

# Elektrofahrzeug mit regenerativ betriebenem On-Board-Energiewandler in Form eines monovalenten Erdgasmotors

## Aufbau und Integration eines Basis Range Extender Moduls zur Funktionserprobung

Zuwendungsempfänger: FEV Europe GmbH <sup>1</sup> Neuenhofstraße 181 52078 Aachen	Förderkennzeichen: 01MY13001E
Projektleiter: Friedrich-Wilhelm Speckens	Email: Speckens@fev.com Tel.: 0241 5689 130
Autoren: Markus Kremer Jörg Philippen Dirk van der Weem	Datum: 31.03.2019

Forschungspartner:



Projekträger:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 01MY13001E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

<sup>1</sup> Am 3. Januar 2017 wurde Handelsregister der neue Name FEV Europe GmbH eingetragen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Danksagung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Überblick</b>	<b>2</b>
2.1	Ziele	2
2.1.1	Gesamtziel des Vorhabens	2
2.1.2	Bezug zu förderpolitischen Zielen	4
2.1.3	Wissenschaftlich und/oder technische Arbeitsziele	4
2.2	Stand der Technik	5
2.2.1	Abgrenzung zu alternativen Lösungsansätzen	5
2.2.2	Entgegenstehende Schutzrechte	5
2.2.3	Bisherige Arbeiten	5
2.3	Projektstruktur	5
2.3.1	Teilaufgaben FEV	7
2.3.2	Meilensteine	7
<b>3</b>	<b>Finaler Ergebnisbericht</b>	<b>8</b>
3.1	Arbeitspaket 103: Konzepterstellung Integration Range Extender	8
3.2	Arbeitspakete 201, 202, 203: Aufbau, Integration und Inbetriebnahme des Basis Range Extender Modul	9
3.2.1	Motoraufbau	9
3.2.2	Mechanische Integration im Fahrzeug	10
3.2.3	Kapselung des Range Extenders	12
3.2.4	E/E Integration im Fahrzeug	14
3.2.5	Software	16
3.2.6	Inbetriebnahme & Funktionsprüfung des Basis Rex im Fahrzeug	17
3.3	Arbeitspaket 403: Aufbau und Inbetriebnahme des GreenREX Moduls	19
3.4	Arbeitspakete 201, 202, 203: Aufbau, Integration und Inbetriebnahme des Basis Range Extender Modul	21
3.5	Arbeitspaket 501: Untersuchung Funktionsentwicklungsfahrzeug	26
3.5.1	Basis Range Extender	26
3.5.2	GreenREX	28
3.6	Arbeitspaket 702: Öffentlichkeitswirksame Darstellung der Ergebnisse	30
3.7	Zusammenfassung Ergebnisse	31
3.8	Risiken	34
3.9	Verwertungsplan	34
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>34</b>

### 1 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Unterstützung, Förderkennzeichen 01MY13001E, sowie unseren Projektpartnern für die gute Kooperation.

### 2 Überblick

#### 2.1 Ziele

##### 2.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Aktuelle Elektrofahrzeuge haben gegenüber konventionellen Fahrzeugen den entscheidenden Nachteil einer geringeren Reichweite, welcher durch die lange Ladezeit der Hochvolt-Batterie noch verschärft wird. Ein möglicher Ansatz zur Lösung dieser Problematik ist der Einsatz eines zusätzlichen Verbrennungsmotors zur Reichweitenverlängerung (Range-Extender). Der Range-Extender als modularer Bestandteil eines seriellen Hybridantriebskonzepts bietet das

Potenzial, die Defizite von Elektrofahrzeugen zu kompensieren und diesen im Fahrzeugsegment der Klein- und Kleinstwagen als Brückentechnologie den Weg zu bereiten.

Eine besondere Bedeutung kommt einer kompakten Modulbauweise zu, da sie eine Minimierung der Schnittstellen mit dem Fahrzeug ermöglicht, den Entwicklungs- und Applikationsaufwand begrenzt und somit positive Skaleneffekte mit sich bringt. Dies ist zwingend an den rein seriellen Hybridantrieb ohne mechanischen Durchtrieb gebunden. Ein kompaktes Aggregat und dessen bauraumökonomische Installation sollen dabei größtmögliche Freiheiten bezüglich eines alternativen Fahrzeug-Package und -Styling bieten. Das von KSPG und FEV anlässlich der IAA 2011 präsentierte Range-Extender-Exponat demonstriert ein solches günstiges Fahrzeug-Package bei Unterflureinbau im Fahrzeugheck.

Die Leistungsbemessung des Verbrennungsmotors und der beiden Generatoren ergibt sich aus der Forderung nach ausreichender Fahrleistung an Steigungen, um hier Konflikte mit dem stark motorisierten Schwerverkehr – sprich stressfreies Fahren bei minimaler Batterieladung (SOC<sub>min</sub>) – zu gewährleisten. Eine Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h bei 3 % Steigung und noch gut 80 km/h bei einer Extremsteigung auf deutschen Autobahnen von 5,3% bedingen – bezogen auf die Auslegungsdaten des unterstellten Kleinstwagens – eine Radleistung von 25,8 kW, beziehungsweise wirkungsgradbedingt 30 kW des Verbrennungsmotors.

Für den Range Extender spricht auch, dass die Energiekapazität der teuren Lithium-Ionen-Batterie knapper dimensioniert werden kann. Batterie plus Range Extender müssen dann preislich günstiger sein als eine vergleichsweise große Batterie für den rein elektrischen Antrieb. Zudem sollte sich ein Gewichtsvorteil ergeben. Von konzeptionellen Eckpfeilern abgesehen, die einer möglichst kompakten Auslegung und dem geräuscharmen elektrischen Fahren – sprich einem niedrigen Motorgeräuschpegel (unterstützt durch Downspeeding) und geringen Motorvibrationen (NVH: Noise, Vibration, Harshness) – geschuldet sind, hat die Minimierung der Herstellkosten bei der Konstruktion des Aggregats folglich oberste Priorität.

Ziel dieses Teilvorhabens ist es, einen Basis Range Extender aufzubauen und anschließend in ein Entwicklungsfahrzeug zu integrieren. Somit kann die Entwicklung des GreenREX parallel stattfinden und gleichzeitig eine Validierung der Funktionen im Zielfahrzeug durchgeführt werden.

#### **2.1.1.1 Problemstellung und Hintergründe**

Elektrische Fahrzeuge ermöglichen lokal emissionsfreie Fortbewegung und die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien für das Transportwesen. Fast alle Fahrzeughersteller arbeiten deshalb an der Entwicklung von Konzepten für elektrische Fahrzeuge mit dem Ziel, das beste Konzept mit größter Marktakzeptanz zu finden. Eine entscheidende Rolle hierbei spielt die Akustik der neuen Fahrzeuge. Es wird immer deutlicher, dass elektrische Antriebe sehr viel leiser sind als konventionelle Verbrennungskraftmaschinen. Jedoch ist die Abnahme des Gesamtgeräuschpegels nicht gleichbedeutend damit, dass das Geräusch von elektrischen Fahrzeugen perfekt wäre. Die elektrischen Komponenten verursachen oft hochfrequente Geräuschanteile, die als störend und unangenehm empfunden werden. Darüber hinaus sind die Maskierungseffekte des Verbrennungsmotors nicht vorhanden, so dass andere Geräuschanteile von Nebenaggregaten, Roll- und Windgeräusche stärker in den Vordergrund treten. Um das Innengeräusch eines elektrischen Fahrzeugs verbessern zu können, muss zuerst festgestellt werden, was die Geräuschanteile der verschiedenen Quellen sind, und wie die Geräusche in den Innenraum des Fahrzeugs übertragen werden. Als nächstes gilt es zu definieren, wie das Geräusch eines elektrischen Fahrzeugs klingen soll. Um ein solches Zielgeräusch zu entwickeln, wurde das Innengeräusch eines zuvor von FEV entwickelten elektrischen Prototypen untersucht und in Hörvergleichen bewertet. Darüber hinaus besitzt dieses elektrische Fahrzeug einen Range Extender basierend auf einem Wankelmotor. Die akustische Integration des Range Extender stellt eine weitere Herausforderung dar. Zusätzlich zur Auslegung der Hardware (Motorauslegung) bietet die Betriebsstrategie weitere Freiheitsgrade zur akustischen Optimierung. Die Auswirkung von verschiedenen Range Extender Betriebsstrategien wurde in einem weiteren Hörvergleich untersucht, um die Möglichkeiten dieses Gestaltungsmerkmals zu erkunden.

### 2.1.1.2 Lösungsansatz

Es soll ein Basis Range Extender Modul aufgebaut werden. Das Motorkonzept ist speziell auf die Anwendung bei Kleinwagen zugeschnitten. Ein konzeptioneller Eckpfeiler ist sicherlich die gewählte V2-Bauweise mit einem V-Winkel von 90°. Den hierbei benötigten zwei Zylinderköpfen stehen die bauartbedingten Vorteile geringer Bauhöhe bei vertikal stehender Kurbelwelle sowie, als Basis zur Erfüllung höchst anspruchsvoller NVH-Anforderungen, der Massenkraftausgleich 1. Ordnung allein durch Gegengewichte an der Kurbelwelle und nur geringe Massenmomente 1. Ordnung und Massenwirkungen höherer Ordnung gegenüber. Die weitere NVH-Optimierung beruht auf der Erstanwendung des vom Entwicklungspartner FEV patentierten Rollmomentenausgleichs (Full Engine Vibration Compensation), auf den im Folgenden noch näher eingegangen wird. Das Zylinderkurbelgehäuse des Verbrennungsmotors, die Gehäuse der Generatoren und optional auch der Umrichter sind in ein gemeinsames Aluminiumgussgehäuse integriert und in denselben Kühlkreislauf eingebunden. Die technischen Daten des Verbrennungsmotor-Generator-Aggregats sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Kenndaten des Basis Range Extender**

Kenndaten Verbrennungsmotor	Wert
Motorarchitektur	Zweizylinder-Viertakt-Ottomotor mit 90°-V-Anordnung
Hubvolumen	0,799 l
Bohrung x Hub	80 mm x 79,5 mm
Nennleistung	30 kW bei 4500/min
Effektiver Mitteldruck	10,3 bar bei 4500/min
Maximales Drehmoment	66 Nm bei 4500/min
Ventiltrieb	OHV, zwei Ventile pro Zylinder
Kraftstoffeinspritzsystem	Saugrohreinspritzung

**Tabelle 2: Kenndaten des Basis Generator-Aggregats**

Kenndaten Verbrennungsmotor	Wert
Maschinentyp	Permanentmagneterregte Synchronmaschine, vier Polpaare in Serie geschaltet
Nennleistung (elektrisch)	2 x 15 kW
Antrieb	Getriebestufe, Übersetzungsverhältnis 1:2

Der Range Extender wird zur weiteren Funktionsausarbeitung und -untersuchung in ein Entwicklungsfahrzeug integriert. Somit können wichtige Erkenntnisse bei der Entwicklung des Range Extender GreenREX gewonnen werden.

### 2.1.2 Bezug zu förderpolitischen Zielen

Das geplante Vorhaben adressiert die Ziele der Förderbekanntmachung „ATEM“ - „Antriebstechnologien für die Elektromobilität“ (vom 13. Oktober 2011). Dabei liegen die Schwerpunkte in der Erhöhung der Reichweite mit elektrischer Traktion sowie in der Erforschung innovativer Antriebskonfigurationen. Die Transformation der Automobilindustrie zur Elektromobilität und die Anpassung von Maschinen- und Anlagenbau und Energiewirtschaft sind für den Standort Deutschland wirtschafts- und beschäftigungspolitisch von großer Wichtigkeit

### 2.1.3 Wissenschaftlich und/oder technische Arbeitsziele

Die Kosten für ein reines Elektrofahrzeug, das heutigen Mobilitätsanforderungen genügen muss, sind maßgeblich durch die Batterie bestimmt. Ziel soll es sein, ein serielles Hybridsystem zu gestalten, mit dem einerseits die Anforderungen erfüllt und zum anderen die Kosten gesenkt werden können. Diese Betrachtung soll unter dem Aspekt einer guten Integrationsmöglichkeit in ein vorhandenes, kompaktes Fahrzeug durchgeführt werden. Ein modulares Konzept der Zusatzkomponente soll die Chance eröffnen, die hier erarbeiteten Ergebnisse auf andere Fahrzeuge zu übertragen und somit den Nachteilen der Reichweite und Leistung heutiger reinen Elektrofahrzeugen entgegen treten zu können. Für eine solche Akzeptanz sind Zulassungsfähigkeit für den öffentlichen Straßenverkehr zu gewährleisten und ein erhöhter Reifegrad der Applikation vonnöten.

## **2.2 Stand der Technik**

### **2.2.1 Abgrenzung zu alternativen Lösungsansätzen**

Der Vorteil einer Verbrennungskolbenmaschine als Range-Extender ist das hohe Entwicklungsstadium dieser Wärmekraftmaschinen. Eine Gasturbine ist wegen des baugrößenbedingt geringeren Wirkungsgrads in der typischen Leistungsklasse eines Fahrzeugantriebs in Kategorie M oder N1 keine Alternative. Ein Betrieb mit regenerativen Kraftstoffen stellt zwar andere Anforderungen an die Aggregate, jedoch wird das Grundprinzip des Kolbenmotors nicht angefasst. Neben Biogas existieren noch weitere regenerative Kraftstoffe wie etwa Ethanol für Otto- oder Biodiesel (Rapsmethylester) für Dieselmotoren. Im direkten Vergleich bietet sich für den Range-Extender jedoch ein Ottomotor an, da dieser leichter und kostengünstiger ist. Der Vorteil von Biogas als Brennstoff ist der schon bereits vorhandene Markt in Deutschland. Des Weiteren ist Biogas über die regenerative Eigenschaft hinaus gut für den ottomotorischen Betrieb geeignet. Die hohe Klopffestigkeit erlaubt eine deutliche Anhebung des Verdichtungsverhältnisses und einen wirkungsgradgünstigen Betrieb bei hohen Lasten. Damit können bestehende Downsizing- und Downspeeding-Konzepte konsequent weiter erforscht und in ein Range-Extender-Fahrzeug sinnvoll integriert werden.

### **2.2.2 Entgegenstehende Schutzrechte**

Seitens FEV besteht ein Schutzrecht [PISCH2011] zur Ankopplung der Generatoren an den Verbrennungsmotor. Diese Lösung wird auch im hier verwendeten Range Extender genutzt, dabei finden jedoch keine weiterführenden Arbeiten an dieser Thematik statt.

### **2.2.3 Bisherige Arbeiten**

Innerhalb einer Kooperation zwischen FEV und KSPG [MTZ12] ist ein Range Extender für elektrische Kleinwagen entwickelt worden, welcher auf einem rein seriellen Antriebskonzept beruht. Diese Antriebsvariante erscheint vor allem aus der Sicht eines Automobil-Zulieferers die beste Wahl für das Ziel-Fahrzeugsegment darzustellen. Ein solches Aggregat weist keinerlei mechanische Verbindung zu den Antriebsrädern auf. Wegen des direkten Vergleichs zum nahezu geräuschlosen elektrischen Fahren ist das Vibrationsverhalten (NVH) eines solchen Aggregats besonders kritisch zu bewerten und bedarf neuer, innovativer Lösungsansätze wie dem FEVcom System.

Unter Berücksichtigung der Motorbaugröße und -kosten wurde ein einfacher 2-Zylinder Ottomotor mit minimaler Komplexität ausgewählt. Eine V2-Anordnung mit getrennten Generatoren hat sich als besonders günstig erwiesen. Der vollständige Ausgleich der Massenkräfte erster Ordnung lediglich durch Gegengewichte an der Kurbelwelle und die geringen Massenmomente durch den kleinen Bankversatz waren entscheidende Argumente für den V2 mit 90° Bankwinkel. Der Verbrennungsmotor und die PMSM-Generatoren befinden sich in einem Motorblock und verfügen über einen gemeinsamen Kühlkreislauf. Die Generatoren, welche über eine akustisch günstige Verzahnung angetrieben werden, sind hierbei Teil des FEVcom-Prinzips.

Da die Generatoren immer einen definierten Winkel zueinander aufweisen müssen, wird schon für die ersten Tests der Generatoren am Prüfstand die Verzahnung benötigt. Da diese Teil des Kurbelwellengehäuses ist, musste ein besonderer Prüfstandsaufbau umgesetzt werden, welcher auch schon den Verbrennungsmotor beinhaltet. In Anschluss an die Basiskalibrierung konnten Motorversuche durchgeführt werden und erste, vorläufige motorspezifische Kenngrößen bestimmt werden. Schließlich wurde das Modul in ein Fahrzeug (FEV LiiONA) integriert und erprobt.

## **2.3 Projektstruktur**

Das Teilvorhaben ist insgesamt an fünf Phasen des Gesamtvorhabens beteiligt, wobei er maßgebliche Arbeitsaufwand in den Aufbau des Range Extender zur Funktionserprobung fließen wird. Ferner wird FEV verantwortlich für das Arbeitspaket Fahrzeugdemonstration und -untersuchung, hier können umfangreiche Erfahrungen eingebracht werden.

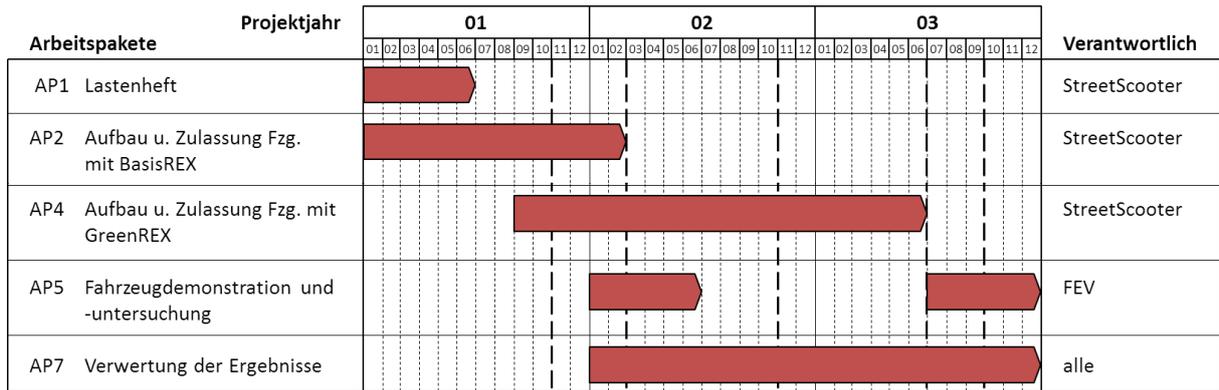


Abbildung 1: Projektstrukturplan

### 2.3.1 Teilaufgaben FEV

Die Arbeitspakete seitens FEV sind im Folgenden in Kurzform genannt.

- Konzepterstellung zur Integration eines Range Extender Moduls in das Fahrzeug,
- Aufbau des Range Extender Moduls, mit Dokumentation der Inbetriebnahme und Anfertigung einer Stückliste,
- Anbindung des Range Extender Moduls an das Bordnetz,
- Sicherstellung der Betriebsbereitschaft des Range Extender Moduls und Anfertigung der für die Fahrzeugzulassung benötigter Dokumentation,
- Erstellung eines Simulationsmodells zur Unterstützung der Brennverfahrensauslegung,
- Integration des Range Extender Moduls in das Fahrzeug,
- Sicherstellung der Grundfunktionalität und Weiterentwicklung hinsichtlich Komfort und Leistung des Hybridfahrzeugs.

Das in diesem Dokument beschriebene Teilvorhaben bezieht sich im Wesentlichen auf die innovative Erarbeitung, Integration und Applikation des Range Extender Moduls. Nach einer Konzepterstellung zum Aufbau eines Hybridfahrzeugs mit Range Extender Modul wird ein solches Modul angefertigt und dokumentiert. Dabei wird auf die Möglichkeit einer späteren Zulassung geachtet.

Die folgende Inbetriebnahme des Moduls wird durch Simulation der Brennverfahren unterstützt und endet in einer Abnahme am Prüfstand.

Anschließend erfolgt die mechanische und elektrische Integration in das Fahrzeug. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme als Range Extender Modul im eingebauten Zustand sind Applikation hinsichtlich Leistung und Komfort im Fokus. Fahrversuche sollen einen erhöhten Reifegrad sicherstellen.

### 2.3.2 Meilensteine

Die Meilensteine sind in Tabelle 3 näher beschrieben.

**Tabelle 3: Meilensteine im Detail**

Meilenstein	Beschreibung
M1	Der BasisREX ist ins Fahrzeug integriert und das Fahrzeug wurde ersten Fahrversuchen unterzogen.
M2	Das GreenREX Aggregat ist aufgebaut und für die Prüfstandversuche bereit.
M3	Der GreenREX ist erprobt und bereit für die Fahrzeugintegration.
M4	Der GreenREX ist ins Fahrzeug integriert und das Fahrzeug wurde ersten Fahrversuchen unterzogen.
M5	Der BasisREX ist ins Fahrzeug integriert und das Fahrzeug wurde ersten Fahrversuchen unterzogen.

### 3 Finaler Ergebnisbericht

#### 3.1 Arbeitspaket 103: Konzepterstellung Integration Range Extender

In Zusammenarbeit mit dem VKA und der StreetScooter GmbH wurden die möglichen Schnittstellen zwischen dem bestehenden Fahrzeug vom Typ „Work“ der StreetScooter GmbH und dem Range Extender Modul identifiziert und eine Möglichkeit der Einbindung in das Fahrzeug definiert.

Anbindungen an die Kühlung, die Aufhängung des Motors und die Einbringung der neuen Komponenten für die Ansteuerung des Range Extenders wurden ebenfalls ausgearbeitet. Die Schnittstelle zur Hochvoltbatterie wurde in Zusammenarbeit mit StreetScooter definiert und im Bereich des Batteriekastens im Fahrzeugunterboden vorgesehen. Da StreetScooter eine Batterie und einen Inverter mit angepasster Spannungslage (320V Nominell) in das Fahrzeug eingebaut hat, war keine Anpassung der Spannungslage des Range Extender Moduls, welcher auf einem Niveau oberhalb von 300V arbeitet, notwendig.

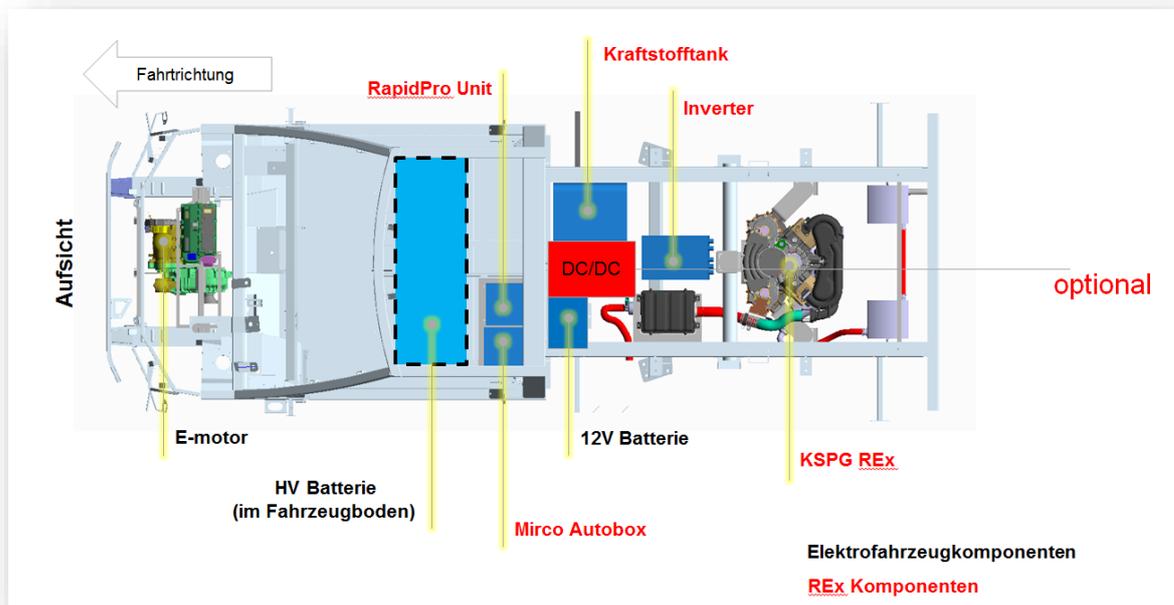


Abbildung 2: Übersichtsbild StreetScooter Work mit Range Extender

Niedervoltseitig wurde für den Range Extender ein eigenständiges System inkl. Kabelstrang und Steuergerät angefertigt und ins Fahrzeug integriert. Schnittstellen zum Fahrzeug bestehen neben der Anbindung an die bestehenden 12V Batterie noch an die HV-Interlock-Line sowie das Not-Aus-Konzept im Fahrgastinnenraum.

Die CAN-Bus Topologie und die Kommunikationsschnittstellen wurden identifiziert und für das Fahrzeug in Form eines angepassten DBC Files vorbereitet.

Notwendige Modifikationen seitens des Range Extender wurden ebenfalls identifiziert, entsprechende und Maßnahmen abgeleitet und so beispielsweise eine akustische Optimierung durchgeführt, welche aufgrund der offenen Bauweise des Fahrzeugs notwendig wurden. Für diesen Zweck wurde eine Schalenkapselung des Range Extenders konstruiert

und die Übergabestellen, Halterungen und ähnliches bereits bei der mechanischen Integration des Basis Range Extenders im Fahrzeug für den späteren Einbau berücksichtigt.



**Abbildung 3: Übersichtsbild Kapselung Range Extender (Arbeitsstand, links Draufsicht, rechts Ansicht von unten)**

### **3.2 Arbeitspakete 201, 202, 203: Aufbau, Integration und Inbetriebnahme des Basis Range Extender Modul**

#### **3.2.1 Motoraufbau**

Das Basis Range Extender Modul wurde bei der FEV GmbH in Zusammenarbeit der haus-eigenen Motorenmontage mit den E/E Spezialisten zum Gesamtmodul aus Verbrennungsmotor und den beiden präzise zueinander ausgerichteten Generatoren montiert und anschließend zwecks Fahrzeugintegration an die StreetScooter GmbH übergeben.

Nach Beschaffung zunächst fehlender Bauteile des Verbrennungsmotors waren aufgrund von Fertigungsfehlern zweier Elemente eine Nachbearbeitung der Kurbelwelle des Basismotors und eine Nachbearbeitung des Zahnrades für die Nockenwellenanbindung erforderlich. Dies führte zu signifikanten Verzögerungen des Motoraufbaus. Des Weiteren gab es bei einigen anderen Komponenten Verzögerung bei der Lieferung, aufgrund von Kapazitätsengpässen bei unserem Zulieferer.

Durch die parallele Bearbeitung weiterer FEV Arbeitspakete wie beispielsweise der Fertigung des Kabelstrangs und Vorbereitung der Software sowie den Einsatz zusätzlichen Personals konnten diese Verzögerungen hinsichtlich der Arbeitspaket seitens FEV jedoch im Laufe der weiteren Projektphasen teils wieder aufgeholt werden.

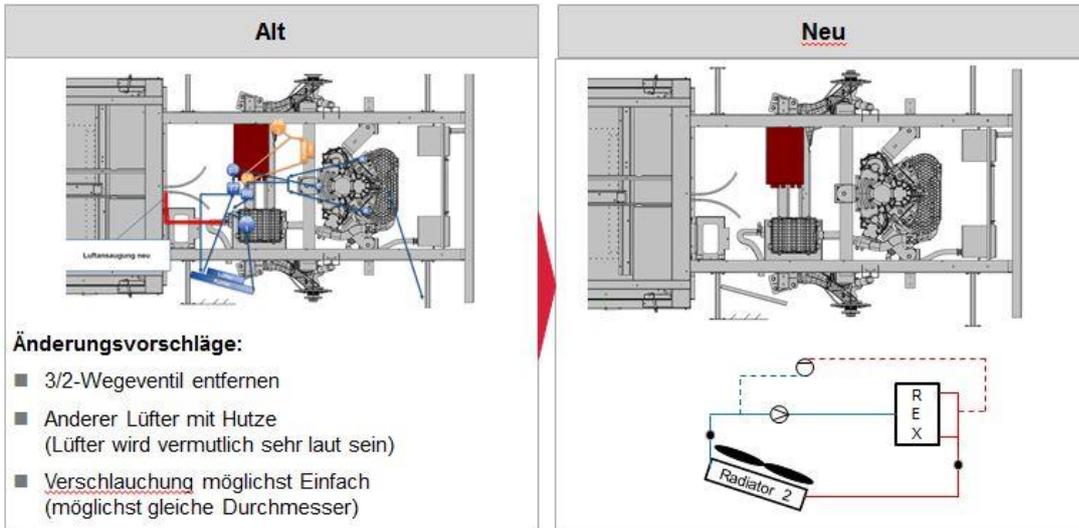


**Abbildung 4: Basis Range Extender Modul**

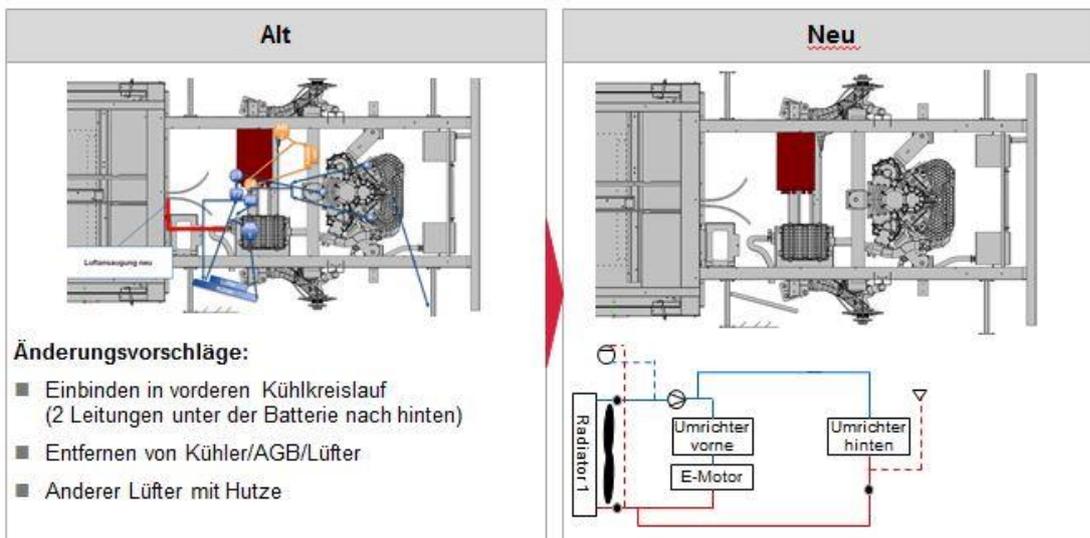
### **3.2.2 Mechanische Integration im Fahrzeug**

Die initiale Integration des Basis Motor in das Fahrzeug mitsamt aller Anschlüsse für Kühlung und Luftführung wurde von der StreetScooter GmbH umgesetzt. Hierbei kam es zu einigen zeitlichen Verzögerungen, die bereits in diesem Projektstadium Auswirkungen auf den Gesamtzeitplan des Projekts hatten.

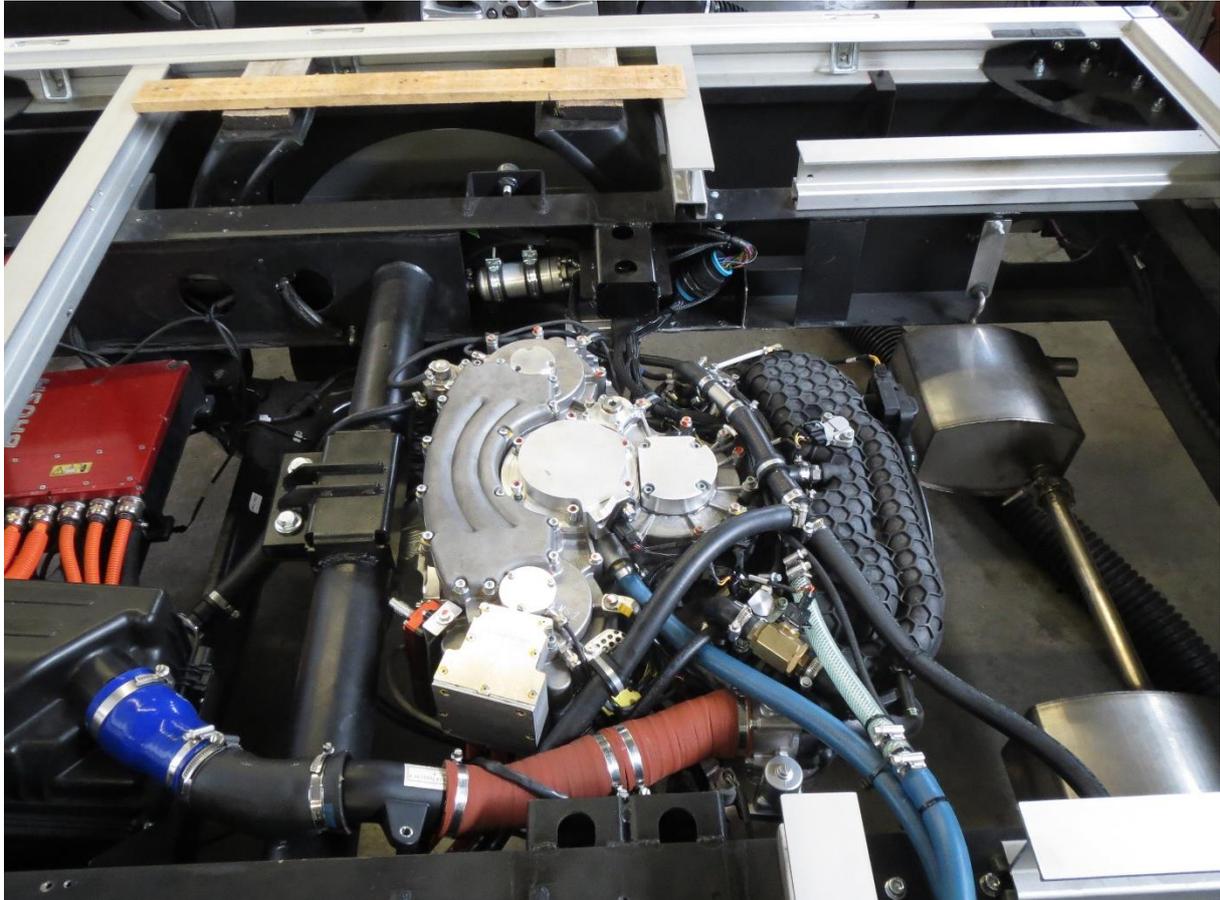
Nachdem das Fahrzeug im Anschluss mit deutlicher Verspätung bei der FEV zwecks Inbetriebnahme des Basis REX angeliefert und im Rahmen eines Eingangsschecks begutachtet wurde, stellten sich zudem einige Mängel beim Aufbau sowie der Anschlüsse der unterschiedlichen Systeme heraus, die zu ungeplanten Mehraufwänden seitens FEV führten. Nach enger Abstimmung mit der StreetScooter GmbH wurden unter anderem für die unterschiedlichen Kühlsysteme sowie für den Ladungswechseltrakt des Verbrennungsmotors neue Konzepte ausgearbeitet, mit StreetScooter diskutiert und anschließend seitens FEV nach dem neuen Plänen neu aufgebaut. Im Zuge dessen wurde beispielsweise der einzelne Kühlkreislauf für den Inverter des Range Extenders entfernt und die Komponenten in den bestehenden Nieder-temperatur-Kühlkreislauf des Fahrzeug eingebunden, wobei dieser mit einer neuen Pumpe mit höherer Förderleistung aufgerüstet wurde. Der Hochtemperatur-Kühlkreislauf für den Verbrennungsmotor wurde ebenfalls komplett überarbeitet, indem u.a. einige Ventile entfernt, die Strömungsrichtung durch den Kühler geändert sowie eine neue Entlüftung eingebaut wurden.



**Abbildung 5: FEV Änderungskonzept für HT-Kühlkreislauf**



**Abbildung 6: FEV Änderungskonzept für NT-Kühlkreislauf**



**Abbildung 7: Integration Basis Range Extender Modul**

### **3.2.3 Kapselung des Range Extenders**

Aufgrund der offenen Bauweise des Fahrzeugs im hinteren Bereich, in welchem der Range Extender verbaut ist, wurde eine Kapselung entworfen und integriert, die neben dem mechanischen Schutz des Aggregats vor Schmutz und Witterungseinflüssen primär das akustische Verhalten in diesem Anwendungsfall verbessern soll.

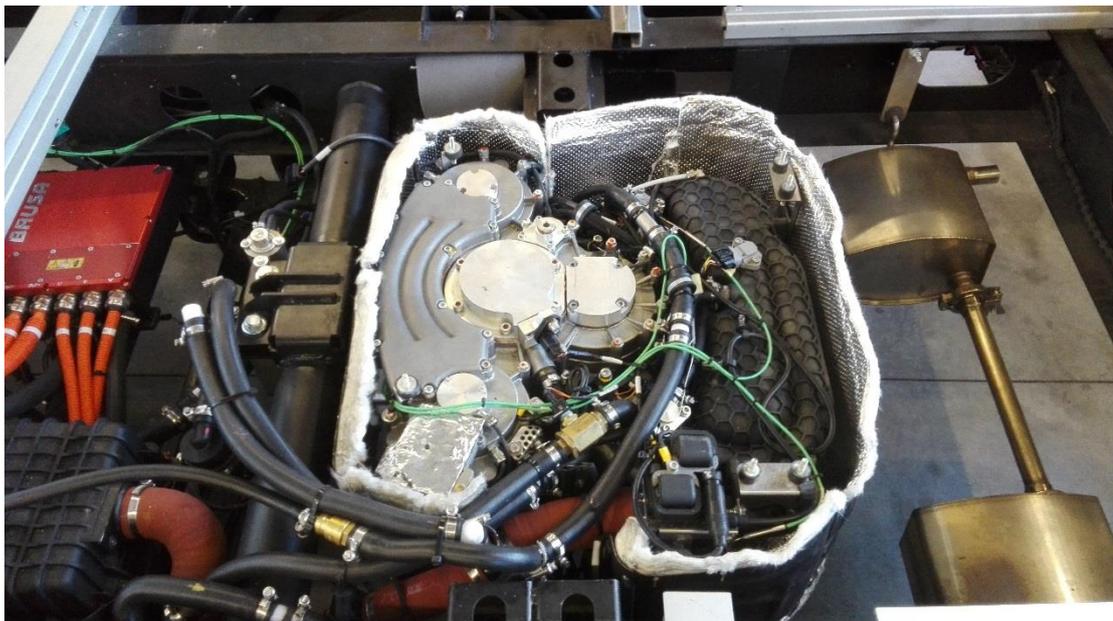
Ausgeführt wurde diese Kapselung in einer Außenkonstruktion aus Stahlblech, welches mithilfe eines Prototypen-Fertigungssystems geformt wurde in Verbindung mit einer hitzebeständigen Innendämmung.

Neben den positiven Eigenschaften der Kapselung hinsichtlich der Akustik wurde andererseits die thermische Belastung des Moduls negativ beeinflusst, wodurch weitere Maßnahmen für einen störungsfreien Betrieb getroffen werden mussten. Um im laufenden Betrieb die Temperaturentwicklung innerhalb der Kapsel kontrollieren und in begrenztem Maße regeln zu können, wurden zusätzliche Temperatursensoren an unterschiedlichen Stellen angebracht, die einerseits die Temperaturverteilung abbilden können und andererseits an kritischen Stellen wie den kraftstoffführenden Bauteilen die zulässigen Bauteil- und Betriebstemperaturen kontrollieren und somit beispielsweise einer Dampfblasenbildung zuvor zu kommen.

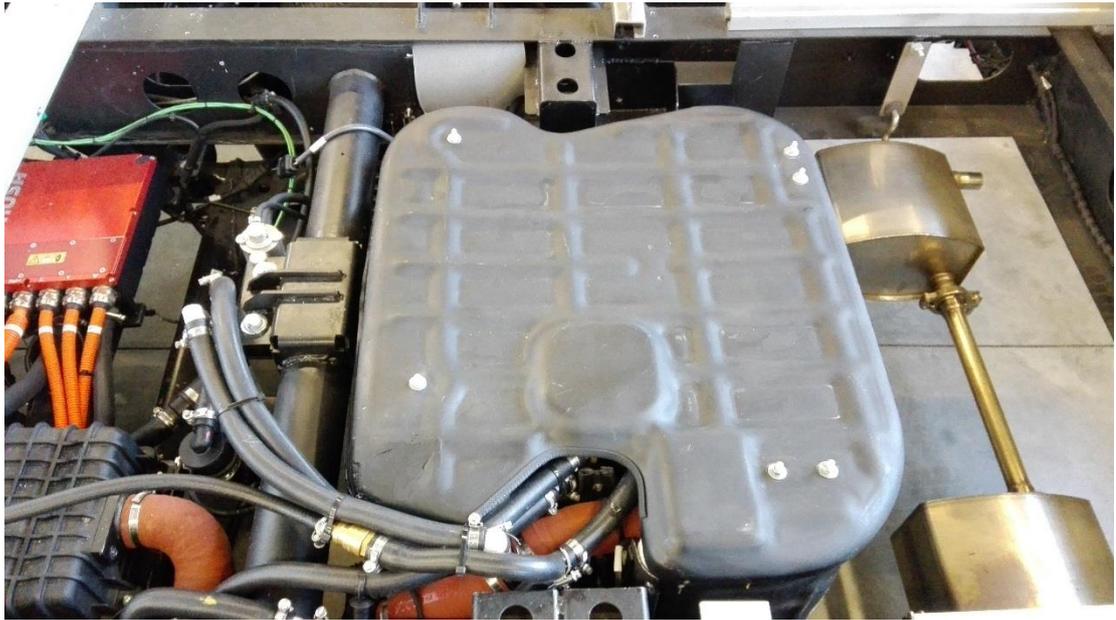
Funktional wurden die Temperatursensoren in der MicroAutoBox welche für die Range Extender Steuerung zuständig ist, eingelesen und neben einer elektrischen Diagnose in die bestehende Steuerung eingebunden. Einerseits fand hierbei eine Anpassung des Thermomanagements in Form einer geänderten Bedienung der Kennfelder für Kühlmittelpumpen- und Lüfter-Ansteuerung statt, die auf den eingelesenen Kapseltemperaturen basiert und andererseits wurde eine dynamische Leistungsbegrenzung eingefügt, die bei hohen Temperaturen an kritischen Stellen innerhalb der Kapselung die Leistung des Range Extenders reduziert bis hin zur Notabschaltung, um Bauteilschäden zu vermeiden.



**Abbildung 8: Kapselung Range Extender Modul „Bottom“**



**Abbildung 9: Range Extender Modul mit offener Kapsel im StreetScooter**



**Abbildung 10: Range Extender Modul mit geschlossener Kapsel im StreetScooter**

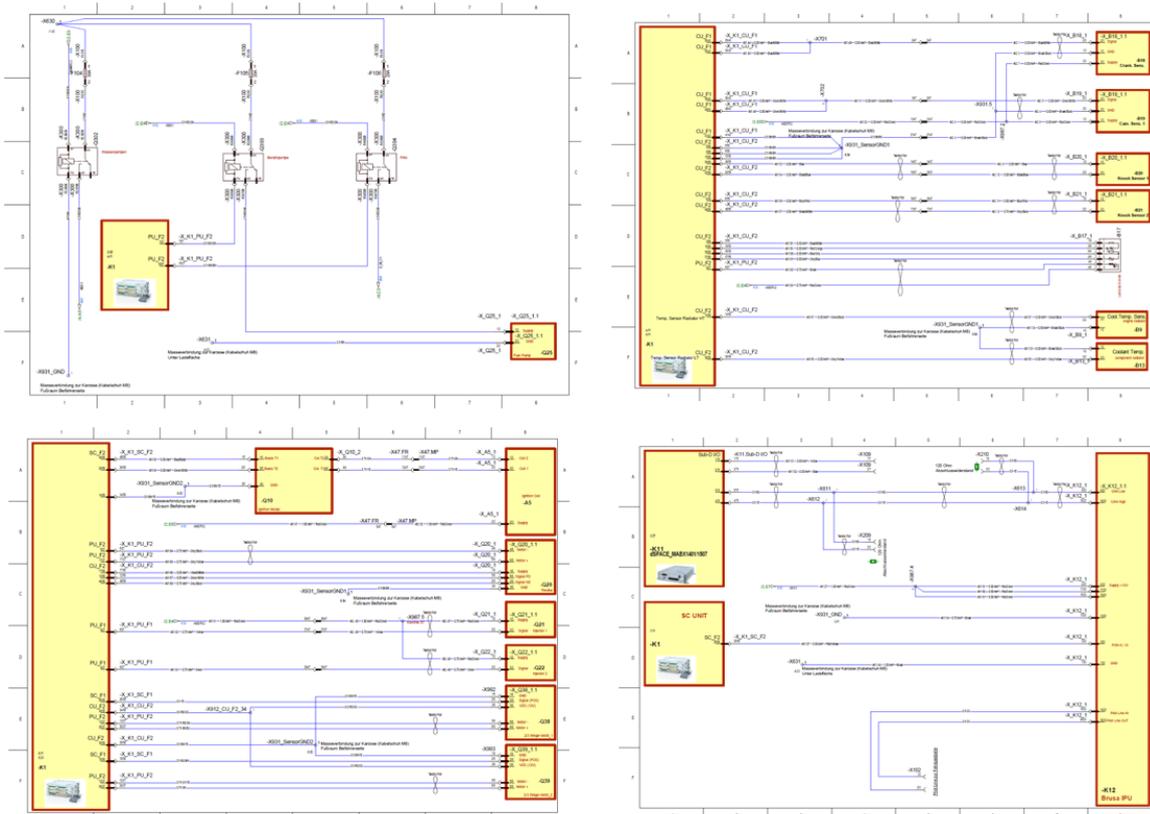
ter

### **3.2.4 E/E Integration im Fahrzeug**

Ein Kabelbaum für den Range Extender mitsamt aller notwendigen Anbindungen an die Fahrzeugsysteme wurde seitens FEV geplant und in für den Einbau in den Versuchsträger gefertigt. Im Detail handelt es sich hierbei um zwei Kabelstränge, einen für die Motorseite und einer fürs Fahrzeug, die über einen zentralen Übergabestecker verbunden sind. Der Vorteil dieser Bauweise liegt u.a. im Handling beim Ein- und Ausbau des Range Extenders, bei dem aus elektrischer Sicht lediglich ein Stecker getrennt werden muss um das gesamte Aggregat aus dem Fahrzeug entnehmen zu können.

Bei der Planung wurden neben den bisherigen Erfahrungen mit diesem Range Extender auch die individuellen Gegebenheiten des Fahrzeugs nach einer Begutachtung vor Ort und der Abstimmung der Positionen einzelnen Komponenten mit StreetScooter berücksichtigt.

Dadurch konnten schon in der frühen Planungsphase die Leitungslängen und die Verläufe detailliert berechnet und für die spätere Fertigung genau festgelegt werden.



**Abbildung 11: Auszug aus dem Schaltplan des REX inkl. E/E Schnittstellen zum Street-Scooter Fahrzeug**

Für die Steuerung des Range Extenders wurde eine MicroAutoBox II in Verbindung mit einer RapidPro aus dem Hause dSPACE ausgewählt und individuell für die Gegebenheiten dieses Projekts bzw. die verwendeten Sensoren und Aktuatoren bestückt und für den späteren Betrieb konfiguriert. Hierbei wurden zudem bereits Ressourcen für die zusätzlichen Sensoren und Aktuatoren des späteren CNG Systems des GreenREX berücksichtigt, so dass eine Nachrüstung bzw. eine Erweiterung des RapidPro Systems mit weiteren Modulen

mit geringem Aufwand möglich war. Untergebracht wurden die RCP-Komponenten zusammen mit der Sicherungs- und Relaisbox für das Range Extender System im Fahrgastraum anstelle eines Beifahrersitzes.



**Abbildung 12: RCP Steuerung des Range Extenders im Fahrgastinnenraum**

### 3.2.5 Software

Die Software des Range Extenders basiert auf einem ersten Prototypen Fahrzeug, welches mit einem vergleichbaren Range Extender Modul ausgerüstet wurde.

Für den Einsatz des Basis- sowie des späteren GreenREX Aggregats im StreetScooter waren jedoch diverse Anpassungen und Erweiterungen notwendig, die den individuellen Gegebenheiten des Fahrzeugs sowie den projektspezifischen Inhalten wie beispielsweise der neu erarbeiteten Betriebsstrategie sowie den Funktionen und Schnittstellen hinsichtlich der CNG Anwendung Rechnung tragen.

So wurden in enger Zusammenarbeit mit dem VKA, welches die Betriebsstrategie erarbeiten und im weiteren Projektverlauf in die Software integrieren musste, unter anderem folgenden Anpassungen und Erweiterungen an der Basisvariante der Software durchgeführt:

- Anpassung der CAN Schnittstelle zum StreetScooter Fahrzeug
- Anpassung der Schnittstellen zu den verwendeten Sensoren und Aktuatoren inkl. elektrischer Diagnose etc.
- Anpassung der Batterieparameter (Spannungslevel, Zellenanzahl, Betriebsgrenzen etc.)
- Anpassung der Motorparameter der StreetScooter Traktionsmaschine (Wirkungsgradkennfeld, Leistungs- und Betriebsparameter etc.)
- Anpassung des Thermomanagements
- Anpassung der Generatorparameter aufgrund der im Basis Rex verwendeten Dietz Generatoren
- Vorbereitung der Schnittstellen für die Implementierung einer neuen Betriebsstrategie

- Vorbereitung der Schnittstellen und Funktionen für die später verwendeten CNG Komponenten (zusätzliche Druck- und Temperatursensoren, Ansteuerung des CNG Druckreglers, Sicherheitsfunktionen etc.)
- Aufbau einer MIL (Model in the Loop) in Matlab Simulink, die zum einen das Street-Scooter Fahrzeug mitsamt des neuen Bosch Antriebsstrangs und der Batterie mit angepassten Spannungsniveaus und andererseits den Range Extender mit den neuen Charakteristika des Verbrennungsmotors sowie den zu verwendeten Generatoren abbildet. In Verbindung mit einem Fahrermodell, welches es ermöglicht, unterschiedliche Fahrprofile wie beispielsweise den NEDC zu simulieren, konnte diese Simulationsabbildung des Gesamtfahrzeugs einerseits seitens FEV für die Entwicklung und Tests der neuen SW Funktionen und andererseits vom VKA für die Simulation der optimalen Betriebsstrategie verwendet werden.

### 3.2.6 Inbetriebnahme & Funktionsprüfung des Basis Rex im Fahrzeug

Die Inbetriebnahme des Range Extenders im Einzelnen als auch später im Gesamtverbund mit den Fahrzeugsystemen wurde seitens FEV durchgeführt. Hierbei wurden die einzelnen Teilsysteme sukzessive geprüft, in Betrieb genommen und etwaige Auffälligkeiten durch Modifikation der Hard- und Software behoben. Für diesen Anwendungsfall wurde eigens eine Inbetriebnahme Prozedur konzipiert und ausgearbeitet, welche eine sichere, vollständige und effiziente Vorgehensweise festlegt, die einzelnen Systeme bis hin zum einsatzfähigen Gesamtsystem prüft und in einen sicheren und betriebsbereiten Zustand überführt. Unterteilt ist diese Prozedur in folgende aufeinander aufbauende Abschnitte:

1. Mechanische Prüfung und Inbetriebnahme
2. Niedervoltinbetriebnahme 1 (alle Systeme, die ohne HV und betriebsbereiten Range Extender bereits prüf- und funktionsfähig sind)
3. Kommunikationsprüfung (Fahrzeug- & Inverter CAN)
4. Hochvoltsystem und Generatoren
5. Niedervoltinbetriebnahme 2 (alle übrigen Komponenten und Diagnosen z.B. drehzahlabhängige Funktionen)
6. Verbrennungsmotor Inbetriebnahme
7. Funktions- und Sicherheitstests

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurde ebenfalls die funktionale Sicherheit der Software überprüft und die Sicherheitsfunktionen überarbeitet und kalibriert.

Aufgrund der teils parallel laufenden Software Anpassungen auf Seiten des Fahrzeugs, welche von StreetScooter durchgeführt und im Fahrzeug kalibriert wurden, standen vor allem zu Beginn der Inbetriebnahme noch nicht alle Funktionen und CAN Signale wie die BMS Daten zur Verfügung, welche die Steuerung des Range Extenders benötigt um die einzelnen Systeme frei zu geben und entsprechend einen Betrieb zu ermöglichen.

Um zu diesem Zeitpunkt nicht zu viel Zeit zu verlieren wurden temporär zusätzliche Funktionen in der Software auf der MicroAutoBox implementiert sowie eine angepasste Kalibrierung verwendet, die ein Fortsetzen der Inbetriebnahme durch beispielsweise manuelles Überschreiben der Batterieparameter oder selektive Deaktivierung einzelner Diagnosen ermöglichte, obwohl das Fahrzeug speziell im Bereich der CAN Schnittstelle zum Range Extender aufgrund der andauernden Softwareentwicklung noch nicht den finalen Spezifikationen entsprach.

Die ersten Inbetriebnahmefahrten, sowie die Basiskalibrierung der kühlungsrelevanten Funktionen wurden in Vorbereitung auf eines der Meilensteintreffen auf dem Avantis Gelände der StreetScooter GmbH durchgeführt.

Im Anschluss an die Inbetriebnahme wurden dann Anfang des Jahres 2016 die ersten Messfahrten auf dem ATC in Aldenhoven durchgeführt, um einerseits die Kalibrierung des Basis-Rex zu finalisieren und andererseits Messergebnisse für die Auswertung sowie den späteren Vergleich mit der GreenREX Variante zu generieren.

Hierbei ging es im Wesentlichen um die Bewertung des Kraftstoffverbrauchs, sowie die der Abgastemperaturwerte, im Vergleich zur Simulationssoftware. Die Simulationssoftware wurde im Anschluss an die Realmessungen angepasst, um die Ergebnisse der Simulation so nah wie möglich an die Realität anzugleichen, da die Simulationssoftware im Verlauf auch als Basis für die Anpassungen des GreenREX-CNG Betriebs bzw. die Auslegung der Betriebsstrategie diente.

Für die Auswertung der Messungen sowie deren Vorstellung im Rahmen von Zwischenberichten und Meilensteintreffen wurden die Ergebnisse der Messauswertung zusätzlich in Form einer Präsentation aufbereitet.

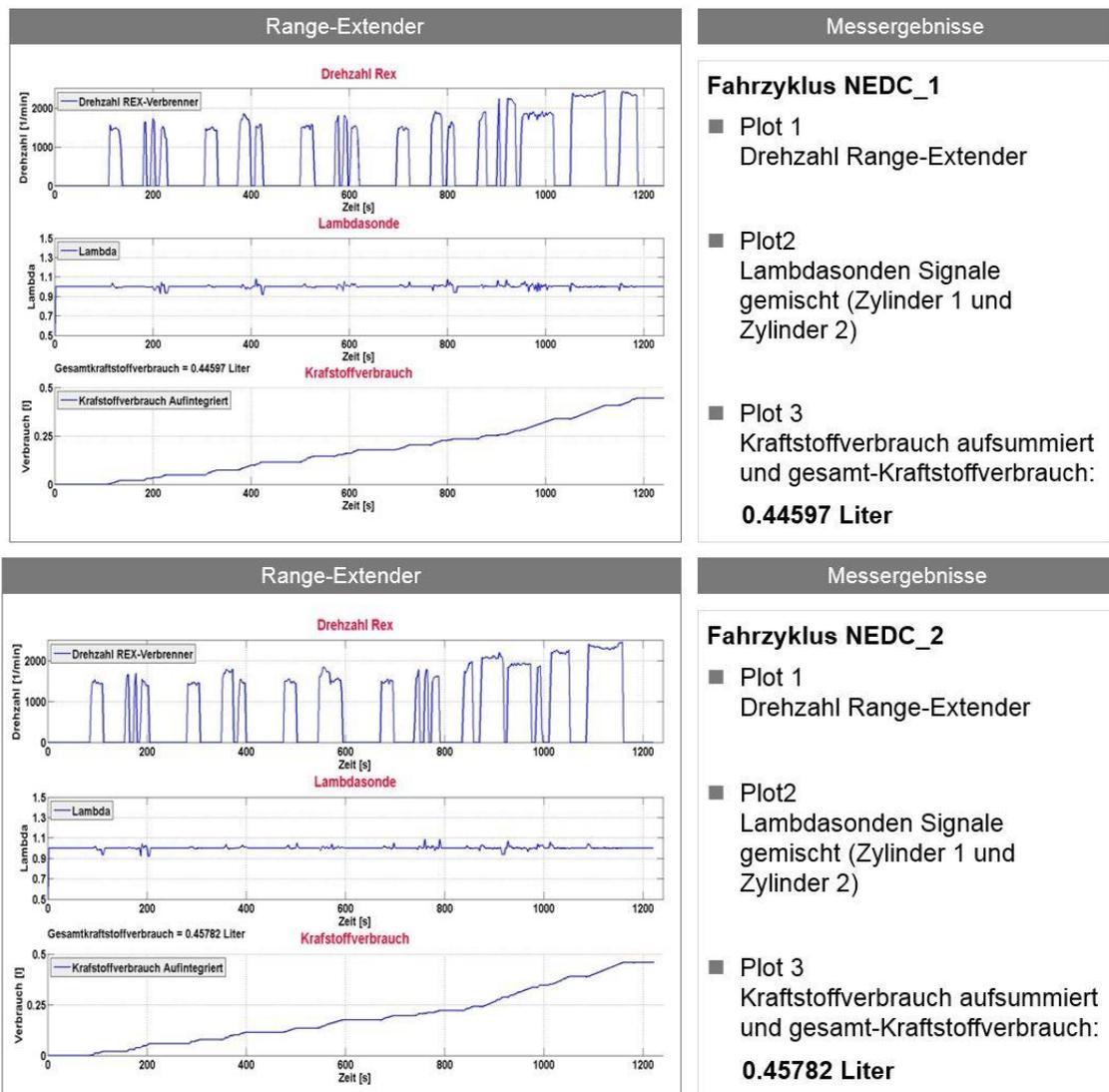


Abbildung 13: Ergebnisse der Basisvermessung im Fahrzyklus NEDC

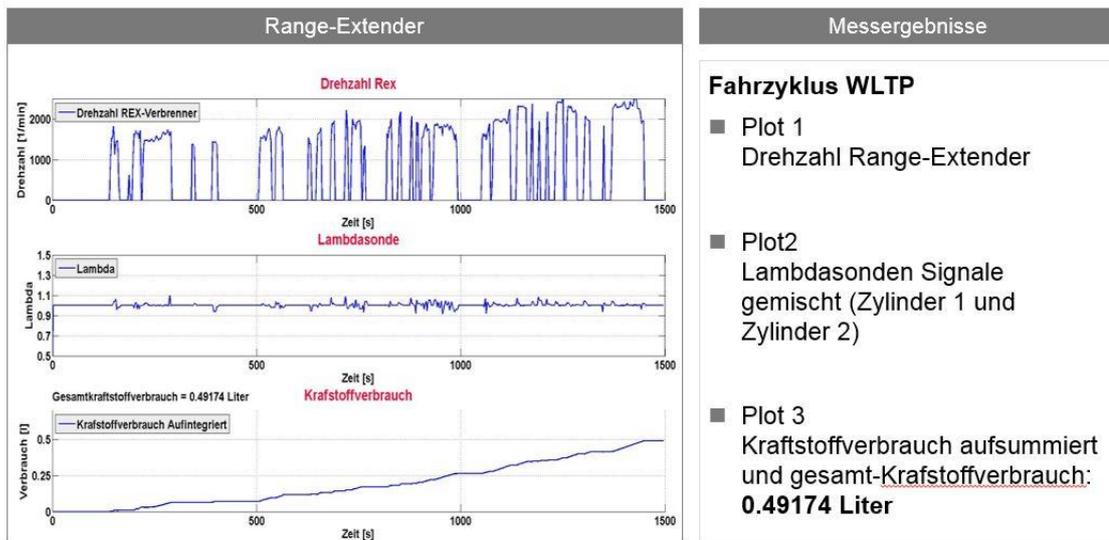
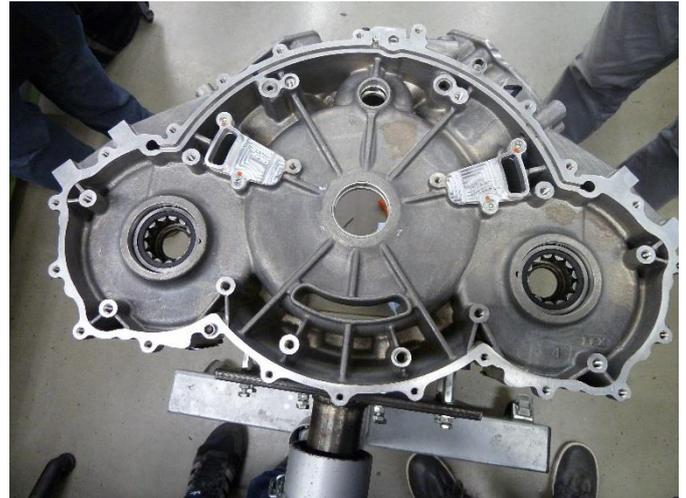


Abbildung 14: Ergebnisse der Basisvermessung im Fahrzyklus WLTP

### 3.3 Arbeitspaket 403: Aufbau und Inbetriebnahme des GreenREX Moduls

Nach Abschluss der Erprobung des Basis REX Ende des Jahres 2016 wurde der Motor aus dem Fahrzeug ausgebaut und demontiert. Da aufgrund der inzwischen geänderten Projektinhalte weder ein zweites Fahrzeug noch ein zweiter Range Extender parallel aufgebaut werden konnten, mussten die Arbeiten am GreenREX Aggregat verschoben und auf die Komponenten des Basis Rex nach dessen Demontage aus dem Fahrzeug gewartet werden.

Der Basis Motor wurde demontiert und auf Schäden überprüft, bevor er mit den neu erstellten Erdgas-Komponenten wie Kolben, Nockenwelle, Ansaugbrücke etc. wieder aufgebaut wurde. Wegen des Wechsels vom Betrieb mit konventionellem flüssigen Ottokraftstoff beim Basis REX zum Betrieb mit Methan (Biomethan oder Erdgas) beim GreenREX wurden zudem ein Hochdruck- und ein Niederdrucksensor, die neuen Injektoren sowie ein Druckregelventil samt Peripherie und Verkabelung zum REX hinzugefügt. Weil zu diesem Zeitpunkt die finalen Generatoren noch nicht zur Verfügung standen und um Schäden an diesen beim Prüfstandbetrieb des Verbrennungsmotors vorzubeugen, wurden für diesen Aufbau anstelle der Generatoren Dummy-Bauteile verbaut, die hinsichtlich des Betriebsverhaltens, beispielweise in Bezug auf die Rotationsträgheit, für die Kalibrierung des Verbrennungsmotors identische Kennwerte aufwiesen.



**Abbildung 15: Aufbau Range Extender Modul**

Die Sensordaten wurden ebenfalls in der Software eingebunden und auch die Ansteuerung des Druckregelventils integriert. Für die Prüfstandssteuerung wurde eine CAN-Schnittstelle mit entsprechendem DBC-File erstellt. Die gesamte Software wurde in die Micro Autobox integriert und für den Prüfstandsbetrieb vorbereitet. Neben dem Range Extender wurde zudem ein Kabelstrang für die Anbindung an den Prüfstand in Abstimmung mit dem Fraunhofer ICT bei FEV gefertigt. Neben den Messdaten, die von der Autobox via CAN an den Prüfstand übermittelt werden sollten, mussten zudem aus Sicherheitsgründen zusätzliche Sicherheits- und Steuerungsfunktionen für den Prüfstandsbetrieb sowohl in der Software als auch in Form von analogen Eingängen in der RapidPro vom Prüfstand zwecks Freigabe oder beispielsweise zur Erfassung der „Fahrpedalstellung“ des Prüfstands eingelesen werden.

Der fertig montierte Motor mitsamt vorbereiteter Elektrik und Steuerung wurde im Anschluss für den Einbau in den Prüfstand zum Fraunhofer ICT geschickt.

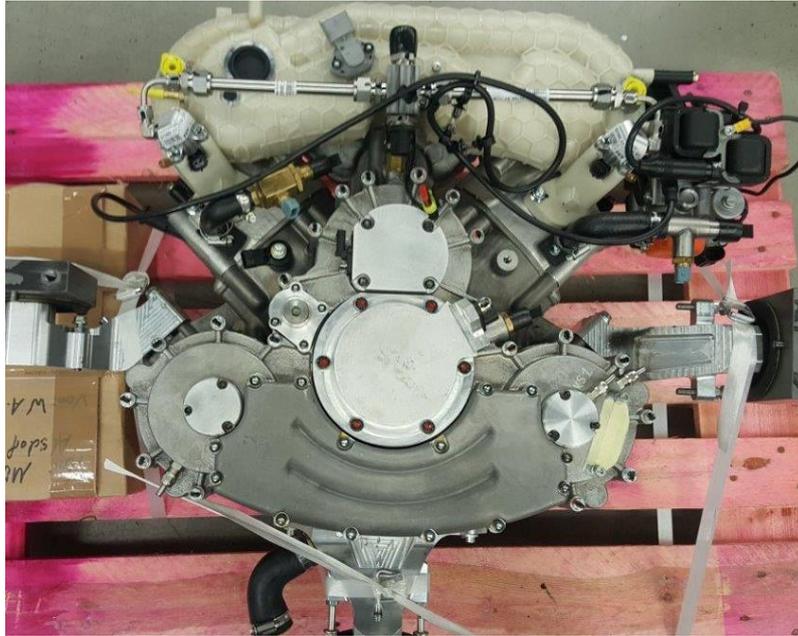


Abbildung 16: Umgerüsteter CNG Range Extender vor dem Versand



Abbildung 17: RCP Steuereinheit und Kabelbaum

### 3.4 Arbeitspakete 201, 202, 203: Aufbau, Integration und Inbetriebnahme des Basis Range Extender Modul

Nachdem der Range Extender in den Prüfstand integriert wurde, wurde die Inbetriebnahme durch die FEV Europe GmbH unterstützt. Hierbei wurde der Aufbau an sich sowie u.a. die Funktion der Sensoren und Aktoren detailliert geprüft. In diesem Zusammenhang wurden Probleme bezüglich des neuen Motorkabelbaums sowie des Öldrucksensors bearbeitet und gelöst sowie zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen in Form einer Prüfstands freigabe, die über einen zusätzlichen Analogeingang in die RapidPro eingelesen wurde, eingebaut und erfolgreich getestet.

Im Anschluss an die Inbetriebnahme wurde im Laufe des Prüfstandsbetriebs ein akustisch auffälliges Ventilprellen festgestellt, welches sich in der Zylinderdruckerfassung widerspiegelte. Um dieser Problematik weiter auf den Grund zu gehen und zu lösen, wurden zunächst in Beisein der FEV vor Ort ins Karlsruhe verschiedene Ventilspeile eingestellt und deren Auswirkung auf das bestehenden Phänomen getestet. Des Weiteren wurden im Anschluss testweise andere Stößelstangen seitens FEV beschafft und modifiziert, um durch den Einsatz einer anderen Materialkombination ggf. eine Verbesserung des Verhaltens zu erzielen. Diese Versuche brachten zwar eine leichte Verbesserung der Problematik mit sich, erzielten jedoch in Summe keine eklatante Verbesserung, die einen weiteren Prüfstandsbetrieb ohne das Risiko von Folgeschäden an beispielsweise den Ventilsitzen hätte ermöglichen können.

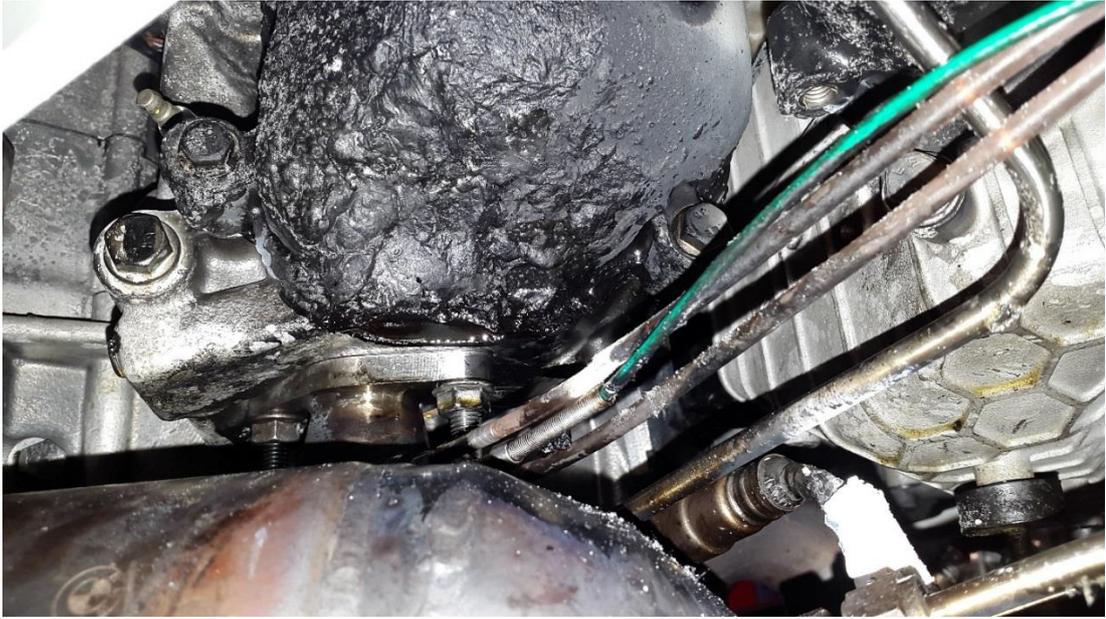
Basierend auf diesen Versuchen wurde unter Beteiligung einiger Ventiltriebexperten aus dem Hause FEV die Auslegung der Nockenwelle für den CNG GreenREX geprüft und ein Fehler in der Geometrie im Bereich der Rampen festgestellt, der zu diesem Verhalten geführt hat. Da nach genauerer Begutachtung eine Nachbearbeitung der CNG Nockenwelle nicht möglich war, wurde entschieden, auf die Nockenwelle des Basis-Rex zurückzugreifen und die zu erwartenden Leistungseinbußen, in Anbetracht einer deutlichen zeitlichen Verzögerung im Falle einer Neuauslegung und Fertigung einer Nockenwelle, in Kauf zu nehmen.

Aufgrund des komplexen Aufbaus des Range Extenders war ein Austausch der Nockenwelle auf dem Prüfstand leider nicht möglich, was die Demontage sowie den Transport zur FEV nach Aachen für die Umbauarbeiten notwendig machte. Nachdem der Motor nach einigen Wochen wieder in Karlsruhe auf dem Prüfstand in Betrieb genommen und das Verhalten der Ventile in der neuen Aufbaukonfiguration (alte Nockenwelle mit neuem CNG Ventiltrieb) begutachtet wurde, konnte seitens Fraunhofer die Kalibrierung des Verbrennungsmotors fortgesetzt werden.

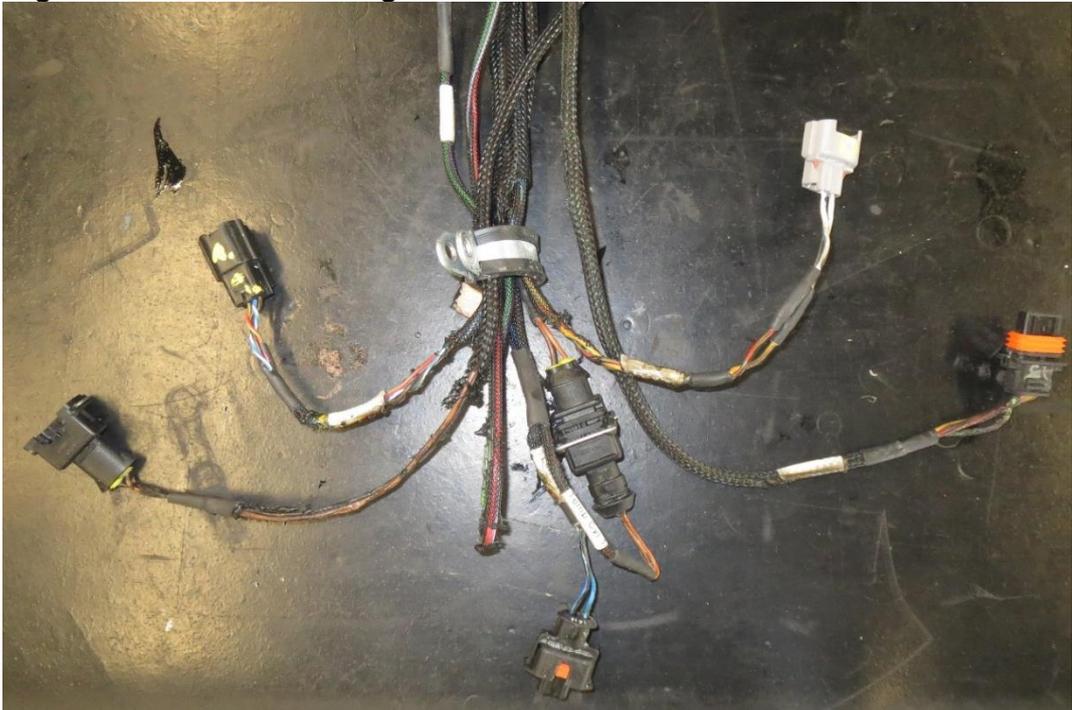
Für den Betrieb am Prüfstand wurde eine erste Kalibrierung auf Basis von Simulationsergebnissen für die CNG Variante in Zusammenarbeit von FEV und VKA erstellt. Im Anschluss wurde Unterstützung bei der Erfassung von Kennwerten und der Erfassung sowie Ausarbeitung des Zündkennfelds geleistet um die Kalibrierung im Hinblick auf den späteren Einsatz im Fahrzeug zu finalisieren.

Nach einigen Wochen Prüfstandsbetrieb kam es bei den letzten Versuchen mit Aufladebetrieb des Motors am Prüfstand aufgrund einer Undichtigkeit im Bereich des Ventildeckels des 2. Zylinders zu einem Brand, ausgelöst durch heruntertopfendes Öl auf den Abgaskrümmer. Hierbei wurden einige Komponenten wie Ventildeckel, Drosselklappe, Ansaugbrücke und Kabelbaum beschädigt, sodass ein weiterer Betrieb auf dem Prüfstand nicht mehr möglich war. Da zu diesem Zeitpunkt die Basiskalibrierung abgeschlossen war und lediglich noch Zusatzuntersuchungen im Gange waren, die für den späteren Betrieb des Range Extenders im Fahrzeug nicht relevant waren, wurde der Prüfstandbetrieb damit für beendet erklärt und das Aggregat zurück an FEV geschickt.

Nach Rückkehr des Range Extenders vom Prüfstand wurden in der Motoraufbauwerkstatt die Schäden auf Folgen des Feuers am Prüfstand untersucht. Hierbei wurden beschädigte Bauteile getauscht und teils, wie beispielsweise der Kabelbaum, neu angefertigt. Weiterhin wurden die Dummy Rotoren gegen die tatsächlichen Rotor-Elemente der E-Maschinen ausgetauscht und der Motor wieder komplettiert. In diesem Zustand wurde das Aggregat an die StreetScooter GmbH für den Einbau ins Fahrzeug übergeben.



**Abbildung 18: Brandschaden Range Extender Modul**



**Abbildung 19: Brandschaden Kabelbaum**



**Abbildung 20: Brandschaden Saugrohr**



**Abbildung 21: Brandschaden Ölwanne**

Das Fahrzeug wurde Ende 2017 von der StreetScooter GmbH mit montiertem GreenREX Motor wieder an FEV übergeben. Die Verrohrung der Gasanschlüsse wurde, von der StreetScooter GmbH durchgeführt, Anschließend wurde in Vorbereitung für die Messfahrten seitens FEV zusätzlich ein Volumenstrommessgerät in den Unterdruckteil der Gaszuleitung zwischen Druckregler und Hauptgasleitung integriert.

Bei der Hochvolt-Verkabelung des Aggregats im Fahrzeug ist im Rahmen der Isolationsprüfung ein Isolationsfehler an einer der beiden E-Maschinen zwischen Motorwicklung und Gehäuse aufgetreten. Da das Fahrzeug mit diesem Fehler nicht in Betrieb genommen werden durfte, wurde zunächst bei eingebautem Range Extender geprüft, ob der Fehler an den Anschlussstellen der E-Maschinen vorlag. Dazu wurden die Anschlüsse demontiert und Abstände zwischen Kontakten und Gehäuse geprüft. Nachdem festgestellt wurde, dass der Isolationsfehler weiterhin besteht, wurde das Aggregat erneut demontiert und der Motoraufbauwerkstatt übergeben. Dort wurde zunächst das Frontcover des Motors demontiert um einen Fehler auf der Frontseite der E-Maschinen auszuschließen (Siehe Abbildung 22). Eine erneute Isolationsmessung wies nach, dass der Fehler weiter besteht, demzufolge wurde mit der Zerlegung des Range Extender Moduls begonnen, um die E-Maschinen demontieren und prüfen zu können. Letztlich wurde sicherheitshalber einer der Statoren ausgetauscht, das Aggregat komplettiert und zwecks Wiedereinbau und Inbetriebnahme an die FEV Werkstatt übergeben.

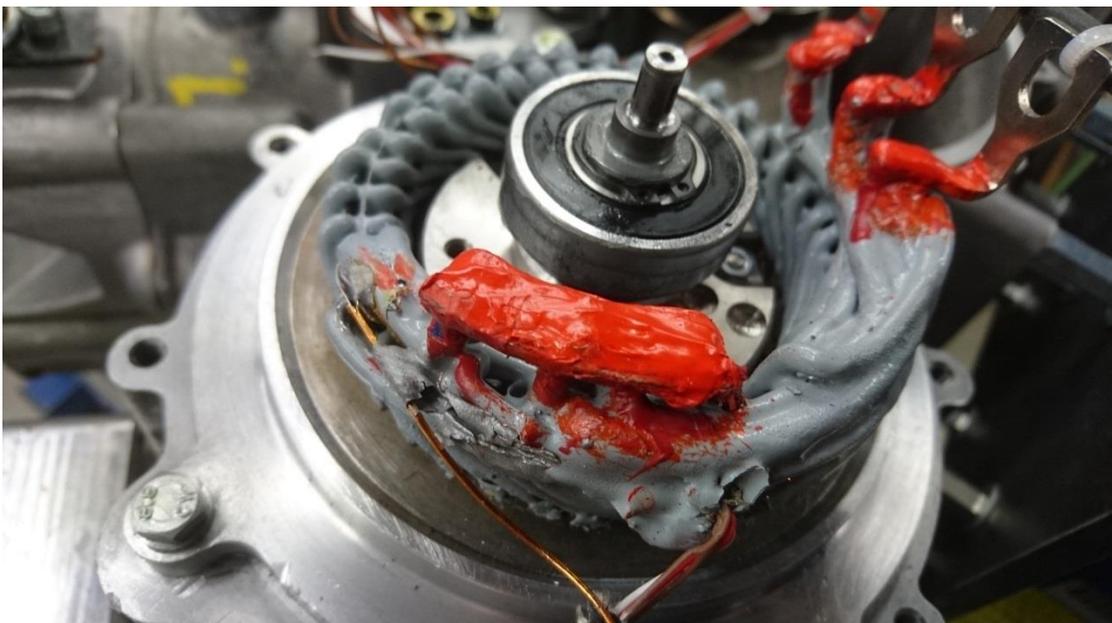


Abbildung 22: Freigelegte Anschlussseite der E-Maschine

Nachdem der Range Extender nach Umbau des Generators wieder im Fahrzeug integriert wurde, konnten die Integrationsarbeiten wie Verkabelung und Verrohrung fortgesetzt und anschließend mit der Erstinbetriebnahme des GreenREX Aggregats im Fahrzeug fortgefahren werden. Hierbei stellte sich bei einem der ersten Schritte leider schnell heraus, dass ein Defekt seitens des HV-System des Fahrzeugs vorlag, der die Inbetriebnahme des Inverters des Range Extenders zwecks Kalibrierung des Resolver Offsets und damit alle weiteren Arbeiten zum Erliegen brachte, da keine Hochspannungsversorgung vom Fahrzeug mehr zur Verfügung stand.

Nach Kontaktaufnahme mit der StreetScooter GmbH ließ sich keine schnelle Lösung für das Problem finden, weshalb das Fahrzeug zwecks Fehlersuche und Reparatur Anfang 2018 zu StreetScooter transportiert wurde.

Nachdem der Fehler seitens StreetScooter behoben und das Fahrzeug wieder fahrbereit war, wurde es Ende August 2018 wieder bei FEV angeliefert, sodass die Inbetriebnahme fortgesetzt werden konnte. Die Inbetriebnahme der Hochvoltkomponenten sowie der niedervoltseitigen Sensoren und Aktuatoren konnte im Hinblick auf das bevorstehende Projektende durch Einsatz zusätzlicher Ressourcen beschleunigt und somit schnell abgeschlossen werden. In Vorbereitung auf den Erststart des Verbrennungsmotors wurde anschließend das Fahrzeug erstmalig mit CNG betankt wobei Leckagen im Bereich der drei Tanks festgestellt und daraufhin die weitere Inbetriebnahme erneut unterbrochen werden musste. Da das CNG System von StreetScooter aufgebaut und durch eine externe Firma abgenommen werden musste, konnte seitens FEV aus rechtlichen Gründen keine Instandsetzung des CNG Systems durchgeführt werden. In enger Abstimmung mit StreetScooter konnte letztlich eine externe Fachfirma beauftragt werden, die den Fehler begutachtet, instandgesetzt und das System für die weitere Verwendung erneut abnimmt bzw. freigibt. Diese Arbeiten wurden von der Firma Theissen in den Räumlichkeiten der FEV Europe GmbH durchgeführt. Hierbei stellte sich schnell heraus, dass die Ventile an allen drei Voraussflaschen nicht festgezogen waren und zudem kein Dichtmittel aufgebracht war. Somit war lediglich eine korrekte Montage unter Verwendung des vorgeschriebenen Dichtmittels und dem entsprechenden Anzugsdrehmoment zur Fehlerbeseitigung ausreichend. Die anschließende Dichtigkeitsprüfung sowie das Betanken des Systems mit CNG deckten im Anschluss an die Reparatur keine weiteren Undichtigkeiten auf, führten in Summe jedoch in Verbindung mit der Fehlersuche und der Verfügbarkeit eines externen Monteurs zu einer erneuten Verzögerung bei der Inbetriebnahme.

Im Anschluss an die Betankung und die Freigabe des CNG Systems wurde die Inbetriebnahme des Verbrennungsmotors fortgesetzt, jedoch recht schnell Aufgrund erneuter HV Probleme seitens des Fahrzeugs wieder unterbrochen, da ohne zur Verfügung stehende Hochvoltversorgung vom Fahrzeug der Range Extender nicht gestartet werden kann, weil die integrierten Hochvoltgeneratoren beim Startvorgang den Verbrennungsmotor hochschleppen müssen.

Nach dem Versuch, das Problem per Ferndiagnose und dem Austausch von Messdaten in den Griff zu bekommen, wurde die Fehlersuche in enger Zusammenarbeit von StreetScooter am Fahrzeug in der FEV Werkstatt durchgeführt, um durch einen Fahrzeugtransport nicht unnötig viel Zeit zu verschwenden und den Abschlussstermin des Projekts halten zu können. Das Fahrzeug konnte im Rahmen dieser Arbeiten nach einigen Tagen Fehlersuche und Anpassung der Fahrzeugsoftware letztlich für die Fortsetzung der Range Extender Inbetriebnahme wieder in einen ausreichend funktionsfähigen Zustand überführt werden, sodass anschließend unter Einsatz hohen Personalaufwands der REX schnell in Betrieb genommen werden konnte und die Funktionsprüfungen in der Werkstatt schnell abgeschlossen werden konnten. Damit war das Fahrzeug kurz vor Projektabschluss bereit für die Fahrerprobung, welche in Zusammenarbeit von FEV und VKA auf dem Aldenhoven Testing Center durchgeführt und somit die ersten notwendigen Ergebnisse für das anschließende Abschlussmeeting mit allen Projektpartnern sowie dem Projektträger durchgeführt werden konnten.

### **3.5 Arbeitspaket 501: Untersuchung Funktionsentwicklungsfahrzeug**

#### **3.5.1 Basis Range Extender**

Im Anschluss an die ersten Inbetriebnahmefahrten auf dem Avantisgelände der StreetScooter GmbH, sollten die weiteren Erprobungen und Tests von der FEV

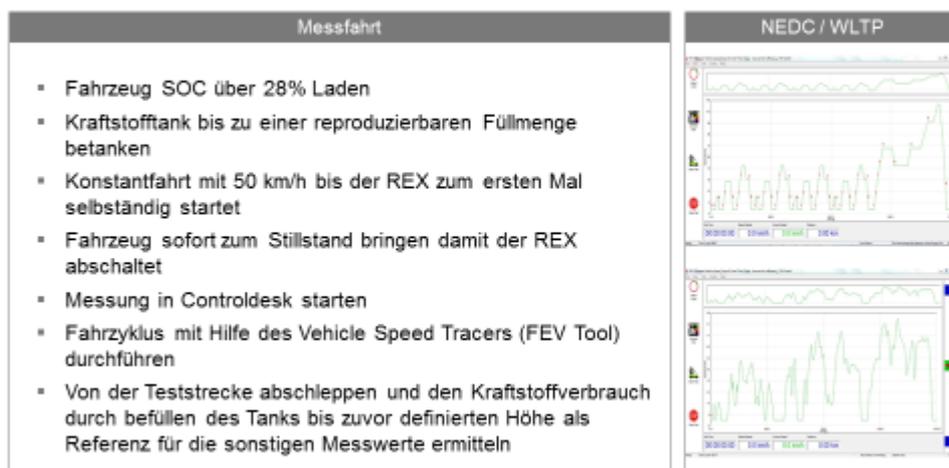
GmbH auf den Aldenhoven Testing Center stattfinden. Diese waren zunächst auf Dezember 2015 datiert, mussten jedoch aufgrund der Witterungen auf Ende Januar und Anfang Februar 2016 verschoben werden.

Der Testumfang beinhaltet hierbei zum einen die Kalibrierung des Verbrennungsmotors bzw. des Gesamttaggregats, die Anpassung und Erprobung der projektspezifischen Gegebenheiten (z.B. Thermomanagement aufgrund der Kapselung) und zum anderen die Durchführung von Verbrauchsmessungen des Range Extenders innerhalb verschiedener Fahrzyklen als Basis für den späteren Vergleich mit dem Green-REX Aufbau. Aufgrund der Verwendung von Dietz Generatoren im Basis Rex, welche neben einem schlechteren Wirkungsgrad zudem andere thermische Verhaltensweisen als die zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung stehenden Ziel-Generatoren aufwiesen, musste für die Verbrauchsmessungen eine Leistungsbegrenzung des Range Extenders in der Software hinterlegt werden. Hintergrund dessen waren zwischenzeitliche Abschaltungen des Range Extenders bei den Tests aufgrund zu hoher Wicklungstemperaturen bei hohen Lastanforderungen vom Basis Rex. Um die einzelnen Fahrzyklen ohne eine Not-Abschaltung der Generatoren oder Derating absolvieren zu können, wurde entsprechend die elektrische Leistung auf ca. 9KW begrenzt wodurch die Range Extender Funktion über den gesamten Prüfzeitraum gewährleistet werden konnte.

Für die Verbrauchsmessungen wurden unter Zuhilfenahme zusätzlicher Messtechnik (z.B. einem Kraftstoff-Volumenstrommesser, Abgastemperatursensoren etc.) sowie weiteren Testequipment wie einem Display für die Anzeige der Soll-Ist Geschwindigkeit zwecks Abfahren der verschiedenen Fahrzyklen auf der Teststrecke, mehrere Testfahrten mit dem Fahrzeug durchgeführt. Durch einen zuvor definierten Testablauf, der neben der Vorgehensweise zum Nachtanken und Laden von Fahrzeug und Rex auch die Konditionierung sowie Handhabung des Gesamtsystems für die spätere Vergleichbarkeit mit der CNG Variante sicherstellt, wurden mehrere Tests mit dem NEDC- sowie dem WLTP Zyklus absolviert.

### Green Rex

AP 502 Fahrzeugtests am ATC (Aldenhoven Testing Center)



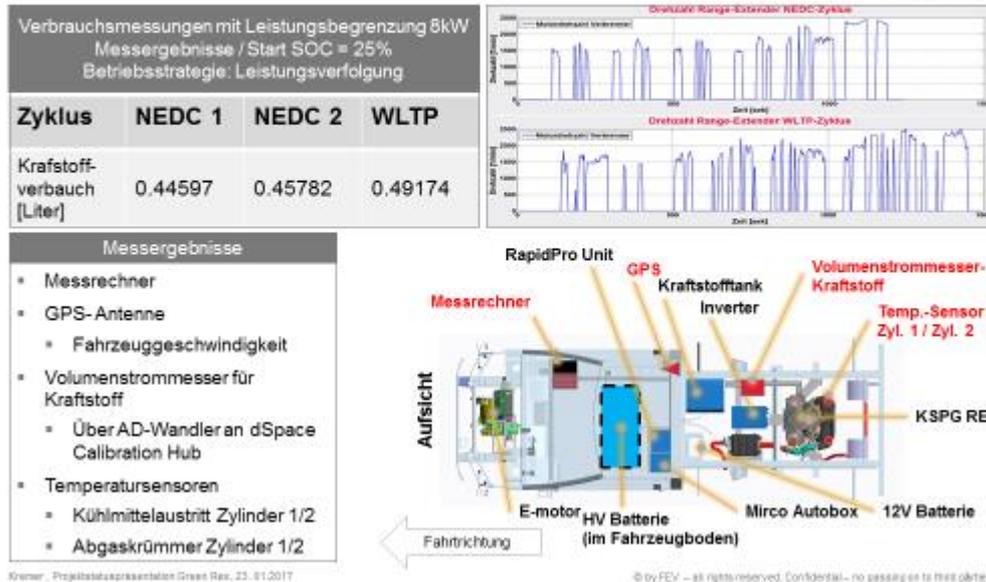
© by FEV – all rights reserved. Confidential – no passing on to third parties | 4

**Abbildung 23: Prozedur Kraftstoffverbrauchsmessung**

ie hierbei gewonnenen Ergebnisse und Messdaten wurden zum einen für die Anpassung des Simulationsmodells zur späteren Optimierung der Betriebsstrategie verwendet und zum anderen die Verbrauchswerte und Temperaturentwicklungen als Basis für den späteren Vergleich mit dem GreenREX Aggregat sowie der neuen Betriebsstrategie des VKA aufbereitet.

## Green Rex

### AP 502 Übersicht Verbrauchsmessungen



**Abbildung 24: Übersicht Kraftstoffverbrauchsmessung**

### 3.5.2 GreenREX

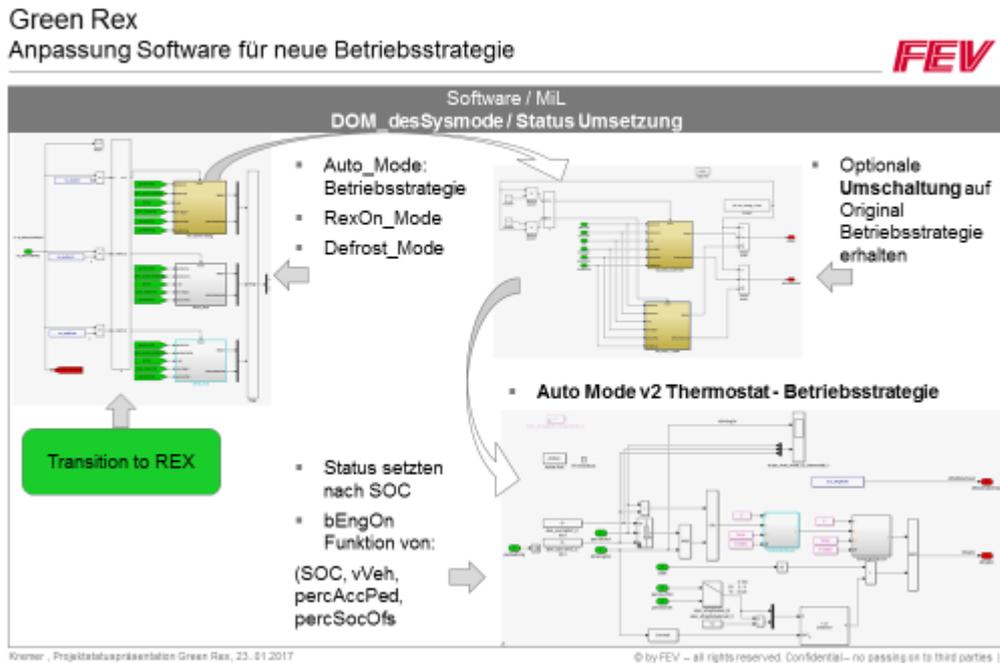
In Vorbereitung auf die Erprobung des GreenREX Aggregats im Gesamtverbund von Fahrzeug und modifizierten CNG Range Extender auf dem Aldenhoven Testing Center wurde neben der bereits beschriebenen Anpassungen im Rahmen der Inbetriebnahme in Zusammenarbeit von FEV und VKA die Software des Range Extenders umfangreich angepasst.

Hierbei wurden zum einen neue Sicherheitsfunktionen eingefügt, die zuvor am Prüfstand nicht von Nöten waren. Zum anderen wurden neue Schnittstellen in der Software geschaffen, um die neue Betriebsstrategie, welche vom VKA ausgearbeitet und im Rahmen der MIL simuliert wurde, einzubinden. Im Detail wurde diese neue Betriebsstrategie zusätzlich zur zuvor beim Basis Rex verwendeten Variante eingefügt und über einen kalibrierbaren Wahlschalter in der Software aktivierbar gemacht, um bei den Fahrzeugtests beide Varianten prüfen zu können, ohne verschiedene Softwarevarianten parallel pflegen zu müssen.

Der Großteil der Anpassungen betraf hierbei die folgenden beiden Bestandteile der Range Extender Control Unit:

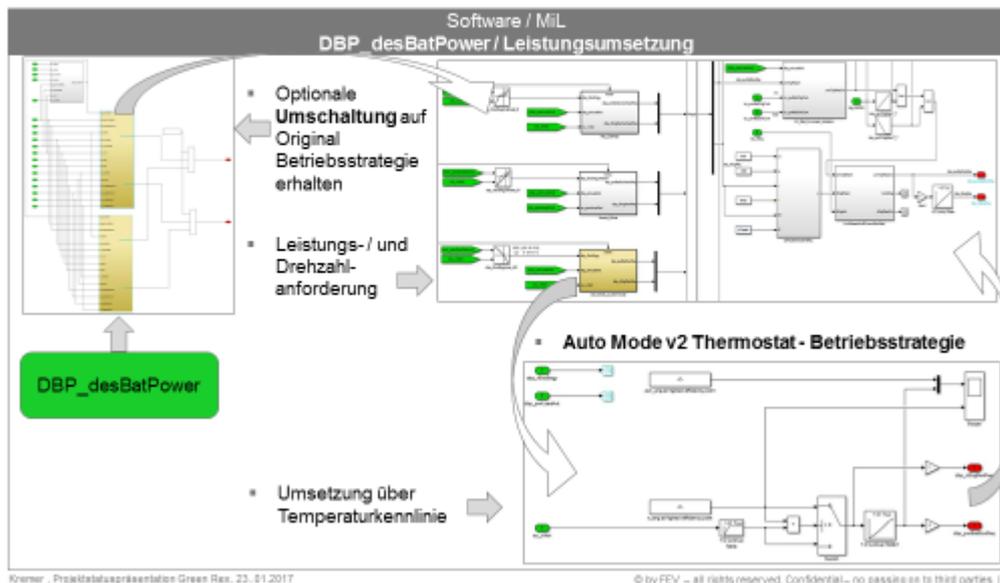
- Transition zum Ein- und Ausschalten des Range Extender in Abhängigkeit verschiedener Parameter, welche vom Fahrzeug via CAN übermittelt werden. Hierbei überwacht eine Funktion neben den Batteriedaten wie SOC, Tempe-

ratur und aktuell zulässigen Spannungs- und Stromgrenzen ebenfalls die derzeitige Fahrsituation in Form von Fahrzeuggeschwindigkeit, Fahrpedalstellung sowie der Differenz zwischen Soll- und Ist SOC der Batterie. Basierend auf diesen Daten wird dann über das Ein- und Ausschalten des Range Extenders entschieden.



**Abbildung 25: Übersicht der Anpassung der Software für die neue Betriebsstrategie 1**

- Notwendige Ladeleistung, die der Range Extender liefern soll: In Abhängigkeit der gewählten Betriebsstrategie entscheidet diese Funktion unter Berücksichtigung ähnlicher Parameter wie zuvor bei der Transition, welche für das Ein- und Ausschalten des Rex verantwortlich ist, welcher Betriebspunkt (Solldrehzahl & Last) vom Range Extender bzw. den beiden Teilsystemen aus Generatoren und Verbrennungsmotor angefahren werden soll.



**Abbildung 26: Übersicht der Anpassung der Software für die neue Betriebsstrategie 2**

Nachdem die Funktionen sowie das Gesamtfahrzeug in Betrieb genommen wurden, unterstützte FEV das VKA bei den Tests auf dem ATC um die notwendigen Messdaten für den Vergleich der neuen und der Basis Betriebsstrategie in Hinblick auf die Verbrauchspotenziale zu ermitteln. Die detaillierten Ergebnisse sind dem Teilbericht des VKA zu entnehmen.

Wie bereits im Rahmen der Abschlusspräsentation im Oktober vorgestellt wurde, traten bei den Messfahrten noch Auffälligkeiten im Bereich der Generatorregelung auf, die aufgrund der Verzögerungen vor und bei der Inbetriebnahme nicht mehr vor der Abschlussbesprechung behoben werden konnten.

Im Nachgang an diesen Termin Ende 2018 wurden in Zusammenarbeit von FEV und VKA weiter Kalibrierarbeiten am Range Extender durchgeführt, sowie die im Oktober festgestellten Auffälligkeiten bei der Generatorregelung analysiert und behoben. Das Vorhaben, weitere Tests mit dem Fahrzeug/ GreenREX auf dem ATC durchzuführen, um die Ergebnisse des Gesamtprojekts weiter zu detaillieren, konnten aufgrund erneuter Hochvoltprobleme seitens des Fahrzeugs bis zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung nicht mehr durchgeführt werden, da ein Defekt innerhalb der Fahrzeugbatterie vermutet wurde und das Fahrzeug daher erneut zu StreetScooter zwecks Diagnose und Reparatur transportiert wurde.

### 3.6 Arbeitspaket 702: Öffentlichkeitswirksame Darstellung der Ergebnisse

Das Projekt wurde im Rahmen der Nutzfahrzeuge IAA in Hannover im September 2014 vorgestellt. Außerdem ist eine Pressemitteilung von Seiten der FEV GmbH vorbereitet worden, in der das Projekt der Öffentlichkeit vorgestellt wurde.

Das Projekt wurde ebenfalls im Rahmen der FEV eigenen Hauszeitschrift vorgestellt.

ALTERNATIVE KRAFTSTOFFE: PROJEKT GREEN REX

» MOTOREN FÜR DEN GASBETRIEB, WELCHE DIE ANFORDERUNGEN AN EINEN RANGE EXTENDER ERFÜLLEN, SIND AKTUELL NICHT ERHÄLTLICH «

MARKUS KREMER IM GESPRÄCH ÜBER DAS VERBUNDPROJEKT „GREEN REX“



Ein rein regenerativ betriebenes leichtes Nutzfahrzeug ist das Ziel des Gemeinschaftsprojekts „Green Rex“. Die Experten der FEV GmbH entwickeln hierbei zusammen mit renommierten Projektpartnern einen „Range Extender“, der mit Erdgas betrieben wird. Grundlage der Entwicklung ist der von

KSPG und FEV entwickelte „J2-Range Extender“ mit FEVCom®-Prinzip, der bereits seit 2012 in einem von FEV zum Elektrofahrzeug konvertierten Fiat 500 Anwendung findet. FEV-Projektleiter Markus Kremer stellt das Projekt, dessen Aufgabenstellung und Roadmap vor.



duktionskosten, geringer Bauraum und gutes NVH-Verhalten – sind aktuell nicht erhältlich. Daher haben wir uns im Green Rex-Forschungsprojekt das Ziel gesetzt, zu klären, ob durch eine neue Kombination aus verfügbaren Großserientechnologien ein marktaugliches Fahrzeug herstellbar ist, das vollständig mit regenerativen Energieträgern betrieben wird.

• Welche Gründe waren ausschlaggebend, auf CNG-Technologie statt auf LPG-Technologie umzurüsten?

Da LPG nicht auf regenerativem Weg hergestellt wird, fiel die Wahl eindeutig auf Biogas. Zusätzlich bietet Biogas ein erhöhtes Einsparpotential vor schädlichem CO<sub>2</sub>. Im Vergleich mit Benzin liegt das Potenzial hier bei rund 24 Prozent, und auch gegenüber LPG sind Einsparungen in Höhe von statistisch 15 Prozent möglich. Zudem lässt sich aus Biogas gewonnenes Methan einfach speichern – beispielsweise im Erdgasnetz.

• Herr Kremer, können Sie kurz die Vorteile eines Range Extenders erläutern?

Der Range Extender ist ein zentrales Konzept für elektrisch betriebene Fahrzeuge. Es löst die Problematik der geringen Energiedichte von Traktionsbatterien. Der zusätzliche klassische Verbrennungsmotor an Bord des elektrisch betriebenen Fahrzeugs kann die Batterie – mittels angelegtem Generator – mit elektrischer Energie versorgen.

• Aktuell angebotene Range Extender sind meist benzind betriebene Otto-Motoren. Warum?

Dies ist in der Regel der günstigen Herstellung geschuldet. Der Nachteil dieses Konzeptes liegt vor allem darin, dass der „Range Extender“ auf die Versorgung mit Kraftstoff aus Erdöl angewiesen ist. Motoren für den Gasbetrieb, welche die Anforderungen an einen „Range Extender“ erfüllen – darunter niedrige Pro-

» METHAN IST EINE IDEALE ERGÄNZUNG ZU KONVENTIONELL ERZEUGTEN ENERGIETRÄGERN

• Wie sieht die Roadmap des Projektes aus?

In einem ersten Schritt wurde der von FEV und KSPG entwickelte „Range Extender“ mit seinem ursprünglichen Benzinbetrieb in ein StreetScooter-Work-Nutzfahrzeug integriert und auf der IAA Nutzfahrzeuge in Hannover der Öffentlichkeit vorgestellt. Derzeit wird der V2-KSPG „Range Extender“ in enger Zusammenarbeit mit der FEV GmbH durch das Fraunhofer Institut

in Karlsruhe auf einen Betrieb mit aufbereitetem Biogas hin überarbeitet und optimiert. Der überarbeitete „Range Extender“ wird dann am Prüfstand auf Herz und Nieren getestet und anschließend in ein weiteres Work-Nutzfahrzeug von StreetScooter integriert.

• Welches Ergebnis ist am Ende des Projektes zu erwarten?

Durch die frühzeitige Einbindung von Produktionsspezialisten kann voraussichtlich bereits am Projektende eine Aussage über die Machbarkeit im Vergleich zu einer Basisvariante mit Benzinantrieb abgeschätzt werden. Zudem planen wir eine Straßenzulassung sowie erste Fahrversuche mit dokumentierten CO<sub>2</sub>-Einsparungen, um die Machbarkeit des Konzeptes zu verdeutlichen. Zudem wird innerhalb dieses Projektes mittels Diskreter Dynamischer Programmierung (DDP) eine optimierte Betriebsstrategie des Range Extenders, speziell für die besondere Anwendung in einem Auslieferungsfahrzeug, ermittelt. Diese wird in der FEV eigenen Range

Extender-Prototypensteuerung zur Anwendung kommen, um den Verbrauch im Auslieferungsfahrzeug noch weiter zu senken.

**INFO**  
 Das Projekt Green Rex wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Projektträger ist das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Initiiert wurde das Projekt vorwiegend von der Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie (Baden-Württemberg GmbH (e-mobility)) und wird im Spitzencluster eElektromobilität (e-mobility) gefördert. Neben Vertretern der FEV besteht das Konsortium aus Spezialisten der KSPG AG, der StreetScooter GmbH, des Leibniz-Instituts für Verbrennungskraftmaschinen (IKV) der RWTH Aachen, des Fraunhofer ICT sowie des IFT – Institut für Produktionstechnik – usw. Weitere Informationen bietet die Projekt-Website: www.greenrex.de

Gesprochen mit:  
 Markus Kremer  
 kremer\_m@fev.com

Abbildung 27: Veröffentlichung im Rahmen der FEV Hauszeitschrift Spectrum

3.7 Zusammenfassung Ergebnisse

Ergebnisse der Untersuchung

Die Ergebnisse der Fahrttests sind in Tabelle 4 dargestellt. Es wurden eine rein elektrische Fahrt im NEDC sowie die regelbasierte und die optimierte Hybridstrategie jeweils im NEDC Fahrzyklus als auch im WLTP Fahrzyklus aufgezeichnet.

Tabelle 4: Ergebnisse der Fahrttests im NEDC und WLTP

#	Fahrzyklus und Strategie	Start SOC (%)	End SOC (%)	Verbrauch elek. (kWh)	Verbrauch mech. (kWh)	Kraftstofffluss (kg)	Kraftstoffenergie (kWh)
1	NEDC elektr.	39	30	1.90	-	-	-
2	NEDC regelb.	23	18	1.88	1.43	0.64	7.156
3	NEDC opt.	22	18	1.81	1.15	0.73	8.13
4	WLTP regelb.	22	16	2.45	1.83	1.06	11.79
5	WLTP opt	22	15	2.50	1.13	0.88	9.76

Die elektrische Energie, die der Batterie während der Fahrt entnommen wurde, liegt im NEDC Zyklus bei etwa 1.85 kWh und im WLTP bei etwa 2.47 kWh. Dies entspricht dem Verbrauch des rein elektrischen Betriebs, sofern die elektrische Energie ausschließlich über externes Laden der Batterie eingespeist wird. Im Range Extender Modus wird die Batterie zusätzlich während der Fahrt durch die an den Verbrennungsmotor angeflanschten Generatoren geladen. Es können demnach zusätzlich die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors sowie der Kraftstofffluss, der über den Heizwert des verwendeten Kraftstoffs in Kraftstoffenergie umgerechnet werden kann, gemessen werden. Diese Kraftstoffenergie, die zum Laden der Batterie

während der Fahrt aufgebracht werden musste, kann schließlich zum Vergleich verschiedener Betriebsstrategien des Hybridmodus herangezogen werden. Ziel ist ein möglichst hoher Wirkungsgrad der Ladefunktion, das heißt das Laden der der Batterie entnommenen elektrischen Energie bei Aufwand einer möglichst geringen Kraftstoffenergie. Voraussetzung für den Vergleich verschiedener Betriebsstrategien ist jedoch, dass jeweils die gleiche elektrische Energie während der Fahrt geladen wird. Bei Testfahrten konstanten Energiebedarfs am Rad muss demnach die Forderung eines konstanten Ladezustands der Batterie bei Start und Ende der Testfahrt gelten. Andernfalls würde die Betriebsstrategie ein Optimum darstellen, die kein Laden der Batterie während der Fahrt, sondern ausschließlich externes Laden nach der Fahrt vorsieht.

Wie in Tabelle 4 ersichtlich wurde diese Forderung bei den ersten Testfahrten nicht eingehalten. Ein Vergleich der Betriebsstrategien ist daher auf Basis der gezeigten Werte zunächst nicht möglich. Ehe weitere Testfahrten vorgenommen wurden, sind jedoch in einem ersten Schritt die Ergebnisse durch Betrachtungen des Energie- und Kraftstoffflusses der jeweiligen Testfahrten korrigiert worden. Durch Vergleich des Ladezustands der Batterie zu Beginn und Ende der jeweiligen Fahrt kann berechnet werden, wie viel Energie bei Einhaltung der Forderung eines konstanten Ladezustands zusätzlich hätte geladen werden müssen. Über die gemessene mechanische Leistung des Verbrennungsmotors beziehungsweise elektrische Leistung der Generatoren sowie des Kraftstoffflusses ist zusätzlich bekannt, wie viel Kraftstoffenergie pro kWh Ladeenergie aufgebracht wurde. Dieser Wert ist ein Indikator dafür, in welchen Betriebspunkten der Range Extender zum Laden betrieben wurde, und demnach bereits ein Maß für die Güte der Betriebsstrategie. Zusätzlich kann über den spezifischen Verbrauch der Verbrauch berechnet werden, der für die zusätzlich aufzubringende Energie zum Laden der Batterie verbraucht worden wäre. Der Gesamtkraftstoffverbrauch kann anschließend zum Vergleich der beiden Betriebsstrategien herangezogen werden. Die Ergebnisse dieser Korrekturrechnung sind in Tabelle 5 dargestellt.

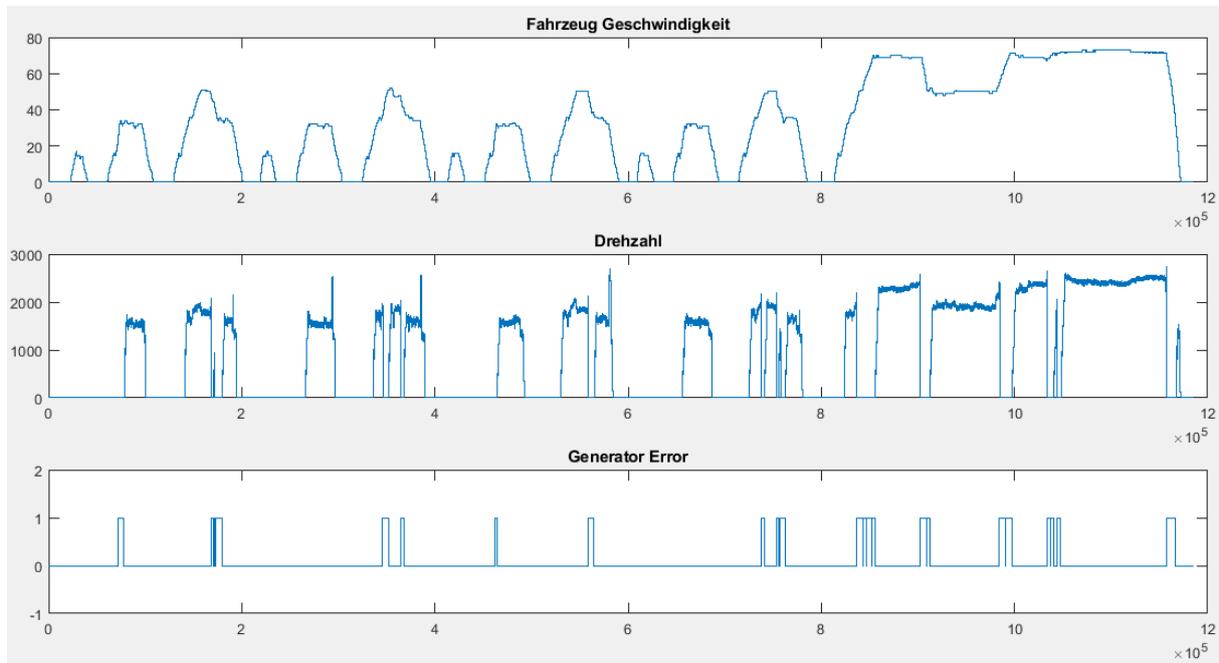
**Tabelle 5: korrigierte Ergebnisse der Fahrtests im NEDC und WLTP**

#	Fahrzyklus und Strategie	Delta SOC (%)	elek. Energie Fehlbetrag (kWh)	Spez. Verbrauch (kg/kWh)	Kraftstoff Fehlbetrag (kg)	Kraftstofffluss gesamt (kg)	Kraftstoff Energie gesamt (kWh)
1	NEDC elektr.	9	1.90	-	-	-	-
2	NEDC regelb.	5	1.05	0.45	0.48	1.12	12.4
3	NEDC opt.	4	0.84	0.64	0.54	1.27	14.1
4	WLTP regelb.	6	1.27	0.58	0.73	1.80	19.9
5	WLTP opt	7	1.48	0.78	1.15	2.03	22.6

Für die Berechnungen wurde angenommen, dass in diesem Bereich des Ladezustands der Batterie ein Prozent Unterschied SOC (State of Charge) einer bestimmten Menge elektrischer Energie entspricht. Hierüber konnte mithilfe der Differenz des Ladezustands jeder Messfahrt der Fehlbetrag berechnet werden, der zusätzlich hätte geladen werden müssen. Anschließend wurde wie beschrieben über den durchschnittlichen spezifischen Verbrauch jeder Fahrt der Gesamtbedarf an Kraftstoffenergie berechnet. Hierbei wurde angenommen, dass der spezifische Verbrauch sich auch bei Einhalten der Forderung eines konstanten Ladezustands der Batterie nicht geändert hätte.

Insgesamt ist ein sehr geringer Wirkungsgrad der Ladefunktion zu verzeichnen. Dies liegt insbesondere an einem fehlerhaften Ansteuerverhalten des Range Extender Moduls, wie bereits

im Rahmen der Abschlusspräsentation im Oktober kommuniziert wurde. In Phasen, in denen der Verbrennungsmotor den Regeln der Betriebsstrategien folgend Leistung abgegeben haben müsste, wurde er stattdessen in kurzen Abständen wiederholt gestoppt und wieder gestartet. Teilweise ist über längere Phasen ein Kraftstofffluss messbar, der jedoch nicht zur Zündung gebracht wurde und dementsprechend keine Leistung vom Verbrennungsmotor abgegeben wurde. Abbildung 3.22 zeigt beispielhaft die Messung eines NEDC Zyklus' in denen der hier als Generator Error bezeichnete Fehler auftritt.



**Abbildung 28 Auffälligkeiten im Bereich der Generatorregelung ohne Kompensationen**

Dieser fehlerhafte Betrieb kann zu einem deutlich erhöhten Kraftstoffverbrauch führen, da der Verbrennungsmotor zum einen während der häufigen Start-/Stopp-Vorgänge durch suboptimale Betriebspunkte fährt und zum anderen, wie beschrieben, teilweise der gasförmige Kraftstoff nicht zur Zündung gebracht wird. Daher sind die bisher gezeigten Messergebnisse nicht abschließend aussagekräftig und auch der Vergleich der Betriebsstrategien kann bislang nicht final beurteilt werden.

Nach anschließenden Untersuchungen in Zusammenarbeit von VKA und FEV Europe GmbH konnte der beschriebene Fehler einem fehlerhaften Stromsensor zugeordnet werden, der am Inverter der Traktionsmaschine einen deutlich überhöhten Strom gemessen hat. Durch die softwareseitigen Leistungsbegrenzungen der HV-Batterie und der beteiligten Inverter wurde aufgrund dessen in bestimmten Situationen der Stopp des Verbrennungsmotors erzwungen bzw. dessen Start verhindert. Per Software-Update und Nutzung eines alternativen Signals konnte der Fehler behoben werden.

Leider mussten unsere Aktivitäten nach erfolgreichem Funktionstest der upgedateten Software eingestellt werden. Bereits vorbereitete Messfahrten konnten nicht durchgeführt werden, nachdem das Fahrzeug aufgrund von erneuten Problemen des HV-Systems nicht weiter betrieben werden konnte. Der Ladezustand der HV-Batterie wurde als 0% ausgegeben und die HV-Relais konnten nicht mehr geschaltet werden. Auch ein externes Laden der Batterie war nicht möglich. Zur Diagnose und Reparatur musste das Fahrzeug daher erneut zu StreetScooter GmbH transportiert werden, wo sich herausgestellt hat, dass einzelne Zellen der HV-Batterie defekt sind und ausgetauscht werden müssen.

Diese Reparatur war dem Partner StreetScooter aber bis zur Fertigstellung dieses Berichts nicht möglich, so dass keine weiteren Messfahrten durchgeführt werden konnten. Die dargestellten Analysen beziehen sich also auf die bis zum defekt gewonnenen Messdaten.

### 3.8 Risiken

Der Aufbau des Versuchsfahrzeugs unter Verwendung von Bauteilen aus verschiedenen Spenderfahrzeugen schloss das nicht erkannte Risiko ein, das bestimmte Ersatzteile möglicherweise im Fall eines Defekts nicht oder schwer verfügbar sein könnten. Dieses Risiko ist vermutlich eingetreten und mag eine Instandsetzung der Batterie verhindert haben. Ein Risiko besteht in der geplanten Zulassung des Fahrzeugs zur Nutzung im öffentlichen Straßenverkehr, so ergeben sich bei der Dokumentation und Validierung der Funktionen besondere Anforderungen.

### 3.9 Verwertungsplan

Die geplante Verwendung des Fahrzeugs für Werbezwecke wird leider nicht möglich sein, weil die HV-Batterie vom Eigentümer Firma StreetScooter nicht mehr repariert wurde und diese auch nicht in Aussicht steht. In der Zwischenzeit hat die Deutsche Post angekündigt, das Unternehmen bis spätestens zum Ende des Jahres 2020 zu schließen und die Produktion des Fahrzeugs einzustellen.

Dagegen konnte FEV die Erkenntnisse aus dem Projekt bereits in zwei Kundenprojekten einsetzen, die sich mit der Entwicklung von Batterie-elektrischen Fahrzeugen mit Range-Extendern beschäftigten. Etliche Funktionen und Algorithmen der Software konnten als Grundlage für kundenspezifische Anpassungen verwendet werden. Ihre kontinuierliche Weiterentwicklung sichert die Wettbewerbsfähigkeit der FEV.

Die Ergebnisse des Projekts leisten somit einen Beitrag zur Stärkung der Wettbewerbsposition für FEV und damit für den Technologie-Standort Aachen.

## 4 Literaturverzeichnis

- [BAC13] Richard Backhaus, Redaktion Springer für Professionals, Freikolbenlineargenerator als Range-Extender, 2013, <http://www.springerprofessional.de/freikolbenlineargenerator-als-range-extender/4023706.html> [abgerufen am: 28.08.2013].
- [MCK09] McKinsey, CO2-Reduzierung bei Pkws: Klassische Verbrennungsmotoren haben das größte Einsparpotenzial, [http://www.mckinsey.de/downloads/presse/2009/090408\\_pm\\_Roads\\_Toward\\_a\\_Low-Carbon\\_Future.pdf](http://www.mckinsey.de/downloads/presse/2009/090408_pm_Roads_Toward_a_Low-Carbon_Future.pdf), 2009
- [MTZ12] Range Extender von KSPG, Motortechnische Zeitschrift, Stuttgart, 2012
- [NPE-10a] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Zwischenbericht: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 30.11.2010.
- [NPE-11] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Zwischenbericht: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 30.11.2010.
- [PISCH2011] Martin Pischinger, Christoph Steffens, Karsten Wittek, Markus Kalenborn; Arbeitsmaschine, Patent WO2011160847A1
- [PUD10] Katrin Pudenz, ATZ Online, Der Audi A! E-tron: Mit E-Antrieb und Wankelmotor als Range-Extender, 2010, <http://www.springerprofessional.de/der-audi-a1-e-tron-mit-e-antrieb-und-wankelmotor-als-range-extender-12804/3949138.html> [abgerufen am: 28.08.2013].
- [SHE09] Shell, Shell-PKW Szenarien bis 2030 – Kurzfassung, [http://www.sttic.shell.com/static/deu/downloads/publications\\_2009\\_shell\\_mobility\\_scenarios\\_summary\\_de.pdf](http://www.sttic.shell.com/static/deu/downloads/publications_2009_shell_mobility_scenarios_summary_de.pdf), 2009

- [STA13] Statista, Installierte elektrische Leistung von Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2013 (in Megawatt), <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167673/umfrage/installierte-elektrische-leistung-von-biogasanlagen-seit-1999/> [abgerufen am: 28.08.2013].
- [UFO12] BMU, Sonderteil: Forschungsrahmen des BMU und Umweltforschungsplan (UFOPLAN) 2013.
- [WEB] <http://GreenREX.de/projekt/>

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel GreenREX Elektrofahrzeug mit regenerativ betriebenem On-Board-Energiewandler in Form eines monovalenten Erdgasmotors - Aufbau und Integration eines Basis Range Extender Moduls zur Funktionserprobung Abschlussbericht Teilvorhaben FEV Europe GmbH	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kremer, Markus Philippen; Jörg Speckens, Friedrich-Wilhelm Van der Weem; Dirk	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2018
	6. Veröffentlichungsdatum 31.03.2019
	7. Form der Publikation Elektronisch
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) FEV Europe GmbH Neuenhofstrasse 181 52078 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 01MY13001E__FEV_Abschlussbericht _GreenREX
	10. Förderkennzeichen 01MY13001E
	11. Seitenzahl 34
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 11
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 28
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Das Projekt wurde im Rahmen der Nutzfahrzeuge IAA in Hannover im September 2014 vor-gestellt.	
18. Kurzfassung Aktuelle Elektrofahrzeuge haben gegenüber konventionellen Fahrzeugen den entscheidenden Nachteil einer geringeren Reichweite, welcher durch die lange Ladezeit der Hochvolt-Batterie noch verschärft wird. Ein möglicher Ansatz zur Lösung dieser Problematik ist der Einsatz eines zusätzlichen Verbrennungsmotors zur Reichweitenverlängerung (Range-Extender). Der Range-Extender als modularer Bestandteil eines seriellen Hybridantriebskonzepts bietet das Potenzial, die Defizite von Elektrofahrzeugen zu kompensieren und diesen im Fahrzeugsegment der Klein- und Kleinstwagen als Brückentechnologie den Weg zu bereiten. Der Vorteil einer Verbrennungskraftmaschine als Range-Extender ist das hohe Entwicklungsstadium dieser Wärmekraftmaschinen. In Kombination mit alternativen Biokraftstoffen ist ein CO2 neutraler Betrieb möglich. Biogas ist über die regenerative Eigenschaft hinaus gut für den ottomotorischen Motornbetrieb geeignet. Die hohe Klopfstigkeit erlaubt eine deutliche Anhebung des Verdichtungsverhältnisses und einen wirkungsgradgünstigen Betrieb bei hohen Lasten. Ziel dieses Teilvorhabens war es, einen Range Extender für alternative Kraftstoffe aufzubauen und anschließend in ein Entwicklungsfahrzeug zu integrieren. Nach einer Konzepterstellung zum Aufbau eines Hybridfahrzeugs mit Range Extender wurde ein solches Modul entwickelt und aufgebaut. Die Inbetriebnahme des Moduls wurde durch Simulation der Brennvorfahren unterstützt und endete in einer Abnahme am Prüfstand. Anschließend erfolgte die mechanische und elektrische Integration in das Fahrzeug. Die Inbetriebnahme des Range Extenders im Einzelnen als auch später im Gesamtverbund mit den Fahrzeugsystemen wurde seitens FEV durchgeführt. FEV unterstützte danach das VKA bei den Tests auf dem ATC um die notwendigen Messdaten für den Vergleich der neuen und der Basis Betriebsstrategie in Hinblick auf die Verbrauchspotenziale zu ermitteln. Die detaillierten Ergebnisse sind dem Teilbericht des VKA zu entnehmen.	
19. Schlagwörter Alternative Kraftstoffe, modularer Elektroantrieb, Range Extender, Energieeffizienz	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title GreenREX Electric vehicle with regenerative on-board energy converter in the form of a monovalent natural gas combustion engine - Design and integration of a basic range extender module for functional testing Final Report, subproject FEV Europe GmbH	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kremer, Markus Philippen; Jörg Speckens, Friedrich-Wilhelm Van der Weem; Dirk	5. end of project 31.10.2018
	6. publication date 31.03.2019
	7. form of publication Electronic
8. performing organization(s) (name, address) FEV GmbH Neuenhofstrasse 181 52078 Aachen	9. originator's report no. 01MY13001E__FEV_Final_Report_GreenREX
	10. reference no. 01MY13001E
	11. no. of pages 34
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 11
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 28
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) The project was presented as part of the Commercial Vehicles IAA in Hanover in September 2014.	
18. abstract Current electric vehicles have the decisive disadvantage of a shorter range compared to conventional vehicles, which is exacerbated by the long charging time of the high-voltage battery. A possible approach to solving this problem is the use of an additional internal combustion engine for range extension (range extender). The range extender as a modular component of a hybrid electric drive concept has the potential to compensate for the shortcomings of electric vehicles and pave the way for them in the vehicle segment of small and micro cars as a bridge technology. The advantage of an internal combustion engine as a range extender is the high development stage of these heat engines. In combination with alternative biofuels, CO2 neutral operation is possible. In addition to its regenerative properties, biogas is also well suited for engine operation on the Otto engine. The high knock resistance allows a significant increase in the compression ratio and a low-efficiency operation at high loads. The aim of this subproject was to build a range extender for alternative fuels and then integrate it into a development vehicle. After a concept for the construction of a hybrid vehicle with range extender, such a module was developed and built. The commissioning of the module was supported by simulation of the combustion process and ended in a test bench acceptance test. Subsequently, the mechanical and electrical integration into the vehicle. The commissioning of the Range Extender in detail as well as later in the overall network with the vehicle systems was carried out by FEV. FEV then assisted the VKA in the tests on the ATC to determine the necessary measurement data for the comparison of the new and the basic operating strategy with regard to the consumption potential. The detailed results can be found in the sub-report of the VKA.	
19. keywords Alternative fuels, modular electric drive, range extender, energy efficiency	
20. publisher	21. price