minuten länger wird.

3.8.1 Schulung von Fahrern bei den HGL

Ende März 2013 fand bei den HGL die Eco-Drive Schulung statt. Zuerst wurden fünf neue Busfahrer gebeten, eine 11 km lange Testrunde im Westen von Graz zu fahren, siehe Abbildung 9. Sie hatten keine besonderen Kenntnisse vom Hybridbus und sollten ihre individuellen Busfahrstil anwenden, unter Einhaltung der Zeitvorgaben für die Haltestellen.

Danach wurde ihnen und den LehrfahrerInnen der HGL der Eco-Drive präsentiert. Der aus den Schulungsfolien entstandene Leitfaden "EcoDrive für Hybridfahrzeuge" ist eine eigene Broschüre (Kies, 2013-07). In der folgenden Diskussion ergab sich, dass die Einhaltung des Fahrplans Vorrang vor einer sparsamen Fahrweise hat. Wenn ein Fahrer zu langsam wird und der nachfolgende Bus zu weit aufholt, wird der langsame Bus aus der Linie genommen und in der Gegenrichtung wieder eingereiht, was jeder vermeiden möchte. Daher liegt die Entscheidung über den Fahrstil beim Fahrer selbst: Wenn es Verkehr und Fahrplan zulassen, sollte ein sparsamer Fahrstil mit langen Bremswegen angewendet werden, bei Zeitdruck in den Stoßzeiten wird schneller gefahren. Der Kompromiss für die folgende Schulungsfahrt mit anspruchsvollen Zeitvorgaben war, mit Vollgas anzufahren und nach Möglichkeit sanft zu bremsen, um mit der Elektromaschine Energie zurückzugewinnen. Damit wird bei den Anfahrvorgängen keine Zeit verloren und die Busse kommen schnell auf Geschwindigkeit. Außerdem hat das Anfahrverhalten einen kleineren Einfluss auf den Verbrauch, wie in Abbildung 7 und Abbildung 15 zu sehen ist. Da so nur noch bei den Bremsvorgängen ein Zeitnachteil gegenüber der Normalfahrt entsteht, hält sich die Verlängerung der Umlaufdauer in vertretbaren Grenzen.

Nach dem Theorieteil übte jeder Fahrer auf dem Betriebshof der HGL das Nutzbremsen, um sich an den Pedalwiderstand, der bei 20 % Bremspedalweg die max. Generatorleistung signalisiert, und den wesentlich längeren Bremsweg zu gewöhnen, siehe Abbildung 39.



Abbildung 39: Bremsübung mit dem Hybridbus, Pedalampel (u. r.)
Am Messtag waren die Strassen schneefrei, nur der Betriebshof nicht komplett geräumt.

Nur für die Schulung wurde eine Pedalampel mittels Microcontroller an den CAN-Bus angeschlossen. Abhängig von Brems- und Gaspedalstellung leuchtete diese grün, gelb oder rot, um dem Fahrer zu zeigen, ob er gerade sparsam, mittelmäßig oder zu zügig unterwegs ist. Die notwendigen Einstellungen und Programme sind in Abschnitt 7.2 angeführt.

Nach der Bremsübung fuhr jeder Fahrer wieder eine Testrunde. Diesmal sollte er immer die volle Nutzbremmung mit geringer Verzögerung anwenden, wenn dies verkehrstechnisch möglich war. Um die Fahrdauer nicht zu lang werden zu lassen, sollte stark beschleunigt werden. Das Ergebnis im Mittel ist, dass die Fahrer beim Eco-Drive 10 % Diesel eingespart haben und die Fahrdauer Strecke nur ca. 1 min länger war als vorher ($v > 0$, ohne Stand). Zwischen den fünf Fahrern streute die Einsparung von 16 bis 3 % und die Fahrzeitverlängerung von - 1 bis + 2 min. Für die genauen Ergebnisse siehe Abbildung 9.

Umgelegt auf eine 20 km lange Buslinie heißt das, dass mit einem Nutzbremmungs-Eco-Drive ca. 10 % Kraftstoff eingespart werden können, bei einer max. Verlängerung der Fahrdauer von 4 min ($v > 0$, ohne Stand), eher weniger.

3.8.2 Informationsveranstaltung am IVT

Im Juli 2013 gab es eine Infoveranstaltung mit Schulung zu EcoDrive für Hybridfahrzeuge, die öffentlich ausgeschrieben war. Allerdings war das Interesse der eingeladenen Fahrschulen und anderen in EcoDrive-Schulungen tätigen Organisationen knapp unter der Nachweisgrenze. Bei der Information und Schulung wurden die Grundlagen vom EcoDrive mit Hybridfahrzeugen vorgestellt, und konnten mit dem Pkw VW Jetta Hybrid ausprobiert werden. Die Schulungsunterlagen sind im separaten Leitfaden zu finden (Kies, 2013-07), Eindrücke vom Theorieteil der Veranstaltung werden in Abbildung 40 gezeigt.



Abbildung 40: Theorieteil der Infoveranstaltung zum Eco-Drive

Anschließend waren 7 Fahrer je zweimal auf einer 3.7 km langen Runde im TU-Viertel unterwegs und es wurden die Emissionen mitgemessen, vergleiche Abbildung 16. Beim ersten Mal sollten die Fahrer ihren eigenen Pkw-Fahrstil anwenden und beim zweiten Mal die Leistungsgrenzen auf der Anzeige beachten, siehe Abbildung 14. Die Ergebnisse im Mittel sind, dass beim Pkw-Eco-Drive 13 % weniger Kraftstoff verbraucht wurden und ca. 60 % weniger Schadstoffe NO_x , HC und CO emittiert wurden. Des Weiteren ist die Fahrtdauer ($v > 0$, ohne Stand) auf der 3.7 km lange Strecke nur um ca. 7 s länger geworden.

è Im normalen Stadtverkehr mit Hybrid-Pkw kann der Eco-Drive problemlos angewendet werden. Die Kraftstoffeinsparung wird je nach Hybridmodell meist über 10 % sein und die Fahrtdauerverlängerung vernachlässigbar gering. Die FahrerInnen müssen sich aber an einen mindestens doppelt so langen Bremsweg gewöhnen, um das Nutzbremspotential ausschöpfen zu können. Bei Hybrid-PKW mit hohen installierten elektrischen Leistungen (deutlich über 30 kW) dürfte der Einfluss der Nutzbremse wesentlich geringer sein, da hier das Limit der Rekuperierbarkeit über den normalen Bremsleistungen liegt. Hohe elektrische Leistungen machen Hybridantriebe allerdings teurer, so dass die Kombination aus einem kostengünstigeren Hybridantrieb mit intelligenter Nutzung effizienter ist.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das wichtigste Ergebnis ist, dass eine angepasste Fahrweise auch bei den meisten Hybridfahrzeugen zu einer deutlichen Kraftstoffeinsparung gegenüber dem Normalfahrstil führt. Die Besonderheit von Hybriden ist, dass ein sanftes „Nutzbremsen“ sehr wichtig ist, das Gasgeben weniger. Um die Technik optimal zu nutzen, sollte nicht über der maximalen Generatorleistung der Elektromaschine gebremst werden, da sonst die Bremsenergie nur in geringem Umfang in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Im Fall des untersuchten Hybridbusses und auch bei einigen Hybrid-Pkw resultiert dieses EcoDrive Verhalten in einer ungewohnt langsamen Verzögerung mit langen Bremswegen. Dies fordert von den Fahrern eine Umstellung der Gewohnheiten, man muss den Bremsbeginn sehr weit im Voraus legen. Der Gewinn ist eine Kraftstoffeinsparung von typischerweise über 10 % gegenüber dem Normalfahrstil. Bei Hybridfahrzeugen mit hoher installierter elektrischer Leistung kann auch bei starker Verzögerung noch rekuperiert werden, so dass bei solchen Kfz das Bremsverhalten deutlich weniger Einfluss zeigen sollte.

Mit einem Vollhybrid-Stadtbuss wurden bei einer bewusst passiven Fahrweise 22 % Einsparung gegenüber dem „normalen“ aggressiv/zügigen Busfahrstil gemessen, bei einem gemäßigten Nutzbremms-EcoDrive waren es noch 10 %. Bei einem Vollhybrid-Pkw lag die erreichbare Einsparung zwischen 13 und 42 %, je nach Strecke.

Die Befürchtung, beim EcoDrive den Busfahrplan nicht mehr einhalten zu können, wurde entschärft, indem als Kompromiss zwischen niederem Verbrauch und Fahrzeitverlängerung weiterhin hohe Beschleunigungswerte zugelassen werden, jedoch Bremsmanöver sanft erfolgen sollen, soweit im Verkehr möglich. In den Messungen hat sich gezeigt, dass beim Nutzbremms-EcoDrive die Rolldauer ($v > 0$, ohne Standphasen), umgerechnet auf eine 20 km lange Stadtstrecke, im Mittel um 2.4 min länger wird, mit einem Maximalwert von 4 min. Eine solche Fahrzeitverlängerung sollte in Runden mit normalem Verkehrseinfluss auf die Busfahrt durch verkürzten Halt an der Endstation kompensierbar sein. Wenn sonstige Verzögerungen auftreten, müsste gegebenenfalls zwischenzeitlich auf zügigen Fahrstil gewechselt werden, um den Fahrplantakt zu halten.

Auf Seiten der Batterie wurde gemessen, dass diese im Realbetrieb langsamer altert, als vorher angenommen, was sehr positiv für Lebensdauer und Batteriekosten ist. Mit der Alterungssimulation wurde berechnet, dass bei aggressiver Fahrt die Batterielebensdauer im Vergleich zur durchschnittlichen Belastung 7 % kürzer und bei passiver Fahrt 11 % länger wird. In Betriebsstunden sind das - 1 050 oder + 1 650 h. Bei einer angenommenen Jahresbetriebsdauer von 5 000 h wären das - 2.5 oder + 4 Monate. Für den gemäßigten Nutzbremms-EcoDrive wurde ein nur sehr geringer Einfluss auf die Batteriealterung festgestellt.

Mit der Verkehrsflusssimulation konnte für eine "virtuelle Buslinie" ebenfalls ein Sparpotential von 10 bis 20 % bei der Beschränkung von Verzögerung und Beschleunigung berechnet werden. Mit einer Vorab-Simulation vom Hybrid-Pkw, ohne vergleichende Messergebnisse, wurde der größere Einfluss der Nutzbremmung gegenüber dem Gasgeben richtig vorhergesagt. Zusätzlich konnten die Grundregeln und Einsparpotenziale für EcoDrive mit Hybrid-Pkw aufgestellt werden, die danach durch Messungen validiert und auch geschult wurden.

Ebenfalls konnte in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berechnet werden, dass im direkten Vergleich mit einem verbrauchsoptimierten Standardbus die zusätzliche Einsparung durch das Nutzbremmen wahrscheinlich Voraussetzung für eine Amortisation des untersuchten Hybridbusses innerhalb von 10 Jahren ist. Beim erwartbaren Ansteigen der Diesel- und Absinken der Batteriepreise ist eine Amortisation realistisch, denn Nutzbremmen können Standardbusse trotz aller sonstigen Spartechnik nicht.

5 Ausblick und Empfehlungen

Für das Ausschöpfen der möglichen Kraftstoffeinsparung durch EcoDrive ist die konsequente Anwendung durch die FahrerInnen notwendig. Um deren Motivation zu unterstützen, wäre ein Bonussystem hilfreich, mit dem sich die sparsamsten FahrerInnen etwas dazuverdienen können. Um die Akzeptanz zu gewährleisten, sind aber gleiche Fahr- und Sparbedingungen für alle TeilnehmerInnen notwendig. Die technischen Fragen, wie der Verbrauch der FahrerInnen pro einzelner Schicht zuverlässig ermittelt werden kann, sind bereits gelöst. Die mittels Datenfunk übertragenen Messwerte

der fahrzeugeigenen Sensoren sind genau genug, um fahrerIngenau den Streckenverbrauch zu berechnen.

Um das Sparpotential eines Hybridfahrzeuges zu erhöhen, sollte das Verhältnis von Generatorleistung zu Fahrzeugmasse möglichst groß genug sein, um die im normalen Betrieb häufig auftretenden Verzögerungen elektrisch rekuperieren zu können. Damit ist die minimale elektrische Leistung von Fahrzeugmasse und Fahrwiderständen sowie von den typischen Geschwindigkeitsverläufen abhängig. Bei der Auslegung der Antriebstränge von Hybridfahrzeugen sollte in Zukunft also für typische Kundenzyklen bewertet werden, ob ausreichend elektrische Leistung zum Nutzbremsen installiert ist. Dann kann auch bei stärkeren Bremsmanövern ein Großteil der freiwerdenden kinetischen Energie zurückgewonnen werden, denn ein sanftes Nutzbremsen ist fahrplan- oder verkehrsbedingt nicht immer möglich. Welche Leistung dann installiert wird, muss aus dem Zielkonflikt einer Kraftstoffverbrauchsminderung bei Kfz-Mehrkosten für stärkeren Elektromotor und höhere Batteriekapazität und Batterieleistung entschieden werden. Dies ist aber eine Forderung an die Grundkonstruktion eines Hybridfahrzeuges und kann nur herstellerseitig umgesetzt werden.

Konkrete Verbesserungsvorschläge seitens der Busfahrer sind, die elektrische Nutzbremse mit einem Retarderhebel an der Lenkradsäule fein steuern zu können, und die Grenze des elektrischen Fahrens von 17 auf 30 km/h anzuheben. Ebenfalls wird gewünscht, beim Anfahren den Zeitpunkt der Umschaltung vom Elektro- zum Dieselmotor mit der Gaspedalstellung bestimmen zu können.

Aus technischer Sicht wäre auch die Schubabschaltung der Verbrennungskraftmaschine eine zu überlegende Maßnahme am Kfz. Damit würde die Abgasnachbehandlung weniger stark auskühlen, was insbesondere für die NO_x-Konvertierung im SCR-Katalysator vorteilhaft wäre. Zusätzlich würde auch eine weitere Verbrauchseinsparung erreicht, dafür wäre dann das häufige Starten für einige Bauteile bezüglich Haltbarkeit eine Herausforderung.

6 Literaturverzeichnis

Baric D. et al. Effects of Eco-Drive Education on the Reduction of Fuel Consumption and CO2 Emissions [Journal] // PROMET - Traffic&Transportation / ed. Anzek M.. - Zagreb : University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences, 2013-05. - 3 : Vol. 25. - pp. 265-272. -

<http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v25i3.1260>. - ISSN 1848-4069.

Barth M. et al. Dynamic ECO-driving for arterial corridors [Conference] // 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS 2011), Wien. - New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011-06. - pp. 182-188. -

<http://dx.doi.org/10.1109/FISTS.2011.5973594>. - ISBN 9781457709906.

Blassnegger J. et al. Real world emission measurement of different city bus concepts [Conference] // 19 th International Transport and Air Pollution Conference (TAP2012), Thessaloniki / ed. Samaras Z.. - Thessaloniki : Aristotle University, Laboratory of Applied Thermodynamics, 2012-11.

Blassnegger J. Messung von Geräusch, Motornennleistung und Abgasgegendruck an einem Mercedes Citaro O530 Omnibus in Serienzustand und mit POK [expertise]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2005-07. - p. 5. - Report no. I-10/2005 Jblass EM 09/05.

Bruckner G., Pieber, R. Untersuchung der Emissionen im realen Fahrbetrieb bei Nutzfahrzeugen mithilfe mobiler Messtechnik [mini thesis]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2013-06.

Campbell R. et al. Energy Recovery Incentive for Regenerative Braking [Conference] // National Automobile Week, Detroit, MI. - Warrendale, PA : SAE International, 1962-03. -

<http://dx.doi.org/10.4271/620143>. - ISSN 0148-7191, SAE paper no. 620143.

Cole J. Tesla Battery In The Model S Costs “Less Than A Quarter” Of The Car In Most Cases [Internet article] // InsideEVs. - 2013-08. - <http://insideevs.com/tesla-battery-in-the-model-s-costs-less-than-a-quarter-of-the-car-in-most-cases>.

Dib W. et al. Evaluation of the Energy Efficiency of a Fleet of Electric Vehicle for Eco-Driving Application [Journal] // Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles / ed. Ropital F.. - Rueil-Malmaison : IFP Énergies nouvelles (IFPEN), 2012-09. - 4 : Vol. 67. - pp. 589-599. -

<http://dx.doi.org/10.2516/ogst/2012023>. - ISSN 1953-8189.

Dippold M. et al. NEMO – A Universal and Flexible Model for Assessment of Emissions on Road Networks [Conference] // 19th International Transport and Air Pollution Conference (TAP2012), Thessaloniki / ed. Samaras Z.. - Thessaloniki : Aristotle University, Laboratory of Applied Thermodynamics, 2012-11.

Doczy S. 812_Spezifikation_SOH [internal document]. - Zettling : Magna Steyr Battery Systems, 2010-09.

Doczy S. EHEV - Volvo Hybrid. Complete report 2013/07/31 [internal document]. - Zettling : Magna Steyr Battery Systems, 2013-07. - GVB_Bus_Report_Endergebnis.pdf, EHEV\pdf\.

Doczy S. EHEV - Volvo Hybrid. Day evaluation of driving cycles 2013/03/26 // internal document. - Zettling : Magna Steyr Battery Systems, 2013-06. - GVB_Bus_Report_day_26.pdf, EHEV\pdf\2013\2013_03\.

Doczy S. Versuchsplanung für Lithium-Ionen Batteriesysteme [Conference] // Workshop „Modellbasierte Kalibriermethoden“. - Wien : TU Wien, Christian Doppler Labor für modellbasierte Kalibriermethoden, 2010-09. - http://mbc.tuwien.ac.at/fileadmin/t/cdl/Vortraege_Workshop_17092010/Doczy.pdf.

Dubarry M. et al. Identifying battery aging mechanisms in large format Li ion cells [Article] // Journal of Power Sources. - Amsterdam : [s.n.], 2011-04. - 7 : Vol. 196. - pp. 3420-3425. -

dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.07.029. - ISSN 0378-7753.

Fellendorf M. et al. Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM [Book Section] // Fundamentals of Traffic Simulation / book auth. Barcelo J.. - Berlin : Springer, 2010. -

http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-6142-6_2. - ISBN 9781441961419.

Friedl T. [internal document] // 812_GVB_Bus_Datenlogger.docx. - Zettling : Magna Steyr Battery Systems, 2010-09.

Gao Y. et al. Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV [Conference] // Future Transportation Technology, Costa Mesa, CA. - Warrendale, PA : SAE International, 1999-08. -

<http://dx.doi.org/10.4271/1999-01-2910>. - ISSN 0148-7191, SAE paper no. 1999-01-2910.

Glauninger F. Messung und Simulation von Hybridfahrzeugen im realen Stadtverkehr [diploma thesis]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2011-02.

Gray T. et al. 2010 Toyota Prius VIN 0462 Hybrid Electric Vehicle Battery Test Results [Report]. - Washington, DC : U.S. Department of Energy, 2013-01. - p. 14. -

<http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/avta/pdfs/hev/batterygenIIIprius0462.pdf>. - Report no. INL/EXT-13-28025.

Hausberger S. et al. Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3 [Report]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2009-12. - p. 76. -

http://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA_31_Docu_hot_emissionfactors_PC_LCV_HDV.pdf. - report no. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679.

Hausberger S. et al. Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3 [Report]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2009-12. -

http://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA_31_Docu_hot_emissionfactors_PC_LCV_HDV.pdf. - report-no. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679.

Hausberger S. et al. PHEM - das Modell der TU Graz zur Berechnung von Kfz-Emissionen und seine Datenbasis bei Euro 5 und Euro 6 [Conference] // Fachgespräch Verkehrsemissionen, Stuttgart. - Stuttgart : Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), 2011-07. - <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/207995>.

Hesser T. Energy storage Financing and Future Prospects [Conference] // 22nd annual meeting. - Washington, DC : Electricity Storage Association - ESA, Washington, DC, 2012-05. - p. 11.

Hirschmann K. et al. GAVe - Grazer adaptive Verkehrssteuerung [Report]. - Graz : TU Graz, ISV, 2009-02. - p. 78. - Projekt Nr. 812719.

Honda1 Daten: Insight Hybrid - 1.3 IMA Elegance [data sheet]. - Wiener Neudorf : Honda Austria, 2013-10. - http://www.honda.at/automobile/modelle_insight_hybrid_technische_daten.php.

Honda2 Insight Specifications [data sheet]. - Torrance, CA : American Honda Motor Co., Inc., 2013-10. - <http://automobiles.honda.com/insight-hybrid/specifications.aspx>.

Honda3 Daten: Civic - 1.4 i-VTEC Comfort [data sheet]. - Wiener Neudorf : Honda Austria, 2013-10. - http://www.honda.at/automobile/modelle_civic_technische_daten.php.

IVT1 Chassis Dynamometer for Light Duty Vehicles [brief description]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2013-04. -

http://www.ivt.tugraz.at/images/stories/Files/Emissionen/ldv_chasis_dyno_description.pdf.

IVT2 Portable emission measurement system (PEMS) [brief description]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb. Emissionen, 2013-05. - http://www.ivt.tugraz.at/images/stories/Files/Emissionen/pems_description.pdf.

IVT3 Roller Test Bed for Heavy Duty Vehicles [brief description]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2013-05. - http://www.ivt.tugraz.at/images/stories/Files/Emissionen/hd_cchassisdyno_description.pdf.

Kies A. [guidelines] // EcoDrive für Hybridfahrzeuge. Ein Leitfaden. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2013-07.

Kies A. et al. Influence of the driving style on fuel consumption and battery wear of a parallel hybrid city bus [Conference] // 13th Stuttgart International Symposium 'Automotive and Engine Technology'. - Stuttgart : FKFS - Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart, 2013-02.

Kmiecik O. Hybrid driving – Toyota's top tips for best fuel economy [blog entry]. - Portsmouth : Toyota (GB) PLC, 2013-02. - <http://blog.toyota.co.uk/hybrid-driving-technique-toyotas-top-tips-for-achieving-the-best-fuel-economy-in-your-hybrid>.

Kraschl-Hirschmann K. et al. A method for emission estimation for microscopic traffic flow simulation [Conference] // 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS 2011), Wien. - New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011-06. - pp. 300-305. - <http://dx.doi.org/10.1109/FISTS.2011.5973625>. - ISBN 9781457709906.

Lee H. et al. The effect of eco-driving system towards sustainable driving behavior [Conference] // 1st ACM Conference on Human Factors in Computing Systems 2010 (CHI 2010), Atlanta, GA. - New York : Association for Computing Machinery (ACM), 2010-04. - pp. 4255-4260. -

<http://dx.doi.org/10.1145/1753846.1754135>. - ISBN 9781605589305.

Leonhardt A. Verkehrssimulation in der Verkehrsplanung [Lecture]. - München : Universität der Bundeswehr, Institut für Verkehrswesen und Raumplanung, 2012-12. -

<http://www.unibw.de/ivr/strassenverkehrstechnik/aktuelles/ptv-group-simulation-axel-leonhardt-unibw-2012-12.pdf>.

Louden R. et al. Computer simulation of automotive fuel economy and acceleration [SAE technical Paper]. - Warrendale, PA : SAE International, 1960-01. - <http://dx.doi.org/10.4271/60013>. - ISSN 0148-7191, SAE paper no. 600132.

Marano V. et al. Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles [Conference] // Vehicle Power and Propulsion Conference (VPCC). - Dearborn, MI : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 2009-09. - pp. 536-543. -

<http://dx.doi.org/10.1109/VPCC.2009.5289803>. - ISBN 9781424426010.

Mensing F. et al. Vehicle trajectory optimization for hybrid vehicles taking into account battery state-of-charge [Conference] // 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPCC 2012), Seoul. - New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2012-10. - pp. 950-955. -

<http://dx.doi.org/10.1109/VPCC.2012.6422774>. - ISBN 9781467309530.

Merkisz J. et al. Road Test Emissions Using On-board Measuring Method for Light Duty Diesel Vehicles [Journal] // Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering / ed. Mismar M.. - Amman :

Jordanian Ministry of Higher Education and Scientific Research, 2011-02. - 1 : Vol. 5. - pp. 89-96. -

<http://jjmie.hu.edu.jo/files/v5n1/JJMIE-14.pdf>. - ISSN 1995-6665.

Neusser H. et al. Der Antriebsstrang des Jetta Hybrid von Volkswagen [Journal] // MTZ -

Motortechnische Zeitschrift / ed. Liebl J.. - Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013. - 1 : Vol. 74. - pp. 10-19. - <http://www.springerprofessional.de/der-antriebsstrang-des-jetta-hybrid-von-volkswagen/3721286.html>. - ISSN 0024-8525.

Renhart W. et al. Recent NiMH-battery modeling supported by finite element thermal analysis

[Conference] // 20th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Pisa. - Napoli : University Federico II of Naples, Dept. of Electrical Engineering,

2010-06. - <http://dx.doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5542280>.

Rexeis M. et al. Trend of vehicle emission levels until 2020 – Prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation [Journal] // Atmospheric Environment / ed. Brimblecombe P.. - Amsterdam : Elsevier, 2009-10. - 31 : Vol. 43. - pp. 4689–4698. -

<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.034>. - ISSN 1352-2310.

Schwingshackl M. et al. Monitoring Mechanism 2013 - Verkehr [Report]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2013-01. - p. 46. -

http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/industrie/pdfs/Monmech_Verkehr_IVT_2013.pdf. - Report no.: Inst-01/13/ Schwi Em 03/12-679.

Sensors SEMTECH® EFM-HS High Speed Exhaust Flow Meter. - Saline, MI : Sensors, Inc., 2012-07. -

http://www.sensors-inc.com/brochures/SEMTECH_EFM-HS.pdf.

Smith K. et al. Battery wear from disparate duty-cycles: Opportunities for electric-drive vehicle battery health management [Conference] // 2012 American Control Conference (ACC). - Montreal : American Automatic Control Council (AACC), Troy, NY, 2012-06. - <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/54698.pdf>. - NREL/CP-5400-54698.

Smode S. Simulation und Messung eines Hybrid-Pkws in Bezug auf ökonomischen Fahrstil [diploma thesis]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2013-11.

Strömberg H. et al. Comparative effects of eco-driving initiatives aimed at urban bus drivers – Results from a field trial [Article] // Transportation Research / ed. Burrin K.. - Amsterdam : Elsevier, 2013-07. - Part D: Transport and Environment. - Vol. 22. - pp. 28–33. - <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2013.02.011>. - ISSN 1361-9209.

Unruh R. Test MAN Lion's City Hybrid [Journal] // Lastauto Omnibus. - Stuttgart : EuroTransportMedia, 2012-09. - 10 : Vol. 89. - p. 74. - ISSN 0023-866X.

Unruh R. Test Mercedes Benz Citaro [Journal] // Lastauto Omnibus. - Stuttgart : EuroTransportMedia, 2013-07. - 8 : Vol. 90. - p. 52. - ISSN 0023-866X.

Volvo Volvo 7700 Hybrid [data sheet]. - Göteborg : Volvo Bus Corporation, 2010-02. - http://www.volvobuses.com/bus/germany/de-de/products/stadtbusse/volvo-7700-hybrid/Documents/7700hybrid_lhd.pdf.

VW Betriebsanleitung Jetta [owner's manual]. - Wolfsburg : Volkswagen AG, 2012-12.

Wengraf I. Easy on the Gas - The effectiveness of eco-driving [Report]. - London : The Royal Automobile Club Foundation for Motoring (RAC Foundation), 2012-08. - p. 50. - http://www.racfoundation.org/assets/rac_foundation/content/downloadables/easy_on_the_gas-wengraf-aug2012.pdf.

Wiedemann R. Simulation des Strassenverkehrsflusses [Journal] // Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen. - Karlsruhe : Uni Karlsruhe, 1974. - 8.

Wood E. et al. Variability of Battery Wear in Light Duty Plug-In Electric Vehicles Subject to Ambient Temperature, Battery Size, and Consumer Usage [Conference] // International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium 26 (EVS26). - Los Angeles : Electric Drive Transportation Association (EDTA), Washington, DC, 2012-05. - <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53953.pdf>. - NREL/CP-5400-53953.

Zallinger M. Mikroskopische Simulation der Emissionen von Personenkraftfahrzeugen [doctoral thesis]. - Graz : TU Graz, IVT, Fb Emissionen, 2010-03.

Zarkadoula M. et al. Training urban bus drivers to promote smart driving: A note on a Greek eco-driving pilot program [Article] // Transportation Research / ed. Button K.. - Amsterdam : Elsevier, 2007-08. - Part D: Transport and Environment. - 6 : Vol. 12. - pp. 449–451. - <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2007.05.002>. - ISSN 1361-9209.

7 Anhang

7.1 Fahrzeugdaten

Hier werden die technischen Daten der gemessenen Hybrid- und Standardfahrzeuge angeführt.

7.1.1 Mildhybrid-Pkw

(Honda1, 2013-10) (Honda2, 2013-10)

Hersteller	Honda
Modell	Insight - Elegance
Baujahr	2010
Leergewicht	1.28 t
Zuladung	0.37 t
Verbrennungsmotor	Honda, Otto Viertakt
Abgasnorm	EURO V
Zylinderzahl	4
Hubraum	1.34 L
Nennleistung	65 kW @ 5800 1/min
Batterie	NiMH, 101 V, 5.75 Ah
Elektromaschine	permanentmagneterregte Synchronmaschine
Nennleistung Motor	10 kW _{mech} @ 1500 1/min
Nennleistung Generator	ca. 14 kW _{mech} (Schätzwert)
Getriebe	automatisiertes Schubgliederbandgetriebe, 1 stufenloser Vorwärtsgang, 1 stufenloser Rückwärtsgang

7.1.2 Standard-Pkw

(Honda3, 2013-10)

Hersteller	Honda
Modell	Civic - Comfort
Baujahr	2010
Leergewicht	1.34 t
Zuladung	0.34 t
Verbrennungsmotor	Honda, Otto Viertakt
Abgasnorm	EURO V
Zylinderzahl	4
Hubraum	1.34 L
Nennleistung	73 kW @ 4800 1/min
Getriebe	manuelles Schaltgetriebe, 6 Vorwärtsgänge, 1 Rückwärtsgang

7.1.3 Vollhybrid-Stadtbus 12 m

(Volvo, 2010-02)

Hersteller	Volvo Buses
Modell	7700LH
Baujahr	2010
Leergewicht	12.2 t
Zuladung	5.8 t
Verbrennungsmotor	Volvo D5F215, Diesel Viertakt
Abgasnorm	EEV
Zylinderzahl	4
Hubraum	4.8 L
Nennleistung	161 kW @ 2200 1/min
Batterie	Magna E-Car Prototyp, Li-Fe-P, 600 V, 120 kW _{el} , 4.9 kWh _{el} , 210 kg
Elektromaschine	Volvo I-SAM, permanentmagneterregte Synchronmaschine
Nennleistung Motor	70 kW _{mech}
Nennleistung Generator	70 kW _{mech}
Getriebe	Volvo AT2412D I-Shift, automatisiertes Schaltgetriebe, 12 Vorwärts- / 4 Rückwärtsgänge

7.1.4 Standard-Stadtbus 12 m

(Blassnegger, 2005-07)

Hersteller	Mercedes Benz EvoBus
Modell	O530 Citaro
Baujahr	Anfang 2000er
Leergewicht	11.9 t
Zuladung	6.1 t
Verbrennungsmotor	Mercedes Benz OM 475, Diesel Viertakt
Abgasnorm	Euro III
Zylinderzahl	6
Hubraum	12.0 L
Nennleistung	260 kW @ 2000 1/min
Getriebe	Voith DIWA 3, automatisches Wandlergetriebe, 4 Vorwärtsgänge, 1 Rückwärtsgang

7.1.5 Microhybrid-Stadtbus 12 m

(Unruh, 2013-07)

Hersteller	Mercedes Benz EvoBus
Modell	O530 Citaro
Baujahr	2013
Leergewicht	11.3 t
Zuladung	6.7 t
Verbrennungsmotor	Mercedes Benz OM 936, Diesel Viertakt

Abgasnorm	Euro VI
Zylinderzahl	6
Hubraum	7.7 L
Nennleistung	220 kW _{mech} @ 2200 1/min
Batterie	Superkondensator als Rekuperationsmodul, 0.024 kWh _{el}
Elektromaschine	3 Lichtmaschinen 28 V, Zuschaltung bei Nutzbremse
Nennleistung Generator	12.6 kW _{el}
Getriebe	ZF Ecolife, automatisches Wandlergetriebe, 6 Vorwärtsgänge, 1 Rückwärtsgang

7.1.6 Vollhybrid-Pkw

(Neusser, 2013)

Hersteller	Volkswagen
Modell	Jetta Hybrid
Baujahr	2013
Leergewicht	1.51 t
Zuladung	0.52 t
Verbrennungsmotor	Volkswagen EA211 TSI, Otto Viertakt
Abgasnorm	Euro VI
Zylinderzahl	4
Hubraum	1.40 L
Nennleistung	110 kW @ 6000 1/min
Batterie	Li-Ion, 222 V, 1.1 kWh, 53 kg
Elektromaschine	permanentmagneterregte Synchronmaschine
Nennleistung Motor	20 kW _{el}
Nennleistung Generator	28 kW _{el}
Getriebe	Volkswagen DSG, automatisiertes Doppelkupplungsgetriebe, 7 Vorwärtsgänge, 1 Rückwärtsgang

7.2 Details Pedalampel

7.2.1 CANalyzer

Mittels eines Schnittstellenwandlers vom Typ CANcase XL des Hersteller Vector Informatik wurde ein Messlaptop an die CAN-Buses J1939 und J1587 angeschlossen. Auf dem Laptop lief das Programm CANalyzer, ebenfalls von Vector, womit die Messgrößen auf dem CAN-Bus ausgelesen wurden, welche die Steuergeräte im Fahrzeug untereinander austauschen. Für die Betätigung der Pedalampel wurden die Größen Gaspedalposition und Bremspedalposition benötigt. In einem separaten CAPL Steuerblock wurde programmiert:

Bremspedal = 0 % UND Gaspedal = 0 %

ASCII Wert "0" (binär 00110000) auf RS232 senden

Bremspedal ≤ 20 % ODER Gaspedal ≤ 70 %

ASCII Wert "1" (binär 00110001) auf RS232 senden

20 % ≤ Bremspedal ≤ 25 % ODER 70 % ≤ Gaspedal ≤ 90 %:

ASCII Wert "2", (binär 00110010) auf RS232 senden

25 % ≤ Bremspedal ODER 90 % ≤ Gaspedal:

ASCII Wert "3" (binär 00110011) auf RS232 senden

Die Benutzeroberfläche des CANalyzer mit dem CAPL Block ist in Abbildung 41 dargestellt.

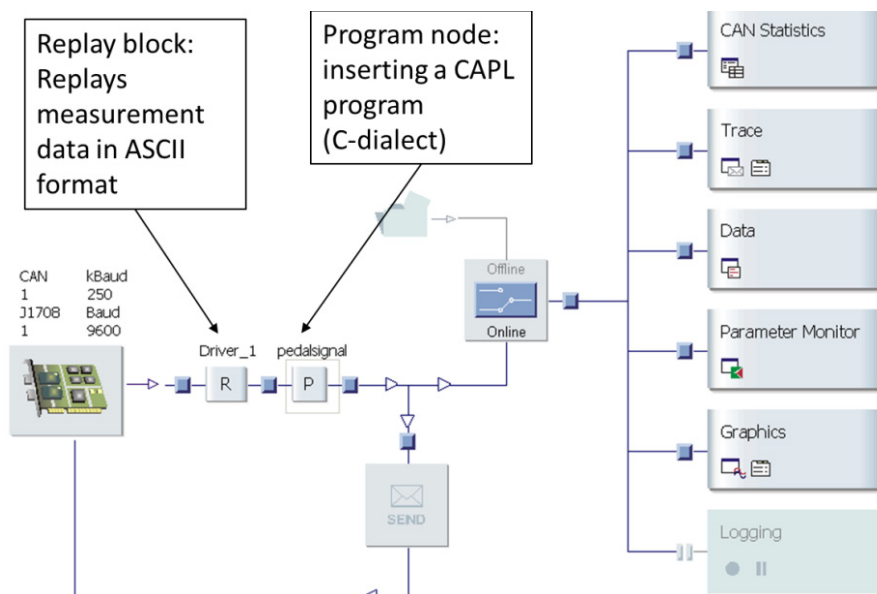


Abbildung 41: CANalyzer Benutzeroberfläche

Zusätzlich wurden noch Verbrauch und Strecke aufsummiert, um nach Fahrtende sofort den Streckenverbrauch in L/100km angeben zu können.

Der Quelltext des CAPL Programms:

```
variables
{

int i = 0;           // counter
int acc = 0;         // actual value accelerator pedal position
int acc_prev = 0;    // previous value accelerator pedal position
int brake = 0;       // actual value brake pedal position
int brake_prev = 0;  // previous value accelerator pedal position

int brake1 = 25;     // 1st limit brake pedal position
int brake2 = 20;     // 2nd limit brake pedal position
int acc1 = 90;       // 1st limit accelerator pedal position
int acc2 = 70;       // 2nd limit accelerator pedal position

/* initialisation of the characters to be sent via RS232
   declaration as char, size 2 B, content are characters with encoding UTF 16,
   Unicode Standard v6.2, C0 Controls and basic latin */
```


Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

```
char zero[2]="0";    // 0: U+0030
char green[2]="1";   // 1: U+0031
char yellow[2]="2";  // 2: U+0032
char red[2]="3";     // 3: U+0033

/* the integer 'light', byte-form, size 2 B, to carry the above defined characters */
byte light[2];

char starttext_char [40] ="BEGIN"; // a text message for control reasons, size 40 B
int length = 0;                    // a length counter
byte starttext_byte[40];           /* the integer 'starttext_byte', size 40 B,
    to carry the above defined message */

float time_v = 0;                  // the time at income of the actual velocity value
float time_v_prev = 0;            /* the time at income of the previous velocity
    value */
float time_FC = 0;                 // the time at income of the actual FC value
float time_FC_prev = 0;           // the time at income of the previous FC value
float timediff_v = 0;             /* the time difference between the previous and
    actual velocity value */
float timediff_FC = 0;            /* the time difference between the previous and
    actual FC value */
float v = 0;                      // initialize the actual velocity
float dist = 0;                   /* initialize the distance at income of actual
    velocity value */
float dist_prev = 0;              /* the distance at income of previous velocity
    value */
float diff_dist = 0;              /* the distance difference between the previous
    and actual velocity value */
float FC = 0;                     // initialize the actual FC
float FC_accum = 0;               /* initialize the accumulated FC at income of
    actual FC value */
float FC_accum_prev = 0;          /* the accumulated FC at income of previous FC
    value */
float diff_FC_accum = 0;          /* the volume difference between the previous and
    actual FC value */
float FC_per_dist = 0;            // the FC per distance in l/100km
int FC_per_dist_int = 0;          /* the FC per distance, converted to the number
    range to fill the new CAN message */
message FC_calc FC_intermed;      /* allocate the value 'FC_intermed' to the new CAN
    message 'FC_calc' */

}

// do at measurement start

on start
{
write("Started RS232 signalling."); // display an info text

rs232open(1);                      // open the serial port COM1

if (0!=rs232configure(1,9600,8,1,0)) /* configure the serial port, display
    the configuration */
{
write("Configuration RS232 OK: COM1, 9.6 k Bd, 8 databit, 1 stopbit, no parity");
}
else
{
```

```
write("RS232 Configuration failed.");           // display error message in case of fail
}

length = strlen(starttext_char) + 1;           /* write the number of bytes of
'starttext_char' to the counter 'length' */

for (i = 0; i < length; i++)                   /* write the characters from
'starttext_char' to the carrier integer 'starttext_byte', encoding UTF 16*/
{
    starttext_byte[i] = starttext_char[i];
}

rs232send(1, starttext_byte, length);          /* send the start message 'BEGIN' from
'starttext_byte' via RS232 to the receiver */
}

on message *
{
    output(this);          // forward all incoming J1939 messages
}

on j1587Message *
{
    output(this);          // forward all incoming J1587 messages
}

on message EBC1_X_A           // do at income of J1939 message 'EBC1_X_A' (10 Hz)
{
    output(this);             // forward the message
}

brake_prev = brake;           /* set the previous brake pedal position to the
    last value from the memory, what is the position from the previous CAN message*/

brake=this.BrakePedalPos.phys; /* read the physical value of the actual brake
    pedal position from the message */

/* If the actual brake and accelerator pedal positions are zero and one pedal was
    actuated before: set the carrier byte 'light' to 0 and send it.
    The command 'rs232send' converts the content of the carrier byte 'light' from
    16 bit UTF-16 to 8 bit ASCII, following the RS232 standard. */
if ((brake == 0 && acc == 0) && (brake_prev != 0 || acc_prev != 0))
{
    light[0] = zero[0];
    light[1] = zero[1];
    rs232send(1, light, 1);
}

/* if the brake pedal position switched from 0 to range green:
    set the carrier byte 'light' to 1 and send it*/
else if (brake_prev == 0 && 0 < brake && brake <= brake2)
{
    light[0] = green[0];
    light[1] = green[1];
    rs232send(1, light, 1);
}

/* if the brake pedal position switched from range green or yellow to range red:
    set the carrier byte 'light' to 3 and send it*/
else if (brake_prev <= brake1 && brake > brake1)
```

```
{
  light[0] = red[0];
  light[1] = red[1];
  rs232send(1, light, 1);
}

/* if the brake pedal position switched from range green or red to range yellow:
   set the carrier byte 'light' to 2 and send it*/
else if ((brake_prev <= brake2 || brake1 < brake_prev) && (brake2 < brake && brake <= brake1))
{
  light[0] = yellow[0];
  light[1] = yellow[1];
  rs232send(1, light, 1);
}

/* if the brake pedal position switched from range red or yellow to range green:
   set the carrier byte 'light' to 1 and send it*/
else if (brake_prev > brake2 && brake <= brake2)
{
  light[0] = green[0];
  light[1] = green[1];
  rs232send(1, light, 1);
}
}

on message EEC2_X_E                                // do at income of J1939 message 'EEC2_X_E' (20 Hz)
{
  output(this);                                     // forward the message

  // treat the accelerator pedal position equally to the brake pedal position, see above

  acc_prev = acc;

  acc = this.ApPosition.phys;

  if ((brake == 0 && acc == 0) && (brake_prev != 0 || acc_prev != 0))
  {
    light[0] = zero[0];
    light[1] = zero[1];
    rs232send(1, light, 1);
  }

  // evaluate the accelerator pedal position only, when the brake pedal is not actuated
  if (brake == 0)
  {
    if (acc_prev == 0 && 0 < acc && acc <= acc2)
    {
      light[0] = green[0];
      light[1] = green[1];
      rs232send(1, light, 1);
    }

    else if (acc_prev <= acc1 && acc > acc1)
    {
      light[0] = red[0];
      light[1] = red[1];
      rs232send(1, light, 1);
    }
  }
}
```

```
else if ((acc_prev <= acc2 || acc1 < acc_prev) && (acc2 < acc && acc <= acc1))
{
    light[0] = yellow[0];
    light[1] = yellow[1];
    rs232send(1, light, 1);
}

else if (acc_prev > acc2 && acc <= acc2)
{
    light[0] = green[0];
    light[1] = green[1];
    rs232send(1, light, 1);
}
}

on j1587Param FuelRateInstantaneous /* do at income of J1587 message
    'FuelRateInstantaneous' (5 Hz) */
{
    time_FC_prev = time_FC; /* set the time at the income of
        the previous FC signal from the memory to the value for the previous timestep */

    FC_accum_prev = FC_accum; /* set the accumulated FC at income
        of the previous FC signal from the memory to the value for the previous timestep */

    time_FC = timeNowFloat() / 100000; /* calculate the actual time from
        [10 us] to [s] */

    timediff_FC = time_FC - time_FC_prev; /* calculate the timedifference
        from previous to actual FC value*/

    FC = this.FuelRateInstantaneous.phys; // read the actual FC value in l/s

    diff_FC_accum = FC * timediff_FC; /* calculate the FC volume
        difference from previous to actual timestep:
        Delta_V [l] = FC_actual [l/s] * Delta_t [s] */

    FC_accum = diff_FC_accum + FC_accum_prev; /* add the actual FC volume
        difference to the accumulated FC volume from the previous timestep*/

    if (dist != 0) // do if the distance greater than 0
    {
        FC_per_dist = FC_accum / (dist / 100000); /* calculate the distance-based FC
            in l/100km */

        write("FC = %3.8f", FC_per_dist); /* display the actual FC [l/100km]
            value: 3 leading digits, 8 decimal digits*/

        FC_per_dist_int = FC_per_dist / 0.01; /* In the generated J1939 message
            the FC is stored as an unsigned 16 bit integer, value range 0 to 2^16 --> 0 to 65535.
            The factor to re-calculate the real FC is chosen as 0.01: its value range becomes
            0 to 655.35 l/km. Divide the actual FC value by this factor.*/

        FC_intermed.FC_per_dist_calc = FC_per_dist_int; /* write the FC in 16 bit integer
            format to the new CAN message*/

        output(FC_intermed); // output the new CAN message
    }
}
```

```
on j1587Param RoadSpeed          /* do at income of J1587 message
    'RoadSpeed' (12 Hz) */
{
    time_v_prev = time_v;          /* set the time at previous income of 'RoadSpeed'
        to the last time value from the memory*/

    dist_prev = dist;             /* set the distance at previous income of
        'RoadSpeed' to the last distance value from the memory*/

    time_v = timeNowFloat() / 100000; // calculate the actual time from [10 us] to [s]

    timediff_v = time_v - time_v_prev; /* calculate the timedifference from previous to
        actual velocity value*/

    v = this.RoadSpeed.phys;       // read the actual velocity value in [km/h]

    diff_dist = v / 3.6 * timediff_v; /* calculate the distance difference from previous
        to actual velocity value: Delta_s [m] = v_actual [m/s] * Delta_t [s] */

    dist = dist_prev + diff_dist;  /* Add the actual distance difference to the
        accumulated distance from the previous timestep */
}
```

7.2.2 C-Control

Ein Microcontroller C-Control Pro Mega 32 des Herstellers Conrad Elektronik wurde so programmiert, dass er bei Eingang über die Schnittstelle RS232 der ASCII Werte "0", "1", "2", oder "3" ein Relais aus, Ausgang 1 ein, Ausgang 2 ein oder Ausgang 3 ein schaltete.

Der Microcontroller wurde per RS232 mit dem CANalyzer Laptop verbunden, welcher abhängig von den Pedalpositionen die ASCII Werte sendete. Am Relais hing die Pedalampel, welche aus, grün, gelb oder rot geschaltet wurde.

Der Quelltext für die C-Control:

```
/* Declare the global variable 'buffer', size 80 B. It is used as fixed RAM address to
    buffer the incoming/outgoing RS232 signals. Its size contains reserved 6 B for
    FIFO, which are not available for Rx/Tx signal storage. */
byte buffer[80];

// Start the main program

void main (void)
{

    /* Set the portbits 20 to 23 of port no. C to output. A portbit is, according to the
        C-Control nomenclature, a single I/O connector of the MCU. */

    Port_DataDirBit(20,1);
    Port_DataDirBit(21,1);
    Port_DataDirBit(22,1);
    Port_DataDirBit(23,1);

    /* Initialize the serial port in interrupt mode:
        serial port no. 0, RAM address 'buffer', size Rx buffer 40 B, size Tx buffer 34 B,
```

```
    8 databits | 1 stopbit | no parity, 9.6 kBd */

Serial_Init_IRQ(0, buffer, 40, 34, SR_8BIT | SR_1STOP | SR_NO_PAR, SR_BD9600);

// Infinite loop: While (true)

while (1)
{
    RS232();          // Call the subroutine RS232, which switches the relais

    AbsDelay(50);     // Time delay of 50 ms: The loop is run with a frequency of 20 Hz
}

// The subroutine RS232, which reads the serial port

void RS232(void)
{
    int byte_in;      // The carrier byte for the received RS232 signals

    // Do only, if bytes were received during the last loop

    if (Serial_IRQ_Info(0, RS232_FIFO_RECV) != 0) /* Check, if received bytes are buffered
        in the last 50 ms: Return value of RS232_FIFO_RECV is unequal 0 */
    {

        byte_in = Serial_ReadExt(0); /* Transfer the received byte to 'byte_in'
            and empty buffer. This works only, when 1 B is received. For longer signals like
            texts the size of the occupied Rx buffer needs to be checked. */

        Msg_WriteChar(byte_in);      /* Display the received byte as decimal number on the
            C-Control IDE for control reasons */

        /* Do only, if the ASCII characters 0, 1, 2, 3 or N are received. N is the last
            character of the text 'BEGIN', which is sent from CANalyzer at the begin of the
            transmission. */

        if (byte_in == 48 || byte_in == 49 || byte_in == 50 || byte_in == 51 || byte_in == 78)
        /* 48, 49, 50, 51, N are the decimal numbers or characters corresponding to the bit
            sequences of size 8 b in ASCII format*/
        {
            Msg_WriteChar(13);        // Add a line break to the IDE display
        }

        if (byte_in == 48)            // If 0 is received, switch off the relais (no light)
        {
            Port_WriteBit(21,0);
            Port_WriteBit(22,0);
            Port_WriteBit(23,0);
        }
        else if (byte_in == 49)      /* if 1 is received, switch on connector 21, switch off
            connectors 22 and 23 */
        {
            Port_WriteBit(21,1);
            Port_WriteBit(22,0);
            Port_WriteBit(23,0);
        }
        else if (byte_in == 50)      /* if 2 is received, switch on connector 22, switch off
            connectors 21 and 23 */
        {
            Port_WriteBit(21,0);
            Port_WriteBit(22,1);
            Port_WriteBit(23,0);
        }
    }
}
```



```

{
  Port_WriteBit(21,0);
  Port_WriteBit(22,1);
  Port_WriteBit(23,0);
}
else if (byte_in == 51)      /* if 3 is received, switch on connector 23, switch off
connectors 21 and 22 */
{
  Port_WriteBit(21,0);
  Port_WriteBit(22,0);
  Port_WriteBit(23,1);
}
}
}

```

7.3 Rechengang zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Hybridbussen

Fall "Mittel": Batteriepreis sinkt p. a. um 5 %, Tankstellen-Realpreis Diesel steigt um 2 ct/(J*L), inflationsbereinigt

1	Kaufpreisdifferenz Hybrid- zu Standardbus	50 000	€		
2	Fremdkapitalzinssatz	4.5%			
3	Dauer Abzahlung	10	J		
4	Zins-Mehrbelastung Hybrid	13 189	€		
5	Batteriepreis 2013	30 000	€		
6	mittl. Batteriepreis-entwicklung	-5%	/J		
7	<i>siehe weiter unten</i>				
8	Dieselpreis 2013	1.36	€/L		
9	Mittl. Entwicklung Realpreis Diesel 2013-2023	0.020	€/(J*L)		
10	Abschlag Dieselpreis Bus	-18%			
11	Dieselpreis Bus 2013	1.12	€/L		
12	Mittl. Änderung Realpreis Diesel Bus 2013-2023	0.016	€/(J*L)		

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

		7	13		
	Jahr	Batteriepreis €	Dieselpreis €/L		
J1	2013	30 000	1.12		
J2	2014	28 500	1.13		
J3	2015	27 075	1.15		
J4	2016	25 721	1.17		
J5	2017	24 435	1.18		
J6	2018	23 213	1.20		
J7	2019	22 053	1.21		
J8	2020	20 950	1.23		
J9	2021	19 903	1.25		
J10	2022	18 907	1.26		
14	Preisdifferenz Basis-Wartungsvertrag Hybrid zu Standard	-130	€/Mon =	-1 560	€/J
15	Anzahl Batterietausch in 10 J	1			
16	Batterieverschleiß	193	€/Mon =	2 321	€/J
17	Preisdifferenz Komplett-Wartungsvertrag Hybrid (mit Batterie) zu Standard	63	€/Mon =	761	€/J
18	Mehrkosten Hybrid zu Standard in 10 J	70 803	€		
19	Jahresfahrleistung	80 000	km/J =	800	100km/J
20	Verbrauch Standard	48	L/100km		
21	Jahresverbrauch Standard	38 400	L/J		

22	23										24
	Betriebsjahr	aufsummierte Einsparung									
Einsparung Verbrauch Hybr zu Std											Amorti- sations- dauer in J
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	aufsummierte Einsparung										
5%	2 143	4 317	6 523	8 760	11 029	13 330	15 661	18 025	20 420	22 846	29.8
6%	2 571	5 181	7 828	10 513	13 235	15 996	18 794	21 630	24 503	27 415	24.9
7%	3 000	6 044	9 132	12 265	15 441	18 661	21 926	25 235	28 587	31 984	21.4
8%	3 429	6 908	10 437	14 017	17 647	21 327	25 058	28 840	32 671	36 553	18.8
9%	3 857	7 771	11 742	15 769	19 853	23 993	28 191	32 445	36 755	41 122	16.8
10%	4 286	8 635	13 046	17 521	22 059	26 659	31 323	36 049	40 839	45 692	15.2
11%	4 714	9 498	14 351	19 273	24 264	29 325	34 455	39 654	44 923	50 261	13.8
12%	5 143	10 361	15 655	21 025	26 470	31 991	37 587	43 259	49 007	54 830	12.7
13%	5 571	11 225	16 960	22 777	28 676	34 657	40 720	46 864	53 091	59 399	11.8
14%	6 000	12 088	18 265	24 529	30 882	37 323	43 852	50 469	57 175	63 968	11.0
15%	6 429	12 952	19 569	26 281	33 088	39 989	46 984	54 074	61 259	68 537	10.3
16%	6 857	13 815	20 874	28 033	35 294	42 655	50 117	57 679	65 342	73 107	9.7
17%	7 286	14 679	22 179	29 786	37 500	45 321	53 249	61 284	69 426	77 676	9.2
18%	7 714	15 542	23 483	31 538	39 705	47 987	56 381	64 889	73 510	82 245	8.7
19%	8 143	16 406	24 788	33 290	41 911	50 653	59 513	68 494	77 594	86 814	8.3
20%	8 572	17 269	26 092	35 042	44 117	53 318	62 646	72 099	81 678	91 383	7.9

- 1) Aufpreis des Hybridbusses gegenüber einem verbrauchsoptimierten Standardbus (*Preisdiff_Hybr-Std*), beide in Vollausrüstung für den Linienbetrieb
- 2) Die Zinsen, die jährlich für geliehenes Fremdkapital gezahlt werden. Für diese Rechnung wird angenommen, dass große Investitionen wie die Neuanschaffung von Bussen auf Kredit getätigt werden. Die lfd. Kosten wie Kraftstoff, Wartungsvertrag und Batterieverschleiß beim Hybrid werden aus den lfd. Einnahmen gezahlt. Bei einer tatsächlichen Geschäftsanbahnung würde der einmalige Batterietausch in den Wartungsvertrag eingerechnet und nicht separat aufgeführt.
- 3) Die Dauer, innerhalb der der Kredit zurückgezahlt wird. Im vorliegenden Rechenbeispiel werden die Busse bezüglich der Gesamtkosten innert 10 J verglichen.
- 4) Der Mehrbetrag, der an Zinsen innert 10 J für den Hybrid aufgrund des höheren Anschaffungspreises gezahlt werden muss (*Aufzins_Hybr*). Es wird mit der Rentenbarwertformel gerechnet:

Annuität_konstant = ...

... *Schuldenaufnahme* • (*Jahreszins* • (1 + *Jahreszins*)^{*Jahre_Laufzeit*}) / ...

... ((1 + *Jahreszins*)^{*Jahre_Laufzeit*} - 1)

à $A = S \cdot (Z \cdot (1 + Z)^n) / ((1 + Z)^n - 1)$

à $\Delta \mathcal{L}_{hybr-std,10J} = \mathcal{L}_{hybr-std} \cdot (n \cdot (Z \cdot (1 + Z)^n) / ((1 + Z)^n - 1) - 1)$

- 5) Gesamtpreis Batterie in €

- 6) mittlere Entwicklung des Batterie-Kaufpreises in %/J, nächste 10 J (*Entw_Pr_batt,m*)

- 7) Preis der neuen Batterie bei Austausch in €, nächste 10 J ($Pr_Batt,10J$)
 $Pr_Batt,10J(J+1) = Pr_Batt,10J(J) * Entw_Pr_batt,m$
Der Batteriepreis für das jeweils nächste Jahr (J+1) im betrachteten Zeitraum ist das Produkt aus dem Preis im Jahr davor (J) und der jährl. Batteriepreisentwicklung
- 8) mittlerer Dieselpreis in €/L, aktuelles Jahr (Pr_Di)
- 9) mittlere Entwicklung des Dieselpreises in €/(J*L), nächste 10 J ($Entw_Pr_Di,m$)
- 10) Großkunden-Abschlag Dieselpreis in % ($Abschl_Pr_Di_Bus$)
- 11) mittlerer Dieselpreis in €/L, Busunternehmen aktuelles Jahr (Pr_Di,Bus)
 $Pr_Di,Bus = (100 \% + Abschl_Pr_Di_Bus) * Pr_Di$
- 12) mittlere Entwicklung des Dieselpreises Busunternehmen in €/(J*L), nächste 10 J ($Entw_Pr_Di,m,Bus$)
 $Entw_Pr_Di,m,Bus = (100 \% + Abschl_Pr_Di_Bus) * Entw_Pr_Di,m$
- 13) Mittlerer Dieselpreis Busunternehmen in €/L, nächste 10 J ($Pr_Di,m,Bus,10J$)
 $Pr_Di,m,Bus,10J(J+1) = Pr_Di,m,Bus,10J(J) + Entw_Pr_Di,m,Bus$
Der Dieselpreis für das jeweils nächste Jahr (J+1) im betrachteten Zeitraum ist die Summe aus dem Dieselpreis im Jahr davor (J) und der jährl. Dieselpreisänderung für Busunternehmen
- 14) Differenz im jährl. Zahlbetrag für den Basis-Wartungsvertrag, Hybrid zu Standard ($Diff_Wv_hybr-basis--std$). Darin sind enthalten: Verschleißteile und Reparatur, mit Ausnahme von Reifen und Gewalteinwirkung. Beim Hybrid sind die Kosten für den 1maligen Batterietausch nicht drin, da diese nicht 5 J im Voraus bekannt sind.
- 15) Anzahl der Batteriewechsel, nächste 10 J
n = 1: Batteriewechsel im 6. Jahr
n = 2: Batteriewechsel im 4. und 7. Jahr
- 16) Kosten des Batterieverschleißes in €/J ($K_B_verschl$)
 $K_B_verschl = Pr_batt,6 / 10 J$ ODER $K_B_verschl = (Pr_batt,4 + Pr_batt,7) / 10 J$
Abhängig von der Anzahl der Batteriewechsel wird der Kaufpreis der neuen Zellen im 6. Jahr oder im 4. und 7. Jahr auf die Abschreibungsdauer 10 J umgelegt.
- 17) Differenz im jährl. Zahlbetrag für den Komplett-Wartungsvertrag ($Diff_Wv_hybr-kompl--std$), Hybrid zu Standard, beim Hybrid Basis + Batteriekosten
 $Diff_Wv_hybr-kompl--std = Diff_Wv_hybr-basis--std + K_B_verschl$
- 18) Mehrkosten des Hybridbusses gegenüber dem Standardbus in 10 J (Mk_hybr_10J)
 $Mk_hybr_10J = Preisdiff_Hybr-Std + Aufzins_Hybr + 10 * Diff_Wv_hybr-kompl--std$
- 19) Jahresfahrleistung eines 12 m Stadtbusses in 100 km/J (Jkm_Bus)
- 20) Streckenverbrauch eines 12 m Standardbusses in L/100km ($Verbr_Std$)
Es wurde ein hoher Wert von 48 L/100km für schweren Innenstadtverkehr gewählt
- 21) Jahresverbrauch eines Standardbusses in L/J (Jv_std)
 $Jv_std = Verbr_Std * Jkm_Bus$
- 22) Relative Einsparung beim Dieselpverbrauch, Hybrid- zu Standardbus ($Spar_Di_hybr$)

23) Aufsummierte Einsparung, Hybrid- zu Standardbus ($Summ_Spar_hybr$)

$$Summ_Spar_hybr(J+1) = [Spar_Di_hybr * Jv_std * Pr_Di,m,Bus,10J(J+1)] + ... \\ ... + Summ_Spar_hybr(J)$$

Pro Einsparwert (1, 2, 3 ...%) wird für 10 Betriebsjahre die aufsummierte Einsparung in den Kraftstoffkosten des Hybridbusses gerechnet. Die **jährl. Einsparung** im jeweils nächsten Jahr (J+1) ist das Produkt aus %-Diseleinsparung Hybrid, Jahresverbrauch Standardbus und Dieselpreis. Die **aufsummierte Einsparung** im jeweils nächsten Jahr ist die Summe aus der jährl. Einsparung in dem Jahr (J+1) und der aufsummierten Einsparung im Jahr davor (J).

24) Amortisationsdauer des Hybridbusses in J

Die Amortisationsdauer ist der Wert in Jahren, bei dem die aufsummierte Einsparung des Hybridbusses genauso groß wie seine Mehrkosten gegenüber einem Standardbus werden. Nach diesem Zeitpunkt ist der Hybrid bei den Lebensdauerkosten günstiger als ein Standardbus.

8 Kontaktdaten

ProjektleiterIn	Dipl.-Ing. Antonius Kies
Institut/Unternehmen	TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
Kontaktadresse	Inffeldgasse 19, 8010 Graz, kies@ivt.tugraz.at , Tel. +43 316 873 30283, Fax. +43 316 873 30262, http://www.ivt.tugraz.at

Projektpartner:

Magna E-Car Systems, Graz
TU Graz, Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Holding Graz Linien