

Abschlussbericht

zum ETN-Vorhaben

„Neues Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der CO₂-Emission auf 69 g/km“

Zuwendungsempfänger: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) 52074 Aachen	Förderkennzeichen: 64.65.69-EN-2043C
Projektleiter: Dipl.-Ing. Christian Renner (bis 2013) Dipl.-Ing. Jens Viehöfer (ab 2014)	Tel.: +49 241 8861174 +49 241 8861130 E-Mail: renner@fka.de viehoefer@fka.de
Laufzeit des Vorhabens: von: 09.12.2010 bis: 31.09.2014	
Berichtszeitraum von: 09.12.2010 bis: 31.09.2014	

Gefördert durch



Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Inhalt

1	Einleitung und Projektziel	3
2	Forschungsansatz und Projektgrundlagen.....	6
2.1	Auswahl des Basisfahrzeugs als Grundlage für den Demonstrator	7
3	Beschreibung der Arbeiten im Projektvorhaben	9
3.1	Längsdynamik-Simulation (AP 2.9).....	9
3.1.1	Aufbau des Basismodells	9
3.1.2	Aufbau des Demonstratormodells	17
3.1.3	Anpassung der relevanten Komponenten.....	18
3.1.4	Simulationsergebnisse	19
3.2	Maßnahmenpaket (AP 2.10).....	24
3.3	Umbau Fahrzeug (AP 3.1)	25
3.3.1	Entwicklung der Steuersoftware	26
3.3.2	Entwicklung der Energiemanagement Software des Startergenerators	29
3.3.3	Aufbau der Steuersoftware in Simulink.....	31
3.4	Fahrzeugapplikation und -analyse (AP 3.3)	35
3.5	Umschaltung in den Aufladebetrieb (Aufstockung AP 2.1).....	38
3.5.1	Überprüfung von Methoden zum gleichmäßigen Drehmomentaufbau	40
3.6	Erweiterte Applikation der Stopp/Start-Funktion (Aufstockung AP 2.2)	41
3.6.1	Überprüfung der Möglichkeiten hinsichtlich Optimierung von Komfort und Verbrauch.....	41
3.7	NVH-Optimierung (Aufstockung AP 3).....	43
4	Zusammenfassung und Ausblick	45
5	Quellenverzeichnis	46

1 Einleitung und Projektziel

Um den fortwährenden Forderungen nach deutlichen Reduzierungen der CO₂-Emissionen im Automobilbereich Rechnung zu tragen, werden neben Entwicklungen von alternativen Antriebskonzepten, wie Hybridfahrzeuge und reine Elektrofahrzeugen, auch konventionelle Antriebssysteme fortlaufend weiter optimiert. Hierbei sind Downsizingkonzepte bereits sehr verbreitet im Automobilmarkt vorzufinden. Durch eine Betriebspunktverschiebung von höheren Drehzahlen und geringer Last zu niedrigen Drehzahlen mit erhöhter Last lässt sich der mittlere Wirkungsgrad in den für die Kraftstoffverbrauchsbestimmung relevanten Fahrzyklen erhöhen. Dem Grad des Downsizings sind jedoch Grenzen gesetzt. Bei sehr kleinen Motoren ist das Drehmoment im niedrigen Drehzahlbereich mit herkömmlichen Aufladetechniken meist unzureichend. Zudem entstehen bei Motoren mit niedrigen Zylinderzahlen veränderte Schwingungsanregungen und akustische Eigenschaften, die entsprechend berücksichtigt und mit Gegenmaßnahmen versehen werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit der CO₂-Emissionsreduzierung bietet der Einsatz von Erdgas als Kraftstoff. Durch die günstigere chemische Verbrennung von Erdgas mit kürzeren Kohlenstoffketten können bei optimaler technischer Umsetzung Einsparungen von bis zu 25 % erzielt werden [MET14b]. Weitere komponenten- und fahrzeugseitige Maßnahmen ermöglichen es, zusätzliche Effizienzsteigerungen zu erzielen.

Im Rahmen des Projekts „Neues Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der CO₂-Emissionen auf 69 g/km“ wurde eine technische Umsetzung eines erdgasbetriebenen Verbrennungsmotors mit Downsizingkonzept in einem optimierten Fahrzeug angestrebt. Das Projektkonsortium besteht aus der Meta Motoren- und Energietechnik in Herzogenrath, dem Institut für Kraftfahrzeuge Aachen und der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen. Nach vorhergegangenen Recherchen wurde ein Volkswagen Polo V Blue Motion 87 g als Basisfahrzeug im Projekt ausgewählt und vom Serienzustand mit Dieselerbrennungsmotor auf einen Erdgasantrieb umgebaut. Dabei sollen die Fahrzeugperformance und die akustischen Eigenschaften mindestens auf dem gleichen Niveau des Basisfahrzeugs liegen. Während der Umbaumaßnahmen im Projekt wurde der 3-Zylinder-Verbrennungsmotor durch eine Erdgasmotor-Eigenentwicklung mit zwei Zylindern ersetzt. Zur Kompensation des Verlustes an Low-End-Torque (Drehmoment im niedrigen Drehzahlbereich) durch die Motorverkleinerung ist ein neu entwickeltes Aufladesystem auf Basis eines Hubkolbenverdichters vorgesehen. Um die bauartbedingten Schwingungsanregungen des Zweizylindermotors zu kompensieren, wird ein aktives System anstelle des Zweimassenschwungrades eingesetzt. Diese Technologien werden von der Meta entwickelt.

An Stelle des Dieseltanks ist ein Erdgasdrucktank installiert. Ein Nebenziel im Projekt war hierbei, das mögliche Zuladevolumen beizubehalten. Weitere Maßnahmen im Fahrzeug, wie z. B. ein Kühlmedium-Wärmespeicher, Stopp/Start-System mit intelligenter Rekuperation und Laderegelung, sollen in Verbindung mit den motorischen Maßnahmen die Reduzierung der

CO₂-Emissionen von 87 g/km (Serienzustand VW) auf einen Zielwert von 69 g/km, entsprechend einer Reduktion um ca. 21 %, ermöglichen.

Im vorliegenden Abschlussbericht werden sämtliche bei der Forschungsgesellschaft KrafftFahrwesen mbH Aachen (fka) durchgeführten Arbeiten dokumentiert und die Ergebnisse vorgestellt. Die fka hat aufgrund von Verzögerungen durch die Komplexität der Motorentwicklung und der Motorinbetriebnahme einen Antrag einer Projektaufstockung bis zum 31.09.2014 gestellt. Diesem Antrag wurde stattgegeben. Dadurch wurde die gesamte Laufzeit des Projektes auf 45 Monate erhöht.

Der im Forschungsantrag ausgearbeitete Projektplan gibt Aufschluss über die zeitliche Abfolge der Arbeiten im Projekt. Der zeitliche Ablauf der Arbeitspakete wurde fortlaufend aktualisiert und an die Entwicklungen im Projekt angepasst. Dieses ist in drei Projektphasen eingeteilt. Der Gesamtprojektplan ist inklusive der Meilensteine in Abb. 1-1 dargestellt. Die Arbeiten der fka begannen im Juli 2011. Das Jahr 2012 ist ab Juli bis zum Juli 2013 aus Ansichtsgründen ausgespart. Innerhalb dieser Zeit wurden keine Arbeiten durchgeführt bzw. nur unterstützender Support bei Rückfragen für ika und Meta geleistet.

Projekt-Monat	2011					2012					2013					2014												
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	
Projektphase 2																												
Fahrzeugseitig																												
2.9 Längsdynamik-Simulation																												
2.10 Maßnahmenpaket																												
Meilenstein #2.2:																												
Vorhersage des Kraftstoffverbrauchs																												
Projektphase 3																												
Fahrzeugseitig																												
3.1 Umbau Fahrzeug																												
3.3 Fahrzeugapplikation und -analyse																												
Meilenstein #3.1:																												
Bestätigung Zielwerte für das Gesamtpaket																												
Projektphase 4																												
Fahrzeugseitig																												
2.1 Umschaltung in den Aufladebetrieb																												
2.2 Erweiterte Applikation Start-Stopp-Fkt.																												
3 NVH-Optimierung																												
4. Projektleitung																												

Abb. 1-1: Gesamtprojektplan von 2011 – 2014 (Mit Teilaussparungen zw. 2012 und 2013)

Die projektrelevanten Arbeitspunkte sind im Folgenden grob aufgeschlüsselt:

2.9 Längsdynamik-Simulation

- Aufbau des Basisfahrzeugmodells
- Parametrierung des Modells mit Messwerten des ika
- Aufbau des Demonstratormodells

2.10 Maßnahmenpaket

- Ableitung und Definition von Umbaumaßnahmen am Basisfahrzeug zur Erreichung der Zielwerte im Projekt

3.1 Umbau Fahrzeug

- Integration des Motors inkl. Starter-Generator und Batteriemangement

3.3 Fahrzeugapplikation und -analyse

- Inbetriebnahme des Fahrzeugs inkl. aller Steuergeräte und Komponenten
- Applikation und Abstimmung der Steuergeräte zusammen mit Meta/ika
- Applikation des Startergenerators und Batteriemagements im Fahrzeug

Projektphase 4 (Aufstockung):

2.1 Umschaltung in den Aufladebetrieb

- Bewertung unterschiedlicher Varianten für den Drehmomentaufbau mit Hilfe des Simulationsmodells
- Subjektive Bewertung aus Rollversuchen
- Optimierung der Steuersoftware hinsichtlich Fahrkomfort
- Inbetriebnahme und Applikation am Demonstrator

2.2 Erweiterte Applikation der Stopp/Start-Funktion

- Parametergestützte Simulationsstudie
- Optimierung der Steuersoftware hinsichtlich Fahrkomfort
- Inbetriebnahme und Applikation am Demonstrator

3 NVH-Optimierung

Im vorliegenden Bericht werden die durchgeführten Arbeiten der jeweiligen Arbeitspakete und deren Ergebnisse im gesamten Projekt beschrieben. Vorab werden das ausgewählte Basisfahrzeug und die Umbaumaßnahmen detaillierter vorgestellt.

2 Forschungsansatz und Projektgrundlagen

Der im Jahr 2010 gestellte Projektantrag umfasst ein Konzept für den Fahrzeugumbau eines Volkswagen Polo 6R Bluemotion 87 g. Im Antrag wurden bereits die notwendigen Arbeiten am Fahrzeug definiert, um einen Zielwert – eine CO₂-Emissionsreduktion um ca. 20 % – zu ermöglichen. Der Hintergrund der ausgewählten Umbaumaßnahmen soll nachfolgend kurz erläutert werden. Im Anschluss werden die einzelnen Umbaumaßnahmen für das gesamte Fahrzeugkonzept vorgestellt und hinsichtlich der Ausarbeitung und Auswahl der Einzelkomponenten vorgestellt.

Der Kraftstoffverbrauch eines PKW und die damit gekoppelten CO₂-Emissionen sind durch die Betrachtung der Prozesskette bei der Fortbewegung eines PKW erkennbar. In Abb. 2-1 ist ein Energieflussdiagramm dargestellt, in dem die Verteilung der Kraftstoffenergie über den gesamten Antriebsstrang eines PKW bei dessen Fortbewegung ersichtlich ist.

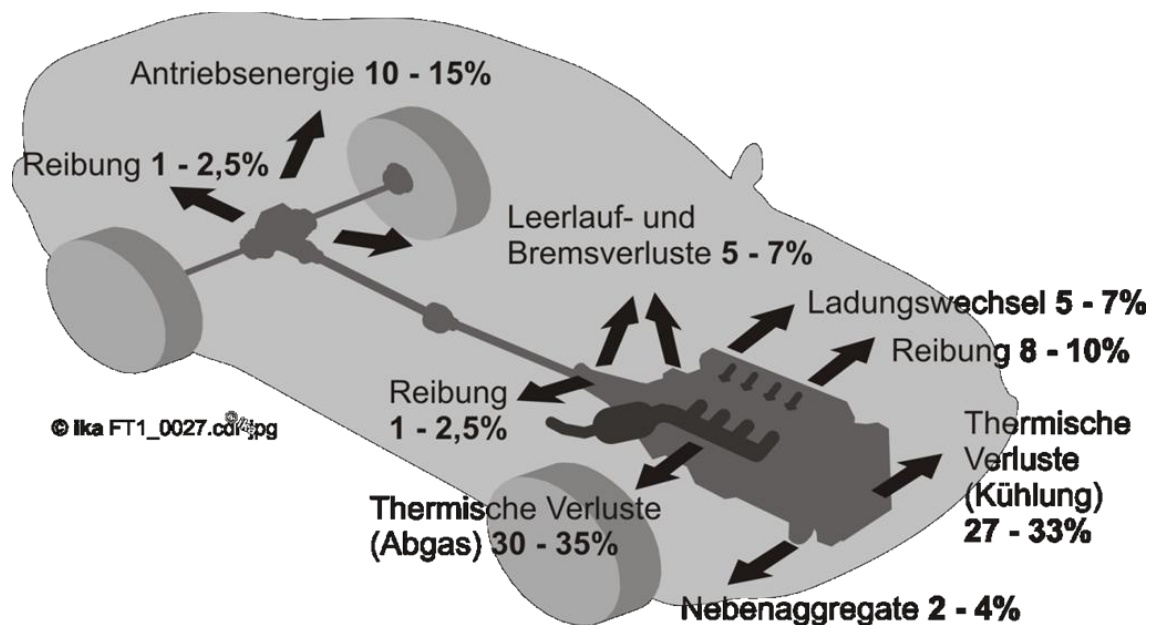


Abb. 2-1: Aufteilung der im Kraftstoff enthaltenen Energie [ECK11]

Neben der Änderung des Antriebskonzeptes mit einem Downsizingmotor und dem Einsatz von Erdgas als Kraftstoff, die die Themen ideale Energiewandlung (chemische Umsetzung von CNG) und Verluste (Reibungsreduzierung im Motor) adressieren, lassen sich die CO₂-Emissionen auch durch weitere Maßnahmen am Fahrzeug reduzieren. Die Reduktion der CO₂-Emissionen kann durch eine Verringerung des Energiebedarfs des Fahrzeugs erreicht werden. Die Überwindung der Fahrwiderstände stellt mit einem Anteil von ca. 33 % ca. ein Drittel der Bedarfsenergie zur Fortbewegung dar. Diese Energie E_{Bed} kann aus Integration der Bedarfsleistung P_{Bed} über die Zeit ermittelt werden kann, s. Gl. 2-1 und 2-2.

$$E_{Bed} = \int P_{Bed} dt = \int (F_{Bed} \cdot v) dt \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$F_{Bed} = F_R + F_L + F_{St} + F_a \quad \text{Gl. 2-2}$$

dabei sind:

F_R : Rollwiderstandskraft

F_{St} : Steigungswiderstandskraft

F_{St} : Luftwiderstandskraft

F_a : Beschleunigungswiderstandskraft

Da die Beschleunigungs-, Roll- und Steigungsanteile massenrelevant sind, ist eine Verringerung der Fahrzeugmasse ebenso zielführend wie die Reduzierung des Luftwiderstandsbeiwerts c_w und des Rollwiderstandsbeiwerts f_r .

Die Anteile von Luft und Rollwiderstand sind für den veralteten Drittmix und den Neueuropäischen Fahrzyklus (NEFZ), der als Bemessungsgrundlage in der Norm EG 715/2007 herangezogen wird, der Abb. 2-2 zu entnehmen.

Fahrzyklus		Drittmix	NEFZ
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]		76,2	32,5
Widerstandsanteil [%]	Luftwiderstand	44	24
	Rollwiderstand	44	45
	Beschleunigungswiderstand	12	31

Abb. 2-2: Anteile der Fahrwiderstände am Gesamtwiderstand für NEFZ und Drittmix nach [HUC11]

2.1 Auswahl des Basisfahrzeugs als Grundlage für den Demonstrator

Vor Beginn der Arbeiten im Projekt wurde zur Ausarbeitung des Projektantrags eine Recherche zu ökologischen Fahrzeugen der Kleinwagen-Fahrzeugklasse (B-Segment) durchgeführt. Bei dem Projektantrag im Jahr 2009 war der Volkswagen Polo Bluemotion (87 g) das zurzeit sparsamste Serienfahrzeug dieser Klasse und wurde als Basisfahrzeug für das Projekt ausgewählt.

Fahrzeug: Volkswagen Polo V Blue Motion (87 g)

Baujahr: 2010

Leistung: 55 kW/75 PS

Bereifung: 185/60R15 84T

Das Fahrzeug wurde zu Projektbeginn angeschafft und umfangreich vermessen. Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Berichtes beschrieben.

Die Kernkomponenten des Umbaus sind zu Beginn des Projekts im Projektantrag festgelegt worden, so vor allem der von der Meta GmbH entwickelte 0,8-l-CNG-Motor. Die damit verbundenen Umbaumaßnahmen werden ebenfalls von der Meta definiert. Eine Übersicht über die Umbaumaßnahmen am Fahrzeug sind Abb.2-3 zu entnehmen.

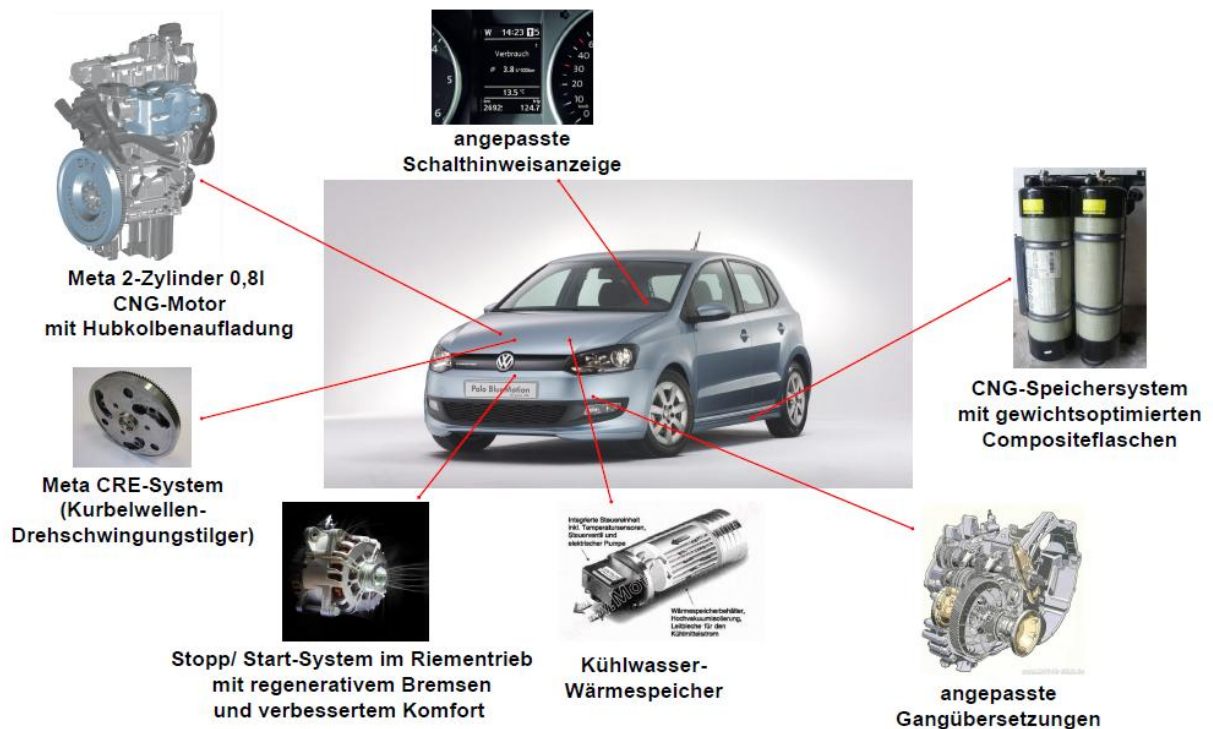


Abb.2-3: Geplante Umbaumaßnahmen am Basisfahrzeug zu Projektbeginn

Die Umbauten lassen sich z. T. den einzelnen Projektpartnern zuordnen, werden aber aufgrund von Abhängigkeiten auch gemeinschaftlich geplant und durchgeführt.

Die Entwicklung, Konstruktion und der Aufbau des Verbrennungsmotors, CRE-Systems und Hubkolbenladers wurde durch die Meta durchgeführt. Als Anbauteile werden der Startergenerator, das Kühlwasserwärmespeichersystem und das CNG-Tanksystem vom ika ausgewählt und ein Packagekonzept gemeinschaftlich mit der Meta entwickelt. Darüber hinaus wurde eine potenzielle Getriebeanpassung berücksichtigt. Alle Eingangsdaten, die zur Auswahl der Komponenten erforderlich sind, werden durch eine Fahrzeugsimulation der fka unterstützt.

3 Beschreibung der Arbeiten im Projektvorhaben

Im Folgenden werden sämtliche Arbeitspakete im Projekt beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt. Die Arbeiten in den jeweiligen Arbeitspaketen wurden, wenn möglich, zeitlich parallel durchgeführt. Die Beschreibung der Arbeitspakete erfolgt ergebnisorientiert. Ausführliche Details zu den einzelnen Arbeitspaketen können den Zwischenberichten des ika entnommen werden.

3.1 Längsdynamik-Simulation (AP 2.9)

Zur Beurteilung der Eigenschaften des Basisfahrzeugs im Vergleich mit dem Demonstratorfahrzeug wurde zunächst ein längsdynamisches Simulationsmodell auf Basis des modularen fka-Simulations-Baukastens in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink aufgebaut. Dieser beinhaltet parametrierbare Komponenten des Antriebsstrangs, die blockweise (komponentenweise) in einem Gesamtmodell zu einem Antriebsstrang zusammengeführt werden. Um die Komponentenmodelle parametrieren zu können, wurden Daten aus den Messungen des ika und der Meta herangezogen [IKA14b, MET14b]. Ergänzend wurden interne Datenbankdaten hinzugezogen. Nach Zusammenstellung des erforderlichen Datensatzes wurde das Fahrzeugmodell parametriert und anhand der Messdaten validiert.

3.1.1 Aufbau des Basismodells

Das aufgebaute Simulationsmodell, das im Verlauf des Projekts auch als Basis des Demonstrators diente, bildet das Fahrzeug inkl. der Antriebsstrangkomponenten und der Gesamtfahrzeugsteuerung nach. Die oberste Ebene des Basisfahrzeugmodells zeigt Abb. 3-1.

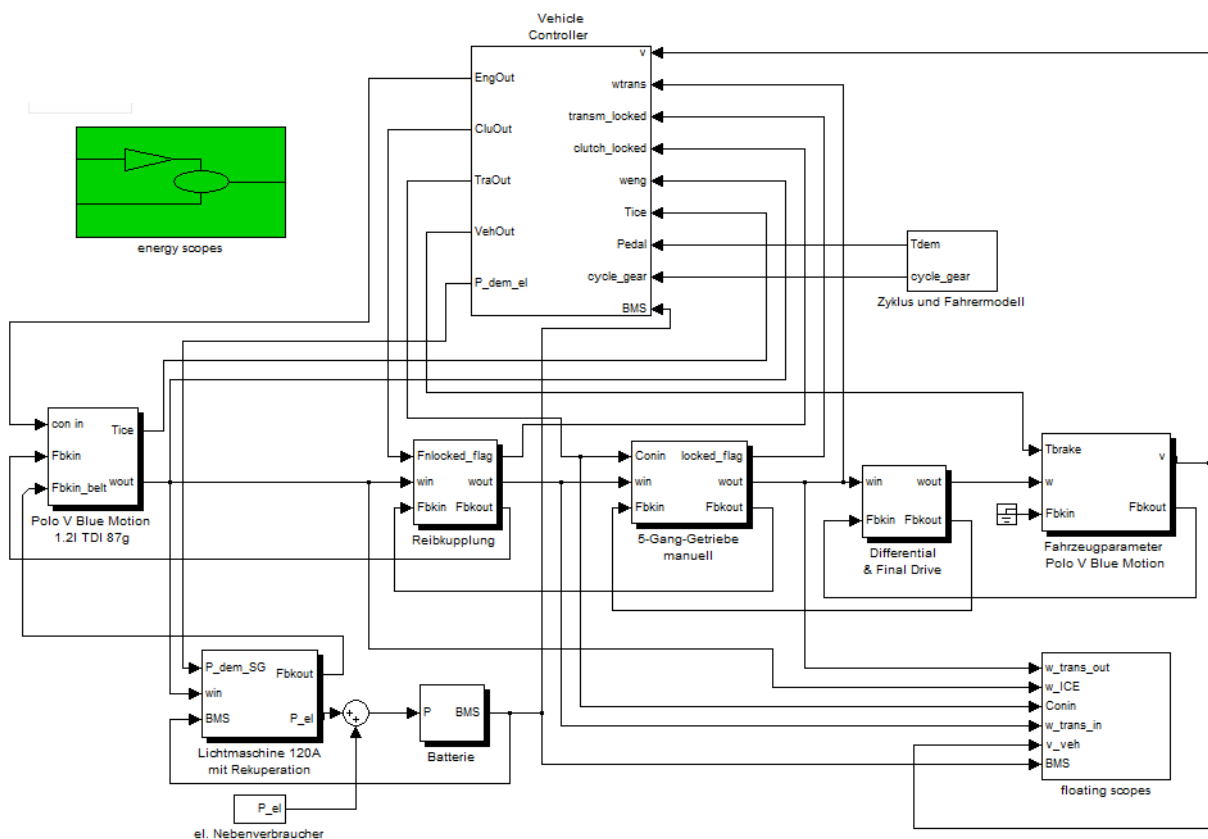


Abb. 3-1: Simulink-Blockmodell des VW Polo V Blue Motion (Basisfahrzeug)

Um ein möglichst realistisches Modell aufbauen zu können, ist es notwendig, sämtliche aufgezeichneten Messdaten aus dem Arbeitspaket der Ist-Sollwertbestimmung auszuwerten. Hierzu wurden Parameter der Ausrollversuche und Verbrauchsmessungen herangezogen. Wichtige Kenngrößen sind die aus der Ausrollkurve gewonnenen Daten, die das Fahrzeugrollverhalten beschreiben [IKA14b]. Bei den Verbrauchsmessungen wurden stationäre Betriebspunkte des Fahrzeugs und der zugehörige Kraftstoffdurchfluss sowie der gesamte Kraftstoffverbrauch verschiedener Zyklen herangezogen, die im Simulationsmodell entsprechend validiert wurden. Da die Regelungsstrategie der Bremsenergieerückgewinnung bzw. das Stopp/Start-Verhalten eine besondere Rolle spielen, wurde hier besonderes Augenmerk auf elektrische Messdaten aus dem Fahrzeugbordnetz gelegt. Diese Daten wurden ergänzend zu den längsdynamischen Daten vom ika erfasst.

Im vorliegenden Bild der Hauptebene des Simulationsmodells (Abb. 3-1) ist zu erkennen, dass der Antriebstrang vom Motor bis zum Rad von links nach rechts in der Bildmitte durch die entsprechenden Blöcke dargestellt wird. Zu erkennen sind der Verbrennungsmotor, die Reibkupplung, das manuelle 5-Gang-Getriebe, das Differential inkl. Final-Drive-Achsübersetzung und das Fahrzeug mit Abbildung der Seitenwellen und der Räder. Der zentrale obere Block beinhaltet die Logik und Steuerung aller Komponenten, der Block „Zyklus und Fahrermodell“ repräsentiert den hinterlegten Fahrzyklus und eine Modellierung des Fahrers bzw. des Fahr-/Gaspedals. Besonderes Augenmerk wurde auf die Modellierung des

Bordnetzes inkl. der intelligenten Energierückgewinnung (Rekuperation) und der Batterie gelegt. Diese Komponenten sind in der unteren, linken Hälfte zu erkennen. Die Blöcke „energy scopes“ und „floating scopes“ stellen Auswertemechanismen und Anzeigen wichtiger Parameter während und nach der Simulation zur Verfügung.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponentenblöcke des Modells genauer vorgestellt.

Die realitätsnahe Modellierung des Verbrennungsmotors ist eine wichtige Voraussetzung, um valide Simulationsergebnisse generieren zu können. In der hier verwendeten Simulationsumgebung erfolgt dies anhand eines stationären, spezifischen Verbrauchskennfeldes, in dem der spezifische Verbrauch b_e [g/kWh] als Isolinie im Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld des Motors aufgetragen wird. Mit Bezug auf die aktuelle, vom Motor abgegebene Leistung und der zeitlichen Änderung kann ein absoluter Wert für den verbrauchten Kraftstoff in Gramm erzeugt werden. Dieser Wert lässt sich dann mit Bezug auf die gefahrene Strecke in einen Streckenkraftstoffverbrauch (l/100 km) umrechnen.

Das b_e -Kennfeld wurde aus einem bekannten Dieselmotorkennfeld ähnlicher Baugröße und -art in Verbindung mit Validierungsmessungen diverser Betriebspunkte auf einem Rollenprüfstand synthetisch erstellt und abgeglichen. Als weitere Grundlage für diese Kennfelderstellung dienten die aus der Literatur bekannten Maximalkennlinien von Motordrehmoment und Motorleistung des 1,2 l TDI aus dem Basisfahrzeug (Abb. 3-2).

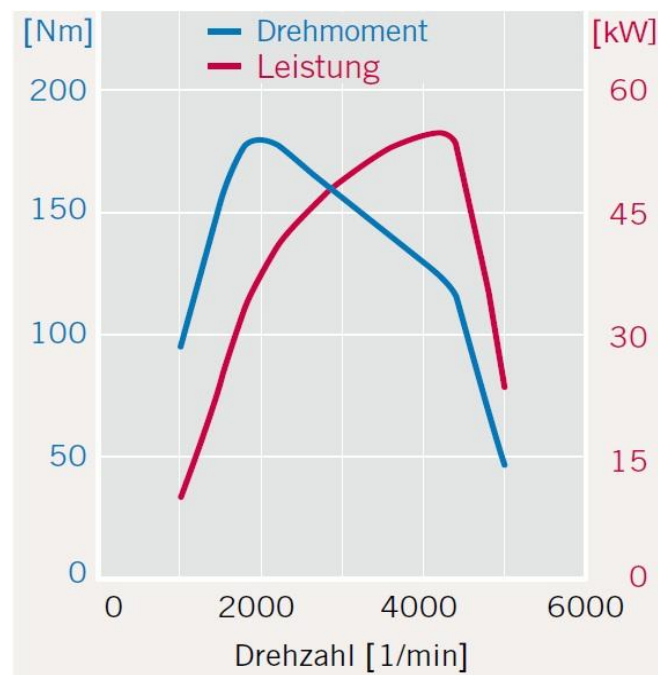


Abb. 3-2: Kennlinien der Leistung und des Drehmoments vom 1,2 l TDI [VAG09]

Sämtliche Komponenten des Simulationsmodells wurden analog mit Hilfe interner Datensätze und ggf. durch Recherchedaten parametrisiert. Für das Getriebe wurden die von

VW publizierten Gangübersetzungen verwendet, die im weiteren Verlauf des Projekts zur Ermittlung der optimalen Übersetzungen im Demonstrator variiert wurden.

Die Modellierung des Fahrzeugs als Blockkomponente enthält die wesentlichen Fahrwiderstandsberechnungen, die für das längsdynamische Fahrzeugverhalten wichtig sind. Die Fahrwiderstände können dabei über einen Schalter entweder von den Messungen der Ausrollkurven mit dem Parametersatz f_0, f_1, f_2 (vgl. Halbjahresbericht 1/2011) oder auch nach dem vereinfachten Ansatz der Längsdynamik mit den Koeffizienten f_r, c_w, ρ_L und A berechnet werden. Die Berechnung der Fahrwiderstände erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Ausrollversuche und kann entweder in der Form Gl. 2-1

$$F_w = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2 \quad \text{Gl. 2-1}$$

oder wahlweise in der Form des vereinfachten längsdynamischen Ansatzes der Fahrzeugtechnik Gl. 2-2

$$F_w = m_{\text{Fahrzeug}} \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot v^2 \quad \text{Gl. 2-2}$$

formuliert werden.

Die Beschleunigungen werden über den Drallsatz abgebildet. Der Steigungseinfluss spielt beim Durchfahren der Normzyklen keine Rolle, da die relevanten Zyklen steigungsfrei sind. Er kann aber über die fahrzeugtechnische Gleichung ebenfalls modelliert werden. Aufgrund der Vermessung des Basisfahrzeuges hinsichtlich des Ausrollverhaltens wurde für die Simulationen der Parametersatz f_0, f_1, f_2 verwendet. In diesem werden, im Gegensatz zu dem vereinfachten Ansatz, auch Einflüsse der Reibung im Antriebsstrang, z. B. von Radlagern etc. mit abgebildet. Sämtliche Parameter der verwendeten Komponenten können durch ein Initialisierungsskript variiert werden. Somit ist eine Anpassung zum Zwecke von Parametervariationen für das Demonstratormodell einfacher durchzuführen.

Besonderes Augenmerk beim Aufbau des Simulationsmodells lag auf der Modellierung der elektrischen Komponenten im Bordnetz des Basisfahrzeugs. Durch die Verwendung einer „intelligenten“ Lichtmaschine bzw. eines Generators ist es möglich, Bewegungsenergie des Fahrzeugs wieder in elektrische Energie zu wandeln und diese in der speziellen AGM-Starter-Bleibatterie zu speichern. Diese besteht aus in Glasfaser-Vliesmatten gebundenem Elektrolyt. Im Gegensatz zu gebräuchlichen Starterbatterien zeichnet sich diese durch hohe Stromfestigkeit und geringen Innenwiderstand aus. Die Steuerlogik des Start/Stopp & Rekuperationssystems setzt ein Batteriemanagement voraus, welches den genauen Ladezustand der Batterie berechnet. Diese Technologie wird bereits im Basisfahrzeug eingesetzt und ist somit auch Teil des Fahrzeugkonzepts im Demonstrator. Zu den Eingangsdaten des Batteriemanagements zählen die (Batterieerleerlauf-)Spannung, der Strom und auch Umgebungsbedingungen, wie z. B. die Temperatur. Die Erfassung der Logik ist durch die Aufzeichnung der CAN-Daten des Basisfahrzeugs bei den Messfahrten sehr einfach möglich. In Verbindung mit Recherchen zu intelligenten Bordnetzmanagement-

konzepten konnte die im Fahrzeug verwendete Logik auch im Simulink-Modell nachgebildet werden. Dazu wurden weitere umfangreiche Messreihen mit verschiedenen Batteriezuständen durchgeführt und analysiert. Die Ergebnisse wurden im Fahrzeugmodell berücksichtigt. Ein zeitlicher Verlauf der Batterie- bzw. Bordnetzspannung beim Polo 6R (V) Bluemotion im NEFZ zeigt die folgende Abb. 3-3.

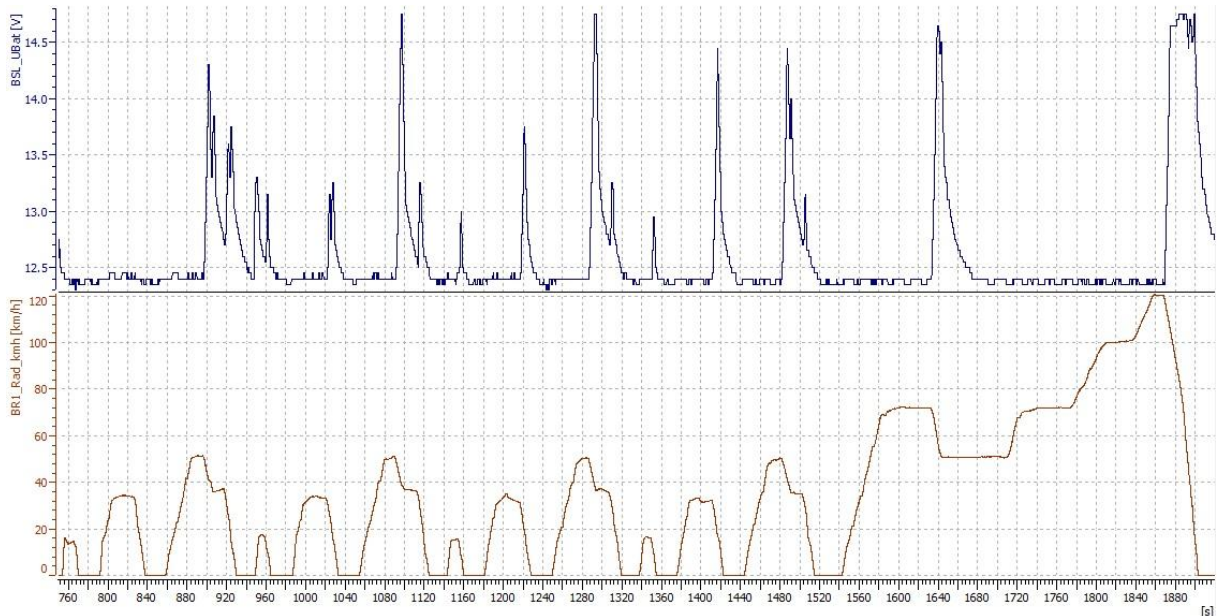


Abb. 3-3: Zeitlicher Verlauf der Batteriespannung (CAN-Messung) im NEFZ

Es ist gut zu erkennen, dass im Bereich der Motorschub- bzw. Bremsphasen die Spannung auf ca. 14,5 V steigt. Der mittlere Spannungswert während der Beschleunigungs- und Konstantfahrphasen liegt bei ca. 12,4 V. Diese Spannung entspricht der Batterieklemmenspannung bei geringerer Last und abgeschaltetem Generator (Lichtmaschine). Durch die Motorstoppphasen bei Fahrzeugstillstand steigt die elektrische Bedarfsleistung durch die Startvorgänge zusätzlich an, so dass das Batteriemanagement im EUDC (Außerstädtischer Bereich des NEFZ) Bereich bereits beginnt, die Batterie auch in Nicht-Bremsphasen nachzuladen bzw. den Batterieladegrad „einzufrieren“ (nicht im Bild). Die Ermittlung des Batteriestromes wurde mit Hilfe eines Zangenamperemeters durchgeführt. Das Gerät ist in Abb. 3-4 dargestellt.



Abb. 3-4: Zangenamperemeter

Die Ergebnisse der Messung finden sich auch in einer Veröffentlichung von BMW in der ATZ 04/2006 (Abb. 3-5) wieder. Hier ist darüber hinaus erkennbar, dass der Batterieladegrad innerhalb eines definierten Fensters gehalten wird. Die Messergebnisse und die Erkenntnisse aus der Veröffentlichung dienen als Grundlage für die Umsetzung der Generatorsteuerung im Demonstrator.

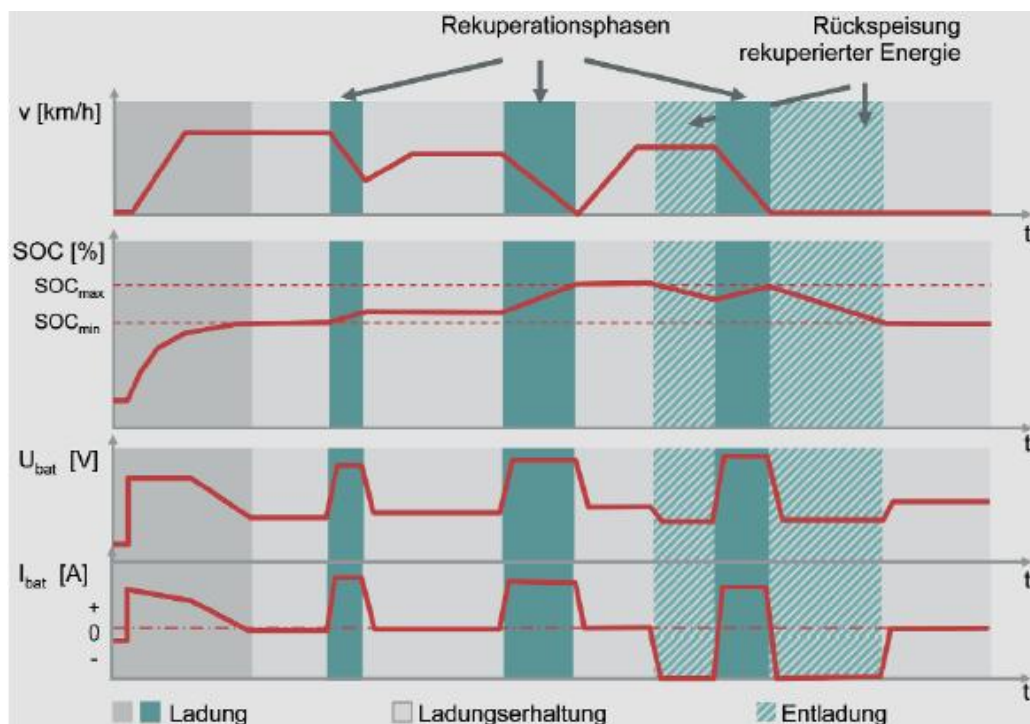


Abb. 3-5: Steuerlogik des Generators [ATZ06]

Zentrale Komponente für die Erzeugung elektrischer Energie und die Rückgewinnung mechanischer Energie ist der Generator. Dieser ist in den Riementrieb des Verbrennungsmotors eingebunden. Der Generator ist im Modell separat vom Antriebstrang über einen zweiten Port mit dem Verbrennungsmotor verbunden. Der Generator gibt im Modell eine Sollspannung vor. Diese kann größer als die Batterieerlaufspannung

(Generatorbetrieb nachladend) oder gleich bzw. kleiner (Ladungserhaltung bzw. Entladen) sein. Benötigte Eingangssignale sind die Riemendrehzahl, die elektrische Sollleistung und Rückmeldedaten aus der Batterie bzw. dem Batteriemanagementsystem, also Spannung, Strom und Ladezustand (SoC). Die Logik des Generators ist in Abb. 3-6 verdeutlicht. In der oberen linken Ecke (1) ist das „State Flow“ zu erkennen. Dieses überwacht definierte Eingangsgrößen, wie die Gaspedalstellung, die Motordrehzahl und die vom CAN-Bus gemeldeten SoC-Grenzen, die als Rahmen für die Regelung herangezogen werden. Der Ausgang steuert einen Schalter (2), der die Zustände für Generatorabwurf (0V), Erhaltungsladung (Generatorspannung = Batteriespannung) oder Laden bzw. Rekuperation (maximal mögliche Generatorspannung (max. 15 V, abhängig von der Bordnetzlast und dem SoC) steuert. Die sich einstellende elektrische Leistung wurde durch den unten ersichtlichen Teil (3), den Leistungsregler, realisiert.

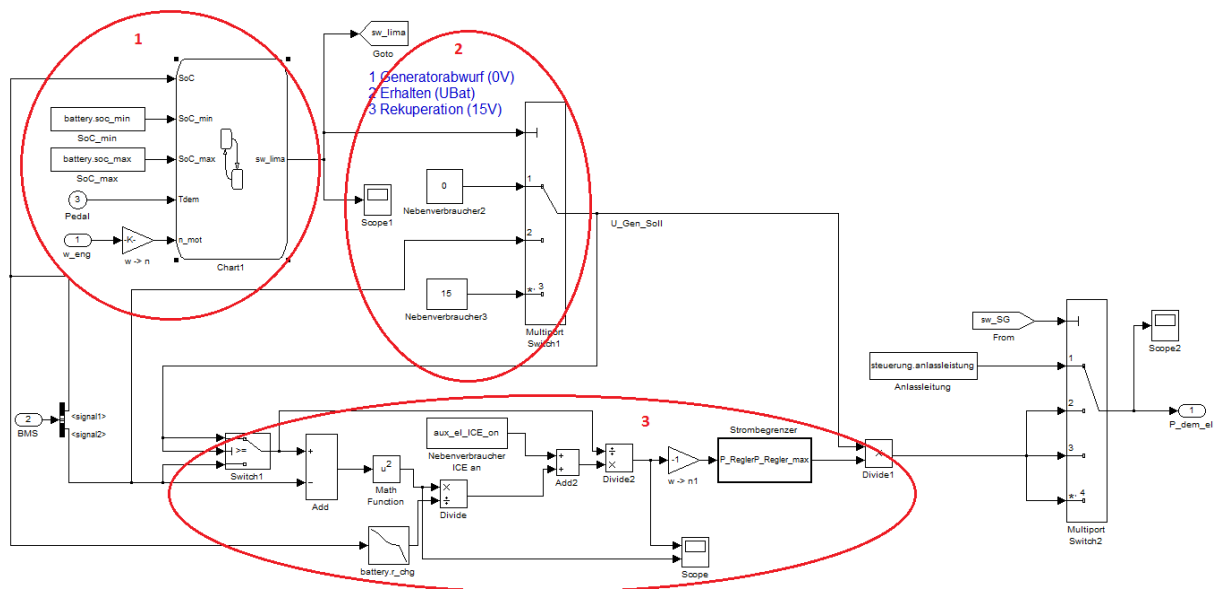


Abb. 3-6: Steuerlogik des Generators

Das „State Flow“ zur Steuerung des Schalters ist auszugsweise in Abb. 3-7 dargestellt.

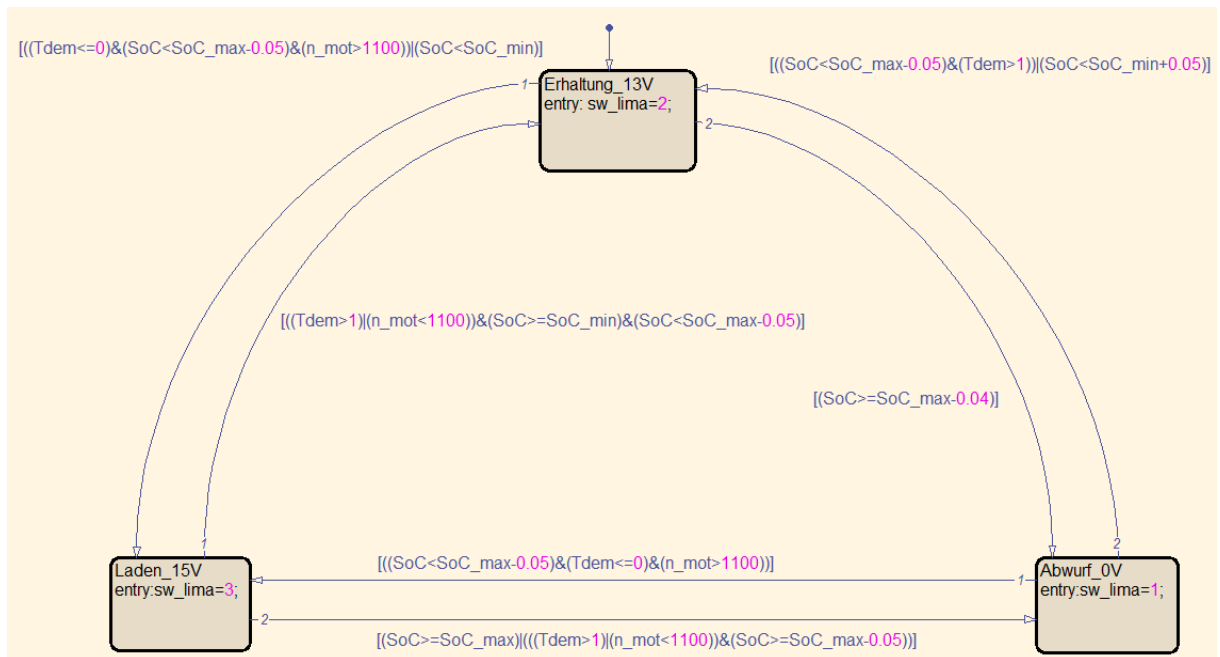


Abb. 3-7: Regelungsstateflow für die Steuerung des Generators

Die Parametrisierung des Blei-Batteriemodells erfordert Kenntnisse über charakteristische Daten, wie z. B. die offene Klemmenspannung und die Innenwiderstände (Laden/Entladen) bei verschiedenen Ladezuständen der Batterie. Diese Daten lagen der fka aus vorangegangenen Projekten, bei denen Komponenten auf dem Batterieprüfstand untersucht wurden, vor. Sie wurden für die hier benötigte Modellierung herangezogen.

Die elektrischen Verbraucher werden durch ein Lastprofil dargestellt. Dieses wurde bei den Fahrzeugmessungen ebenfalls erfasst und ausgewertet. Vereinfacht wurden die Mittelwerte der elektrischen Last für die Grundzustände Zündung an, Verbrennungsmotor an und Zündung an, Verbrennungsmotor aus (z. B. Stopp/Start-Funktion) angenommen. Diese liegen bei ca. 300 Watt bzw. 190 Watt. Zusatzverbraucher können ebenfalls simuliert werden, sind aber bei Betrachtung der Normzyklen nicht von Bedeutung.

Für die Ausgabe und Speicherung der Simulationsergebnisse aller relevanten Daten ist ein weiterer „Block“ vorhanden. Hier können schon während der Simulation verschiedene Größen beobachtet und überprüft werden. Diese Größen werden zusätzlich über der Simulationszeit aufgetragen und in entsprechenden Variablen gespeichert. So kann anschließend mit den erzeugten Werten gearbeitet und diese z. B. für Vergleiche herangezogen werden. Der Auswertungsblock ist in Abb. 3-8 abgebildet. Die blauen Anzeigen stellen dabei den absoluten Kraftstoffverbrauch, den streckenbezogenen Kraftstoffverbrauch und die zugehörigen CO₂-Emissionen dar.

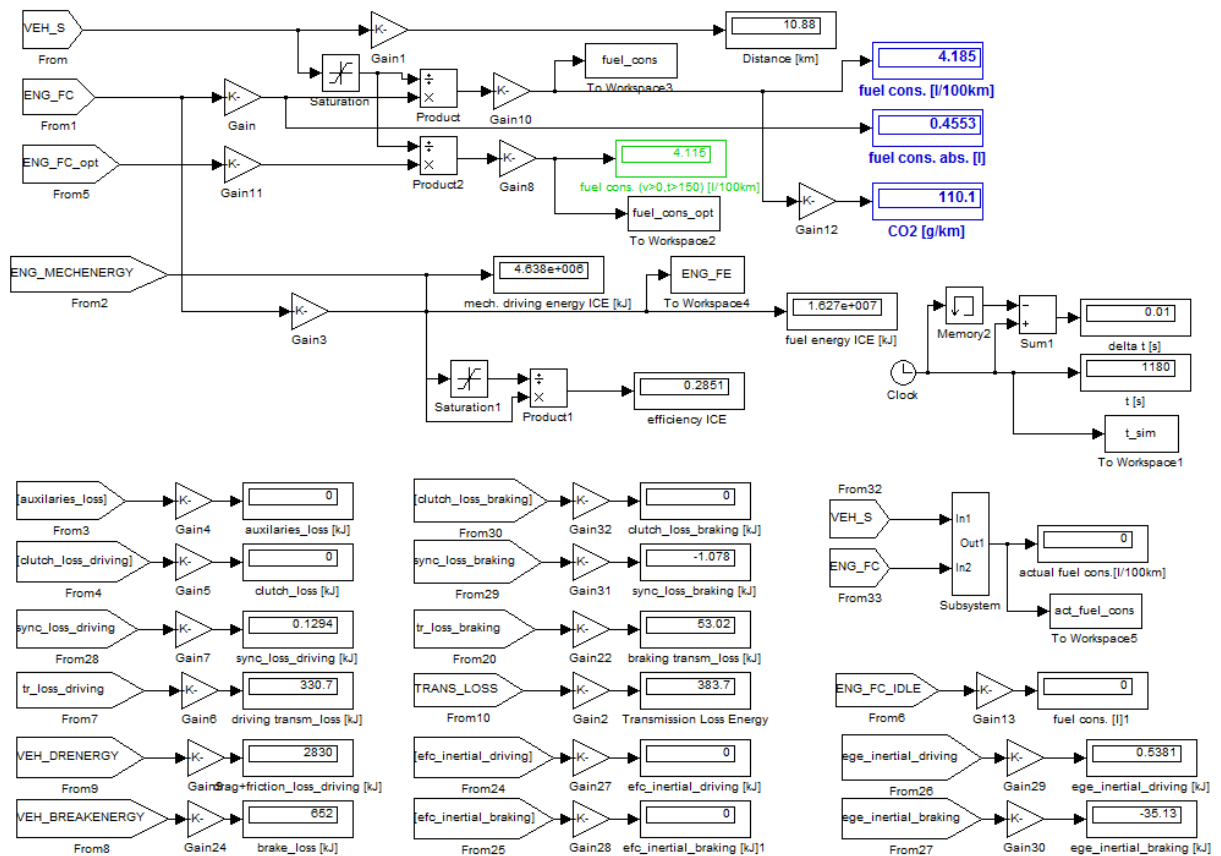


Abb. 3-8: Auswertungsblock mit direkten Anzeigen in Simulink

Nach dem Aufbau des Basismodells und der Modellierung der Einzelkomponenten in Verbindung mit der Parametrierung aus Messdaten und Literaturdaten konnten die Verbrauchsergebnisse und auch das Fahrzeugverhalten in der Simulation mit einer Abweichung kleiner 2,5 % nachgebildet werden.

3.1.2 Aufbau des Demonstratormodells

Ende September 2011 wurde parallel zu den Arbeiten am Basisfahrzeugmodell auch mit den Arbeiten am Demonstratormodell begonnen. Für den Umbau des Fahrzeugs wurden notwendige Modifikationen der Modelle des Verbrennungsmotors, des Getriebes, des Differentials und des Gesamtfahrzeugs erforderlich. Das Motorverbrauchskennfeld wurde anhand von Messungen auf einem Motorenprüfstand von der Meta GmbH zur Verfügung gestellt [MET14b].

Zusätzlich zu den Änderungen am Fahrzeug und der Einzelkomponenten sind die für das Erdgassystem relevanten Berechnungsalgorithmen in das Modell des Demonstrators integriert worden. Diese beinhalten Berechnungen zu den verschiedenen Erdgasqualitäten, wie z. B. H1-, H2-, L-Gas und auch Biogas. Das Fahrzeugmodell wurde neu strukturiert, um die Integration der Software für die Steuergeräte im Fahrzeug vorzubereiten, vgl. Abb. 3-9.

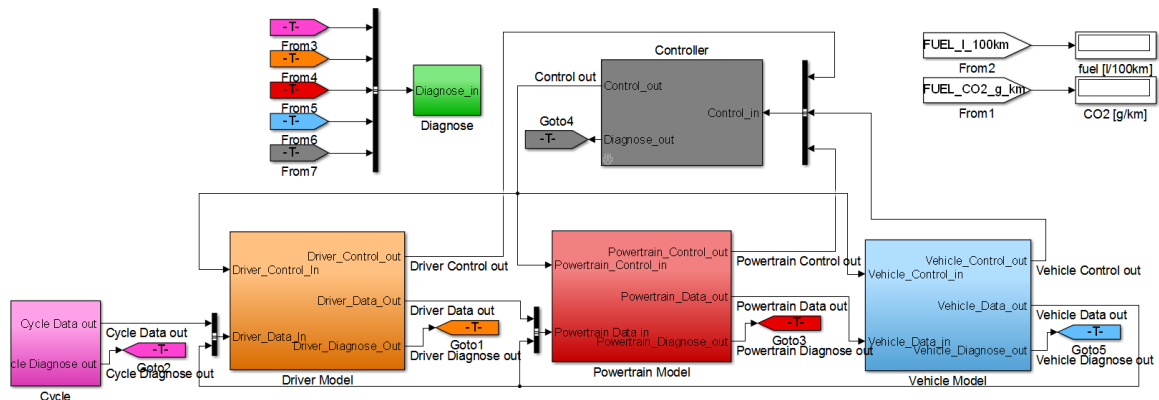


Abb. 3-9: Neue Fahrzeugmodellstruktur (oberste Ebene in Simulink)

Die angepasste Modellstruktur ermöglicht die Einbindung von Messdaten aus aufgezeichneten Messungen und darüber hinaus die Integration von Steuergerätesoftware nach dem In-The-Loop-Verfahren.

3.1.3 Anpassung der relevanten Komponenten

Die vom Umbau des Fahrzeugs betroffenen Komponenten im Simulationsmodell mussten entsprechend der Vorgaben von ika und Meta angepasst werden [IKA14b, MET14b]. Dazu wurden Messdaten bzw. Referenzdaten der Komponenten in das Modell eingepflegt. Das Vorgehen bei den einzelnen Komponenten wird im Anschluss kurz erläutert.

Die Modularität der Einzelkomponenten ermöglicht die schnelle Anpassung einzelner Parameter und Kennfelder. Der Grundaufbau des Teilmodells bleibt bestehen. Das charakteristische Kennfeld, in dem der spezifische Kraftstoffverbrauch über Motordrehzahl und -moment ermittelt wird, unterscheidet sich grundlegend vom Basismodell. Das Kennfeld wurde von der Meta auf einem Motorenprüfstand ermittelt. Diese Prozedur erfordert, dass der Motor ein bestimmtes Betriebspunktraster mehrfach durchläuft. Hierbei wird der Kraftstoffverbrauch ermittelt und entsprechend hinterlegt. Durch die Aufzeichnung des Massenstroms des Kraftstoffs wird ein leistungs- und zeitbezogener Zusammenhang der verbrauchten Kraftstoffmasse über den vom Motor abdeckbaren Betriebspunkten dargestellt. In das Modell eingebaut kann für einen definierten Fahrzyklus die absolut verbrauchte Kraftstoffmasse (bei CNG-Motoren) oder unter Berücksichtigung der Kraftstoffdichte (bei Diesel/Benzinmotoren) auch das Volumen bestimmt werden. Dies wird im Falle des NEFZ-Zyklus auf die gefahrene Strecke bezogen und auf 100 km normiert, so dass ein Wert in kg/100km oder l/100km als Ergebnis vorliegt. Dieses Ergebnis wird unter Annahme einer idealen Verbrennung in einen CO₂-Emissionswert in g/km umgerechnet. Das von der Meta ermittelte Kennfeld des Erdgasmotors für den Demonstrator ist in Abb. 3-10 dargestellt. Die schwarze Linie stellt die Kurve maximalen Motormoments dar.

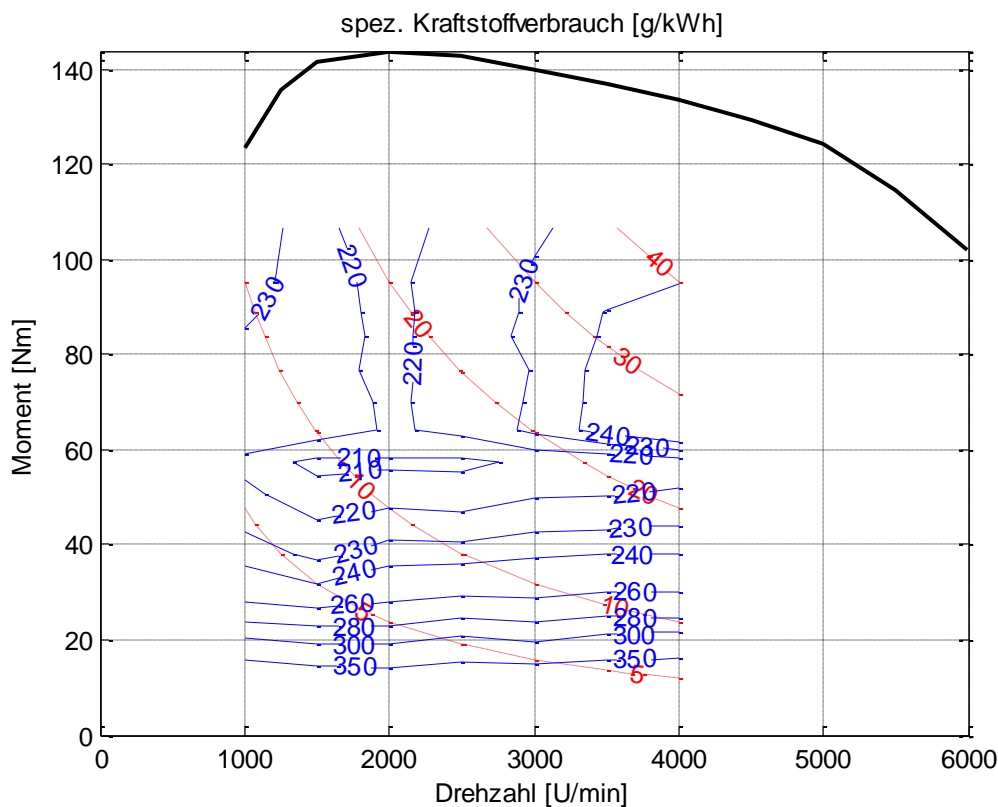


Abb. 3-10: Verbrauchskennfeld des Meta-CNG-Motors (Stand 2011)

Ein weiterer wichtiger Baustein ist das Modell der intelligenten Lichtmaschine und des Anlassers. Dieses wurde in ein Modell für einen riemengetriebenen Starter-Generator (iStars-System der Firma Valeo) überführt [IKA14b]. Die Betriebsstrategie des Systems wurde zunächst vom Basisfahrzeug übernommen. Die Eingangsdaten zur Modellierung wurden vom ika und der Firma Valeo zur Verfügung gestellt und entsprechend in das Modell überführt.

Der Hubkolbenlader ist über das Kennfeld des Verbrennungsmotors mit erfasst. Daher war hier keine separate Modellierung notwendig. Das CRE-System hat ebenfalls keinen längsdynamischen Einfluss, sondern findet nur im Triebstrang-Schwingungsmodell Verwendung. Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse des Demonstratormodells vorgestellt.

3.1.4 Simulationsergebnisse

Der Basisverbrauch des Demonstrators mit Erdgas-Verbrennungsmotor inkl. der im vorhergehenden Kapitel dargestellten Maßnahmen wird als Basiswert herangezogen. Dieser beträgt laut Messung 83,9 % des Referenzwertes des Basisfahrzeugs (100 %). Für die Simulation wurde H-Erdgas verwendet. Die Ergebnisse stellen den Stand vor Optimierung der einzelnen Komponenten unter Einbezug des im Jahr 2012 ermittelten Verbrauchskennfeldes des Verbrennungsmotors dar.

Parametervariationen der Fahrwiderstände

Die Einflüsse der im Arbeitspaket 1.8 (Erfassung Längsdynamik) ermittelten Ausrollkurven sind in der folgenden Abb. 3-11 vergleichend dargestellt. Dabei sind die Messungen des i_{ka} , die externe Kontrollmessung und eine Vergleichsmessung mit einem Polo V mit Benzinmotor hinterlegt. Für die Parameterstudien zu Einflüssen des Fahrwiderstands wurden diverse Randbedingungen erarbeitet. Das Ausgangsfahrzeug hat einen Luftwiderstandsbeiwert (c_w -Wert) von 0,307. Hier wurde eine Reduzierung auf 0,3, 0,29 und 0,28 betrachtet. Für den Rollreibungsbeiwert wurde ein Wert für einen extrem rollwiderstandsarmen Reifen von 0,007 als untere Grenze angenommen. Hier wurde von 0,015 mit Schritten von 0,01 bis zu 0,007 untersucht. Die Ergebnisse der Parameterstudien zu den Fahrwiderständen sind der Tabelle Abb. 3-12 zu entnehmen.

	Parameter	ika-Messung [Basisfahrzeug]	Kontrollmessung [Basisfahrzeug]	Vergleichsmessung [1,2 TSI]
Fahrwiderstände	f0	115,8	109	91
	f1	0,2527	0,77	0,37
	f2	0,0323	0,028	0,0302
Verbrauch [% Ref] NEDC		83,9%	84,6%	78,9%
Einsparung in %		-	-0,70%	5,02%

Abb. 3-11: Parametervariationen der Fahrwiderstandskoeffizienten f_x (Simulation)

	Parameter	Literatur/ Messung	Variation 1	Variation 2
Fahrwiderstände	$c_w \times A$	0,6349	0,6204	0,5600
	f_r^*	0,0095	0,0070	0,0070
Verbrauch [% Ref] NEDC		76,6%	72,5%	70,7%
Einsparung in %		7,29%	11,44%	13,24%

Abb. 3-12: Parametervariationen der Fahrwiderstandsparameter (Simulation)

Die extern ermittelte Ausrollkurve führt im Vergleich zur vom i_{ka} ermittelten Kurve zu einem um 0,7 % schlechteren Kraftstoffverbrauch im NEFZ. Eine Vergleichskurve eines Polo V 1,2 TSI ermöglicht um ca. 5 % günstigere Verbrauchswerte. Der Ansatz der Fahrwiderstandsparameter der Längsdynamik (c_w , f_r etc.) (s. o.) führt zu einem um ca. 7,3 % günstigeren

Kraftstoffverbrauch gegenüber der Ausrollkurve des ika. In der Minimalkonfiguration unter Annahme der günstigsten Voraussetzungen wäre ein theoretischer Verbrauchsvorteil von ca. 13 % zu erwarten. Da keine Änderungen an der Karosserie durchgeführt wurden, ist dieses Ergebnis als theoretische Potenzialbetrachtung zu werten.

Betrachtung der Generatorstrategie/Parameterstudien zum Batterieladegrad

Eine wesentliche Bedeutung kommt der Strategie des Bordnetzmanagements zu. Dazu zählen energiesparende Funktionen, wie das Stopp/Start-System und die Rekuperation von Bremsenergie im Motorschub und beim Bremsen. Diese Strategie wurde durch Aufzeichnung von CAN-Bus-Daten während Fahrten auf der Straße und dem Prüfstand extrahiert. Die Grundidee der Strategie wurde im letzten Bericht [IKA11] näher beschrieben. Diese lässt sich auf das Konzept im Referenzfahrzeug übertragen. Innerhalb der Simulationsstudie wurde untersucht, welche Einflüsse das Stopp/Start-System und die Rekuperationsstrategie mit unterschiedlichen Startwerten des Batterieladegrades (SoC, State of Charge) im Vergleich zu einer ladeschlussspannungsgeregelten Lichtmaschine mit unterschiedlichen Startwerten aufweisen. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abb. 3-13 zu sehen. Die Simulationsstudien wurden mit der Erstvariante des Demonstratormodells durchgeführt. Somit sind die Kraftstoffverbräuche auch hier in kg/100 km CNG angegeben. Nach Interpretation der Ergebnisse ist an dieser Stelle anzunehmen, dass das System bezogen auf einen bestmöglichen Kraftstoffverbrauch im NEFZ bereits ein optimales Verhalten darstellt. Somit sind die eingangs von Volkswagen und BMW vorgestellten Strategien als Optimalfall zu deuten.

		battery.soc_ini	0,75	0,85	0,95	1
Generator auf konstantem Spannungsniveau	14.4 V	start_stopp ein	83,9%	82,9%	82,3%	81,3%
		start_stopp aus	83,9%	83,9%	83,9%	83,9%
	13.5 V	start_stopp ein	83,4%	78,1%	77,9%	77,9%
		start_stopp aus	83,4%	82,9%	82,9%	82,9%
Intelligentes Lademanagement	variable Sollspannung	start_stopp ein	82,1%	77,6%	75,5%	73,7%
		start_stopp aus	82,1%	82,1%	79,7%	77,9%

Abb. 3-13: Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Generator-Strategien und SoC-Ständen

Die Stopp/Start-Strategie ist ab einem SoC oberhalb von 80 % wirksam, wodurch sich die gleichen Zahlen unterhalb dieses Werts erklären lassen. Auffällig ist weiterhin, dass der Verbrauchswert von 3,43 kg/100 km nicht mehr unterschritten wurde. Diese untere Grenze

ist ein Minimum des erreichbaren Kraftstoffverbrauchs durch bordnetzstrategische Maßnahmen. Die Norm zur Ermittlung des Kraftstoffverbauchs im NEFZ, EG 715/2007 sieht vor, dass das Prüffahrzeug mit einer vollgeladenen Bleibatterie vermessen wird. Das führt dazu, dass die Generatorstrategie vorsieht, sämtliche elektrische Verbraucher im Bordnetz, die für die Messung relevant sind (zwangswise alle Fahrzeugsteuergeräte, die Zündung und alle Anzeigeinstrumente im Fahrzeug), aus der Batterie zu versorgen, sofern sich das Fahrzeug in Konstantfahrt- oder Beschleunigungsphasen des NEFZ befindet. Im Falle von Verzögerungsphasen im Schub und/oder durch Bremsen wird die Ladespannung auf ein Maximum (von ca. 15 V) geregelt, so dass die kinetische Energie des Fahrzeugs über die Lichtmaschine in elektrischen Strom gewandelt und dieser ohne zusätzliche Last am Motor gewonnen werden kann. In der Bilanz ist diese Strategie so bemessen, dass zu keiner Zeit ein Nachladen und damit ein erhöhter Kraftstoffverbrauch erzwungen werden muss. Ein ähnliches Verhalten ist auch in Vergleichszyklen mit vergleichbarer Fahrdauer zu beobachten. Dies resultiert in einem für den NEFZ minimalen Kraftstoffverbrauch. Diese Strategie wurde nach diesen Erkenntnissen ebenfalls im Demonstrator umgesetzt, da hier keine weitere Verbesserung erzielt werden kann. Der Zusammenhang zwischen SoC-Startwert und Kraftstoffverbrauch ist zur besseren Übersicht nochmals grafisch in Abb. 3-14 dargestellt. Dabei ist der SoC-Endwert nicht dargestellt und kann hier strategieabhängig variieren. Insbesondere die intelligente Laderegulierung sorgt für ein schnelles Erreichen des eingestellten SoC-Wertes von ca. 0,92.

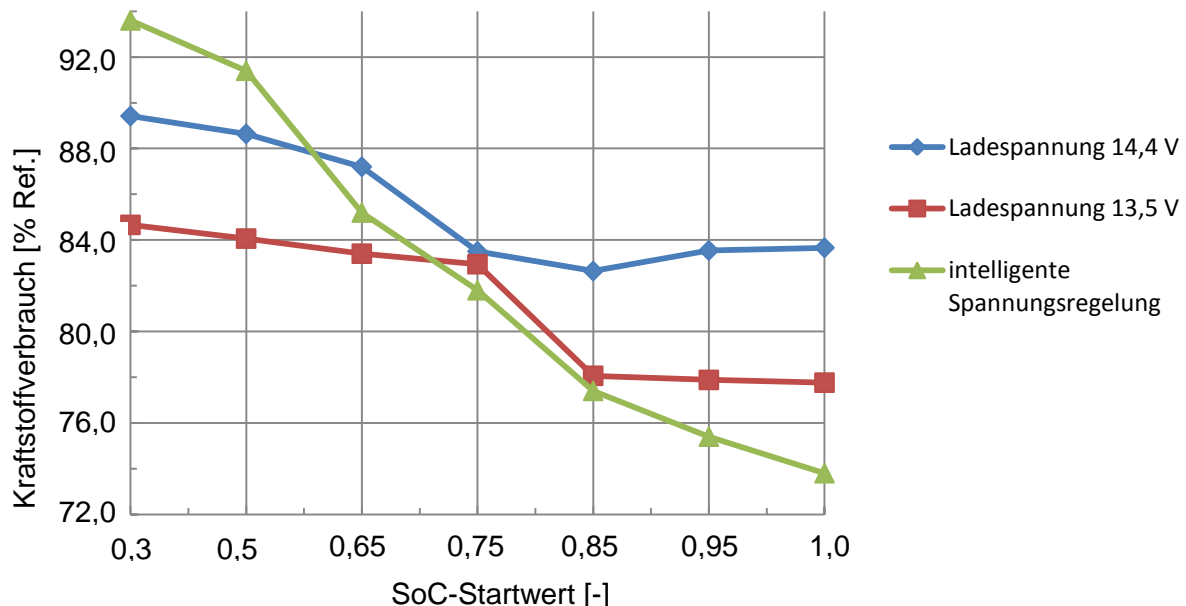


Abb. 3-14: Vergleich der Bordnetzstrategien

Der hohe Kraftstoffverbrauch ist beim intelligenten Lademanagement und niedrigem Ladezustand der Batterie durch die hohe Steuerspannung von 15 V begründet. Diese soll ein schnelles Nachladen der Batterie gewährleisten, so dass das Stopp/Start-System schnell

eingesetzt werden kann und zudem die generelle Startsicherheit nach einer sehr kurzen Fahrt wieder gegeben ist.

Einfluss des Kühlwasserwärmespeichers

Die Integration des Kühlwasserwärmespeichers wurde in der Simulation bewertet und in die Modellumgebung des Verbrennungsmotors integriert. Die Funktion kann über einen Konfigurationsparameter ein- oder ausgeschaltet werden. Das System wurde auf Basis von Messdaten aus dem öffentlichen Förderprojekt des Bundesumweltamtes mit dem Titel „Technische Möglichkeiten zur Umsetzung einer durchschnittlichen CO₂-Emission von 120 g/km bei PKW in Europa“, in dem ein solches System in einem Golf-V-GT [ESP07] verbaut wurde, modelliert. Die Einflüsse wurden entsprechend auf das vorliegende Fahrzeug und die Komponenten angepasst. Die Ergebnisse mit Verwendung des Kühlwasserwärmespeichers finden sich in Abb. 3-15.

Wärmespeicherintegration	Standard kalt / ohne	Standzeit 6 Stunden	Standzeit 24 Stunden
Verbrauch [kg/100km] NEDC	83,9%	82,7%	82,8%
Einsparung in %	-	1,20%	1,05%

Abb. 3-15: Einfluss des Kühlwasserwärmespeichers im Demonstrator

Die maximalen Einsparungen belaufen sich laut Simulationsprognose, bedingt durch eine Prüftemperatur von ca. 25 °C und einer Stillstandszeit von sechs Stunden nach Fahrzeugkonditionierung, auf maximal ca. 1,2 %.

Getriebesimulationsstudie

Der Einbau des Erdgasverbrennungsmotors führt zu einer veränderten Drehmomentcharakteristik am Getriebeeingang. Auch das Gesamtdrehzahlband ist im Vergleich zum Dieselmotor größer. Aus diesem Grund wurde eine umfassende Simulationsstudie durchgeführt, um optimale Gangübersetzungen zu ermitteln. Dabei wurden verschiedene Grundbedingungen, die einen stabilen Fahrbetrieb ermöglichen, berücksichtigt. Details hierzu können dem vorliegenden ika-Abschlussbericht [IKA14b] entnommen werden. Die Auswertung der Getriebestudie hat gezeigt, dass mit dem Basisgetriebe die geringsten Kraftstoffverbräuche erreicht werden. Die Leistungsfähigkeit ist mit einer insgesamt kürzeren Achsübersetzung geringfügig besser, rechtfertigt aber nicht den Austausch des Getriebes [IKA14b]. Gut zu erkennen ist in Abb. 3-16 die Häufigkeitenverteilung der Betriebspunkte im NEFZ. Besonders die außerstädtischen Anteile liegen hier in einem guten Wirkungsgradbereich (rote Punkte).

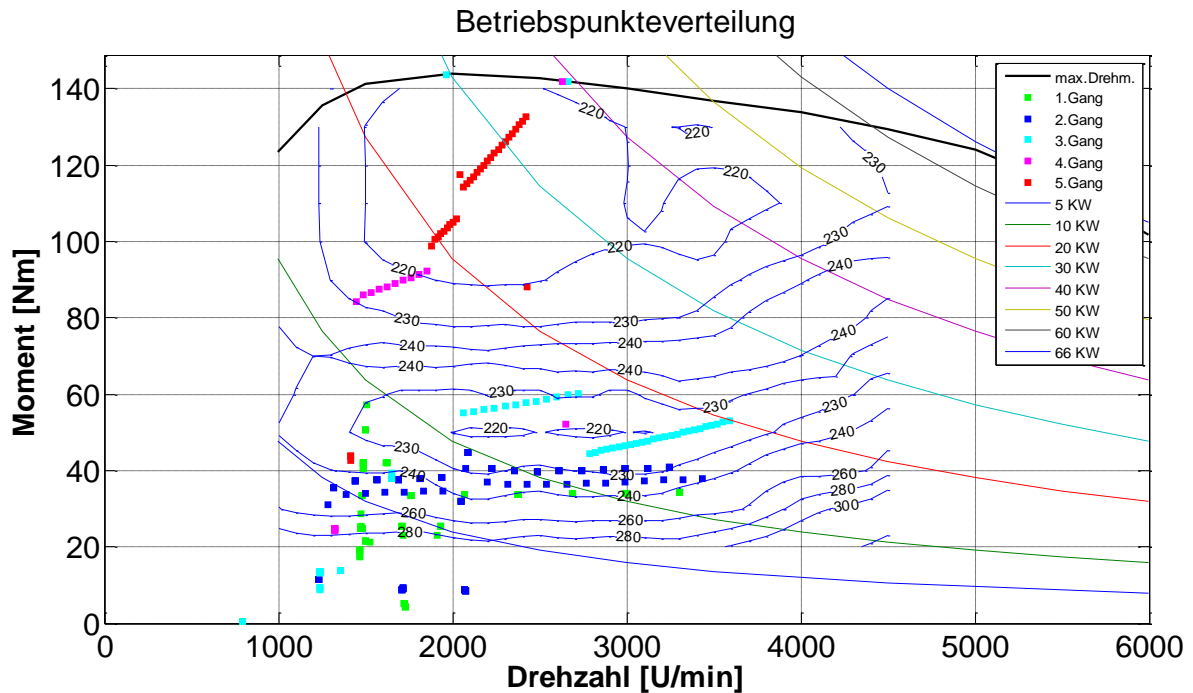


Abb. 3-16: Betriebspunkteverteilung im NEFZ mit Basisgetriebe

In einer Diskussionsrunde aller Projektpartner wurde beschlossen, das Seriengetriebe weiterzuverwenden.

3.2 Maßnahmenpaket (AP 2.10)

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurde in Kooperation mit dem ika und der Meta ein Lastenheft erarbeitet, in dem sämtliche Umbaumaßnahmen am Fahrzeug beschrieben werden. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden alle Maßnahmen hinsichtlich des Einsparpotentials bewertet und ein Gesamtwert ermittelt. Die fest geplanten Umbaumaßnahmen, abgeleitet aus den Simulationsergebnissen und der Recherche durch ika und Meta, sind in Abb. 3-17 dargestellt.

Komponente	Basisfahrzeug	Zielfahrzeug
Motor	VW 1,2 l R3 TDI - 55kW	Meta 0,88 l R2 CNG - 66kW
Schwingungsdämpfer	VW 2-Massenschwungrad	Meta CRE-System
Tank	42l - Kunststoff-Dieseltank	58l - CNG-Drucktanks
Wärmespeicher	-	Ritter Wärmespeicher Typ B
Anlasser	Bosch-System (Stopp-Start)	Integration in Generator (s.u)
Generator	Bosch, 140A	Valeo iStars
Getriebe	manuell, 5-Gang	evtl. Anpassung der Übersetzungen
Achsübersetzung	mechanisches Diff.	evtl. Anpassung der Gesamtübersetzung

Abb. 3-17: Geplante Umbaumaßnahmen am Fahrzeug

Weitere, zu Projektbeginn untersuchte, gewichtsreduzierende Umbauten wurden nach weitergehender Recherche und Analyse durch das ika aufgrund ungünstiger Kosten/Nutzen-Verhältnisse verworfen [IKA14b]. Aufwändige Änderungen an der Fahrzeugkarosserie wurden ebenfalls verworfen. Die Potenziale wurden im Simulationskapitel aufgezeigt und können für weitere Arbeiten am Demonstrator nach Projektende ggf. aufgegriffen werden.

3.3 Umbau Fahrzeug (AP 3.1)

Die Integration der Komponenten wurde in Kooperation in den Werkstätten der Meta durchgeführt. Der Motor wurde, zusammen mit den weiteren Technologien der Meta, nach Abschluss der Prüfstandtests bei der Meta zusammen mit dem iStars-System und dem Kühlwasserwärmespeicher in das Fahrzeug eingebaut. Die Abstimmung aller Funktionen erfolgte sowohl im Fahrzeug als auch zuvor am Prüfstand.

Als Vorbereitung für den Fahrzeugumbau wurde von der fka in Zusammenarbeit mit dem ika und der Meta die Steuersoftware für das Stopp/Start-System, die Bordnetzstrategie und die Schaltanzeige entwickelt. Die Funktionsentwicklung wurde in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink durchgeführt. Der Code wurde anschließend auf eine Autobox der Firma dSpace installiert. Die Autobox wird auch im Rahmen der Umbauten der Meta eingesetzt und dient daher als zentrales Steuergerät für sämtliche Steuerungsaufgaben, mit Ausnahme der Motorsteuerung, der Meta. Somit konnten eine hohe Komplexität und eine hohe Anzahl an Kommunikations-Bussen im Fahrzeug vermieden werden. Zudem können sämtliche Steuersysteme zentral agieren. Das Autoboxsystem ist in Abb. 3-18 dargestellt.



Abb. 3-18: (Micro-)Autobox der Firma dSpace [DSP14]

Durch die im Arbeitspaket „Längsdynamiksimulation“ vorgenommene Umstellung der Simulationsumgebung war es möglich, die Steuerlogik des Startergenerators über einen Compiler direkt in den für die Autobox verständlichen Quellcode umzusetzen. Dadurch konnten jederzeit Änderungen kurzfristig vorgenommen werden und direkt durch eine schnelle Neukompilierung auf die Autobox übertragen werden. Dadurch wurde der nachfolgende Applikationsprozess stark beschleunigt.

3.3.1 Entwicklung der Steuersoftware

Zur Steuerung von Komponenten werden heutzutage in Fahrzeugen der Oberklasse teilweise über 60 Steuergeräte verbaut, die entsprechende Funktionen realisieren und in ständigem Kontakt zueinander stehen. Antriebsseitige Steuergeräte nutzen dabei den weit verbreiteten CAN (Controller Area Network) Standard. Die Steuerung von elektrischen Komfortkomponenten wird häufig über den LIN (Local Interconnect Network) Standard gelöst. Dieser stellt eine kostengünstigere Alternative bei reduzierter Leistungsfähigkeit dar. Infotainment-Komponenten werden meist über den MOST (Media Oriented Systems Transport) Bus verbunden.

Der CAN-Bus arbeitet mit priorisierten Kommunikationsvorgängen. Einzelne Botschaften werden durch die Vergabe eines niedrigen Identifiers (ID) gegenüber Botschaften mit höherer ID vorangestellt. Im LIN-Bus erfolgt die Kommunikation in zyklischer Form. Die Kommunikation der Systeme ist anschaulich in Abb. 3-19 und Abb. 3-20 dargestellt.

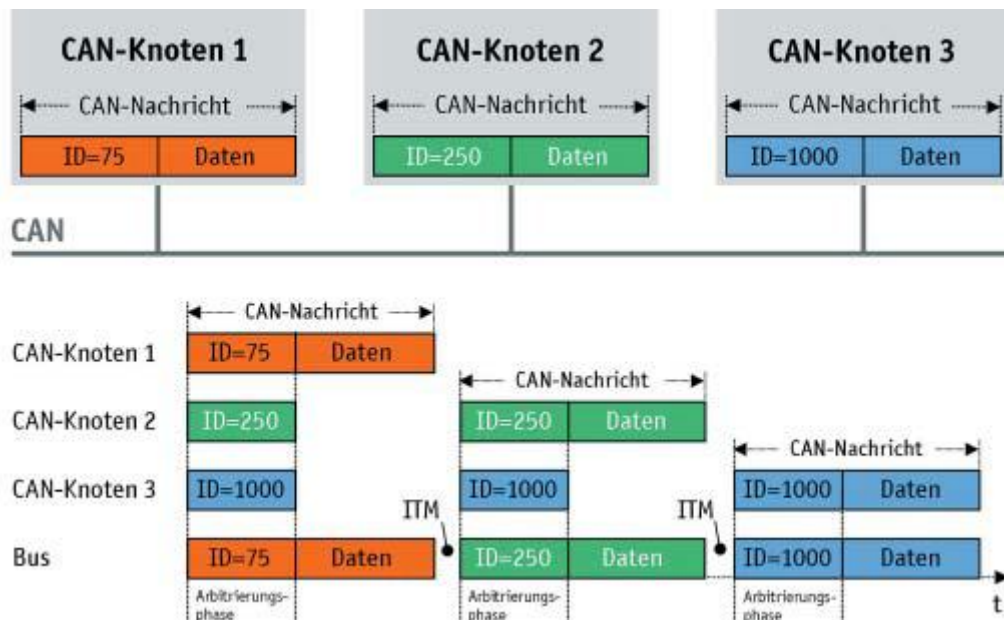


Abb. 3-19: Kommunikation im CAN-Netzwerk [VEC12]

Die CAN-Nachrichten werden entsprechend ihrer ID übertragen. Beispielsweise hat die Nachricht mit ID = 75 Vorrang und wird zuerst übertragen, die weiteren Nachrichten werden kontrolliert unterbrochen. Es folgt eine erneute Sendung der Nachricht mit ID = 250. Letztendlich folgt dann die Nachricht mit der ID = 1000, die beim dritten Mal durch das kontrollierte Prinzip der Arbitrierung gesendet wird.

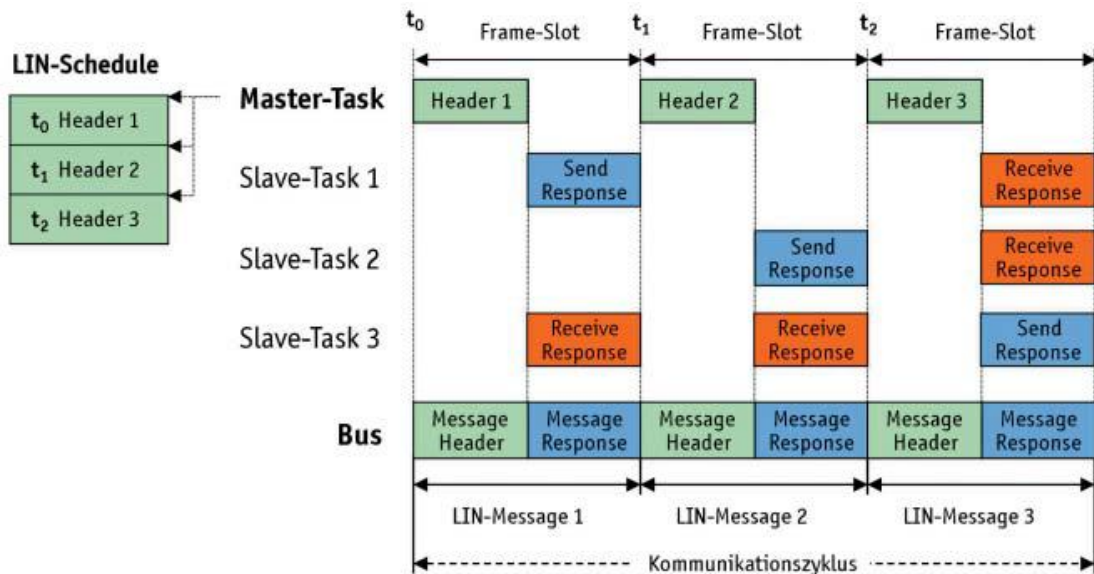


Abb. 3-20: Kommunikation im LIN-Netzwerk [VEC12]

Beim LIN-Bus wird ein Zeitplan (Schedule) abgearbeitet, der durch das Master-Steuergerät (hier das Motorsteuergerät der Meta) vorgegeben wird. Die im Bus angehängten Slaves reagieren mit definierten Aktionen auf die Headervorgaben des Mastergerätes.

Die Eigenschaften und Funktionsweise der verschiedenen Bussysteme sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Für die Softwareentwicklung sind der CAN- und der LIN-Bus bedeutend. Durch die Möglichkeit, die Daten des CAN-Bus und LIN-Bus abzugreifen und zu verwenden, konnte die gesamte Struktur im Fahrzeug entsprechend ausgelegt werden. Der Aufbau der Steuerarchitektur im Fahrzeug ist in Abb. 3-21 dargestellt.

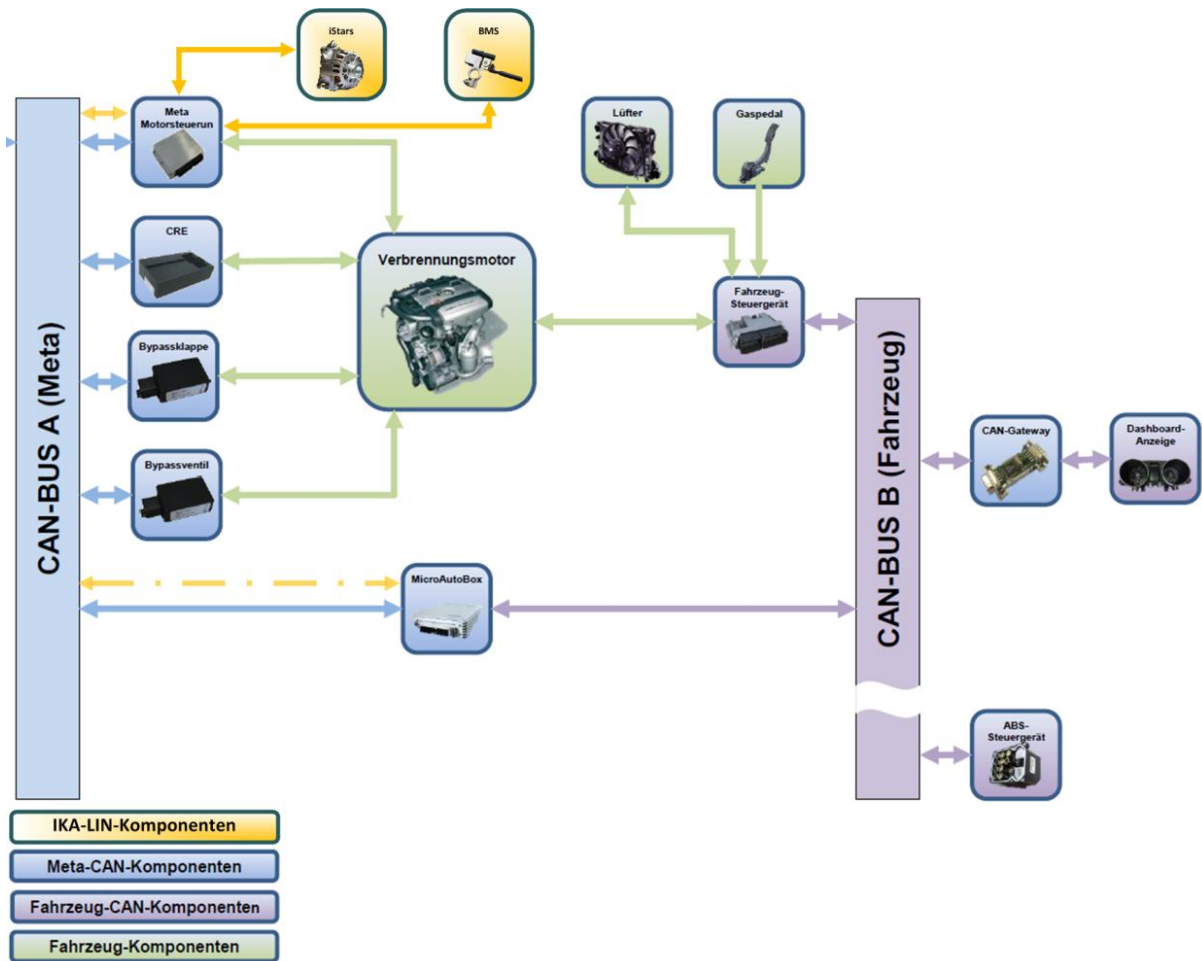


Abb. 3-21: Busstruktur im Demonstrator

Die Autobox übernimmt hierbei wesentliche Berechnungen und Steuerfunktionen für Komponenten der Peripherie. Hier ist es möglich, Datenein- und -ausgänge im CAN-Busformat zu erzeugen und somit eine Anbindung an die bestehende Struktur der Bussysteme im Demonstrator zu schaffen. Das Motorsteuergerät übernimmt neben der Hauptfunktion der Motorsteuerung auch die Funktion der Übersetzung von CAN- in LIN- und LIN- in CAN-Signale, da sich nach Recherchen ergeben hat, hiermit den Aufwand der Autoboxprogrammierung reduzieren zu können (Verbindung über gelb-gestrichelte Linien, s. Abb. 3-21). Das iStars-System und das Batteriemanagementsystem von Hella kommunizieren via LIN-Bus, alle weiteren, neu eingesetzten Komponenten auf CAN-Bus-Basis.

Durch Identifizierung der projektrelevanten CAN-Signale im Fahrzeug konnten sämtliche Funktionen und Anzeigen im Fahrzeug erhalten werden bzw. weiter genutzt werden. Dadurch ergeben sich keine Einschränkungen, und die Implementierung im Demonstrator konnte entsprechend unauffällig durchgeführt werden.

3.3.2 Entwicklung der Energiemanagement Software des Startergenerators

Zu Beginn der Softwareentwicklung wurden die Funktionen ausgearbeitet, die im Demonstrator mittels der zu steuernden Komponenten dargestellt werden sollen. Wie schon zuvor erwähnt, handelt es sich um folgende Funktionen:

- Stopp/Start-Funktion bei Fahrzeugstillstand
- „intelligente“ Regelung des Generators beim Fahrbetrieb (inkl. Rekuperation etc.)
- Implementierung einer auf den neuen Verbrennungsmotor angepassten Schaltanzeige

Zunächst war es wichtig, die beteiligten Komponenten zu ermitteln und die entsprechenden Schnittstellen untereinander zu definieren. Bezogen auf das Stopp/Start-System und die Laderegulierung sind hier das iStars-Startergeneratorsystem von Valeo und die Einbeziehung der AGM-Bleibatterie zu nennen. Für die Schaltanzeige ist es notwendig, den aktuell eingelegten Gang zu berechnen, da hierzu kein Sensor verbaut wurde. Weiterhin ist es erforderlich, das Motorkennfeld in der Software zu hinterlegen, um den Gang mit dem niedrigsten Kraftstoffverbrauch zu berechnen.

Um die Steuerung des Startergenerators und die Schaltanzeige aufbauen zu können, ist es zunächst erforderlich, Informationen zu den benötigten Ein- und Ausgangssignalen einzuholen. Bei der Schaltanzeige ist beispielsweise ein Ausgangssignal der empfohlene Gang für die aktuelle Fahrsituation, eingangsseitig werden Informationen zur aktuellen Motordrehzahl, dem aktuellen Motormoment und, wie oben erwähnt, zum aktuell eingelegten Gang benötigt. Viele dieser Signale sind bereits auf dem CAN-Bus des Basisfahrzeugs enthalten und können daher ohne die Integration neuer Sensoren verwendet werden. Da aber das VW-Batteriemanagement keine Daten über den CAN-Bus offenlegt (interne Verarbeitung), muss hier ein anderes System ergänzt werden, welches die benötigten Signale für die Startergeneratorsteuerung zur Verfügung stellt. Welche Signale für die Steuerung des Start/Stopp-Systems und für die Schaltanzeige gebraucht werden, wurde durch Versuche am Basisfahrzeug und Recherchen ermittelt.

Um das Stopp/Start-System funktionssicher auszulegen, müssen verschiedene Parameter berücksichtigt werden, bevor eine Freigabe des Systems erfolgen darf. NEFZ-relevante Aspekte sind mit einem (*) gekennzeichnet:

- Fahrzeug steht nicht an einer Steigung (*)
- Außentemperatur liegt zwischen $T_{\text{außen}} = 3 \text{ °C}$ und 30 °C [ALK11] (*)
- Klima-Anlage ausgeschaltet bzw. gewählte Temperatur im Innenraum um $\Delta T = 3 \text{ °C}$ erreicht (*)
- Lüftungsgebläse ausgeschaltet bzw. gewählte Temperatur im Innenraum um $\Delta T = 3 \text{ °C}$ erreicht (*)

- Der Katalysator wurde auf Betriebstemperatur aufgeheizt (gemessen im NEFZ: 190 s)
- Fahrzeug ist zuvor mit mindestens 10 km/h gefahren (*)
- Rückwärtsgang nicht eingelegt
- Taste für die Stopp/Start-Anlage wurde nicht gedrückt
- Fahrer-Sicherheitsgurt wurde angelegt
- Türen und Motorhaube geschlossen
- Keine Defrost-Einstellung (Scheibenheizung, Scheibengebläse) gewählt
- Kein Anhänger angekuppelt
- Kein starker Lenkeinschlag
- Einpark-Assistent nicht aktiviert
- Unterdruck im Bremskraftverstärker ist ausreichend
- Kein Fehler im Fehlerspeicher hinterlegt (Notlauf)

Die mit (*) gekennzeichneten Aspekte sind im NEFZ vorgeschrieben. Der einzige relevante Punkt, die Erwärmung des Katalysators, wurde bei den Verbrauchsmessungen bestimmt und in das Modell aufgenommen. Somit sind die Abfragen des Stopp/Start-Systems hinreichend für die Simulationsstudien abgebildet.

Wie dem letzten Halbjahresbericht der fka zu entnehmen ist, werden zur Ausführung des Motorstopps verschiedene Bedingungen abgefragt. Diese dienen einer Sicherstellung der Wiederstartbarkeit des Verbrennungsmotors, z. B. einer Überwachung des Batterieladegrads und der Last durch weitere elektrische Verbraucher. Ferner werden sicherheitsrelevante Punkte, wie z. B. eine geöffnete Motorhaube, erkannt und der Motorstart in diesem Fall unterdrückt, um ein Verletzungsrisiko durch den Riementrieb bei wiederstartendem Motor zu verhindern. Im Bereich Automotive werden sämtliche Verletzungsszenarien überprüft, auch wenn sie zunächst unrealistisch erscheinen. Ein jederzeit funktionierendes und sicheres System ist insbesondere zu späteren Demonstrationszwecken vor Publikum wünschenswert.

Zur Realisierung der Schaltpunktanzeige im Fahrzeug werden aufwändige Rechenprozesse auf der Autobox durchgeführt. Die Anzeige der verbrauchsgünstigsten Fahrstufe basiert dabei auf einer Analyse des Kraftstoffverbrauchs im aktuellen Betriebspunkt des Motors (Drehzahl/Drehmoment). Die Funktionsweise wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

Wie dargestellt, sind die Signale für die Laderegulierung zum großen Teil LIN-basiert. Das Batteriemanagementsystem und der Starter-Generator werden über LIN angebunden. Weitere Funktionen werden dann in der Autobox über CAN hinzugezogen.

3.3.3 Aufbau der Steuersoftware in Simulink

Im Folgenden werden der Aufbau und die Funktionsweise der Steuersoftware in Simulink näher beschrieben.

Stopp/Start- und Laderegler:

Die grundlegenden Steuerfunktionen für das Stopp/Start-System und die Laderegelung wurden im Matlab/Simulink-Modell des Basisfahrzeugs parallel mit aufgebaut. Die Betriebsstrategie wurde bereits vorgestellt. Diese wurde in einem nächsten Schritt des Fahrzeugumbaus im Fahrzeugmodell des Demonstrators aufgebaut und in einem In-the-Loop-Verfahren getestet, anschließend in ein gesondertes Modell extrahiert und an einem Hardwareprüfstand bei der Meta getestet [MET14b], vgl. Abb. 3-22. Das separate Modell der Steuersoftware für die Stopp/Start-Funktion und den Laderegler ist Abb. 3-23 zu entnehmen.

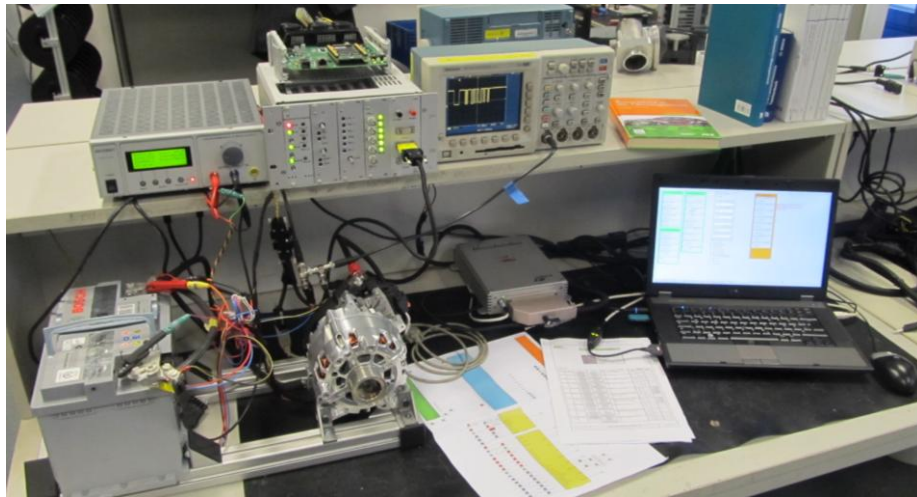


Abb. 3-22: Hardware-in-the-Loop-Testumgebung

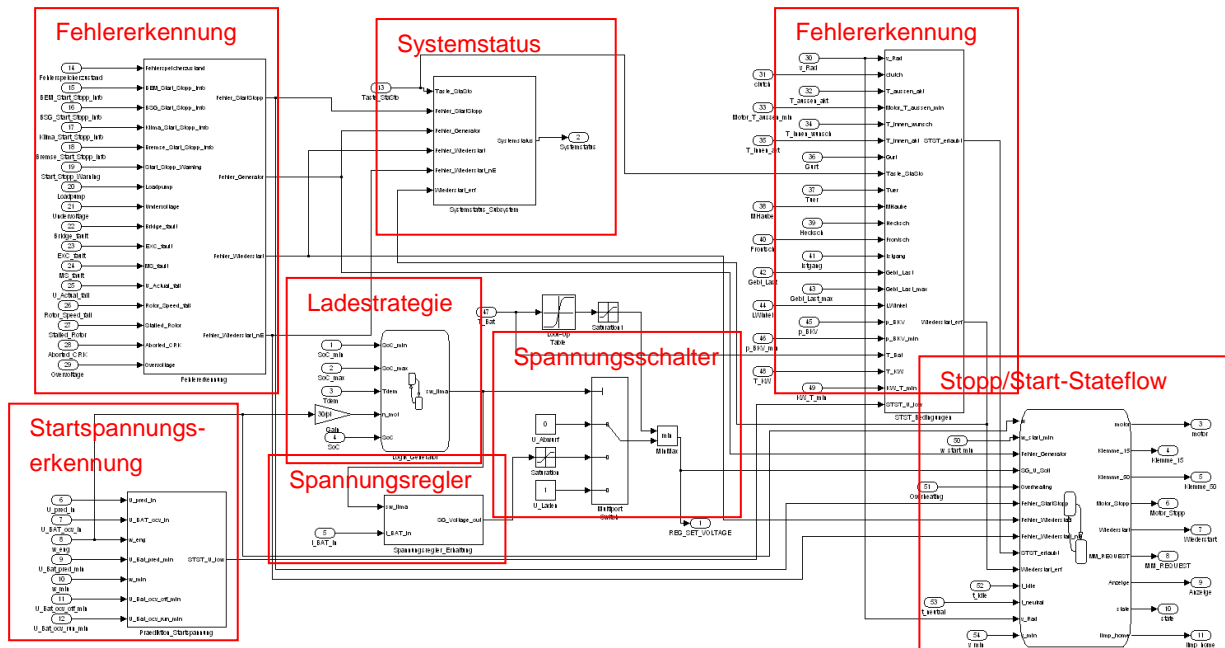


Abb. 3-23: Hauptebene des Subsystems Stopp/Start

Der links dargestellte Block stellt einen Zustandsautomaten dar, in dem die Freigabe und Durchführung des Motor(wieder)starts überwacht und durchgeführt werden. Dazu werden fortlaufend verschiedene funktions- und sicherheitsrelevante Signale ausgewertet [IKA12a].

Als Ausgabesignal zum Motorstopp wird ein Freigabebit gesetzt und ein entsprechendes Signal an die Motorsteuerung gesendet. Zum Motorstart wird bei Erkennung entsprechender Wiederstartsignale ein Startsignal an Motorsteuerung und Startergenerator gesendet. Der Wiederstart wird über die Betätigung des Kupplungspedals veranlasst, sofern keine sicherheitsrelevanten Wiederstarts durch z. B. eine zu tief entladene Batterie durchgeführt werden müssen.

Der kleinere, im Bild rechts dargestellte Zustandsautomat regelt den Generatorbetrieb des iStars-Systems. Grundsätzlich sind drei Lademodi vorgesehen.

1) Rekuperationsladung:

In Rekuperations- und Rollphasen wird der Generator auf die maximal mögliche Ladespannung geregelt, da die kinetische Energie des Fahrzeugs „verlustfrei“, d. h. ohne Aufwand des Verbrennungsmotors in elektrische Energie gewandelt werden kann. Hier ist aufgrund der begrenzten elektrischen Leistung des iStars-Systems nur ein kleiner Anteil der Energie zurückzugewinnen bzw. zu rekuperieren. Die restliche Energie wird über den Verbrennungsmotor (Schubbetrieb) beim Rollen und durch die Reibbremse (beim aktiven Bremsen) abgebaut. Dieser Modus wird auch bei kritischem Batterieladegrad gewählt, um ein schnelles Laden der Batterie und sowohl die Versorgung elektrischer Komponenten als auch die Startfähigkeit des Motors zu gewährleisten.

2) Erhaltungsladung:

Bei Einhaltung eines definierten Wertebereichs des Batterieladegrads (SoC) wird der Batteriestrom auf etwa 0 A geregelt. Elektrische Verbraucher im Bordnetz werden dann nur durch den Generator versorgt. Damit wird einerseits die Batterie geschont bzw. die Lebensdauer erhöht und andererseits der Mehrverbrauch des Verbrennungsmotors durch die mechanische Zusatzlast des Generators gering gehalten. Zum Vergleich: Eine konventionelle Ladestrategie sieht eine konstante Ladeschlussspannung von ca. 14,4 V vor, mit der zu jedem Zeitpunkt die Batterie geladen wird. Dadurch wird bei einer vollgeladenen Batterie Energie „verschenkt“, indem diese nur noch in Wärme gewandelt wird. Die Leerlaufspannung einer vollen Bleibatterie liegt bei etwa 12,7 V, so dass sich ein entsprechender Ladestrom gemäß der Differenzspannung weiterhin einstellt. Dieser sorgt für einen Mehrverbrauch durch den Verbrennungsmotor.

3) Generatorabwurf:

Im Bereich hohen Batterieladegrads oder sehr hoher Verbrennungsmotorlasten mit ausreichend hohem Ladegrad wird der Generator in den Leerlaufmodus versetzt, so dass nur die Reibungs- und Antriebsverluste des Systems überwunden werden müssen. Eine weitere mechanische Last durch die Erzeugung elektrischer Energie entfällt. So ist ein verbrauchsoptimaler Betrieb gewährleistet. Insbesondere bei hohen Verbrennungsmotorlasten (Volllastanfettung) nimmt der Kraftstoffverbrauch überproportional zu, so dass dieser Bereich gemieden werden sollte.

Schalthinweisanzeige:

Die Software für die Schaltanzeige wurde analog zur Startergeneratorsteuerung zunächst im Demonstrator-Fahrzeugmodell aufgebaut, in einem In-the-Loop-Modell validiert und final auf der Autobox im Fahrzeug getestet.

Basis der Anzeige der optimalen Fahrstufe bildet die Berechnung des auf den aktuellen Fahrzustand bezogenen Kraftstoffverbrauchs. Hierbei werden über die Eingangsdaten des Verbrennungsmotors (Drehzahl, Drehmoment) spezifische Kraftstoffverbräuche in fünf Dimensionen (einer je Fahrstufe) ermittelt und miteinander verglichen. Die Randbedingungen wie Drehzahlminimum und -maximum und die Drehmomentgrenzen werden berücksichtigt. Abhängig von eingestellten Parametern für zeitliche Varianz und die Verbrauchsdifferenz kann der entsprechende Zielgang ermittelt und über das Fahrerinformationssystem im Kombiinstrument ausgegeben werden. Dieses System setzt ein möglichst genaues spezifisches Verbrauchskennfeld des Verbrennungsmotors voraus, welches im Projektverlauf mehrfach aktualisiert und überarbeitet wurde. Das Blockschaltbild des Simulinkaufbaus ist Abb. 3-24 zu entnehmen.

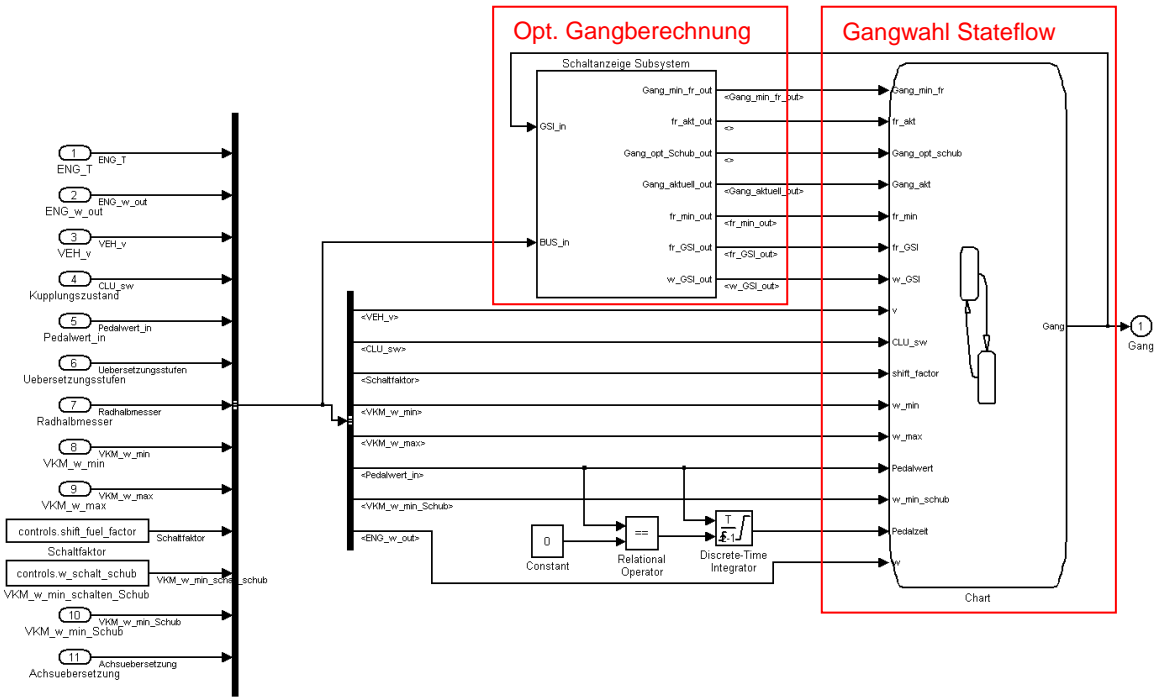


Abb. 3-24: Hauptebene des Subsystems Schaltanzeige

Der in der Abbildung mittig zu erkennende Block übernimmt sämtliche Berechnungen der Kraftstoffverbräuche aller Gangstufen simultan. Dabei werden nicht zu realisierende Gangstufen im aktuellen Betriebspunkt gefiltert. Die Werte werden an den im Bild rechts zu erkennenden Zustandsautomaten weitergegeben. Innerhalb des Zustandsautomaten werden abhängig von Parametereinstellungen dann Entscheidungen zum ausgegebenen Sollgang getroffen und der Wert für den Sollgang ausgegeben. Das Kombiinstrument im Fahrzeug erkennt abweichende Werte von Ziel- und Istgang und stellt einen Schalthinweis durch ein Pfeilsymbol dar, vgl. Abb. 3-25 oben rechts. Dabei bedeutet ein Pfeil nach oben einen Schalthinweis in den neben dem Pfeil angegebenen höheren Gang, analog ein Pfeil nach unten in den angegebenen niedrigeren Gang.



Abb. 3-25: Schalthinweisanzeige im Fahrerinformationssystem des Polo Bluemotion V

Die Anzeige des Stopp/Start-Verhaltens wird analog auch direkt im Kombiinstrument dargestellt, vgl. Abb. 3-26.



Abb. 3-26: Anzeige des aktiven Motorstopps im Fahrerinformationssystem

Die hardwareseitigen Umbauten am Fahrzeug wurden im Wesentlichen von der Meta und dem ika durchgeführt [MET14b, IKA14b]. Die fka unterstützte die Integration der Softwareumgebung in das Fahrzeug.

Nach Abschluss der Einbauten und einer Erstinbetriebnahme des Fahrzeugs wurden die Arbeiten am Fahrzeug auf dem dynamischen Rollenprüfstand des ika begonnen.

3.4 Fahrzeugapplikation und -analyse (AP 3.3)

Da sich im Projekt Verzögerungen bei der Motorentwicklung ergaben und somit der Einbau und die Applikation der Komponenten erst verspätet begonnen werden konnten, wurde nach Möglichkeiten gesucht, Teile der Inbetriebnahme unabhängig von der Verfügbarkeit des Gesamtfahrzeugs durchzuführen. Mit den Herstellern des Starter-Generatorsystems (Valeo) und des Batteriemanagementsystems (Hella) wurde das mögliche Fehlerfallverhalten des Starter-Generatorsystems diskutiert. Darüber hinaus wurde eine Detailbetrachtung unter Einbezug von Verhaltensstudien an anderen Fahrzeugen mit Stopp/Start-Systemen durchgeführt. Als Ergebnis wurde die Software in der Form weiterentwickelt und überarbeitet, dass sämtliche protokollierte Fehler erkannt werden und entsprechend reagiert werden kann. Zusätzlich wurden kritische Zustände, die durch den Fahrer oder die Umgebung ausgelöst werden können, berücksichtigt. Für das Stopp/Start-System wurden z. B. die auf dem CAN-Bus vorhandenen Fehlerspeicherzustände relevanter Steuergeräte überprüft und in die Beurteilung der Stopp/Start-Freigabe mit einbezogen. Weist der Fehlerspeicher einen Eintrag auf, wird die Stopp/Start-Funktion direkt deaktiviert bzw. der Motor gestartet. Im Subsystem des Startergenerators werden über 50 Eingangsgrößen eingelesen und ausgewertet. Damit ist der Funktionsumfang der Systemsoftware deutlich angewachsen und sehr seriennah-orientiert aufgebaut.

Die Applikation der Stopp/Start-Komponenten und der Schaltanzeige erfolgte zusammen mit der Motorapplikation im Fahrzeug auf dem dynamischen Rollenprüfstand des ika. Der Rollenprüfstand ist in Abb. 3-27 dargestellt.



Abb. 3-27: Dynamischer Rollenprüfstand am ika für die Applikationsarbeiten

Im eingerüsteten Zustand wurde das Fahrzeug mit der angetriebenen Vorderachse auf dem Rollensatz installiert, vgl. Abb. 3-28.



Abb. 3-28: Gerüstetes Demonstratorfahrzeug auf dem Rollenprüfstand am ika

Für die Applikationsarbeiten wurden verschiedene Fahrscenarien betrachtet. Das Ziel war hier primär, den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit einem akzeptablen und

komfortablen Verhalten durchfahren zu können und den Kraftstoffverbrauch zu minimieren, um die Projektziele zu erreichen.

Der Ablaufplan ist im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Motorapplikation (Meta)
 - o Leerlaufregelung
 - o Regelung bei verschiedenen Lastzuständen und Drehzahlstützstellen
 - o Verhalten bei Tip-In (stabiles Lambda)
 - o Optimierung der Schubabschaltung
- Applikation der Ganganzeige
 - o Stabilität
 - o Anzeige
 - o Erkennung von Change-Of-Mind-Situationen
 - o Lastverhalten
- Applikation der Stopp/Start-Funktion und Starter-Generatorbetrieb
 - o Lastverhalten im Generatormodus (Leerlauf und Fahrbetrieb)
 - o Zuverlässigkeit Motorstart
 - o Anzeige
 - o Erkennung von Fehlerzuständen, Wiederstart etc.

Die Applikationsarbeiten auf dem Prüfstand erfolgten gemeinsam mit allen Projektpartnern. Dabei konnten Wechselwirkungen, z. B. zwischen der Ladestrategie im Leerlauf und die Leerlaufregelung direkt besprochen und eine Lösung gefunden werden. Änderungen konnten dabei teilweise „on-the-fly“ in der Nutzeroberfläche „Control Desk“ der Firma dSpace durchgeführt werden (Abb. 3-29). Nach dem Sammeln von geänderten Parametern wurde dann ein neuer Softwarestand erzeugt, in dem alle Änderungen eingebracht wurden. Diese wurden ausführlich dokumentiert, so dass auch eine Backup-Möglichkeit gegeben blieb. Während der Applikationsarbeiten wurden weit mehr als 40 Softwarestände erzeugt.



Abb. 3-29: Applikationsarbeiten mit „Control Desk“ auf Notebooks im Fahrzeug

Die Priorität der Applikation lag zunächst auf einem optimalen Kraftstoffverbrauch. Mit Einreichen der Projektverlängerung bis zum September 2014 wurde die Themen Komfort und Fahrbarkeit bei den weiteren Applikationsarbeiten schwerpunktmäßig behandelt – mit der Maßgabe eines weiterhin optimalen Kraftstoffverbrauchs.

3.5 Umschaltung in den Aufladebetrieb (Aufstockung AP 2.1)

Im Arbeitspaket 2.1 liegt der Arbeitsschwerpunkt auf der Identifizierung von Maßnahmen für einen komfortbetonten Übergang vom Saugbetrieb des Motors in den Aufladebetrieb, vgl. Abb. 3-30. Hier ist die maximale Drehmomentkurve im Saugbetrieb dick-gestrichelt eingezeichnet, die durchgezogene Kurve entspricht dem maximalen Drehmoment im Aufladebetrieb. Das Überblenden zwischen den Betriebsarten wird dynamisch kennfeldhinterlegt gesteuert.

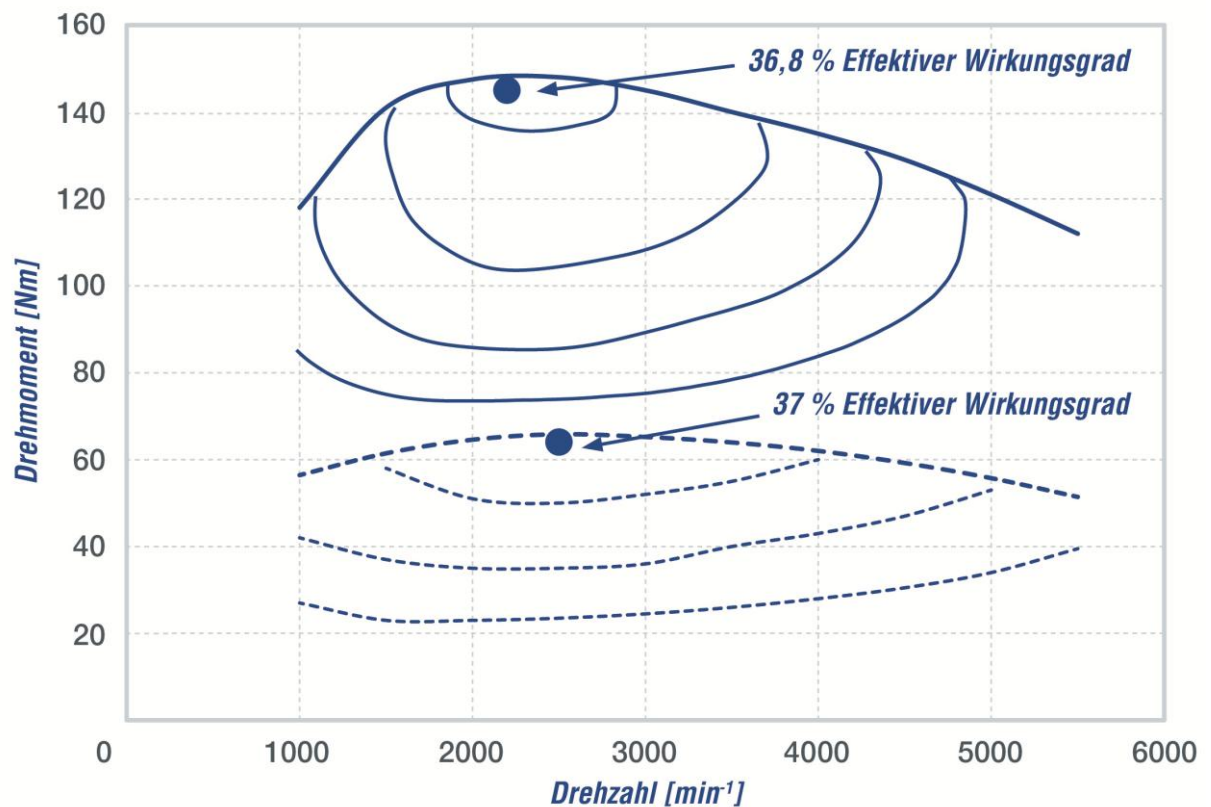


Abb. 3-30: Motorkennfeld mit Saug- (durchgezogen) und Aufladebetrieb (gestrichelt) [MTZ13]

Für den Betriebspunkt bei einer Motordrehzahl von 1250 1/min ist in der folgenden Abb. 3-31 der zeitliche Aufbau des effektiven Mitteldrucks bei einem Tipp-in-Versuch (Volllastanforderung) in blau dargestellt. Hier ist ein Einbruch nach einer Zeit von ca. 0,2 s erkennbar. Diese „Treppenstufe“ ergibt sich durch das Zuschalten des Kompressors über die Magnetkupplung. Nach dem Zuschalten erhöht sich die Bedarfsleistung des Verbrennungsmotors um den Wert, den der Kompressor als Antriebsleistung benötigt. Dieser Anteil steht nicht mehr für den Abtrieb zur Verfügung. Die weiteren eingezeichneten Verläufe beschreiben Mitbewerber-Motoren mit Turbo- (hellgraue Linien) und Turbo-Kompressor-Aufladung (dunkelgraue Linie).

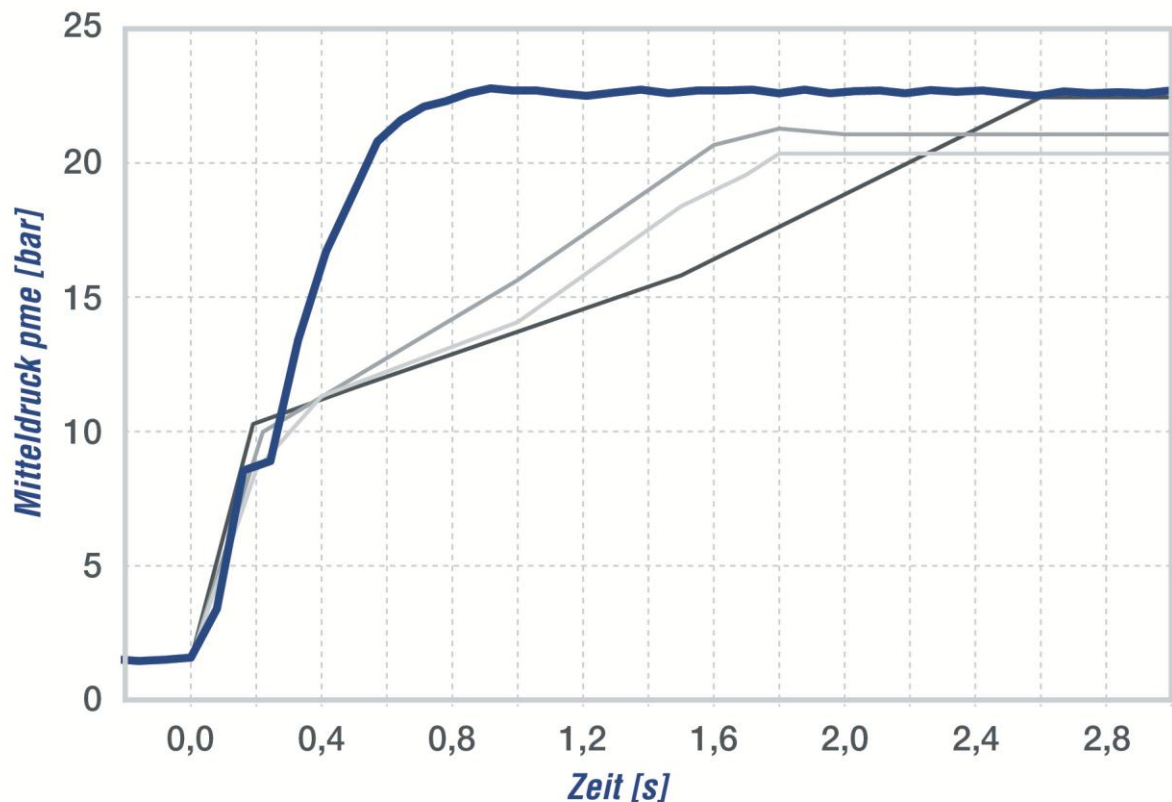


Abb. 3-31: Aufbau des eff. Mitteldrucks über der Zeit bei Kompressorzuschaltung [MTZ13]

Der Einbruch bei der Kurvensteigung hat eine starke Schwingungsanregung des Antriebsstrangs zur Folge. Diese kann nur zum Teil über das CRE-System abgefangen werden und bedarf daher weiterer Applikation zur Steigerung des Fahrkomforts mit der Prämisse einer möglichst gleichbleibenden Performance. Die identifizierten Möglichkeiten dazu sollen im folgenden Absatz näher beschrieben werden.

3.5.1 Überprüfung von Methoden zum gleichmäßigen Drehmomentaufbau

In Gesprächen mit der Firma Valeo wurde nach Austausch von Bedarfsdaten festgestellt, dass dem Startergenerator eine dauerhafte Belastung in dieser Form schadet und die Lebensdauer enorm verkürzen würde bzw. auch kein stabiler Betrieb gewährleistet wäre. Aktuell wird dieses Thema in Verbindung mit leistungsfähigeren 48-V-Motoren untersucht und soll mit diesen in Form des „Boosting“ ermöglicht werden [CON14].

Der Einsatz eines elektrischen Antriebs für den Lader bzw. eines elektrischen Ladens ermöglicht einen bedarfsgerechten Betrieb des Aggregates. Hier könnte die Drehzahl auf ein Maß für die erforderliche Luftmenge eingestellt werden, so dass ein Bypass und die damit entstehenden Verluste vermieden werden könnten, vgl. Abb. 3-32. Die eingegrauten Bereiche könnten im Falle eines elektrischen Ladens oder elektrisch angetriebenen mechanischen Ladens eingespart werden.

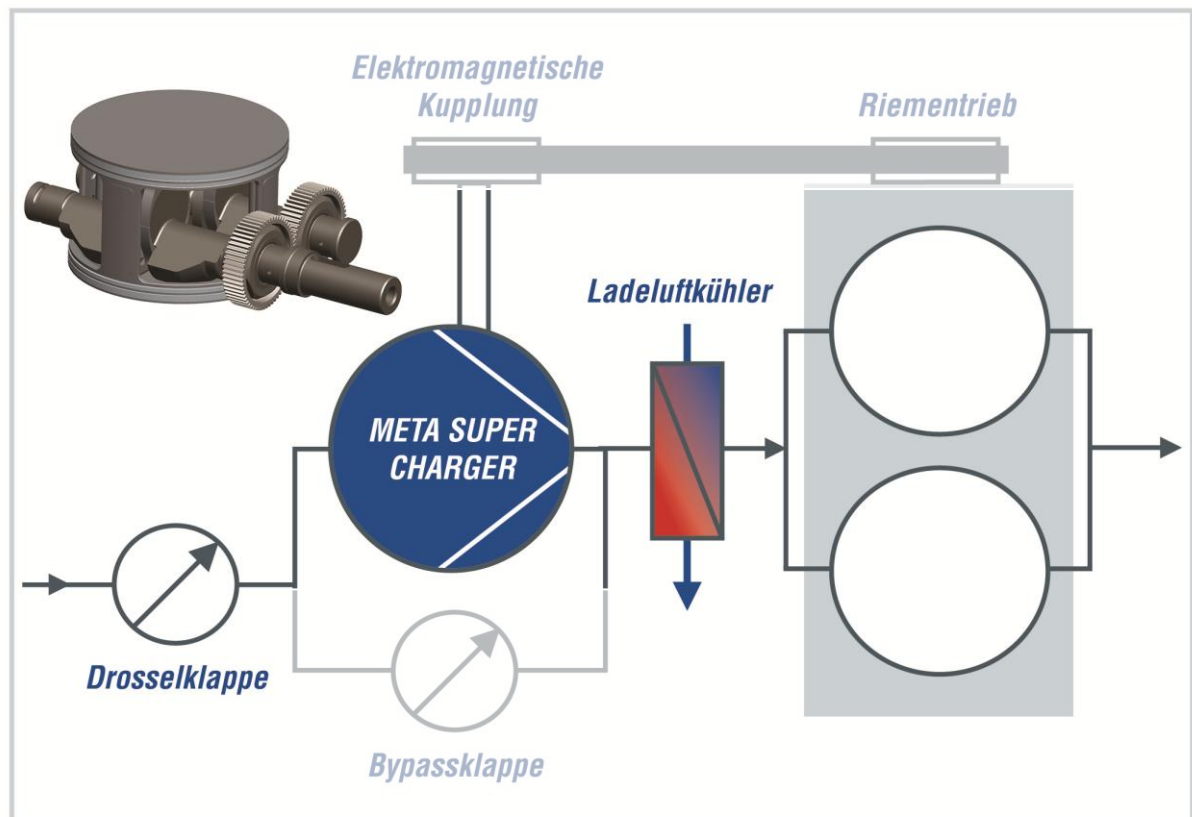


Abb. 3-32: Integration Meta-Lader im Luftkanal

Diese Option für die Einsparungen des Kraftstoffverbrauchs und Optimierung des Drehmomentaufbaus ist im aktuellen Projektrahmen jedoch nicht realisierbar, sollte aber in einer weiteren Entwicklungsstufe des Demonstrators untersucht werden.

3.6 Erweiterte Applikation der Stopp/Start-Funktion (Aufstockung AP 2.2)

Mit Aufstockung des Forschungsprojekts wurden weitere Themenschwerpunkte untersucht und Maßnahmen zur Verbesserung des Komforts im Fahrzeug aufgezeigt und umgesetzt. Diese werden nachfolgend beschrieben.

3.6.1 Überprüfung der Möglichkeiten hinsichtlich Optimierung von Komfort und Verbrauch

Die Optimierung von Kraftstoffverbrauch und Fahrkomfort durch Verwendung eines Startergenerators stehen, ebenso wie der optimierte Drehmomentaufbau im vorhergehenden Kapitel, in einem direkten Konflikt. Einerseits sind Ausweitungen der Nutzungshäufigkeit des Stopp/Start-Systems durchführbar, andererseits ist auch der Betrieb des Generators zum Laden der Batterie bzw. zur Bordnetzversorgung ein Einflussfaktor auf den Verbrauch und den Fahrkomfort.

Stopp/Start-System

Der Betrieb des Startergenerators als Anlasser des Motors für eine Stopp/Start-Funktion erfordert es, eine Vielzahl von Parametern auszuwerten, damit ein sicherer Motorstart jederzeit gewährleistet ist. Grundsätzlich sinkt der Kraftstoffverbrauch mit der Erhöhung der Motorstillstandszeit. Auf der anderen Seite ist jedoch ein ständig abgeschalteter Motor aus Sicht des Fahrkomforts nicht wünschenswert. Die Kombination mit dem hier verwendeten Schaltgetriebe ermöglicht allerdings ein für den Fahrer plausibles Systemverhalten. Er kann (bzw. muss) selber entscheiden, wann der Motor abgestellt werden soll. Eine Abschaltung findet, analog zu Seriensystemen im Markt, nur dann statt, wenn das Getriebe in Neutralstellung steht, das Fahrzeug stillsteht und die Kupplung geschlossen ist (Kupplungspedal nicht getreten). Hier gäbe es grundsätzlich weitere Möglichkeiten, die Motorstillstandszeiten zu erhöhen, ohne den Fahrkomfort weiter einschränken zu müssen.

Die Geschwindigkeitstoleranz für die Abschaltung könnte grundsätzlich angehoben werden, so dass der Motor beispielsweise bei Geschwindigkeiten unterhalb von 6 km/h und nicht getretenem Gaspedal bereits abgeschaltet wird. Hier ergibt sich jedoch das Problem, dass Nebenaggregate im Riementrieb zur Versorgung von sicherheitsrelevanten Komponenten, wie der Bremse oder der Lenkung, nicht mehr angetrieben werden. Die Lenkung ist in diesem Fahrzeug elektromechanisch ausgeführt und könnte über die Batterie gepuffert werden, die Unterdruckpumpe für die Aufrechterhaltung des Bremsdrucks müsste jedoch auch elektrifiziert werden, da das Fahrzeug in jedem Fall sicher zum Stillstand gebracht werden muss. Dennoch sollen hier Untersuchungen durchgeführt werden, inwieweit der bei Abschaltung vorhandene Bremsdruck ausreicht, um das Fahrzeug abzubremsen. Ein Spezialfall stellt hier auch eine Gefällefahrt dar, bei der ein erhöhter Bremsbedarf notwendig ist. Im Problemfall kann bei zu niedrigem Bremsdruck der Motor vorzeitig wieder gestartet werden. Erforderlich ist in jedem Fall, dass der Fahrer durch die Getriebeneutralstellung das Abschalten und Starten des Motors überhaupt ermöglicht.

Als weitere Option wurde ein zeitliches Vorziehen der Motorabschaltung in der Simulation betrachtet. Hier wären Einsparungen von ca. 1,0 – 1,2 % zu erwarten, wenn der Motor bereits nach dem ersten Fahrabschnitt im NEFZ wieder abgeschaltet werden könnte. Im Widerspruch dazu steht jedoch die Kaltstartphase des Motors. In der Regel wird bei konventionellen Verbrennungsmotoren die Stopp/Start-Automatik erst dann freigegeben, wenn der Katalysator eine Betriebstemperatur von ca. 500 °C erreicht, damit eine hohe Konvertierungsrate der Schadstoffe im Abgas erreicht werden kann. Dies ist erforderlich, da in der Kaltstartphase nahezu 80 – 90 % der emittierten Schadstoffe entstehen. Auch wenn die Kraftstoffersparnis als Projektziele an erster Stelle steht, soll jedoch auch die Abgasqualität auf dem Niveau des Basisfahrzeugs gehalten werden. Dazu sind aber weitere spezielle Messungen notwendig, die nicht innerhalb des Projekts realisiert werden konnten. Der Verkürzung dieser Kaltstartphase kommt die sehr motornahe Integration des Katalysators zugute. Darüber hinaus sorgt auch das Downsizingkonzept mit verkleinertem Motorvolumen und weniger Materialien für ein schnelleres Aufheizen der Abgase. Der Zeitpunkt für die Freigabe wurde bei Versuchen auf dem Rollenprüfstand bzw. aus

Messergebnissen vom Motorprüfstand bestimmt. Treibender Parameter ist die Kühlwassertemperatur, über die ein Rückschluss auf den Aufheizzustand gezogen werden kann.

Energiemanagement im Generatorbetrieb

Das Lademanagement des Verbunds Startergenerator, Batteriemanagement, Batterie und Bordnetz erfordert die Überwachung vieler Parameter. Es nimmt wesentlichen Einfluss auf das Stopp/Start-System, da dieses nur bei einer ausreichend geladenen Batterie aktiviert werden kann. Neben den Überwachungen der im Fahrzustand auftretenden Parameter ist auch die Überwachung von Fehlerzuständen der Komponenten sehr wichtig, um ggf. einen Notlaufbetrieb einleiten und dem Fahrer eine Rückmeldung geben zu können. Die grundlegende Strategie basiert auf einer Ladeerhaltung, die adaptiv an die aktuelle Bordnetzlast geregelt wird. Der Generator stellt demnach genau die Leistung zur Verfügung, die von den elektrischen Verbrauchern angefordert wird. Im Falle der Fahrzeugverzögerung, bei der sich der Motor in der Schubphase befindet, wird die höchstmögliche Energie über die Kurbelwelle durch den Generator in die Batterie zurückgespeist. Hierbei begrenzend sind der Ladezustand und die Temperatur der Batterie. Dieser Zustand erfordert entsprechend stabile Komponenten im Bordnetz, die aufgrund des serienmäßig verbauten intelligenten Generators bereits vorhanden sind. Insbesondere die Fahrzeugbeleuchtung wird spannungsstabilisiert ausgeführt, damit keine Helligkeitssprünge durch abwechselnde Schubphasen und Abwurfphasen des Generators hervorgerufen werden. Diese führen oftmals zu Missverständnissen im Straßenverkehr, da diese als „Lichthupe“ gedeutet werden könnten.

Der Übergang von Schubphase mit höchster Energieerzeugung zum Abwurf des Startergenerators stellt gleichzeitig eine große Herausforderung an den Verbrennungsmotor dar. In diesem Moment muss der Verbrennungsmotor das zur Verfügung gestellte Drehmoment gemäß der Mehr- oder Minderlast durch den Startergenerator anpassen. Je nach Fahrsituation bzw. angefragtem Drehmoment kann dies zu einem unruhigen Motorlauf führen. Dies ist über die Motorsteuerung abzufangen. Ein Spezialfall ist hierbei der Leerlauf. Hier ist der erzeugbare Strom des Startergenerators begrenzt, da die Leistungsfähigkeit mit der Drehzahl steigt. Bei sehr vielen elektrischen Verbrauchern regelt der Generator einen hohen Ausgangsstrom ein, der für ein entsprechend hohes aufgenommenes Drehmoment über den Riementrieb sorgt. In diesem Moment ist es erforderlich, dass der Leerlaufregler das Motordrehmoment nachregelt, damit der Motor nicht stottert oder gar „abstirbt“. Diese Applikationsarbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit der Meta am Rollenprüfstand durchgeführt. Eine Abschätzung aus der Simulation heraus ist hier im Voraus aufgrund der Komplexität nicht möglich.

3.7 NVH-Optimierung (Aufstockung AP 3)

Für die Reduzierung der Antriebstrangschwingungen, die sich letztendlich in komfortmindernden Fahrzeuglängsschwingungen äußern, werden mit einem vom ika aufgebauten Ge-

samtfahrzeugmodell im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse unterschiedliche Varianten für den Drehmomentaufbau während eines Tipp-in-Manövers ausgearbeitet und simuliert. Im Anschluss an die Simulationen werden die einzelnen Varianten sowohl hinsichtlich des Fahrkomforts als auch hinsichtlich der Performance bewertet.

Verschiedene Maßnahmen zur NVH-Optimierung werden gemeinsam mit dem ika entwickelt und im Fahrzeug umgesetzt. Zur finalen Bewertung der Wirksamkeit der Maßnahmen wird der Fahr- und Schwingungskomfort in einer abschließenden Messreihe auf einem Akustik-Rollenprüfstand ermittelt. Da die Arbeiten an dieser Stelle in enger Zusammenarbeit mit dem ika durchgeführt werden, sind die Ergebnisse der Simulationen und der Messreihe zur Ermittlung des Akustik- und Schwingungskomforts im Abschlussbericht des ika zu finden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projekts „Neues Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der CO₂-Emissionen auf 69 g/km“ wurde ein Fahrzeugkonzept entwickelt, durch das die CO₂-Emissionen eines energieeffizienten Kleinfahrzeugs vom Typ Volkswagen Polo Bluemotion 87 g um ca. 20 % verringert werden konnten. Grundlage für die Erreichung dieses Ziels ist der Austausch des Dieselmotors gegen einen Erdgasmotor, der nach dem Ansatz des Downsizings ausgelegt ist. Der Hubraum und die Zylinderzahl wurden reduziert, der Aufladegrad des Motors mit einem Hubkolbenlader gesteigert. Dabei ist die Leistung des Motors vergleichbar mit der des Basismotors. Die Integration eines Startergenerators im Riementrieb ermöglicht eine bedarfsgeregelte Ladung der Batterie in Verbindung mit einer verbesserten Stopp/Start-Funktion. Die Integration der Erdgastankanlage und eines Wärmespeichers im Fahrzeug wurde so durchgeführt, dass das Zuladevolumen nicht eingeschränkt ist.

Das Fahrzeugkonzept wurde anhand eines von der fka aufgebauten Simulationsmodells, das mithilfe umfangreicher Messungen am Basisfahrzeug erstellt wurde, im Detail ausgearbeitet. Das Verhalten des Demonstrators konnte hinsichtlich Verbrauch und Leistung vorab beurteilt und Eigenschaften der einzelnen Maßnahmen bewertet werden.

Mithilfe des aufgebauten Fahrzeugmodells wurde eine Software entwickelt, die die Steuerungsfunktionen des Startergenerators übernimmt und die Schalthinweisanzeige im Fahrzeug ansteuert. Durch Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern konnte hier ein energieeffizienter und gleichzeitig komfortabler Betrieb realisiert werden.

Im Zuge der Projektaufstockung im Jahr 2014 konnte der NVH-Komfort unter Einhaltung der bereits erreichten Emissionsziele noch weiter verbessert werden. Hierzu haben insbesondere eine detaillierte Applikation der Antriebskomponenten einerseits und weitere NVH-Maßnahmen andererseits beigetragen. Die Ergebnisse der Rückmessungen zeigen, dass das aufgebaute Demonstratorfahrzeug aufgrund der umgesetzten Maßnahmen einen Schwingungs- und Akustik-Komfort auf dem Niveau des Ausgangsfahrzeugs bietet.

Mittels Hybridisierung des Antriebskonzepts könnte noch weiteres Potenzial für die Emissionsminderung gehoben werden. Insbesondere verspricht die 48-V-Technologie hier vielseitige Möglichkeiten, so dass hiermit ein Anknüpfungspunkt an das erfolgreiche Projekt in Zukunft gegeben ist.

5 Quellenverzeichnis

- [CON14] N.N.
<http://www.continental.de>
Continental Pressemitteilung zu 48 V Komponenten, Stand 2014
- [DSP14] N.N.
<http://www.dspace.com>
dSpace Produktkatalog, Stand 2014
- [DMM13] N.N.
Fotos der Stopp/Start-Anzeige und Schaltanzeige im Polo 6R Blue Motion
<http://dmm.travel>
- [ECK11] ECKSTEIN, L.
Vorlesungsumdruck „Fahrzeugtechnik I – Längsdynamik“
Aachen, Auflage 2011
- [ELM14] ELM, J. H.; VIEHÖFER, J.; BIERMANN, J.W.
„Investigation of NVH Characteristics of a Downsizing Vehicle“
SAE Int. J. Engines 7(3), 2014
- [EUR11] N.N.
Verordnung (EG) Nr. 715/2007 Des europäischen Parlaments und des Rates
EU, Juni 2007
- [FKA13b] RENNER, C.
Halbjahresbericht des Instituts für Kraftfahrzeuge im Projekt „Neues
Downsizing Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der
CO₂-Emission auf 69 g/km“
Aachen, Dezember 2013
- [IKA13b] BÜTTERLING, P.
Halbjahresbericht des Instituts für Kraftfahrzeuge im Projekt „Neues
Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der
CO₂-Emission auf 69 g/km“
Aachen, Dezember 2013
- [IKA14b] BÜTTERLING, P.
Abschlussbericht des Instituts für Kraftfahrzeuge im Projekt „Neues
Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der
CO₂-Emission auf 69 g/km“
Aachen, November 2014
- [MET13b] BEY, R.
Halbjahresbericht der Meta Motoren- und Energietechnik im Projekt „Neues

- Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der CO₂-Emission auf 69 g/km“
Herzogenrath, Dezember 2013
- [MET14b] METZGER, O.
Abschlussbericht der Meta Motoren- und Energietechnik im Projekt „Neues Downsizing-Antriebskonzept im optimierten Fahrzeug zur Reduzierung der CO₂-Emission auf 69 g/km“
Herzogenrath, November 2014
- [MTZ13] BEY, R.; OHREM, C.; BIERMANN, J.W.; BÜTTERLING, P.
„Downsizing-Konzept mit Zweizylinder-Erdgasmotor“,
MTZ 09/2013, Springer Verlag
Wiesbaden, September 2013
- [VAL12] N.N.
<http://www.valeo.fr>
Valeo's second-gen stop-start technology coming to 1M diesel Peugeots, Citroëns by 2013, Stand 2012
- [VEC12] N.N.
<http://www.vector.com>
Vector Informatik, Erklärung der Bussysteme im PKW, Stand 2012