

Zwischenbericht 2005, 14. Dezember 2005

**47715**

# Massnahmen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus

Autor und Koautoren	Bruno Schneider
Beauftragte Institution	Institut für Energietechnik, Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
Adresse	ETH Zentrum, ML J40, 8092 Zürich
Telefon, E-Mail, Internetadresse	044 632 79 92, <a href="mailto:schneider@lav.mavt.ethz.ch">schneider@lav.mavt.ethz.ch</a> , <a href="http://www.lav.ethz.ch">www.lav.ethz.ch</a>
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	47715 / Verfügungs-Nr. 87835
Dauer des Projekts (von – bis)	01.10.2002 – 30.06.2006 (Verlängerungsantrag vom 12.12.2005)

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieses Projekts besteht in der Auslegung eines teillastoptimierten Antriebs für PKW-Anwendungen mittels ausgeklügelter Simulation. Dabei rücken vermehrt Konzepte in den Vordergrund, die einen starken Elektrifizierungsgrad in Kombination mit einem entsprechend konfigurierten Verbrennungsmotor aufweisen.

Während dieses Berichtjahres ist es gelungen, das Grundgerüst des neuen auf Matlab/Simulink beruhenden Modells zu vervollständigen und erste Ergebnisse für ein übliches Fahrzeug im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zu präsentieren.

In guter Übereinstimmung mit – zur Zeit in der Literatur spärlich vorhandenen Messdaten – konnte mit einem „Mild-Hybrid“-Antrieb gegenüber dem herkömmlichen Verbrennungsmotor-Antrieb ein Verbrauchsvorteil im NEFZ von knapp 25% errechnet werden.

Der Nutzen des neuen Modells kann erst dann voll ausgeschöpft werden, wenn zusätzliche Komponenten und deren dynamisches und thermisches Verhalten (z.Bsp. Abgaskatalysatoren) in der Struktur der Software berücksichtigt werden. Um diese Erweiterung vorzunehmen und umfangreiche Simulationsfälle durchzurechnen, so dass das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential diverser Massnahmen zuverlässig und vergleichend abgeschätzt werden kann, ist eine kostenneutrale Streckung des ursprünglich auf den 31.12.2005 terminierten Projektes um ein halbes Jahr erforderlich.

## Projektziele

Ziel des Projektes ist die Darstellung eines neuen PKW-Antriebs, der bei vollem Potential zur Erfüllung von Nullemissionsstandards (bezogen auf CO, UHC, NOx, Russ) eine spezifische CO<sub>2</sub>-Reduktion um 25 % gegenüber dem heutigen Stand der Technik aufweist. Es wird dabei von herkömmlichen Treibstoffen ausgegangen, womit keine Infrastrukturprobleme betreffend der Kraftstoffversorgung entstehen. Die hier vorgeschlagene Technologie ist direkt auf Benzin, Erdgas und Diesel als Treibstoff anwendbar (bei letzterem ist die Nullemissionstauglichkeit jedoch noch nicht gegeben).

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Einleitung

Für die Modellierung von Fahrzeugen resp. deren Eigenschaften in Standardisierten Fahrzyklen (ECE, NEFZ etc.) sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Modellierungsansätze möglich:

Bei der ersteren (und häufiger Angewandten) Methode wird die Belastung des Fahrzeugs und der Arbeitspunkt der Antriebskomponenten rückwärts aus der durch den Fahrzyklus vorgegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit und Beschleunigung berechnet.

Dagegen wird mit der zweiten Methode das Fahrzeug an und für sich modelliert, d.h. jede Komponente des Fahrzeugs (Motoren, Getriebe, Kupplungen etc.) wird durch ein eigenes Untermodell mitsamt seinem statischen und dynamischen Verhalten abgebildet. Das auf diese Weise aus vielen miteinander verknüpften Komponenten zusammengestellte Fahrzeugmodell kann nun wie ein echtes Fahrzeug betrieben werden – mit Gas geben, schalten, kuppeln usw.

Ein Vergleich der beiden Methoden zeigt dass die erste Vorgehensweise grundsätzlich einfacher, aber auch viel weniger flexibel ist. Hochdynamische Vorgänge wie z.Bsp. das Einkuppeln und der Einfluss des „Fahrers“ lässt sich damit nicht simulieren. Die zweite Methode stellt dagegen ein flexibles Modell zur Verfügung, das nicht nur für die Simulation von vordefinierten Fahrzyklen geeignet ist. Der Einfluss des „Fahrers“ wird mitgenommen, da die Eingangsgrößen des Modells denjenigen eines echten Fahrzeugs entsprechen. Mit dieser Methode können auch weniger „offizielle“, aber in der Praxis durchaus beliebte Fragen untersucht werden, so z.Bsp. wie sich das Fahrzeug beim Sprint von Null auf 100km/h verhält...

In der vorliegenden Arbeit wurde die zweite Vorgehensweise gewählt, d.h. es wurde ein Modell des Fahrzeugs mitsamt seinen relevanten Komponenten erstellt. Ein Regler übernimmt die Rolle des Fahrers und folgt durch Gas geben, schalten und bremsen der durch den Fahrzyklus vorgegebenen Bewegung.

### Untersuchte Modelle: „Konventioneller Antrieb“ vs. „Milder Hybrid“

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des im vorliegenden Bericht untersuchten Fahrzeugmodells. Das Fahrzeug wird durch einen konventionellen Benzinmotor angetrieben; In der Hybridvariante sitzt zudem nach der Kupplung ein Elektromotor/Generator auf der Getriebeeingangswelle. Diese milde Hybridbauweise erfordert nur wenige Änderungen am Aufbau des Fahrzeugs und lässt sich – sofern der Platz vorhanden ist – sehr einfach realisieren.

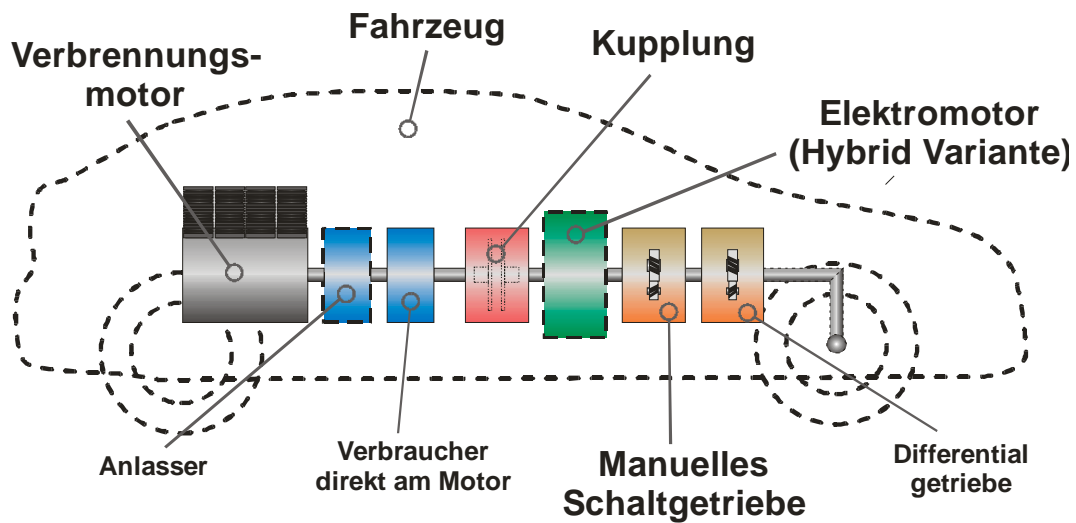


Fig. 1: Untersuchtes Fahrzeugmodell mit Komponenten (Gestrichelte Umrisse: Optionale Komponenten und das Fahrzeug).

### Modellierung des Fahrzeugs

Das Fahrzeug mit den einzelnen Komponenten wurde in **Matlab/Simulink** modelliert (**Matlab/Simulink** ist eine Software von **MathWorks** zur Modellierung, Lösung und Analyse von dynamischen Systemen). Die Verbindungen zwischen den Bauteilen erfolgt über standardisierte **Simulink** Bussignalleitungen, damit ist sichergestellt, dass später abgeänderte oder neue Bauteile ohne Kompatibilitätsprobleme in die bestehenden Fahrzeugmodelle eingebaut werden können.

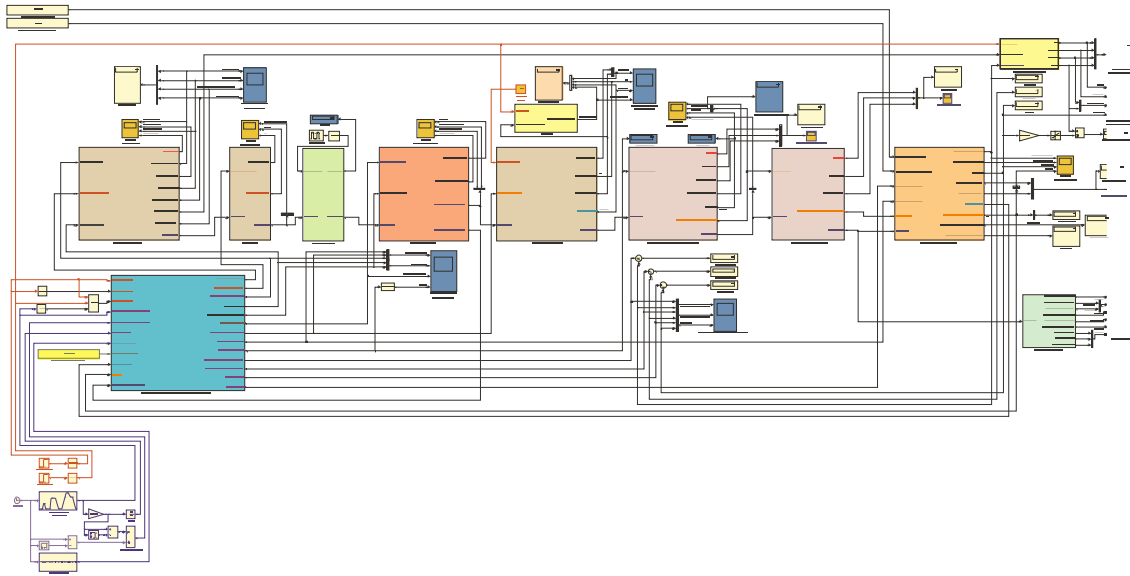


Fig. 2: Matlab Simulink Modell des Hybrid-Fahrzeugs. Komponenten von links unten nach rechts oben: Fahrzyklusvorgabe, Regler (= „Fahrer“), Verbrennungsmotor, Anlasser (Reserve), Lasten am Motor (Klimaanlage etc.), Trockenkupplung, Elektromotor/Generator, 5-Gang Handschaltgetriebe, Endgetriebe, Fahrzeug.

### Fahrzeug und Antriebsdaten

Das modellierte Fahrzeug entspricht in etwa einem eher sportlichen Mittelklassewagen in der Größenklasse eines Opel Astra oder VW Golf. Angetrieben wird es durch einen 2 Liter Vierzylinder Ottomotor (Kennfeld Abbildung 3) was mit der gewählten Getriebeübersetzung eine Höchstgeschwindigkeit von etwa 200  $\text{km/h}$  ermöglicht.

<b>Fahrzeugdaten:</b>	Gesamte Fahrzeugmasse Testbereit: 1500kg, Hybridvariante 1600kg Stirnfläche: $2.1\text{m}^2$ , Cw-Wert: 0.33 Rollwiderstandsbeiwerte statisch: 0.011, dynamisch: $3.3\text{E-6}$
<b>Getriebedaten:</b>	Manuell, 5 Gänge, Spreizung 3.93, Effizienz 97% (statischer Verlust: 1% von $P_N$ )
<b>V-Motordaten</b>	4 Zylinder, 2 L Hubraum. Maximale Leistung = 105kW, Max. Moment = 190Nm
<b>E-Motordaten:</b>	Maximale Leistung = 30kW, Maximales Moment = 200Nm (Antrieb und Bremsen)

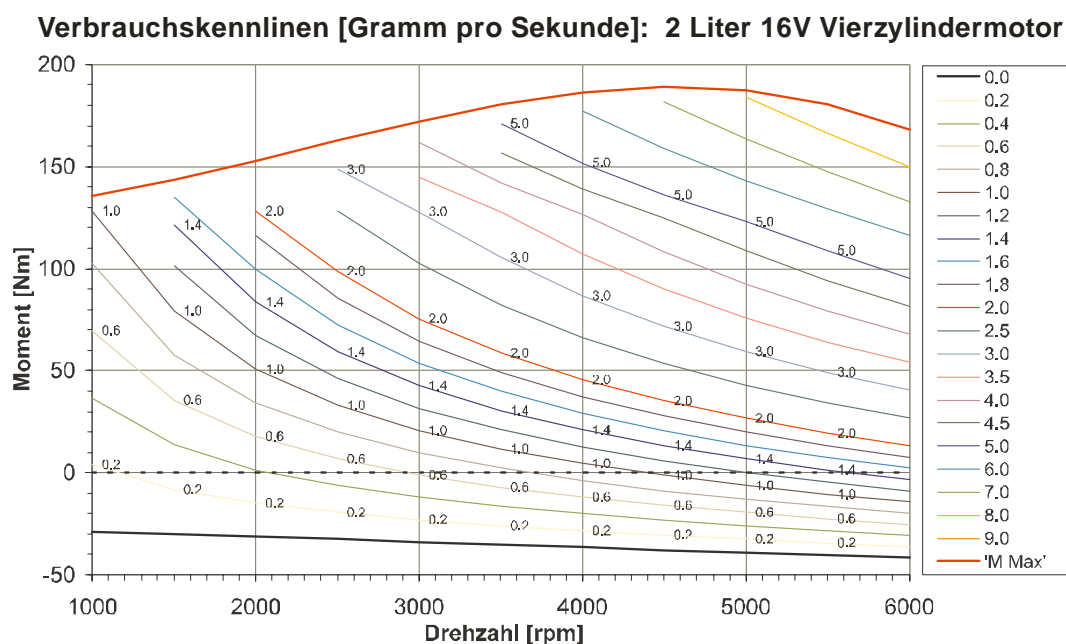


Fig. 3: Fahrzeugdaten und Verbrauchskennlinien des Verbrennungsmotors inklusive Schubetrieb.

Die gute Motorisierung dieses Autos führt dazu, dass die Betriebspunkte des Motors in den relevanten gesetzlich vorgegebenen Fahrzyklen im sehr tiefen Teillastbereich liegen – d.h. der Motor wird in einem Gebiet mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad betrieben. Um so interessanter ist bei diesen Fahrzeugen der Einsatz der Hybridtechnologie, was Autohersteller in letzter Zeit eindrücklich demonstriert haben.

Im weiteren sollen die Eigenschaften dieses Fahrzeugs mit und ohne Hybridantrieb im Rahmen des Neuen Europäischen Fahrzyklus für leichte Motorwagen (NEFZ ohne Warmlaufphase) untersucht werden. Dieser Zyklus dauert 1180 Sekunden bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von  $33.6 \text{ km/h}$  (Maximum =  $120 \text{ km/h}$ ), dabei wird eine Strecke von 11 km zurückgelegt.

### Einfluss des „Fahrers“ auf das Fahrverhalten

In der Abbildung 4 ist ein Teil eines EUDC Zyklus für ein konventionelles und für ein Hybridfahrzeug dargestellt. Deutlich erkennbar ist der Anfahrvorgang (mit schleifender Kupplung) beim An-

trieb mit dem Verbrennungsmotor. Der Hybrid fährt elektrisch an, erst wenn die Leistung des Elektromotors nicht mehr ausreicht wird der Verbrennungsmotor eingeschaltet und der Elektroantrieb ausgeschaltet. Der Verbrennungsmotor wird dabei durch das Schliessen der Kupplung zwischen dem Elektroantrieb (resp. dem Getriebe) und dem Motor in Gang gesetzt (der Anlasser des Verbrennungsmotors wird nicht benötigt).

Die weiteren Zacken im Drehzahlverlauf zeigen die Schaltpunkte des manuellen Getriebes – die Momentübertragung zwischen Verbrennungs- oder Elektromotor und den Antriebsrädern muss während dem Schaltvorgang kurz unterbrochen werden.

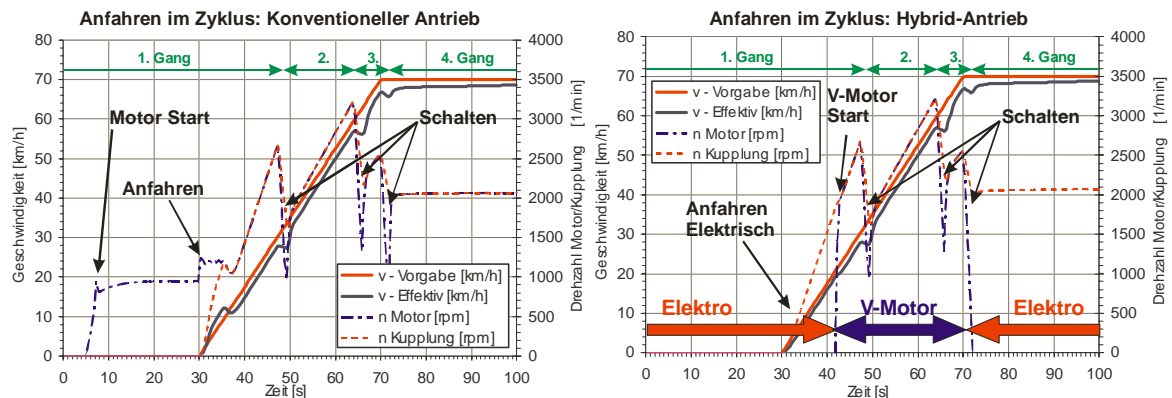


Fig. 4: Anfahren und Gänge schalten. Ausgezogene Linien: Soll- und Ist-Fahrzeug-Geschwindigkeit, Gestrichelte Linien: Drehzahlen des Motors und der Kupplung (Getriebeseite), beim Hybrid entspricht dies der Elektromotordrehzahl.

Hier wird der Einfluss des „Fahrers“ resp. der Fahrzeugsteuerung deutlich sichtbar: Der Anfahrvorgang mit schleifender Kupplung kann ganz unterschiedlich ausfallen, auch die Zugkraftunterbrüche beim Schalten sind stark vom „Fahrer“ abhängig. Beim Hybridantrieb kommen weitere Freiheitsgrade dazu: Je nach Leistungsbedarf des Fahrzustands, der Leistungsfähigkeit des Elektroantriebs und dem Batteriezustand kann der Elektroantrieb ein- und ausgeschaltet werden. Zur Erhöhung der Gesamtleistung kann er auch zusammen mit dem Verbrennungsmotor betrieben werden.

## Ergebnisse im NEFZ Standardzyklus

Abbildungen 5 und 6 zeigen den Fahrzeuggeschwindigkeitsverlauf und den aktiven Gang beim konventionell Angetriebenen und dem Hybridfahrzeug. Die Geschwindigkeitsverläufe sind sehr ähnlich: Während beim konventionellen Antrieb vor allem Totzeiten durch das Anfahren mit schleifender Kupplung entstehen, kommt es beim Hybridantrieb zu kurzen Unterbrüchen durch die Antriebsumschaltung. Da der Elektromotor/Generator am Getriebeeingang sitzt, kommt es in beiden Fällen zu gleich langen Zugkraftunterbrüchen durch die Schaltvorgänge.

Gut sichtbar ist das Herunterschalten der Gänge beim Abbremsen des Fahrzeugs: Beim konventionellen Fahrzeug kann so gebremst werden, ohne dass die Fahrzeugbremse zu oft eingesetzt werden muss. Beim Hybridfahrzeug ermöglicht das Herunterschalten, dass die Momentlimite des Generators nicht überschritten wird und so die ganze Bremsleistung wieder zurückgewonnen werden kann.

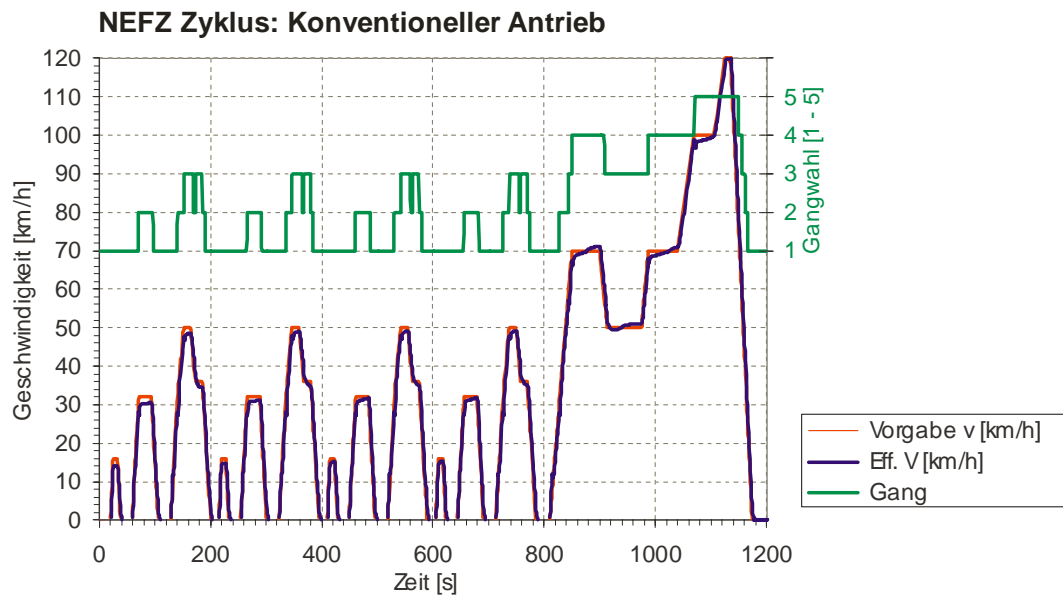


Fig. 5: Geschwindigkeitsprofil und Gangwahl im NEFZ Zyklus für das Fahrzeug ohne Hybridantrieb.

In der Abbildung 6 ist zusätzlich eingetragen wann das Hybridfahrzeug mit dem elektrischen Antrieb resp. der elektrischen Bremse fährt (inklusive Stillstandszeiten, der Verbrennungsmotor läuft in der Hybridvariante im Stillstand nicht).

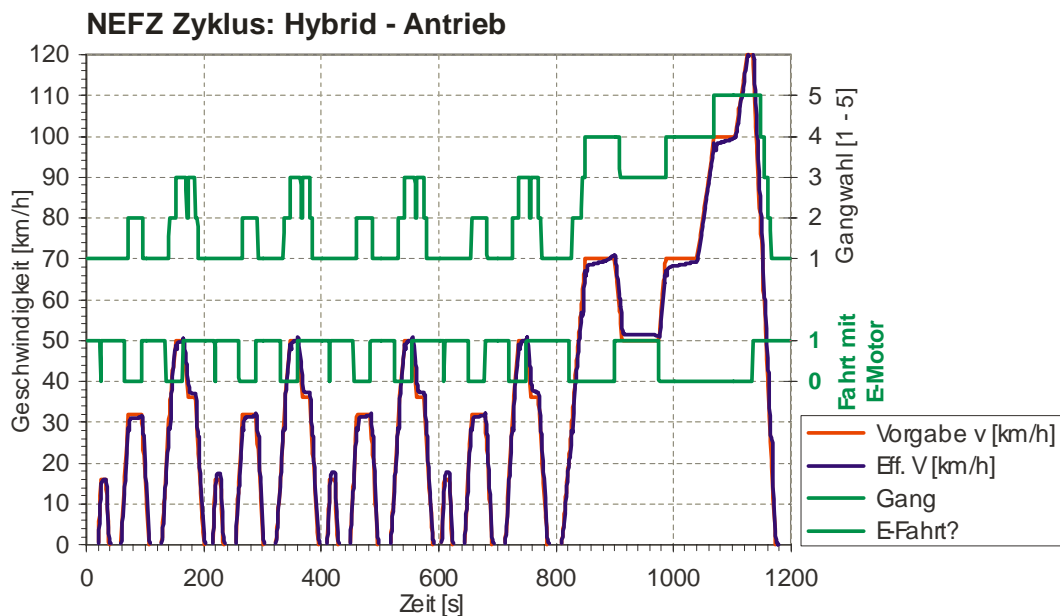


Fig. 6: Geschwindigkeitsprofil, Gangwahl und Fahrt elektrisch Ja/Nein im NEFZ Zyklus für das Fahrzeug mit Hybridantrieb.

Die Energiebilanz des elektrischen Teils des Hybridfahrzeugs ist aus der Abbildung 7 ersichtlich. Der Ladezustand der Batterie muss am Ende des Zyklus wieder auf demselben Niveau wie am Anfang sein (Berechnet mit einem Batterie-Gesamtwirkungsgrad von 75%).

Diese Simulationsrechnungen zeigen, dass durch den Einsatz dieser doch relativ einfachen, milden Hybrid-Technik der Benzinverbrauch des Fahrzeugs im NEFZ Zyklus von  $7.9 \text{ l}/_{100\text{km}}$  auf  $6.0 \text{ l}/_{100\text{km}}$  reduziert werden kann, was einer Einsparung von fast 25% entspricht!

	<b>Antriebsvariante „Konventionell“</b>	<b>Antriebsvariante „Milder Hybrid“</b>	<b>Einsparung „Milder Hybrid“</b>
Verbrauch im städtischen Teil: (Dauer: 780 s, Strecke: 4058m)	0.38 l $9.37 \text{ l}/_{100\text{km}}$	0.23 l $5.72 \text{ l}/_{100\text{km}}$	-39%
Verbrauch im ausserstädtischen Teil: (Dauer: 400 s, Strecke: 6955m)	0.49 l $7.10 \text{ l}/_{100\text{km}}$	0.43 l $6.22 \text{ l}/_{100\text{km}}$	-12 %
<b>Verbrauch im gesamten Zyklus: (Dauer: 1180 s, Strecke: 11013m)</b>	<b>0.87 l <math>7.94 \text{ l}/_{100\text{km}}</math></b>	<b>0.66 l <math>6.04 \text{ l}/_{100\text{km}}</math></b>	<b>-24 %</b>
Gewichtszunahme durch Hybridisierung:		ca. + 100kg	
Maximal notwendige Batteriekapazität (bei 15% Ausnutzung):		< 1 kWh	

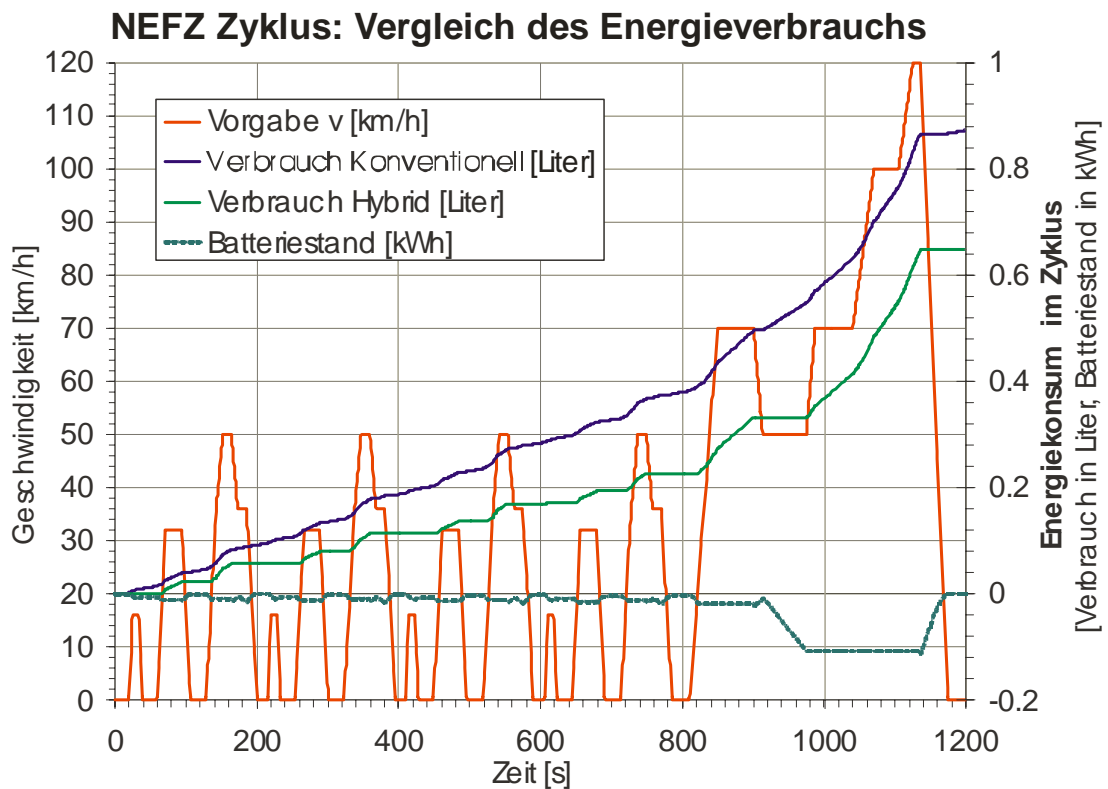


Fig. 7: Vergleich des Energieverbrauchs zwischen konventionellem Antrieb und Hybrid-Antrieb im NEFZ Zyklus (Distanz 11.013km). (Gesamter Benzinverbrauch in Liter, die Batterie ist am Ende des Zyklus wieder auf dem gleichen Niveau wie am Start).

## Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Mit dem vorliegenden **Matlab/Simulink** Modell wurde eine gute Basis für eine ausführliche Bewertung von verschiedenen Antriebskonzepten bei unterschiedlichen Anwendungen resp. Lastfällen (Zyklen) geschaffen. Die Modellierung der einzelnen Komponenten als in sich geschlossene Einheiten erlaubt auch viele weitere Parameter und Zustandsgrößen in die Simulation einfließen zu lassen, so z.Bsp. die Komponententemperaturen (Einfluss auf die Kennfelder, Wirkungsgrade), die Abgastemperaturen (Einfluss auf die Katalysatortemperatur und somit auf dem Schadstoffausstoss) usw. Durch die Standardisierung der Verbindungen können einzelne Komponenten des Gesamtmodells wie z.Bsp. das Getriebe ohne grossen Aufwand durch andere Bauelemente ersetzt werden.

Besonders interessant sind die folgenden Erweiterungen für die Weiterentwicklung des Modells:

- Neue Komponenten (VTG und Automatik-Getriebe, Supercaps anstelle der normalen Batterien)
- Bauteiltemperaturen, Wärmebilanzen
- Kennfelder und Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Temperatur
- Katalysatoreffizienz, Schadstoffausstoss in Abhängigkeit der Temperaturen
- Andere Regelstrategien (Fahrer), Optimierung der Hybrid-Regelung
- Verbrauchsreduktionsstrategien (Downsizing, Zylinderabschaltung)

Die wichtigsten dieser Arbeiten werden im Verlauf des nächsten Halbjahres abgeschlossen und ausführliche Rechnungen mit verschiedenen Varianten werden das Potential des Simulationstools und der möglichen technologischen Optionen demonstrieren.

## Referenzen

- [1] K. Boulouchos, H. Hörler, M. K. Eberle: ***Diverse Vorlesungsunterlagen zum Thema Verbrennungskraftmaschinen***, 1990 – 2005
- [2] J. Inhelder, ***Verbrauchs und schadstoffoptimiertes Ottomotor Aufladekonzept***, Diss. ETH Zürich Nr. 11948, 1996
- [3] P. Dietrich, ***Gesamtenenergetische Bewertung verschiedener Betriebsarten eines Parallel-Hybridantriebes mit Schwungradkomponente und stufenlosem Weitbereichsgetriebe für einen Personenwagen***, Diss. ETH Zürich, Nr. 12958, 1999
- [4] ***Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich der Abgasemissionen von motorisierten Strassenfahrzeugen, der periodischen Nachkontrolle von Motorfahrzeugen und der Treibstoffqualität***, BUWAL, 2002