



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

MASSNAHMEN ZUR REDUKTION DER CO₂ – EMISSIONEN VON PKW ANTRIEBEN IM RE- ALEN FAHRZYKLUS

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Bruno Schneider, Institut für Energietechnik, Laboratorium für Aerothermo-
chemie und Verbrennungssysteme**

ETH Zentrum, ML J40, 8092 Zürich

schneider@lav.mavt.ethz.ch

www.lav.ethz.ch

Impressum

Datum: 30. November 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Dr. A. Hintermann

Projektnummer: 47715

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1. Ausgangslage	3
2. Ziel der Arbeit	3
4. Ergebnisse	4
Die Matlab/Simulink Bibliothek der Fahrzeugbaugruppen	4
Modelliertes Fahrzeug, Motorisierung	6
Untersuchte AntriebsVarianten	7
Beispiel: Fahrzyklus und Gangwahl mit Handschalt- und CVT Getriebe	7
Beispiel: NEFZ Fahrzyklus mit einem Hybrid-Antrieb	8
Treibstoffverbrauch der Antriebsvarianten im NEFZ Fahrzyklus	10
Vergleich der Antriebsvarianten Beim 0 - 100 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ Sprint	10
5. Diskussion	11
Vergleich des Treibstoffverbrauchs der Verschiedenen Antriebsvarianten	11
Trade Off zwischen Treibstoffverbrauch und Beschleunigungszeiten	13
6. Schlussfolgerungen	14
Referenzen	15
Anhang	16
Kennfelder der eingesetzten Benzinmotoren:	16
Kennfeld der Batterie:	17
Kennfeld des eingesetzten Elektromotors/Generators:	18
Listing der für die Simulationsrechnungen verwendeten Bauteilparameter:	18

Zusammenfassung

Die Reduktion der CO₂ Emissionen gehört heute zu den vordringlichsten Anforderungen bei der Entwicklung neuer Fahrzeugmodelle. Neben dem Treibstoffverbrauch müssen aber auch kundenorientierte Aspekte wie z.Bsp. das Beschleunigungsvermögen bei der Entwicklung beachtet werden damit die Fahrzeuge auf dem Markt erfolgreich auftreten können. Der Trade Off zwischen „Sparsamkeit“ und „Sportlichkeit“ kann aber nur durch technische Innovationen überwunden werden, wovon die Hybrid Antriebe aus aktueller Sicht sicherlich das grösste Potential aufweisen.

Hybrid Antriebssysteme sind komplex und können in vielen unterschiedlichen Varianten realisiert werden. Es ist daher unumgänglich dass diese Varianten schon in der Konzeptphase mit einem guten Simulationswerkzeug unter möglichst realistischen Bedingungen untersucht werden können.

In diesem Projekt wurde ein Simulations-Werkzeug erarbeitet das dies ermöglicht. Es besteht aus einer Bibliothek in der alle relevanten Komponenten von Fahrzeugen mit oder ohne Hybrid Antrieb abgelegt sind. Aus diesen Bibliotheks-Bauteilen können Fahrzeuge mit den unterschiedlichen Antriebskonzepten schnell und einfach zusammengestellt und auf virtuellen Teststrecken getestet werden.

Der hier gewählte Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von anderen Simulationstools da hier das Fahrzeug an sich direkt modelliert wird und nicht die Belastung resp. die Arbeitspunkte der Bauteile rückwärts aus dem Fahrzyklus berechnet werden. Mit dieser Methode kann das Fahrzeug auf jeder beliebigen Fahrstrecke untersucht werden, der Einfluss des „Fahrers“ wird dabei ebenso berücksich-

tigt wie die Auswirkung einzelner Bauteiländerungen auf das Fahr- und Verbrauchsverhalten des gesamten Fahrzeugs.

Die in diesem Projekt entwickelte Bibliothek wurde im Weiteren dazu eingesetzt um Acht unterschiedlich angetriebene, aber ansonst identische PKW's zu vergleichen (zwei Motorgrössen, zwei Getriebetypen, mit/ohne mildem Hybrid Antrieb auf elektrischer Basis). Der Vergleich umfasste dabei nicht nur der durchschnittliche Treibstoffverbrauch im NEFZ Standardzyklus sondern auch das Beschleunigungsvermögen bei einem Sprint von Null auf 100 km/h.

Es zeigt sich, dass das gleiche Fahrzeug ohne Verlust an „Sportlichkeit“ zu einem wesentlich sparsameren Umgang mit dem Treibstoff gebracht werden kann: Ausgehend vom gewählten Basisfahrzeug (PKW der Golf/Astra Klasse) kann der Umbau des Antriebs von einem 105kW 2.0L Benzinmotor mit einem 5 Gang Handschaltgetriebe zu einem 75kW 1.2L Benzinmotor + 30kW Elektromotor/Generator mit einem CVT Getriebe den Treibstoffverbrauch im NEFZ Fahrzyklus um 35% reduzieren! (Von 7.0 l/100km auf 4.5 l/100km) Gleichzeitig verbessert sich die Sprintzeit auf 100 km/h mit dem Hybrid-Antrieb (Booster Betrieb mit beiden Antrieben) um 5% (von 10.4s auf 9.9s).

Anmerkung:

Gegenüber dem ursprünglich zusätzlich anvisierten Ziel der Berücksichtigung von thermischen Effekten im Antriebsstrang (Katalysatoraufwärmung usw.) in Zusammenhang mit spezifischen motorischen Massnahmen, wurde hier in Absprache mit dem Programmleiter vorgezogen, die Arbeit auf die exakte und regelungstechnisch aufwendige Abbildung verschiedener, auch in Zukunft relevanter Komponenten zu fokussieren; eine Berücksichtigung der Abgasnachbehandlung kann in einem nächsten Projekt, wenn Interesse seitens von Industriepartner besteht eingebaut werden.

1. Ausgangslage

Treibstoff – sei es Benzin oder Diesel – ist ein kostbarer Stoff. Nicht nur der Endlichkeit der Ressourcen oder des Preises wegen (der in Zukunft mit Sicherheit weiter ansteigen wird) sondern auch weil es durch keinen anderen Stoff mit vernünftigem Aufwand im grossen Stil zu ersetzen ist.

Nichtsdestotrotz nimmt der Durchschnittsverbrauch der verkauften Autos laufend zu. Dies einerseits da der durchschnittliche Neuwagen immer mehr Treibstoff schluckt, aber andererseits auch durch die Zunahme des „städtischen“ Verkehrsanteils an der insgesamt zurückgelegten Fahrstrecke (Staus und stockender Verkehr, Ausbreitung der Agglomerationen mit Lichtsignalen, Kreiseln etc.)

Der einfachste Lösungsansatz für die Problematik wären kleinere, leichtere Autos mit kleinen effizienten Motoren. Leider sind derartige Fahrzeuge (wie z.Bsp. der 3 Liter Lupo von Volkswagen) wiederholt am Markt gescheitert - ein erfolgreiches Konzept lässt sich also nur mit Fahrzeugen realisieren die genügend gross (und damit auch schwer) sind und mit anderen Autos vergleichbare Fahrleistungen aufweisen.

Die Energiebilanz von weiterhin grossen und schweren Autos kann aber nur verbessert werden indem der Verbrennungsmotor ausschliesslich in einem optimalen Bereich betrieben wird und zudem die beim Bremsen ansonsten „vernichtete“ Energie gespeichert und beim Anfahren wieder genutzt wird, d.h. die Fahrzeuge benötigen **einen Hybridantrieb** (eine Kombination verschiedener Antriebsvarianten).

Ein Fahrzeug mit mehreren Antrieben und einem Energie-Zwischenspeicher kann einerseits den Verbrennungsmotor getaktet mit einem optimalen Wirkungsgrad betreiben, bietet andererseits aber auch die Möglichkeit kurzzeitig beide Antriebe gemeinsam einzusetzen („Kickdown“, Boost Effekt). So lassen sich diese Fahrzeuge gleichzeitig sparsam und - wenn erforderlich - auch sportlich bewegen.

Als Zwischenspeicher für die Bremsenergie resp. der überschüssigen Energie des Verbrennungsmotors können sowohl mechanische Systeme wie Schwungräder/Druckbehälter als auch elektrische Systeme mit Batterien oder Supercaps eingesetzt werden. Für kleinere Fahrzeuge wie PKW's werden heute aber fast ausschliesslich elektrische Systeme eingesetzt.

Die Auslegung eines Hybridantriebs bietet enorm viele Freiheitsgrade. Nur mithilfe von Simulationsprogrammen ist es möglich aus den vielen denkbaren Varianten die sinnvollen herauszusuchen und deren Eigenschaften zu optimieren.

2. Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll ein Simulations-Tool geschaffen werden mit dem grundsätzlich beliebige Varianten von Hybridantrieben für unterschiedlichste Einsatzzwecke untersucht werden können. Die Eigenschaften der Antriebsvarianten für PKW's werden dabei normalerweise in standardisierten Fahrzyklen (ECE, NEFZ etc.) untersucht.

Grundsätzlich sind 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. Mit der zweiten Methode wird dagegen das Fahrzeug an und für sich simuliert, d.h. jede Baugruppe 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 dafür auch viel weniger flexibel ist. Hochdynamische Vorgänge wie z.Bsp. das Einkuppeln und der nicht zu unterschätzende Einfluss des „Fahrsers“ können damit nicht simuliert werden. Die zweite Methode stellt dagegen ein flexibles Modell zur Verfügung mit dem nicht nur Simulationen von vordefinierten Fahrzyklen möglich sind – die abzufahrende Strecke muss hier nicht schon vorher bekannt sein. Der Einfluss der Fahrercharakteristik wird mitgenommen da die Eingangsgrössen des Modells denjenigen eines echten Fahrzeugs entsprechen. Mit dieser Methode können auch weniger „offizielle“, aber in der Praxis (und am Markt) durchaus wichtige Fragen untersucht werden wie zum Beispiel die Eigenschaften des Fahrzeugs bei einem Sprint von Null auf 100km/h ...

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

Die Baugruppen welche im Fahrzeug eingebaut werden können sind als parametrierbare Simulink Komponenten (Subsysteme) in einer Bibliothek abgelegt. Ein konventionelles Fahrzeug kann so zum Beispiel aus den Komponenten für Verbrennungsmotoren, Starter, Kupplung, Schaltgetriebe, Differential, Fahrzeug (Karosserie) und Fahrzeugregler (Fahrer) aufgebaut werden.

Die Verbindung der Simulink Komponenten erfolgt über Simulink Busstrukturen. Sie folgen den Energieflüssen zwischen den Bauteilen (mechanische Energie über Wellen, elektrische Energie zwischen Batterie und Elektromotor/Generator) oder stellen dem Fahrzeugregler Zustandsinformationen der Baugruppen zur Verfügung (Drehzahlen, Wirkungsgrade, Limiten etc).

Mithilfe dieser Bibliothek wird im Weiteren das Potential von „Mild-Hybrid“ Antriebsvarianten gegenüber einem konventionellen Antrieb untersucht (in einem „Mild-Hybrid“ Antrieb sitzt der Elektromotor/Generator direkt auf der Getriebe-Eingangswelle und lässt sich daher mit geringem konstruktivem Aufwand realisieren). Neben den Verbrauchseigenschaften soll auch die kundenorientierten Aspekte der Fahrzeugeigenschaften untersucht werden. Als Verbrennungsmotoren kommen hier ausschliesslich Benzinmotoren zum Einsatz da ein Nullemissionskonzept mit einem Dieselmotor noch nicht möglich ist.

Die Verbrauchseigenschaften der Fahrzeuge werden im Neuen Europäischen Fahrzyklus für leichte Motorwagen (NEFZ ohne Warmlaufphase) ermittelt und verglichen. Dieser Zyklus dauert 1180 Sekunden bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 33.6 km/h (Maximum = 120 km/h), dabei wird eine Strecke von etwas über 11 km zurückgelegt.

4. Ergebnisse

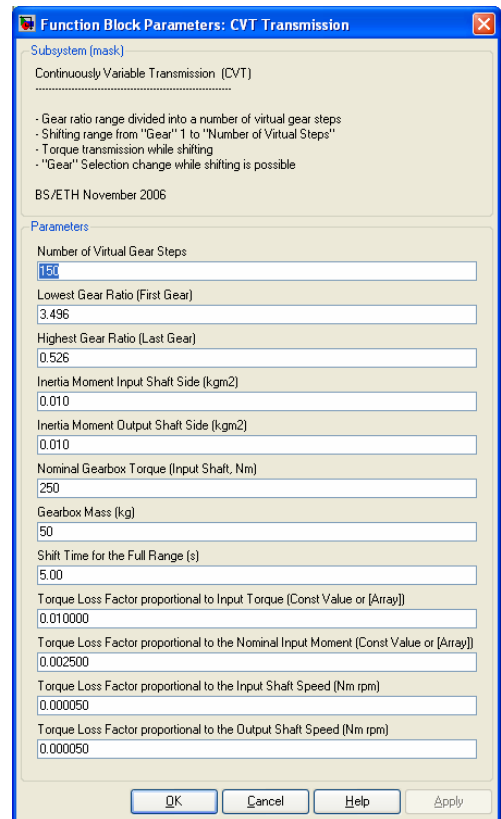
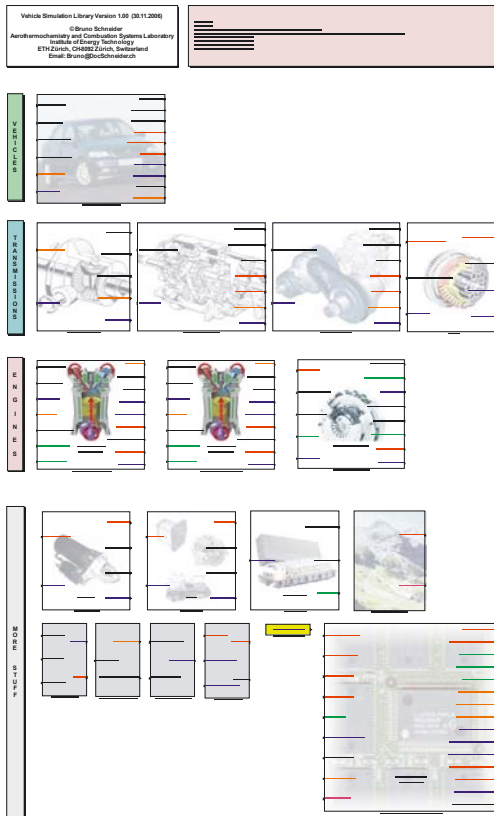
DIE MATLAB/SIMULINK BIBLIOTHEK DER FAHRZEUGBAUGRUPPEN

Wie im letzten Abschnitt erwähnt wird in diesem Simulationsmodell das Fahrzeug direkt aus den auch real vorhandenen Baugruppen aufgebaut. In der Bibliothek gibt es also Komponenten für Motoren, Getriebe, Karosserien usw. Diese Baugruppen wurden soweit wie möglich als generische Komponenten programmiert, die effektiv im Fahrzeugmodell gewünschten Eigenschaften können über Parameter eingegeben werden (zum Beispiel Getriebeübersetzungen, Anzahl Gänge, Wirkungsgrade). Parametrierung können sowohl als Konstanten als auch als Matlab Variablen eingegeben werden. Figur 2 zeigt als Beispiel die Eingabemaske für das CVT Getriebe.

Figur 1 zeigt die aktuell vorhandenen Bauteile der Bibliothek (Von oben links nach unten rechts sind dies: Bibliothek Versionskennung und Kommentarblock. Dann ein PKW Fahrzeug (Karosserie). Darunter ein fixes Getriebe (Differential), ein manuelles und ein CVT Schaltgetriebe und eine Kupplung. Dann folgen zwei Benzinmotoren und ein Elektromotor/Generator. Die zweitunterste Reihe beinhaltet einen Anlasser, Lasten am Motor, eine NiMH Batterie und die Quelle für die Fahrstrecke. Darunter einige Hilfskomponenten und ganz rechts der Fahrzeugregler).

Weitere Varianten einzelner Baugruppen welche sich nicht durch simple Parametervariationen realisieren lassen (zum Beispiel andere Motoren oder Getriebe) lassen sich sehr einfach realisieren. Durch die standardisierten Ein/Ausgänge und Bus-Strukturen können sie später ohne weitere Anpassungsarbeiten direkt in bestehende Modelle integriert werden.

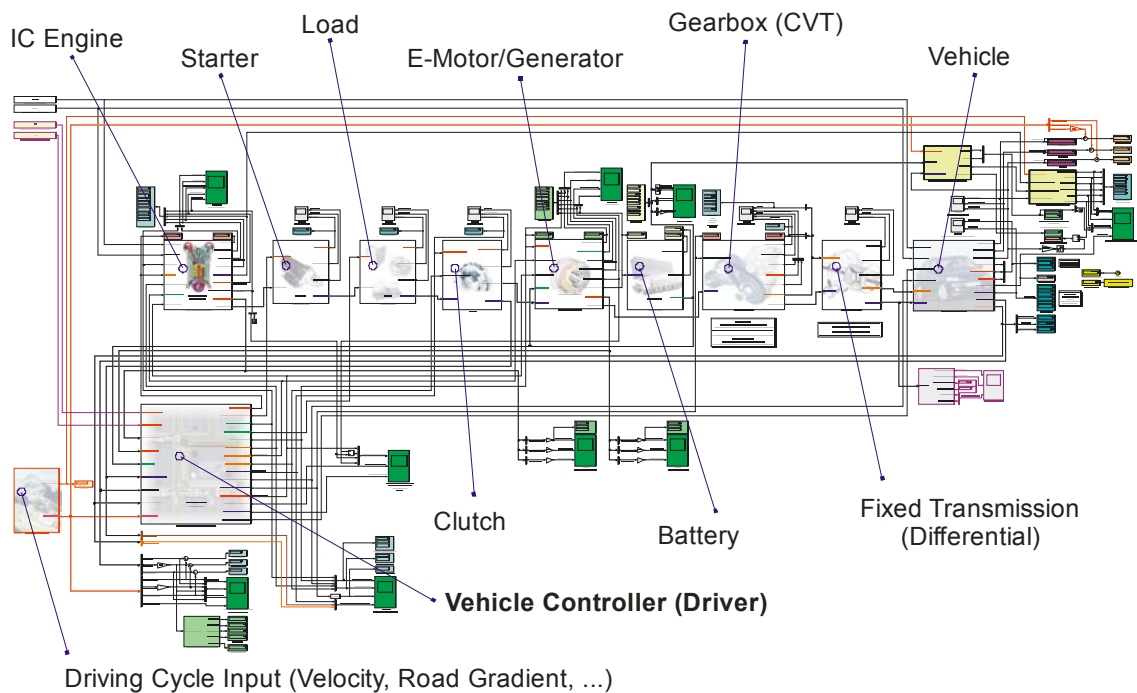
Figur 3 zeigt ein aus den Komponenten der Bibliothek aufgebautes Modell eines Hybridfahrzeugs. Neben den Baugruppen aus der Bibliothek sind für die Berechnungen keine weiteren Simulink Bauteile notwendig – d.h. alle nicht beschrifteten Objekte in Figur 3 dienen nur der Anzeige resp. Kontrolle von Betriebsdaten des Fahrzeugs resp. der Fahrzeugkomponenten.



Figur 1: Bibliothek mit den Fahrzeug-Komponenten.

Figur 2: Eingabemaske der CVT Getriebeparameter.

Die Basis für die Bibliothek und Simulationsrechnungen ist Matlab/Simulink (Matlab Version 7.1.0.246 (R14) Service Pack 3). Auf einem mittelmässigen PC (Athlon64/3500 oder Pentium M 2.16GHz) dauert die Simulation eines NEFZ Fahrzyklus ca. 6 Minuten (Simulationszeit 1200 Sekunden, Zeitschritt 20 Millisekunden, fixed step solver ode5).



Figur 3: Ein Modell eines Hybridfahrzeugs.

MODELLIERTES FAHRZEUG, MOTORISIERUNG

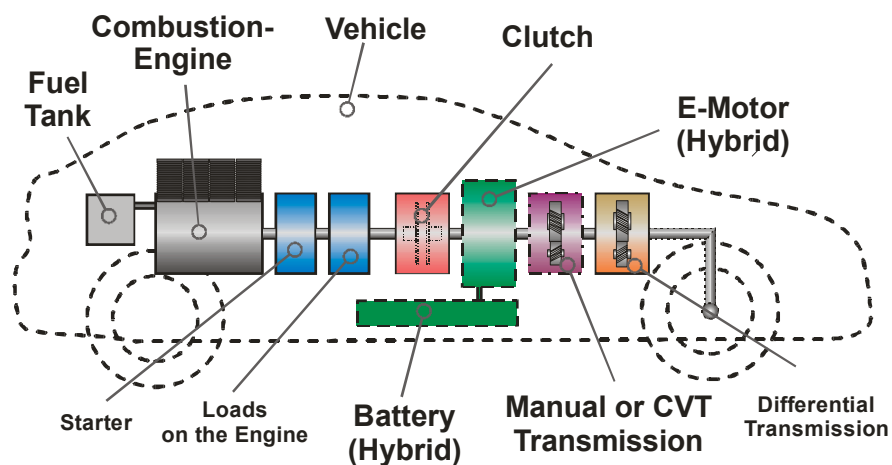
Das modellierte Fahrzeug entspricht einem Mittelklassewagen in der Grössenklasse eines Opel Astra oder VW Golf. Angetrieben wird es in der Basisvariante durch einen 2.0 Liter Vierzylinder Ottomotor mit 105kW Leistung.

Die Fahrzeug- und Antriebsdaten sind in der Tabelle 1 aufgeführt (Kennfelder der Antriebe und der Batterie sind im Anhang zu finden):

Fahrzeug:	PKW der VW Golf resp. Opel Astra Klasse Gewicht je nach Antrieb zwischen 1400kg und 1600kg Stirnfläche: 2.1m ² , Cw-Wert: 0.33 Rollwiderstandsbeiwerte statisch: 0.011, dynamisch: 3.3E-6
Verbrennungsmotoren:	2.0L Vierzylinder 16V Benzinmotor Max. Leistung: 105kW bei 6000 1/min Max. Drehmoment: 190Nm bei 4500 1/min (> 170Nm zwischen 3000 und 6000 1/min)
	1.2L Vierzylinder 16V Benzinmotor Max. Leistung: 75kW bei 6900 1/min Max. Drehmoment: 110Nm bei 5300 1/min (> 100Nm zwischen 3300 und 7000 1/min)
Elektromotor und Generator (Hybrid):	Max. Leistung: 30kW (Motor und Generator) Max. Drehmoment: 125Nm (Motor und Generator)
Batterie (Hybrid):	NiMH: 228 Zellen à 6.5Ah Leistungsdichte: 600W/kg Gewicht: 57kg
Getriebevarianten:	5 Gang Handschaltgetriebe Spreizung 3.93, Gangwechselzeit 0.5s
	CVT Automatikgetriebe Spreizung 6.65, Umschaltung voller Bereich in 5s

Tabelle 1: Fahrzeug und Antriebsvarianten.

Figur 4 zeigt die prinzipielle Anordnung der Komponenten im Fahrzeug. Als „Milder Hybrid“ ist der Elektromotor/Generator zwischen der Kupplung und dem Getriebe eingebaut. Diese Bauweise ist nicht so Aufwendig wie die Hybrid Varianten mit einem Drehmoment-Mischgetriebe (Toyota Prius), hat aber den Nachteil dass die Drehzahlen von Benzin- und Elektromotor nicht unabhängig voneinander eingestellt werden können.



Figur 4: Komponenten der untersuchten Fahrzeuge.

Der Anlasser und das 12V Bordnetz (mit Alternator und Batterie) wurden auch bei den Hybrid-Varianten beibehalten damit das Fahrzeug auch mit leeren Fahrbatterien betriebsbereit ist.

UNTERSUCHTE ANTRIEBSVARIANTEN

Tabelle 2 führt die in diesem Bericht untersuchten Antriebsvarianten auf:

Bezeichnung	Hybrid	Motorisierung	Getriebe	Fahrzeuggewicht
CONV 5GEAR 2.0L	Nein	2.0L Ottomotor	5 Gang Manuell	1500 kg
CONV 5GEAR 1.2L	Nein	1.2L Ottomotor	5 Gang Manuell	1410 kg
CONV CVT 2.0L	Nein	2.0L Ottomotor	CVT	1500 kg
CONV CVT 1.2L	Nein	1.2L Ottomotor	CVT	1410 kg
HYBRID 5GEAR 2.0L	Ja	2.0L Ottomotor	5 Gang Manuell	1610 kg
HYBRID 5GEAR 1.2L	Ja	1.2L Ottomotor	5 Gang Manuell	1520 kg
HYBRID CVT 2.0L	Ja	2.0L Ottomotor	CVT	1610 kg
HYBRID CVT 1.2L	Ja	1.2L Ottomotor	CVT	1520 kg

Tabelle 2: Untersuchte Antriebsvarianten.

Das in der Tabelle 2 aufgeführte Fahrzeuggewicht beinhaltet auch den Fahrer (es ist das Gewicht beim Start des Fahrzyklus). Für die Gewichtsrechnung wird auch berücksichtigt dass die Masse der im Fahrzeug eingebauten Bauteile einen Einfluss auf die notwendige Karosseriefestigkeit und damit das Karosseriegewicht hat (25% der Komponentenmasse wird zur Verstärkung der Karosserie zusätzlich benötigt).

BEISPIEL: FAHRZYKLUS UND GANGWAHL MIT HANDSCHALT- UND CVT GETRIEBE

Figuren 5 und 6 zeigen die Fahrt eines konventionellen Fahrzeugs (d.h. ohne Hybrid Antrieb) über einen NEFZ Fahrzyklus. Aufgetragen ist auf der linken Skala die geforderte resp. effektive Fahrzeuggeschwindigkeit und auf der rechten Skala die jeweils aktive Getriebestufe. Beim CVT Getriebe (Figur 6) wird die an sich unendlich feine Gangabstufung aus praktischen Gründen in viele diskrete „virtuelle“ Getriebestufen unterteilt (in den vorliegenden Rechnungen immer auf 150 Stufen).

Der Vorteil der CVT (Continuously Variable Transmission) Getriebe, die feine Abstufung der Übersetzungen, ermöglicht dass der Motor immer mit der hinsichtlich des Wirkungsgrades optimalen Drehzahl betrieben werden kann. Zudem kann im Gegensatz zum Handschaltgetriebe auch während dem Verstellen der Übersetzung (schalten) Drehmoment übertragen werden (keine Schaltpausen). Ein Handschaltgetriebe kann während dem Schalten kein Drehmoment übertragen, hat dafür aber einen gegenüber dem CVT Getriebe besseren Wirkungsgrad.

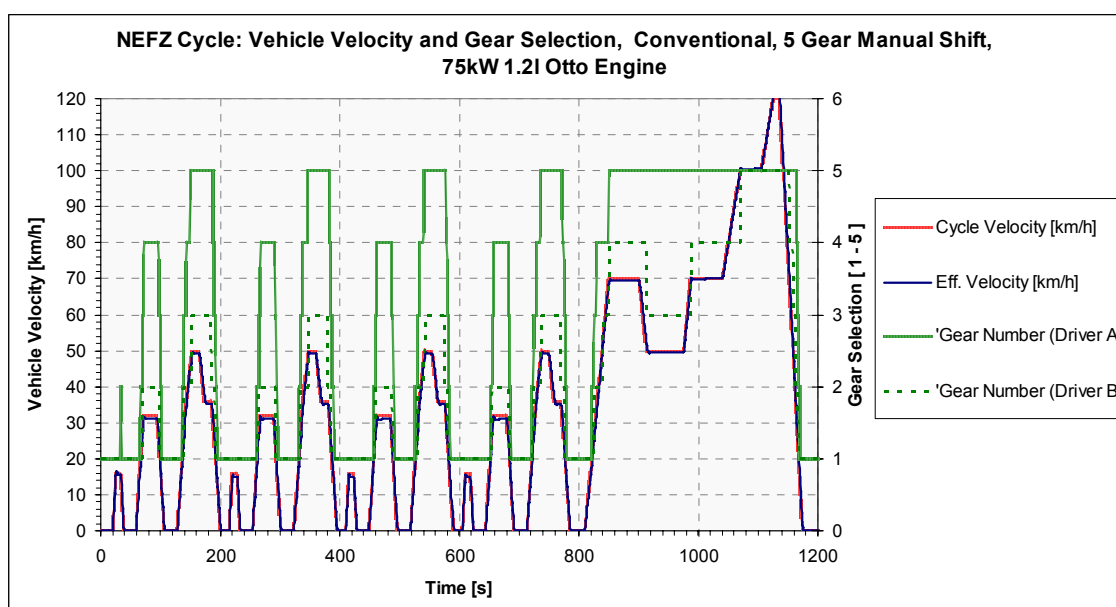
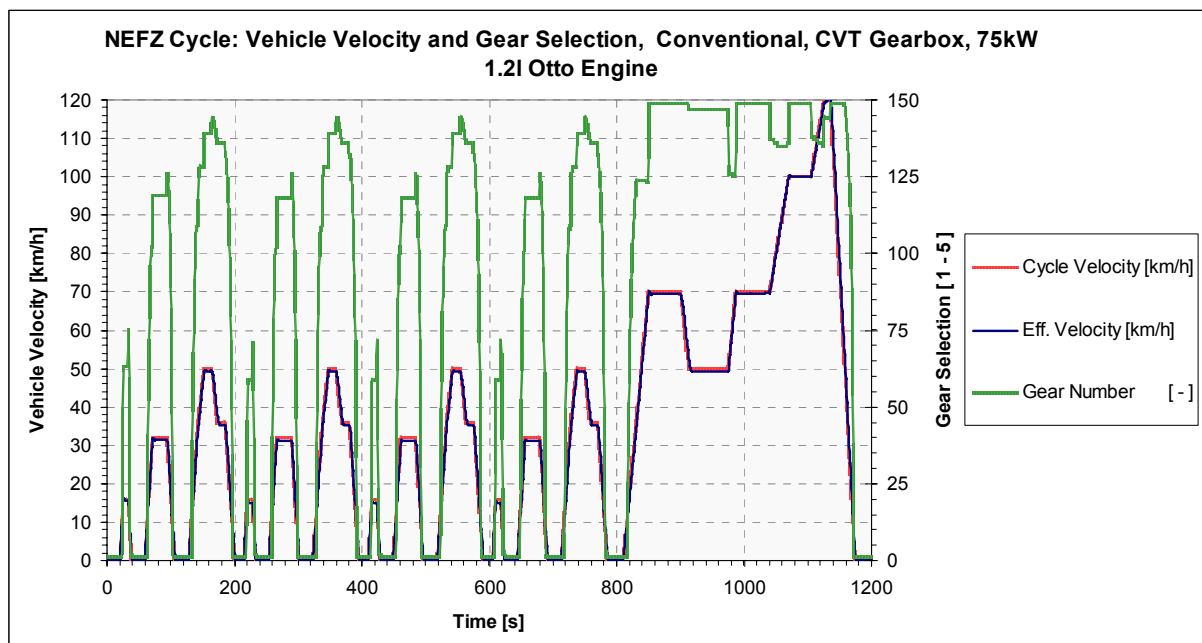


Figure 5: NEFZ Fahrzyklus (Geschwindigkeit und Gangwahl) mit einem 5 Gang Handschaltgetriebe.

In Figur 5 (manuelles Getriebe) zeigt zusätzlich die Schaltprofile von zwei unterschiedlichen Fahrertypen (Fahrzeugregler). Fahrer A schaltet wesentlich schneller in höhere Gänge um wie Fahrer B und betreibt daher den Verbrennungsmotor in einem effizienteren Bereich. Alleine dies führt schon zu einer Reduktion des durchschnittlichen Treibstoffverbrauchs um 10%! (Von 6.7 auf 6.1 l/100km)

In den weiteren Rechnungen wird immer der effizientere Fahrzeugregler gemäss dem Fahrer A eingesetzt. Er wählt grundsätzlich immer die Übersetzungsstufe bei dem der Wirkungsgrad des momentan aktiven Antriebs (bei der aktuell geforderten Leistung) am besten ist – sofern die Antriebsleistung ausreicht und die Antriebsdrehzahl bei dieser Übersetzung im zulässigen Bereich liegt.

Die Fahrt mit dem gleichen Fahrzeug mit einem CVT Getriebe zeigt die Figur 6. Dank der freien Wahl der Übersetzung kann der Fahrzeugregler die Motordrehzahl bei geforderter Leistung noch besser an den optimalen Wirkungsgrad anpassen, der Durchschnittsverbrauch sinkt nochmals um 4% (von 6.1 auf 5.85 l/100km). Dass das CVT Getriebe nicht noch höhere Einsparungen ermöglicht liegt einerseits am tieferen Wirkungsgrad dieses Getriebetyps, andererseits aber auch daran dass ein 5-Ganggetriebe im NEFZ Fahrzyklus die Motordrehzahlen immer genügend Nahe ans Optimum annähern kann.



Figur 6: NEFZ Fahrzyklus (Geschwindigkeit und Gangwahl) mit einem CVT Getriebe.

BEISPIEL: NEFZ FAHRZYKLUS MIT EINEM HYBRID-ANTRIEB

Figur 7 zeigt den Leistungsbedarf der Antriebe in einem Hybrid Fahrzeug im NEFZ Fahrzyklus. Die Leistung des Elektroantriebs (blaue schattierte Kurve) kann sowohl positiv (Antreiben) wie auch negativ (Bremsen) sein – die (trotzdem vorhandene) Fahrzeugbremse kommt nur zum Einsatz wenn die Bremsleistung des Elektromotors/Generators nicht ausreicht oder die Batterie voll geladen ist. Der Verbrennungsmotor (rote, volle Kurve) nimmt nur positive Werte an (die Bremsleistung des gedrosselten Motors wird nicht benützt).

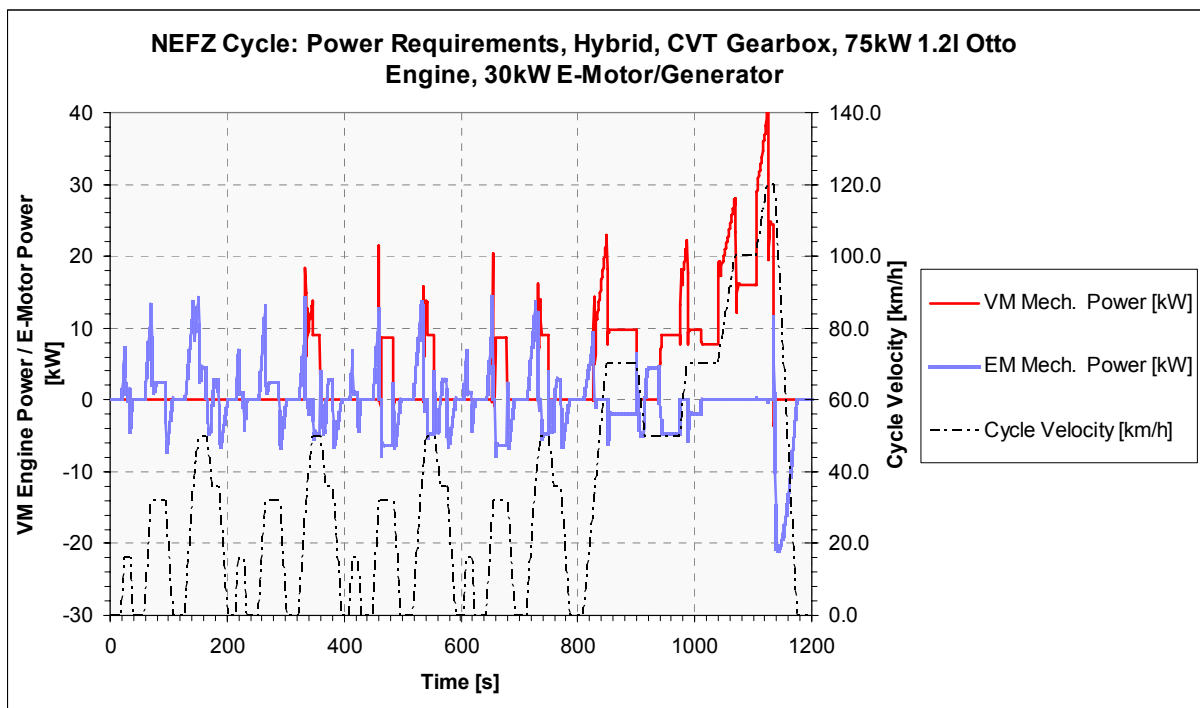
Umschalten zwischen Elektro- und Verbrennungsmotorantrieb: Grundsätzlich wird beim Hybrid Fahrzeug elektrisch gefahren, insbesondere das Anfahren des Fahrzeugs erfolgt wenn immer möglich elektrisch (mit dem Verbrennungsmotor verursacht die schleifende Kupplung in diesem Teil des Fahrzyklus einen sehr hohen spezifischen Treibstoffverbrauch). Auf Verbrennungsmotorantrieb wird nur umgeschaltet wenn die geforderte Leistung vom Elektromotor (oder von der Batterie) nicht erbracht werden kann, oder wenn der Ladezustand der Batterie unter die zulässige Limite gefallen ist. Beim Starten des Verbrennungsmotors wird der Anlasser nicht benötigt, der Motor erreicht die Startdrehzahl durch das schliessen der Kupplung (der Elektromotor schaltet erst aus wenn der Verbrennungsmotor läuft). Auf Elektroantrieb wird wieder zurückgeschaltet wenn entweder die Batterien wieder voll gela-

den sind (obere Limite) und die Antriebsleistung des Elektromotors ausreicht oder aber in jedem Fall wenn das Fahrzeug abgebremst wird.

Dass beide Antriebe zusammen eingesetzt werden müssen (da die Leistung des Verbrennungsmotors alleine nicht ausreicht) gibt es im NEFZ Fahrzyklus nicht.

Laden der Batterie: In Hybridfahrzeugen muss die Batterie in hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades günstigen Momenten wieder aufgeladen werden (Ausnahme: So genannte „Plug-In Hybrids“ bei denen die Batterie über Nacht Zuhause am Stromnetz aufgeladen wird). Beim hier eingesetzten Regler wird die Batterie immer dann geladen wenn der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors durch die Batterie-Ladeleistung noch verbessert werden kann. Zudem wird die Ladeleistung gegenüber der maximalen Batterie-Ladeleistung reduziert um einen besseren Ladewirkungsgrad zu erhalten. In den vorliegenden Rechnungen hat sich gezeigt dass eine Reduktion der zulässigen Ladeleistung auf ca. 30% - 50% der maximalen Leistung den besten Gesamtwirkungsgrad ermöglicht (NiMH Batterie).

Bei der Simulation des Fahrzyklus wurde darauf geachtet dass der Ladestand der Batterie am Ende des Zyklus immer auf demselben Stand war wie am Anfang. Diese Regelstrategie ist nicht unbedingt optimal für den alltäglichen Betrieb eines Hybrid-Fahrzeugs geeignet, verhindert aber dass man am Ende der Berechnungen den Batteriezustand über geschätzte Wirkungsgrade in einen Treibstoffverbrauch umrechnen muss.



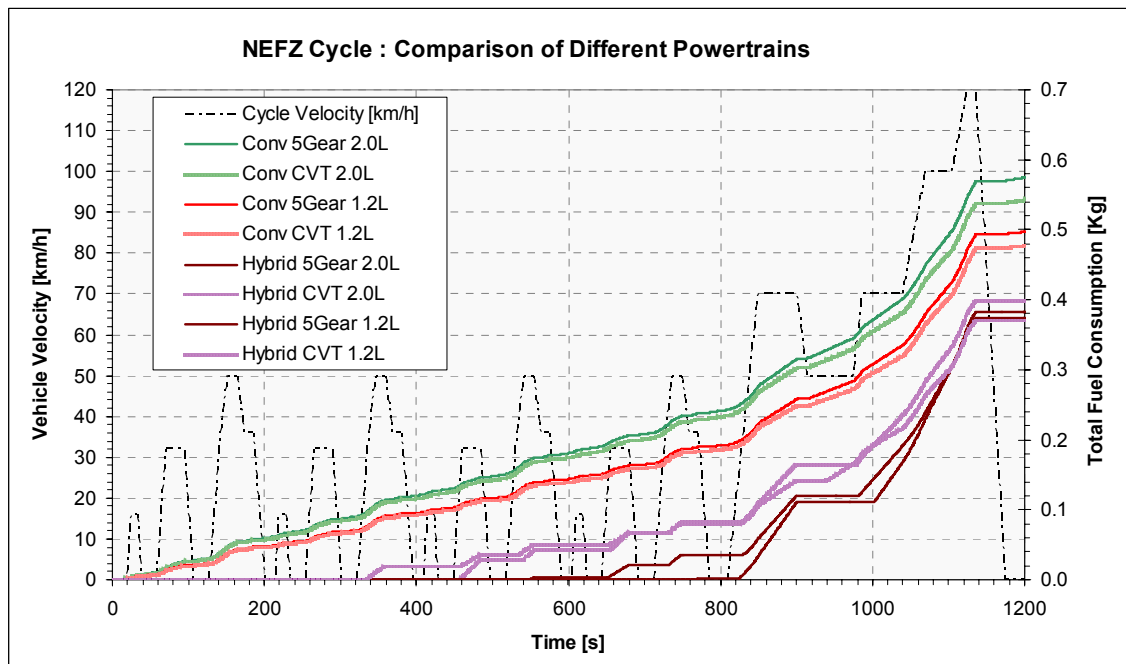
Figur 7: NEFZ Fahrzyklus mit einem Hybrid Fahrzeug: Antriebsleistungen und Zyklusgeschwindigkeiten.

Der Zyklus in Figur 7 zeigt wie schon nach 5 Minuten mit dem Nachladen der Batterie begonnen wird (Verbrennungsmotor positive Leistung, gleichzeitig beim Elektromotor/Generator negative Leistung). Gegen Ende des NEFZ Zyklus im ausserstädtischen Teil kann die Batterie nicht mehr geladen werden da der Verbrennungsmotor sonst nicht mehr in einem optimalen Bereich betrieben werden kann. Erst mit der Rückgewinnung der Energie aus dem Abbremsen des Fahrzeugs von 120 km/h auf Null am Ende des Zyklus wird die Batterie wieder auf die Ausgangskapazität gebracht.

Je nach Fahrzeuggewicht und Antriebsvariante kann im NEFZ Zyklus zwischen 40% und 55% der insgesamt benötigten Batterieladeenergie alleine aus dem Abbremsen des Fahrzeugs wieder zurückgewonnen werden! Der Gesamtwirkungsgrad der eingesetzten NiMH Batterie liegt bei knapp 90%, dieser sehr hohe Wert rührt daher dass die Batterie nur im optimalen Bereich des Kennfelds betrieben wird (Kennfelder siehe Anhang).

TREIBSTOFFVERBRAUCH DER ANTRIEBSVARIANTEN IM NEFZ FAHRZYKLUS

In Figur 8 ist der aufsummierte Treibstoffverbrauch der untersuchten Antriebsvarianten aufgeführt. Bei den Hybrid Fahrzeugen wird der Verbrennungsmotor erst im Verlauf des Zyklus zeitweise eingesetzt, dafür steigt der summierte Verbrauch aber anschliessend steiler an – es wird zusätzlich Motorleistung für das Wiederaufladen der Batterie eingesetzt.



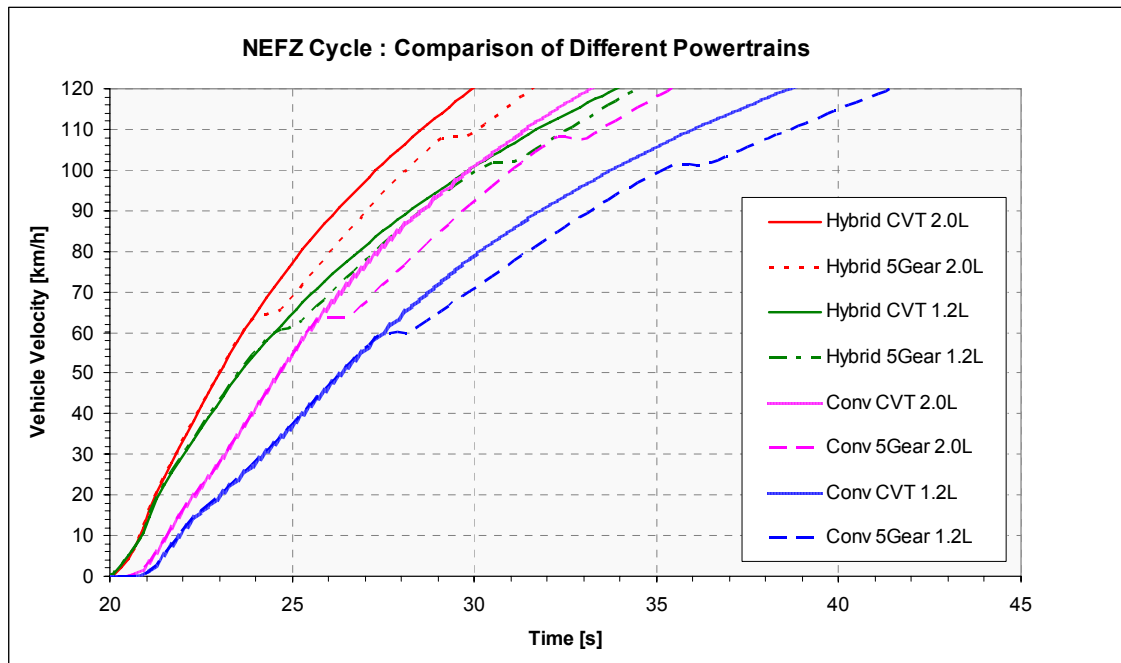
Figur 8: Summierter Treibstoffverbrauch der Antriebsvarianten im NEFZ Fahrzyklus.

Auffällig dass bei beiden Hybrid-Varianten mit CVT Getriebe der Treibstoffverbrauch der Verbrauch beim Beschleunigen im ausserstädtischen Zyklusteil (nach 13 Minuten) tiefer ist als bei den Handschaltgetriebe Varianten. Dies ist eine Folge der Wechselwirkung zwischen der Zielsetzung des Fahrzeugreglers den optimalen Betriebspunkt für den Verbrennungsmotor zu finden und der Anforderung an die Simulationsrechnung dass die Batterie am Ende des Fahrzyklus wieder auf dem ursprünglichen Ladezustand sein muss. Beim Antrieb mit Handschaltgetriebe läuft der Verbrennungsmotor häufig nicht am optimalen Betriebspunkt und hat daher mehr Reserven frei um die Batterie zu laden. Dieses Verhalten könnte in Zukunft durch Fahrzeugregler welche für den Betrieb mit CVT Reglern optimiert wurden verbessert werden.

VERGLEICH DER ANTRIEBSVARIANTEN BEIM 0 - 100 $\frac{\text{KM}}{\text{h}}$ SPRINT

Dieser Aspekt der Fahrzeugeigenschaften ist hinsichtlich der Verbrauchseigenschaften nicht von Interesse – Fahrzeuge, die rasch Beschleunigen sind sehr gut motorisiert und daher normalerweise keine „Sparmobile“. Mit Hybrid-Fahrzeugen lässt sich die Regel durchbrechen: Sparsame Fahrzeuge können trotz knapper Verbrennungsmotorleistung unter Zuhilfenahme des Elektroantriebs gute bis sehr gute Spureigenschaften aufweisen! Natürlich sind diese „Boost“ Fähigkeiten zeitlich begrenzt durch die Batterieladung, aber für kurze Sprints oder Überholmanöver reicht die Batteriereserve allemal aus. Ein Fahrzeug bei dem diese Hybrid-Eigenschaft bewusst eingesetzt und propagiert wird ist der Hybrid Lexus RX400h (Treibstoffsparen darf diesem Zusammenhang allerdings nur relativ verstanden werden: Es heisst von einem 4 Liter V8 auf einen „vernünftigen“ 3.3 Liter V6 Benzinmotor umsteigen).

Deutlich zu sehen in Figur 9 wie gut die „doppelt“ motorisierten Hybrid Fahrzeuge abschneiden! Hinzu kommt dass die stufenlose Schaltung der CVT Getriebe sich hier einen deutlichen Vorsprung verschaffen können (Beim manuellen Getriebe wird von einer Umschaltzeit von 0.5 Sekunden plus einer Einkuppelzeit von ca. 0.20 bis 0.30 Sekunden ausgegangen).



Figur 9: Sprint von Null auf 100 km/h – Vergleich der Antriebsvarianten.

Ein Hybridfahrzeug mit dem kleinen Verbrennungsmotor und CVT Getriebe ist beim Spurt von Null auf 100 km/h schneller als das Basisfahrzeug mit dem 2L Motor und dem 5 Gang Handschaltgetriebe.

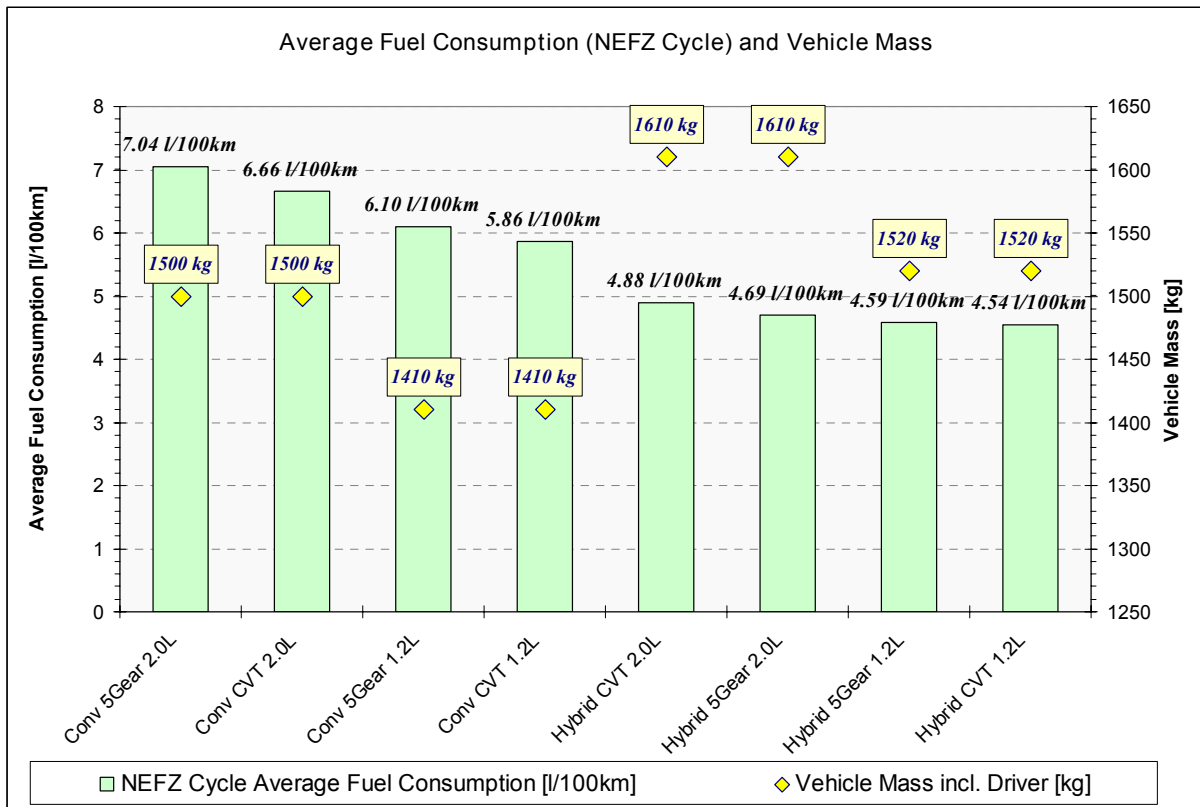
5. Diskussion

VERGLEICH DES TREIBSTOFFVERBRAUCHS DER VERSCHIEDENEN ANTRIEBSVARIANTEN

In den Figuren 10 und 11 sind die Fahrzeugvarianten mit durchschnittlichem Treibstoffverbrauch und der Fahrzeugmasse resp. der Beschleunigungszeit auf 100 km/h dargestellt, in Figur 10 sortiert nach Treibstoffverbrauch und in Figur 11 sortiert nach Beschleunigungszeit.

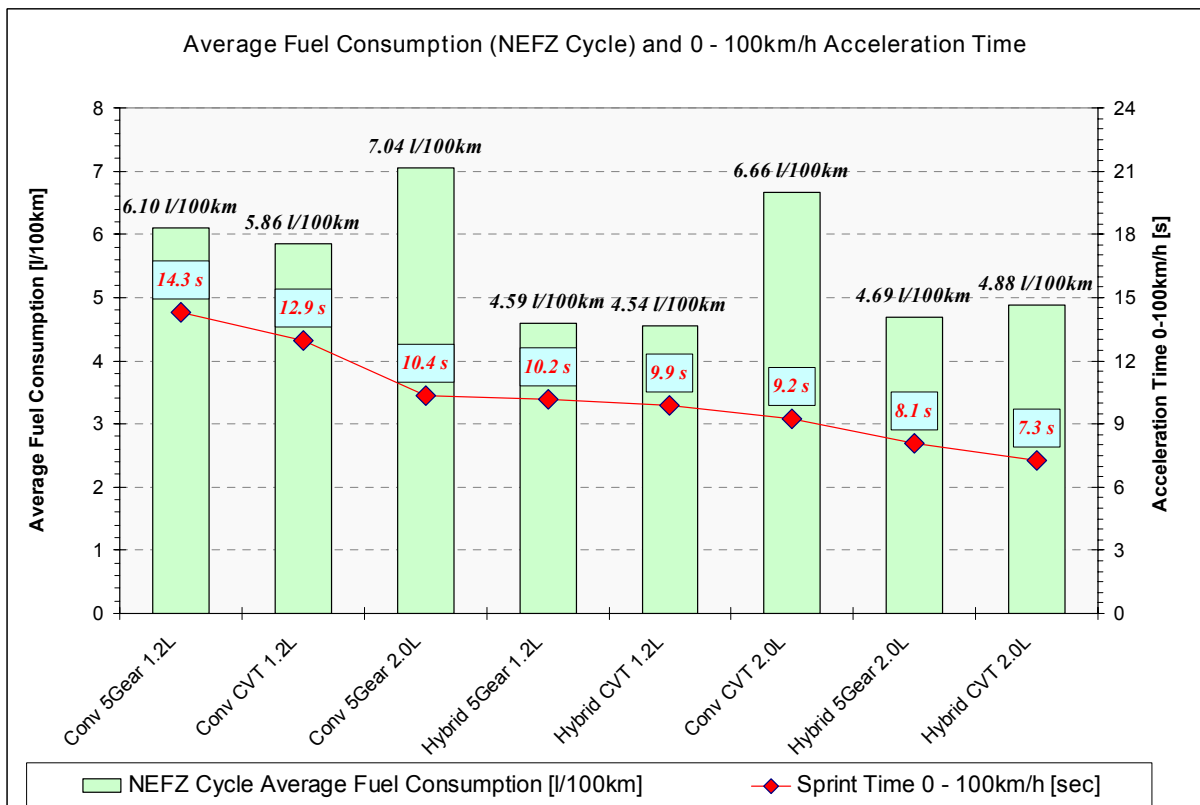
Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ausgehend vom 2.0L Basisfahrzeug kann das Fahrzeuggewicht um 90kg (- 6%) reduziert werden wenn ein kleinerer Motor mit 1.2L Hubraum eingebaut wird (kleinere Motormasse, kleinerer Tank, reduziertes Karosseriegewicht). Dies alleine führt bereits zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs im NEFZ Zyklus um 13%! (Von 7.04 auf 6.10 l/100km resp. von 6.66 auf 5.86 l/100km mit dem CVT Getriebe)
- Allerdings landet dieses mit dem 1.2L Verbrennungsmotor ausgerüstete Fahrzeug bei der Sprintprüfung trotz der reduzierten Fahrzeugmasse ziemlich abgeschlagen auf den letzten Plätzen (14.3s resp. 12.9s mit CVT Getriebe).
- Der Ersatz des 5-Gang Handschaltgetriebes durch ein CVT Getriebe vermag den Durchschnittsverbrauch bei den Fahrzeugen ohne Hybrid Antrieb jeweils um 5% zu reduzieren (von 7.04 auf 6.66 l/100km resp. von 6.10 auf 5.86 l/100km mit dem kleineren Motor).
- Gleichzeitig sprinten die mit dem CVT ausgerüsteten konventionell angetriebenen Fahrzeuge etwa 10% schneller auf 100 km/h als die Varianten mit Handschaltgetriebe (von 10.4 auf 9.2s resp. von 14.3 auf 12.9s mit dem kleineren Motor).
- Die Ausrüstung der Fahrzeuge mit dem Hybrid Antrieb verursacht ein Zusatzgewicht von 110kg (+ 7.5%) (Elektromotor/Generator, Batterie, Karosserieverstärkung). Der Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Durchschnittsverbrauch ist aber wesentlich kleiner als bei den konventionell angetriebenen Fahrzeugen da die kinetische Energie beim Bremsen weitgehend zurückgewonnen werden kann (siehe auch Abschnitt „Beispiel: NEFZ Fahrzyklus mit einem Hybrid-Antrieb“).



Figur 10: Treibstoffverbrauch im NEFZ Zyklus und Fahrzeuggewicht der Antriebsvarianten.

- Gegenüber der gleichen Fahrzeugvarianten ohne Hybrid Antrieb kann im NEFZ Zyklus im Durchschnitt 27 % Treibstoff eingespart werden (von durchschnittlich 6.42 l/100km auf durchschnittlich 4.68 l/100km).

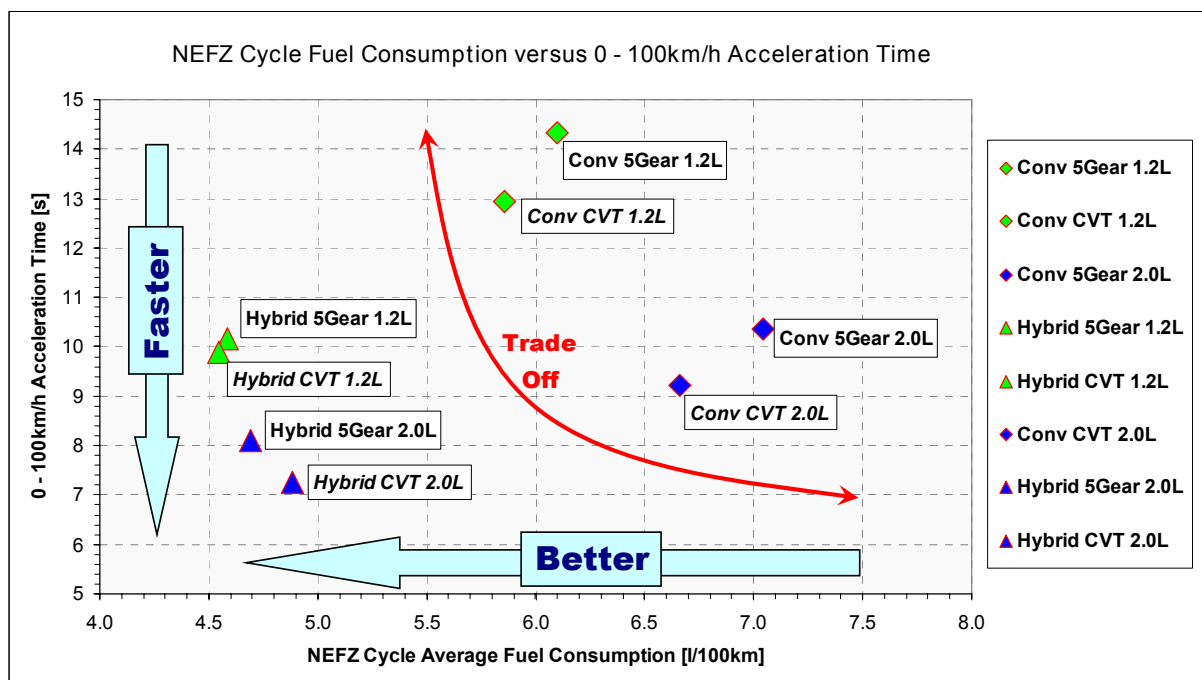


Figur 11: Treibstoffverbrauch im NEFZ Zyklus und die Beschleunigungszeiten auf 100 km/h.

- Der kleinere Verbrennungsmotor mit 1.2L Hubraum ermöglicht eine Reduktion des Durchschnittsverbrauchs gegenüber dem 2.0L Motor um weitere 4.5% (von 4.79 l/100km auf 4.57 l/100km).
- Dass der durchschnittliche Treibstoffverbrauch aller Hybridvarianten relativ nahe beieinander liegt kann damit erklärt werden dass die Verbrennungsmotoren hier unabhängig von der Grösse immer in einem Bereich mit einem guten Wirkungsgrad betrieben werden können.
- Die Hybrid Antriebsvarianten mit dem CVT Getriebe sind in diesen Rechnungen nicht unbedingt besser als die Varianten mit einem Handschaltgetriebe. Dies kann wie bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnt an der für diesen Fall nicht optimalen Regelung der Batterieladung liegen.

TRADE OFF ZWISCHEN TREIBSTOFFVERBRAUCH UND BESCHLEUNIGUNGSZEITEN

Die grundsätzlich entgegen gesetzten Anforderungen an ein „sportlich“ oder aber „sparsam“ ausgelegten Fahrzeug lassen sich in gut in einem Trade Off Diagramm darstellen (Figur 12):



Figur 12: „Trade Off“ zwischen Treibstoffverbrauch und Beschleunigungszeit von Null auf 100km/h.

Wird in einem konventionellen Fahrzeug gleicher Bauweise nur die Motorleistung verändert so bewegen sich die Fahrzeugeigenschaften entlang der Trade Off Kurve – Mehr „Sportlichkeit“ bedeutet immer auch weniger „Sparsamkeit“ und umgekehrt.

Diese Abhängigkeit kann nur durch **technische Verbesserungen** durchbrochen werden. Dies zeigt sich deutlich an den Daten der konventionellen Fahrzeuge bei denen das Handschaltgetriebe durch ein CVT Getriebe ersetzt wurde: Die Betriebspunkte verschieben sich senkrecht zur Trade Off Kurve – Mehr „Sportlichkeit“ und mehr „Sparsamkeit“! Auf diesem technischen Stand kann man sich aber weiterhin durch die Veränderungen der Motorleistung nur entlang der Trade Off Kurve bewegen.

Die Ausrüstung der Fahrzeuge mit einem Hybrid Antrieb bewirkt unabhängig von den anderen eingesetzten Baugruppen eine wesentliche Verbesserung von „Sportlichkeit“ und „Sparsamkeit“. Auch hier bewirkt die Wahl der Motorleistung alleine eine Verschiebung in Richtung der allgemeinen Trade Off Kurve, die Ausrüstung der Hybrid Fahrzeuge mit einem CVT Getriebe hingegen bringt (zumindest mit dem aktuell vorhandenen Fahrzeugregler) keine eindeutige Verbesserung mehr im Bezug auf den durchschnittlichen Treibstoffverbrauch.

Der Einfluss des Fahrers im Trade Off Diagramm: Wie bereits erwähnt versucht der Fahrer (Fahrzeugregler) bei allen hier präsentierten Simulationsrechnungen die Motoren wenn immer möglich im besten

Wirkungsgradbereich zu fahren. Tut der Fahrer dies nicht, so verschieben sich dementsprechend die Betriebspunkte (und damit die Trade Off Kurve) nach rechts – der Durchschnittsverbrauch steigt, aber noch schneller geht's trotzdem nicht von Null auf 100 km/h.

Zusammenfassend die Resultate in Tabellenform:

Verbrennungs- motor	Getriebe- typ	Hybrid An- trieb?	NEFZ Zyklus Ø-Verbrauch [l/100km]	Beschleunigung Null auf 100 km/h [Sekunden]	Fahrzeuggewicht Betriebsbereit [kg]
2.0L 16V Otto	5 Gang	Nein	7.04	10.4	1500 kg
1.2L 16V Otto	5 Gang	Nein	6.10	14.3	1410 kg
2.0L 16V Otto	CVT	Nein	6.66	9.2	1500 kg
1.2L 16V Otto	CVT	Nein	5.86	12.9	1410 kg
2.0L 16V Otto	5 Gang	Ja	4.69	8.1	1610 kg
1.2L 16V Otto	5 Gang	Ja	4.59	10.2	1520 kg
2.0L 16V Otto	CVT	Ja	4.88	7.3	1610 kg
1.2L 16V Otto	CVT	Ja	4.54	9.9	1520 kg

Tabelle 3: Zusammenfassung der Resultate

6. Schlussfolgerungen

Mit der vorliegenden Matlab/Simulink Bibliothek für den Aufbau von unterschiedlichen Fahrzeugenmodellen wurde eine gute Basis für eine ausführliche Bewertung von verschiedenen Antriebskonzepten bei unterschiedlichsten Anwendungen resp. Lastfällen (Zyklen) geschaffen. Die Modellierung der einzelnen Baugruppen als in sich geschlossene Einheiten erlaubt dass ohne Veränderung der Gesamtmodelle in Zukunft viele zusätzliche Parameter und Zustandsgrössen in den Simulationsrechnungen berücksichtigt werden können, so z.Bsp. die Bauteiltemperaturen (Einfluss auf die Kennfelder, Wirkungsgrade), die Abgastemperaturen (Einfluss auf die Katalysatortemperatur und somit auf dem Schadstoffausstoss) usw. Durch die Standardisierung der Komponentenverbindungen können einzelne Teile des Gesamtmodells wie z.Bsp. das Getriebe sehr einfach durch neue Baugruppen derselben Art ersetzt werden.

Die Modellrechnungen mit den aus der neu erstellten Bauteilbibliothek aufgebauten Fahrzeugmodelle haben gezeigt dass der in diesem Projekt gewählte Ansatz sehr gut geeignet ist um die Antriebskonzepte im Bezug auf unterschiedlichste Anforderungen untersuchen zu können. Die Simulationsrechnungen zeigen weiter ganz klar, dass sich die heutigen, grundsätzlich widersprechenden Anforderungen nach sparsameren und trotzdem sportlichen Fahrzeugen nur durch technische Innovationen unter einen Hut bringen lassen. Das grösste Potential für sparsame und trotzdem zeitgemäss motorisierte PKW's weist eindeutig der Hybrid Antrieb aus, dies umso deutlicher desto mehr das Fahrzeug im Alltag in einer städtischen, vom Verkehr überlasteten Region betrieben wird.

Die vorliegende Bibliothek bildet eine solide Basis für vertiefte Untersuchungen über die Wechselwirkungen zwischen dem Fahrzeug (Baugruppen, Bauteiltemperaturen, Wirkungsgradkennfelder), dem Fahrzyklus (Standard-Zyklen oder „Alltags“-Zyklen), dem Fahrzeugregler (Optimierungen) und den Emissionen (wiederum Abhängig vom Fahrzeugzustand wie Temperaturen etc.).

Sinnvoll wäre die Erweiterung mit folgenden Komponenten:

- Dieselmotoren (inkl. Kennfeld/Trägheit des Turboladers)
- Andere Energiespeicher (Supercaps)

Die bereits bestehenden Baugruppen lassen sich einfach erweitern mit:

- Bauteiltemperaturen und Wärmebilanzen

- Kennfelder und Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Temperatur
- Katalysatoreffizienz, Schadstoffausstoss in Abhängigkeit der Temperaturen

Daneben ist die sicherlich die Untersuchung neuer Strategien (durch die Änderung des Fahrzeugreglers) von grossem Interesse:

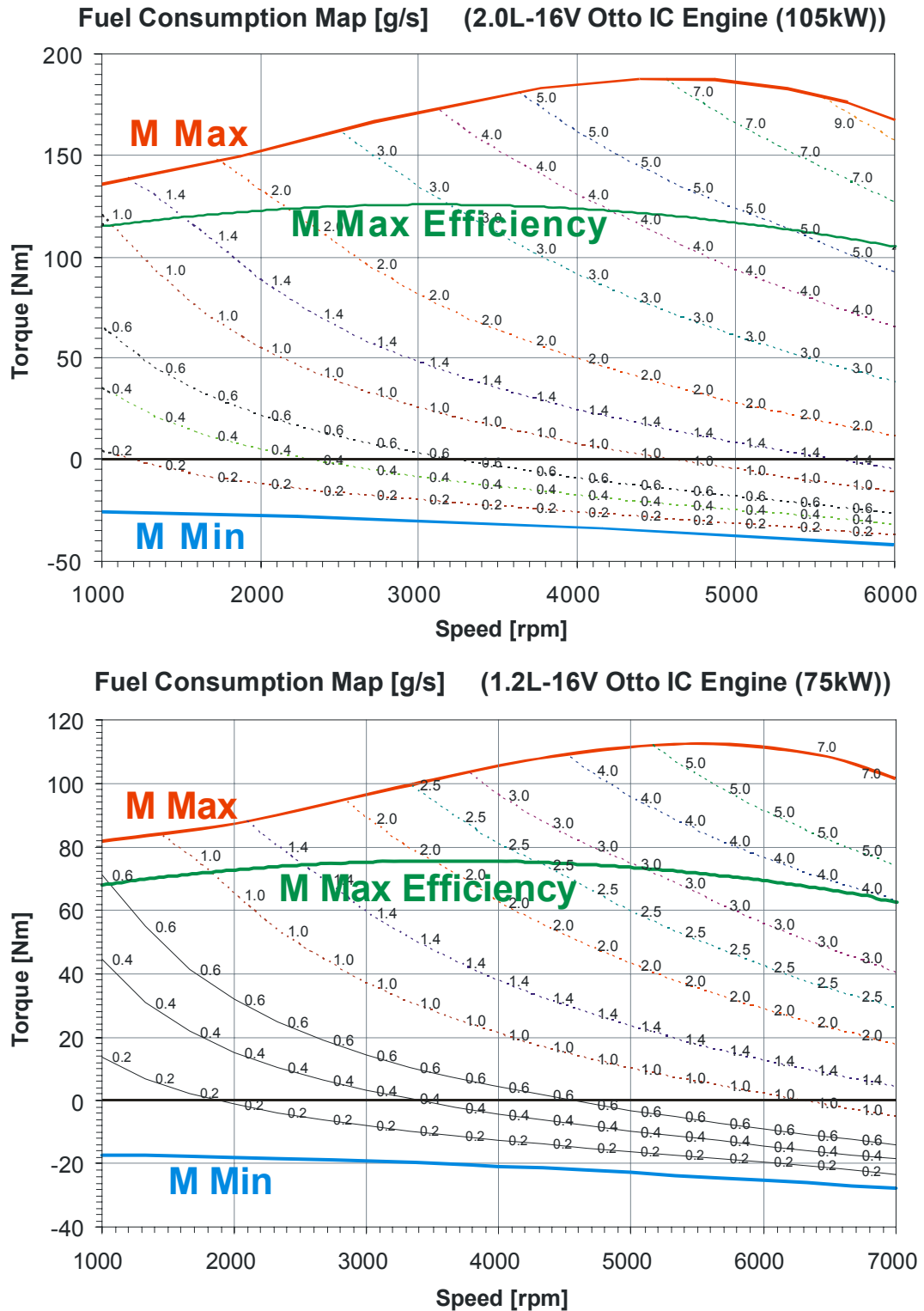
- Andere Regelstrategien resp. Fahrercharakteristiken
- Optimierung der Hybrid-Regelung, Batterie Ladung
- Andere Verbrauchsreduktionsstrategien (Zylinderabschaltung etc.)

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: *Gesamtenergetische 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.
- [5] Guttenberg, P: *Der Autarke Hybrid am Prüfstand – Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse*. Dissertation, Technische Universität München, 2004

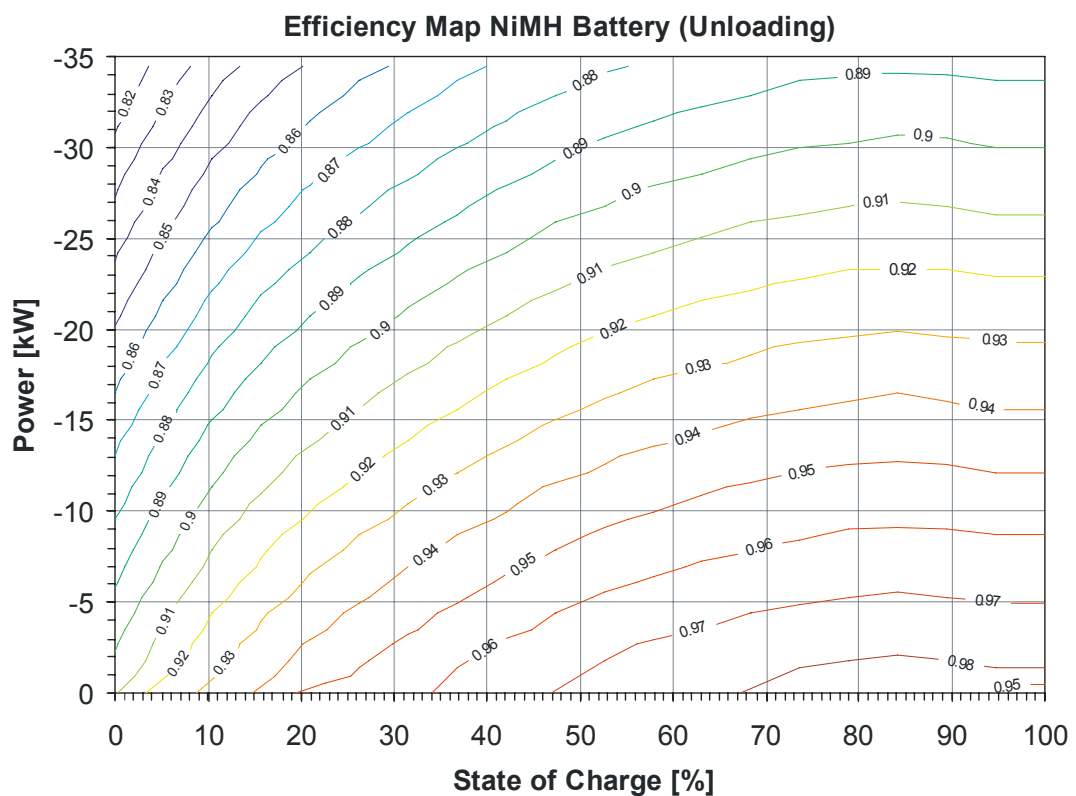
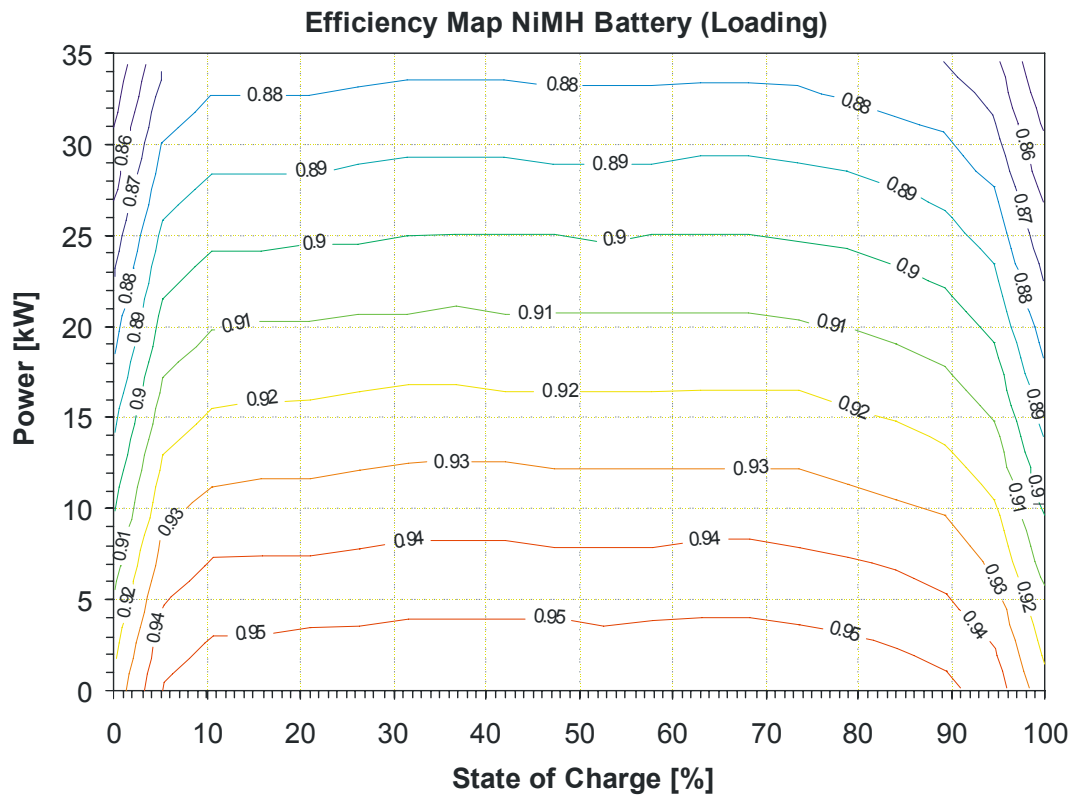
Anhang

KENNFELDER DER EINGESETZTEN BENZINMOTOREN:



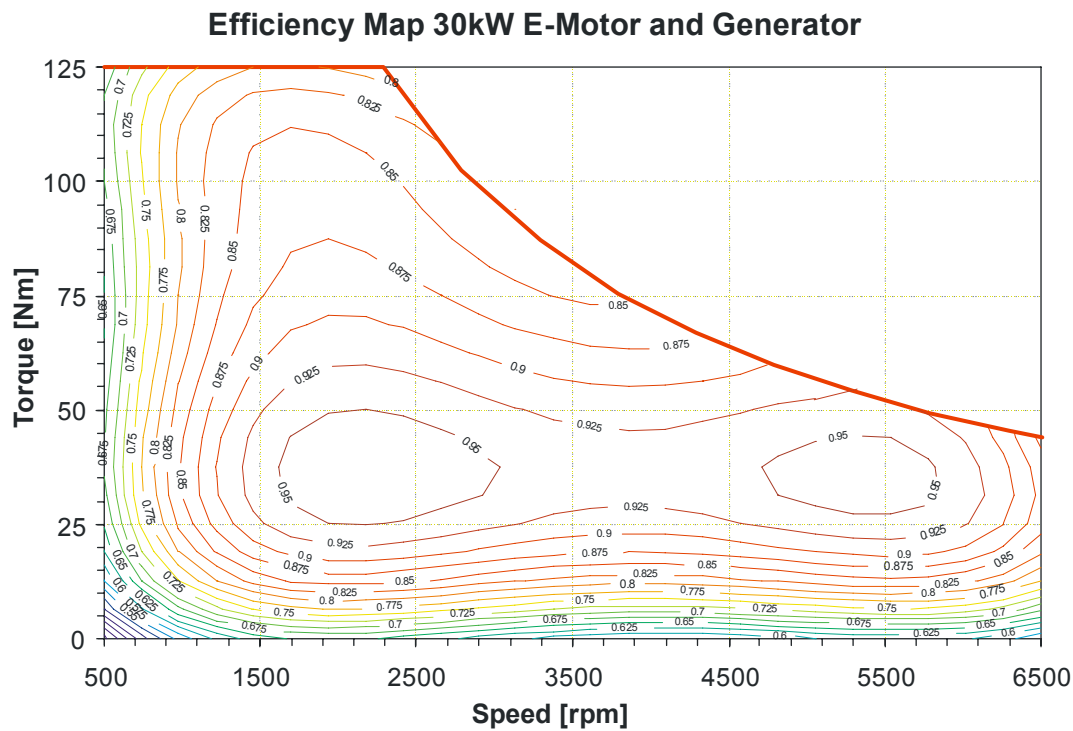
Figur 2: Verbrauchs-Kennfelder des 2.0L (oben) und des 1.2L (unten) Ottomotors.

KENNFELD DER BATTERIE:



Figur 2: Kennfelder der eingesetzten NiMH-Batterie

KENNFELD DES EINGESETZTEN ELEKTROMOTORS/GENERATORS:



Figur 2: Kennfelder Elektromotors (identisches Kennfeld im Generatorbetrieb)

LISTING DER FÜR DIE SIMULATIONSRECHNUNGEN VERWENDETEN BAUTEILPARAMETER:

Nachfolgend sind alle Eingabeparameter aufgeführt welche bei den in diesem Bericht präsentierten Simulationsberechnungen eingesetzt wurden.

Verbrennungsmotoren:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Heizwert Brennstoff:	43.2	43.2	MJ/kg
Massenträgheitsmoment aller Wellen:	0.15	0.15	kgm ²
Motorgewicht komplett:	100	150	kg
Treibstoffgewicht:	35	50	kg

Motorstarter (Anlasser) (alle Daten auf die Motorwelle reduziert):

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Maximale Drehzahl	1000	1000	1/min
Maximales Drehmoment	75.0	75.0	Nm
Maximale Leistung	2.5	2.5	kW
Wirkungsgrad (im Durchschnitt)	60	60	%
Massenträgheitsmoment	0.010	0.010	kgm ²
Gewicht inkl. Startbatterie	2.0	2.0	kg

Last an der Motorwelle (alle Daten auf die Motorwelle reduziert):

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Maximale Leistung (Eingeschaltet)	2.0	2.0	kW
Maximale Leistung erreicht bei Drehzahl ...	1500	1500	1/min
Verlustmoment Fix (Eingeschaltet)	1.000000	1.000000	Nm
Verlustmoment prop. Drehzahl (Eingeschaltet)	0.000100	0.000100	Nm pro 1/min
Verlustmoment Fix (Ausgeschaltet)	0.001000	0.001000	Nm
Verlustmoment prop. Drehzahl (Ausgeschaltet)	0.000010	0.000010	Nm pro 1/min
Gewicht	5.0	5.0	kg
Massenträgheitsmoment	0.010	0.010	kgm ²

Kupplung:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Maximales übertragenes Drehmoment	200	250	Nm
Massenträgheitsmoment Motorseite	0.010	0.010	kgm ²
Massenträgheitsmoment Getriebeseite	0.010	0.010	kgm ²
Gewicht	12.5	15.0	Kg

Elektromotor/Generator:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Maximale Leistung (Motor- und Generator)	30	30	kW
Maximales Moment (Motor- und Generator)	125	125	Nm
Massenträgheitsmoment	0.050	0.050	kgm ²
Gewicht	30	30	kg

NiMH Batterie:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Anzahl Zellen	228	228	
Kapazität pro Zelle	6.5	6.5	Ah
Gewicht pro Zelle	0.25	0.25	Kg
Leistungsdichte	600	600	W/kg
Kapazität am Anfang der Simulation	95	95	%

5-Gang Handschaltgetriebe:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Getriebestufen in der Form [i1 i2 i3 ...]	[3.496 2.055 1.449 1.138 0.940]	[3.496 2.055 1.449 1.138 0.940]	n_Ein / n_Aus
Massenträgheitsmoment (Eingangswellen)	0.010	0.010	kgm ²
Massenträgheitsmoment	0.010	0.010	kgm ²

(Ausgangswellen)			
Nominales Drehmoment (Eingangswelle)	200	250	Nm
Gewicht	45	50	kg
Schaltzeit pro Gang	0.5	0.5	Sec
Verlustmoment prop. Eingangsdruckmoment	0.010000	0.010000	
Verlustmoment prop. Nominales Drehmoment	0.002500	0.002500	
Verlustmoment prop. Eingangsdruckzahl	0.000050	0.000050	Nm pro 1/min
Verlustmoment prop. Ausgangsdruckzahl	0.000050	0.000050	Nm pro 1/min

CVT Getriebe:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Anzahl virtueller Getriebestufen	150	150	
Minimale Übersetzung (1. Gang)	3.496	3.496	
Maximale Übersetzung (Letzter Gang)	0.526	0.526	
Massenträgheitsmoment (Eingangswellen)	0.010	0.010	kgm ²
Massenträgheitsmoment (Ausgangswellen)	0.010	0.010	kgm ²
Nominales Drehmoment (Eingangswelle)	200	250	Nm
Gewicht	45	50	Kg
Schaltzeit gesamter Übersetzungsbereich	5.0	5.0	Sec
Verlustmoment prop. Eingangsdruckmoment	0.010000	0.010000	
Verlustmoment prop. Nominales Drehmoment	0.002500	0.002500	
Verlustmoment prop. Eingangsdruckzahl	0.000050	0.000050	Nm pro 1/min
Verlustmoment prop. Ausgangsdruckzahl	0.000050	0.000050	Nm pro 1/min

Fixe Getriebestufe (Differential):

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Übersetzungsverhältnis	4.167	3.390	n_Ein / n_Aus
Nominales Drehmoment (Eingangswelle)	1500	1800	Nm
Massenträgheitsmoment (rel. zu Eingangswelle)	0.010	0.010	kgm ²
Gewicht	15	15	kg
Verlustmoment prop. Eingangsdruckmoment	0.010	0.010	
Verlustmoment prop. Nominales Drehmoment	0.0025	0.0025	
Verlustmoment prop. Eingangsdruckzahl	0.00050	0.00050	Nm pro 1/min

Fahrzeug (PKW):

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Korrigiertes Karosseriegewicht ohne Antriebskomponenten	1150	1150	kg
Korrekturfaktor für das Karosseriegewicht mit Antriebskomponenten	1.25	1.25	~1.25
Stirnfläche	2.1	2.1	m ²
Luftwiderstandsbeiwert cw	0.33	0.33	

Rollwiderstandsbeiwert c0	0.011000	0.011000	
Rollwiderstandsbeiwert c1	0.000001	0.000001	s ² /m ²
Raddurchmesser ($d = 2 \cdot b \cdot (h/b)/100 + \text{Felgengrösse} \cdot 25,4$)	0.615	0.615	m
Massenträgheitsmoment eines Rades ($\sim d_{\text{Wheel_Rim}}^2/4 \times m_{\text{Wheel}}$)	0.500	0.500	kgm ²

Fahrzeugregler:

	1.2L 16V Ottomotor	2.0L 16V Ottomotor	
Minimaler und Maximaler Batterieladezustand	[78...86 90]	[72...83 89]	[% %]
Minimaler und Maximaler Batterieladeleistung	[35 45]	[35 45]	[% %]
Normale Einkuppelzeit	1.5	1.5	Sec
Maximale Betriebsdauer des Anlassers	5.0	5.0	Sec
Kontrollerpause nach Antriebswechsel	5.0	5.0	Sec
Kontrollerpause nach Einkuppeln	0.5	0.5	Sec
Kontrollerpause nach Gangwechsel mit Drehmomentunterbruch	0.5	0.5	Sec
Leerlaufdrehzahl Verbrennungsmotor	950	950	1/min
Abfahrdrehzahl Verbrennungsmotor	1350	1250	1/min
Minimale Drehzahl beim Fahren	1275	1225	1/min
Minimale Drehzahl beim Abbremsen	1100	1100	1/min