

Abschlussbericht zum Vorhaben

## **Batteriefahrzeug mit Range Extender**

im Rahmen des FuE-Programms  
**"Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität"**

Stuttgart, Oktober 2011

Kurztitel: REX

Projektpartner: Daimler AG, Stuttgart

Projektlaufzeit: 01.09.2009 – 30.06.2011

Gefördert durch das:



## Abschlußbericht Förderprojekt: „Batteriefahrzeug mit Range Extender“



Batteriefahrzeug mit Range Extender

Dr. C. Nizzola, C. Moog

Daimler

01.09.2009 - 30.06.2011

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung des Verbundes .....</b>	<b>5</b>
1.1	Gesamtziel des Vorhabens .....	5
1.2	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen .....	8
1.3	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens.....	9
<b>2</b>	<b>Ergebnisse des Verbundprojektes .....</b>	<b>12</b>
2.1	Demonstrator 1 (Heckeinbau) .....	12
2.1.1	Entwicklung und Konstruktion Demonstrator 1.....	12
2.1.1.1	Entwicklung gesamte REX-Einheit für den Heckeinbau .....	12
2.1.1.2	Fahrzeugentwicklung zur Integration der REX-Einheit im Versuchsträger .....	14
2.1.2	Konzeption und Aufbau des ersten Versuchsträgers Demonstrator 1 .....	16
2.1.2.1	Auswahl und Entwicklung der Komponenten für REX-Einheiten.....	16
2.1.2.2	Realisierung REX-Einheiten und Funktionstest.....	18
2.1.2.3	Entwicklung Fahrzeugarchitektur zur Aufnahme der REX Einheit.....	20
2.1.2.4	Integration REX-Einheit im Versuchsträger.....	21
2.1.2.5	Softwareentwicklung für Motorapplikation der REX-Einheit .....	24
2.1.2.6	Softwareentwicklung für Applikation Getriebe und Kupplung der REX-Einheit.....	25
2.1.2.7	Inbetriebnahme der REX-Einheit am Motor-Prüfstand .....	26
2.1.2.8	Funktionstest des Versuchsträgers am Rollenprüfstand .....	27
2.2	Konzeption REX mit Direkttrieb im ATG 1 .....	28
2.2.1	Entwicklung der einzelnen Komponenten .....	28
2.2.1.1	Entwicklung Verbrennungsmotor für REX-Einheit .....	28
2.2.1.2	Entwicklung Emissionsstrategie (Kaltstart) am Motorprüfstand.....	29
2.2.1.3	Entwicklung Generator und E-Motor für REX-Einheit im Fronteinbau .....	31
2.2.1.4	Funktionstest E-Motoren und Leistungselektronik am Prüfstand .....	32
2.2.1.5	Entwicklung Leistungselektronik für höhere Spannungen.....	33
2.2.1.6	Entwicklung Simulationsmodelle zur Gesamtoptimierung der REX- Einheit .....	34
2.2.2	Entwicklung und Erprobung der Betriebsstrategie im ATG 1 .....	35
2.2.2.1	Entwicklung Simulationsumgebung zur Basisentwicklung Betriebsstrategie im Labor .....	36
2.2.2.2	Entwicklung Simulationsumgebung zur Optimierung BS am REX- Prüfstand .....	37
2.2.2.3	Entwicklung und Optimierung der BS am REX-Prüfstand.....	38
2.2.2.4	Ableich Simulation/ Messung zur Grundlagenentwicklung von Tools und Methoden .....	39
2.2.2.5	Implementierung der Betriebsstrategie in den Versuchsträgern .....	41

2.2.3	Konzeption und Entwicklung der REX-Einheit mit Direkttrieb im Fronteinbau .....	42
2.2.3.1	Konzeption und Entwicklung des Gesamtsystems (E-Antrieb, REX-Einheit) .....	42
2.2.3.2	Entwicklung eines kompakten 2/3-Gang-Getriebes für Direkttrieb .....	43
2.2.3.3	Entwicklung Fahrzeugumfänge zur Aufnahme der REX-Einheit .....	45
2.3	Aufbau Demonstrator 2 mit Fronteinbau .....	46
2.3.1	Entwicklung und Konzeption der Fahrzeugplattform .....	46
2.3.1.1	Entwicklung gesamte REX-Einheit für Fronteinbau .....	46
2.3.2.1	Fahrzeugentwicklung zur Integration der REX-Einheit im Versuchsträger Entwicklung gesamte REX-Einheit für Fronteinbau .....	47
2.3.2	Konzeption und Aufbau des zweiten Versuchsträgers .....	48
2.3.2.1	Auswahl und Entwicklung der Komponenten für REX-Einheiten .....	48
2.3.2.2	Entwicklung Fahrzeugarchitektur zur Aufnahme REX-Einheit .....	50
2.3.2.3	Integration der REX-Einheit im Versuchsträger .....	51
2.3.2.4	Softwareentwicklung für Motorapplikation der REX-Einheit .....	53
2.3.2.5	Softwareentwicklung und Applikation Getriebe und Kupplung der REX-Einheit .....	54
2.3.2.6	Inbetriebnahme des Versuchsträgers .....	55
2.3.2.7	Funktionstest des Versuchsträgers am Rollenprüfstand .....	56
2.4	Nachweis Potential/ Funktionalität .....	57
2.4.1	Nachweis Leistungspotenzial und Funktionalität für alltagstauglichen Einsatz .....	57
2.4.1.1	Beschreibung und Umsetzung auf Rollenprüfstand typischer Nutzerprofile .....	57
2.4.1.2	Ersatzteile - Reparaturen .....	58
2.4.1.3	Versuchsmessungen auf Einfahrbahn zum Nachweis des Leistungspotentials .....	59
2.4.2	Evaluierung des Alltagsbetriebs im Rahmen eines Fahrzeugtests .....	60
2.4.2.1	Beschreibung typischer Fahrprofile im Alltagsbetrieb .....	61
2.4.2.2	Beschreibung Testumfang zur Darstellung der Alltagstauglichkeit .....	63
2.4.2.3	Alltagsnahe Versuchsmessung .....	64
2.4.2.4	Vergleich seriell/ direkt .....	65
2.5	Entwicklung und Darstellung des Lastenheftes für den REX mit Direkttrieb .....	67
2.5.1	Beschreibung REX-Konzept je nach Nutzungsverhalten .....	67
2.5.1.1	Erstellung Lastenheft für REX mit Direkttrieb für zukünftige universell einsetzbare Fahrzeugkonzept-Vergleiche .....	67
2.5.1.2	CO2-Bilanz bei Fahrzeugnutzung .....	69
2.5.1.3	Berechnung und Simulation .....	71
<b>3</b>	<b>Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse für KMU .....</b>	<b>74</b>

**4 Abbildungsverzeichnis .....75**

# 1 Einleitung und Problemstellung des Verbundes

## 1.1 Gesamtziel des Vorhabens

In einer globalisierten Welt spielt der Verkehrssektor und dabei im speziellen der Straßenverkehr eine herausragende Rolle zur Sicherstellung individueller Mobilität. Daraus resultieren steigender Kraftstoff sowie ansteigende Emissionen und CO<sub>2</sub>-Belastung. Um die Umwelt nicht stärker zu belasten, müssen die Emissionen weiter reduziert werden. Es wird nötig, dass PKW Hersteller ihre Innovationspotenziale ausschöpfen und in der Evolution der Antriebsmöglichkeiten die nächste Stufe nehmen.

Zur Erreichung dieser Ziele hat Daimler im Rahmen seiner Aktivitäten zur Sicherstellung einer Nachhaltigen Mobilität seine Strukturen neu geordnet. Durch die Einbindung der E-Drive Fachbereiche sorgt Daimler für eine wirkungsvolle strategische und operative Steuerung der Nachhaltigkeitsaktivitäten vom Vorstand bis zur Arbeitsebene.

Die Palette der Daimler Fahrzeuge zeigt heute schon, dass Ökonomie und Ökologie keine Gegensätze sein müssen. Wichtigster Trend ist dabei die Hybridisierung der Fahrzeuge und somit die schnelle Realisierung von emissionsfreien bzw. emissionsarmen Fahrzeugen.

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) bieten hier ein interessantes Potenzial. In der Vergangenheit haben sich diese Fahrzeuge allerdings in der Praxis nicht durchsetzen können. Aufgrund veränderter Rahmenbedingungen, wie erhöhter Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Reduktion, steigende Ölpreise und Fortschritte bei der Batterietechnologie (Reichweite und Lebensdauer) sind heute aber notwendige Grundvoraussetzungen dafür gegeben, dass sich ein signifikanter Markt für batterieelektrische Fahrzeuge entwickeln kann.

Heutige Fahrzeuge, ausgerüstet mit effizienten Verbrennungsmotoren, erreichen Reichweiten von bis zu 1000 Kilometern. Obwohl dieses Potential nur von den wenigsten Fahrern genutzt wird, vermittelt es doch ein Gefühl der Sicherheit, verlängert es doch die nötigen Tankintervalle beträchtlich. Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb sind in der öffentlichen Wahrnehmung vor allem in Verbindung mit einer Batterie als Energiespeicher bekannt. Daimler arbeitet intensiv an der Verbesserung der spezifischen Energiedichte von Lithium-Ionen Batterien, trotzdem erreichen batterieelektrische Fahrzeuge nur deutlich reduzierte Reichweiten. Unter Einsatz aktuell verfügbarer Batterie-Technologie würde ein Fahrzeug des C-Segmentes ca. 250 km Reichweite realisieren.

Aufgrund dieser Problematik, stellen BEVs keinen vollwertigen Ersatz für das Erstfahrzeug eines durchschnittlichen Haushaltes, bzw. von kommerziell genutzten Fahrzeugen im Verteilerverkehr dar. Erst kleinere, leichtere Batterien

mit deutlich erhöhter Energie- und Leistungsdichte sowie kürzeren Ladezyklen, werden batterieelektrische Fahrzeuge sowohl von der Reichweite als auch den Fahrleistungen her in den Nutzungsbereich aktueller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bringen.

Auswertungen von Pendlerfahrten in Deutschland haben ergeben, dass der durchschnittliche Pendler pro Tag weniger als 20 km einfache Strecke zu seinem Arbeitsplatz zurücklegt. Mit der Fahrt von oder zum Arbeitsplatz werden oft Aktivitäten wie das Abholen der Kinder von der Schule oder der Besuch des Fitness-Centers verbunden. Berücksichtigt man diese zusätzlichen Wege, summieren sich die durchschnittlichen Fahrstrecken auf 44 km pro Tag (Quelle: BMVBS). Das Range Extender (REX) Konzept erlaubt 100 km elektrische Fahrstrecke und deckt damit die täglichen Anforderungen der Nutzer ab. Unter der Voraussetzung einer flächendeckenden Lade-Infrastruktur erhöht sich das Nutzungsspektrum des Range Extenders im elektrischen Betriebszustand weiter.

Batterieelektrische Fahrzeuge haben in ersten Demonstrationstests bewiesen, dass sie dauerhaft eingesetzt werden können und dabei lokal vollständig emissionsfrei fahren (Zero Emission Vehicle: ZEV). Allerdings sind bis zur vollen Einsatzreife moderner Batterie-Elektrofahrzeuge noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sowie Erprobungen notwendig. Hierzu gehört die Weiterentwicklung u.a. der Batterietechnologie und des E-Antriebes ebenso wie die Erforschung von Kundenanforderungen und Nutzungsverhalten. Auch aufgrund der nicht flächendeckend verfügbaren Lade-Infrastruktur sind BEVs prädestiniert für den Einsatz als Stadt- und Pendler-Fahrzeug, also im Bereich der Nutzung als klassischer Zweitwagen.

Das technische Konzept des Range Extender Fahrzeugs kombiniert den Vorteil des lokal emissionsfreien Fahrens (E-Antrieb) mit dem Komfort einer großen Reichweite. Realisiert wird dies durch die Hybridisierung des E-Fahrzeugs durch einen Verbrennungsmotor (VM). Der Motor treibt einen Generator an, der wiederum durch den erzeugten elektrischen Strom den Elektroantrieb des Fahrzeugs auch dann sicherstellt, wenn die Batteriekapazität zur Neige geht und keine Möglichkeit zum Laden per Kabel besteht. Somit lässt sich das Nutzungsspektrum eines solchen Fahrzeugs auf das eines vollwertigen „Allzweck“-Fahrzeugs (z.B. C-Segment) bzw. ein Fahrzeug für den Verteilerverkehr in der Stadt (z.B. Mercedes Benz Vito) erweitern. Die C-Segment PKW der „Generation Golf“ machen heute ca. 42% des gesamten PKW-Bestandes in Deutschland aus (Quelle: KBA 2007 Kompakt- und Mittelklassefahrzeuge). Die Positionierung des Range-Extender-Konzepts ist in Abbildung 1 dargestellt.

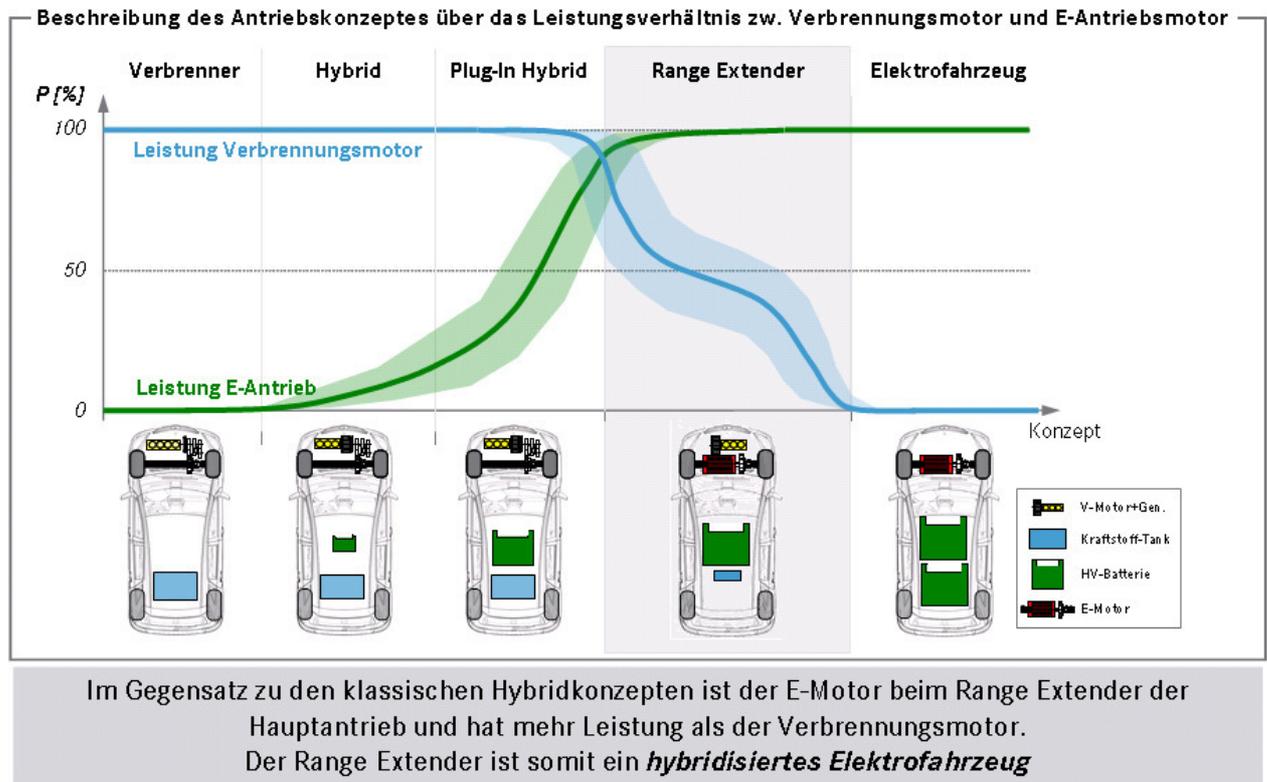


Abbildung 1: Antriebskonzeptes über dem Leistungsverhältnis zwischen Verbrennungsmotor und Elektroantrieb

Somit ergeben sich die Gesamtziele des Vorhabens:

- Umsetzung eines Fahrzeugkonzeptes zur Reduktion der innerstädtischen Emissionen wie CO<sub>2</sub>, sowie von Schadstoffen und Lärmemissionen auf nahezu null
- Realisierung in einem Fahrzeug des C-Segmentes (B-Klasse, 5-Sitzer), bei Übertragbarkeit des Antriebskonzeptes auf andere Fahrzeugklassen, z.B. Verteilerfahrzeuge
- Damit verbunden eine Reduktion des Flottenverbrauchs bzw. der Flottenemissionen in Kombination mit der Nutzung elektrischer Energie
- Realisierung einer Reichweite von mindesten 80 km im reinen E-Betrieb, der Verbrennungsmotor des Range Extenders ermöglicht einen REX-Betrieb von bis zu 600 km Reichweite

- Modularer Aufbau ermöglicht zwei „REX-Betriebsarten“:  
Im seriellen Betrieb treibt der Verbrennungsmotor den Generator an und lädt so die Batterie, ein direkter Durchtrieb auf die Antriebsräder ermöglicht den Einsatz nach klassischem, bekanntem Antriebs-Muster
- Der Einsatz alternativer Kraftstoffe in einem Ottomotor ist ebenso möglich wie die Nutzung eines Diesel-Antriebes

Das heißt, das Ziel ist die Darstellung eines „vollwertigen“ Fahrzeuges des C-Segmentes mit maximalem Zero-Emissions-Betrieb (ZEV) im Kundeneinsatz. Somit ist eine ausreichend große Nutzergruppe adressiert, die eine weite Verbreitung in der Fläche erst ermöglicht. Die universelle Einsetzbarkeit stellt den Einsatz in Kundenhand in Verbindung mit maximalem Nutzen für die Umwelt sicher.

Für die Umsetzung der Ziele ist der Aufbau von Versuchsträgern und einer kleinen Flotte geplant. Erprobungsziele sind hierbei die Darstellung und Erprobung von Funktionalitäten und Nutzungsspektren im kundennahen Einsatz. Damit sollen die Antriebskomponenten für die Kundenanforderungen und den maximalen ZEV-Betrieb beschrieben und für das ideale Serienkonzept festgelegt werden. Die variable Ausprägung der Fahrzeuge hinsichtlich der Leistungsstufen ermöglicht die Entwicklung verschiedener Betriebsstrategien.

Ziel ist es, elektrische Mobilität in der Breite verfügbar zu machen und hierfür ein Fahrzeugkonzept im C-Segment mit maximalem ZEV-Betrieb und großer Gesamt-Reichweite im Kundeneinsatz darstellen.

## **1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Durch einen Ausbau der Elektromobilität sollen eine Reduktion der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Importabhängigkeit vom Erdöl erreicht werden. Die Bundesregierung wird ihre Anstrengungen im Bereich Elektromobilität bündeln und erhöhen, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu stärken. Sie hat dazu die ressortübergreifende Koordinierungsplattform Elektromobilität mit der Ausarbeitung einer Strategie zur Förderung der Elektromobilität beauftragt. Im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität soll gemeinsam mit Wissenschaft, Industrie und Politik eine konzertierte Forschungs- und Entwicklungsstrategie entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von den Grundlagen über die Materialien, Komponenten, Zellen, Batterien bis hin zum Gesamtsystem und seiner Anwendung - initiiert und bis hin zur Erprobungs- und Einsatzreife vorangebracht werden. Letztlich soll damit Deutschland zu einem Leitmarkt für Elektromobilität entwickelt werden.

Die Daimler AG unterstützt dieses Vorhaben unter anderem mit dem Projekt Range Extender (REX). Im Rahmen der Aktivitäten zur Sicherstellung nachhaltiger Mobilität stellt dieses Projekt individuelle Mobilität sicher. Dabei wird die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduziert, ohne dabei Abstriche bei markttypischen Eigenschaften wie Sicherheit, Komfort, Souveränität und Emotionalität in Kauf nehmen zu müssen.

Durch die intelligente, sinnvolle Kombination modularer Antriebskomponenten kann ein vollwertiges Fahrzeugkonzept im C-Segment umgesetzt werden, das auch für solche Käufergruppen attraktiv ist, die sich kein zweites Stadtfahrzeug leisten können oder wollen. Somit wird die Elektromobilität und somit ZEV-Tauglichkeit universell einsetzbarer Fahrzeuge ausgeweitet und die Umwelt geschont.

Die Kombination aus Elektrofahrzeug einerseits und einem klassischem Verbrennungsmotor erlaubt gegenüber einem reinen Elektrofahrzeug den Einsatz einer kleineren Batterie bei gleichzeitig erheblich größerer Reichweite. Neben reduzierten Kosten kann dabei auch das Fahrzeuggewicht reduziert werden und Packagevorteile genutzt werden, was sich wiederum vorteilhaft auf Reichweite, nutzbaren Innenraum und Fahrdynamik auswirkt. Somit wird das elektrische Antriebskonzept bereits bekannter Klein- und Stadtfahrzeuge auf ein Mittelklassefahrzeug mit erhöhtem Nutzungsspektrum übertragen.

Die Bundesregierung verfolgt mit ihrem Maßnahmenpaket des „Integrierten Energie- und Klima-Schutzprogramms der Bundesregierung“ das Ziel, Treibhausgasemissionen und somit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß signifikant zu reduzieren. Die Daimler AG setzt mit dem Range-Extender-Konzept einen strategischen Impuls zur Unterstützung dieser Ziele.

### **1.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens**

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) stellen, bedingt durch die relativ geringen Energieinhalte der aktuell zur Verfügung stehenden Batterietechnik nur eine sehr begrenzte Reichweite zur Verfügung.

Durch den Einsatz von mehreren Batterien in einem Fahrzeug kann diese Reichweite zwar erweitert werden, doch müssen damit Nachteile hinsichtlich Fahrzeuggewicht und Package in Kauf genommen werden. Weiterer limitierender Faktor sind die lange Ladezeit und die fehlende Lade-Infrastruktur. Aus diesen Gründen kann ein BEV ein konventionelles Fahrzeug nicht ersetzen, sondern bestenfalls als Stadt- oder Zweitfahrzeug dienen.

Ziel des Projektes „Range-Extender“ ist es, ein Elektrofahrzeug universell nutzbar zu machen und dem Verbraucher dadurch 100% Mobilität bei praktikablem ZEV-Einsatz zu garantieren. Ein Range Extender ist demnach ein Elektrofahrzeug, das durch den Einsatz eines Verbrennungsmotors zur Erweiterung der Reichweite bei minimalem Kraftstoffverbrauch hybridisiert wird. Als Basisfahrzeug wird die aktuelle Baureihe der Mercedes-Benz B-Klasse als typischer Vertreter eines C-Segment Fahrzeuges herangezogen.

Durch die weiterentwickelte, einzigartige Sandwichboden-Architektur die Mercedes-Benz bereits vor zehn Jahren auch mit Blick auf die Integration alternativer Antriebe für die A- und B-Klasse eingeführt hat, sind die wesentlichen Antriebskomponenten schwerpunktgünstig, Platz sparend und bestmöglich geschützt im Unterboden des Fahrzeugs eingebaut. Das Raumangebot im Innenraum bleibt vollständig erhalten und es müssen keine Kompromisse bei Fahrgast-, Kofferraum und Variabilität in Kauf genommen werden. Durch diese Karosseriebauweise kann auch die Crash-Sicherheit auf Mercedes-typisch höchstem Niveau gehalten werden.

Damit unterscheidet sich das Range-Extender Fahrzeug maßgeblich von herkömmlich aufgebauten Elektroautos, bei denen beispielsweise die schwere und voluminöse Speicherbatterie im Kofferraum oder im Bereich der Rücksitze untergebracht ist.

Durch das Sandwichboden-Konzept lässt sich ein Range-Extender Fahrzeug zeitnah und ohne Einschränkungen für den Endverbraucher realisieren.

Im Idealfall wird das Fahrzeug an öffentlichen Ladestationen oder an der heimischen Steckdose mit Ladestrom für die, u.a. im Projekt „e-mobility“ entwickelte, flüssigkeitsgekühlte Lithium-Ionen-Batterie versorgt. Die innerhalb von vier Stunden voll geladene Batterie ermöglicht eine Reichweite von bis zu 100 km im lokal emissionsfreien und geräuscharmen Fahrbetrieb. Für eine Ladung der Batterie werden im Durchschnitt Kosten von ca. 2,70 Euro entstehen.

Angetrieben wird der Range-Extender von einem kompakten Elektro-Motor, der maximal 100 kW leistet und 320 Nm Drehmoment bereitstellt. Somit können bei einem hohen Maß an Fahrkomfort gute Fahrleistungen dargestellt werden, die denen von modernen C-Segment Fahrzeugen in nichts nachstehen.

Wird eine größere Reichweite verlangt und der Ladezustand der Batterie sinkt unter eine Mindestgrenze, wird automatisch ein kleiner Dreizylinder-Verbrennungsmotor gestartet. Dieser konventionelle Motor ist an einen permanenten Stromgenerator gekoppelt und wird stationär in einem verbrauchs-optimalen Betriebspunkt zur Stromerzeugung betrieben. Während der Fahrt werden die Batterien aufgeladen und erst nach einer weiteren Strecke von bis zu 600 km muss der Fahrer eine Tankstelle aufsuchen.

Aktuelle Studien zeigen auf, dass die durchschnittliche Tagesfahrleistung in Deutschland bei 44 km liegt (Quelle: BMVBS, s. auch Abbildung 1). Daraus resultiert für das Vorhaben eine elektrische Zielreichweite im NEFZ von 100 km, um Fahrzeuggewicht und Systemkosten möglichst gering zu halten und dem Verbraucher das bestmögliche Kosten-Nutzen Verhältnis zu bieten.

Aufgrund der stark variierenden Nutzungsspektren, beinhaltet das Daimler Vorhaben den Aufbau von drei unterschiedlich ausgeprägten Demonstratoren. Der Aufbau der Flotte und die sich anschließende Fahrerprobung bildet die Grundlage für die Serienauslegung des Range Extender Konzeptes je nach Nutzerprofilen.

Der Energiebedarf und somit die Reichweite eines Fahrzeuges ist im Wesentlichen von dem Profil der Fahrstrecke sowie von den fahrzeugspezifischen Parametern (Gewicht, Reibungsbeiwerte...) abhängig. Einen deutlichen Einfluss haben jedoch auch das Fahrerverhalten des Fahrers und die Verwendung von Komforteinrichtungen wie beispielsweise Klimaanlage, Heizung oder Beleuchtung bei entsprechender Witterung.

Im realen Alltagsbetrieb ist es daher möglich, dass eine Reduzierung der elektrischen Reichweite im „worst-case“ von bis zu 50% gegenüber der Angabe im NEFZ (zertifizierten Wert) auftreten kann. Daher ist es bei der Konzeption und der Auslegung von Komponenten für Fahrzeuge mit Range-Extender unbedingt erforderlich, Funktionalitäten und Nutzungsspektren bei verschiedenen Leistungsstufen und Betriebsstrategien darzustellen, um einen optimalen Kundennutzen zu generieren.

Außerdem stellt der „seltene“ Betrieb des Verbrennungsmotors, sowie die je nach Fahrsituation variierenden Ladezyklen der Batterie neue Parameter für Lebensdauer und Alterungserscheinungen bei unterschiedlichen Belastungen und Umgebungsbedingungen dar.

## **2 Ergebnisse des Verbundprojektes**

Die Ergebnisse der Entwicklungen und Konstruktionen des Demonstrator 1 mit Heckeinbau und des ATG 1 mit Fronteinbau werden in Kapitel 2 vorgestellt. Dabei werden die Ergebnisse analog zu den festgelegten Arbeitspaketen beschrieben.

### **2.1 Demonstrator 1 (REX-Einheit im Heckeinbau)**

Der Demonstrator 1 dient zur Bestätigung des Range-Extender-Konzeptes mit Direkttrieb-Funktionalität. Zur schnellen Realisierung des Demonstrators wurde auf im Hause Daimler vorhandenen Komponenten zurückgegriffen. Dabei wurde als Basis die Fahrzeugarchitektur der B-Klasse mit Elektroantrieb und Brennstoffzelle genommen. Die Brennstoffzelle wurde durch die Antriebsbatterie ersetzt und die Range-Extender-Einheit wurde im Heck integriert. Gleichzeitig wird die Software für die Applikation des Getriebes und der Kupplung entwickelt – anschließend das Fahrzeug in Betrieb genommen.

#### **2.1.1 Entwicklung und Konstruktion Demonstrator 1**

Dieses Arbeitspaket umfasst die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten für die Range Extender Einheit und für das Packaging im Fahrzeug. Für die Range Extender Einheit sind neue Bauteile zur Koppelung zwischen Verbrennungsmotor, Getriebe und Generator zu entwickeln. Für die Integration der Range Extender Einheit im Versuchsträger sind die grundsätzliche Modifikationen bzw. Anpassungen im Fahrzeugrohbau erforderlich.

##### ***2.1.1.1 Entwicklung gesamte REX-Einheit für den Heckeinbau***

Die REX-Einheit besteht aus Verbrennungsmotor, Generator und Getriebe. Die einzelnen Komponenten sind für den Einsatz als REX-Einheit im Fahrzeug sowohl konstruktiv als auch funktional zu modifizieren.

Zunächst wird ein geeigneter 3 Zylindermotor ausgewählt, der bereits im Unternehmen verwendet wird. Dieser wird für den Einsatz als Range Extender modifiziert und optimiert. Zeitgleich muss ein geeignetes Interface Interfaces zur Kopplung des Getriebes mit dem Generator und dem Motor entwickelt werden.

Der Verbrennungsmotor muss zunächst geometrisch angepasst werden. Dazu bedarf es Modifikationen an diversen Bauteilen wie der Ölwanne, dem Schwungrad und der Wasserpumpe, um den Motor konstruktiv in die Range Extender -Einheit integrieren zu können.

Auch funktional muss eine Anpassung erfolgen; diese bezieht sich insbesondere auf den Nockenwellen-Sensor und den Antrieb der Kühlmittelpumpe. Die mechanische Anbindung des 3-Zylindermotors wird durch die Konstruktion eines entsprechenden Interfaces sichergestellt.

Als Getriebe wurde ein 5-Gang automatisiertes Serien-Getriebe verwendet. Für die Anwendung im REX werden nur der 4. und der 5. Gang verwendet.

Parallel muss die Auslegung des Generator-Antriebs inklusive der Fertigung der entsprechenden Bauteile erfolgen. Aus Package-Gründen wurde für den Antrieb des Generators ein Riemen gewählt. Somit lässt sich der Generator über das Getriebe einordnen.

Eine Übersicht des Packages der REX-Einheit inklusive Verbrennungsmotor ist in der Abbildung 2 zu sehen. Diese stellt die Gesamtkonzeption bzw. den Zusammenbau aller Komponenten anschaulich dar.

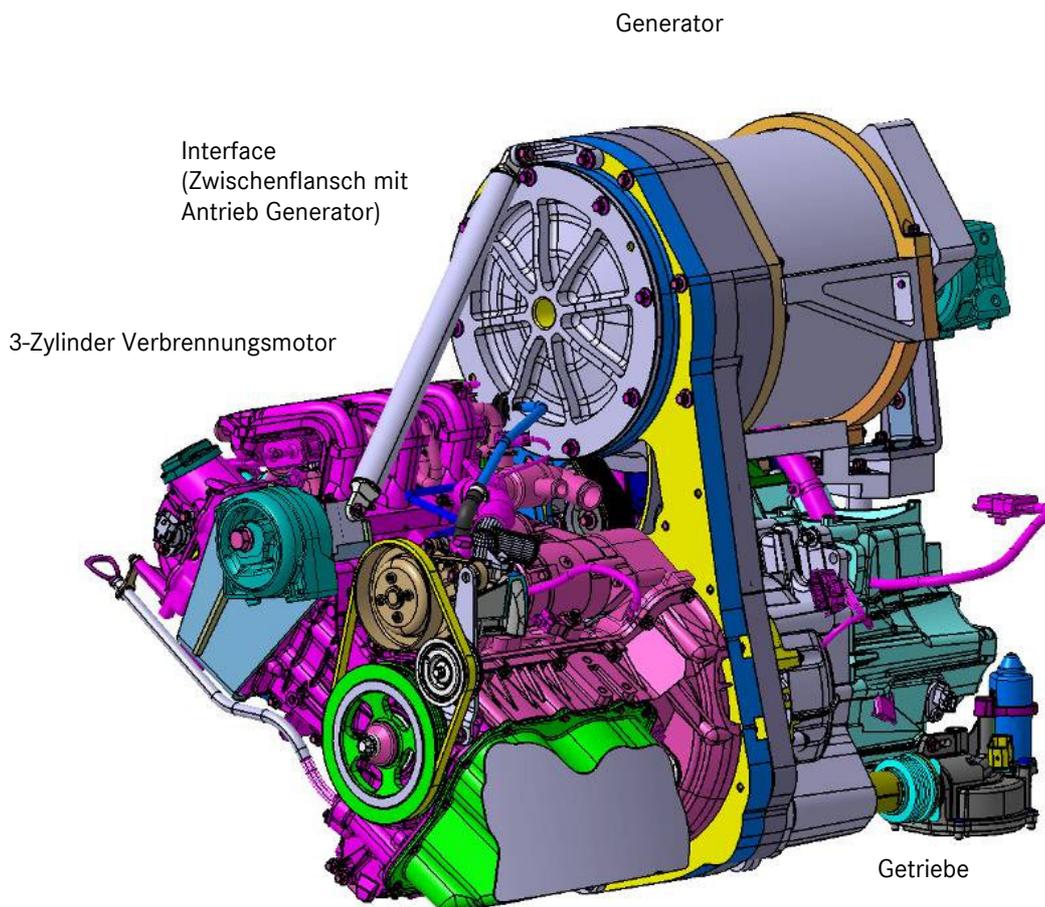


Abbildung 2: REX-Einheit mit Verbrennungsmotor

### **2.1.1.2 Fahrzeugentwicklung zur Integration der REX-Einheit im Versuchsträger**

Für das gewählte Antriebskonzept mit Heckeinbau wird als Basis die B-Klasse mit Elektroantrieb und Brennstoffzelle ausgewählt. Die elektrische Antriebseinheit im Fronteinbau kann direkt übernommen werden. Dennoch um die Antriebsbatterie im Unterboden und die REX-Einheit im Heck integrieren zu können, bedarf es einiger grundlegender Modifikationen am Fahrzeug.

Zunächst werden Rohbaustrukturen zur Aufnahme der Batterie im Unterboden und der Antriebseinheit im Heck konstruiert und diese Konstruktionen anschließend umgesetzt. Außerdem zur Kühlung der zusätzlichen Komponenten (Verbrennungsmotor, Generator und Batterie) müssen sämtliche Kühlsysteme ergänzt bzw. neu ausgelegt und entwickelt werden. Dies betrifft den Nieder- und Hochtemperaturkreislauf, die Batterie- und Ladeluftkühlung sowie die Auslegung des Heizkreislaufs.

Diverse Neuteile – wie etwa Bauteile zur Aufnahme der Antriebseinheit - müssen dimensioniert und beschrieben werden; das entsprechende Gewichts- und Teilemanagement wird im Rahmen der Fahrzeugentwicklung umgesetzt.

Aufgrund der Anordnung der Batterie im Unterboden und der REX-Einheit im Heck des Fahrzeugs bedarf es einer grundlegend geänderten Elektrik- bzw. Elektronik-Architektur. Diese wird konzipiert und festgelegt.

Zur Umsetzung aller erforderlichen Massnahmen werden durch die Konstruktion Werkstattzeichnungen erstellt, mit denen die beschriebenen Änderungen am Fahrzeug durchgeführt werden. Eine Prinzipskizze der Integration der Antriebseinheit im Rohbau und ein Überblick über die Kühlkreisläufe sind in Abbildung 3 und 4 zu sehen.

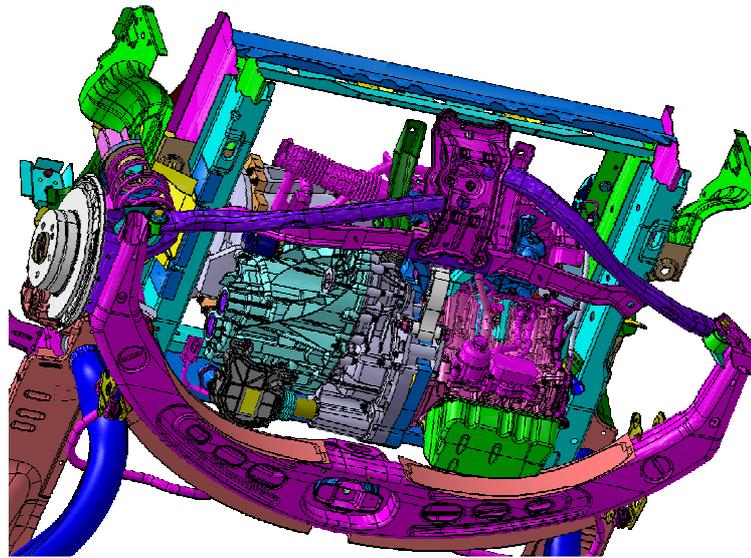


Abbildung 3: Integration der REX-Einheit im Rohbau

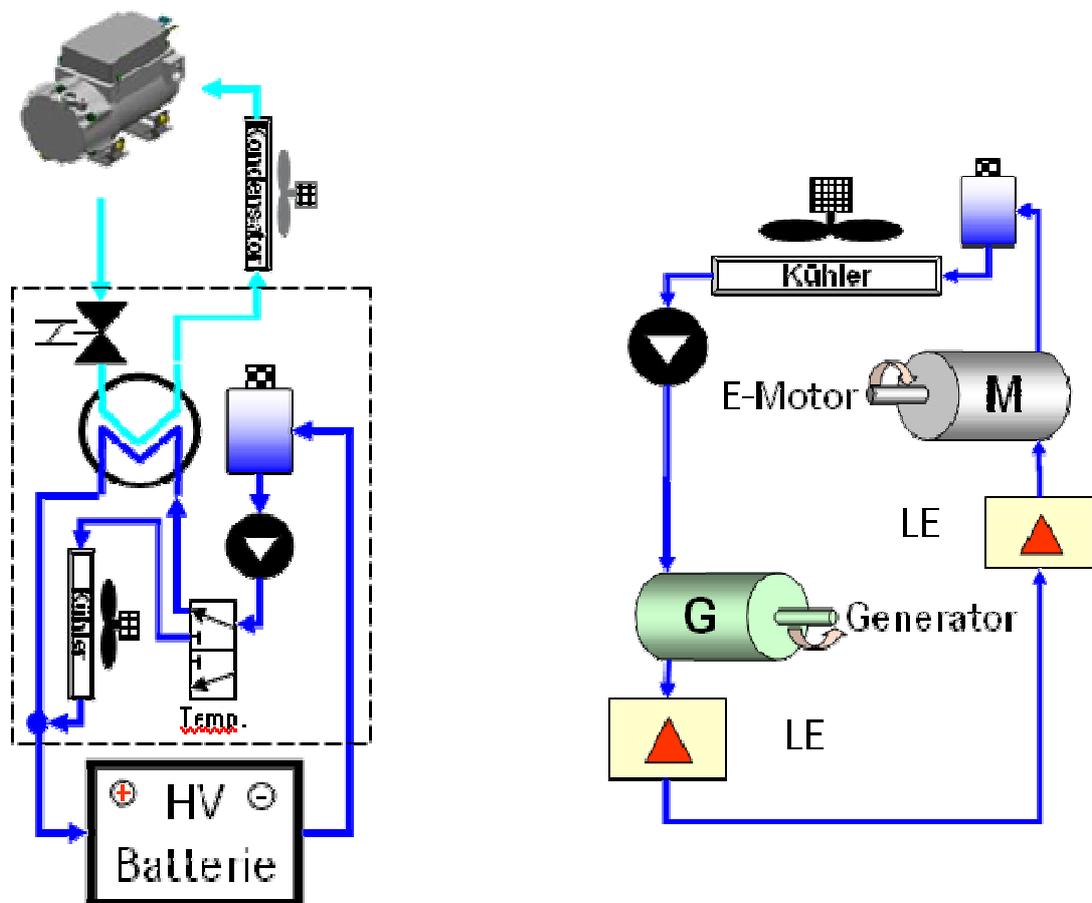


Abbildung 4: Kühlkreisläufe

## 2.1.2 Konzeption und Aufbau des ersten Versuchsträgers Demonstrator 1

Nach der Festlegung der Komponenten für die REX-Einheit und der digitaler Absicherung des Packages im Fahrzeug folgt die Phase der Umsetzung in Hardware. Zwei Range Extender Einheiten werden realisiert. Eine Einheit dient zur Untersuchung und Funktionsoptimierung am Prüfstand. Die andere Einheit wird im Fahrzeug eingebaut.

### 2.1.2.1 Auswahl und Entwicklung der Komponenten für REX-Einheiten

Für den Verbrennungsmotor und für das Getriebe wurden Serienkomponenten der Smart-Baureihe verwendet. Die Batterie im Unterboden wurde explizit für den Einsatz in der B-Klasse entwickelt. Bei der Auswahl des Generators wird auf die Komponente eines Zulieferers gesetzt.

Ein grober Überblick der Komponente und deren Anordnung geben die Abbildungen 5, 6 und 7 wieder.

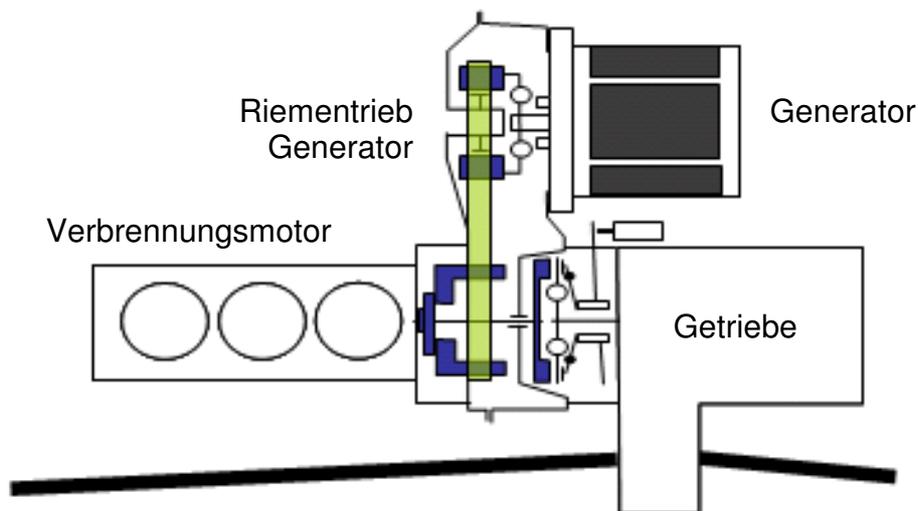


Abbildung 5: Anordnung der Komponenten



Abbildung 6: Getriebe



Abbildung 7: Komponenten Demonstrator 1 Versuchsträger

### 2.1.2.2 Realisierung REX-Einheiten und Funktionstest

Die in Kapitel 2.1.1.2 beschriebenen Rohbaumaßnahmen und Fahrzeugänderungen (u.a. Kühlung) wurden umgesetzt, so dass die Integration der Antriebseinheit im Heck und Einbau der zusätzlichen Komponenten für Kühlung und Steuerung der REX-Einheit im Fahrzeugvorbau vorbereitet ist. In Abbildung 8 sind Teile der Rohbauänderungen dokumentiert.

Nachdem der Einbau dieser Einheiten erfolgt ist, wird die Verdrahtung aller relevanten High-Voltage und Low-Voltage Komponenten durchgeführt. Des Weiteren erfolgt der Anschluss an die jeweiligen Kühlkreisläufe, um die Kühlung aller Komponenten zu gewährleisten und der Einbau der Hochvolt-Batterie mit dem entsprechenden Anschluss an die zugehörigen Stromkreise. Als letzter Arbeitsschritt erfolgt die Überprüfung und Abnahme der durchgeführten Arbeiten.

In den Abbildungen 9 und 10 sind die im Fahrzeug realisierten Kühlkreislauf und Hoch-Volt-Bordnetz dargestellt.

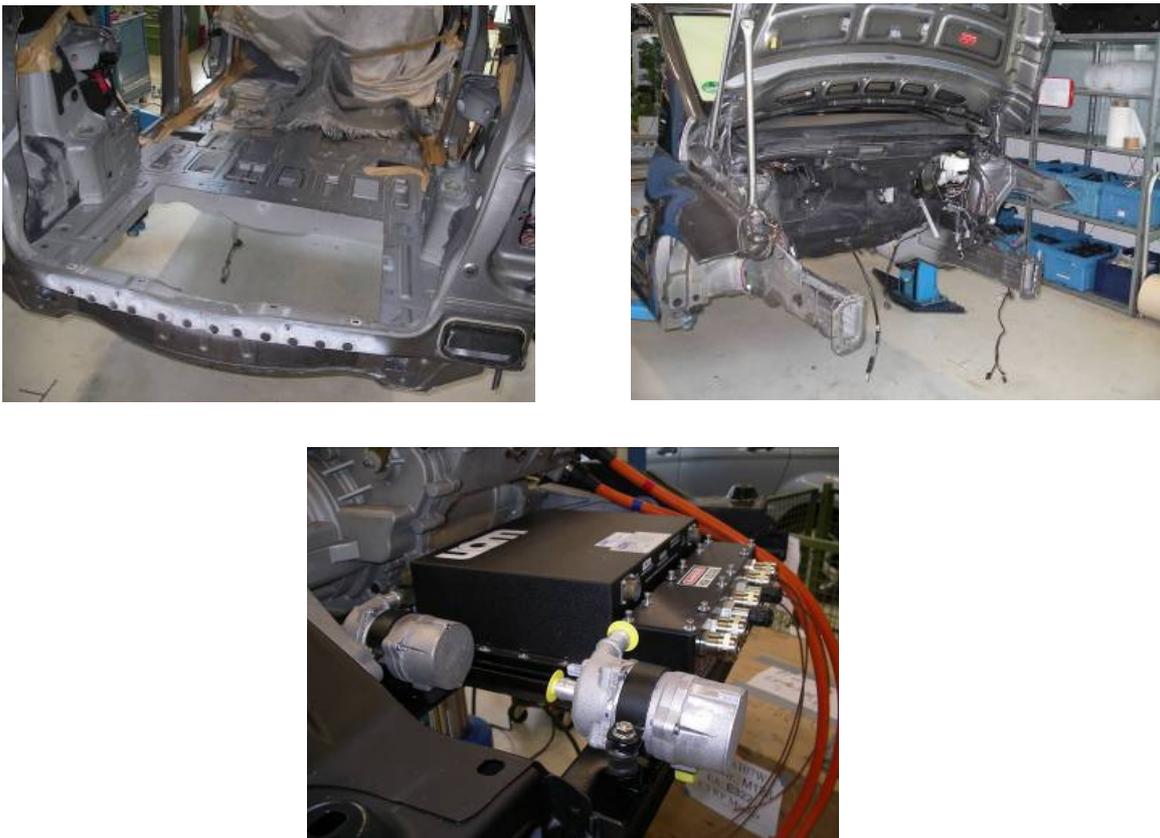


Abbildung 8: Rohbauänderungen für den Aufbau des Demonstrators 1.

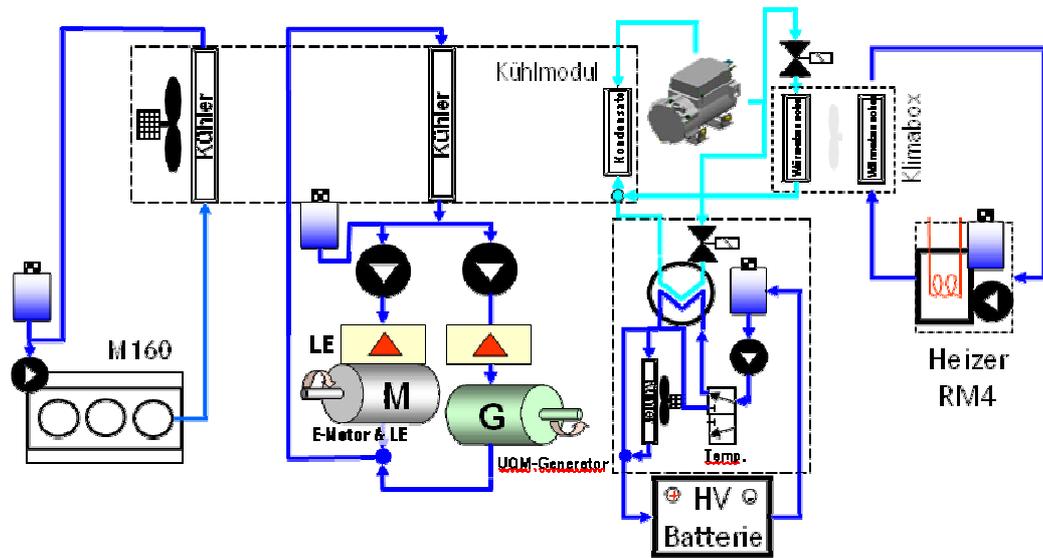


Abbildung 9: Realisierter Kühlkreislauf im Fahrzeug (Demonstrator 1)

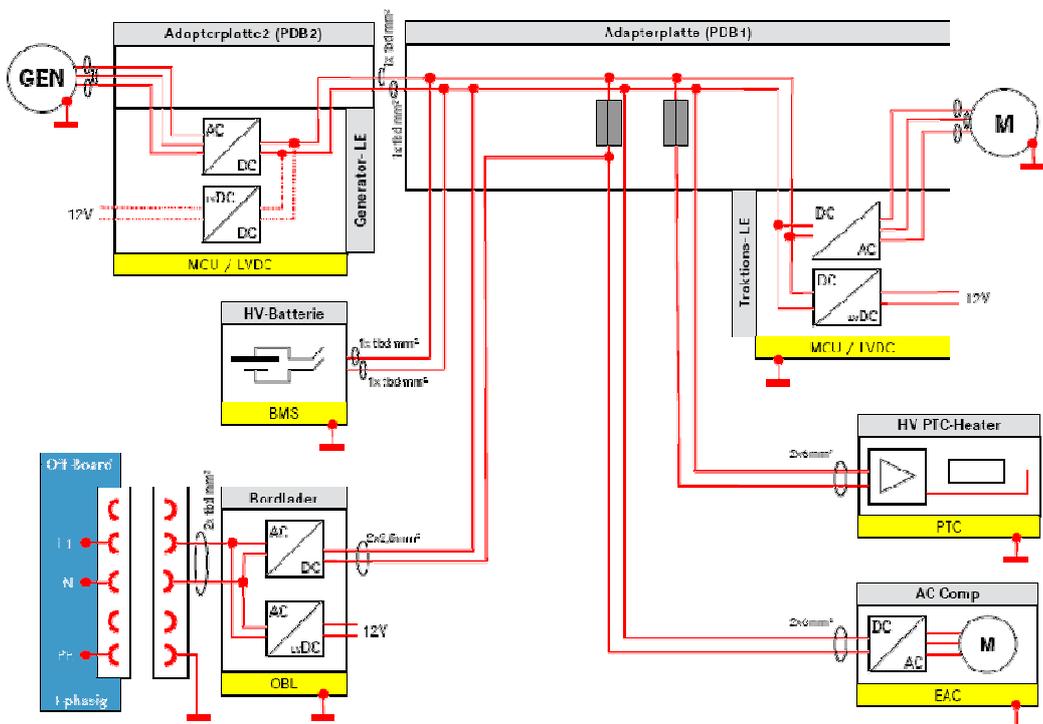


Abbildung 10: Hoch-Volt-Bordnetz

### 2.1.2.3 Entwicklung Fahrzeugarchitektur zur Aufnahme der REX Einheit

Neben den reinen Rohbauänderungen müssen zur Integration der REX-Einheit weitere Randbedingungen geschaffen werden.

In einem ersten Schritt werden NVH-optimierte Motorlager konzipiert und konstruiert. Dabei verläuft die Motorlagerung durch die Torque-Roll-Achse. Die Drehmomentabstützung erfolgt am Heckquerträger. Die gerichtete Motorraum-durchströmung wird durch zwei vom Fahrstaudruck unterstützte Lüfter und eine entsprechend geformte Motorabdeckung sichergestellt.

Um den Direkttrieb über die REX-Einheit im Heck zu ermöglichen ist eine Anpassung bzw. neue Konstruktion der Hinterachse notwendig. Die Konstruktion der Hinterachse wird auf Basis der bestehenden ARC-Hinterachse aus der B-Klasse durchgeführt. Dies geschieht durch Anbringung entsprechender Konsolen mit integrierter Radlagerung (siehe Abbildung 6). Die Seitenwellen werden durch Längenanpassung bestehender Seriengelenke realisiert.

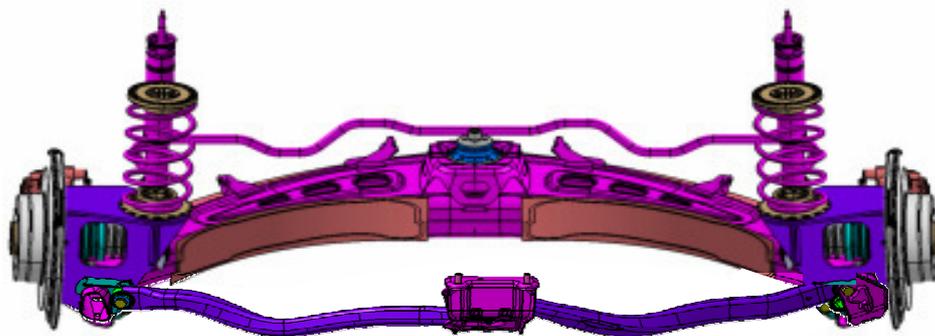


Abbildung 11: Realisierte Hinterachse für den Demonstrator 1 (CAD-Konstruktion und Realisierung in Hardware)

Des Weiteren wird eine Auspuffanlage mit dem zur Verfügung stehenden Bau-  
raum konzipiert und optimiert.

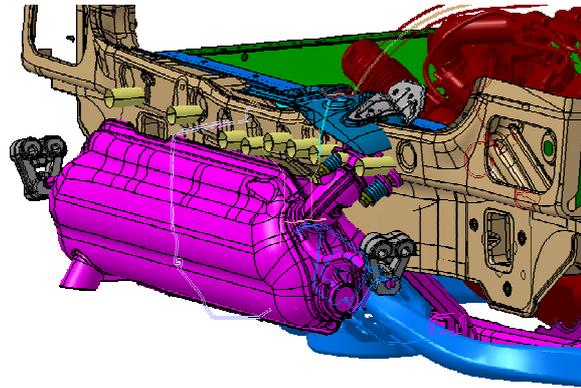


Abbildung 12: Unterbringung der Abgasanlage vor des Stossdämpfers

#### **2.1.2.4 Integration REX-Einheit im Versuchsträger**

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Maßnahmen zur Umsetzung be-  
schrieben wurden, wird nun im nächsten Schritt die Implementierung der Ran-  
ge-Extender-Einheit im Fahrzeug umgesetzt.

Das Fahrzeug wird mit der für den Heck-Einbau konzipierten Struktur aufge-  
baut, die Komponenten werden ins Fahrzeug integriert und in Betrieb genom-  
men. Wie in Kapitel 2.1.2.2 wird die entsprechende Fahrzeugarchitektur umge-  
setzt und die Komponenten an die jeweiligen Stromnetze und Kühlkreisläufe  
angeschlossen. Eine Fotodokumentation der Realisierung ist in Abbildung 13-  
17 zu sehen.

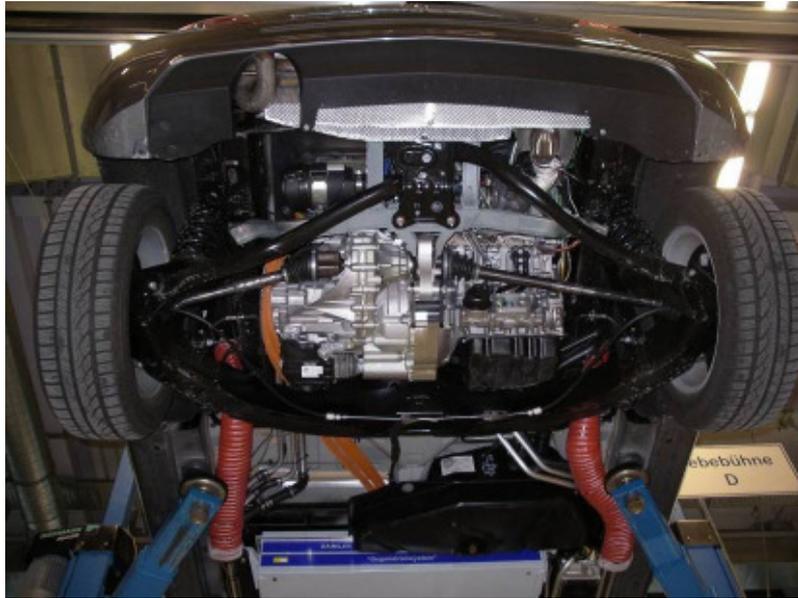


Abbildung 13:REX-Einheit im Fahrzeugheck vom Demonstrator 1



Abbildung 14:REX-Einheit im Fahrzeugheck vom Demonstrator 1



Abbildung 15: Traktionsmaschine im Fahrzeugfront vom Demonstrator 1



Abbildung 16: Motorraum Demonstrator

### 2.1.2.5 Softwareentwicklung für Motorapplikation der REX-Einheit

Parallel zur Konzeption und Entwicklung der Hardware findet die Entwicklung der Steuergeräte-Software zur Realisierung der Fahrzeug-System-Architektur und zur Vernetzung der unterschiedlichen Steuergeräte statt.

Als zentrales Steuergerät des hybridisierten Antriebstranges wird dabei die UPC (universal peripheral controler) eingesetzt. Diese dient zur Ansteuerung des gesamten Antriebs und ist das Master-Steuergerät zur koordination bzw. Ansteuerung der unterschiedlichen Steuergeräte der einzelnen Komponenten. In der UPC erfolgen Vortriebs-, Thermo- und Energiemanagement.

Die Software-Funktionen der UPC werden zuerst in Matlab/Simulink modelliert, so dass sie durch Simulation des gesamten Fahrzeugs entwickelt und optimiert werden können. Um eine einwandfreie Kommunikation zwischen den Antriebs- und Fahrzeugkomponenten zu gewährleisten, werden die entsprechenden Schnittstellen zur Kommunikation via CAN-Bus und die I/O-Funktionen entwickelt. Die Funktionsstruktur ist in Abbildung 8 zu sehen.

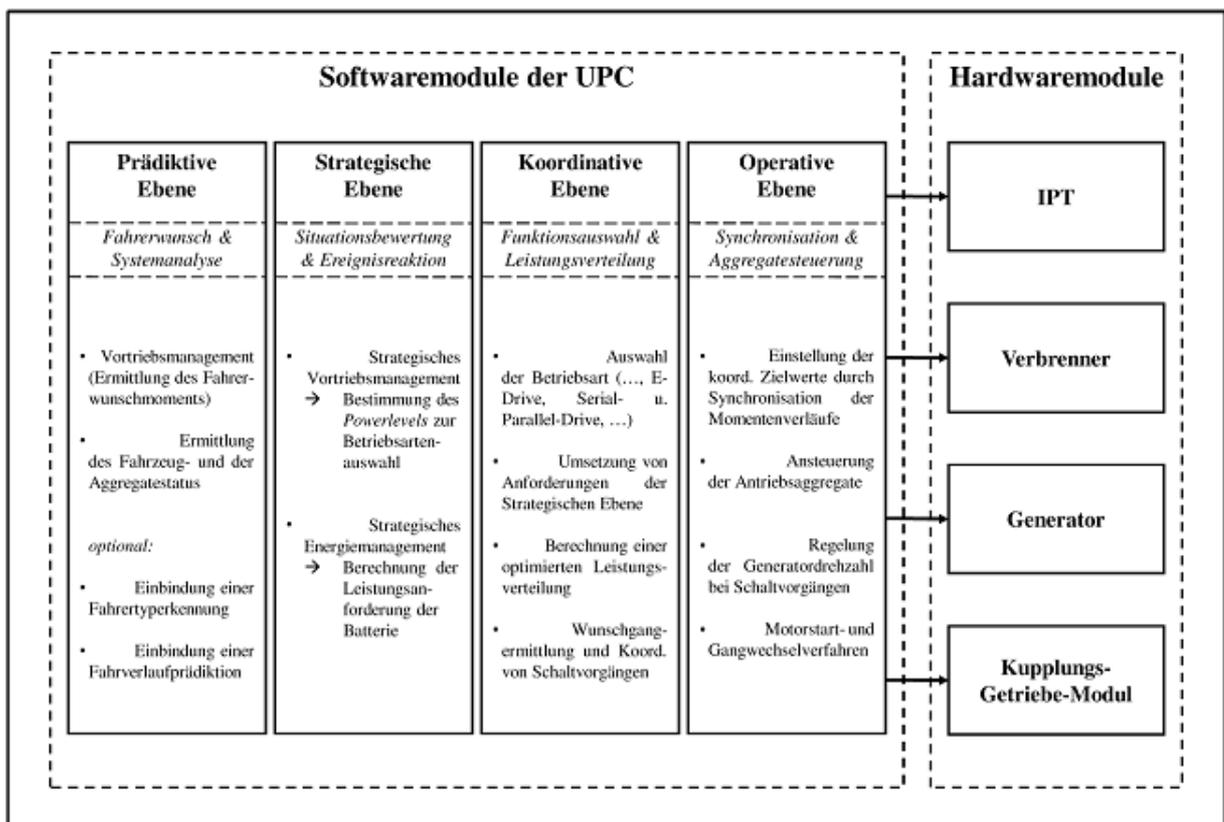


Abbildung 17:Funktionsstruktur der Antriebssteuerung

### 2.1.2.6 Softwareentwicklung für Applikation Getriebe und Kupplung der REX-Einheit

Die Entwicklung von entsprechenden Software-Funktionen für alle Betriebsarten und vor allem die Wechsel zwischen den Betriebsarten erfolgt zuerst -wie schon erwähnt- in der Simulation.

Drei Betriebsarten bzw. Fahrmodi werden entwickelt und optimiert: „parallel drive“, „serial drive“ und electric drive“. Diese sind besonders für die Applikation von Motor- und Getriebe-Steuergerät relevant. Eine Übersicht über die verschiedenen Betriebsarten und deren Zusammenspiel ist in Abbildung 18 dargestellt.

Um eine Abfrage von Betriebszuständen zu gewährleisten und den aktuellen Betriebsart erkennen bzw. überwachen zu können, wird einen Kommunikationsschnittstelle zwischen UPC und Getriebe implementiert.

Außerdem wird eine Auswertung der über das Wahlhebelmodul gelieferten Stellgröße hinsichtlich der gewünschten Fahrstufe funktionell integriert. Durch diese Funktion wird eine bedarfsorientierte Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Eingangssignale gewährleistet.

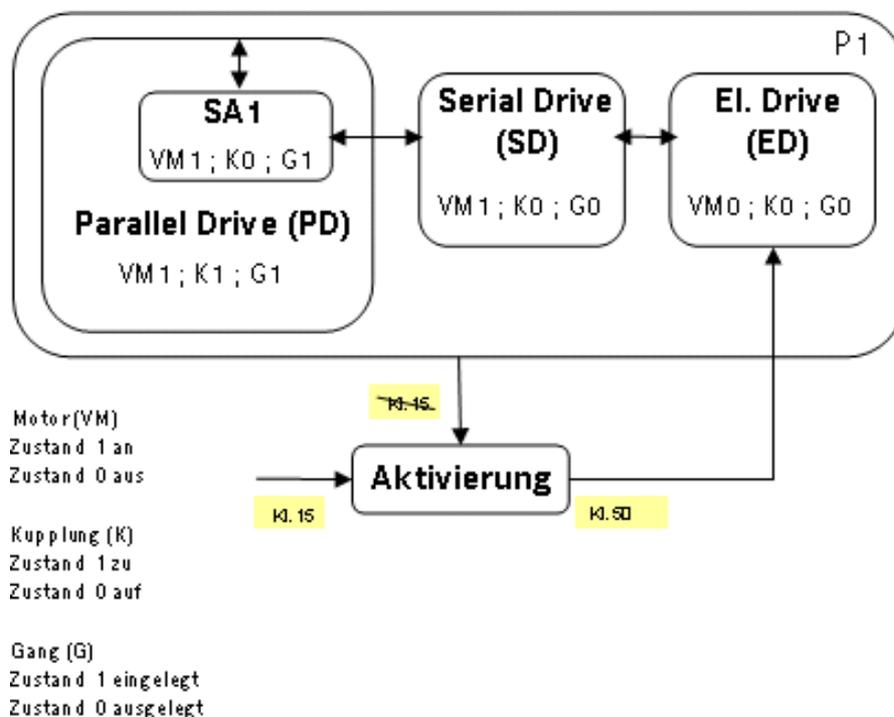


Abbildung 18: Betriebsarten des Antriebsstranges

### 2.1.2.7 Inbetriebnahme der REX-Einheit am Motor-Prüfstand

Im nun folgenden Schritt wird ein Funktionstest der Range Extender Einheit sowie des Hochvoltsystems und des elektrischen Antriebs am Motor-Prüfstand durchgeführt.

Während des Funktionstests des Gesamtaggregate wird dabei eine Überprüfung der Vernetzung der Antriebssteuergeräte und deren Kommunikation untereinander durchgeführt. Außerdem wird die Funktionstüchtigkeit der Hochvoltfunktionalitäten geprüft. Wie bei einem konventionellen Antriebsstrang werden die mechanischen Funktionalitäten sowohl von Motor und Getriebe, als auch des Generators untersucht.

Bei der Applikation der UPC gilt es, sämtliche in der Betriebsstrategie implementierten Funktionen abzuprüfen. Dazu gehört auch die Untersuchung der verschiedenen Betriebsmodi „serial“, „parallel“ und „electric“. Ebenfalls wichtig beim Zusammenspiel mehrerer Antriebsarten ist die Koordination der Momente der unterschiedlichen Aggregate – auch dieses gilt es auf korrekte Funktionalität zu prüfen.

In Abbildung 19 ist ein Systemschaubild des Antriebsstrangs und dessen Komplexität zu sehen. Die Fahrzeugumgebung wird über ein Simulationsmodell am Prüfstand abgebildet.

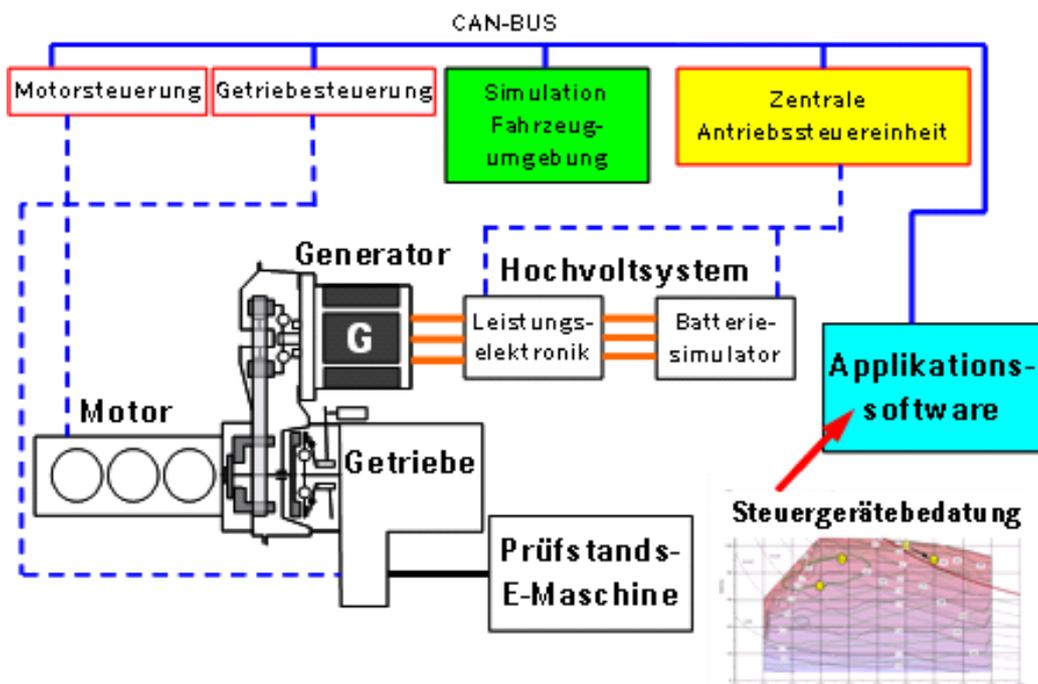


Abbildung 19: Systemschaubild Antriebsstrang

### 2.1.2.8 Funktionstest des Versuchsträgers am Rollenprüfstand

Im Fahrzeug erfolgt die Erstinbetriebnahme, Überprüfung und Optimierung der Steuerfunktionen auf dem Rollenprüfstand.

Für die Optimierung der Betriebsstrategie werden Messungen für den Zertifizierungs-/Referenzzyklus (NEFZ) durchgeführt. Am Rollenprüfstand werden vor allem Betriebszustände optimiert, die durch die Simulation nicht genau abgebildet werden können. In erste Linie handelt es sich hier um die Kaltstartverhalten des Verbrennungsmotors in Abhängigkeit von Einschalthäufigkeit und Batterie-Ladestrategie.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der State of Charge (SOC) der Batterie. Während der Messungen auf dem Rollenprüfstand wird der Hub variiert und dabei entstehende Nebenwirkungen im NEFZ-Zyklus untersucht.

Die ersten Messungen auf dem Rollenprüfstand lassen nun auch weitere Untersuchungen des Thermomanagements und einen Vergleich mit Simulationsergebnisse zu, so dass das Management der Kühlkreisläufe weiterentwickelt werden kann.

Exemplarisch ist in Abbildung 20 die Aufzeichnung einiger Messwerte am Rollenprüfstand dargestellt. Dabei wird die Abhängigkeit zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Motordrehzahl und des State of Charge der Hochvolt-Batterie aufgezeigt.

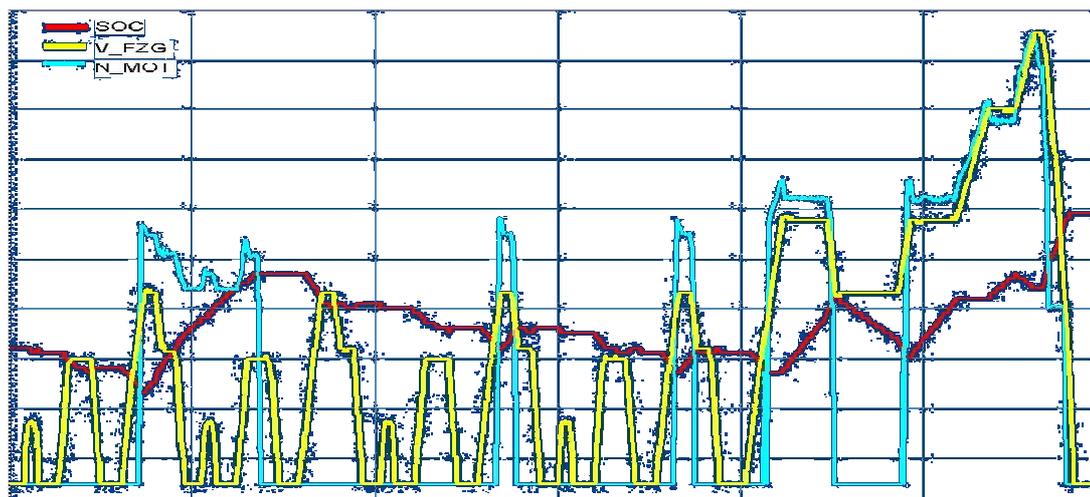


Abbildung 20: Auf dem Rollenprüfstand ermittelte Batterie- und Motorkennwerte (SOC: State of Charge /Ladezustand der Batterie; N\_MOT: Motordrehzahl; V\_FZG: Fahrzeuggeschwindigkeit)

## **2.2 Konzeption REX mit Direkttrieb im Demonstrator 2**

Im Rahmen des vorgegebenen Arbeitspaketes werden die Komponenten für den Front-Einbau der Range-Extender-Einheit entwickelt. Dabei gilt es analog zum Demonstrator 1 (Heckeinbau) die Komponenten konstruktiv zu package bzw. zu entwickeln und um die Umsetzung im Fahrzeug.

Durch die Integration der Antriebseinheit im Fronteinbau besteht die Möglichkeit, diese auf andere Baureihen auszudehnen. Des Weiteren bringt ein Heckeinbau in ausgewähltem Fahrzeug diverse Nachteile mit sich. Neben dem Problem, dass bei einem Heckeinbau der Platz im Innenraum des Fahrzeugs stark eingeschränkt wird, gibt es unter anderem Nachteile bzgl. des NVH-Verhaltens.

### **2.2.1 Entwicklung der einzelnen Komponenten**

Analog zu den Entwicklungsarbeiten am Demonstrator 1 werden nun die Komponenten des Range Extenders für den Fronteinbau entwickelt. Dabei werden auch die Grundlagen zur Qualifizierung und zur Optimierung der Komponenten mit Hilfe der Ergebnisse des Demonstrator 1 insbesondere beim Zusammenspiel im Gesamtsystem erarbeitet. Die Betriebsstrategie zur Steuerung und Regelung der verschiedenen Komponenten je nach Fahrsituation wird somit ebenfalls weiterentwickelt.

#### **2.2.1.1 Entwicklung Verbrennungsmotor für REX-Einheit**

Nachdem der 3-Zylinder-Verbrennungsmotor bereits im Demonstrator 1 verwendet wurde, wird dieser nun für die Anwendung im Demonstrator 2 mit Fronteinbau angepasst. Der Motor wird für einen verbrauchs- und emissionsoptimalen quasi-stationären Betrieb gezielt entwickelt und optimiert. Besondere Fokus bei der Entwicklung des Verbrennungsmotors ist die Erfüllung der strengsten amerikanischen Emissionsanforderungen (SULEV) auch im Range Extender Einsatz.

Der Verbrennungsmotor wird auf dem Prüfstand weiterentwickelt – relevante Kennfeldpunkte zur Emissionsoptimierung werden mit Hilfe der Prüfstandsmessungen ermittelt. Neben den Messungen bedarf es auch einiger konstruktiver Änderungen zur Erreichung der Kenngrößen „Emissionen“ und Verbrauch.

Der Verbrennungsmotor wird zuerst für die Anwendung im Range Extender gezielt appliziert. In Abbildung 21 ist der resultierende Verbrauchskennfeld dargestellt. Grün dargestellt ist die ermittelte Verbrauchsoptimale-Betriebslinie.

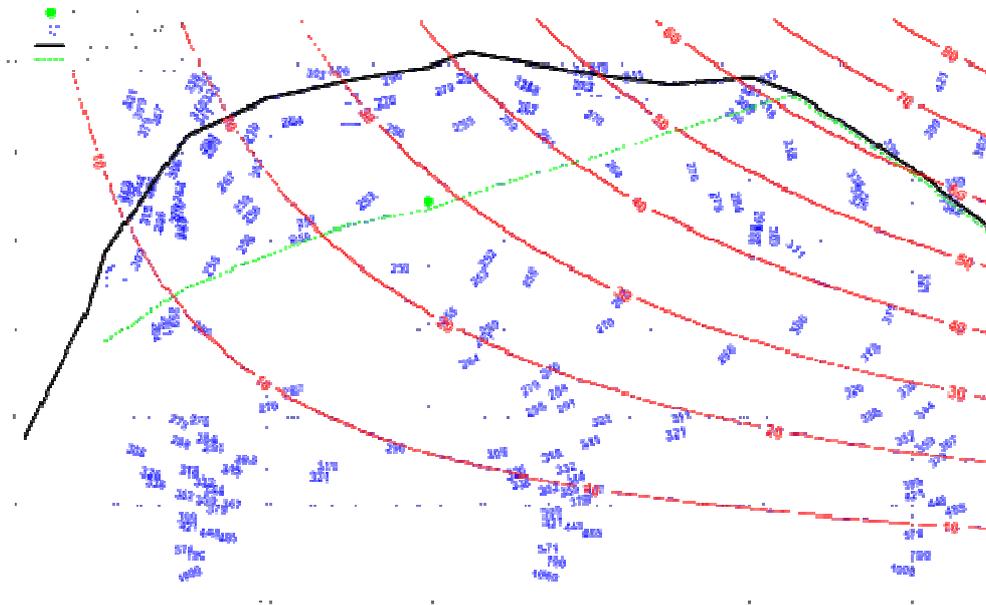


Abbildung 21: Motorverbrauchskennfeld, REX-Einheit für Fronteinbau

### **2.2.1.2 Entwicklung Emissionsstrategie (Kaltstart) am Motorprüfstand**

Zur Erfüllung der strengsten Emissionsanforderungen in USA (SULEV) spielt die Erwärmung des Katalysators eine zentrale Rolle: Im Prüfstandsumfeld werden spezielle Verbrennungsmotor-Betriebsmodi zur Definition der optimalen Katalysator-Heizstrategie. Verschiedenen Motorkonfigurationen werden getestet und verglichen um die optimale Strategie und notwendigen Technologie-Set beschreiben zu können (s. Abbildung 22). Folgende Untersuchungsziele werden dabei verfolgt:

- Optimierung der Motorapplikation
- Bewertung unterschiedlicher Katalysator-Systeme / Bewertung des Potential vom Elektrisch beheizten Katalysator
- Auslegung und Optimierung des Sekundärluft-Systems
- Bewertung vom Hochdrehzahlstart durch den Generator
- Optimierung Katalysatoranströmung
- Simulation Emissionen End-Off-Pipe

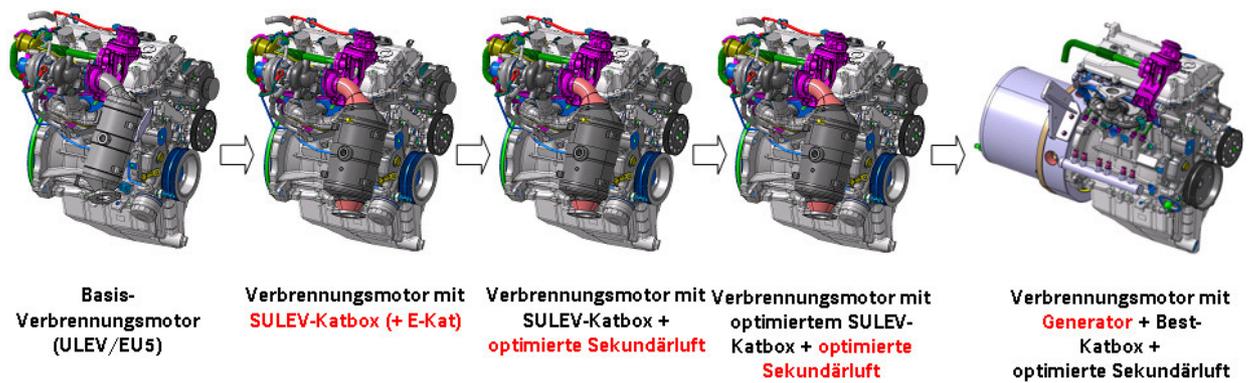


Abbildung 22: Motorkonfiguration zur Optimierung des Emissionsverhaltens des Verbrennungsmotors.

In einem nächsten Schritt werden mit Hilfe der Messergebnisse die Katalysator-Heizpunkte zum Erreichen der Emissionsgrenzen definiert. Unter Berücksichtigung zukünftiger Gesetzesvorgaben wird eine Heizstrategie zur Realisierung geringster Rohemissionen bei einem niedrigen Verbrauch entwickelt.

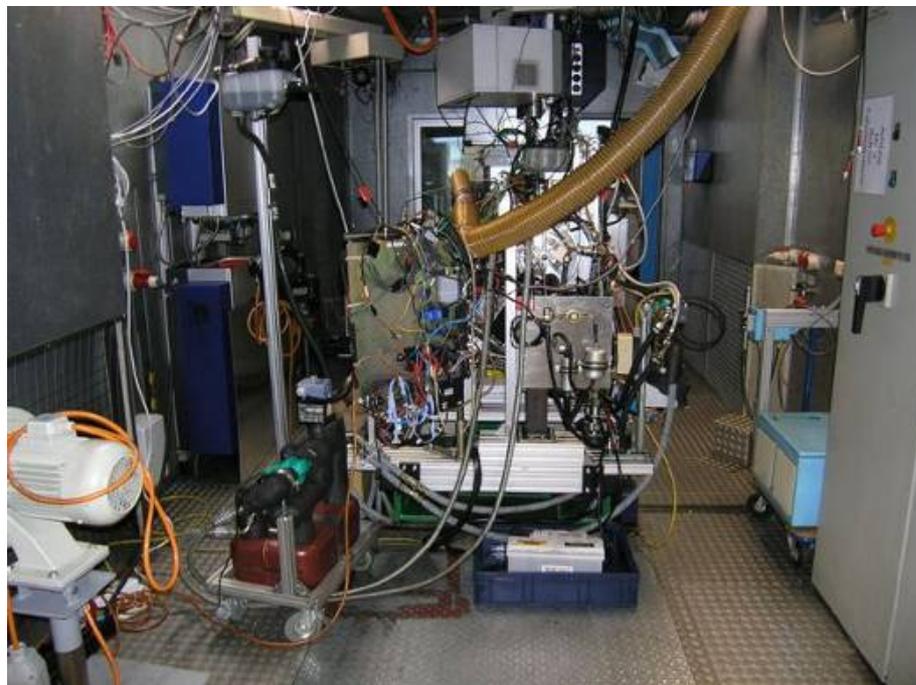


Abbildung 23: Prüfstands Aufbau zur Optimierung des Emissionsverhaltens des Verbrennungsmotor

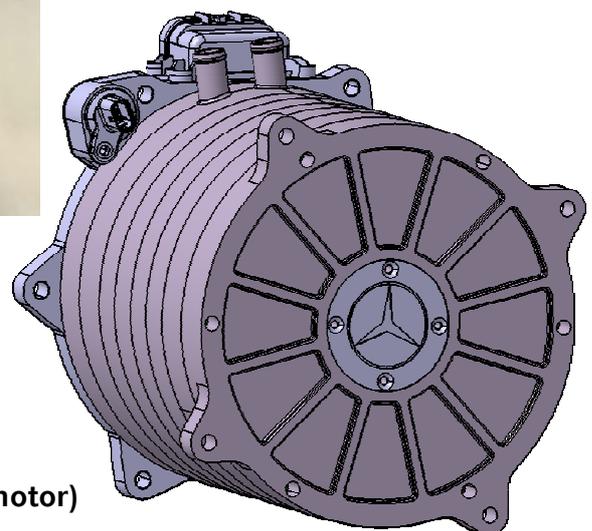
### 2.2.1.3 Entwicklung Generator und E-Motor für REX-Einheit im Fronteinbau

Die Entwicklung einer kompakten Generator-Einheit mit Drehzahl- und Drehmomentregler ist der nächste Schritt zur Komplettierung des Gesamtantriebsstrangs. Analog dazu wird die E-Motor Einheit entwickelt. Die Wahl/Entwicklung der Komponenten wird neben den Leistungsdaten durch das Package im Fronteinbau stark beeinflusst.

Durch die Entwicklung von E-Motoren mit vergrabenen Permanentmagneten kann die Erfüllung der erforderlichen Leistungs- und Drehmomentdichten sichergestellt werden. Dabei kann zur Nutzung von Synergieeffekten die Übernahme des Generators aus dem laufenden Smart-Projekt erfolgen. Die Entwicklung des Traktions-E-Motors ist eine Eigenentwicklung. Die maximalen Leistungsdaten der Komponenten betragen 55 kW für den Generator und 100 kW für den Traktions-E-Motor (Spitzenleistungen). In Abbildung 24 ist ein Foto des Generator-Prototyps und eine 3D-Zeichnung des E-Motors zu sehen.



**Generator**



**E-Motor (Traktionsmotor)**

Abbildung 24: Generator und E-Motor



### 2.2.1.5 Entwicklung Leistungselektronik für höhere Spannungen

Eine bereits im Konzernbaukasten bestehende Leistungselektronik muss an die Bedarfe des Demonstrator 2 angepasst werden. Dabei gilt es, die notwendigen Spannungen abdecken zu können für die Verwendung von nur einer Batterie, zur Kompensation des Leistungsverlustes.

Dabei wird die Leistungselektronik an die Spannungslage und Leistung für den Antriebsmotor angepasst – diese kann flexibel für weitere alternative Antriebe im Konzern eingesetzt werden. Synergieeffekte im Konzern wurden bereits genutzt, da die Elektronik aus dem Smart EV Projekt stammt. Abbildung 26 zeigt CAD-Bilder der Komponenten.

Die Leistungsklassen der Leistungselektroniken sind:

- LE Antrieb: 330 A cont.
- LE Generator: 200 A cont.

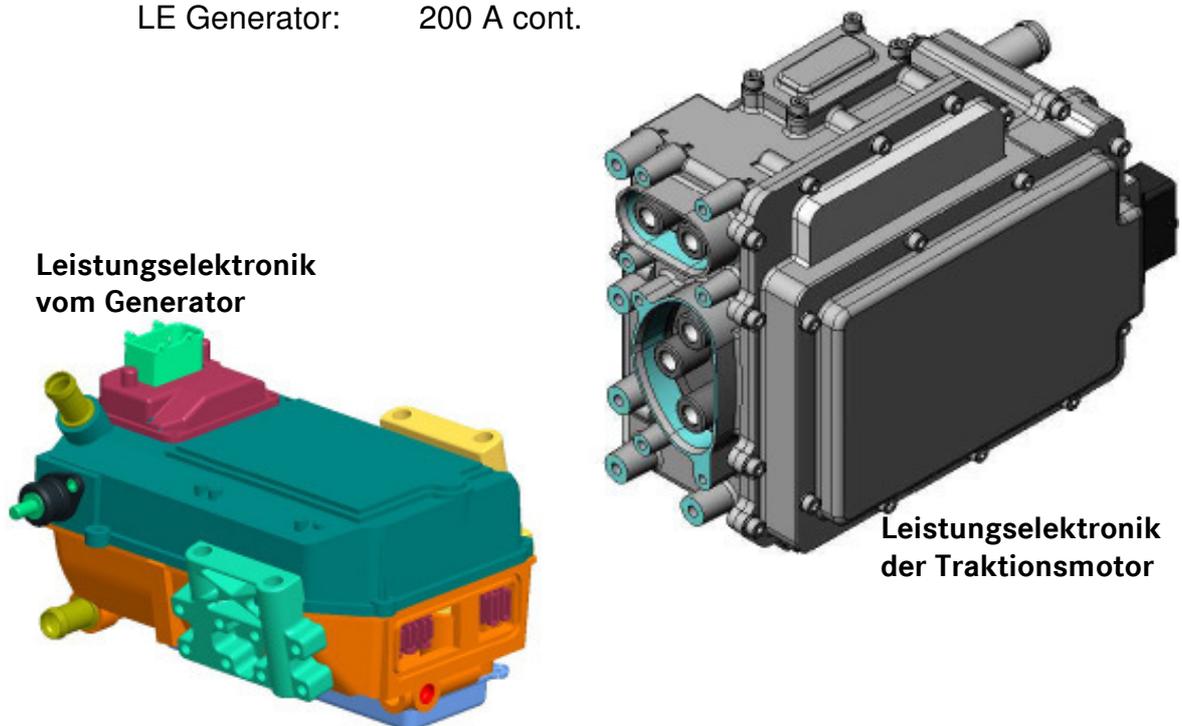


Abbildung 26: Leistungselektronik für Antrieb und Generator E-Motor

### **2.2.1.6 Entwicklung Simulationsmodelle zur Gesamtoptimierung der REX-Einheit**

Nachdem die Komponenten nun ausgiebig im Einzelnen erprobt wurden, müssen nun Simulationsmodelle zur Auslegung der REX-Komponenten im Hinblick auf den späteren Einsatz im Gesamtsystem entwickelt werden. Dabei wird sich an die Ergebnisse der vorangegangenen Prüfstandsuntersuchungen angelehnt und die Ergebnisse validiert. Auch die Ergebnisse aus dem ersten Demonstrator fließen in der Entwicklung der Simulationsmodelle und dienen vor allem zur Validierung des Fahrzeugmodells und des Verhaltens des Antriebs im Fahrzeug.

Zunächst wird eine praxisnahe Simulationsumgebung aufgebaut, bestehend aus Streckenvorgabe, Fahrer und Fahrzeug. Dies geschieht mit der Nutzung von Matlab/ Simulink.

Bei der Erstellung des Modells werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Physikalisches Batteriemodell und Modell des Steuergerät
- Kennfeldmodelle für E-Motor und Generator
- Getriebe-Steuerung über Stateflow
- Kennfeldmodell für Verbrennungsmotor, Modellierung der Kühlwasser- und Öltemperatur

Am HiL-Prüfstand (Hardware in the Loop) erfolgt die CAN-Anbindung über ein Rapid-Prototyping-System an das Fahrzeugsteuergerät (UPC) zur Entwicklung des Steuerungsmodells inklusive der Entwicklung der Betriebsstrategie der Range Extender-Einheit.

Während des Prozesses nähert man sich in diversen Iterationsschleifen einer optimalen Lösung an. In Abbildung 27 ist ein Entwicklungsschritt schematisch dargestellt.

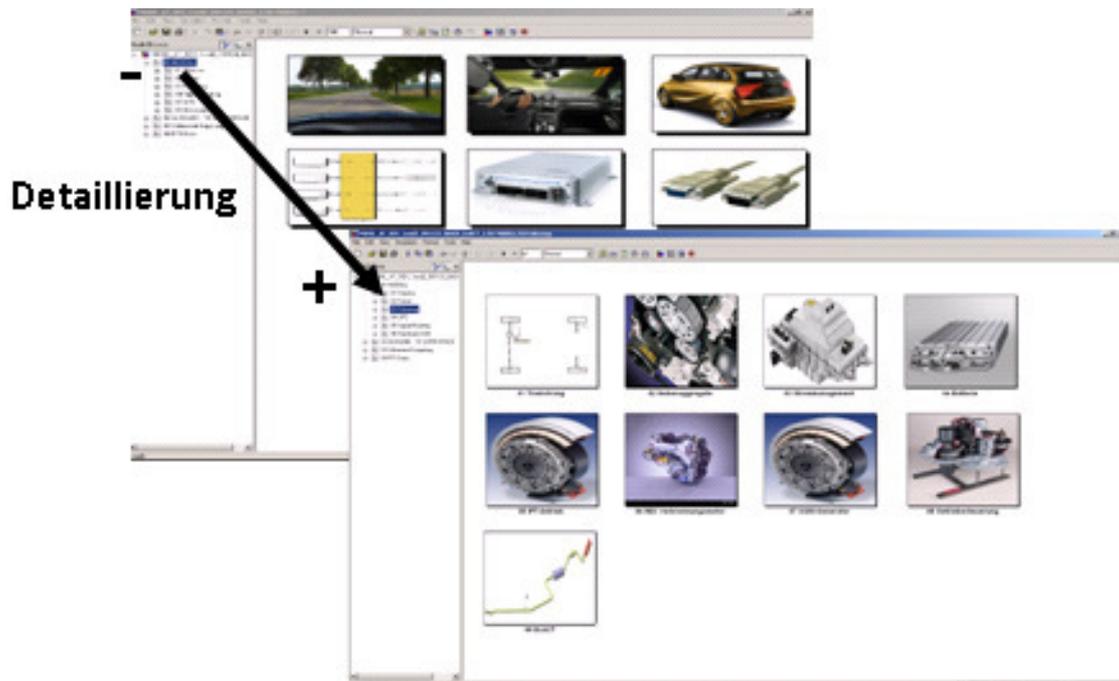


Abbildung 27: Schema Entwicklung Simulationsmodelle – Detaillierung der Modelle für die einzelnen Komponenten

## 2.2.2 Entwicklung und Erprobung der Betriebsstrategie im ATG 1

Die Betriebsstrategie sorgt für ein optimales Zusammenspiel der einzelnen Komponenten hinsichtlich des Energieverbrauchs, der Emissionen und der Fahrbarkeit unter Berücksichtigung aller Fahrsituationen bzw. des Fahrerwunsches. Im Rahmen dieses Prozesses werden die Tools und die Methoden zur Entwicklung und zur Optimierung der Betriebsstrategie neu entwickelt. Dafür sind neuartige Ansätze zur dynamischen Multiparameter-Optimierung zu erforschen.

Zur Bewältigung dieser komplexen Aufgabe ist eine enge Verbindung zwischen Berechnung/Simulation und Antrieb-Prüfstandsversuche erforderlich. Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) Umgebungen werden gezielt für die Anwendung im Zusammenhang mit dem Range Extender neu entwickelt.

### **2.2.2.1 Entwicklung Simulationsumgebung zur Basisentwicklung Betriebsstrategie im Labor**

Fahrzeug und Range Extender Einheit werden in Simulationsmodellen abgebildet, die die wichtigsten Sensorsignale wie im realen Fahrzeug reproduzieren. Diese Signale werden an das reale Fahrzeug-Steuergerät gesendet, zur Entwicklung der Betriebsstrategie in verschiedenen Fahrsituationen.

Abhängig vom Ladezustand der Batterie sind grundsätzlich zwei Betriebszustände mit dem Range Extender vorgesehen:

- Ladezustand/ Energie der Batterie über einer definierten Grenze: Rein elektrisches Fahren. Die Batterie wird in der Regel wie bei jedem rein elektrischen Fahrzeug über Plug-In geladen.
- Ladezustand/ Energie der Batterie unter einer definierten Grenze: Range Extender-Betrieb, d.h. Zuschaltung des Verbrennungsmotors. Zur Optimierung des Benzinverbrauchs sind in Abhängigkeit der Geschwindigkeit zwei Betriebszustände möglich:
  - Unterhalb einer Geschwindigkeit von ca. 60 km/h übernehmen Verbrennungsmotor und Generator die Stromerzeugung an Bord („serieller Betrieb“). Der Verbrennungsmotor kann somit in seinem verbrauchsoptimalen Betriebspunkt betrieben werden.
  - Über einer Geschwindigkeit von ca. 60 km/h übernimmt der Verbrennungsmotor gemeinsam mit dem Elektromotor direkt die Rolle des Antriebs („paralleler Betrieb“) über die Vorderachse. Möglich Überschussleistung des Verbrennungsmotors wird zum Laden der Batterie sowie für die Versorgung der Nebenaggregate verwendet.

Für die Entwicklung der Betriebsstrategie wird zunächst die SiL- und HiL-basierte Simulationsumgebung aufgebaut und die UPC zur Konfiguration der Betriebsstrategie aufgebaut. Des Weiteren wird ein realer Wahlhebel für die Fahrstufe und reale Fahrpedale in die Simulationsumgebung integriert. Anschließend wird das Restfahrzeugmodell auf einer zweiten Echtzeitplattform (Autobox) implementiert.

Nun ist das Echtzeitverhalten der Antriebssteuerung simulierbar durch Verwendung einer realen Hardware-Verkabelung sowie einer CAN-Vernetzung gemäß der Zielkonfiguration. Der Aufbau der Simulationsumgebung ist in Abbildung 28 dargestellt. Mit diesem Aufbau lässt sich nun eine Grundlage schaffen, mit der man nahezu die vollständige Bedatung der Betriebsstrategie für erste Fahrversuche festlegen kann.

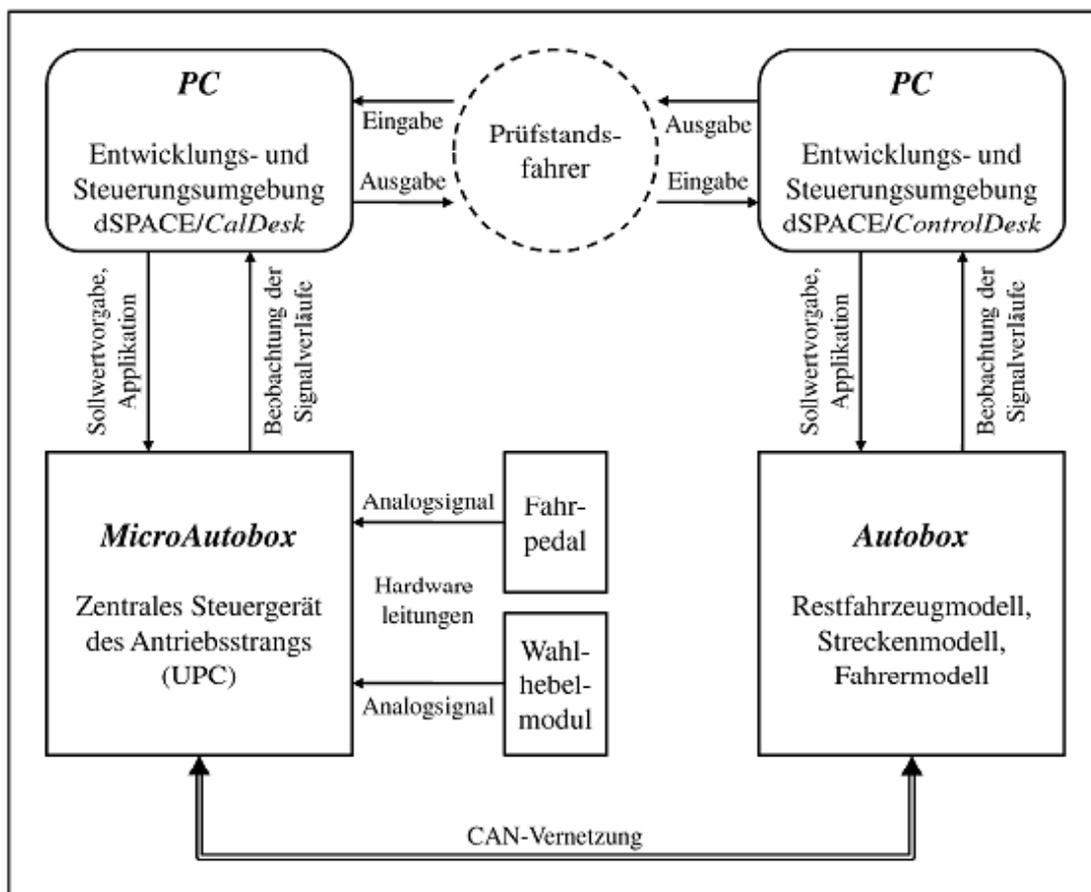


Abbildung 28:Aufbau der Simulationsumgebung

### 2.2.2.2 Entwicklung Simulationsumgebung zur Optimierung BS am REX-Prüfstand

Nachdem ein erster Ansatz der Betriebsstrategie mit Hilfe der SiL- und HiL-Umgebung erzeugt wurde, kann man nun mit diesen Daten die weitere Entwicklung am Prüfstand durchführen.

Zunächst wird das Fahrzeug in einem Simulationsmodell abgebildet. Der Prüfstand simuliert den Fahrwiderstand. Das Simulationsmodell liefert die Informationen, mit denen am Prüfstand die Fahrsituation reproduziert werden kann.

Somit können die Vorarbeiten für die Prüfstandsuntersuchungen abgeschlossen werden. Der Einsatz der Simulationsumgebung zur Optimierung der Betriebsstrategie am Prüfstand darf jedoch erst nach der Grundapplikation des Zuschaltverhaltens der REX-Einheit im Fahrzeug (Momentrampen und Drehzahlgradienten) erfolgen. Bild 29 zeigt die Vernetzung des Prüfstandsbaus.

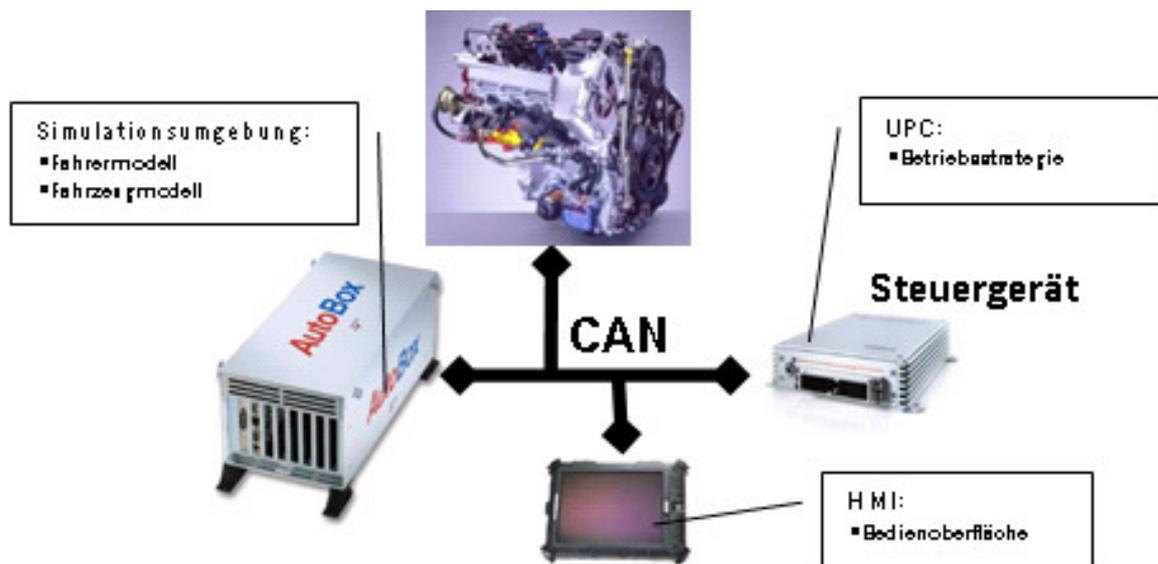


Abbildung 29: Vernetzung des HiL-Aufbaus mit der REX-Einheit am Prüfstand

### 2.2.2.3 Entwicklung und Optimierung der BS am REX-Prüfstand

Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel der Simulation sowie der Prüfstandsergebnisse erfolgt der Abgleich sowie die Optimierung der Betriebsstrategie.

Nachdem nun diverse Simulationen stattgefunden haben, wird der erste reale Prüfstandsaufbau durchgeführt. Dieser dient zur Entwicklung und Absicherung der Betriebsstrategie für den Direkttrieb. Die wesentlichen Komponenten sind dabei der Verbrennungsmotor, das Getriebe und der Generator.

Zur Realisierung der Betriebsfähigkeit des Generators wird ein Batteriesimulator verwendet, der das Strom- und Spannungsverhalten der Batterie simuliert.

Weiterhin werden verschiedene Betriebsarten und Betriebsartenwechsel untersucht. Diese Untersuchungen beinhalten:

- Anfahren der Arbeitspunkte für die Betriebsarten Seriell und Parallel Fahren.
- Absicherung der Betriebsartenwechsel zwischen Electric und Seriell Fahren sowie zwischen Seriell und Parallel Fahren.
- Ablauf Gangwechsel im Parallel Fahren.

- Funktionsprüfung der zentralen Momentenverrampung in allen Betriebsarten (Zweck: Festlegung Fahrzeugverhalten bei geänderter Lastpunktverteilung).

In Abbildung 30 ist beispielhaft einen Ablauf der wichtigen Größen und Zustände bei einem Schaltvorgang dargestellt.

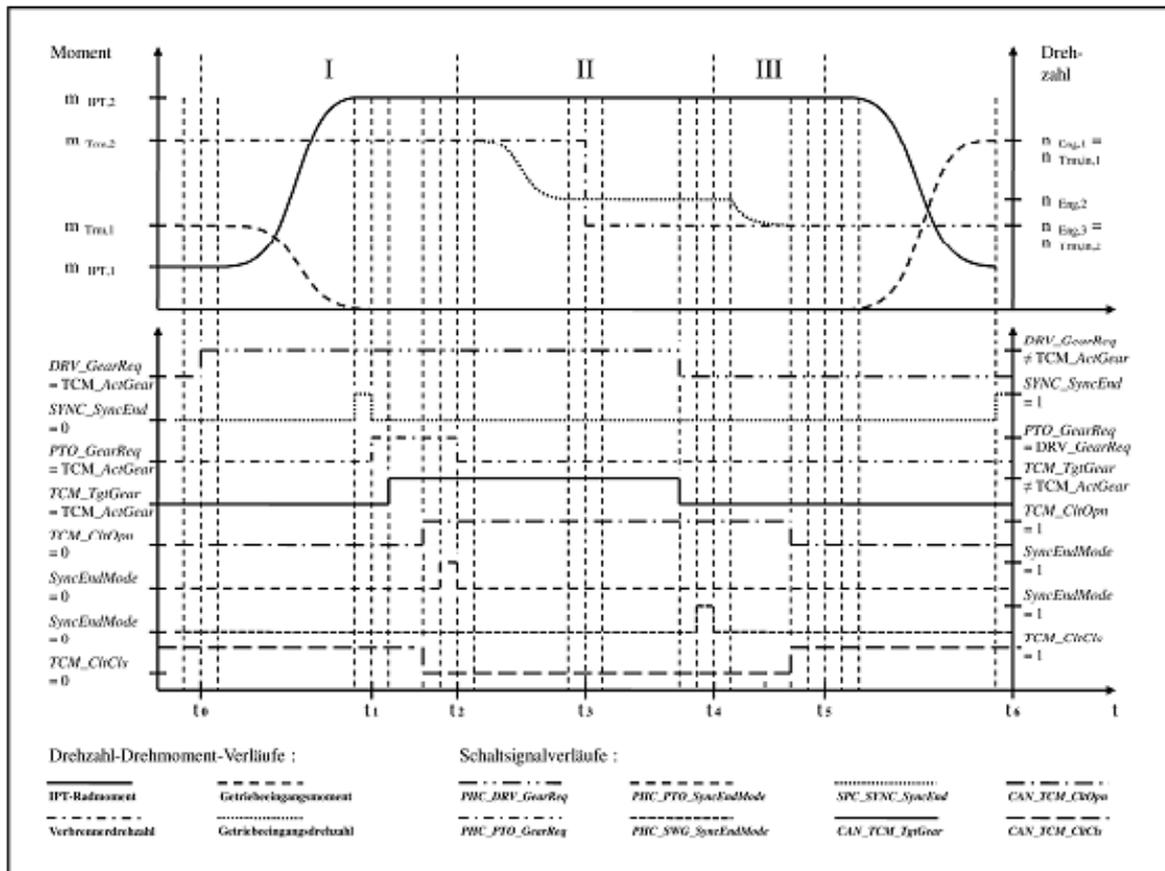


Abbildung 30:Ablaufsteuerung eines Schaltvorgangs

#### 2.2.2.4 Abgleich Simulation/ Messung zur Grundlagenentwicklung von Tools und Methoden

Nachdem nun sowohl Simulationsergebnisse als auch Prüfstandsmessungen vorliegen, müssen diese gegeneinander abgeglichen werden, um sie bewerten zu können. Mit den Ergebnissen des Abgleichs können Tools und Methoden mit dem Ziel der Verbesserung des Grundlagenverständnisses entwickelt werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse lässt sich nun kontinuierlich die Simulationsumgebung optimieren. Somit kann die Bedienbarkeit, die Anzeige und die vorangehende Bedatung verbessert werden.

Bereits vorhandene Tools lassen sich erweitern und somit lassen sich die Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien im Vorfeld grob abschätzen. Dadurch können Zusatzkomponenten schnell ausgetauscht werden und deren Einfluss auf das Gesamtsystem analysiert werden.

Möglich ist auch eine parallele Entwicklung einer generischen Betriebsstrategie, um mit kleinem Parametrisierungsaufwand auf Basis der entwickelten Simulationsumgebung Analysen durchführen zu können.

Bild 31 zeigt, wie die Messdaten während des Betriebs dargestellt werden (HMI-Umgebung) und wie die Daten für weitere Berechnungen aufbereitet dargestellt werden können.

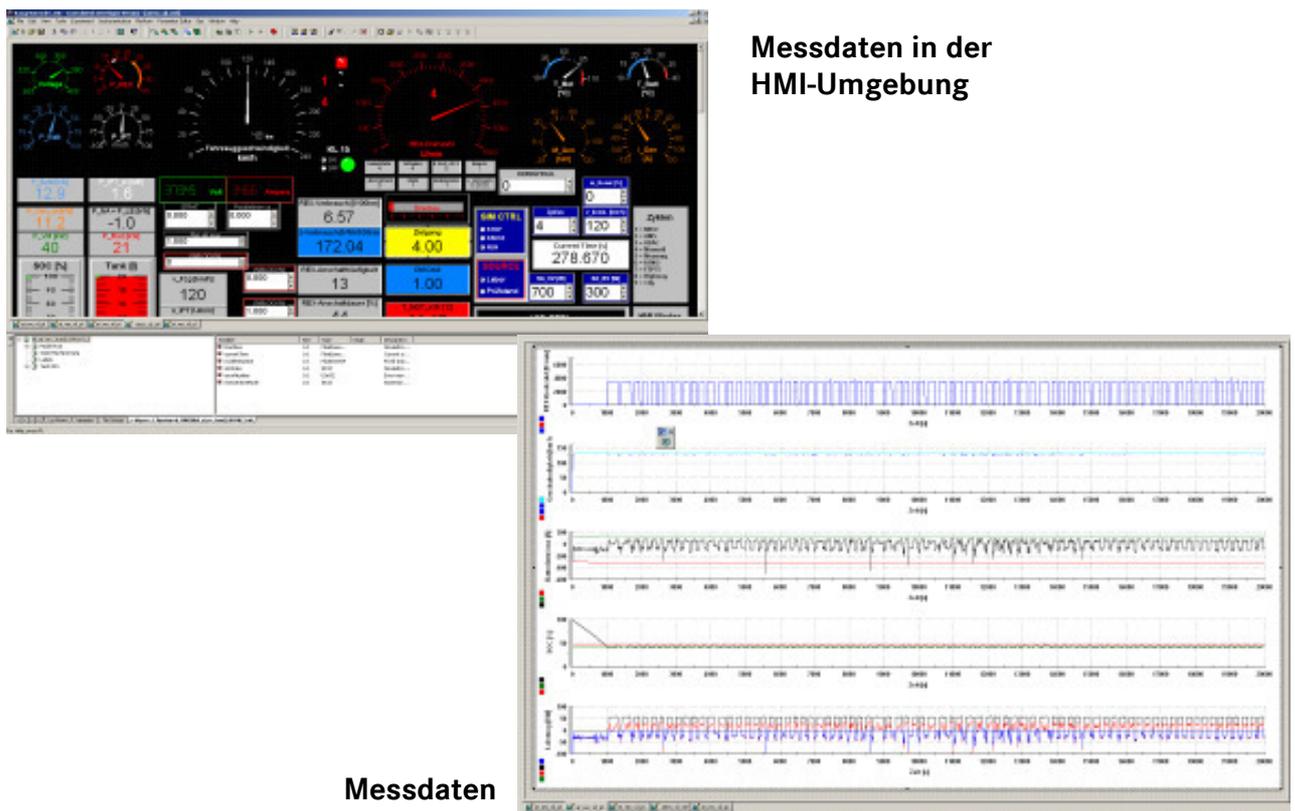


Abbildung 31: Umsetzung Messdaten in der HMI-Umgebung

### 2.2.2.5 Implementierung der Betriebsstrategie in den Versuchsträgern

Nachdem die Simulations- und Prüfstandsuntersuchungen nun abgeschlossen ist, muss in einem nächsten Schritt die entwickelte Regel- und Betriebsstrategie auf die Versuchsträger übertragen werden. Im Fahrzeug sind – aus gewonnenen Erkenntnissen durch Rollenprüfstandsmessungen und dem Fahrbetrieb auf der Straße - weitere Entwicklungen und Optimierungen der Betriebsstrategie hinsichtlich Fahrbarkeit notwendig.

Im Fahrzeug (Demonstrator 2) wird ein Prototypen-Steuergerät der Firma dSpace® verwendet. Auf diesem wird die der Stand der bis dahin entwickelten Betriebsstrategie implementiert. Des Weiteren muss gewährleistet werden, dass die benötigten Hardware I/O- und CAN-Schnittstellen bereitgestellt werden zur weiteren Software-Entwicklung. Um das Steuergerät ins Fahrzeug zu implementieren, wird die Pinnbelegung definiert und im Labor getestet. Analog wird die Prüfung der Vernetzungstopologie der CAN-Kommunikation durchgeführt (Abbildung 32).

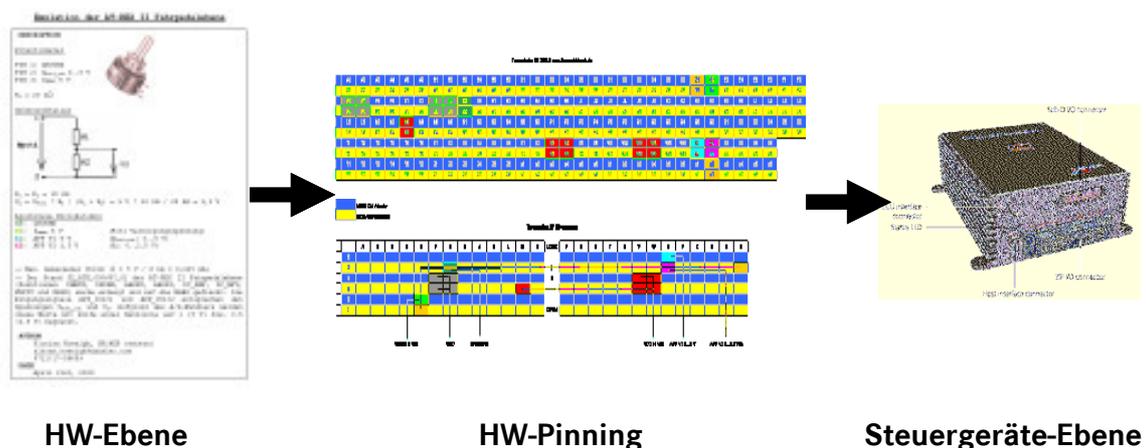


Abbildung 32: Ablauf hardwarebasierte Steuergeräte-Bedatung

### **2.2.3 Konzeption und Entwicklung der REX-Einheit mit Direkttrieb im Fronteinbau**

Die größte Herausforderung bei der Konzeption und Entwicklung der Range Extender Einheit im Fronteinbau ist das Packaging. Dort im Fahrzeug, wo in der Regel ein Verbrennungsmotor und ein Getriebe eingebaut werden, ist eine möglichst kompakte, hoch integrierte Antriebseinheit mit Verbrennungsmotor, kleinem automatisierten Getriebe (2 bis 3 Gänge), starkem Generator (mindesten 30 kW) und starkem E-Antriebsmotor (70/80kW) zu entwickeln.

Mit dem ersten Konstruktionsentwurf und der Erfahrung mit dem ersten Versuchsträger werden die Anforderungen an das Getriebe klar beschrieben (u.a. Packaging-Engpässe, Anzahl der Gänge und Übersetzungen), das Ziel-Getriebe wird anschließend final ausgelegt und entwickelt.

#### ***2.2.3.1 Konzeption und Entwicklung des Gesamtsystems (E-Antrieb, REX-Einheit)***

Die nächste Herausforderung auf dem Weg zur Integration eines batterieelektrischen Antriebes mit Range Extender ist die Gesamtsystem-Entwicklung zur Darstellung einer extrem kompakten Antriebseinheit im Fronteinbau. Dies bedeutet die Entwicklung neuartiger Package-Konzepte. Der Vorteil ist, die Antriebseinheit evtl. in anderen Fahrzeug-Baureihen platzieren zu können.

Zunächst erfolgt auf Basis der Vorauslegung und der Simulationsergebnisse eine Auswahl und Auslegung der Elektromotoren. Dabei bilden die E-Motoren (E-Motor/Generator) mit dem Getriebe und dem Verbrennungsmotor die Antriebseinheit. Hauptaufgabe ist, die Integration der Komponenten in das Gesamtpackage umzusetzen. Abbildung 33 zeigt das Packaging der Antriebseinheit im Zusammenbau aller Komponenten.

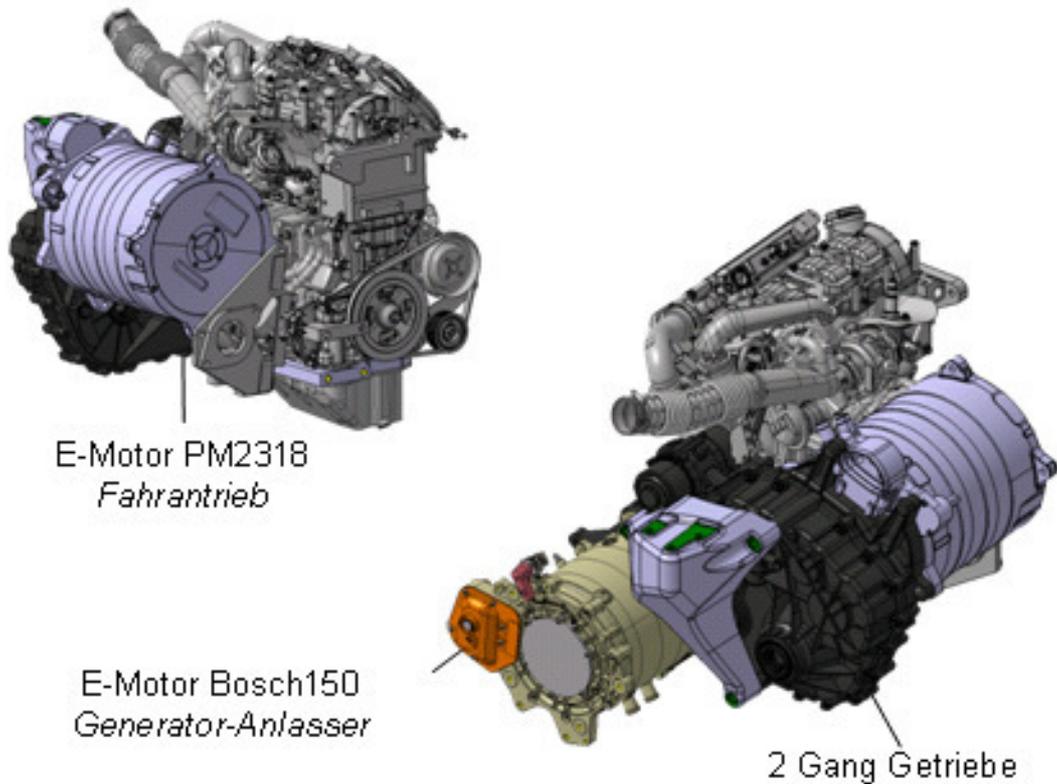


Abbildung 33:Antriebseinheit im Zusammenbau

### **2.2.3.2 Entwicklung eines kompakten 2/3-Gang-Getriebes für Direkttrieb**

Zu Beginn der Überlegungen steht ein kompaktes, automatisiertes Getriebe mit 2 bis 3 Gängen - ausgehend von Serienkomponenten – welches im nächsten Schritt zu entwickeln ist. Ein erster Konstruktionsentwurf des Getriebes wird im Auftrag an die Firma Getrag übergeben.

Das zielführende Konzept ist ein 2-Gang REX-Getriebe mit einem vereinfachten Aktorkonzept. Ein erster Package-Entwurf wird erstellt und dieser im vorhandenen Fahrzeugbauraum abgesichert. Des Weiteren werden die Schnittstellen zum Verbrennungsmotor, der E-Maschine und die Anbindung an das Fahrzeug festgelegt.

Nachdem diese Arbeiten abgeschlossen sind, wird bei der Firma Getrag aus dem Konzeptentwurf ein konstruktiver Entwurf als Arbeitsmodell abgeleitet. Parallel dazu werden Berechnungen zur Auslegung der Verzahnung, der Wellen und der Lager durchgeführt. Die Aktorik, d.h. die Schaltung und die Kupplungsaktuierung über die Schaltwalze, als auch eine Parksperrenmechanik werden ausgelegt. In Abbildung 34 ist das Schnittmodell des Getriebes mit Generator

und Elektromotor dargestellt. In Abbildung 35 ist die konstruktive Umsetzung in CAD dargestellt.

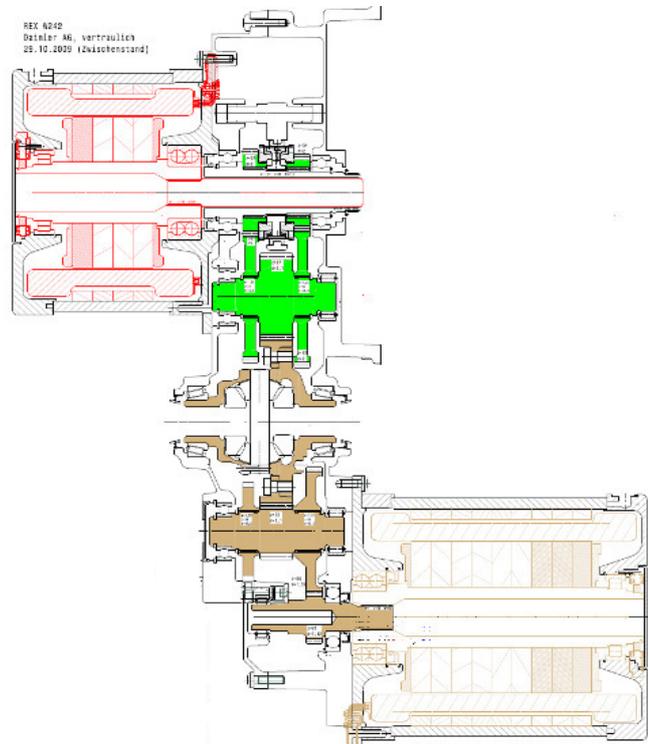


Abbildung 34: Schnittmodell des Getriebes inkl. Generator (rot) und Elektromotor (braun).

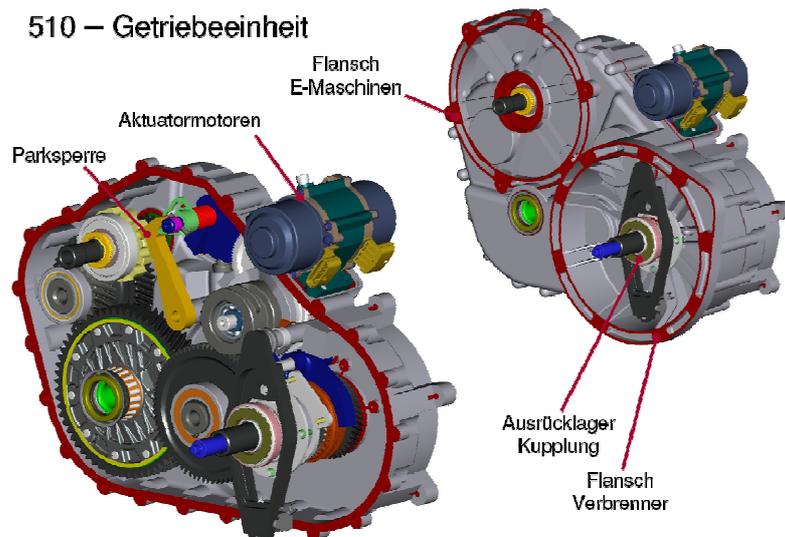


Abbildung 35: Entwurfsmodell des REX-Getriebes

### 2.2.3.3 Entwicklung Fahrzeugumfänge zur Aufnahme der REX-Einheit

Um den Antriebsstrang im Fronteinbau realisieren zu können, sind die Entwicklung von Motor-, Generator- und Getriebelagern und von Achssystemen zur Aufnahme der REX-Einheit notwendig.

Zur Umsetzung des Einbaus werden spezifische Lager und Bauteile konstruiert und gefertigt- diese sind (Abbildung 36):

- Verbindungselemente der Hauptlager zum Getriebe/VM.
- Verbindungselement Hauptlager zum E-Motor.
- Entwicklung und Fertigung einer neuen, antreibbaren Hinterachse.

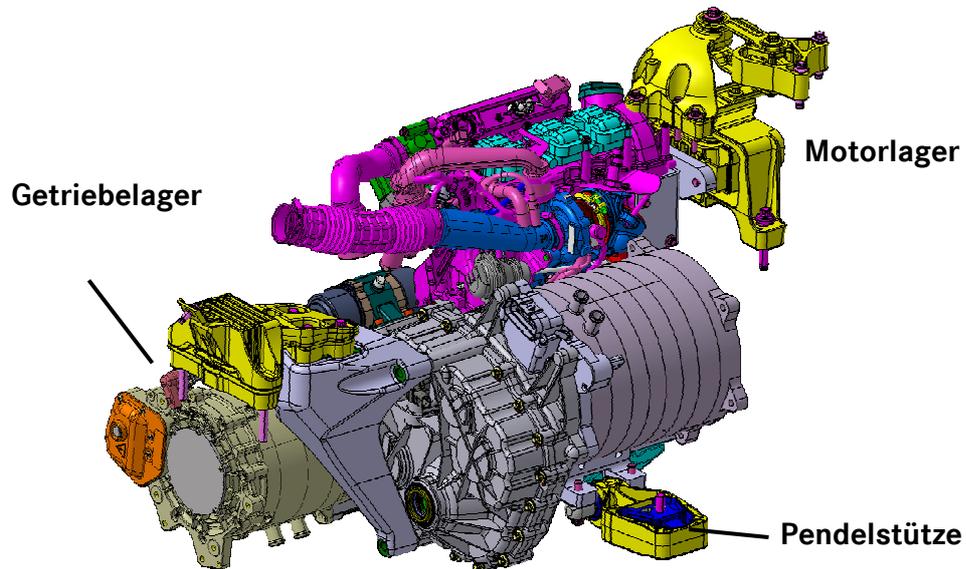


Abbildung 36: REX-Einheit mit Motor-, Generator- und Getriebelagern

## **2.3 Aufbau Demonstrator 2 mit Fronteinbau**

Die Voraussetzungen für den Fronteinbau wurden bis hierher geschaffen – im nächsten Schritt geht es um die Implementierung des Antriebstrangs in das Fahrzeug und um die Entwicklung der dazu benötigten, fahrzeugrelevanten Bauteile.

### **2.3.1 Entwicklung und Konzeption der Fahrzeugplattform**

Die in Kapitel 2.2 entwickelte gesamte Antriebseinheit (Verbrennungsmotor, Generator, Getriebe, elektrischer Traktionsmotor und Leistungselektronik) wird im Demonstrator 2 Front quer eingebaut. Dafür ist die Fahrzeugplattform und die Fahrzeugarchitektur zu entwickeln bzw. zu modifizieren

#### **2.3.1.1 Entwicklung gesamte REX-Einheit für Fronteinbau**

Die Integration der Antriebseinheit inkl. Range Extender wird nun in der Fahrzeugplattform des zweiten Versuchsträgers integriert. Hierzu bedarf es der Fertigung von Motor-Peripherieteilen wie z.B. Luftführung, Abgasführung, Ölwanne, Riementrieb und Zylinderkopf.

Mit diesen wird der Verbrennungsmotor umgebaut. Des Weiteren wird eine modifizierte Kupplung, Torsionsdämpfer und – bei der Fa. Getrag – das Getriebe gefertigt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Inbetriebnahme der Komponenten Getriebe, Kupplung und Schaltung im Zusammenspiel. Die Bauteile für die Lagerung der Antriebseinheit – Motorträger, Seitenwellenlagerung und Drehmomentstütze – werden gefertigt.

Anschließend wird der Antriebsstrang montiert und auf einer Prüfstandspalette gerüstet, so dass die Inbetriebnahme aller Komponenten im Zusammenspiel auf dem Prüfstand erfolgen kann.

In Abbildung 37 sind Fotos des komplett montierten Antriebstranges mit allen Komponenten, vormontiert auf der Prüfstandspalette zu sehen.

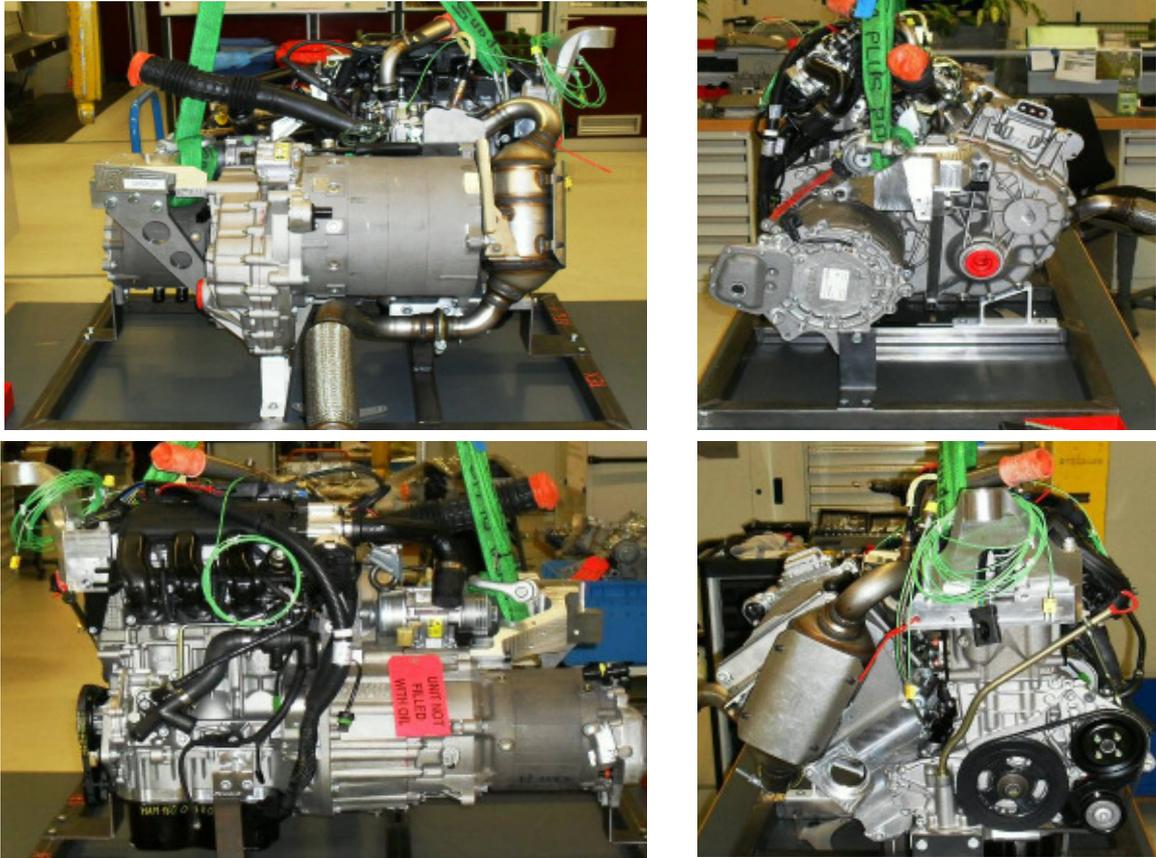


Abbildung 37:Antriebseinheit auf Prüfstandspalette

### **2.3.2.1 Fahrzeugentwicklung zur Integration der REX-Einheit im Versuchsträger Entwicklung gesamte REX-Einheit für Fronteinbau**

Ein weiterer Schritt in Richtung der Gesamtfahrzeug-Entwicklung ist die Integration der REX-Einheit in den Versuchsträger. Hierzu muss die Fahrzeugumgebung zur Aufnahme der Komponenten in front/quer Ausrichtung entwickelt und vorbereitet werden.

Durch Packageoptimierung des Rex-Triebkopfs einschließlich aller Subsysteme wird die Umsetzung zur Verwendung eines B-Klasse-Basisfahrzeuges (neuer Fahrzeugplattform) ohne Rohbaumodifikationen erreicht. Der Triebkopf setzt ohne Modifikationen auf die Serienmotorlager auf.

Alle zusätzlich erforderlichen Komponenten gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb konnten mit der bestehenden Fahrzeugstruktur kompatibel gestaltet werden. Hierzu zählen besonders die Hochvolt-Systeme mit ihrer Hochvolt-Verteilung und –Kontaktierung, aber auch das wesentlich kom-

plexere Kühlsystem. Dabei wurden die stark divergierenden Anforderungen der Verbrennungsmotorkühlung und der Kühlung von E/E-Komponenten in einem geregelten Kreislauf vereinigt.

In Abbildung 38 ist ein Package-Modell des verbauten Antriebstrangs im Fahrzeug zu sehen.

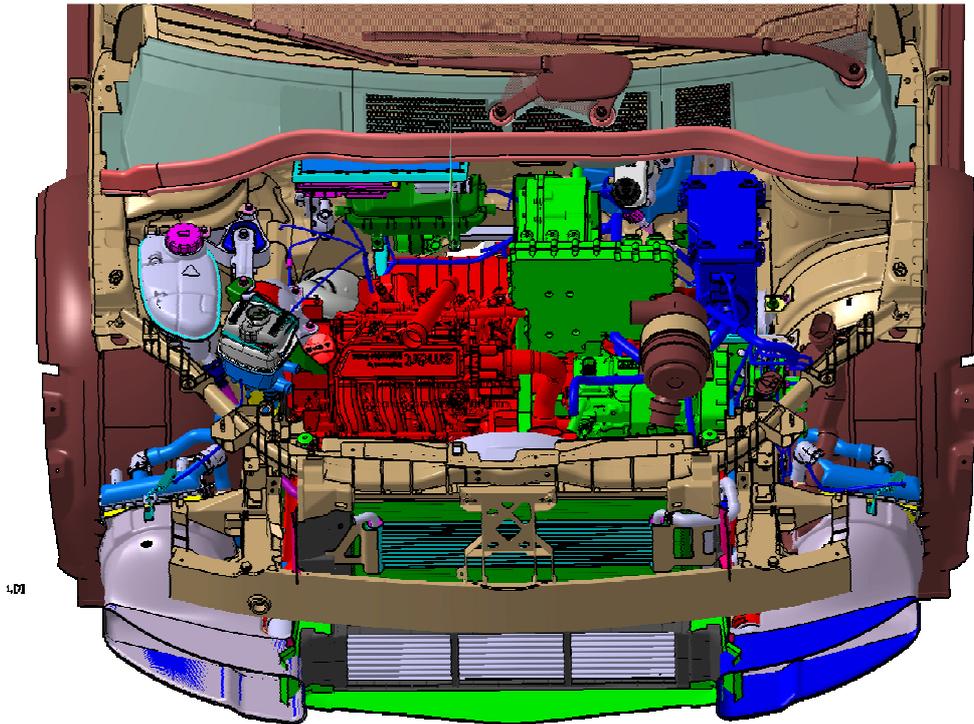


Abbildung 38: Package-Model des verbauten Antriebstrangs

### **2.3.2 Konzeption und Aufbau des zweiten Versuchsträgers**

In diesem Kapitel werden die Arbeiten zur Darstellung des zweiten Versuchsträgers beschrieben. Ähnlich wie beim ersten Versuchsträger werden auch hier zwei Range Extender Einheiten entwickelt und realisiert, damit die Fahrzeug-Versuche parallel auf dem Prüfstand reproduziert werden können.

#### **2.3.2.1 Auswahl und Entwicklung der Komponenten für REX-Einheiten**

Die Unterbringung des Gesamtantriebs - mit Ausnahme der Batterie und des On-Board-Laders - im Fronteinbau des Fahrzeugs steht nun an.

Dabei ist die zentrale Anbaustelle das Getriebe, an das die Komponenten Verbrennungsmotor, Generator, Traktionsmaschine und Leistungselektroniken angebaut werden. Dadurch wird ein Parallel-Betrieb durch Traktionsmaschine und Verbrennungsmotor ermöglicht. Wie in den vorangehenden Kapiteln beschrieben, gilt für die Entwicklung der Komponenten:

- Das Getriebe wurde für den Zweck als automatisches Schaltgetriebe mit 2 Gängen neu entwickelt.
- Übernahme von Generator + LE und Verbrennungsmotor aus Smart-Projekt mit Modifikationen.
- Traktionsmaschine + LE wurde neu entwickelt.

Abbildung 39 zeigt den Triebkopf mit der Hochvoltverkabelung sowie ein Foto des ATG 1.

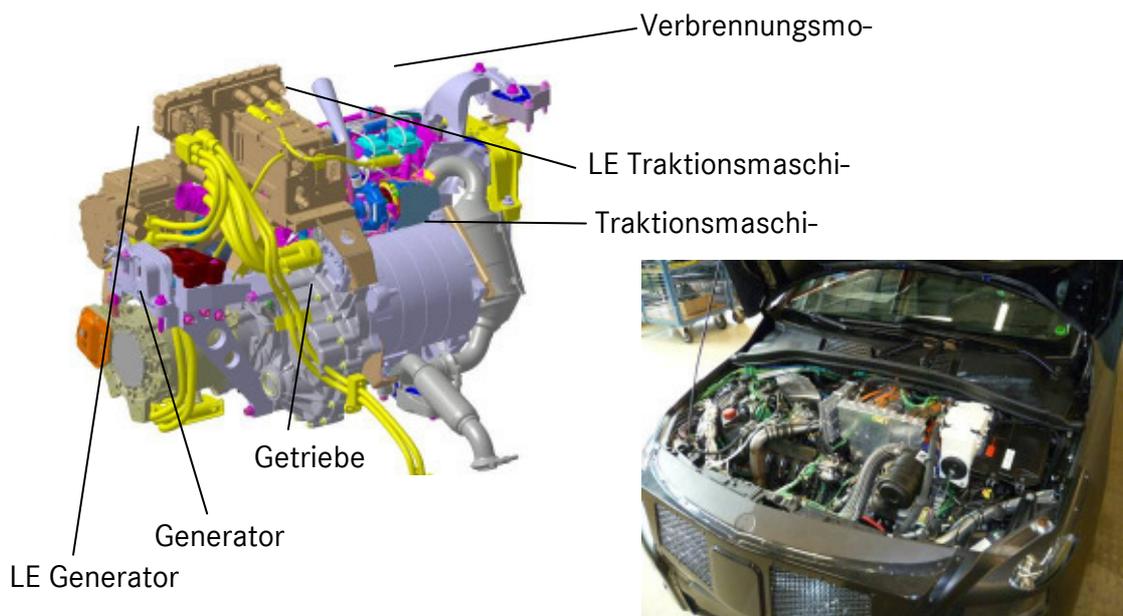


Abbildung 39:Antriebsstrang mit HV-Verkabelung/ eingebauter Zustand

Bei der Auswahl der Komponenten wurde ein Kompromiss zwischen Verfügbarkeit, Funktion und vor allem Bauraum, damit eine kompakte Antriebseinheit in Front des Basisfahrzeugs integriert werden kann. In Abbildung 40 ist die Auswahlmatrix der einzelnen Komponenten dargestellt. Wenn für Verbrennungsmotor, Generator und Batterie auf vorhandenen Komponenten zurückgegriffen werden konnte, für Getriebe und Elektromotor war eine neue Entwicklung erforderlich.

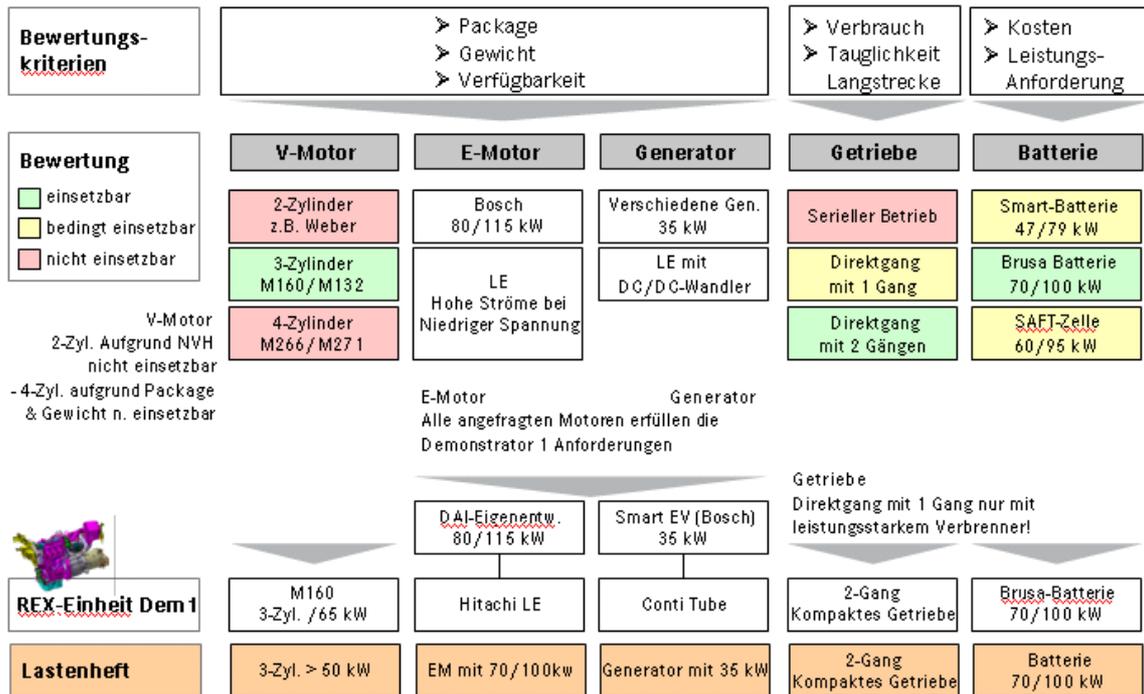


Abbildung 40:Komponentenauswahl für Demonstrator 2

### 2.3.2.2 Entwicklung Fahrzeugarchitektur zur Aufnahme REX-Einheit

Ein weiterer Umfang der Integration des Antriebsstrangs in das Gesamtfahrzeug ist die Entwicklung der Fahrzeugarchitektur zur Integration der elektrofahrzeugspezifischen Umfänge wie Leitungssatz und Sonderinstrumenten.

Zur Realisierung kurzer Hochvolt-Kabellängen und Darstellung eines kompakten Triebkopfs werden die Leistungselektroniken (LE) der Traktionsmaschine u. des Generators inklusive zweier Hochvolt-Verteiler (PDP A/B) auf einem festen Modulrahmen montiert.

Dabei sind PDP und LE sind fest verschraubt und Hochvolt-seitig über fixe Steckverbinder ange-bunden. Diese modulare Anordnung gewährleistet eine gute Zugänglichkeit und Austauschbarkeit der einzelnen Hochvolt-Komponenten.

Die zu erwartenden starken Vibrationen aufgrund des 3 Zylinder-Motors werden explizit bei der Bauteilentwicklung berücksichtigt und führen zu sehr steifen, vielfach verschraubten Gehäusen mit aufwendigen Schnittstellen. Da das Basisfahrzeug keinen hochgesetzten Fahrzeugboden für eine Unterflurmontage besitzt, wird die Hochvoltbatterie der Firma Brusa im Kofferraum untergebracht

und Batteriesubsysteme in der Reserveradmulde verbaut. Abbildung 41 zeigt Bilder der Hochvolt-Kontaktierung.

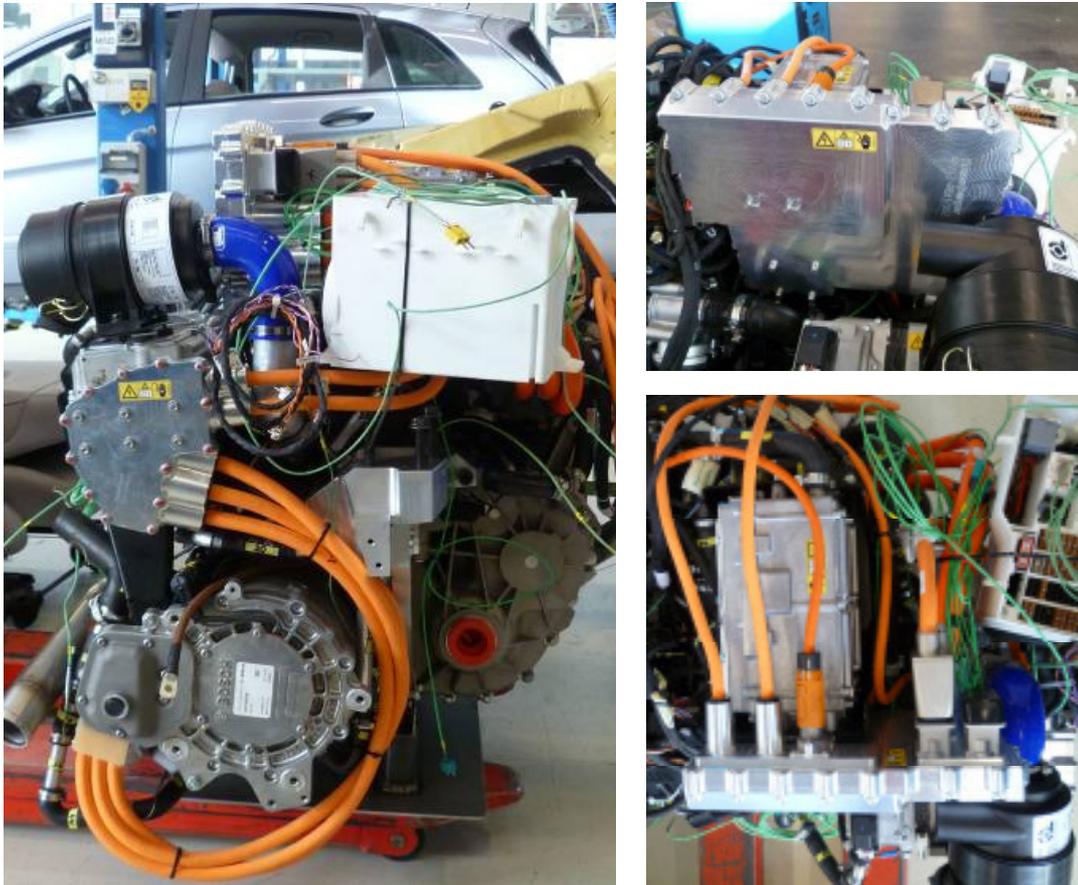


Abbildung 41: Hochvolt-Kontaktierung/ -Verteilung

### **2.3.2.3 Integration der REX-Einheit im Versuchsträger**

Ziel der nächsten Arbeitsschritte ist die Integration des elektrischen Antriebsmotors inkl. Leistungselektronik, der Batterie und des Hochvoltsystems in das Fahrzeug.

Der Triebkopf wird im Fahrzeug positioniert und lagerseitig angebunden. Parallel müssen die zum Betrieb des Motors erforderlichen Subsysteme festgelegt werden.

Um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten, müssen an gefährdeten Stellen Hitzeschutzbleche – vor allem im Bereich der Abgasanlage angebracht werden. Nach dem Verbau wird die Abgasanlage montiert.

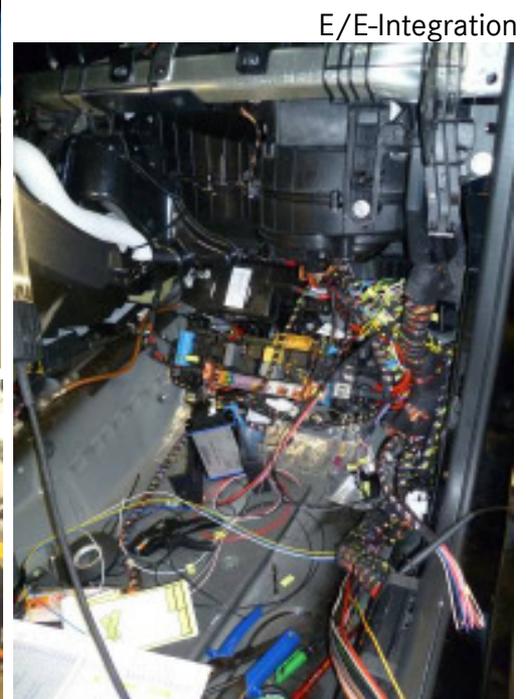
Der nächste Arbeitsschritt erfordert die Verschlauchung und Verrohrung der Kühlkreisläufe sowie des Klimakreislaufs zur Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums.

Für das gesamte Fahrzeug müssen die 12V-Systeme verlegt bzw. montiert werden. Dies beinhaltet die Verkabelung, die Kontaktierung sowie die Steuergeräte-Positionierung und Halterung.

Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Aufbau des Fahrzeugs aufgrund der Prüfstands- und Fahrversuche ist die Implementierung der Messtechnik und deren Verkabelung.

Zum Abschluss der Aufbauarbeiten wird die Hochvolt-Batterie samt deren Subsysteme (z.B. Crash-Rahmen, Kühlung, Ladegerät) in das Fahrzeug integriert.

Triebkopfintegration



Batterie- & Messtechnikintegration

Abbildung 42: Aufbau des Versuchsträgers



### 2.3.2.5 Softwareentwicklung und Applikation Getriebe und Kupplung der REX-Einheit

Nachdem nun die Voraussetzungen geschaffen sind, muss im nächsten Schritt die Entwicklung, Implementierung, Test und Applikation der Getriebesoftware zur Steuerung und Regelung der Komponente je nach Fahrsituation umgesetzt werden.

Die Softwarearchitektur zur Getriebeansteuerung wird erstellt; dabei wird die Definition der Softwaremodule inklusive der Funktionsinhalte (Kupplungs- und Gangansteuerung) erstellt und implementiert. Die Inhalte der „Low-Level-Software“ werden mit dem Zulieferer abgestimmt und erstellt – parallel werden Kommunikationsschnittstellen definiert und implementiert. Ein weiterer, wichtiger Inhalt der Software sind Testfunktion, Schutzfunktionen und Fehlerreaktionen – je nach eintretender Fahrsituation.

Zum Abschluss werden Funktionstests und Applikationen zur Überprüfung der Funktionalität und Absicherung der Ansteuerungssoftware werden für den Prüfstand und das Fahrzeug durchgeführt.

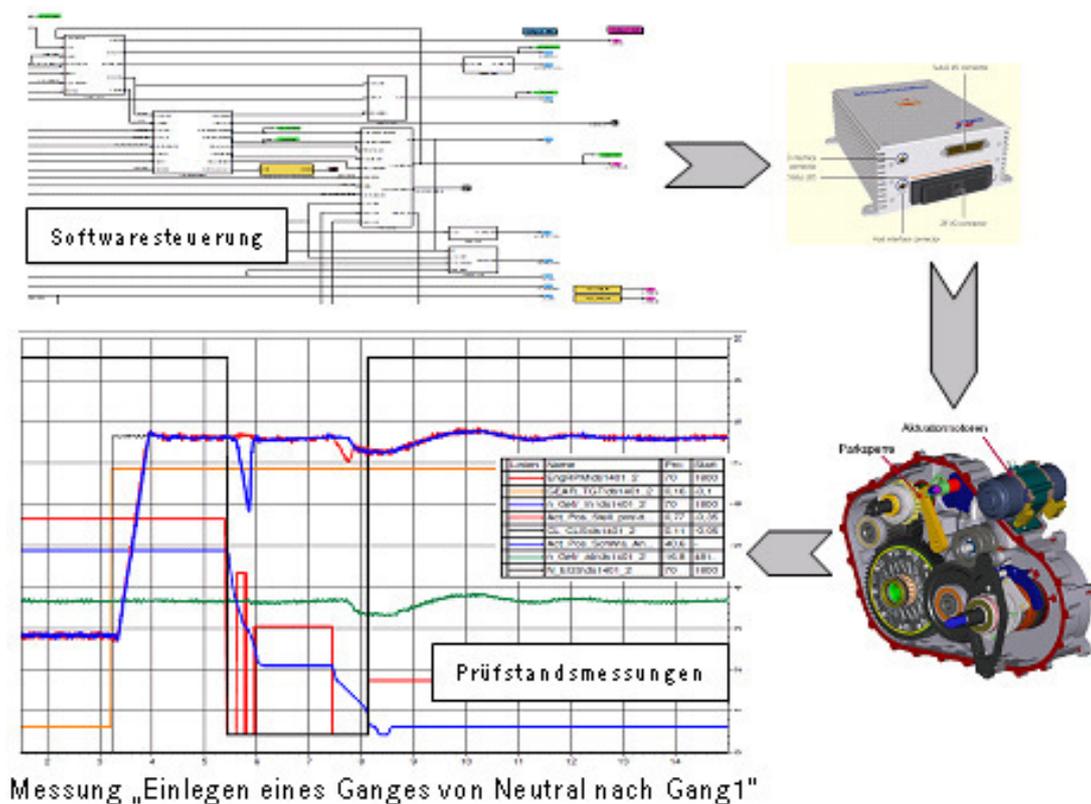


Abbildung 44: Getriebeansteuerung und Prüfstandsmessungen

### 2.3.2.6 Inbetriebnahme des Versuchsträgers

In einem letzten Schritt, bevor die Funktionstests mit dem Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand durchgeführt werden können, werden alle Fahrzeugfunktionalitäten in Betrieb genommen mit anschließender Systemprüfung und den entsprechenden Sicherheitstests.

Dabei wird der Antriebsstrang des Demonstrators 2 mit einem A-Muster Rechner (UPC) in Betrieb genommen. Die 12Volt-Verkabelung und die Kommunikation zwischen allen Antriebskomponenten werden am Prüfstand einer Systemprüfung unterzogen. Parallel wird das Hochvolt Netz am Prüfstand auf Sicherheit und Funktion getestet.

Alle Antriebskomponenten werden im Zusammenspiel einem systematischen Test unterzogen. Dabei werden alle Betriebsarten - die elektrische Fahrt, die seriell hybridische Fahrt und die parallel hybridische Fahrt - erprobt (siehe Abbildung 45).

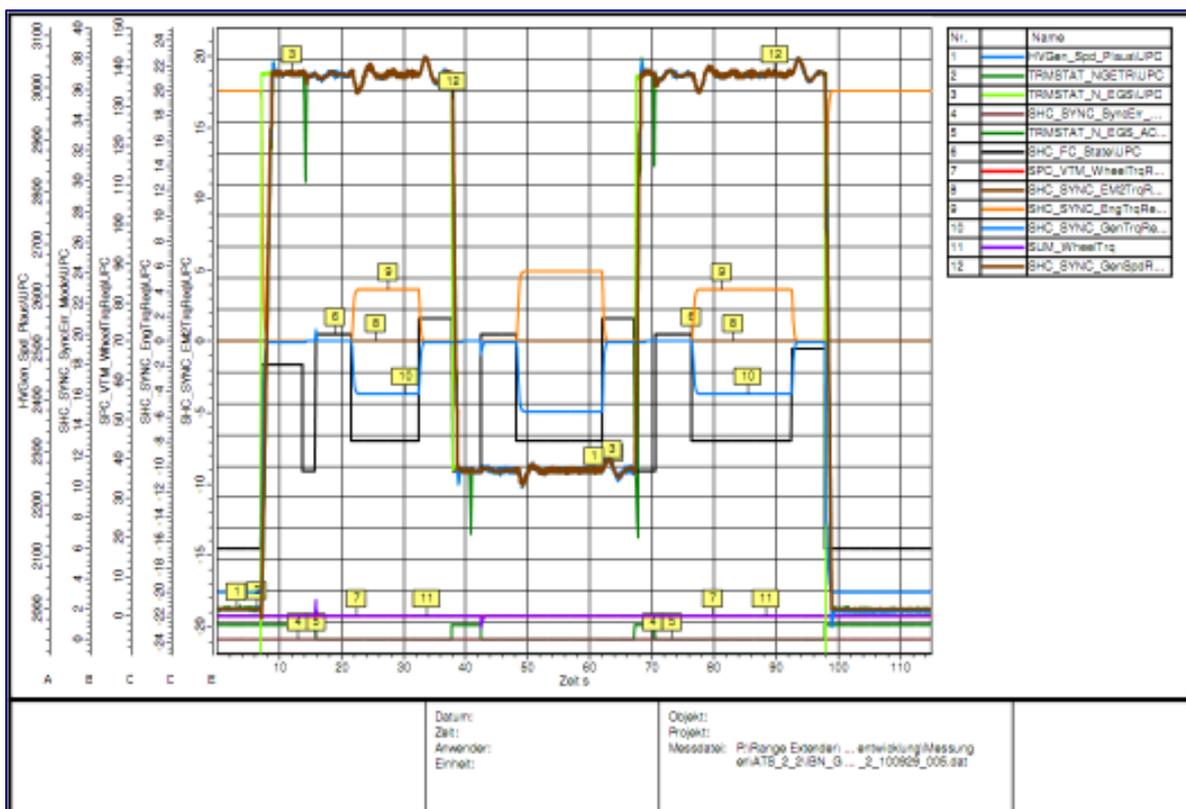


Abbildung 45: Betriebsartenwechsel seriell nach parallel am Prüfstand

### 2.3.2.7 Funktionstest des Versuchsträgers am Rollenprüfstand

Der abschließende Schritt zum Aufbau des Demonstrators 2 ist die Durchführung der Funktionstests und der Basismessungen am Rollenprüfstand. Nach Inbetriebnahme des Versuchsträgers wurde im Versuch ein Funktionstest von allen relevanten Betriebsarten durchgeführt. Die Versuche wurden zunächst am Prüfstand und dann im Fahrzeug durchgeführt.

Die folgenden Umfänge werden geprüft und freigegeben:

- Das 12V Bordnetz.
- Die HV-Sicherheit des Bordnetzes und der Komponenten.
- Die Funktion Laden der Fahrzeugbatterie am 230 V Netz.
- Die verschiedenen Betriebsarten ElectricDrive, SerialDrive und ParallelDrive.
- Die Fahrleistung im Fahrversuch von 0...100 km/h.

Neben den beschriebenen Freigaben wird das Fahrzeug auf der Teststrecke des Mercedes-Werks in Sindelfingen ausgiebig erprobt. Die Abbildung 46 zeigt einige Ergebnisse der Inbetriebnahmeprüfungen.

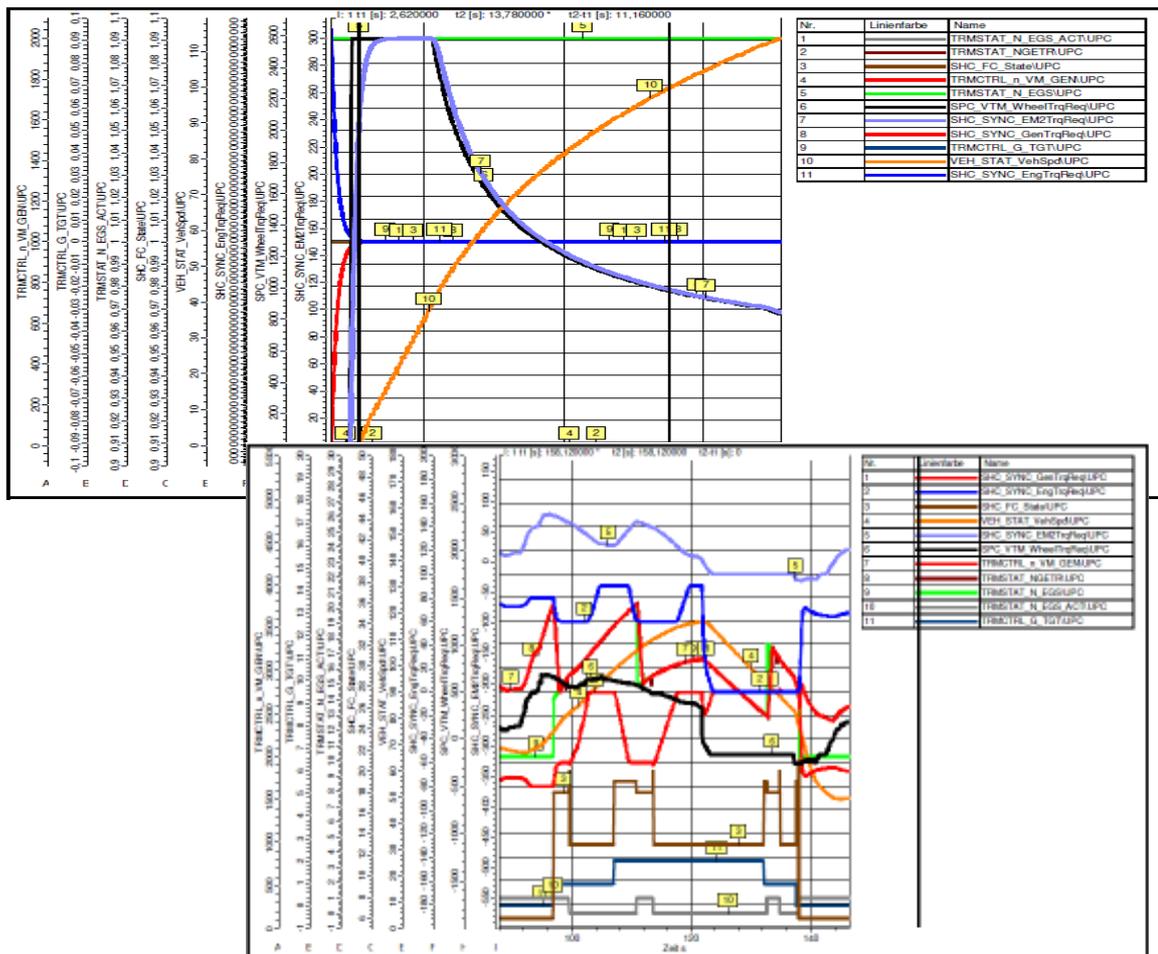


Abbildung 46: Dokumentation Inbetriebnahme

## 2.4 Nachweis Potential/ Funktionalität

Das batterieelektrische Fahrzeug mit Range Extender ist ein neuartiges Konzept, für das noch keinerlei Erfahrungswerte vorhanden sind. Nachdem der Versuchsträger aufgebaut und in Betrieb genommen ist, gilt es nun den Nachweis für das Potential des Fahrzeugs sowie die Funktionalität zu erbringen.

### 2.4.1 Nachweis Leistungspotenzial und Funktionalität für alltagstauglichen Einsatz

Dieses Arbeitspaket umfasst die Versuche und Tests zum Nachweis des Potenzials und der Funktionalität der Range Extender Einheit mit Direkttrieb unter Berücksichtigung eines alltagstauglichen Einsatzes.

#### 2.4.1.1 Beschreibung und Umsetzung auf Rollenprüfstand typischer Nutzerprofile

Der Nachweis des Potenzials und der Funktionalität des Range Extender Konzeptes mit Direkttrieb wird auf Basis des ersten Versuchsträgers erfolgen. Das Fahrzeug wird mit umfassender Messtechnik zur Aufnahme der relevanten Größen ausgerüstet und sowohl auf dem Rollenprüfstand als auch in normalen Verkehrsverhältnissen auf öffentlichen Strassen erprobt (Alltagsbetrieb).

Somit kann im Fahrversuch das Potential und die Funktionalität des Versuchsträgers nachgewiesen werden. Um reproduzierbare Fahrzustände erzeugen zu können bzw. erfassen zu können werden Meßstellen in das Fahrzeug integriert und über die CAN Schnittstelle erfasst. Die folgenden Funktionalitäten für den Alltagsbetrieb werden umgesetzt:

- Laden der Fahrzeugbatterie am 230 V Netz.
- Klimatisierung der Fahrgastzelle mit HV- Heizung und Klimaanlage.
- Nachweis des Fahrkomforts in allen Betriebsarten und Betriebsartenwechsel
- Fahrleistung im Alltagsbetrieb.

Abbildung 47 zeigt ein Fahrprofil im typischen innerstädtischen Betrieb (reale Messung in normalen Verkehrsbedingungen).

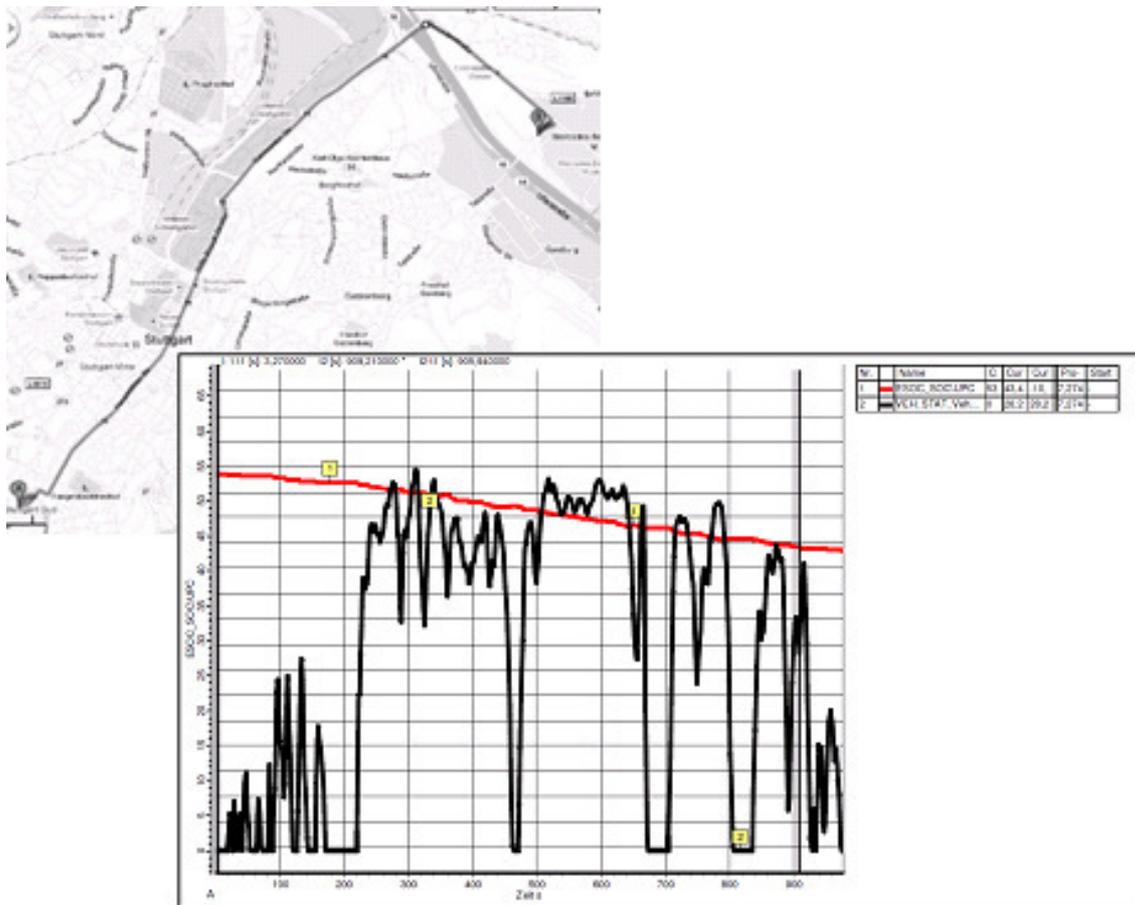


Abbildung 47: Innerstädtische elektrische Fahrt 7km Stuttgart 8:30Uhr (Winter 10°C). Die Batterie wurde um 10% SOC entladen.

#### 2.4.1.2 Ersatzteile - Reparaturen

Ein wichtiger Umfang der Forschungsarbeiten im Rahmen des REX-Projektes ist die Bereitstellung von Ersatzteilen zur Sicherstellung des Erprobungsbetriebes sowie die Durchführung von Reparaturen.

Dabei wird eine entsprechende Ersatzteil-Strategie im Rahmen der Lieferantenauswahl berücksichtigt. Die Beschaffungswege für Ersatzteile werden - in Abstimmung mit dem konzerneigenen Einkauf - mit verblockten Baureihen und Antrieben festgelegt. Je nach Abhängigkeit der Ersatzteilkosten werden diese in der Entwicklungswerkstatt gelagert oder im Schadensfall kurzfristig bereitgestellt. Durch die parallele Weiterentwicklung der Komponenten wird bei einer Substitution eine Verbesserung des Reifegrades erzielt. Dabei wird zuvor eva-

liefert, ob eine Substitution tatsächlich notwendig ist oder ob eine gezielte Reparatur ausreicht.

Die Ausfall- bzw. Fehlerursachen durch Reports in die Weiterentwicklung der Ersatzkomponenten mit ein.



**PDU (Bestellung)**



**Reimentrieb + Umlenkrolle (auf Lager)**

Abbildung 48: Beispiel eines Bestellteils und eines Lagerteils als Ersatz.

#### **2.4.1.3 Versuchsmessungen auf Einfahrbahn zum Nachweis des Leistungspotentials**

Diese Untersuchungen umfassen die Fahrzeugvorbereitung, die Durchführung und die Auswertung der Versuchsmessungen. Dabei werden verschiedene Betriebsstrategien erprobt sowie verschiedene Konfigurationen im Fahrzeug simuliert.

Es werden verschiedene Fahrsituationen erprobt und auf ihr Potential hin untersucht. Der Betrieb des Range Extenders mit Direkttrieb in den beiden Gangstufen ist komfortabel und im Hinblick auf das Verbrauchspotential angeraten.

Die Untersuchung des Schaltkomforts im Direktdurchtrieb zeigen, dass die Zugkraft bei der Schaltung nicht unterbrochen wird und somit ist der Komfort als gut zu bewerten.

Die Rückwirkung der Momenten-Ungenauigkeit des Generators gegenüber dem Verbrennungsmotor wird im Hinblick auf das Fahrverhalten untersucht. Im Mittel liegt die Ungenauigkeit bei ca. 8 Nm. Dieser Wert ist für den Versuchsträger tolerierbar.

Bei leerer Batterie kann das Fahrzeug durch den Range Extender sicher betrieben werden. Der Fahrbetrieb im Direktdurchtrieb wird jedoch eingeschränkt.

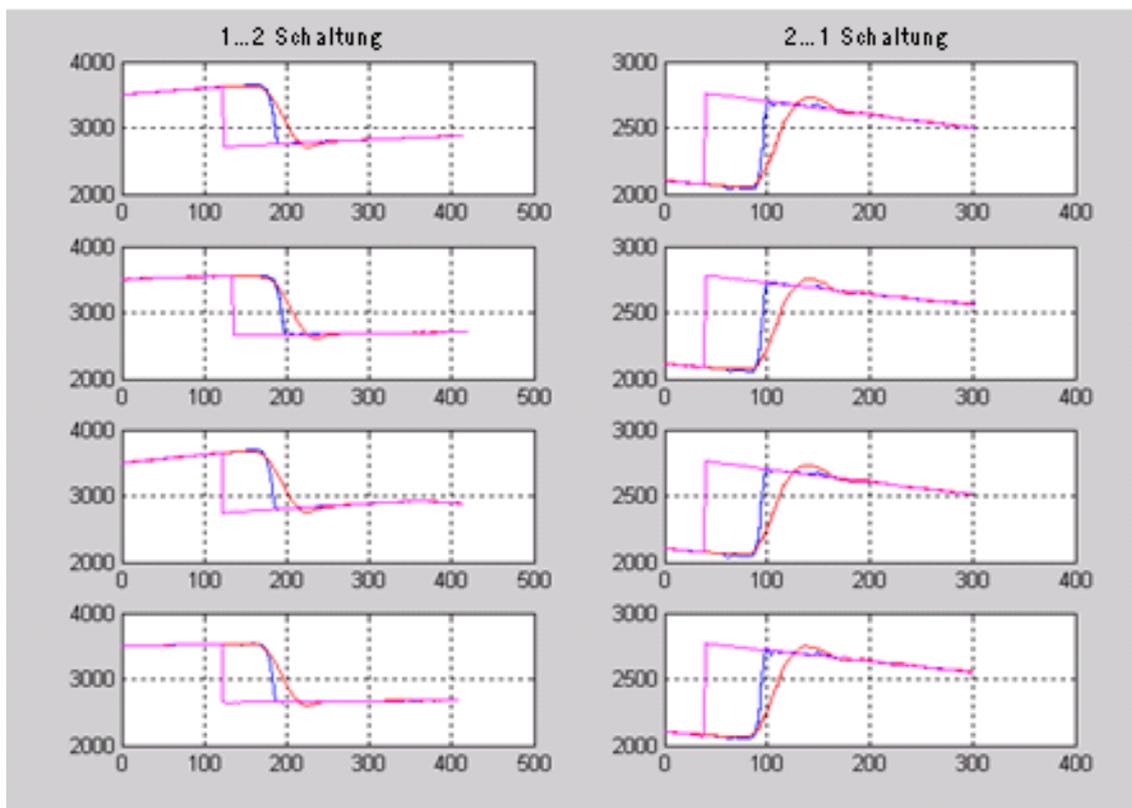


Abbildung 49: Untersuchungen des Schaltkomforts

#### 2.4.2 Evaluierung des Alltagsbetriebs im Rahmen eines Fahrzeugtests

Zur Berücksichtigung des Alltagsbetriebs bei der Erprobung des Range Extender Fahrzeugs mit Direkttrieb findet eine alltagsnahe Versuchsmessung sowie eine Auswertung und Bewertung der Ergebnisse statt. Basis dieser Versuche

bilden die typischen Alltags-Fahrprofile, die auf Basis der E-Mobilitäts-Studie erstellt werden.

### 2.4.2.1 Beschreibung typischer Fahrprofile im Alltagsbetrieb

Auf Basis der vorhandenen Studie über E-Mobilität wird ein typischer Alltagsbetrieb des Fahrzeugs mit Range Extender abgeleitet. Dieses beinhaltet die Anzahl und Häufigkeit der Fahrten, typische Tagesfahrleistungen und Anforderungen an die batterieelektrische Reichweite.

Die folgende Grafik in Abbildung 50 zeigt die zurückgelegten Distanzen verschiedener Nutzergruppen:

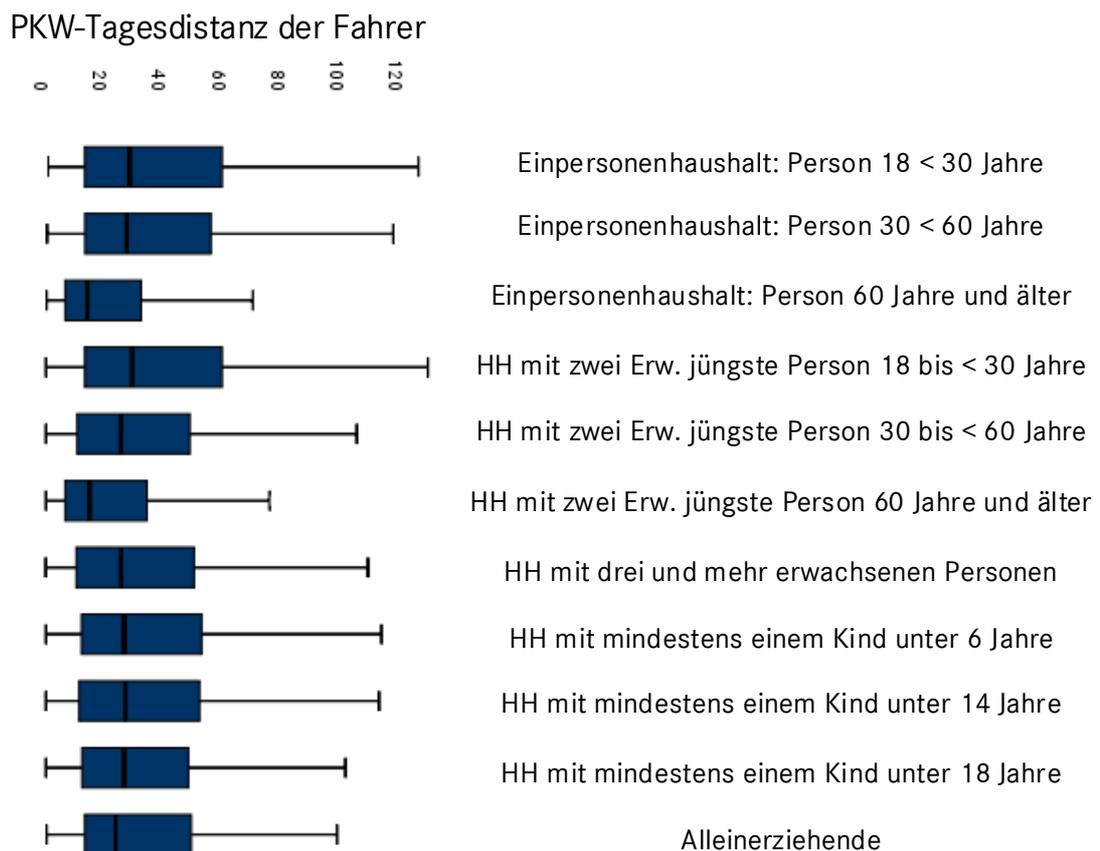


Abbildung 50: Tagesstrecken unterschiedlicher Nutzergruppen

Weitere Ergebnisse sind im Folgenden aufgelistet:

- Durchschnittlich werden etwas mehr als 3 Wege / Tag zurückgelegt.
- 50% aller Pkw-Fahrer sind am Tag weniger als 30 km unterwegs, 75 % der Pkw-Fahrer legen weniger als 60 km am Tag zurück.
- In Kernstädten ist die Fahrleistung etwas geringer als in ländlichen Regionen, dagegen ist der Fahrzeitaufwand in Städten etwas höher als in ländlichen Regionen.
- Die Anforderungen an die batterieelektrische Reichweite wird von Befragten häufig deutlich höher als der tatsächliche Mobilitätsbedarf angegeben. Gründe sind hier z.B. seltenere Ladeintervalle. Preissensible dagegen präferieren Reichweiten von 50 km um den Kaufpreis gering zu halten.

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse einer Umfrage dargestellt, bei der die Gründe hinterfragt wurden für eine Entscheidung pro/ contra Range-Extender-Fahrzeug. Dabei fällt auf, dass den befragten Personen eine hohe Fahrdynamik sowie die Wirtschaftlichkeit eines solchen Fahrzeuges wichtig ist.

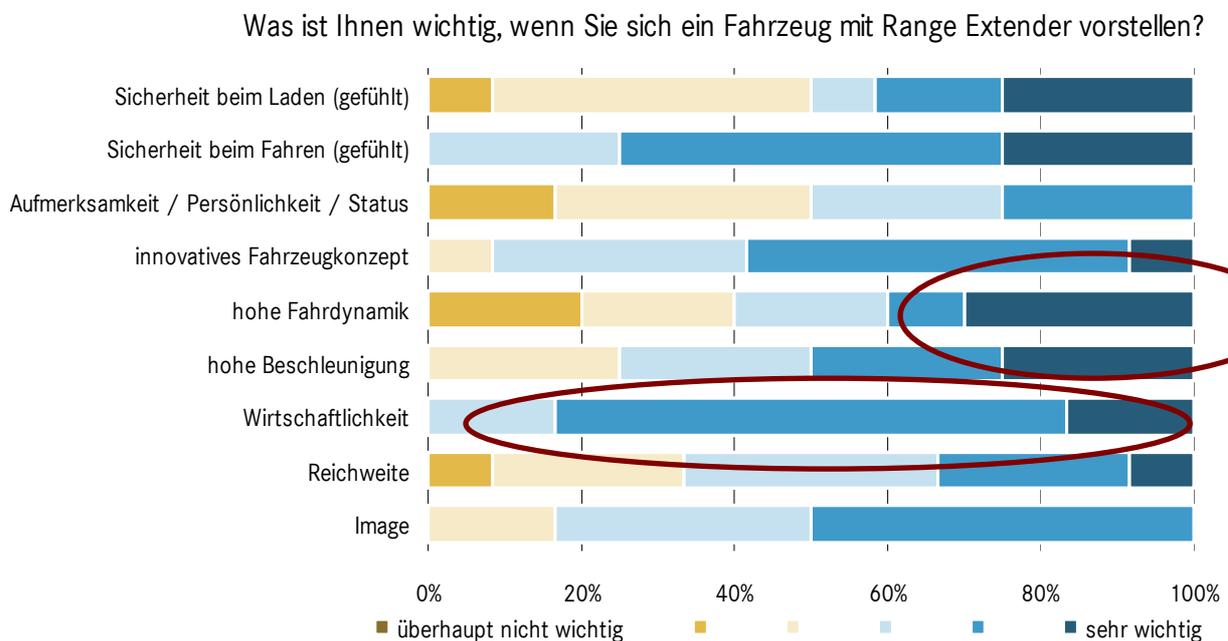
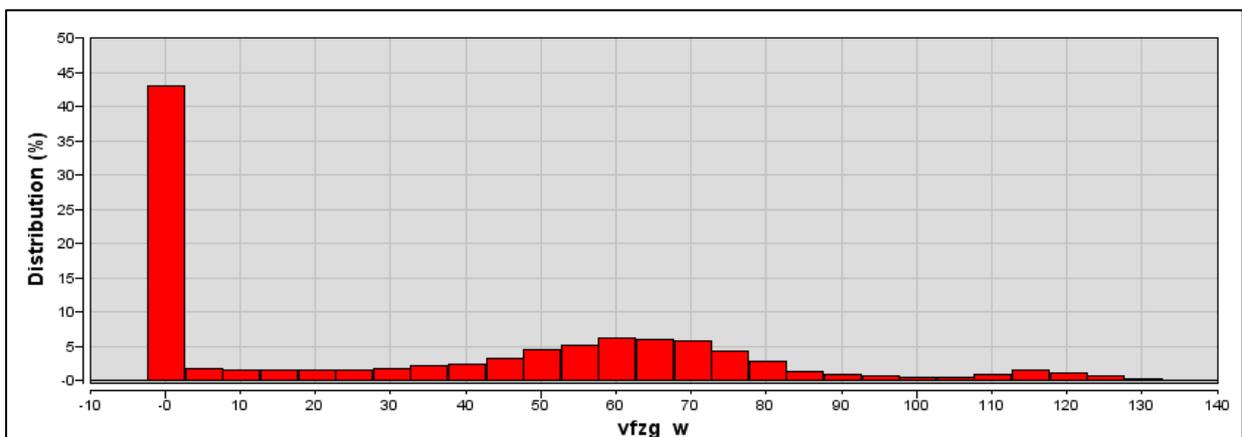


Abbildung 51: Ergebnisse der Umfrage Range Extender

### 2.4.2.2 Beschreibung Testumfang zur Darstellung der Alltagstauglichkeit

Für die Auslegung und Bewertung der Betriebsstrategie werden zum einen Standard-Daimler interner Fahrzyklen herangezogen, die auf Messungen im Testfeld mit realen Verkehrsverhältnissen zurückgreifen. Zum anderen werden Fahrprofile aufgezeichnet, die einen hohen Stadt-Anteil berücksichtigen, die aus selbst durchgeführten Fahrten abgeleitet wurden. Die beschriebenen Zyklen sind kundennahe Fahrzyklen. In Abbildung 52 ist die Geschwindigkeitsverteilung eines typischen Stadt-Fahrprofils.

Häufigkeitsverteilung mit Stillstandszeit



Häufigkeitsverteilung ohne Stillstandszeit

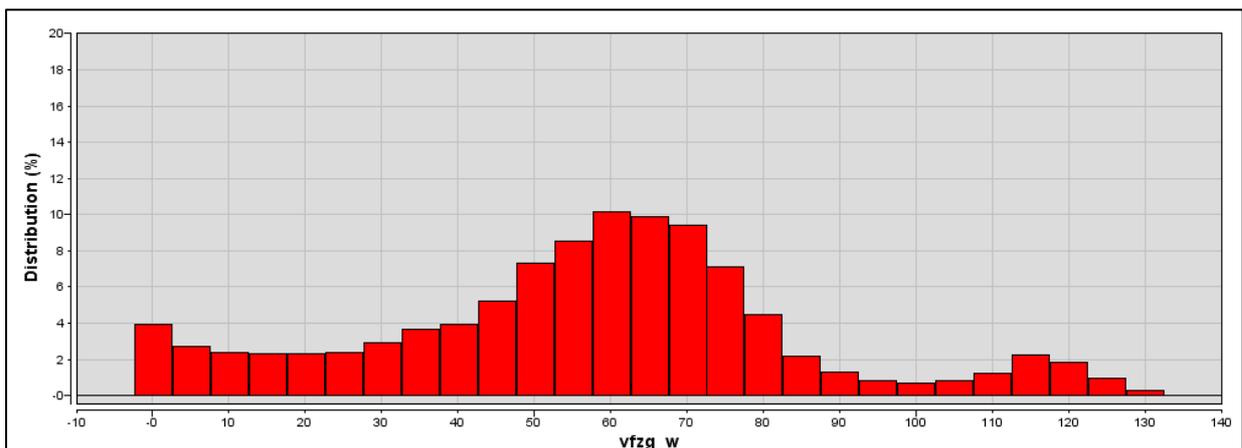


Abbildung 52: Beispiel LA-Zyklus

### 2.4.2.3 Alltagsnahe Versuchsmessung

Nachdem alltagstaugliche Profile beschrieben sind, werden nun die Versuche sowohl auf den Rollenprüfstand als auch auf der Einfahrbahn durchgeführt.

Dabei wird das Fahrzeug im alltagsnahen Versuch von verschiedenen eingewiesenen Fahrern auf einem abgesperrten Testgelände erprobt. Bei der Erprobung werden in Summe mehr als 3000 km zurückgelegt. Hierbei hat sich das Konzept des Range-Extenders als zweckmäßig erwiesen.

Des Weiteren werden mit dem Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand Standard-Tests durchgeführt um das NVH-Verhalten zu erproben. In Abbildung 53 ist beispielhaft die Messung auf dem Rollenprüfstand des NEFZ dargestellt.

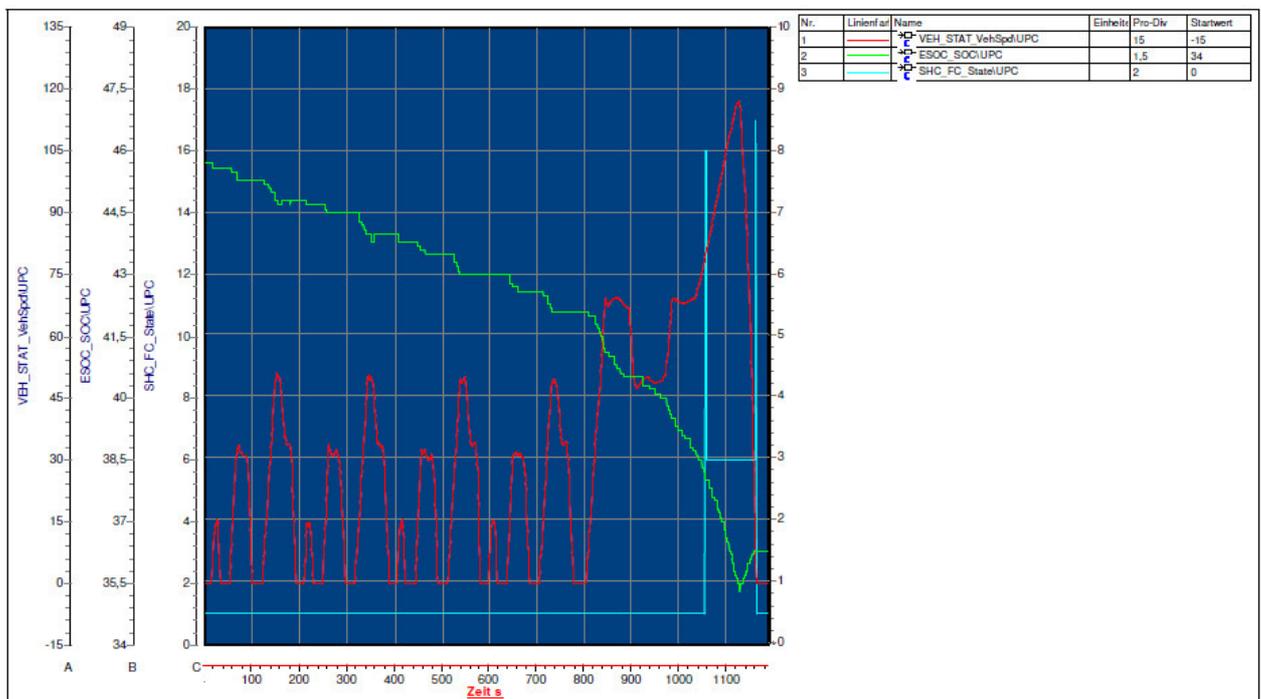


Abbildung 53:NEFZ-Tauglichkeit im Rollenprüfstandsversuch nachgewiesen

### 2.4.2.4 Vergleich seriell/ direkt

In nun folgendem Kapitel wird zwischen dem reinen seriellen Range Extender und Range Extender mit Direkttrieb verglichen. Die Versuche am Rollenprüfstand gewährleisteten die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse - Insbesondere beim Vergleich verschiedener Antriebsarten und Betriebsstrategien.

In Abbildung 54 sind die Betriebszustände des Range Extenders mit Direkttrieb dargestellt. Der Range Extender ohne Direkttrieb hat nur die Betriebsmodi *Electric-Drive* und *Serial-Drive*.

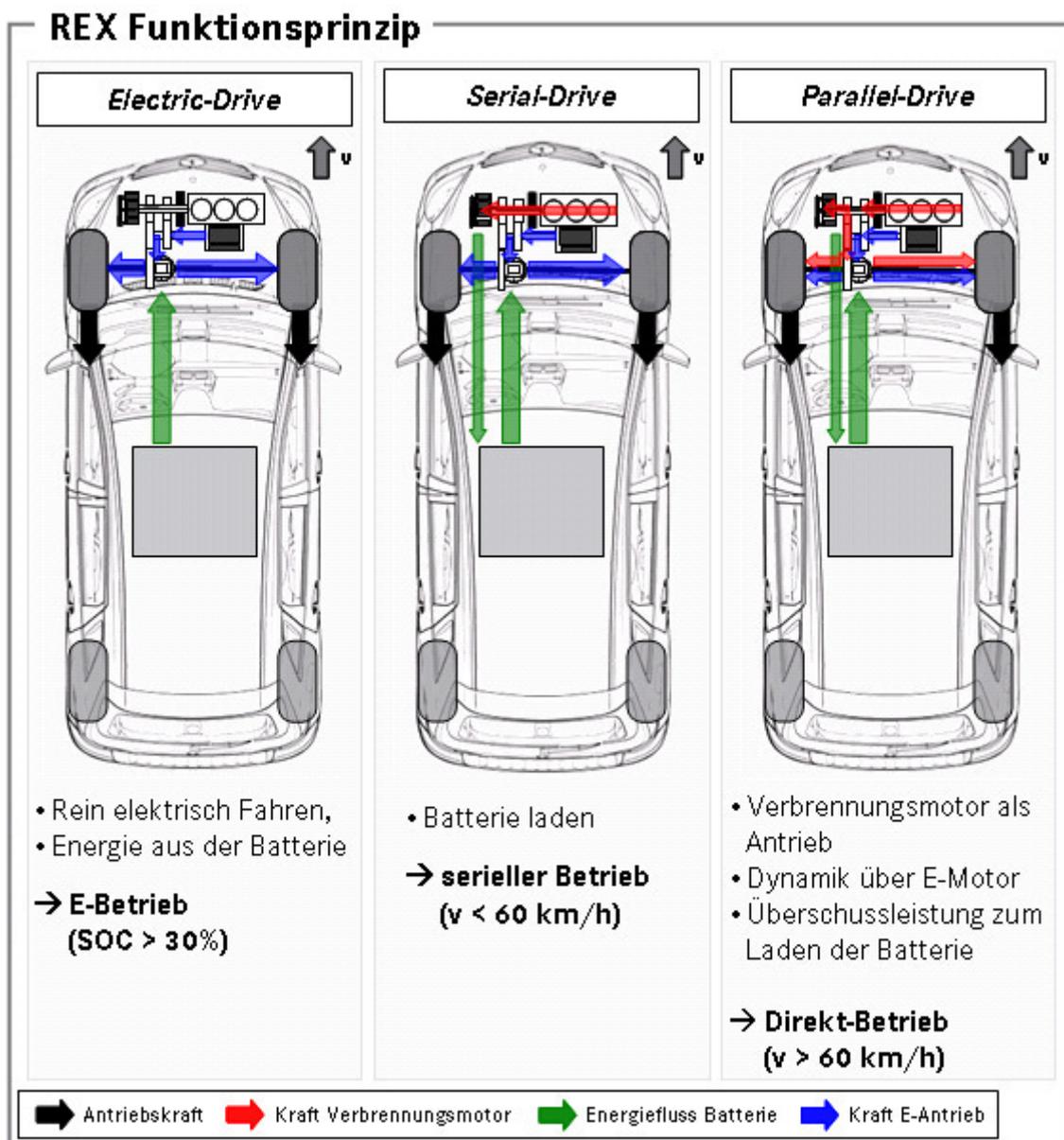


Abbildung 54: Betriebsarten von Range Extender

Die Ergebnisse der Verbrauchssimulation einer Fahrstrecke Stuttgart-Hamburg in Abbildung 55 zeigen einen deutlichen Verbrauchsvorteil für den Direkttrieb mit 2-Gang-Getriebe.

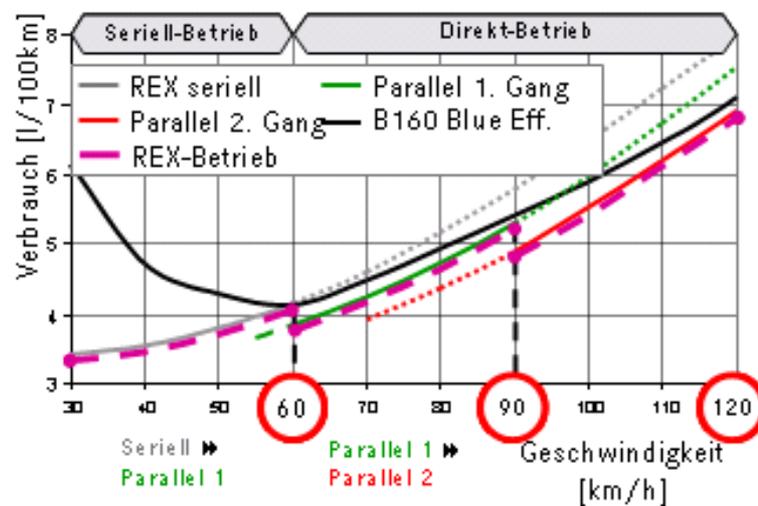
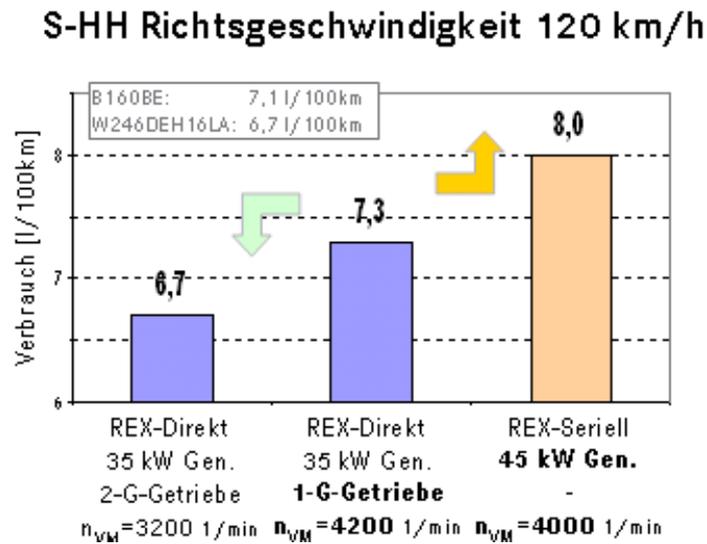


Abbildung 55: Verbrauchsvergleich zwischen serielltem Betrieb und Direkttrieb.

## 2.5 Entwicklung und Darstellung des Lastenheftes für den REX mit Direkttrieb

Nachdem die ersten Fahrzeuge aufgebaut wurden und Versuchsmessungen erfolgreich durchgeführt wurden, konnte das Konzept bestätigt werden. Auf Basis dieser Untersuchungen gilt es nun, ein Lastenheft für die Entwicklung des Fahrzeugs in der Serie darzustellen.

### 2.5.1 Beschreibung REX-Konzept je nach Nutzungsverhalten

Dieses Kapitel beschreibt die Erstellung eines Lastenheftes für eine Range Extender Einheit für zukünftige Fahrzeuge im C-Segment. In das Lastenheft fließen die Erkenntnisse aus dem Nachweis des Leistungspotenzials und der Funktionalität für alltagstauglichen Einsatz und aus den gesammelten Erfahrungen bei der Entwicklung der einzelnen Komponenten und der kompakten Range Extender Einheit im Fronteinbau ein.

#### 2.5.1.1 Erstellung Lastenheft für REX mit Direkttrieb für zukünftige universell einsetzbare Fahrzeugkonzept-Vergleiche

Bei der Erstellung des Lastenheftes müssen die folgenden Themenschwerpunkte beschrieben werden:

- Fahrleistung (Beschleunigung, Spitzengeschwindigkeit). Die Zielwerte hierfür sind:

0-100km/h:	< 13 s
Vmax:	160 km/h
- Reichweite im elektrischen Betrieb, gesamte Reichweite.

Reichweite NEFZ:	> 80 km rein elektrisch; < 500 km insgesamt
Verbrauch NEFZ:	< 5,0 l/100km
- Festlegung von geeigneten Packagevarianten in Bezug auf Lastverteilung, Einbaulage, Crashverhalten etc. In Abbildung 56 ist ein Vergleich des Packages des REX-Antriebsstranges und eines konventionellen 4-Zylinder Dieselmotors mit Doppelkupplungsgetriebe. Die Range Extender Einheit ist in dem gleichem Bauraum eines konventionellen Antriebs unterzubringen.
- Auslegung der Leistungsverhältnisse zwischen elektrischem Antrieb und dem Range Extender (siehe Abbildung 57).

In Abbildung 58 ist das Schema des Range Extender Konzeptes dargestellt.

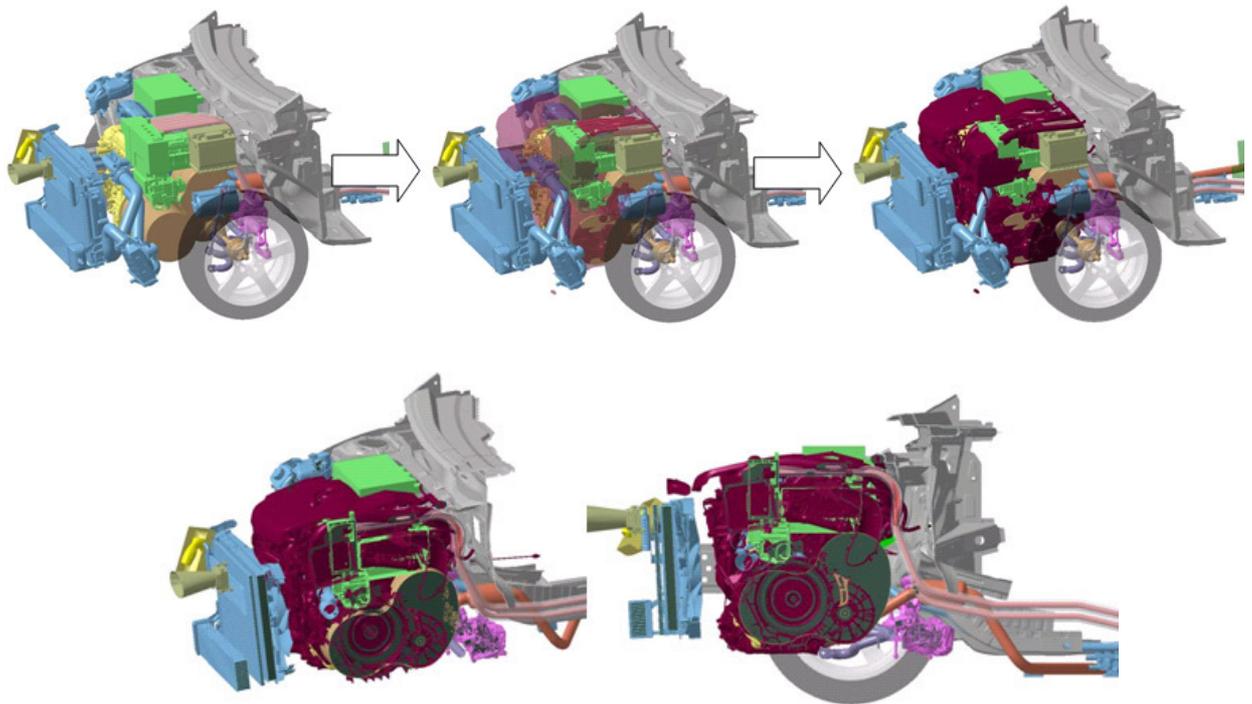


Abbildung 56: Package-Vergleich REX-Antriebsstrang mit konventionellem 4-Zylinder-Dieselmotor inkl. Doppelkupplungsgetriebe (dunkelrot).

		T (Moment) / I (Stromstärke)		P (Leistung)	
		Dauer	Peak	Dauer	Peak
Verbrennungsmotor 	<ul style="list-style-type: none"> <li>3-Zylinder aufgeladener Otto motor mit ca. 1,0L Hubraum</li> </ul>	>100Nm @ 2000-4000rpm		>50kW @ 5500rpm	
Getriebe 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Getriebe mit 2 automatisch schaltenden Gängen und Kupplung.</li> <li>REX-spezifische Entwicklung.</li> </ul>	VM: >100 Nm EM: >200 Nm Gen: >100 Nm	VM: >100 Nm EM: >250 Nm Gen: >100 Nm	VM: >50 kW EM: >60 kW Gen: 35 kW	VM: >50 kW EM: >100 kW Gen: >45 kW
E-Maschine und LE 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permanent erregte Synchronmaschine Maschine</li> </ul>	>200Nm	>250Nm	>60kW	>100KW
Generator und LE 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permanenterregte Synchronmaschine in P1-Anordnung an Verbrennungsmotor gekoppelt.</li> </ul>		>100 Nm	35kW	>45kW
Batterie* 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flüssigkeitsgekühlte Batterie mit Li-Ionen Zelle</li> </ul>			BoL: > 60 kW	BoL: > 90 kW

\*50% SOC (BoL/EoL)

Abbildung 57: Zielwerte der einzelnen Komponenten für Range Extender

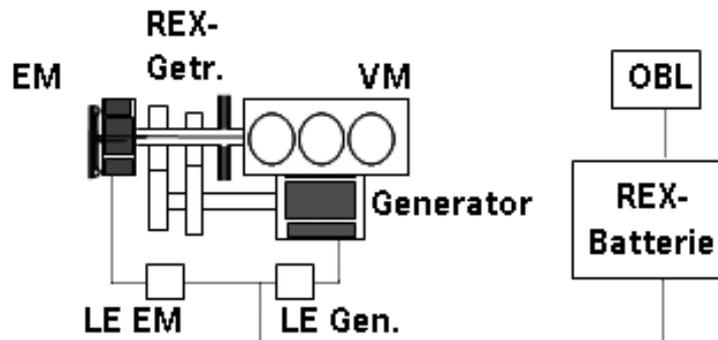
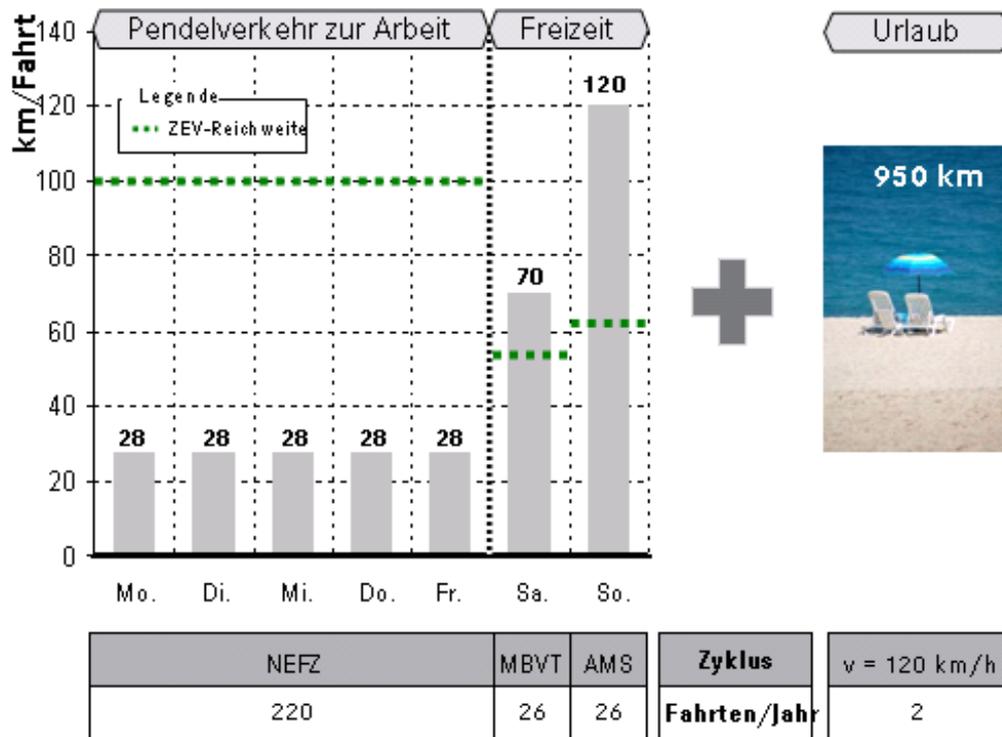


Abbildung 58: Schema des Zielkonzeptes für Range Extender

### 2.5.1.2 CO<sub>2</sub>-Bilanz bei Fahrzeugnutzung

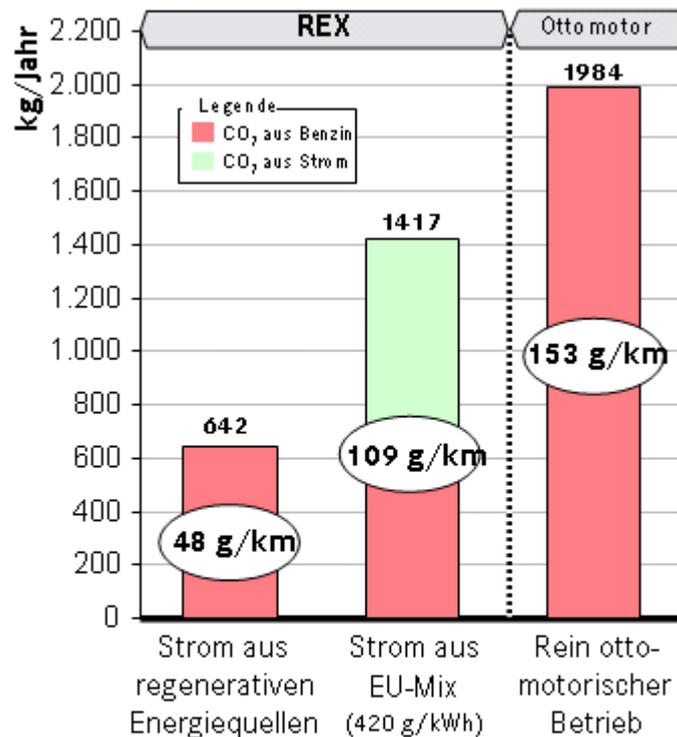
Die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird sowohl mit konventionellen Abtriebsarten sowie Hybrid-Antrieben verglichen und bewertet. Dabei zeigt sich, dass der Range Extender Antrieb auch im Kundeneinsatz großes Potential zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen hat.

Für diesen Vergleich wird ein für die fahrzeugklasse typisches Kundenprofil angenommen (Abbildung 59). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen werden für dieses Fahrprofil bei der Verwendung unterschiedlicher Energiequelle berechnet (Abbildung 60)



Die Jahreslaufleistung<sup>1</sup> von 13.000 km wird zu 72 % (9.295 km) im rein elektrischen Betrieb absolviert.

Abbildung 59:typisches Kundenprofil für die untersuchte Fahrzeugklasse.



Die REX Einheit sorgt im Kundeneinsatz für eine Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Abbildung 60:CO2-Bilanzen und

### 2.5.1.3 Berechnung und Simulation

Die im Rahmen des Projektes entstandenen Tools und Methoden, die auf Basis der innerhalb der Erprobung gesammelten Daten laufend validiert und aktualisiert werden, werden ebenfalls dokumentiert.

Dadurch konnten unterschiedliche Simulations-Umgebungen aufgebaut werden wie z.B.:

- Quasi-stationär: Für Grobauslegung oder Delta-Betrachtungen.
- Dynamische Simulation: Zur Auslegung der Betriebsstrategie.
- Dynamic-Programming: Optimierung für das Gesamtsystem.
- MiL-, HiL-Prüfstand: Für die Funktionsauslegung, Auslegung der Betriebsstrategie.

Außerdem werden die Simulationsmodelle mit den folgenden Messungen validiert:

- Antriebsstrang-Prüfstand
- Rollenprüfstand
- Feldversuch

Die Modelle und deren Ergebnisse werden fortlaufend dokumentiert. Als Beispiel sind in Abbildung 61 die Messergebnisse den Simulationsergebnissen für den NEFZ gegenübergestellt. Man kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erkennen.

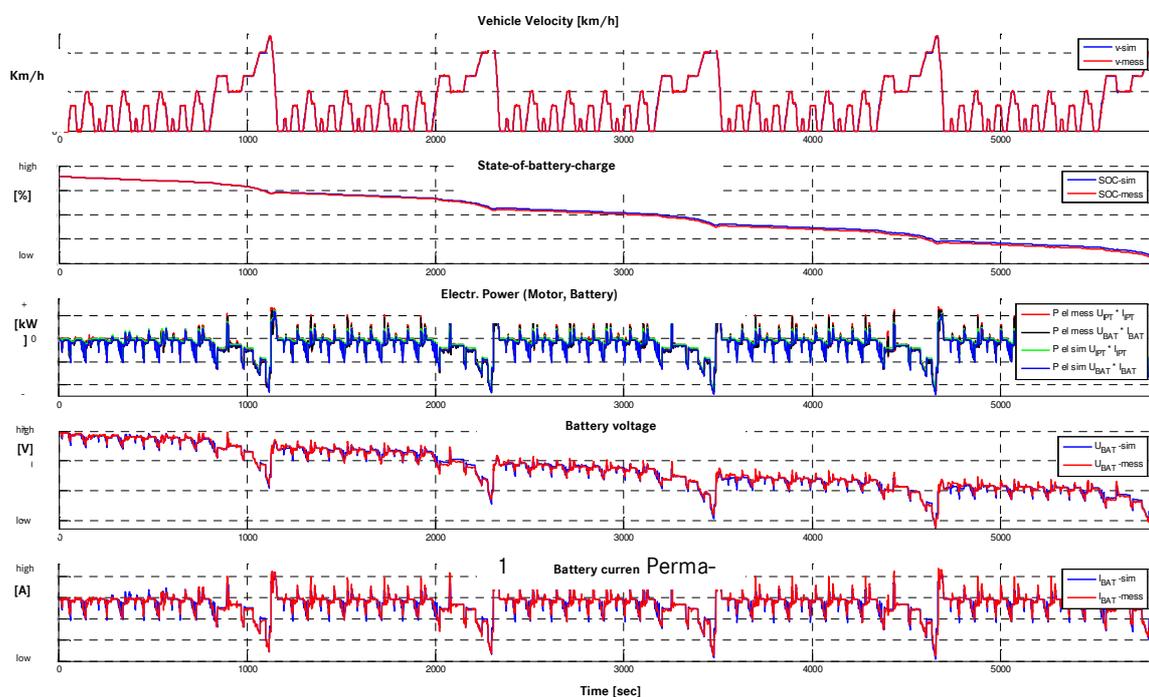


Abbildung 61: Gegenüberstellung Messung – Rechnung (NEFZ am Rollenprüfstand).

Die Ergebnisse einer simulierten Fahrt von Stuttgart nach Hamburg sind in Abbildung 62 dargestellt. Abhängig vom Fahrprofil lassen sich die benötigten Leistungen von E-Maschine und Verbrennungsmotor in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie darstellen. Daraus ergeben sich die Verbrauchshäufigkeiten und somit kann der exakte Verbrauch für die Strecke vorausberechnet werden.

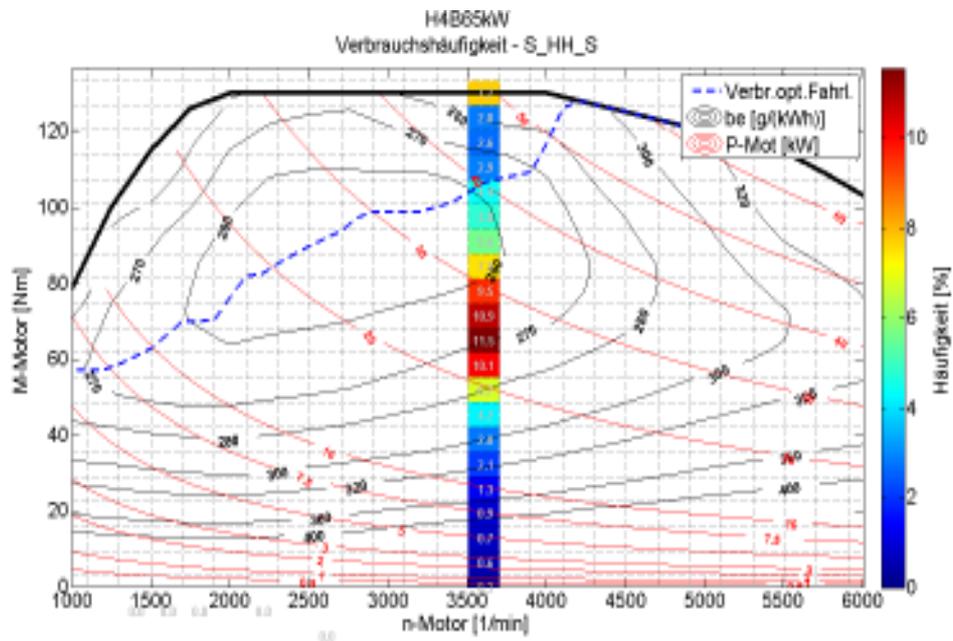
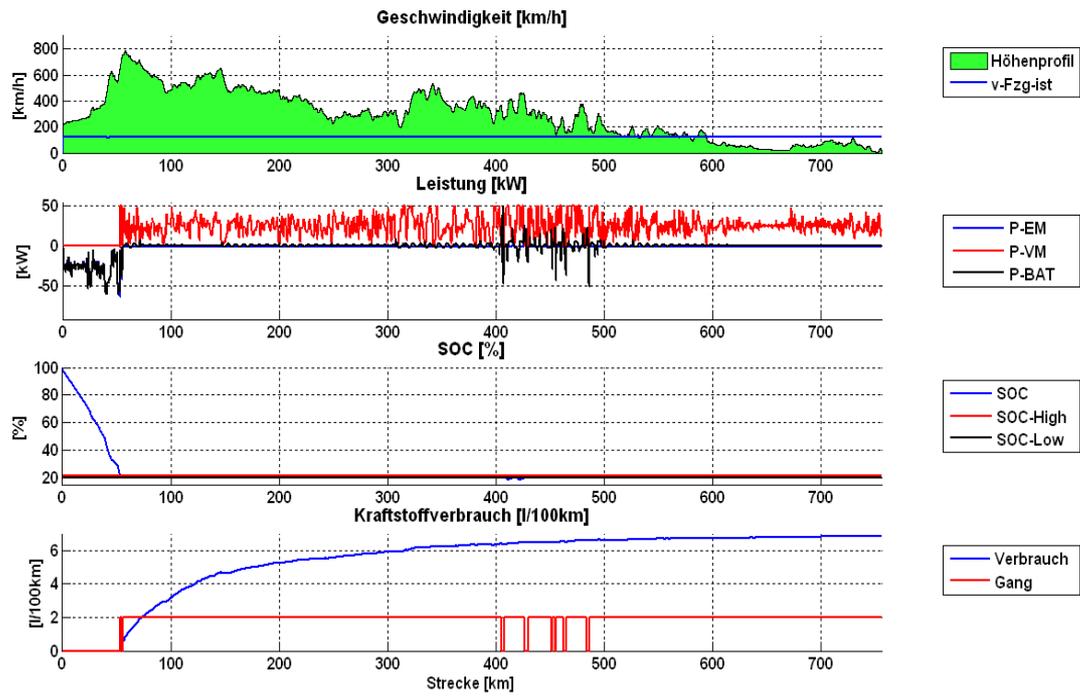


Abbildung 62: Simulation Fahrtstrecke Stuttgart-Hamburg

### **3 Anwendungspotentiale und Nutzbarkeit der Ergebnisse für KMU**

Der Umfang des Förderprojektes ist eine Integrationsaufgabe, d.h. existierende Komponenten aufeinander anzupassen und so abzustimmen, dass diese in ein vorhandenes Fahrzeug integriert werden können. Dabei sollen die Fahreigenschaften des Gesamtfahrzeuges optimiert werden im Hinblick auf Energieverbrauch und Komfort.

Die technischen Inhalte dieser Integrationsaufgabe obliegen der Firma Daimler. Hierzu bedarf es der Entwicklung neuer Technologien für die Einzelkomponenten, da es sich um ein neuartiges Antriebskonzept handelt.

In dieser Aufgabe, d.h. zunächst im Verständnis für die Anforderungen, anschließend in der Entwicklung der Kompetenzen bzgl. der neuen Technologien liegen große Chancen für klein- und mittelständische Unternehmen, sich am Markt zu positionieren.

## 4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Antriebskonz. über Leistungsverhältnis zwischen VM und E-Antrieb .....	7
Abbildung 2:	REX-Einheit mit Verbrennungsmotor .....	13
Abbildung 3:	Integr. Dem. 1 im Versuchsträger, Kühlkreisläufe, HV-Architektur .....	15
Abbildung 4:	Komponenten Demonstrator 1 Versuchsträger .....	16
Abbildung 5:	Dem.1 Rohbauänderungen, Fahrzeugarchitektur und Verdrahtung .....	19
Abbildung 6:	Hinterachse Demonstrator 1, CAD-Konstruktion und Umsetzung .....	20
Abbildung 7:	Fotos Demonstrator 1 Versuchsträger .....	<b>Fehler! T</b>
Abbildung 8:	Funktionsstruktur der Antriebssteuerung .....	24
Abbildung 9:	Betriebsarten des Antriebsstranges .....	25
Abbildung 10:	Systemschaubild Antriebsstrang .....	26
Abbildung 11:	Abh. einiger Messwerte des Dem.1 auf dem Rollenprüfstand .....	27
Abbildung 12:	Motorverbrauchskennfeld, REX-Einheit für Fronteinbau .....	29
Abbildung 13:	Ansteuerung E-Kat-System, Antrieb am Prüfstand .....	30
Abbildung 14:	Generator und E-Motor .....	31
Abbildung 15:	REX-Modul mit E-Motoren und Getriebe .....	32
Abbildung 16:	Leistungselektronik für Antrieb und Generator E-Motor .....	33
Abbildung 17:	Schema Entwicklung Simulationsmodelle .....	35
Abbildung 18:	Aufbau der Simulationsumgebung .....	37
Abbildung 19:	Vernetzung des HiL-Aufbaus mit der REX-Einheit am Prüfstand .....	38
Abbildung 20:	Ablaufsteuerung eines Schaltvorgangs .....	39
Abbildung 21:	Umsetzung Messdaten in der HMI-Umgebung .....	40
Abbildung 22:	Ablauf hardwarebasierte Steuergeräte-Bedatung .....	41
Abbildung 23:	Antriebseinheit im Zusammenbau .....	43
Abbildung 24:	Entwurfsmodell des REX-Getriebes .....	44
Abbildung 25:	REX-Einheit mit Motor-, Generator- und Getriebelagern .....	45

Abbildung 26:	Antriebseinheit auf Prüfstandspalette .....	47
Abbildung 27:	Package-Model des verbauten Antriebstrangs .....	48
Abbildung 28:	Antriebsstrang mit HV-Verkabelung/ eingebauter Zustand .....	49
Abbildung 29:	Komponentenauswahl für Demonstrator 2 .....	50
Abbildung 30:	Hochvolt-Kontaktierung/ -Verteilung .....	51
Abbildung 31:	Aufbau des Versuchsträgers .....	52
Abbildung 32:	Übersicht Vernetzungstopologie ATG 1 .....	53
Abbildung 33:	Getriebeansteuerung und Prüfstandsmessungen .....	54
Abbildung 34:	Betriebsartenwechsel seriell nach parallel am Prüfstand.....	55
Abbildung 35:	Dokumentation Inbetriebnahme.....	56
Abbildung 36:	Innerstädtische elektrische Fahrt in Stuttgart.....	58
Abbildung 37:	Beispiel eines Bestellteils und eines Lagerteils.....	59
Abbildung 38:	Untersuchungen des Schaltkomforts .....	60
Abbildung 39:	Tagesstrecken unterschiedlicher Nutzergruppen.....	61
Abbildung 40:	Umfrage-Ergebnisse Range Extender .....	62
Abbildung 41:	Beispiel LA-Zyklus .....	63
Abbildung 42:	..... NEFZ-Tauglichkeit im Rollenprüfstandsversuch nachgewiesen	64
Abbildung 43:	Vergleich zwischen den Betriebsarten .....	66
Abbildung 44:	Package-Vergleich REX-Antriebsstrang mit 4-Zylinder-Diesel inkl. Doppelkupplungsgetriebe .....	68
Abbildung 45:	Komponentenwerte aus Lastenheftbeiträgen .....	68
Abbildung 46:	CO2-Bilanzen und typisches Kundenprofil .....	70
Abbildung 47:	Gegenüberstellung Messung – Rechnung: NEFZ am Rollenprüfstand	72
Abbildung 48:	Simulation Fahrtstrecke Stuttgart-Hamburg.....	73