

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Entwicklung und Demonstration eines biokraftstoffbetriebenen Rang-Extender-Systems zur Reichweitenverlängerung elektrisch betriebener Nutzfahrzeuge im Wirtschaftsverkehr (BioRexWiVe);

Teilvorhaben 1: Biokraftstoffe

Teilvorhaben 2: Abgasnachbehandlung

Teilvorhaben 3: Fahrzeugintegration

Zuwendungsempfänger:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Argomotive GmbH Institut für effiziente und umweltverträgliche Antriebstechnologien

car systems Scheil GmbH & Co. KG

Förderkennzeichen:

22401315

22402416

22402616

Laufzeit:

01.12.2016 bis 31.08.2018

Monat der Erstellung:

Oktober 2018

Gefördert durch:

Datum der Veröffentlichung:

27.03.2018



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsgeber

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

Ronny Winkelmann

OT Gülzow

Hofplatz 1

18276 Gülzow Prützen

Ansprechpartner:

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH:

Jörg Schröder

Torgauer Straße 116

04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-522

E-Mail: joerg.schroeder@dbfz.de

Argomotive GmbH Institut für effiziente und umweltverträgliche
Antriebstechnologien:

Claus-Gunter Kummer

Gutzkowstraße 30

01069 Dresden

Tel.: +49 (0)351 404 96 921

E-Mail: claus.kummer@argomotive.de

car systems Scheil GmbH & Co.KG:

Jens Scheil

Zum Apfelstein 2

04158 Leipzig

Tel.: +(49)341 4683000

E-Mail: waleipzig@aol.com

Erstelldatum:

Mittwoch, 27. März 2019

Gesamtseitenzahl + Anlagen 83

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....3

Abkürzungsverzeichnis.....4

Abbildungsverzeichnis.....5

Tabellenverzeichnis.....8

1. Ziele9

1.1. Aufgabenstellung9

1.2. Stand der Technik.....11

1.3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen13

2. Ergebnisse14

2.1. Erzielte Ergebnisse.....14

2.1.1. Neuausrichtung auf Benzinsubstitute im Kontext aktueller politische Diskussionen14

2.1.2. Biokraftstoffe.....14

2.1.3. Exkurs: Ökobilanzielle Bewertung Hybridfahrzeuge32

2.1.4. Fahrprofile35

2.1.5. Range-Extender40

2.1.6. Abgasnachbehandlung47

2.1.7. Fahrzeugintegration und Straßenverkehrszulassung58

2.1.8. Zusammenfassung Projektphase 164

2.1.9. Abgeleitete Forschungsfragen64

2.1.10. Konzept Verbundvorhaben BioRexWiVe Phase 266

2.2. Verwertung69

2.3. Erkenntnisse von Dritten69

2.4. Veröffentlichungen.....69

Literaturverzeichnis70

Anhang 1: Teilvorhaben Biokraftstoffe.....74

Anhang 2: Teilvorhaben Abgasnachbehandlung77

Anhang 3: Teilvorhaben Fahrzeugintegration79

Abkürzungsverzeichnis

AGN	<i>Abgasnachbehandlung</i>
B100	<i>100 Vol.-% Biodiesel (entsprechend DIN EN 14214)</i>
B7	<i>Dieselmotortreibstoff mit 7 Vol.-% Biodiesel (entsprechend DIN EN 590)</i>
Basis	<i>Basisszenario</i>
Basis-U	<i>Basisszenario mit Umweltrestriktionen</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
DBFZ	<i>Deutsches Biomasseforschungszentrum</i>
DVR	<i>Druckverformungsresttest</i>
E0	<i>Benzinmotortreibstoff ohne Bioethanol</i>
E10	<i>Benzinmotortreibstoff mit 10 Vol.-% Bioethanol (entsprechend DIN EN 228)</i>
E5	<i>Benzinmotortreibstoff mit 5 Vol.-% Bioethanol (entsprechend DIN EN 228)</i>
E85	<i>Benzinmotortreibstoff mit 85 Vol.-% Bioethanol (entsprechend DIN 51625)</i>
EE	<i>Erneuerbare Energien</i>
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Ester, Fettsäuremethylester, Biodiesel</i>
FKM	<i>Fluorkautschuk</i>
FKZ	<i>Förderkennzeichen</i>
HEV	<i>Hybridelektromotortriebfahrzeug</i>
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oils, Hydriertes Pflanzenöl</i>
HVO100	<i>100 Vol.-% HVO (entsprechend DIN EN 15940)</i>
HVO95E5	<i>95 Vol.-% HVO mit 5 Vol.-% Bioethanol</i>
ICP-OES	<i>Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma</i>
LDL	<i>Lower Detection Limit, unterhalb der Nachweisgrenze</i>
NBR	<i>Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (Nitrilkautschuk)</i>
NEFZ	<i>Neuer Europäischer Fahrzyklus</i>
NVH	<i>Geräusche und Vibrationen (Noise Vibration Harshness)</i>
PHEV	<i>Plug-In-Hybridelektromotortriebfahrzeug</i>
Pkw	<i>Personenmotortriebwagen</i>
PTL100	<i>100 Vol.-% Power-to-Liquid</i>
PTL7	<i>Dieselmotortreibstoff mit 7 Vol.-% PTL</i>
RD	<i>Reißdehnung</i>
REX	<i>Range-Extender</i>
RF	<i>Reißfestigkeit</i>
SCR	<i>Selektive katalytische Reduktion</i>
STF	<i>Syngas-to-Fuel</i>
Super+	<i>SuperPlus-Motortreibstoff (entsprechend DIN EN 228)</i>
THG	<i>Treibhausgas</i>
TWC	<i>Dreiwegekatalysator</i>
VKM	<i>Verbrennungsmotortriebmaschine</i>
Vol.-%	<i>Volumenprozent</i>
WLTC	<i>Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle</i>
WLTP	<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure</i>
wt.-%	<i>Massenprozent</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Strukturplan – Arbeitspakete und deren verantwortliche AP-Leiter	10
Abbildung 2	Biokraftstoffe in Deutschland 2016 [16]. ©DBFZ 2018.....	15
Abbildung 3	Konversionspfade für bio- und strombasierte Kraftstoffe [19]. ©DBFZ 2018	15
Abbildung 4	Mittlere THG-Vermeidung mit Bioethanol aus verschiedenen Ausgangsstoffen im Vergleich zum fossilen Referenzwert für Deutschland, 2015 und 2016 [16]. ©DBFZ 2018	16
Abbildung 5	Relative Änderung der Abgasemissionen bei Verwendung von E85-Kraftstoff in Euro-5- und Euro-6-Fahrzeugen [21–23]. ©DBFZ 2018.....	17
Abbildung 6	Dichte für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018	21
Abbildung 7	Heizwert für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018	21
Abbildung 8	Ethanolgehalt für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018	22
Abbildung 9	Oxidationsstabilität für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018	23
Abbildung 10	Konzept 1: Tanksystem mit Kraftstofffass auf (mobiler) Auffangwanne ©DBFZ 2018	27
Abbildung 11	Konzept 2: Tanksystem mit stationärem Kraftstofflager und mobilen Kraftstoff-Trolley ©DBFZ 2018.....	27
Abbildung 12	Vereinfachte Vorgehensweise zur Bestimmung der Flächenpotenziale für Bioenergie im Bundesland Sachsen ©DBFZ 2018 [34].....	28
Abbildung 13	Biomassepotenzial bzw. Brennstoffpotenzial für das Bundesland Sachsen im Zeitraum bis 2030 ©DBFZ 2018 [34].	29
Abbildung 14	Anteil der einzelnen Biomassen am gesamten Flächenpotenzial für die energetische Nutzung im Bundesland Sachsen bis 2030 ©DBFZ 2018 [34].	30
Abbildung 15	Anteil der berücksichtigten Biomassen am gesamten Brennstoffpotenzial für die energetische Nutzung im Bundesland Sachsen bis 2030 ©DBFZ 2018 [34].	30
Abbildung 16	Struktur des Energieverbrauches im Verkehrssektor im Bundesland Sachsen in PJ a ⁻¹ ©DBFZ 2018 [37].....	31
Abbildung 17	Prozesskette Ökobilanzierung Fahrzeuge. ©DBFZ 2018.....	32
Abbildung 18	WTW-Emissionen in g CO ₂ -eq pro km für unterschiedliche Energieträgerkombinationen (Annahmen: Plug-in-Hybrid mit REX (70% Strom / 30% Kraftstoff), Verbrauch 21 kWh pro 100 km; THG Fahrzeug bei 41,7 g CO ₂ -eq pro km, Vorkettenemissionen FAME für B7 und B100 mit 60% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel, PTL mit 80% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel. ©DBFZ 2018.....	34
Abbildung 19	WTW-Emissionen Plug-in-Hybrid Transporter in g CO ₂ -eq pro km für unterschiedliche Energieträgerkombinationen (Annahmen: Plug-in-Hybrid mit REX (70% Strom / 30% Kraftstoff), Verbrauch 21 kWh pro 100 km; THG	

Abbildungsverzeichnis

Fahrzeug bei 41,7 g CO ₂ -eq pro km, Vorkettenemissionen FAME bzw. Bioethanol für B7, B100 und E85 mit 60% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel, PTL mit 80% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel. ©DBFZ 2018	34
Abbildung 20 Auswertung Fahrprofile (links: Anzahl der Tage in Abhängigkeit der zurückgelegten täglichen Fahrtstrecke; rechts: Fahrzeiten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit). ©DBFZ 2018	37
Abbildung 21 Notwendige Antriebsleistung bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Steigung p. © Argomotive	38
Abbildung 22 Notwendige mittlere Antriebsleistung bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km h ⁻¹ in Abhängigkeit der Zuladung (100% entsprechen einer Zuladung von 700 kg) und Steigung p. © Argomotive	39
Abbildung 23 CAN-Signale im Prüfstandsbetrieb (von oben beginnend: HV-Status, HV-Batteriespannung, HV-Spannung, REX-Status, Soll-Drehzahl REX, Ist-Drehzahl REX, HV-Spannung REX, HV-Leistung REX, Temperatur REX, Temperatur Kühlmittel). © car systems Scheil	44
Abbildung 24 Anzeige von REX-Spannung, REX-Drehzahl und REX-Leistung im Prüfstandsbetrieb. © car systems Scheil	44
Abbildung 25 Statusanzeige Batteriemanagementsystem. © car systems Scheil	44
Abbildung 26 Rotglühender Abgaskrümmer des BMW i3 REX bei der Inbetriebnahme auf Grund reduzierter Motorsteuerung. © car systems Scheil	45
Abbildung 27 Schema Versuchsaufbau am Teststand Argomotive. © Argomotive	46
Abbildung 28 Schadstoffemission beim Ottomotor [45].	48
Abbildung 29 Abhängigkeit des Umsatzes der Schadstoffemissionen vom Luftverhältnis bei einem 3-Wege-Katalysator an Ottomotoren [46].	49
Abbildung 30 Anordnung Katalysator am Range Extender im Versuchsaufbau. © Argomotive	52
Abbildung 31 Im Projekt realisierter Prüfstands Aufbau des REX-Systems. © Argomotive	53
Abbildung 32 Hauptkomponenten des Versuchsaufbaus. © Argomotive	53
Abbildung 33 Beispiel Anfahrzustand VKM aus kaltem Zustand. © Argomotive	54
Abbildung 34 Vergleich Katalysatoranordnungen (links: Katalysator Original BMW i3 REX; rechts: Katalysator-Neuteil). © Argomotive	55
Abbildung 35 Integration des REX in Demonstratorfahrzeug – Seitenansicht. © car systems Scheil	59
Abbildung 36 Integration des REX in Demonstratorfahrzeug – Top-Down-Ansicht. © car systems Scheil	59
Abbildung 37 Schema zur Abgasgesetzgebung – Einordnung eines RE-Systems, [50, 53]. © Argomotive	62
Abbildung 38 Strukturplan BioRexWiVe Projektphase 2	67
Abbildung 39 Versuchsaufbau car systems Scheil. © car systems Scheil	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 40 Erprobung Stromregelung 48-V-Einbindung. © car systems Scheil82

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Technische Kategorisierung nach Anordnung der Antriebe und nach Grad der Hybridisierung [1–5].....	11
Tabelle 2	Auswahl Range-Extender (Stand 2018).....	13
Tabelle 3	Kraftstoffcharakterisierung.....	18
Tabelle 4	Charakterisierung der frischen Kraftstoffe (Woche 0), („LDL“ – unter der Nachweisgrenze; „-“ – nicht gemessen).....	20
Tabelle 5	Ergebnisse der Zugprüfung, bestehend aus Reißfestigkeit (RF) und Reißdehnung (RD), für die beiden Elastomere NBR und FKM.....	24
Tabelle 6	Ergebnisse der Härtebestimmung für die beiden Elastomere NBR und FKM.....	25
Tabelle 7	Ergebnisse des Druckverformungsrestbestimmung für die beiden Elastomere NBR und FKM	26
Tabelle 8	THG-Emissionen (Herstellungs- und Nutzungsphase) verschiedener Fahrzeugklassen	33
Tabelle 9	Datenerfassung Fahrzeug	36
Tabelle 10	Antriebsleistung eines VW Caddy bei Variation der Fahrdynamik, Steigung und Zuladung	38
Tabelle 11	Auslegung Verbrennungskraftmaschine des Range-Extenders	40
Tabelle 12	Range-Extender-Systeme mit Ottomotor als Verbrennungskraftmaschine.....	41
Tabelle 13	Auslegung Tankvolumen	41
Tabelle 14	WLTC-Zyklusdaten für Klasse 3 Fahrzeuge ($P_{mr} > 34 \text{ W kg}^{-1}$).....	56
Tabelle 15	Emissionsergebnisse aus Prüfstandstests für den Original- und den Neu-Katalysator	57
Tabelle 16	Berechnung Emissionswerte bezogen auf WLTP-Zyklus (1 Durchlauf)	57
Tabelle 17	Emissionsgrenzwerte für Ottomotoren (Regelung 83, 2015), [50]	60
Tabelle 18	Auszug Angebotslegung DEKRA.....	63
Tabelle 19	Zeitplan BioRexWiVe Projektphase 2	68

1. Ziele

Klimaschutz im Verkehr geht über die heute etablierten Anwendungsfelder hinaus. Dabei stellen Biokraftstoffe einen Weg dar, die Klimagasemissionen im Verkehr zu reduzieren und gleichzeitig fossile Energieträger zu substituieren. In welchem Verkehrssektor sie welche Rolle im Kontext anderer Optionen der Energieeffizienz bzw. erneuerbarer Alternativen einnehmen, wird künftig stärker durch die erreichbare Klimaschutzeffizienz bestimmt sein. Ein erster Schritt in diese Richtung war der Systemwechsel von der energiebezogenen Biokraftstoffquote hin zu einer Treibhausgas(THG)-Quote im Jahr 2015 als nationale Umsetzung der Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD, 2009/30/EG bzw. 98/70/EG) über das §37 BImSchG / BiokraftQuG. Die Anforderungen an Biokraftstoffe sind in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED, 2008/29/EG) bzw. der BiokraftNachV geregelt. Beide Richtlinien sind wesentliche Meilensteine für die Zielerreichung der Europäischen Union zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Zudem gilt es, die Anforderungen der Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID, 2014/94/EU) umzusetzen.

Hierbei werden Hybridanwendungen eine entscheidende Rolle spielen. Die hier ausgewählte Anwendung eines Range-Extender-Systems für Wirtschaftsfahrzeuge eröffnet die Option, über den i. d. R. flottenbezogenen Einsatz und damit verbunden entsprechend ausgelasteten Betriebsstellen auch Reinbiokraftstoffe einzusetzen, wenngleich die Hürde der Erlangung der Zulassung zum Vertrieb und Einsatz von „neuen“ Kraftstoffen im öffentlichen Verkehr hier für kurz- und mittelfristige Einführungen sehr hoch aufgestellt ist.

1.1. Aufgabenstellung

Deutschland hat das erklärte Ziel zum Leitanbieter und Leitmarkt im Bereich Elektromobilität zu werden. Die Motivation hierfür ist die Erfüllung klima- und energiepolitischer Ziele sowie die Reduktion umweltschädlicher Abgasemissionen. Für die Erfüllung der Ziele ist ein systematischer, marktorientierter und technologieoffener Ansatz notwendig, der die bekannten technischen und ökonomischen Hindernisse (z. B. Batteriekosten/-kapazität) bei der Einführung von Elektrofahrzeugen beachtet. Als Übergangslösung zur reinen Elektromobilität werden derzeit verschiedene hybride Lösungen vor allem im Personenverkehr angeboten. Die Erweiterung einer vollständig elektrisierten Mobilität im Wirtschaftsverkehr steht im Gegensatz noch aus und kann insbesondere bei regional begrenzten Anwendungen durch regenerativ betriebene und mit Range-Extender-Systemen erweiterten Elektrofahrzeugen eingeleitet werden.

Das Projekt zielt auf die Integration eines Range-Extender-Systems in ein Elektrofahrzeug für den urbanen Wirtschaftsverkehr ab. Dieser Range-Extender (REX) soll die limitierte Reichweite elektrisch angetriebener leichter Nutzfahrzeuge aufheben und technische Einschränkungen (beispielsweise Klimatisierung) aufweichen. Mit dem genannten Anforderungsprofil ergeben sich Anwendungsfelder, die aktuell noch schwer zugänglich für die elektromobile Nutzung sind, wie beispielsweise Handwerker und Zustell-/ Apothekendienste, mobile Lebensmittelversorger/ Essensdienste, Krankentransporte oder leichte Nutzfahrzeuge mit leistungsstarken Nebenverbrauchern.

Zum Zwecke klimafreundlichen Fahrens wird der Einsatz von regenerativen Kraftstoffen mit einem hohen Treibhausgasreduzierungs potenzial als wesentliches Merkmal der hier behandelten Range-Extender-Anwendung gesehen. Die Versorgung mit diesem Kraftstoff soll dabei in Form von einfachen Hoftanksystemen erfolgen.

Das Range-Extender-System soll für die Nachrüstung von Fahrzeugflotten leichter Nutzfahrzeuge mit elektrischen Antrieben ausgelegt sein.

Ziele

In Projektphase 1 wurden die Grundlagen bezüglich Auswahl des Range-Extender-Systems, Kraftstoffauswahl, Abgasnachbehandlung, Fahrzeugintegration und Fahrzeugzulassung geschaffen sowie ein Konzept für die Nachrüstung erstellt, siehe dem zum Projekt zugehörigen Strukturplan in Abbildung 1.

In Projektphase 2 soll aufbauend darauf das Konzept entsprechend an einem vorhandenen Elektrofahrzeug für den leichten Wirtschaftsverkehr umgesetzt und erprobt werden. Weiterhin sollen daraus resultierende Empfehlungen zur Auslegung des Range-Extender-Systems final zusammengefasst werden.

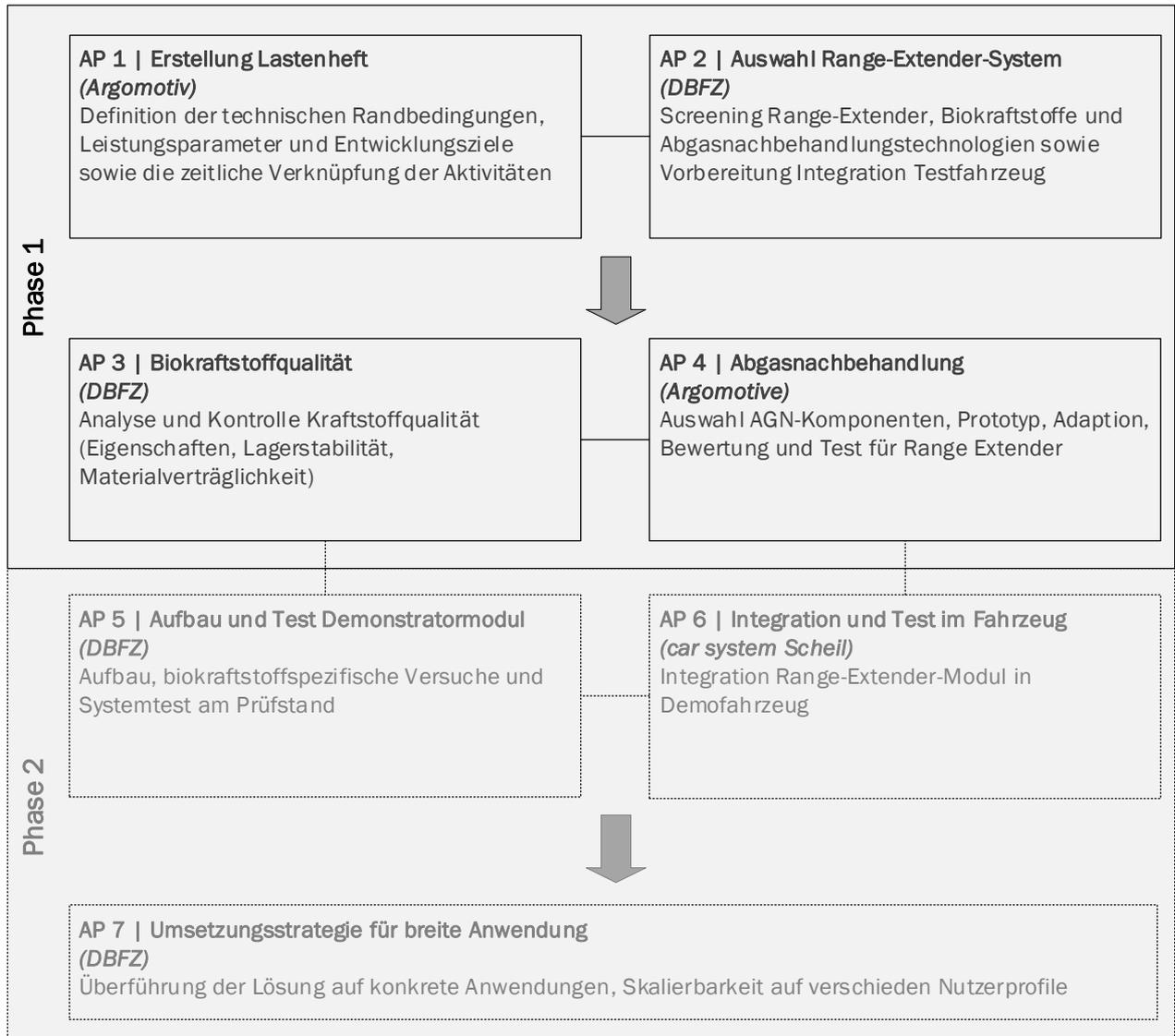


Abbildung 1 Strukturplan – Arbeitspakete und deren verantwortliche AP-Leiter

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele stellen sich wie folgt dar:

- Entwicklung und Umbau eines Range-Extenders zum biokraftstoffbetriebenen Range-Extender-System inklusive Abgasnachbehandlung im Standard Euro-6
- Aufbau eines Demonstrationsfahrzeugs mit integriertem Range-Extender
- Gewinnung detaillierter Erkenntnisse von Elektrofahrzeugen mit Reichweitenverlängerung im Wirtschaftsverkehr

Ziele

- Verständnis bezüglich der Abgasnachbehandlung bei Elektrofahrzeugen mit Reichweitenverlängerung (u. a. Stichwort Thermomanagement, Laufzeiten und Einsatz von alternativen Kraftstoffen)
- Betrachtung von Nutzerprofilen im Wirtschaftsverkehr, die eine weiterführende ökonomische und ökologische Auswertung ermöglichen
- Erarbeitung von Empfehlungen bezüglich der Auslegung eines Range-Extender-Systems für die Anwendung in ausgewählten Wirtschaftsbereichen.

1.2. Stand der Technik

Hybridelektrofahrzeuge lassen sich nach dem Grad der Hybridisierung und nach der Anordnung der Antriebe im Gesamtsystem einteilen. Tabelle 1 stellt die unterschiedlichen Varianten der Kategorisierung von Hybridfahrzeugen aus technischer Sicht vor. Das Konzept der Plug-In-Hybride setzt sich neben diversen Boost-Varianten derzeit zunehmend durch, da es den Vorteil eines kurzzeitig rein elektrischen Fahrens bietet und die elektrische Energie nicht erst durch Wärmekraftmaschinen im Fahrzeug erzeugt werden muss.

Tabelle 1 Technische Kategorisierung nach Anordnung der Antriebe und nach Grad der Hybridisierung [1–5]

Bezeichnung	Beschreibung
<i>Kategorisierung nach Getriebeanordnung</i>	
Serieller Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Nur einer der beiden Energiewandler treibt die Antriebsachse(n) an (in der Regel Elektromaschine) • Beide Energiewandler sind in Reihe angeordnet • Sekundärenergiewandler liefert eine durchschnittlich notwendige Leistung, Traktionsbatterie dient als Energiepuffer • Rein elektrischer Fahrmodus möglich
Paralleler Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei Energiewandler treiben Antriebsachse(n) an • Beide Energiewandler sind parallel angeordnet • Rein elektrischer, rein verbrennungsmotorischer und kombinierter Fahrmodus möglich
Leistungsverzweigter Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Vom Verbrennungsmotor erzeugte Leistung wird in mechanischen und elektrischen Teil aufgeteilt • Serielle und parallele Hybridstruktur möglich
<i>Kategorisierung nach Hybridisierungsgrad</i>	
Mikrohybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Kein zweiter Energiewandler für Fahrzeugantrieb vorhanden • Elektrische Maschine übernimmt Start-Stopp-Funktion • Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation)
Mildhybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Elektromotor (inkl. Traktionsbatterie) unterstützt Verbrennungsmotor (Boost) • Beide Antriebsvarianten sind fest miteinander gekoppelt • Elektrische Maschine übernimmt Start-Stopp-Funktion • Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) • Rein elektrisches Fahren nicht möglich
Vollhybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Rein elektrischer, rein verbrennungsmotorischer und kombinierter Fahrbetrieb möglich • Elektrischer Fahrbetrieb auf Grund reduzierter Batteriekapazitäten nur im geringen Umfang möglich (< 10 km) • Anordnung der Antriebe kann parallel, seriell oder leistungsverzweigt erfolgen

Plug-In-Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau wie Vollhybrid • Externe Batterieaufladung möglich • Größere Batterie mit höherer Energiekapazität im Vergleich zu klassischen Vollhybrid • Rein elektrischer Fahrbetrieb auf größeren Distanzen (30 bis 100 km) möglich
----------------	--

Range-Extender-Fahrzeuge werden auf dieser Grundlage momentan seriellen Plug-In-Hybridfahrzeugen zugeordnet. Eine eigene Kategorie hinsichtlich Zulassung und Emissionsverhalten hat der Gesetzgeber bisher nicht vorgesehen. Range-Extender-Fahrzeuge decken die üblichen täglich wiederkehrenden Fahrleistungen rein elektrisch ab und können über externe Strombereitstellung (Plug-In) die Traktionsbatterie wiederbeladen. Der Range-Extender, der ein System aus einer Verbrennungskraftmaschine (VKM) und einem Generator darstellt, dient ausschließlich der zusätzlichen Energiebereitstellung für die Traktionsbatterie im Notfall, d. h., wenn die notwendige Reichweite mit der extern aufgeladenen Energie nicht abgedeckt werden kann. Range-Extender haben damit keine direkte Anbindung an den mechanischen Antrieb des Fahrzeuges, sondern können lediglich der Entladung der Traktionsbatterie entgegenwirken. Range-Extender-Fahrzeuge sind als eine Sonderform der seriellen Hybridfahrzeuge zu verstehen, da im Vergleich zum klassischen seriellen Hybridfahrzeug größere Batteriekapazitäten und gleichzeitig kleiner dimensionierte Verbrennungsmotoren verwendet werden. Aus Sicht eines reinen Elektroantriebes könnte bei der Integration eines Range-Extenders die Traktionsbatterie etwas kleiner dimensioniert und trotzdem die Reichweite erreicht oder gar erhöht werden. Die Fahrzeuge mit REX sind als ein Zwischenschritt zum rein elektrischen Fahren ohne zusätzliche Antriebsaggregate [1–5] zu verstehen. Bisher fand diese Technologie ausschließlich im Bereich von Personenkraftwagen (Pkw) Anwendung und diente vordergründig der Behebung bzw. Reduktion der Reichweitenlimitation von Elektroantrieben.

Generell existieren zur Erzeugung zusätzlicher elektrischer oder mechanischer Energie für die Verlängerung der Reichweite eines Elektroautos unterschiedliche Range-Extender-Konzepte. Dabei wird unterschieden zwischen elektrochemischen Antrieben, wie der Brennstoffzelle, welche chemische Energie direkt in elektrische Energie umwandeln, und Wärmekraftmaschinen, die zunächst chemische Energie in mechanische Energie und anschließend über einen Generator in elektrische Energie umsetzen. Als Wärmekraftmaschine können sämtliche konventionelle Hubkolben- (Zwei- und Viertakt-Otto-/Dieselmotor), Rotationskolben-, Stirling- und Freikolbenmotoren sowie Gasturbinen als Energiewandler verwendet werden. Für jede Maschine ergeben sich Vor- und Nachteile hinsichtlich des Gesamtkonzeptes. Auch gibt es unterschiedliche Ausgangssituationen zur Beherrschung der Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauches. Für alle ist eine Abgasnachbehandlung zwingend erforderlich, um der heutigen diesbezüglichen Gesetzgebung gerecht zu werden. In diversen Forschungsprojekten wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Range-Extender-Konzepte getestet und verglichen. So untersuchte u. a. das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. verschiedene Technologien hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials als Range-Extender. Die gewichteten Bewertungskriterien waren dabei: Wirkungsgrad, Geräusche und Vibrationen (NVH, Noise Vibration Harshness), Packaging, Leistungsdichte, Kosten, Emissionen, Kraftstoffflexibilität und Skalierbarkeit [1].

Die heute tatsächlich zur Verfügung stehende Auswahl an kommerziell erhältlichen Range-Extender-Komplettlösungen insbesondere in Kombination mit dem potenziellen Einsatz biogener flüssiger und gasförmiger Kraftstoffe ist sehr eingeschränkt und überschaubar. Tabelle 2 fasst die Rechercheergebnisse diesbezüglich zusammen.

Tabelle 2 Auswahl Range-Extender (Stand 2018)

Hersteller	Kraftstoff	Bemerkung
Steyr Motors [6]	Diesel / Biodiesel	Entwicklungsphase Range-Extender mit Common-Rail-System
Steyr Motors [6]	Diesel / Biodiesel	Kleinserie Range-Extender mit Pumpe-Düse-System Euro-4 Abgasnorm
Mahle [7]	Benzin	Entwicklungsphase
ENGIRO [8]	Benzin	Kleinserie Rotationskolbenmotor (20 kW)
ENGIRO [9]	Benzin	Kleinserie Ottomotor (40 kW)
BMW [10]	Benzin	Austauschgerät für BMW i3 Euro-6 Abgasnorm
KSPG [11]	Benzin	Entwicklungsphase
Lotus	Benzin	Einzelanfertigung

Insgesamt bleibt aber festzustellen, dass die vorgestellten Lösungen vornehmlich auf den Einsatz im Personenverkehr abzielen. Die hier zu betrachtenden Anwendungen im Wirtschaftsverkehr benötigen jedoch abweichende, entsprechend angepasste Ansätze und Lösungen. Die weiterführende Betrachtung aus der Kombination Range-Extender und regenerative Kraftstoffe reduziert die verfügbaren Modelle weiter. Das bearbeitete Projekt setzt an diesem Punkt an.

Mit der Entwicklung eines rein elektrogetriebenen Fahrzeugs seitens der Deutschen Post (StreetScooter) scheint in Fragen der Elektrifizierung der Fahrzeugflotte im Segment der leichten Nutzfahrzeuge eine erste Lösung gefunden zu sein [12]. Im zunehmenden Maß sind die Fahrzeuge im Straßenbild von Städten und ländlichem Raum zu sehen. Es ist aus Sicht der Projektbearbeiter aber nicht davon auszugehen, dass dieses Fahrzeug mit seiner reduzierten Reichweite (113 bzw. 205 km im NEFZ [12]) flächendeckend eingeführt wird und sämtliche Einsatzcharakteristika abdecken wird [13, 14]. Der Range-Extender bleibt als Brückentechnologie auf dem Weg zur Elektrifizierung für viele Anwender von Interesse, wenn er kostengünstig und flexibel zur Umrüstung vorhandener Fahrzeugflotten zur Verfügung steht.

1.3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Projektphase 1 erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Leipzig, die dem Projektteam umfassende GPS-Daten von Elektrofahrzeugen aus ihrem Datenpool zur Verfügung gestellt haben. Außerdem stand die Leipziger Niederlassung der Prüfgesellschaft DEKRA dem Projektteam bezüglich Fragestellungen im Kontext der Fahrzeugzulassung beratend zur Seite.

Die beiden zertifizierten Prüflabore Analytik-Service-Gesellschaft mbH (ASG) und k-labor GmbH wurden unter Beachtung der Nebenbestimmungen zur Zuwendung für verschiedene Kraftstoffanalysen und Materialprüfungen, welche das DBFZ-hausinterne Labor nicht leisten kann, beauftragt.

Darüber hinaus wurden Kontakte aus den jeweiligen Netzwerken der am Projekt beteiligten Unternehmen genutzt, um z. T. Hardware als auch Know-how kostenneutral in die Projektarbeit einfließen zu lassen (z. B. HTW Dresden bei der Bereitstellung von elektrischen Lasten für den REX-Versuchsstand und von Know-how bei der Entschlüsselung der BMW CAN-Signale).

2. Ergebnisse

2.1. Erzielte Ergebnisse

2.1.1. Neuausrichtung auf Benzinsubstitute im Kontext aktueller politische Diskussionen

Auf Grund der aktuellen politischen und gesellschaftlichen Diskussion um Dieselfahrverbote in Innenstädten haben sich die Projektpartner in Absprache mit dem Projektträger FNR (Kommunikation mit Herrn Winkelmann in 07/2017) entschieden, statt Dieselsubstitute als Kraftstoffmatrix Benzinsubstitute zu untersuchen. Diese generelle Änderung in der Projektausrichtung wurde im Nachhinein durch das Bundesverwaltungsgericht mit seinem Urteil zu Fahrverboten von Dieselfahrzeugen vom 27.02.2018 als richtig bekräftigt [15]. Neben der Auswahl an verfügbaren Kraftstoffen ändert sich ebenfalls die Auslegung der Abgasnachbehandlung. Diese Entscheidung wurde darüber hinaus auch von der bis dahin in der Projektarbeit gewonnenen Erkenntnis gestützt, dass die Umsetzung einer gesetzeskonformen Abgasemissionsminderung durch Diesel-Abgasnachbehandlungssysteme (AGN) einen vergleichsweise sehr hohen technischen als auch kostenintensiven Aufwand bedeutet. Anstelle der vermeintlich aufwendigen Abgasnachbehandlung für Dieselmotoren mit Euro-6d (Kombination aus Dieseloxidationskatalysator, Dieselpartikelfilter und NO_x-Speicherkatalysator bzw. SCR-Katalysator) wurde die Ausrichtung auf eine vergleichsweise einfache Abgasnachbehandlung mit einem Dreiwegekatalysator für Benzinmotoren umorientiert. Die potenzielle Akzeptanz der Überführung einer REX-Lösung wäre sonst auch aus Sicht der Kostenakzeptanz in einem hohen Maße gefährdet gewesen.

2.1.2. Biokraftstoffe

Auswahl Biokraftstoffe

In Deutschland wurden im Kalenderjahr 2016 insgesamt 114 PJ an Biokraftstoffen im Verkehrssektor verbraucht (der gesamte Endenergieverbrauch im Verkehrssektor lag bei 2.696 PJ) [16, 17]. Es wurden dabei im Wesentlichen Biodiesel (Fettsäuremethylester, FAME), Bioethanol und hydriertes Pflanzenöl (HVO) umgesetzt, siehe Abbildung 2. Die drei genannten Kraftstoffe werden den konventionellen Kraftstoffen fast ausschließlich als Beimischung in Form von E5, E10 und B7 hinzugegeben. Mit dem Einsatz der 114 PJ in Form von Biokraftstoff konnten Treibhausgasemissionen in Höhe von 76,9% gegenüber der fossilen Referenz im Jahr 2016 eingespart werden (fossiler Referenzwert: 83,8 t CO₂-eq TJ⁻¹) [18].

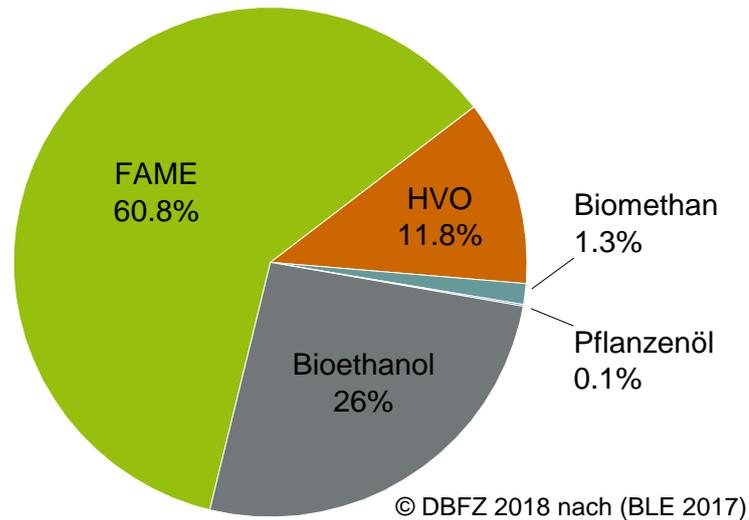


Abbildung 2 Biokraftstoffe in Deutschland 2016 [16]. ©DBFZ 2018

Die weiter oben erwähnte Änderung der Kraftstoffmatrix schränkt die Auswahl an fortschrittlichen Kraftstoffsubstituten mit einer mittelfristigen Aussicht auf Marktdurchdringung deutlich ein. Abbildung 3 zeigt die aktuell in der Diskussion befindlichen Kraftstoffoptionen. Dabei werden vor allem Ethanol, Methanol, HVO-Benzin und Fischer-Tropsch-Benzin als Benzinsubstitute aufgeführt, wobei HVO-Benzin und Fischer-Tropsch-Benzin keine Anwendung finden werden [19]. Methanol kann über verschiedene Syntheseverfahren weiter in einen benzinähnlichen Kraftstoff umgewandelt werden, wie es beispielsweise das Unternehmen Chemieanlagenbau Chemnitz mit ihrem synthetischen Kraftstoff Syngas-to-Fuel (STF) plant [20].

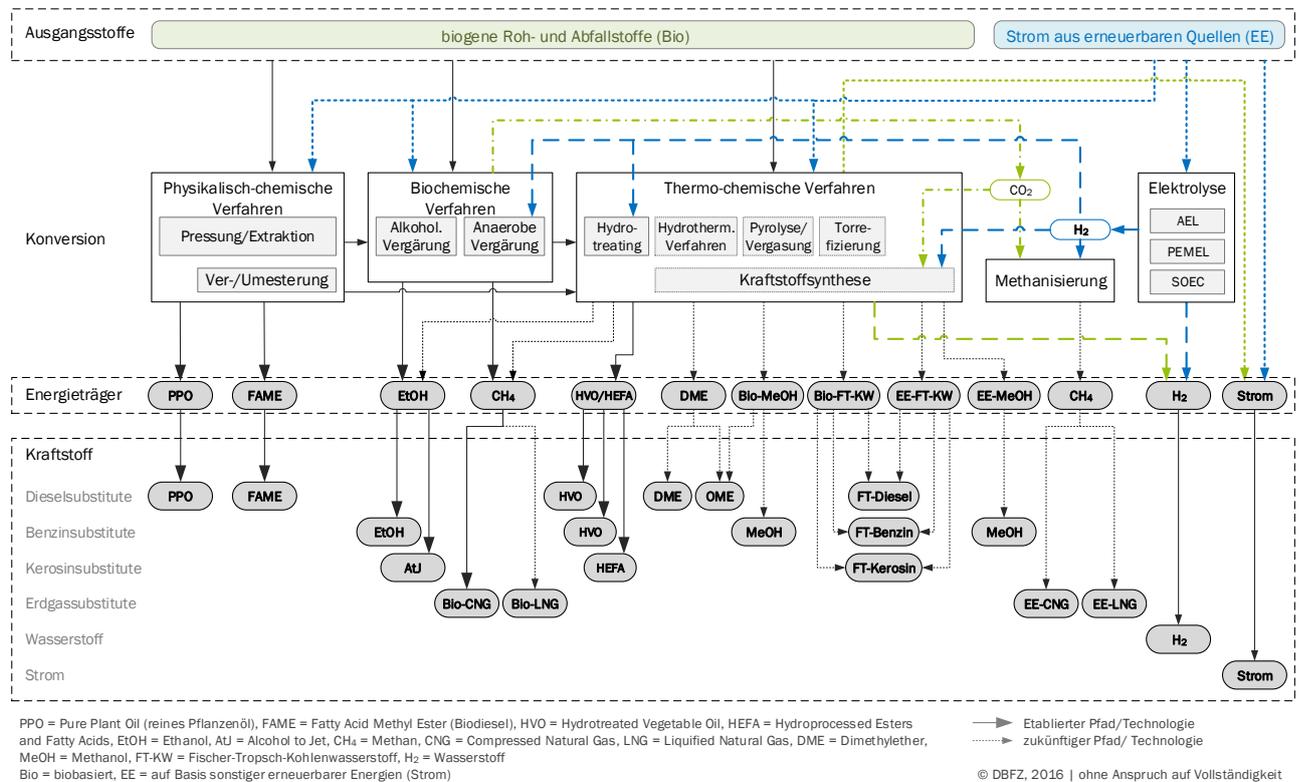


Abbildung 3 Konversionspfade für bio- und strombasierte Kraftstoffe [19]. ©DBFZ 2018

Anhand der Verfügbarkeit und des Potenzials zur Treibhausgasreduktion soll die Anwendung eines Range-Extender-Systems für den leichten (sub-)urbanen Wirtschaftsverkehr mit Ethanol-Kraftstoff

Ergebnisse

ausgelegt werden. Es ist dabei zu prüfen, inwiefern Ethanol als E85-Kraftstoff verfügbar ist. Als zukünftige Alternative wird zusätzlich der synthetische Kraftstoff STF betrachtet.

Bioethanol

Bioethanol ist wie oben beschrieben aktuell der zweitbedeutendste Biokraftstoff nach Biodiesel und wird im Wesentlichen als Blendkraftstoff in E5 und E10 in Deutschland vertrieben. Es wurden 2016 ca. 30,2 PJ Bioethanol als Kraftstoff in den Markt gebracht [16]. Als Ausgangsstoff wird zucker-, stärke- und lignozellulosehaltige Biomasse verwendet. Es handelt sich dabei um Mais, Weizen, Zuckerrohr, Triticale, Roggen, Gerste und Abfall-/Reststoffe. Im Mittel konnten mit diesen Ausgangsstoffen 75,4% der Treibhausgasemissionen gegenüber der seit Ende 2017 gültigen fossilen Referenz von 83,8 g CO₂-eq pro MJ Kraftstoff eingespart werden [18]. Eine detaillierte Auflistung ist Abbildung 4 zu entnehmen.

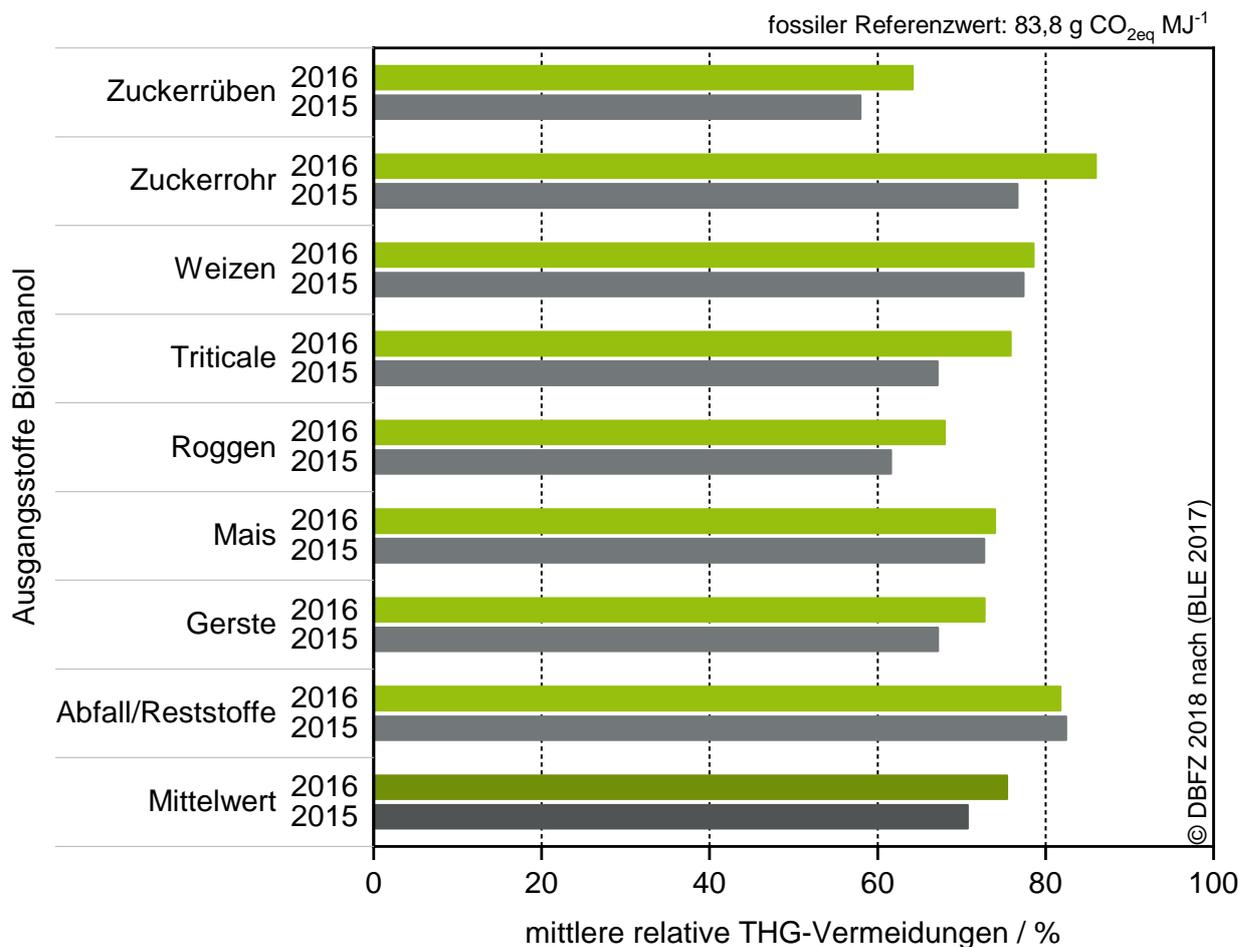


Abbildung 4 Mittlere THG-Vermeidung mit Bioethanol aus verschiedenen Ausgangsstoffen im Vergleich zum fossilen Referenzwert für Deutschland, 2015 und 2016 [16]. ©DBFZ 2018

Bioethanol als Kraftstoff ist in den Normen DIN EN 51625 für E85, DIN EN 228 für E5 und E10 sowie DIN EN 15376 als Blendkraftstoff definiert. Der Kraftstoff E85 war in der Vergangenheit bereits oft Bestandteil von wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die das Abgasemissionsverhalten und den Kraftstoffverbrauch gegenüber konventionellem Benzinkraftstoff E0 bei Euro-5- und Euro-6-Fahrzeugen betrachteten [21–23].

Der Kraftstoffverbrauch war bei allen gesichteten Veröffentlichungen im Mittel 32% höher als der Referenzkraftstoff E0. Dies liegt vor allem in dem hohen Sauerstoffanteil und dem damit verbundenen reduzierten Heizwert von E85 begründet. Bioethanol hat ein Massenverhältnis (in

Ergebnisse

wt.-%) von 52:13:35 und fossiles Benzin von 85:15:0 für Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff [24]. Gleichzeitig sind die CO₂-Emissionen mit E85 im Mittel um 3% reduziert. Die Schadstoffemissionen sind im Mittel 17% höher für die unverbrannten Kohlenwasserstoffe, 21% höher für Kohlenstoffmonoxid und 1% niedriger für die Stickstoffoxide. Im Gegensatz zum Verbrauch und CO₂-Emissionen wurden für die Schadstoffemissionen hohe Streuungen zwischen den einzelnen Studien identifiziert. Die Begründung für die großen Unterschiede liegt wahrscheinlich in der teilweise fehlenden Anpassung der Steuergeräteapplikation für den Kraftstoff E85. Abbildung 5 zeigt in einem Box-Diagramm die Änderungen im Bezug zu E0 (1 bedeutet keine Änderung zu E0, < 1 weniger als E0, > 1 mehr als E0) für die gesichteten Veröffentlichungen. Neben der Optimierung der Schadstoffemissionen ist eine Anpassung der Motorapplikation ebenfalls sinnvoll, um die höhere Klopfestigkeit von E85 auf Grund der erhöhten Oktanzahl (ca. 104), der damit verbundenen besseren Verdichtung des Verbrennungsraumes sowie der Verbesserung der Verbrennung Folge zu leisten [25].

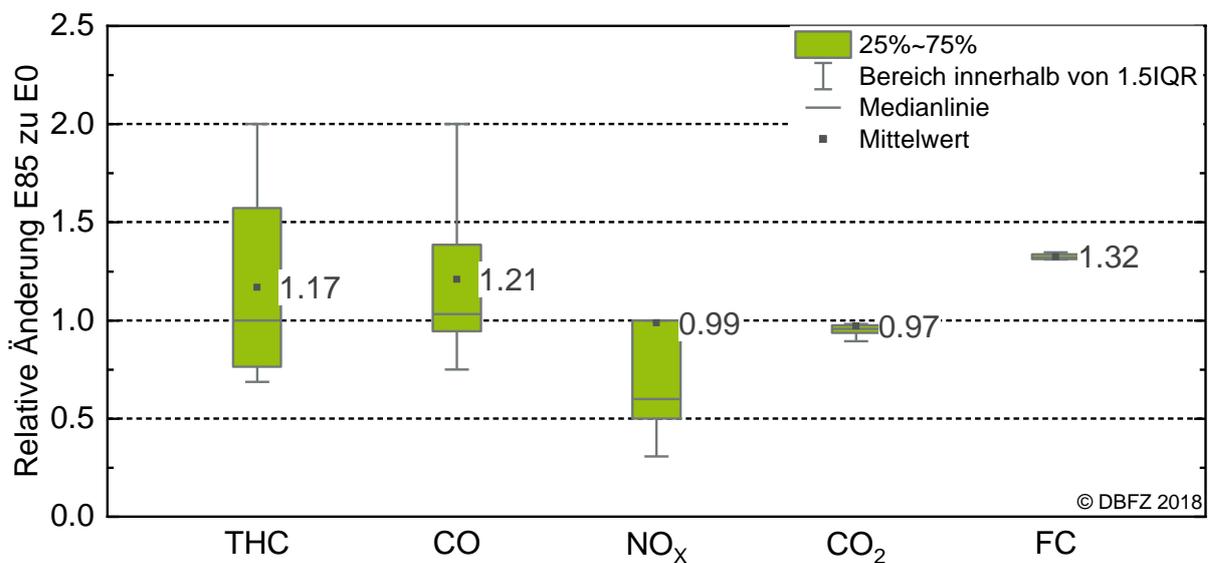


Abbildung 5 Relative Änderung der Abgasemissionen bei Verwendung von E85-Kraftstoff in Euro-5- und Euro-6-Fahrzeugen [21–23]. ©DBFZ 2018

Ausgehend von dieser Statistik muss eine Abgasnachbehandlung im Betrieb mit E85 eine größere Menge an Schadstoffen reduzieren als es vergleichsweise mit konventionellem Benzinkraftstoff notwendig wäre.

Kraftstoffmatrix

In Absprache mit dem Projektträger FNR wurden die nachfolgenden Kraftstoffe hinsichtlich Kraftstoffalterung (außer STF) und Materialverträglichkeit im Projekt betrachtet:

- E85 nach DIN EN 51625 E85
- E10 nach DIN EN 228 E10
- Syngas-to-Fuel (bereitgestellt von Chemieanlagenbau Chemnitz) STF
- SuperPlus nach DIN EN 228 Super+
- HVO mit 5 Vol.-% Ethanol HVO95E5
- HVO nach DIN EN 15940 HVO100
- B7 nach DIN EN 590 B7

Ergebnisse

Die Kraftstoffe E10, Super+, HVO und B7 dienen dabei als Referenzkraftstoffe, um eine Vergleichbarkeit zu dem Ist-Zustand darzustellen.

Die Kraftstoffe HVO95E5 und E85 wurden selbst angemischt. Für E85 wurde Super+ und für HVO95E5 wurde HVO jeweils mit technischem Ethanol im entsprechenden Verhältnis (Bezug auf Vol.-%) angesetzt und intensiv auf einem Schüttler durchmischt.

Neben dem Kraftstoffgemisch HVO95E5 sollte noch die Kombination aus 90 Vol.-% HVO und 10 Vol.-% Ethanol getestet werden. Jedoch konnte in entsprechenden Vorversuchen keine stabile Lösung zwischen Ethanol und HVO hergestellt werden, sodass dieses Kraftstoffgemisch nicht weiter betrachtet wurde.

Kraftstoffcharakterisierung

Die oben genannten Kraftstoffe werden nach den in Tabelle 3 beschriebenen Methoden charakterisiert.

Tabelle 3 Kraftstoffcharakterisierung

Parameter	Einheit	Methode
Dichte bei 15 °C	g cm ⁻³	ASTM D7042
Kin. Viskosität bei 15 °C	mm ² s ⁻¹	ASTM D7042
Kin. Viskosität bei 40 °C	mm ² s ⁻¹	ASTM D7042
Dyn. Viskosität bei 15 °C	mPa s	ASTM D7042
Dyn. Viskosität bei 40 °C	mPa s	ASTM D7042
Unterer Heizwert	MJ kg ⁻¹	DIN EN 14918
Oxidationsstabilität	min	DIN EN ISO 7536, DIN EN 16091
Gehalt an Kohlenstoff	Vol.-%	DIN EN 14774-1
Gehalt an Wasserstoff	Vol.-%	DIN EN 14774-1
Gehalt an Sauerstoff	Vol.-%	DIN EN 14774-1
Gehalt an Blei	mg kg ⁻¹	E DIN 51461-1, DIN 51627-6
Gehalt an Schwefel	mg kg ⁻¹	DIN EN ISO 20846, DIN 51400-10
Ethanol-Gehalt	Vol.-%	Hausmethode
Wassergehalt	Vol.-%	DIN EN 12937

Die Parameter Dichte, kinematische und dynamische Viskosität werden mit einem Rotationsviskosimeter, das nach dem Messprinzip von Stabinger arbeitet, bestimmt. Dichte und die dynamische Viskosität werden gemessen, daraus wird automatisch die kinematische Viskosität berechnet.

Die Bestimmung des unteren Heizwertes beruht auf der Bestimmung des Brennwertes mittels Bombenkalorimeter (Zünden unter Sauerstoff-Atmosphäre). Diesel-Kraftstoffe werden offen und Otto-Kraftstoffe in Gelatine kapseln eingefüllt verbrannt. Nach der Bestimmung des Brennwertes wird der Inhalt der Kalorimeterbombe vollständig in einen 100 ml-Messkolben überführt und auf die Eichmarke aufgefüllt. Diese Lösung wird ionenchromatographisch auf Sulfat und Nitrat/Nitrit untersucht. Des Weiteren werden mittels Elementaranalyse der Wasserstoffgehalt und mittels Karl-Fischer-Titration der Wassergehalt bestimmt. Über eine Gleichung, in der diese Parameter berücksichtigt werden, wird der Heizwert berechnet und in [MJ kg⁻¹] angegeben. Durch dieses Vorgehen wird vom Brennwert der Anteil der Energie abgezogen, der durch die Kondensation der Verbrennungsprodukte entsteht, was dem Heizwert entspricht.

Ergebnisse

Die Gehalte an Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff werden mittels Elementaranalyse bestimmt. Die mit Wolframoxid versetzte Probe wird im Verbrennungsrohr mit Hilfe von Sauerstoff vollständig verbrannt. Dabei entstehen die Verbrennungsprodukte CO_2 , H_2O , NO_x und SO_x . Im nachgeschalteten Reduktionsrohr (mit Kupferstiften gefüllt) werden NO_x und SO_x zu N_2 und SO_2 reduziert. Nach der Auftrennung der Gase werden N_2 , CO_2 und H_2O mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektor detektiert, während für die Detektion von SO_2 ein Infrarot-Detektor verwendet wird. Die erhaltenen Signale werden integriert und über Kalibrationskurven in prozentuale Elementgehalte umgerechnet. Für die Berechnung des Sauerstoffanteils wird die Differenz aus 100% und den Gehalten an C, N, S und H gebildet (Der Anteil an Asche wurde nicht berücksichtigt, da keine Asche bei der Verbrennung entstand.).

Der Wassergehalt wurde mittels Karl-Fischer-Titrator bestimmt.

Die Gehalte an Blei und Schwefel in Dieselkraftstoffen wurden direkt in den 1:1 mit Premisol verdünnten Proben mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) unter Zuführung von Sauerstoff bestimmt. Dafür wurde eine Zerstäuberkammer für organische Proben verwendet. Die Analyse der Ottokraftstoffe erfolgte aufgrund ihrer höheren Flüchtigkeit in einem externen Labor, dessen ICP-OES mit einer kühlbaren Zerstäuberkammer ausgestattet war.

Die Oxidationsstabilität wurde für Dieselkraftstoffe unter beschleunigten Bedingungen und für Ottokraftstoffe nach dem Induktionsdauerverfahren bestimmt. Bei beiden Verfahren wird eine Probenkammer bei Raumtemperatur mit Kraftstoff und dann bis zu einem jeweils definierten Druck mit Sauerstoff befüllt. Die Probenkammer wird auf eine jeweils definierte Temperatur erhitzt und der Druck aufgezeichnet. Die Zeitspanne bis zum Erreichen des sogenannten Bezugspunktes bzw. Brechpunktes ist die Induktionszeit, die Aufschluss über die Stabilität des Kraftstoffes unter den definierten Bedingungen gibt.

Zur Bestimmung des Ethanolgehaltes wurden die Proben jeweils 1:10 mit n-Hexan verdünnt und anschließend wurde ein definiertes Aliquot, genau wie die entsprechenden Kalibrationslösungen, in ein Head-Space-Vial überführt. Die Analyse der Proben erfolgte mit einem Gaschromatographen mit einem Flammenionisationsdetektor (GC-FID). Zur Probenaufgabe kam ein Head-Space-Sampler mit Gleichdruckdosierung als Aufgabeprinzip zum Einsatz.

Die Charakterisierung der frischen Kraftstoffproben (nachfolgend als „Woche 0“ bezeichnet) ergab die in Tabelle 4 aufgeführten Kennwerte. Dabei ist der neuartige synthetische Kraftstoff STF vergleichbar mit den konventionellen Kraftstoffen E10 und Super+. Die anderen Kraftstoffe mit Ausnahme des Kraftstoffs HVO95E5 entsprechen den Vorgaben der jeweiligen Kraftstoffnormen. Eine Charakterisierung der Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerdauer erfolgt im Abschnitt Lagerstabilität.

Ergebnisse

Tabelle 4 Charakterisierung der frischen Kraftstoffe (Woche 0), („LDL“ – unter der Nachweisgrenze; „-“ – nicht gemessen)

Parameter	Einheit	E85	E10	STF	Super+	HVO95E5	HVO100	B7
Dichte bei 15 °C	g cm ⁻³	0,785	0,743	0,745	0,740	0,780	0,780	0,834
Kin. Viskosität bei 15 °C	mm ² s ⁻¹	1,41	0,60	0,61	0,58	-	-	-
Kin. Viskosität bei 40 °C	mm ² s ⁻¹	0,93	0,49	-	-	2,63	2,97	2,68
Dyn. Viskosität bei 15 °C	mPa s	1,11	0,45	0,46	0,43	-	-	-
Dyn. Viskosität bei 40 °C	mPa s	0,71	0,35	-	-	2,01	2,27	2,19
Unterer Heizwert	MJ kg ⁻¹	29,3	41,6	43,1	41,0	42,0	43,5	42,4
Oxidationsstabilität	min	>360	>360	>360	>360	112	92	65
Gehalt an Kohlenstoff	Vol.-%	57,0	82,3	86,2	84,2	82,8	83,9	85,4
Gehalt an Wasserstoff	Vol.-%	13,6	13,4	13,8	13,5	15,3	15,8	14,1
Gehalt an Sauerstoff	Vol.-%	29,4	4,3	0	2,3	1,9	0,3	0,5
Gehalt an Blei	mg kg ⁻¹	LDL	<0,5	<0,9	<0,5	-	-	-
Gehalt an Schwefel	mg kg ⁻¹	0,5	4,0	<0,5	2,6	LDL	LDL	8,8
Ethanol-Gehalt	Vol.-%	80,1	9,8	-	1,2	5,4	-	-
Wassergehalt	Vol.-%	0,11	0,05	LDL	LDL	0,01	LDL	LDL

Lagerstabilität

Um die Lagerstabilität der o. g. Kraftstoffe zu überprüfen, wurden diese bei Raumtemperatur (im Mittel 22,1 °C, Abweichung max. 3,5 °C) für 16 Wochen gelagert. Dazu wurden zwölf 500-ml-Borosilikatglasflaschen pro Kraftstoff mit jeweils etwa 400 ml Kraftstoff (Einwaage bestimmt) befüllt und mit einem nur lose aufgelegten Deckel eingelagert. Nach jeweils vier Wochen wurden pro Kraftstoff zwei Flaschen entnommen, die Massendifferenz zur Ausgangsmasse bestimmt und die Flascheninhalte nach den in Tabelle 3 genannten Methoden charakterisiert, solange dies aufgrund vorhergehender Ergebnisse sinnvoll erschien. Ziel ist es dabei, Änderungen bei Kraftstoffkennwerten über die Lagerzeit zu identifizieren.

Ottokraftstoffe verlieren aufgrund der höheren Flüchtigkeit mehr Masse bei der Einlagerung als Diesellokstoffe. Die relative Massenabnahme betrug 1,0 bis 31,2%. Bei Diesel und reinem HVO betrug die relative Massenabnahme 0,08% bis 0,23%. Bei HVO mit Ethanol wurde eine relative Reduzierung der Masse zwischen 1,7 und 5,4% bestimmt. Diese Massenreduzierung aufgrund der Flüchtigkeit wirkt sich teilweise auf die Kraftstoffparameter aus.

Bei den Parametern Viskosität, Gehalt an Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Blei und Schwefel sowie bei Wassergehalt sind bei den untersuchten Kraftstoffen keine Auffälligkeiten erkennbar. Zusätzlich wurden bei der visuellen Bewertung der Kraftstoffe keine Ablagerungen am Gefäß oder Trübungen im Kraftstoff für die Ottokraftstoffe erkannt.

Abbildung 6 zeigt die Änderung der Dichte für die untersuchten Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerungsdauer. Für die drei Diesellokstoffe HVO100, HVO95E5 und B7 sind über die Lagerdauer von 16 Wochen keine Änderungen ersichtlich. Die Grenzwerte der entsprechenden Kraftstoffnormen DIN EN 590 (Diesellokstoff) und DIN EN 15940 (paraffinische Diesellokstoffe) werden entsprechend im untersuchten Zeitraum eingehalten. Im Gegensatz dazu sind bei den drei Ottokraftstoffen Änderungen der Dichte in Abhängigkeit der Lagerdauer ersichtlich. Bei E85 steigt die Dichte in den ersten Wochen leicht an und verhält sich anschließend annähernd konstant. Bei E10 und Super+ hingegen stieg in den ersten zwölf Wochen die Dichte von 0,74 auf 0,77 g cm⁻³ an und war anschließend konstant für Super+ bzw. fiel ab für E10. Insbesondere die Dichteänderung

Ergebnisse

bei E10 und Super+ ist kritisch zu bewerten, da hier der in der Kraftstoffnorm für Ottokraftstoffe (DIN EN 228) vorgegebene maximale Grenzwert von $0,775 \text{ g cm}^{-3}$ einzuhalten ist. Ein weiterer Anstieg ist nicht zulässig und hat letztendlich auch Konsequenzen für die Motorapplikation, da eine Änderung der Kraftstoffdichte eine Änderung der motorischen Verbrennung mit sich bringt und ggf. auch ein anderes Verhalten der Abgasnachbehandlung bedingt.

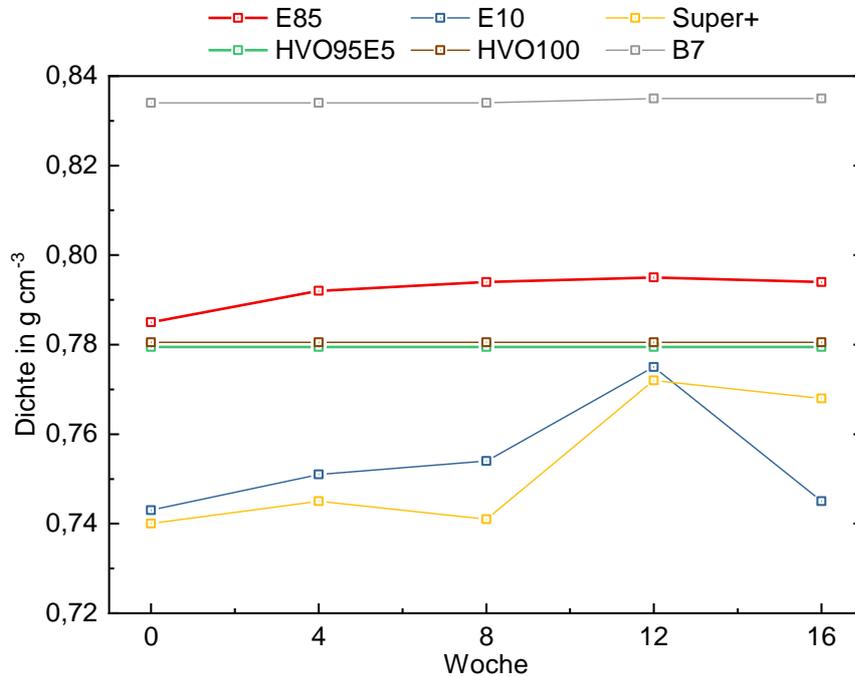


Abbildung 6 Dichte für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018

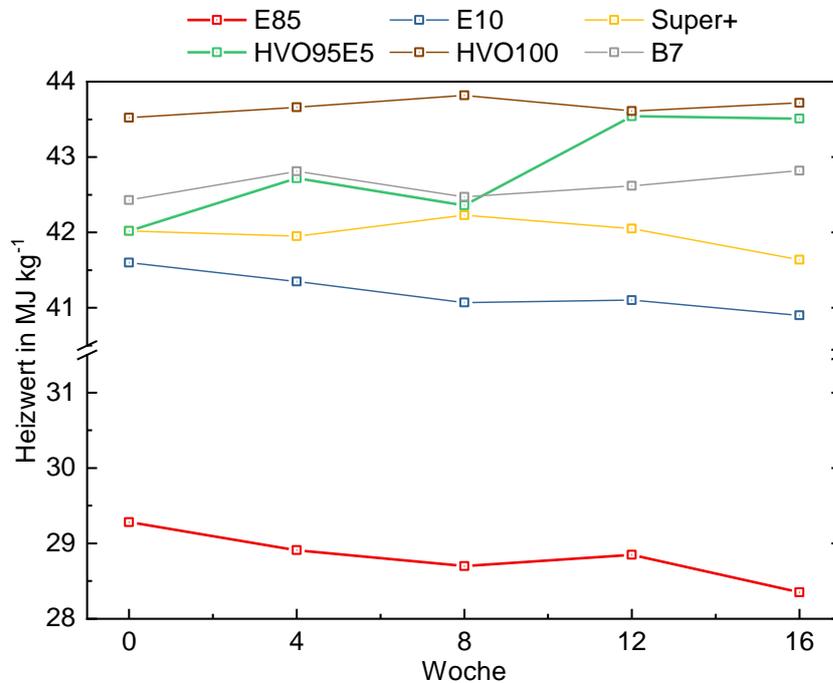


Abbildung 7 Heizwert für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018

Abbildung 7 zeigt den Heizwert der untersuchten Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. Für die Kraftstoffe HVO100, B7 und Super+ sind keine wesentlichen Änderungen ersichtlich – der Heizwert der drei genannten Kraftstoffe schwankt nur minimal innerhalb der 16 Wochen. Bei E10 und E85

Ergebnisse

nimmt der Heizwert mit andauernder Lagerzeit um ca. 1 MJ kg^{-1} ab. Im Gegensatz dazu steigt bei HVO95E5 ab Woche 8 der Heizwert um ca. 1 MJ kg^{-1} an und erreicht letztendlich den Heizwert von HVO100. Die Ursache liegt hier in dem fast vollständigen Verdunsten des Ethanol (siehe Abbildung 8). Der Heizwert der Kraftstoffe wird in den jeweiligen Kraftstoffnormen nicht definiert, sodass es auch zu keinen Grenzwertüberschreitungen kommen kann. Aber auch der Heizwert hat Einfluss auf die Motorapplikation. Sollte der Heizwert im Laufe der Zeit zu sehr von den Standardwerten abweichen, werden Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung nicht optimal funktionieren.

Abbildung 8 zeigt den Ethanolgehalt für die Kraftstoffe E85, E10, Super+ und HVO95E5. HVO100 und B7 wurden bei der Bestimmung nicht mit betrachtet. Für die Kraftstoffe E10 und Super+ wurden über die Lagerzeit von 16 Wochen keine Änderungen erfasst. Bei HVO95E5 reduzierte sich der Ethanolgehalt von 5,4 Vol.-% auf 1,7 Vol.-%. Die Ursache kann entweder in der Verdunstung des Ethanol oder im Entmischen der beiden Kraftstoffkomponenten während der Lagerung liegen. Bei dem Kraftstoff E85 ist der Ethanolgehalt in Woche 0 und in Woche 16 identisch. Die Abweichungen in den Wochen 4, 8 und 12 liegen in der Messunsicherheit der Methode begründet.

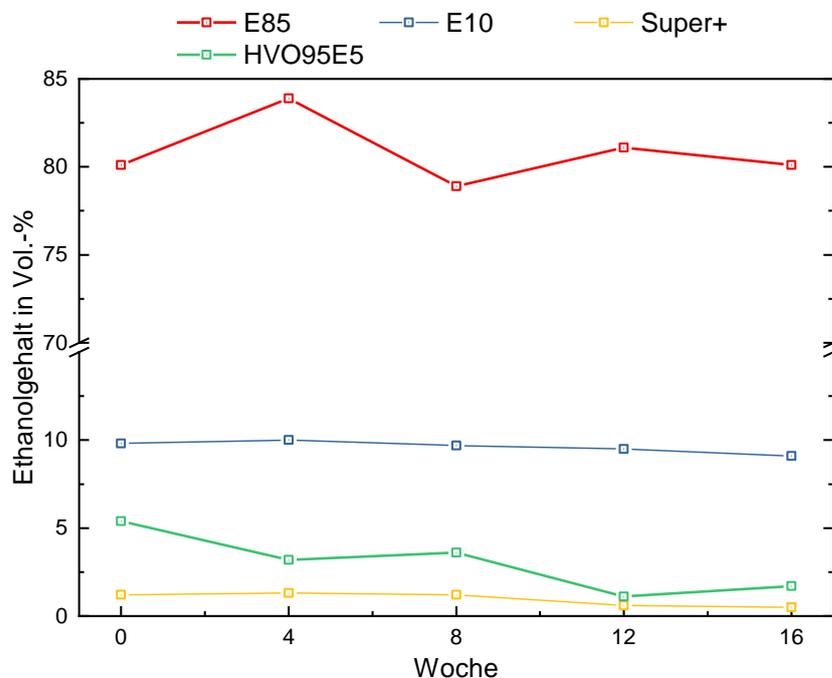


Abbildung 8 Ethanolgehalt für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018

Abbildung 9 zeigt die Oxidationsstabilität der untersuchten Kraftstoffe. Die Oxidationsstabilität wird üblicherweise als Kennwert für die Lagerstabilität herangezogen. Dabei gilt allgemein, je größer der Wert ist, desto stabiler ist der jeweilige Kraftstoff. Bei Ottokraftstoffen muss ein Wert größer 360 min eingehalten werden. Dies traf für die drei untersuchten Ottokraftstoffe über die gesamte Lagerdauer zu, daher werden diese in der Abbildung nicht dargestellt.

Die Oxidationsstabilität der Dieseldieselkraftstoffe wurde mit Hilfe des PetroOxy-Tests bestimmt. Dieses Verfahren entspricht nicht den in den Normen vorgegebenen Verfahren. Es ist jedoch für den Vergleich verschiedener Kraftstofftypen (fossiler und paraffinischer Dieseldieselkraftstoff) am geeignetsten. Damit können jedoch keine Abschätzungen gegeben werden, ob der jeweilige Kraftstoff die Vorgaben der Norm erfüllt. Die Oxidationsstabilität von HVO100 reduziert sich in den ersten vier Wochen von 92 min auf 67 min und bleibt im Anschluss annähernd konstant. B7 schwankt innerhalb der 16 Wochen Lagerzeit sehr stark (Min: 65,0 min in Woche 0; Max: 83,7 min

Ergebnisse

in Woche 16). Es ist jedoch keine Tendenz erkennbar. Im Gegensatz dazu weist HVO95E5 zu Beginn des Versuchs mit 112,0 min eine deutlich höhere Oxidationsstabilität auf als der Reinkraftstoff HVO100. Dies liegt wahrscheinlich an den 5 Vol.-% Ethanol, die eine sehr gute Oxidationsstabilität verursachen. Im Verlauf der Lagerung reduziert sich der Anteil an Ethanol immer weiter und damit auch die Oxidationsstabilität, bis sie nach 16 Wochen auf einem ähnlichen Niveau wie HVO100 liegt (HVO95E5: 79,1 min; HVO100: 68,6 min).

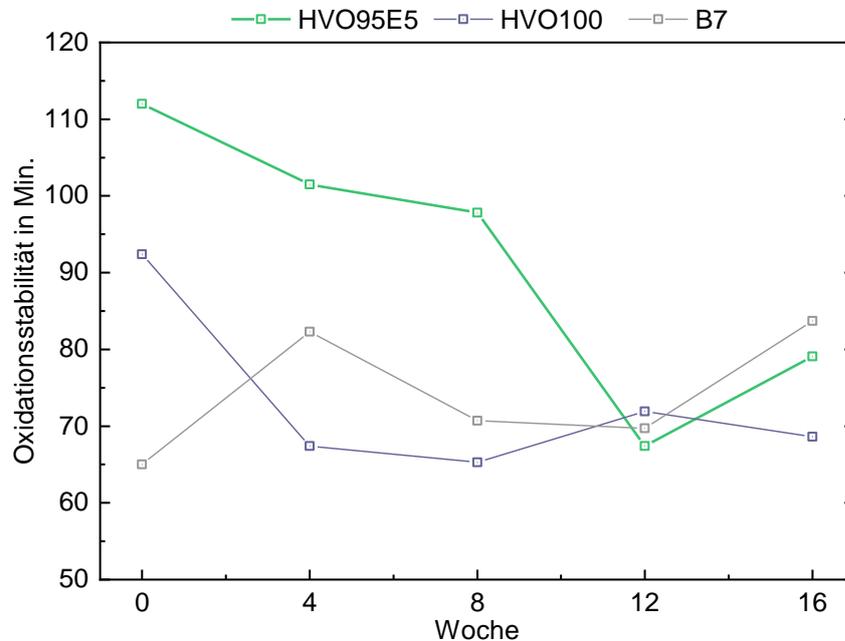


Abbildung 9 Oxidationsstabilität für verschiedene Kraftstoffe in Abhängigkeit der Lagerzeit. ©DBFZ 2018

Anhand der Untersuchungen zur Lagerstabilität sind die untersuchten Ottokraftstoffe E85, E10 und Super+ für die Anwendung mit längeren Lagerzeiten geeignet. Einzig die Änderung der Dichte sowie die Abnahme der absoluten Masse in Abhängigkeit der Zeit könnte ein Schwachpunkt der untersuchten Kraftstoffe sein. Jedoch wurden innerhalb der 16 Wochen Versuchszeit keine Grenzwertüberschreitungen beobachtet.

Materialverträglichkeit

Die Kraftstoffe STF, HVO95E5 und E10 wurden beispielhaft auf ihre Materialverträglichkeit gegenüber den für Fahrzeuganwendungen typischen Elastomeren Nitrilkautschuk (NBR) und Fluorkautschuk (FKM) getestet. Dabei werden die für Kraftstoffsysteme typischen Dichtmaterialien jeweils für 168 Stunden bei 40 °C in den jeweiligen Kraftstoff vollständig eingetaucht und anschließend auf ihre Beständigkeit getestet. In die Bewertung gehen der Zugversuch, bestehend aus Reißfestigkeit und Reißdehnung, nach DIN 53504, die Shore-Härteprüfung nach ISO 7619 und die Bestimmung des Druckverformungsrests (DVR) nach ISO 815 ein. Die Versuche zur Materialverträglichkeit für die drei genannten Kraftstoffe wurden in dem beauftragten Prüflabor k-labor GmbH durchgeführt. Vergleichend wurden Erkenntnisse aus der Literatur für die Wechselwirkungen zwischen E85 und NBR bzw. FKM hinzugezogen.

Aus der Literatur ist die Beständigkeit der beiden Elastomere gegenüber E85-Kraftstoff bereits bekannt. So schildert Weltschew in [26], dass nach der Einlagerung von NBR und FKM in E85 bei einer Temperatur von 40 °C für einen Zeitraum von 84 Tagen eine Massenänderung für FKM von +5% und für NBR von -6% im Vergleich zum Originalzustand ermittelt wurde. Ebenfalls schildert

Ergebnisse

Weltschev eine Änderung der Shore-Härte A nach DIN 53505 von -11% für FKM und -18% für NBR [17]. Ähnliche Ergebnisse wurden durch Walker in [27] veröffentlicht. Laut Walker ändert sich die Shore-Härte A (die Einlagerung der Elastomere erfolgte bei 40 °C für 168 Stunden) für FKM im Bereich von -5% bis -14% und für NBR von -11% bis -14%. Im Zugversuch werden Änderungen in der Reißfestigkeit für FKM von -18% bis -40% sowie für NBR von -31% bis -52% bei einer Reißdehnung für FKM von -26% bis 27% und für NBR von -22% bis -39% beschrieben. Die Volumenänderung ist mit 5% bis 14% für FKM und 12% bis 16% für NBR angegeben. Alle Werte geben die Änderung zum Originalzustand an. Die beiden Quellen zeigen deutlich, dass E85-Kraftstoff auf NBR einen größeren Einfluss hat als auf FKM. Beide Quellen geben aber auch an, dass der Einfluss von E10 auf die beiden Elastomere noch signifikanter ist.

Beim Zugversuch nach DIN 53504 werden genormte Prüfkörper mit einer konstanten Geschwindigkeit bis zum Zerreißen gedehnt. Dabei werden an der Zugprüfmaschine die aufgebrachte Kraft (in MPa) und die dazugehörige Längenänderung (in % als relative Änderung zur Ausgangslänge) in Abhängigkeit der Zeit erfasst. Wichtige Einzelparameter sind die aufgebrachte Kraft (Reißfestigkeit) und die Längenänderung (Reißdehnung) zum Zeitpunkt des Reißens der Elastomere. Im Projekt findet die Methode Anwendung, in dem die beiden Elastomere nach der oben genannten Alterung im Kraftstoff (168 h bei 40 °C) im Zugversuch getestet und anschließend mit dem unbehandelten Frischmaterial (nachfolgend als „Frischprobe“ bezeichnet) und einer Blindprobe als Indikator des Temperatureinflusses (Alterung in Umgebungsluft bei 40 °C für 168 h) verglichen werden. Aus dem Zugversuch können mehrere Rückschlüsse gezogen werden. Zum einem sind Elastomere im Montageprozess oftmals starken Belastungen ausgesetzt, die eine hohe Zugfestigkeit voraussetzen. Zum anderem ermöglicht eine hohe Reißdehnung bei stark verpressten Dichtungen erhöhte Sicherheit gegenüber Spannungsrissen. In Kombination mit der Einlagerung in den Kraftstoffen bei erhöhten Temperaturen über einen längeren Zeitraum kann die mechanische und chemische Beständigkeit der verwendeten Elastomere abgeschätzt werden. [28, 29]

Für die untersuchten Elastomere zeigen sich im Zugversuch Tabelle 5 deutliche Unterschiede bei Verwendung der drei genannten Kraftstoffe gegenüber der Frischprobe. So haben beispielsweise die in STF eingelagerten Elastomere eine geringe Reißfestigkeit und -dehnung (NBR: -19%/ -22%; FKM: -22%/ -9%). Ebenfalls größere Unterschiede sind bei NBR in E10 (-18%/ -21%) und bei FKM in HVO95E5 (-12%/ -17%) zu erkennen. Im Gegensatz dazu zeigen sowohl die Blindprobe für beide Elastomere (Bestimmung der Temperaturabhängigkeit) als auch NBR in HVO95E5 und FKM in E10 keine wesentlichen Veränderungen gegenüber der Frischprobe auf. Laut dem beauftragten Prüflabor sind Änderungen im Vergleich zur Frischprobe von bis zu 25% bei der Reißfestigkeit und von bis zu 50% bei der Reißdehnung tolerierbar.

Tabelle 5 Ergebnisse der Zugprüfung, bestehend aus Reißfestigkeit (RF) und Reißdehnung (RD), für die beiden Elastomere NBR und FKM

	Nitrilkautschuk (NBR)				Fluorkautschuk (FKM)			
	RF in MPa	Änderung	RD	Änderung	RF in MPa	Änderung	RD	Änderung
Frischprobe	14,4		350%		9,5		312%	
Blindprobe	14,2	-1%	341%	-3%	9,6	1%	306%	-2%
STF	11,7	-19%	272%	-22%	7,4	-22%	284%	-9%
E10	11,8	-18%	278%	-21%	9,1	-4%	297%	-5%
HVO95E5	14,4	0%	332%	-5%	8,4	-12%	260%	-17%
E85 [27]		-31% bis -52%		-22% bis -39%		-18% bis -40%		-26% bis 27%

Ergebnisse

Das Shore-Härteprüfverfahren nach ISO 7619 indiziert die Elastizität eines Elastomers, in dem bei Shore-A ein federbelasteter Stahlstift mit einer Stirnfläche von 0,79 mm und einem Auflagegewicht von 1 kg für 15 s auf das Elastomer gedrückt wird. Dabei ist die Eindringtiefe des Stiftes in das Elastomer zu bestimmen, mit einer Skala von 0 Shore, das entspricht einer maximal möglichen Eindringtiefe von 2,5 mm, bis 100 Shore, das entspricht einer Eindringtiefe von 0 mm. Der Test wird bei einer Temperatur von $23\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ durchgeführt. Harte Werkstoffe (90 Shore) weisen einen höheren Widerstand gegen Spaltextusion bei hohen Drücken und höheren Schutz gegen Montagebeschädigungen auf. Im Gegensatz dazu können sich Werkstoffe mit einer niedrigen Shore-A-Härte (50 Shore) leichter verformen und beispielsweise Oberflächenfehler aufnehmen. Als Kraftstoffdichtung werden Materialien gesucht, die eine mittlere Härte von ca. 70 Shore und gegenüber der Frischprobe nach Kontakt mit den Kraftstoffen wenig Änderungen aufweisen. [30, 31]

Die Blindprobe beider Elastomere zeigt keine wesentlichen Änderungen gegenüber der Frischprobe, sodass davon auszugehen ist, dass die Kraftstofftemperatur von 40 °C bei der Lagerung keinen wesentlichen Einfluss nimmt. Im Gegensatz dazu weist insbesondere NBR bei Kontakt mit STF und E10 eine um mehr als 10% reduzierte Härte gegenüber der Frischprobe auf. Bei FKM nimmt die Härte nur bei Kontakt mit STF um über 10% ab (siehe Tabelle 6). Insbesondere bei Verwendung des Kraftstoffs HVO95E5 sind keine Veränderungen gegenüber den Frischproben beider Elastomere ersichtlich.

Tabelle 6 Ergebnisse der Härtebestimmung für die beiden Elastomere NBR und FKM

	Nitrilkautschuk (NBR)		Fluorkautschuk (FKM)	
	Shore A	Änderung	Shore A	Änderung
Frischprobe	68,4		68,7	
Blindprobe	69,4	1%	68,4	0%
STF	60,5	-12%	59,3	-14%
E10	60,9	-11%	66,6	-3%
HVO95E5	69,0	1%	67,3	-2%
E85 [26, 27]		-11% bis -18%		-5% bis -14%

Das dritte verwendete Prüfverfahren, der Druckverformungsresttest nach ISO 815, ermittelt die dauerhafte Verformung des Elastomers nach längerer mechanischer Belastung. Der DVR gibt dabei den dauerhaften Verformungsanteil an, nachdem der Prüfkörper für die hier verwendeten Elastomere um 25% zusammengedrückt wurde. Anschließend wird der verpresste Prüfkörper über beispielsweise 24 h bei Raumtemperatur oder bei erhöhten Temperaturen (hier 40 °C) in einem Medium gelagert. Nach Ablauf der Zeit wird der Prüfkörper bei der Prüftemperatur für 30 min entlastet. Der DVR entspricht danach dem Verhältnis zwischen den Höhendifferenzen des Probenkörpers vor der Prüfung und nach der Prüfung sowie den Höhendifferenzen vor der Prüfung und während der Prüfung. Der DVR ist ein Kennwert für die materielle Beschaffenheit des Elastomers in dem jeweiligen Medium und kann als Kriterium für die Dichtfunktion von O-Ringen herangezogen werden. Elastomere mit niedrigen DVR-Werten sind zu bevorzugen, da ansonsten bei Dauerbelastung die Dichtfunktion im Laufe der Zeit nachlässt. [32, 33]

Der in Tabelle 7 abgebildete Druckverformungsrest von NBR in Kontakt mit STF ist mit 23% und 32% deutlich höher als bei der unbehandelten Frischprobe mit 10%. NBR in HVO95E5 zeigt im Gegensatz dazu einen weiter reduzierten DVR. Bei FKM ist bei den drei verwendeten Kraftstoffen jeweils ein deutlich reduziertes DVR zu erkennen. Mit dem Hintergrund der oben beschriebenen

Ergebnisse

Zusammenhänge sind insbesondere die Änderungen bei NBR in Kontakt mit STF und E10 kritisch zu bewerten.

Tabelle 7 Ergebnisse des Druckverformungsrestbestimmung für die beiden Elastomere NBR und FKM

	Nitrilkautschuk (NBR)		Fluorkautschuk (FKM)	
	DVR	Änderung	DVR	Änderung
Frischprobe	10%		15%	
STF	32%	+220%	10%	-33%
E10	23%	+130%	11%	-27%
HVO95E5	9%	-10%	13%	-13%

Mit Bezug auf die drei durchgeführten Verfahren zur Bestimmung der Materialverträglichkeit der Kraftstoffe STF, E10, HVO95E5 und E85 ist FKM als Dichtmaterial besser geeignet als NBR. Jedoch sind auch bei dem Elastomer FKM für die Verwendung von STF weiterführende Untersuchungen notwendig, da sich insbesondere die Shore-Härte im Vergleich zum Frischmaterial ändert. Bei Verwendung von HVO95E5 sind keine Einschränkungen für beide Elastomere ersichtlich.

Konzept Hoftankstelle

Die beiden Benzinsubstitute E85 und STF sind nicht flächendeckend im deutschen Tankstellennetz vertreten. Während STF eine eher zukünftige Alternative darstellt und aktuell kommerziell nicht verfügbar ist, wird Bioethanol wie weiter oben beschrieben bereits als Beimischung vor allem in E5- und E10-Kraftstoff verwendet. Der bis vor 10 Jahren weit verbreitete E85-Kraftstoff ist nur noch an ausgewählten Tankstellen verfügbar. So vertreibt beispielsweise im Bundesland Sachsen aktuell kein einziger Tankstellenbetreiber E85. Die Range-Extender-Anwendung bedingt jedoch keinen großen Kraftstoffbedarf, sodass die Kraftstoffversorgung über vergleichsweise einfache Hoftanksysteme bereitgestellt werden kann und der Kraftstoff direkt beim Händler in handhabbaren Gebinden wie Kraftstofffass oder IBC-Container bezogen werden kann. Jedoch ist auch hier zu beachten, dass sich klassische Betriebstankstellen mit einem Tankvolumen von 1.000 l und mehr auf Grund der hohen Anschaffungskosten nicht rentieren. Hier sind entsprechend den Angaben eines ehemaligen Betriebshoftankstellenbetreibers für E85-Kraftstoff mit Kosten bis zu 15.000 EUR zu rechnen. Ein anwenderfreundliches Konzept kann erst in einem potenziellen Folgeprojekt herausgearbeitet werden. In dem aktuellen Projekt wurden zwei einfache Konzepte beispielhaft erstellt. Zusätzlich wurde mit einem Sachverständigen über das Thema Hoftankstelle mit Ethanol-Kraftstoff diskutiert.

Ziel ist es, eine Betriebstankstelle auf dem Hof/Gelände des Anwenders für die lokale Betankung des Fahrzeugs zu installieren und falls notwendig zu genehmigen. Die Anforderungen an ein solches System lauten u. a.:

- Die Hardware muss für E85-Kraftstoff ausgelegt sein.
- Die Dimensionierung sollte so klein wie möglich sein, sodass kleine Gebinde (z. B. 60/200-Liter-Kraftstofffass) genutzt werden können.
- Eine fahrzeugspezifische Kraftstoffabrechnung ist optional möglich.
- Die geltenden Verordnungen und technischen Regeln sind einzuhalten, z. B.:
 - Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (**AwSV**),
 - Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (**BetrSichV**),

Ergebnisse

- Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter (**TRGS 509**),
- Tankstellen für Kraftfahrzeuge, Teil 3: Betankung von Kraftfahrzeugen mit Mischungen aus Ethanol und Ottokraftstoff (**TRwS 781-3**).

Für die Abwägung der Notwendigkeit von Genehmigungen gegenüber öffentlichen Behörden und für den sicheren Umgang mit Betriebstankstellen sollte ein Sachverständigenbüro in dem Folgevorhaben zur Unterstützung hinzugezogen werden.

Die folgenden beiden Konzepte sind gegenüber den o. g. Anforderungen genauer zu prüfen:

1. Konzept 1: Tanksystem, bei dem das Kraftstofffass direkt zum Betanken des Fahrzeugs genutzt wird. Das Fass müsste ggf. dabei auf einer (mobilen) Auffangwanne gelagert werden. Siehe Abbildung 10.
2. Konzept 2: Tanksystem mit einem stationären Kraftstofflager, indem beispielsweise Fässer oder IBC-Container gelagert werden, sowie einem Kraftstoff-Trolley, der zum Betanken der Fahrzeuge verwendet wird. Siehe Abbildung 11.

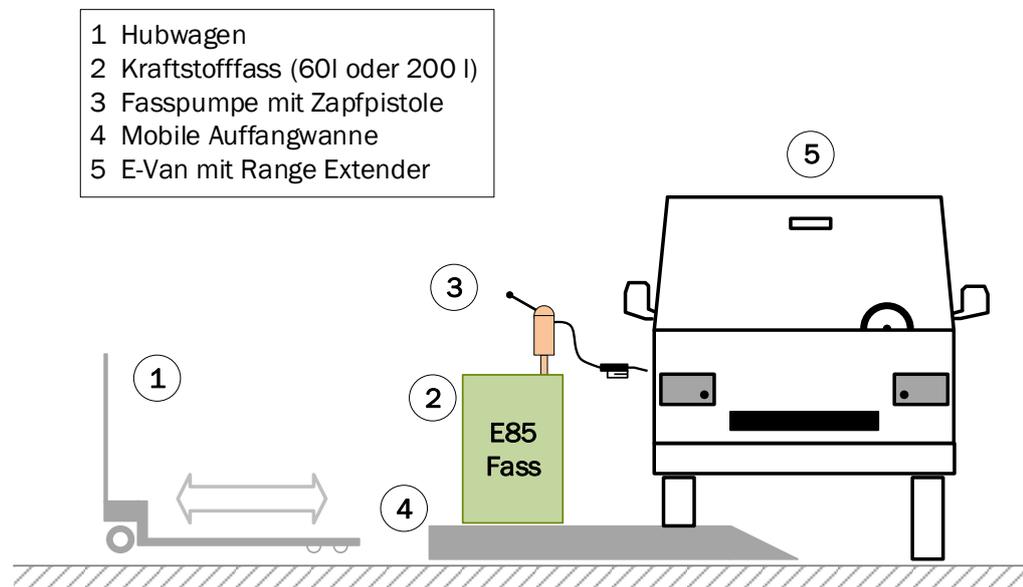


Abbildung 10 Konzept 1: Tanksystem mit Kraftstofffass auf (mobiler) Auffangwanne ©DBFZ 2018

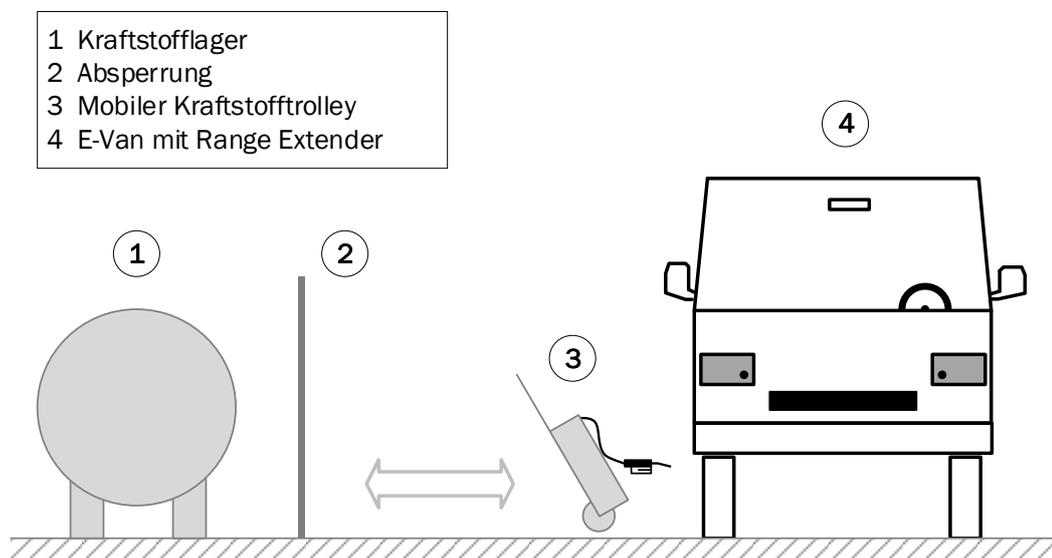


Abbildung 11 Konzept 2: Tanksystem mit stationärem Kraftstofflager und mobilen Kraftstoff-Trolley ©DBFZ 2018

Exkurs: Regionale Bioenergiepotenziale für Elektromobilität

Eines der wesentlichen Erkennungsmerkmale des Verbundvorhabens ist der Einsatz nachhaltiger, regionaler Energieträger bei elektrifizierten Fahrzeugen. Aus diesem Grund werden in dem nachfolgenden Abschnitt Ergebnisse zur Bewertung der regionalen Bioenergiepotenziale für die Anwendung in der Elektromobilität aus dem Vorhaben „Verbundvorhaben Flottenbau mit Multiplikatoren und wissenschaftliche Begleitung“ (BMVI Förderprogramm Schaufenster Elektromobilität, FKZ 16SBS005B), welches durch das DBFZ bearbeitet wurde, dargestellt [34].

Der Beitrag der Elektromobilität (auch in Kombination mit Verbrennungsmotoren) zu einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist unter anderem stark von der Art der eingesetzten Energiequellen abhängig. Hohe Klimaschutzeffekte lassen sich vor allem beim Einsatz von Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) bzw. biogenen Energieträgern in Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybriden realisieren. Gerade für den Anteil von Energieträgern aus Biomasse (Strom und Biokraftstoffe) ist dabei das Potenzial biogener Ressourcen und verfügbarer landwirtschaftlicher Flächen eine wichtige Größe, um den Beitrag biogener Energieträger im Verkehrssektor auf Landesebene einzuordnen. In den genannten Vorhaben wurden, basierend auf verschiedenen Szenarien Flächen-, Biomasse-, und Bioenergiepotenziale für das Bundesland Sachsen bis zum Jahr 2030 abgeschätzt.

Basis der Abschätzungen war zunächst der Bestand landwirtschaftlicher Flächen auf Bundeslandebene sowie die Berücksichtigung der verfügbaren Datenbasis zu spezifischen Größen wie Bevölkerungsentwicklung, Anteil der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie der Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die Produktion von Biomasse für die stoffliche Nutzung. Auf Basis dieser Größen erfolgte eine Fortschreibung der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen (auf der Grundlage der statistischen Datenbasis 2010) bis zum Jahr 2030. Der erwartete Flächenbedarf für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln wurde abgeschätzt und von der verfügbaren landwirtschaftlichen Gesamtfläche abgezogen. Das grundsätzliche Vorgehen zur Potenzialermittlung ist in Abbildung 12 dargestellt.

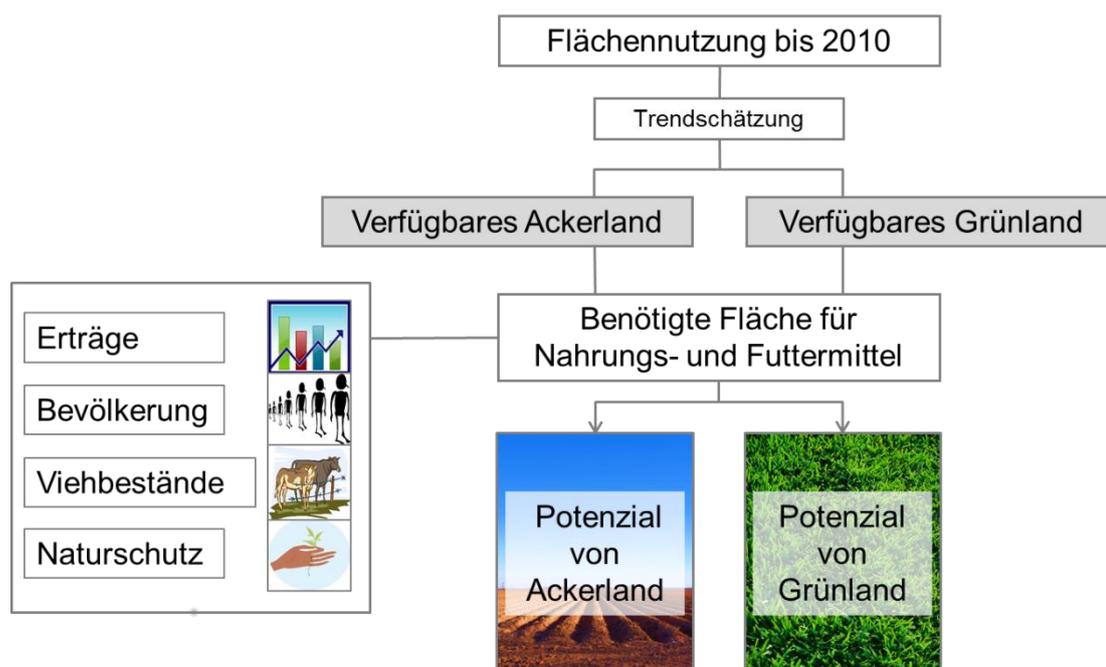


Abbildung 12 Vereinfachte Vorgehensweise zur Bestimmung der Flächenpotenziale für Bioenergie im Bundesland Sachsen ©DBFZ 2018 [34].

Ergebnisse

Die in Abbildung 12 links dargestellten Einflussgrößen (z. B. zukünftige Ertragssteigerungen, Bevölkerungsentwicklung, Naturschutzvorgaben, etc.) haben zum Teil einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis und sind darüber hinaus deutlich von der Entwicklung gesellschaftlicher und politischer Meinungen und Werte (z. B. in Bezug auf die Intensivierung der Landwirtschaft, den Ausbau des Biolandbaus, etc.) geprägt. Um den Einfluss dieser Größen auf das Ergebnis zumindest teilweise sichtbar zu machen und zu diskutieren, wurden die Flächenpotenziale bis 2030 in zwei unterschiedlichen Szenarien (Basisszenario (Basis) und Basisszenario mit erhöhten Umweltrestriktionen (Basis-U)) abgeschätzt. Im Basisszenario erfolgt im Wesentlichen eine Fortschreibung der Flächennutzung unter Berücksichtigung aktueller Trends (z. B. in Bezug auf Ernährungsgewohnheiten, Ertragsfortschreibungen, etc.) und Entwicklungen sowie unter Berücksichtigung des Umbruchsverbotes für Grünland ab 5% Grünlandanteil.

Im Gegensatz dazu berücksichtigt das Basis-U Szenario deutlich ambitioniertere Ziele für den Schutz von Grünland (genereller Umbruchstop von Grünland ab 2013), für die Ausweitung des ökologischen Landbaus (20% der gesamten Landwirtschaftsfläche in 2020) sowie bei der Umsetzung des nationalen Wildnisziels (durch Nutzungsaufgabe der landwirtschaftlich bewirtschafteten Moorflächen).

Im Ergebnis zeigen sich für das Bundesland Sachsen Flächenpotenziale von ca. 200.000 ha bis 220.000 ha (Ackerland im Jahr 2020) bzw. ca. 260.000 ha und 280.000 ha (Ackerland im Jahr 2030). Dieses Zwischenergebnis ist ein erster Schritt zur Herleitung technischer Bioenergiepotenziale. Diese Herleitung erfolgt zunächst über die (rechnerische) Belegung der verfügbaren Flächenpotenziale beider Szenarien mit Feldfrüchten (in einer typischen Fruchtfolge) in bestimmter zeitlichen Abfolge und Zusammensetzung sowie auf der Grundlage derzeit typischer Fruchtfolgen im Bundesland Sachsen [35] und Annahmen zu typischen Erträgen dieser Feldfrüchte [35].

Abbildung 13 zeigt die auf Basis der dargestellten Flächenpotenziale kalkulierten Biomasse-, (berechnet über den Flächenertrag) bzw. Brennstoffpotenziale (berechnet über Flächenertrag und Heizwert der Feldfrüchte) für das Bundesland Sachsen bis zum Jahr 2030 für das Basis bzw. das Basis-U Szenario. Im Ergebnis zeigt sich ein Brennstoffpotenzial von 19.021 TJ a⁻¹ (Jahr: 2020, Szenario: Basis-U) bis 26.630 TJ a⁻¹ (Jahr: 2030, Szenario: Basis).

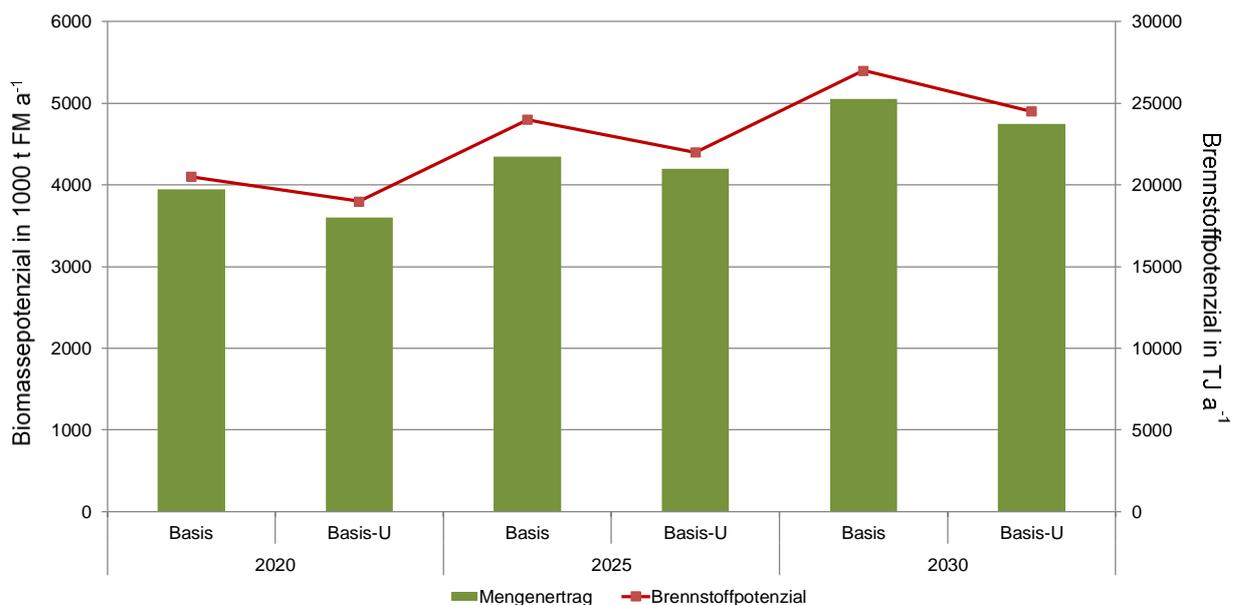


Abbildung 13 Biomassepotenzial bzw. Brennstoffpotenzial für das Bundesland Sachsen im Zeitraum bis 2030 ©DBFZ 2018 [34].

Ergebnisse

Für den nächsten Schritt ist eine Zuordnung der einzelnen Fraktionen (Biomassen) zu den, für diese Biomassen geeigneten Konversionstechnologien notwendig. Die nutzbaren Feldfrüchte umfassen dabei Getreide, Silomais, Zuckerrüben, Winterraps sowie einen kleinen Anteil sonstiger (vor allem verschiedene Zwischenfrüchte) Feldfrüchte.

Abbildung 14 zeigt zunächst den jeweiligen rechnerischen Anteil dieser Feldfrüchte an der Gesamtbelegung des zuvor bestimmten technischen Flächenpotenzials für den Anbau von Rohstoffen für die energetische Nutzung.

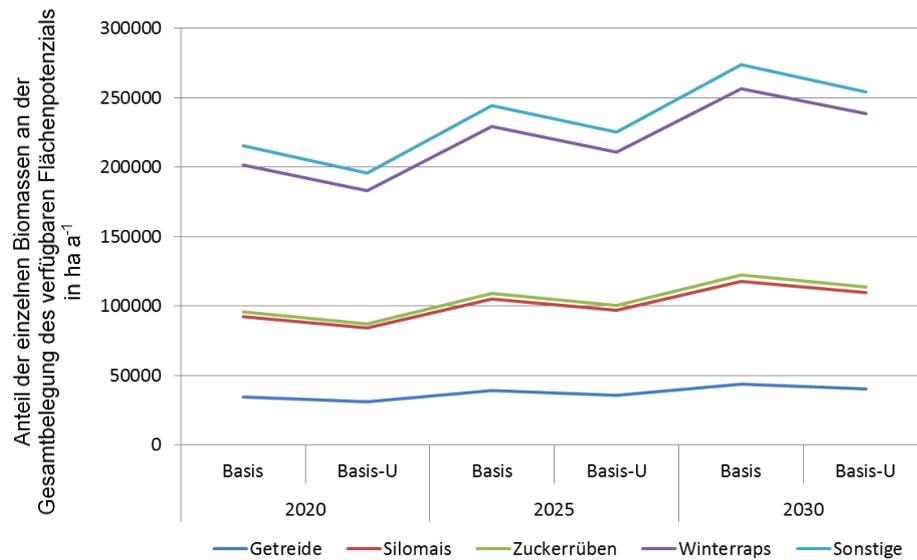


Abbildung 14 Anteil der einzelnen Biomassen am gesamten Flächenpotenzial für die energetische Nutzung im Bundesland Sachsen bis 2030 ©DBFZ 2018 [34].

Die Erträge bzw. die resultierenden Gesamtmengen der angebaute Biomassen sind in der folgenden Abbildung 15 dargestellt.

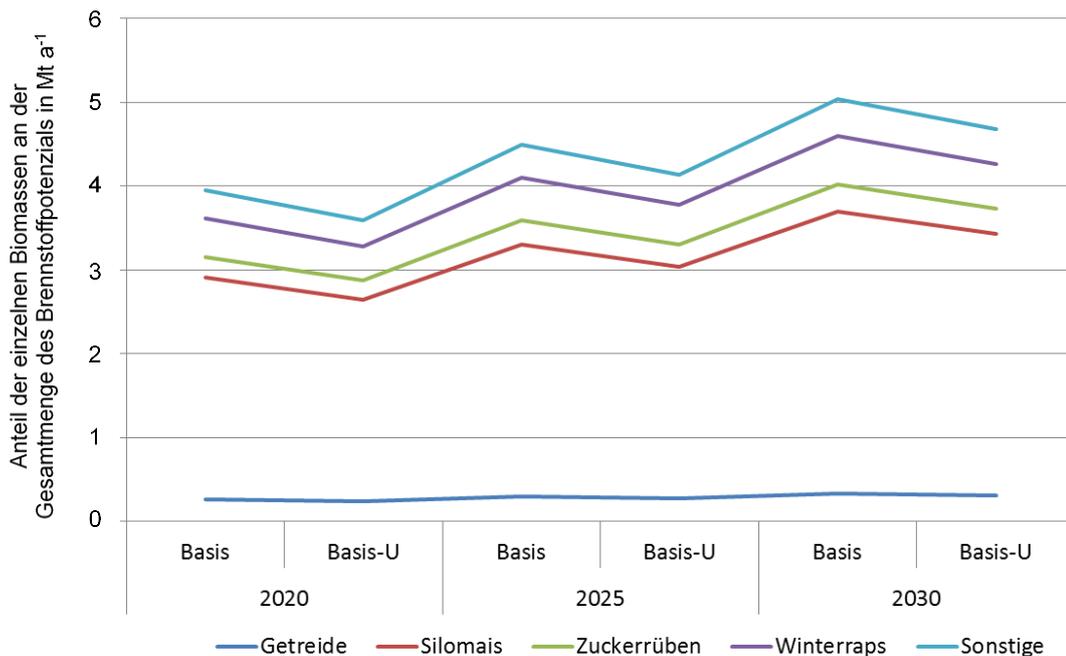


Abbildung 15 Anteil der berücksichtigten Biomassen am gesamten Brennstoffpotenzial für die energetische Nutzung im Bundesland Sachsen bis 2030 ©DBFZ 2018 [34].

Ergebnisse

Für die Bestimmung des aus diesem Brennstoffpotenzial resultierenden Bioenergiepotenzials sind die Zuordnung geeigneter Konversionstechnologien zu den erzeugten Biomassen sowie der spezifische Wirkungsgrad der jeweiligen Technologien für die Umwandlung der Biomassen in Strom und Wärme zu berücksichtigen. Unter der Annahme, dass das identifizierte Brennstoffpotenzial vollständig zur Bioenergieerzeugung nutzbar ist, wurde (für das Szenario Basis-U) ein Bioenergiepotenzial von ca. $6,7 \text{ PJ a}^{-1}$ (2020) bis $10,7 \text{ PJ a}^{-1}$ (2030) berechnet.

Die derzeit im Bundesland Sachsen installierten Kapazitäten von Anlagen zur Stromerzeugung aus Biomasse betragen ca. 283 MWel. Bei einer Jahresleistung von 8.500 h lassen sich auf dieser Basis Kapazitäten von ca. 9 PJ Energie erzeugen. Die dargestellten Brennstoff- und Energiepotenziale sind demnach, zumindest auf Basis dieser Näherung, auch in den vorhandenen Anlagenkapazitäten umsetzbar bzw. bieten in einem gewissen Rahmen Möglichkeiten für den weiteren Ausbau [36].

Der derzeitige Energieverbrauch im Verkehrssektor des Bundesland Sachsen beträgt ca. 100 PJ a^{-1} . [37] Der derzeitige Anteil erneuerbarer Energieträger (inklusive Biokraftstoffen) liegt bei ca. $4,4 \text{ PJ a}^{-1}$. Demnach könnten auf Basis des dargestellten Bioenergiepotenzials aus regionalen Rohstoffen ca. 10% des Energiebedarfes des sächsischen Verkehrssektors mit elektrischer regenerativer Energie abgedeckt werden (Abbildung 16).

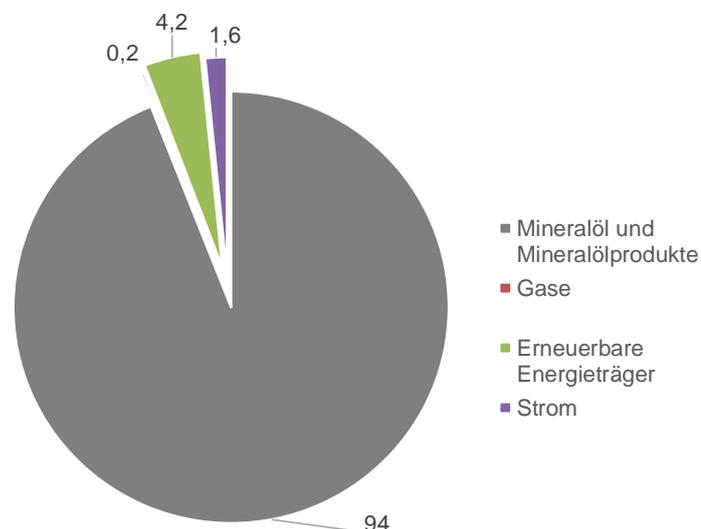


Abbildung 16 Struktur des Energieverbrauches im Verkehrssektor im Bundesland Sachsen in PJ a^{-1} ©DBFZ 2018 [37]

Zusammenfassung Biokraftstoffe

Auf Grundlage der aktuellen politischen Diskussion wurde die betrachtete Kraftstoffmatrix hin zu Benzinsubstituten verschoben. In Folge dessen wurden E85 und der synthetische Kraftstoff STF weiter betrachtet. Während Ethanol ein bereits weitverbreitetes Substitut mit hohen THG-Minderungseffekten darstellt, könnte STF eine zukünftige Option darstellen. Ethanol wird aktuell im Wesentlichen in E5 und E10-Kraftstoff verwendet. Der hier im Projekt fokussierte E85-Kraftstoff ist seit einigen Jahren nur noch schwer erhältlich, so dass im weiteren Verlauf – auch mit Blick auf eine Projektfortführung – die Anwendung von E85 abgewägt werden muss. Bezüglich der Anwendung im Verbrennungsmotor wäre E85 sehr gut geeignet. Abgasemissionen sind mit konventionellem Benzin vergleichbar und Einschränkungen in Hinblick auf Lagerstabilität wurden nicht identifiziert. Die Materialverträglichkeit gegenüber Elastomeren ist zwar eingeschränkt, fällt aber im Vergleich zu heute gebräuchlichen E10-Kraftstoff geringer aus. Der synthetische Kraftstoff STF könnte unter Umständen bezüglich Lagerstabilität und Materialverträglichkeit eine interessante Alternative darstellen. Hier existiert aber aktuell noch keine Verfügbarkeit in entsprechenden Mengen. Die

Ergebnisse

schlechte Verfügbarkeit beider Kraftstoffe lässt die Handhabe nur mittels Betriebshoftankstellen zu, die aber auf Grund der geringen Mengen einfach dargestellt werden müssen (z. B. Betankung aus einem Kraftstofffass). Für die Anwendung solcher Betriebshoftankstellen sollte bei der praktischen Umsetzung ein Sachverständigenbüro beratend hinzugezogen werden.

2.1.3. Exkurs: Ökobilanzielle Bewertung Hybridfahrzeuge

Neben der Diskussion der Verfügbarkeit nachhaltiger Energieträger ist für die Nachhaltigkeitsbewertung von elektrifizierten Fahrzeugen konsequenterweise auch die Bewertung der Fahrzeugherstellung und der Nutzung in Kombination mit dem Energieträger zu diskutieren. Aus diesem Grund werden in dem nachfolgenden Abschnitt Ergebnisse zur ökobilanziellen Bewertung verschiedener Fahrzeugklassen aus dem Vorhaben „Verbundvorhaben Flottenbau mit Multiplikatoren und wissenschaftliche Begleitung“ (BMVI Förderprogramm Schaufenster Elektromobilität, FKZ 16SBS005B) dargestellt und um die Fahrzeugklasse Transporter ergänzt [34].

Folgende Fahrzeugklassen wurden betrachtet:

- Pkw
- Bus
- Transporter

Der Untersuchungsrahmen umfasst die Herstellungsphase, die Nutzungsphase sowie die End-of-Life-Phase des Fahrzeugs Abbildung 17. Bei der End-of-Life-Phase konnte auf Grund der beschränkten Datenlage und den noch geringen Erfahrungswerten nur der Energieverbrauch für Ausbau bzw. Zerlegen des Fahrzeuges betrachtet werden. Das Recycling der Materialien – insbesondere der Batterie – wurden nicht berücksichtigt.

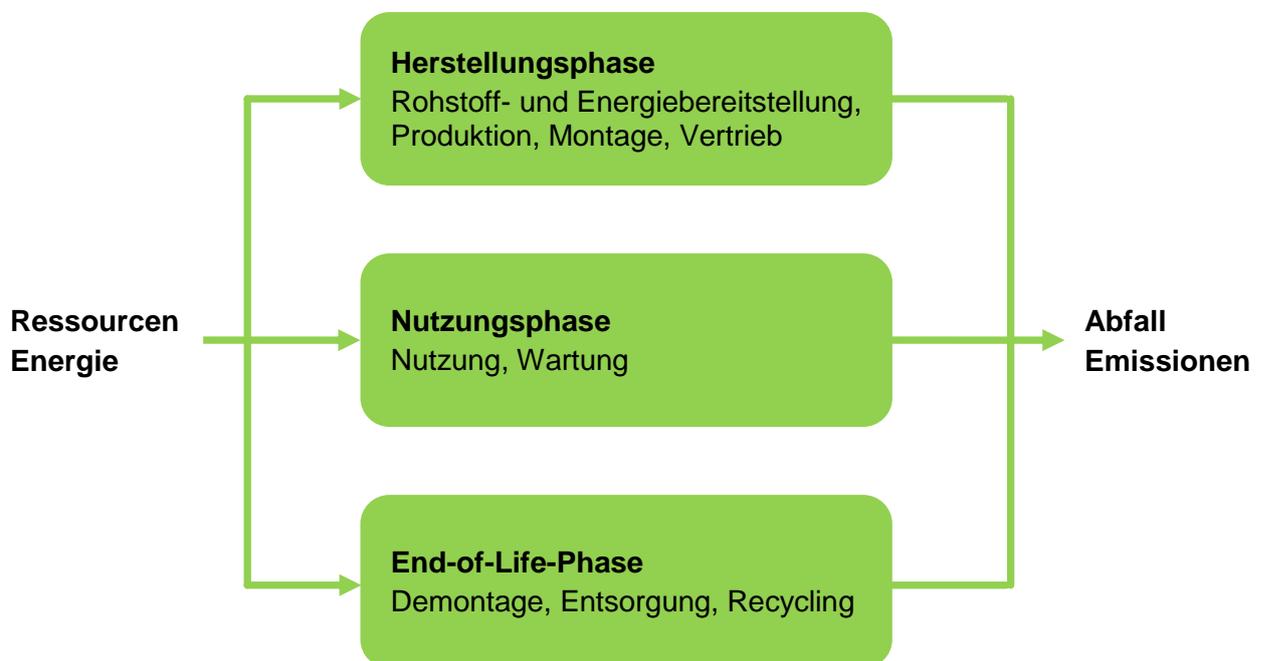


Abbildung 17 Prozesskette Ökobilanzierung Fahrzeuge. ©DBFZ 2018

Für die Nutzungsphase konnte teilweise auf Datensätze aus den Datenloggern der Schaufensterprojekte in Leipzig zurückgegriffen werden. Weitere, wesentliche Quellen der Arbeiten waren die Ökobilanzdatenbanken Ecoinvent 2.2 und 3 sowie Verbrauchsdaten von Automobilherstellern (z. B. [38]) zurückgegriffen.

Ergebnisse

Für die Emissionen der Herstellungsphase ist neben der Materialzusammensetzung und der damit verbundenen Emissionen aus der Bereitstellung der entsprechenden Materiale und Bauteile vor allem der Energieverbrauch für den eigentlichen Konstruktionsprozess von Bedeutung. Die Modellierung der Herstellungsphase erfolgte für die betrachteten Fahrzeugtypen auf Grundlage von [38, 39] sowie den Ergebnissen des Arbeitskreises Ökobilanzen innerhalb des Förderprogramms Schaufenster Elektromobilität. Wesentlicher Treiber der Emissionen aus dem Energiebedarf der Herstellungsphase ist der Emissionsfaktor der Strombereitstellung. Dieser wurde aus einer Erhebung des Umweltbundesamtes für das Jahr 2017 entnommen [40].

Die Bilanzierung der Nutzungsphase der Fahrzeuge erfolgte auf Grundlage von Literaturwerten sowie von Primärdaten aus Datenloggern des Schaufensterprojektes. Zu den Nutzergruppen, von denen Datensätze zur Verfügung standen, zählen insbesondere Dienstleistungsunternehmen aus dem Großraum Leipzig. Die Flotte umfasst dabei Fahrzeuge aus der Kompaktklasse und aus dem Mini-Segment. In die Auswertung sind Datensätze von fünf Fahrzeugen eingeflossen. Die Auswertung der Datensätze erfolgte auf Basis Geografischen Informationssystem ArcGIS 10.2.

Für die Modellierung des elektrisch betriebenen Buses sowie für die Referenzfahrzeuge standen keine Primärdaten aus dem Schaufenster zur Verfügung, sodass diese auf Basis von Literaturdaten modelliert wurden.

Aus der Gegenüberstellung der bilanzierten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) wird deutlich, dass elektrisch betriebene Fahrzeuge (außer das Elektromotorrad) in der Herstellung höhere Emissionen aufweisen, als das Diesel-betriebene Referenzfahrzeug (Tabelle 8). Dies ist vor allem auf die höheren Aufwendungen aus der Herstellung der Batterie zurückzuführen. Bezüglich der Nutzungsphase fällt auf, dass die Diesel-betriebenen Fahrzeuge mehr Emissionen verursachen. Bei der Nutzung ist die unterstellte Nutzungsdauer (PKW: 150.000 km; Bus: 880.000 km, Transporter: 300.000 km) Bei den elektrifizierten Fahrzeugen entspricht die angegebene Nutzungsdauer der Lebensdauer der Batterie. Ein Ersetzen dieser Batterie wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 8 THG-Emissionen (Herstellungs- und Nutzungsphase) verschiedener Fahrzeugklassen

Fahrzeug	Herstellung (kg CO₂-eq pro Fahrzeug)	Nutzung (kg CO₂-eq pro Fahrzeug)
Pkw Elektro	5.501	16.701
Pkw Diesel	1.747	18.252
Bus Elektro	100.630	645.480
Bus Diesel	37.186	1.157.122
Transporter Elektro	43.297	80.685
Transporter Diesel	24.054	95.100

Aufbauend auf den Emissionen der Fahrzeugherstellung und den Nutzungsdaten erfolgt im nächsten Schritt die Bewertung der Gesamtkettenemissionen (auch Well-to-Wheel (WTW)) für ein Plug-in-Hybridfahrzeug unter Berücksichtigung unterschiedlicher Energieträger.

Abbildung 18 stellt die THG-Emissionen pro km für den Betrieb des bilanzierten Plugin-Hybrid-Pkw mit unterschiedlichen Kombinationen aus flüssigen Energieträgern und Stromquellen gegenüber. Berücksichtigt wurde dabei die Nutzung von konventionellem Biodiesel und synthetischem Diesel auf Strombasis (hier wiederum Strom aus erneuerbaren Quellen) jeweils als Reinkraftstoff (B100 bzw. PTL100) oder in der Beimischung mit 7% (V/V) Biodiesel bzw. PTL (B7 bzw. PTL7). Diese Optionen wurden jeweils um Strom für den batterieelektrischen Betrieb mit einem Anteil von 70% (als Annahme für das Jahr 2030, [41] bzw. auf Basis der derzeitigen Zusammensetzung des deutschen Strommixes [40] ergänzt. Ebenfalls ist der Vergleichswert der WTW-Emissionen eines

Ergebnisse

konventionellen Diesel Pkw mit 145 CO₂-eq pro km (gestrichelte vertikale Linie) in der Abbildung dargestellt.

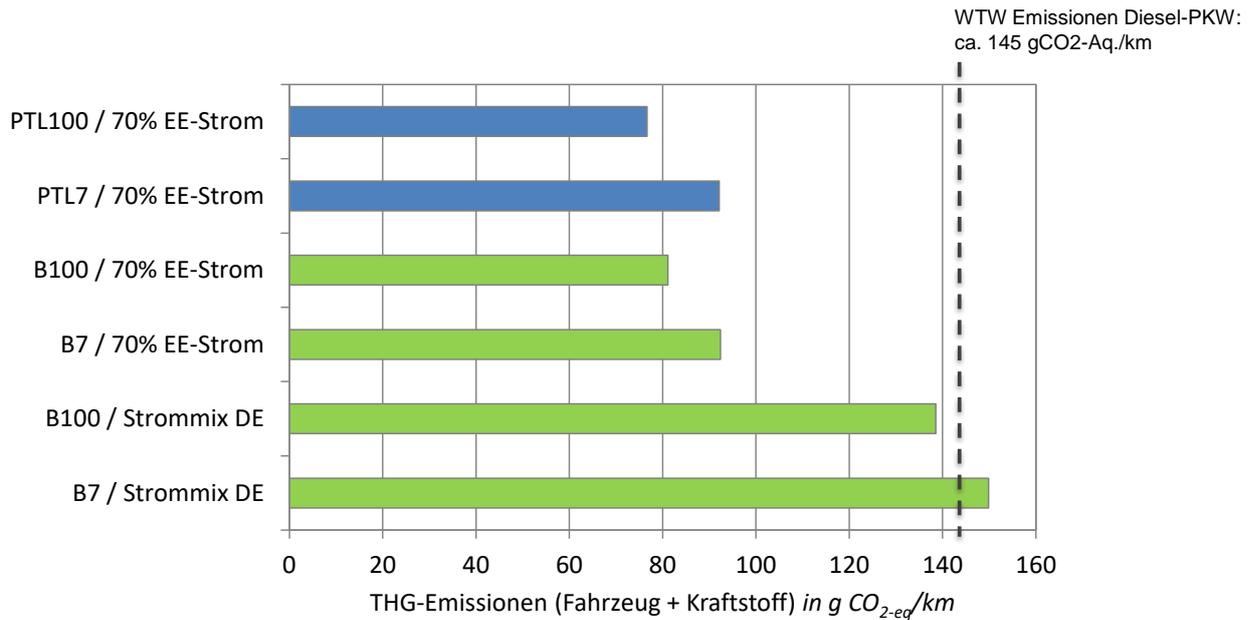


Abbildung 18 WTW-Emissionen in g CO₂-eq pro km für unterschiedliche Energieträgerkombinationen (Annahmen: Plug-in-Hybrid mit REX (70% Strom / 30% Kraftstoff), Verbrauch 21 kWh pro 100 km; THG Fahrzeug bei 41,7 g CO₂-eq pro km, Vorkettenemissionen FAME für B7 und B100 mit 60% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel, PTL mit 80% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel. ©DBFZ 2018

Analog zur vorangegangenen Abbildung 18 zeigt Abbildung 19 die THG-Emissionen pro km für den Betrieb eines Plug-in-Hybrid-Transporters mit unterschiedlichen Kombinationen aus flüssigen Energieträgern und Stromquellen.

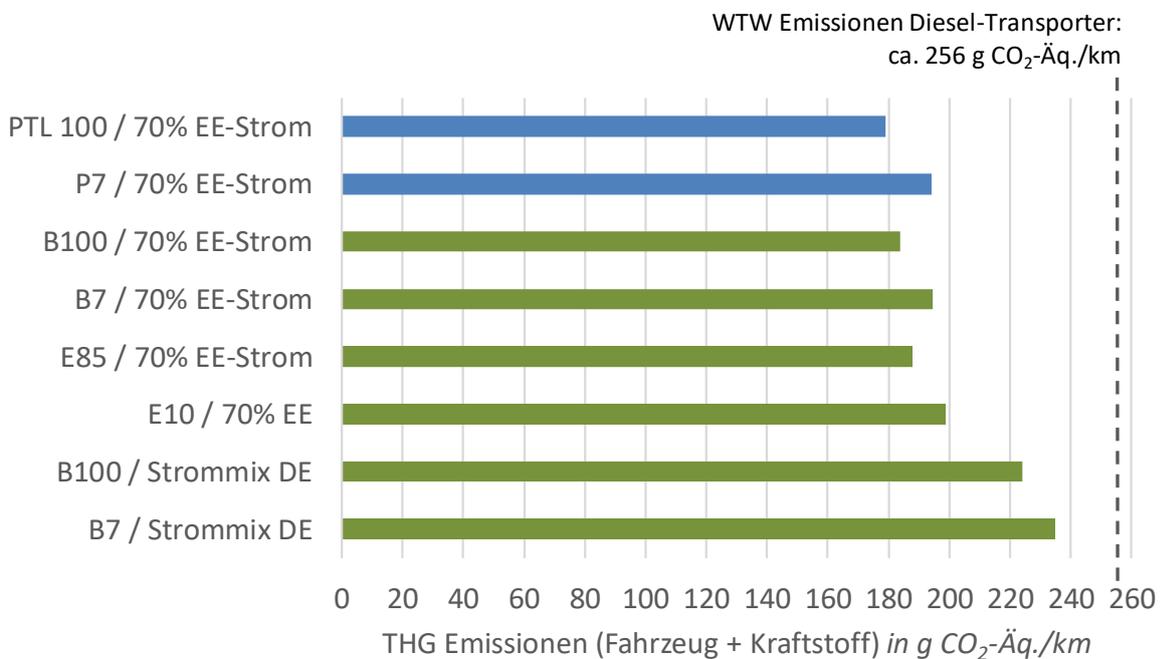


Abbildung 19 WTW-Emissionen Plug-in-Hybrid Transporter in g CO₂-eq pro km für unterschiedliche Energieträgerkombinationen (Annahmen: Plug-in-Hybrid mit REX (70% Strom / 30% Kraftstoff), Verbrauch 21 kWh pro 100 km; THG Fahrzeug bei 41,7 g CO₂-eq pro km, Vorkettenemissionen FAME bzw. Bioethanol für B7, B100 und E85 mit 60% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel, PTL mit 80% THG-Minderung gegenüber fossilem Diesel. ©DBFZ 2018

Ergebnisse

Die Berechnungen zeigen deutlich den Einfluss des hohen Emissionsfaktors des deutschen Strommixes auf die Gesamtemissionen. Im Ergebnis zeigen beide Szenarien, in denen der Strom für den batterieelektrischen Betrieb aus dem deutschen Strommix kommt die höchsten Gesamtemissionen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Klimaschutzbeiträge von Elektromobilitätskonzepten primär von den Vorkettenemissionen des eingesetzten elektrischen Stroms bzw. der eingesetzten Energieträger abhängen.

2.1.4. Fahrprofile

In der Bewertung der funktionalen Eignung und der zu erwartenden Fahreigenschaften von Fahrzeugen spielt das typische Fahrprofil der konkreten Nutzung eine übergeordnete Rolle. So können komplett identische Fahrzeuge einen unterschiedlichen Energiebedarf aufweisen, da sie unterschiedliche Nutzungsprofile abdecken müssen, wie es beispielsweise beim Einsatz im reinen urbanen Zubringerverkehr mit ausschließlichem Anteil an städtischen Fahrten und im Gegensatz dazu im regionalen Zubringerverkehr mit hohem Anteil an Autobahn- und Überlandfahrten der Fall ist. Weitere Einflussfaktoren auf den fahrzeugspezifischen Energiebedarf sind beispielsweise die topographischen und klimatischen Gegebenheiten am Einsatzort, die Fahrzeugzuladung oder die zu gewährleistende Fahrdynamik. Detaillierter wird auf derlei Fragen an späterer Stelle des Berichts nochmals eingegangen.

Aufzeichnung typischer Fahrprofile im leichten Wirtschaftsverkehr

Im Zeitraum Januar 2017 bis März 2017 wurde der Fahrbetrieb von vier Fahrzeugen im relevanten leichten Wirtschaftsverkehr im Raum Leipzig aufgezeichnet. Dabei wurden orts- und zeitspezifische Daten gespeichert und bei einem Fahrzeug zusätzlich ein Fahrtenbuch mit dem täglichen Kraftstoffverbrauch geführt. Bei den Fahrzeugen handelt es sich um jeweils ein Fahrzeug des Typs Renault Kangoo, Renault Trafic, Mercedes (Typ 124 Kombi) und Volkswagen Caddy-Maxi. Zusätzlich wurden die Daten (orts- und zeitspezifische Daten, Stromverbrauch) von zwei rein elektrisch betriebenen leichten Nutzfahrzeugen durch die Stadtwerke Leipzig zur Verfügung gestellt. Die Fahrzeugdaten sowie die zum Fahrzeug gehörigen Fahrleistungen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Ergebnisse

Tabelle 9 Datenerfassung Fahrzeug

	Einheit	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3	Fahrzeug 4	Fahrzeug 5	Fahrzeug 6
Fahrzeughersteller		Volkswagen	Mercedes	Renault	Renault	Nissan	Renault
Fahrzeugtyp		Caddy-Maxi	124 Kombi	Kangoo	Trafic	e-NV 200	e-Kangoo
Antrieb		VKM	VKM	VKM	VKM	Elektro	Elektro
Baujahr		2011	-	-	-	-	-
Leergewicht	kg	1.591	-	-	-	-	-
Zulässige Gesamtgewicht	kg	2.345	-	-	-	-	-
Anzahl Fahrten		41	33	26	17	354	17
Gesamtstrecke	km	1.977,3	474,8	2.914,0	1.481,7	7.948,1	203,6
Maximale Strecke	km d ⁻¹	85,6	42,3	443,7	203,4	95,3	32,6
Durchschnittliche Strecke	km d ⁻¹	48,2 ± 20,3	14,4 ± 11,6	112,1 ± 106,8	87,2 ± 62,6	22,45 ± 16,8	12,0 ± 8,6
Durchschnittliche Geschwindigkeit	km h ⁻¹	46,6	28,0	56,2	59,2	40,4	28,1
Maximale Geschwindigkeit	km h ⁻¹	146	143	155	175	128	83
Durchschnittlicher Verbrauch	l pro 100 km	6,9	-	-	-	-	-

Ergebnisse

Mit den sechs Fahrzeugen wurde in 488 Fahrten (bzw. Tagen) in Summe 15.000 km zurückgelegt. Durchschnittlich entspricht das einer zurückgelegten Strecke von 30,7 km pro Fahrt bzw. Tag bei einer mittleren Geschwindigkeit von 44 km h⁻¹. Die maximale aufgezeichnete Fahrstrecke betrug 443 km und die maximale Geschwindigkeit 175 km h⁻¹. Die linke Grafik der Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Fahrten in Abhängigkeit der zurückgelegten Fahrtstrecke. Es wird dabei erkenntlich, dass bei knapp 90% aller Fahrten eine Strecke von weniger als 50 km pro Tag zurückgelegt wird. Die rechte Grafik der Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit über die Fahrdauer. Über 90% der Fahrzeit beträgt die Fahrgeschwindigkeit unter 100 km h⁻¹.

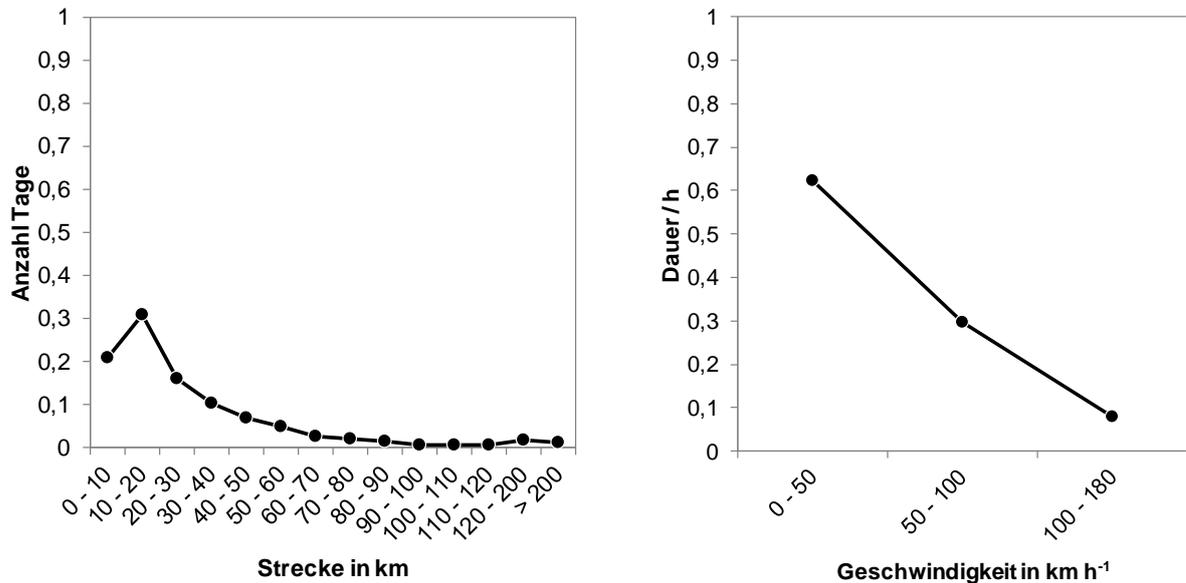


Abbildung 20 Auswertung Fahrprofile (links: Anzahl der Tage in Abhängigkeit der zurückgelegten täglichen Fahrtstrecke; rechts: Fahrzeiten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit). ©DBFZ 2018

Grundlagen Fahrdynamik

Ausgehend von der allgemeinen Gesamtfahrwiderstandsgleichung für ein Straßenfahrzeug mit

$$P_W = F_W \cdot v \quad (1)$$

bestimmt sich die benötigte Leistung P_W als Produkt aus dem Gesamtfahrwiderstand F_W und der in Fahrtrichtung vektoriellen Fahrgeschwindigkeit v . Der Energieverbrauch von Hilfs- und Nebenaggregaten (z. B. Klimatisierung mit Heizung und Kühlung, Stellmotoren, Radio u.a.m.) ist in der Gleichung noch nicht enthalten.

Der zu überwindende Fahrwiderstand F_W setzt sich aus den Anteilen des Radwiderstandes F_R , des Steigungswiderstandes F_S , des Beschleunigungswiderstandes F_B und des Luftwiderstandes F_L zusammen.

$$F_W = \underbrace{f_R \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha}_{F_R} + \underbrace{m \cdot g \cdot \sin \alpha}_{F_S} + \underbrace{m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot a}_{F_B} + \underbrace{c_W \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2}_{F_L} \quad (2)$$

Aus der nachfolgend tabellarisch dargestellten Beispielrechnung (Tabelle 10), die exemplarisch anhand der Daten des Kleintransporters VW Caddy durchgeführt wurde, ergeben sich unter Annahme unterschiedlicher Fahrsituationen Rückschlüsse auf die benötigte reine Antriebsleistung bei Variation der Fahrdynamik, die hier aus realen RDE-Stadtfahrzyklen als „soft“ und „dynamisch“

Ergebnisse

im Sinne des subjektiven Fahrverhaltens abgeleitet werden, der Fahrzeugzuladung und der Steigung der Fahrstrecke.

Tabelle 10 Antriebsleistung eines VW Caddy bei Variation der Fahrdynamik, Steigung und Zuladung

Fahrsituation km h ⁻¹	Dynamik -	Steigung %	Zuladung kg	Zu berechnende Größen			
				P _{mean} kW	P _{max} kW	W kWs	Dauer s
Konstantfahrt	50	-	0	3,3	3,3	3,3	1
	50	-	5	13,7	13,7	13,7	1
	50	-	10	24,1	24,1	24,1	1
	50	-	0	4,1	4,1	4,1	1
	50	-	5	19,6	19,6	19,6	1
	50	-	10	35,0	35,0	35	1
Beschleunigung	0 - 50	soft	0	7,2	15,2	186	25
	0 - 50	soft	5	13,9	23,2	360	25
	0 - 50	soft	10	20,5	32,7	533	25
	0 - 50	soft	0	10,3	22,2	269	25
	0 - 50	soft	5	20,3	33,9	527	25
	0 - 50	soft	10	30,1	47,9	784	25
Beschleunigung	0 - 50	dynamisch	0	18,5	29,8	167	8
	0 - 50	dynamisch	5	25,6	36,8	230	8
	0 - 50	dynamisch	10	32,6	46,3	293	8
	0 - 50	dynamisch	0	27,2	44,1	245	8
	0 - 50	dynamisch	5	37,7	54,1	339	8
	0 - 50	dynamisch	10	48,1	68,2	433	8

Unter Kombination einzelner Einflussfaktoren lassen sich nachfolgende Diagramme (Abbildung 21 und Abbildung 22) für Fahrsituation „Konstantfahrt“ und für die Fahrsituation „Fahrzeugbeschleunigung“ zur Veranschaulichung auftragen.

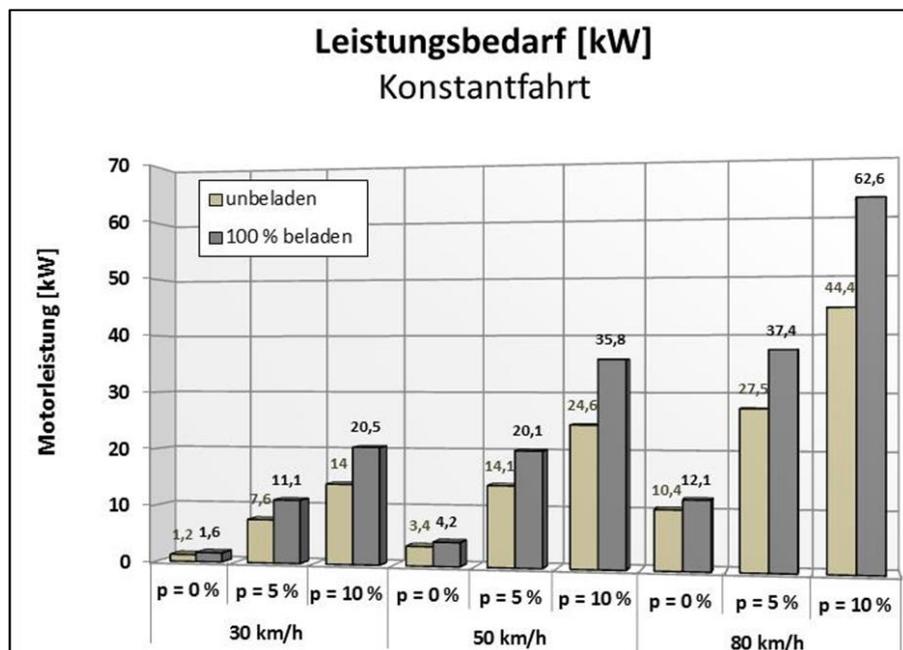


Abbildung 21 Notwendige Antriebsleistung bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Steigung p. © Argomotive

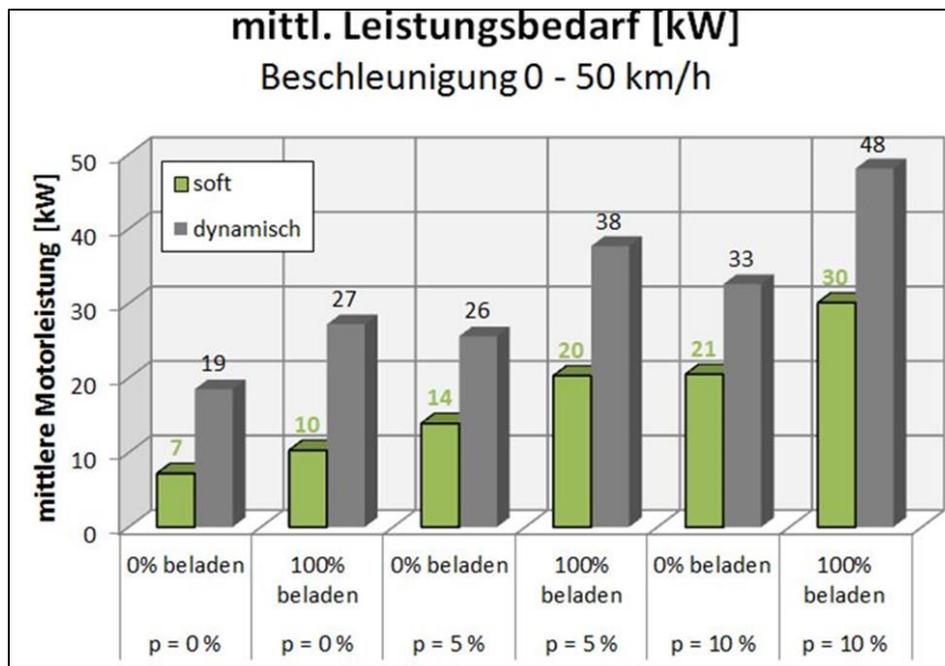


Abbildung 22 Notwendige mittlere Antriebsleistung bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km h⁻¹ in Abhängigkeit der Zuladung (100% entsprechen einer Zuladung von 700 kg) und Steigung p. © Argomotive

Um also alle Fahrzustände dieses Beispiels auch mit reinem REX-Betrieb abbilden zu können, müssten bei leerer Fahrzeugbatterie in den Extremwerten für die Beschleunigung reichlich 50 kW und für die Konstantfahrt ca. 65 kW Motorleistung aufgebracht werden. Diese Leistung ist nicht im Sinne der Grundidee eines Range-Extenders.

Die jeweils benötigte Antriebsenergie des Fahrzeuges schwankt von Fall zu Fall sehr stark. Bei der Leistungsbemessung der VKM eines REX, die die maximale Energiemenge für den Fall der Wiederaufladung einer leeren Batterie im Fahrbetrieb bestimmt, ist unter Zugrundelegung der vorhandenen oder auch der neu festzulegenden (geringeren) Batteriekapazität ein Kompromiss zwischen Aufrechterhaltung der vollen Fahreigenschaften im REX-Betrieb und der Dimensionierung der mittels REX mitgeführten Zusatzleistung (Baugröße/Gewicht REX, Kraftstoffbevorratung, Kosten Umrüstung u. a. m.) zu finden.

Aus diversen Studien und Auswertungen von unterschiedlichsten Fahranforderungsprofilen lassen sich Schlussfolgerungen für eine zweckmäßige VKM-Dimensionierung ableiten. Für den normalen urbanen Verteilerstadtverkehr, der z. B. in einem Flottenversuch mit bis zu 95 Elektrofahrzeugen vom Typ Kleintransporter Mercedes Vito E-Cell in Berlin und Stuttgart in [42] betrachtet worden ist, wird eingeschätzt, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km h⁻¹ in den meisten Fällen unproblematisch ist. In der Reichweitenerwartung wird mit 100 bis 120 km eine Art Schwellwert ausgemacht. In der Mehrzahl der Anwendungen wird mit diesen Parametern die Fahreigenschaft als ausreichend eingeschätzt. Weiter wird in dieser Studie im Rahmen des Flottenversuches festgestellt, dass das Fahrzeugeinsatzprofil bei ca. 48% im Stadt- und Nahbereich, bei 34% auf Bundes- und Landstraßen und bei ca. 3% auf Werksgeländen liegt. Nur 15% des Zubringerverkehrs findet auf der Autobahn statt.

Zur Bestätigung der Abschätzung zur VKM-Dimensionierung sind im Projekt auch eigene Untersuchungen angestellt worden, die die Bedingungen im Großraum Leipzig widerspiegeln sollen. Darüber wurde im vorangestellten Abschnitt berichtet.

Zusammenfassung Fahrprofile

Es wurden innerhalb des Projekts verschiedene leichte Nutzfahrzeuge mittels GPS-Logger aufgezeichnet. Die Auswertung der Daten hat ergeben, dass im urbanen und suburbanen Wirtschaftsverkehr die täglich zurückgelegte Wegstrecke sehr gering ist. Hier wurde bei knapp 90% weniger als 50 km pro Tag zurückgelegt. Die Fahrgeschwindigkeit ist größtenteils unter 100 km h⁻¹. Gleichzeitig zeigt die theoretische Betrachtung der Fahrleistung, dass eine vollständige Energiebereitstellung durch einen REX bei Konstantfahrt mit 80 km h⁻¹ oder Beschleunigung von 0 auf 50 km h⁻¹ und maximaler Fahrzeugbeladung nicht erfolgen kann. Hier müssen Einschränkungen in den Fahreigenschaften hingenommen werden.

2.1.5. Range-Extender

Ableitung der Anforderungen an das Range-Extender-System

Das vorhandene und als Demonstrationsobjekt ausgewählte elektrisch betriebene Nutzfahrzeug von car systems Scheil hat eine geschätzte maximale elektrische Reichweite von 80 km im Leipziger Stadtverkehr. Diese Reichweite entspricht in etwa auch den realen Reichweiten der 20 kWh-Variante des StreetScooter [43]. Auf Grundlage dieser Distanz und der Auswertung in Tabelle 9 benötigt das Elektrofahrzeug bei nur 29 Fahrten bzw. Tagen eine Reichweitenverlängerung mittels Range-Extender. Das entspricht einem Anteil von ca. 6% aller Fahrten. Dabei liegt die ausstehende Fahrstrecke zwischen 0,2 und 364 km, wenn davon ausgegangen wird, dass die Batterie zu Fahrbeginn jeweils zu 100% geladen ist.

Dem Elektrofahrzeug steht für die 80 km eine Batteriekapazität von 15 kWh und ein Elektromotor mit einer maximalen elektrischen Leistung von 20 kW zur Verfügung. Wenn für die Fahrzeugbatterie und den Generator des Range-Extenders jeweils einen Wirkungsgrad von 0,9 angesetzt wird, müsste der Verbrennungsmotor des Range-Extender mindestens 25 kW aufbringen, um die maximale Leistung des Fahrzeugelektromotors im Fall leerer Batterien bereitstellen zu können (Tabelle 11).

Tabelle 11 Auslegung Verbrennungskraftmaschine des Range-Extenders

Elektrische Reichweite Elektrofahrzeug	80 km
Kapazität Batterie Elektrofahrzeug	15 kWh
Maximale Leistung Elektromotor	20 kW
Wirkungsgrad Generator	0,9
Wirkungsgrad Batterie	0,9
Leistung Verbrennungsmotor	25 kW

Auswahl des Range-Extender-Systems

Die in Tabelle 12 dargestellten Range-Extender-Systeme sind aktuell nur eingeschränkt verfügbar. Diese Systeme verfügen jeweils über einen benzinbetriebenen Ottomotor als VKM. Entsprechend der Leistungsanforderung von 25 kW ist das System Engiro RE 20-3 u. a. auf Grund des zu geringen Leistungsbereichs für die Anwendung nicht geeignet. Mit der eingesetzten VKM bietet es auch nicht die Möglichkeit einer zielgerichteten Abgasnachbehandlung. Der RE 40 ist mit 40 kW überdimensioniert und als 3-Zylinderaggregat auch vergleichsweise groß und schwer. Er entfällt ebenfalls für die geforderte Anwendung. Mit Verweis auf die beste Verfügbarkeit wurde in der hier betrachteten Projektphase 1 das System von BMW favorisiert. Der Leistungsbereich von maximal 28 kW liegt minimal über den geforderten 25 kW, sodass der Range-Extender ggf. mit Nebenaggregaten belastet werden kann.

Ergebnisse

Tabelle 12 Range-Extender-Systeme mit Ottomotor als Verbrennungskraftmaschine

Hersteller	Bezeichnung	Status	Kosten	Leistung
BMW	i3 RE	Serie	unbekannt	28 kW
KPLSG	unbekannt	Prototyp	ca. 300.000 EUR	30 kW
Engiro	RE 40	Kleinserie	unbekannt	40 kW
Engiro	RE 20-3	unbekannt	unbekannt	20 kW

Es ist anzumerken, dass der i3 Range-Extender nur als Austauschaggregat über BMW beschafft werden kann. Damit sind sowohl ein höherer logistischer Aufwand als auch Installationsbedarf notwendig, da alle Zusatzkomponenten wie Kraftstoffpumpe, Steuergerät usw. ebenfalls beschafft und adaptiert werden müssen. Die dazugehörigen Steuergeräte des BMW i3 REX sind für Anwender nicht frei zugänglich bzw. programmierbar, sodass eine Änderung der Steuerung der Verbrennungskraftmaschine nur sehr aufwendig dargestellt werden kann. Um eine hinterlegte Applikation zu verstehen, anpassen und verwenden zu können, müssten verschiedenste Fahrsituationen des gesamten Fahrzeugs BMW i3 in den Steuergeräten simuliert werden, welches auf Grund der Kodierung der CAN-Signale sich als sehr aufwendig erwiesen hat und auch künftig ein Problem darstellen wird.

Die Verbrennungskraftmaschine ist für den Betrieb von Super-Benzin ausgelegt. Eine Umstellung auf E85-Kraftstoff bedarf weiteren Planungs- und Umrüstaufwandes sowie Anpassungen von Steuerung und Regelung der Kraftstoffzufuhr.

Auslegung des Tankvolumens

Der Verbrennungsmotor des BMW i3 Range-Extenders hat nach eigenen Beobachtungen einen Kraftstoffverbrauch von ca. 6 Liter Super-Benzin (E5 nach DIN EN 228) auf 100 km Fahrstrecke [34]. Wird stattdessen E85 als Kraftstoff verwendet, sollte sich der aus der Literatur bekannte Mehrverbrauch von ca. 30% einstellen, das einem Gesamtverbrauch von 7,8 Litern entspricht.

Auf Grundlage der beiden Verbräuche für Super-Benzin und E85 kann das benötigte Tankvolumen dimensioniert werden. Tabelle 13 stellt drei verschiedene Varianten der Auslegung vor, wobei Bezug auf die hier im Bericht beschriebenen Fahrstrecken genommen wird.

Tabelle 13 Auslegung Tankvolumen

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
	80 km	90%	100%
Fahrstrecke in km	80	190	370
Benzin in l	4,8	11,4	22,2
E85 in l	6,3	14,8	28,9

Mit Variante 1 können mittels Range-Extender zusätzlich zur elektrischen Reichweite weitere 80 km zurückgelegt werden. Diese Eingrenzung entspricht den gesetzlichen Vorgaben für Elektrofahrzeuge in Kalifornien, bei dem die Range-Extender-Reichweite nicht die Batterieelektrische Reichweite überschreiten darf, um noch als Elektrofahrzeug deklariert werden zu können [44]. Bei dieser Reichweite müsste im E85-Betrieb das Tankvolumen dann ca. 6,3 Liter entsprechen. Mit dieser Dimensionierung von 6,3 Liter und vollständig aufgeladener Batterie könnten mit einer Tankfüllung weitere 20 Fahrten und somit 479 Fahrten der 488 Fahrten aus den aufgezeichneten Fahrprofilen mit dem Fahrzeug bzw. Fahrstrecke von 160 km zurückgelegt werden.

Ergebnisse

In Variante 2 können 90% (26 Fahrten) der 29 Fahrten mit einer Tankfüllung abgedeckt werden. Damit könnten auf Grundlage der aufgezeichneten Fahrprofile eine Distanz von 190 km unter Nutzung des Range-Extenders zurückgelegt werden. 190 km entsprechen bei einem E85-Verbrauch von 7,8 Litern einem Tankvolumen von ca. 15 Litern.

In Variante 3 können alle Fahrten mit einer Tankfüllung abgedeckt werden. Dafür müsste ein Tankvolumen von 29 Litern bei E85-Kraftstoff zur Verfügung stehen.

Variante 3 wird auf Grund des hohen Tankvolumens und der nicht vorhandenen Notwendigkeit unbegrenzter Reichweiten als nicht praktikabel betrachtet, sodass letztendlich die Entscheidung zwischen Variante 1 und 2 erfolgt. Unter der Annahme, dass eine Umrüstung nur für den deutschen bzw. europäischen Markt erfolgen soll, kann das Tankvolumen letztendlich auch größer als 6,3 Liter dimensioniert werden.

Beschaffung Range-Extender

In Zusammenarbeit aller Projektpartner wurde das Lastenheft erstellt und entsprechend der neu gewonnenen Erkenntnisse fortgeschrieben. Hier konnten Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten und aktuellen Umsetzungen von Elektrofahrzeug-Konvertierungen sowie dem Praxisbetrieb von Elektrofahrzeugen eingebracht werden. Es wurden Recherchen zu aktuell tatsächlich verfügbaren und zugänglichen Range-Exendern durchgeführt. Unter Beteiligung aller Projektpartner konnte kein geeignetes universelles Produkt ermittelt werden. Deshalb ist schlussendlich die Entscheidung getroffen worden, das REX-System von BMW einzusetzen (siehe Bericht oben). Der REX war nicht als komplexe Baugruppe beschaffbar, sondern musste aus einzelnen Komponenten des BMW-Ersatzteilsortiments, wie Grundmotor, Starter-Generator, diverse Sensorik und Steuergeräte sowie peripheren Bauteilen beschafft und in Eigenregie montiert werden. Dazu waren Recherchen zu den zwingend erforderlichen Teilen und deren Bezugsmöglichkeiten erforderlich.

In konzeptioneller Überlegung sollten speziell die Arbeiten zur Anpassung einer geeigneten AGN an die Besonderheiten des REX-Betriebes am so geschaffenen Aggregat durchgeführt werden. Es wurde dabei Wert gelegt, dass die Bedingungen im laborativen Versuch möglichst nahe denen eines Fahrzeugeinsatzes sein sollten.

Einen Überblick über die wichtigsten, als Investition in das Projekt eingeflossenen Kaufteile schafft nachfolgende Aufstellung:

- Triebwerk in Verbindung mit Torsionszahnwelle für Generatoranbau
- Sauganlage zzgl. Anbauteile wie Ansaugstutzen, T-Map Sensor und Turbulenzleitungen
- Abgaskrümmer mit Abgasdichtungen und Lambdasonden
- Zündanlage mit Zündspulen und Zündkerzen
- Sensorik mit Öldruckschalter und Nockenwellensensor sowie Temperatursensor-Luft und Halter Sensor
- AT-Startergenerator mit diversen Befestigungselementen
- Wärmetauscher
- Lüfter

Da aus der Serienausstattung für das Fahrzeug BMW i3 Rex eine Abgasnachbehandlung mittels 3-Wege-Katalysator (TWC) vorgesehen ist, wurde auch ein AT-Katalysator nebst Anbauteilen für

Ergebnisse

den motornahen Anbau im Prüfstandsbetrieb gekauft. Er war für die Inbetriebnahme des Versuchsstandes erforderlich und sollte fortan als Referenz für die AGN-Entwicklung dienen.

Vorbereitung Range-Extender als Versuchsstand

Nach Beschaffung der Einzelkomponenten durch Agromotive wurden diese durch car systems Scheil zu einem REX-Aggregat montiert und um weitere, erforderliche Komponenten, wie z. B. Wasserkühler, Lüfter und Sensoren für Thermomanagement und Kraftstoffpumpe mit Druckregelung, zu einem funktionsfähigen Aufbau ergänzt. Dazu wurde ein Rahmengestell für die Geräteaufnahme projektiert und gefertigt. Entsprechende Medienanschlüsse für den Laborbetrieb wurden geschaffen.

Um den REX als Einheit von VKM und Generator später im Prüfstandsbetrieb betreiben zu können, war es zunächst erforderlich, die Datenkommunikation im komplexen System eines BMW i3 Fahrzeugs, das vom DBFZ bereitgestellt werden konnte, in verschiedenen Betriebszuständen im Realbetrieb zu loggen und umfassend auszuwerten. Es wurde die Datenstruktur teilweise ermittelt und entschlüsselt sowie einzelne CAN-Bussignale identifiziert und selektiert. Mit diesen Informationen war dann ansatzweise eine Restbussimulation möglich. Die aufgenommenen Daten wurden analysiert und ausgewertet, sowie die Möglichkeiten von Datenanpassungen ermittelt. Um aktuelle Daten zu erhalten, war es erforderlich an dem Musterfahrzeug Steuergeräte-Programmupdates durchzuführen.

Um die Funktionsfähigkeit der gekauften originalen BMW-Steuergeräte für Motorsteuerung und Hochvoltsteuerung herzustellen, wurden diese programmiert. Weiterhin wurde ein individuell programmierbares Zusatzsteuergerät zur Ansteuerung der Peripherie, Realisierung der Restbussimulation und zur Funktionalität als Gateway, sowie als Schnittstelle zum Steuerrechner (und später zum Fahrzeug) konzipiert, programmiert und eingebunden.

Aus den aufbereiteten Datensätzen wurde ein Ansteuerprofil für den Prüfstandbetrieb erstellt und programmiert, welche eine Ansteuerung über den Leitreechner und eine Abfrage verschiedener Daten bzw. Istwerte ermöglicht. Diese Datensätze bilden die Basis zur Kommunikation mit dem Fahrzeug bei Fahrzeugintegration, wobei hier bei potenzieller Projektfortführung basierend auf dem erreichten Arbeitsstand noch individuelle Anpassungen, je nach später betrachtetem Fahrzeugtyp, erforderlich werden. Es hat sich herausgestellt, dass auf Grund der sehr komplexen Datenstruktur im BMW i3 REX und bei erlebter mangelnder Kooperation seitens BMW eine komplette Restbussimulation nur mittels sehr aufwendiger Reengineeringleistung zur Entschlüsselung der Datenstrukturen gewährleistet werden kann. Diese wäre jedoch erforderlich, um den REX mit den vorhandenen BMW-Steuergeräten gänzlich individuell im gesamten Range von Drehzahl und Leistung ansteuern zu können. Hier ist künftig zu entscheiden, ob es praktikabler und auch wirtschaftlicher ist, den Motor mit einer separat erstellten Motronic-Steuerung neu zu konfigurieren. Diese Abwägung sollte jedoch Inhalt einer folgenden Projektphase sein, wofür ggf. auch ein weiterer kompetenter Projektpartner hinzugezogen werden muss.

Abbildung 23 bis Abbildung 25 zeigen exemplarisch das realisierte Prüfstandsmanagement des REX-Versuchsstands mit dem BMW i3 Range-Extender.

Ergebnisse

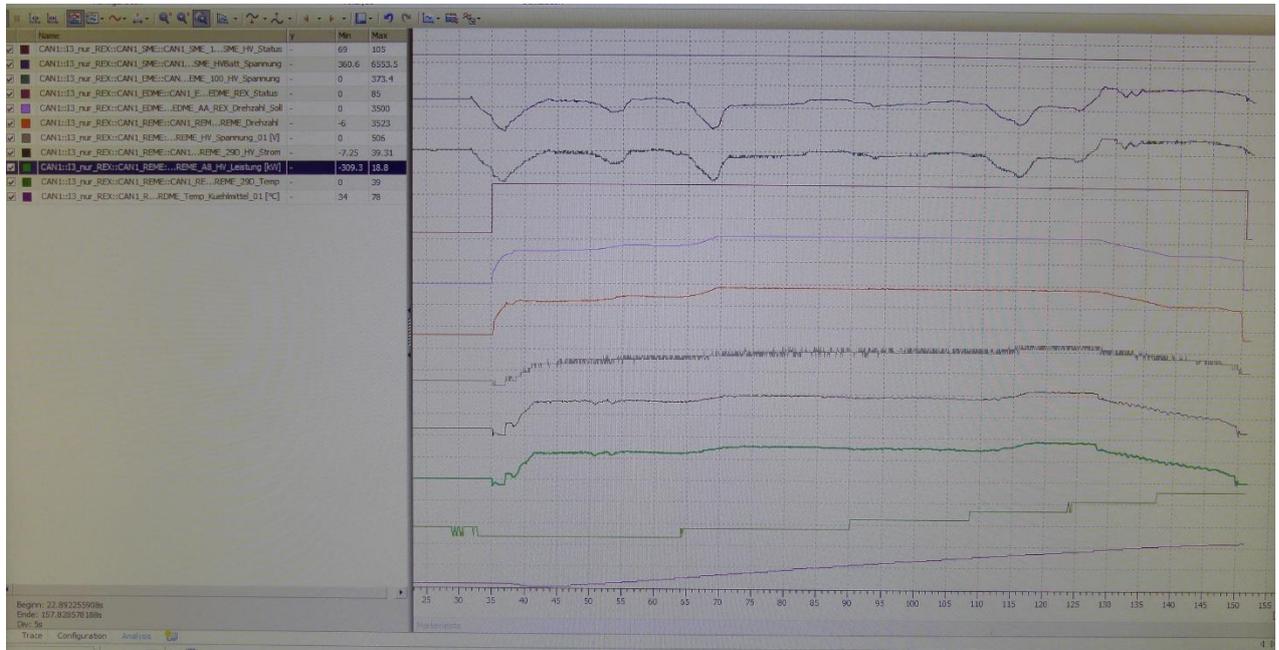


Abbildung 23 CAN-Signale im Prüfstandsbetrieb (von oben beginnend: HV-Status, HV-Batteriespannung, HV-Spannung, REX-Status, Soll-Drehzahl REX, Ist-Drehzahl REX, HV-Spannung REX, HV-Leistung REX, Temperatur REX, Temperatur Kühlmittel). © car systems Scheil

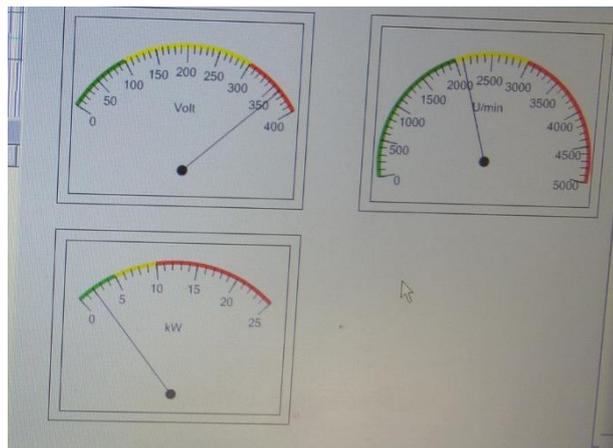


Abbildung 24 Anzeige von REX-Spannung, REX-Drehzahl und REX-Leistung im Prüfstandsbetrieb. © car systems Scheil

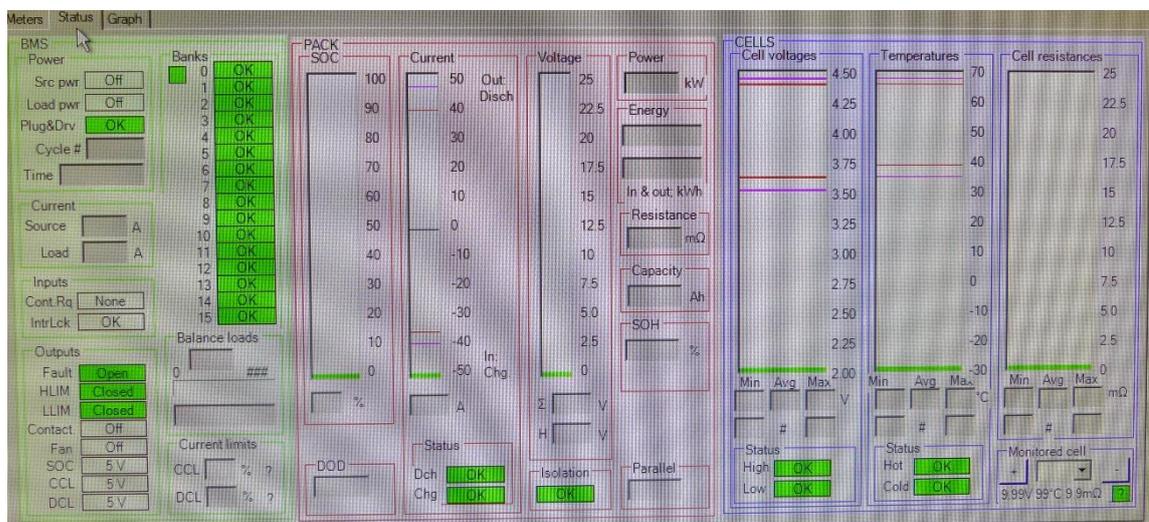


Abbildung 25 Statusanzeige Batteriemanagementsystem. © car systems Scheil

Ergebnisse

Mit dem aktuellen Stand kann die VKM des REX nicht im gesamten Range von Drehzahl und Leistung betrieben werden, was für eine spätere Optimierung und Anpassung an alternativen Kraftstoffen förderlich wäre. Die Steuerung der Verbrennung funktioniert im erreichten Arbeitsstand noch nicht zielführend bzw. nur fehlerbehaftet. Exemplarisch dafür ist in Abbildung 26 der rotglühende Abgaskrümmer bei der Inbetriebnahme des REX auf Grund einer noch mangelhaften Lambda-Regelung der Kraftstoffzufuhr abgebildet.



Abbildung 26 Rotglühender Abgaskrümmer des BMW i3 REX bei der Inbetriebnahme auf Grund reduzierter Motorsteuerung. © car systems Scheil

Die perspektivisch angestrebte Einkopplung des Range-Extender-Systems in verschiedene Fahrzeugtypen setzt voraus, dass das System bzgl. der Spannungslage und der Leistungsregelung auf die Gegebenheiten des jeweiligen Fahrzeugtyps eingestellt werden kann. Daher wurde im Rahmen des Projekts das Hochvoltsystem (HV-System) des verfügbaren Fahrzeuges BMW i3 REX analysiert und die Möglichkeit zur Anpassung an unterschiedliche Spannungsebenen zur Fahrzeugintegration in ein Fahrzeug im Sinne der Projektzielstellung ansatzweise untersucht.

Für eine eventuell erforderliche Anpassung der Spannungslage ist eine zusätzliche Leistungsregelung erforderlich. Um dies perspektivisch zu realisieren, wurden erste Recherchen zu Möglichkeiten der HV-Spannungsanpassung und Stromregelung bereits durchgeführt. Demnach sind je nach Spannungsdifferenz einstufige oder zweistufige (über Zwischenspannung) Konzepte geeignet. Eine größere Auswahl an Leistungs- und Regelungskomponenten bietet die Firma Vicor an. Der modulare Ansatz und die Angebotsbreite (Spannungsebenen, isolierende und nicht isolierende Wandlermodule sowie Abwärts- als auch Aufwärtswandler) könnten möglich machen, eine Eigenentwicklung für die spezifischen Anforderungen einer Leistungsregelung im Fahrzeug zu entwickeln.

Mit Hilfe von Versuchsaufbauten konnten bereits Erfahrungen bis zu einer Leistung von 1,5 kW und dem Einsatz von Vicor-Komponenten gesammelt werden. So wurden bereits prototypisch Leistungsstufe und Steuerung inkl. Fahrzeugkopplung für einen Energietransfer von 48 VDC zu 320 VDC mit Zwischenspannung in Funktions- und Systemtests durch den Projektpartner car system Scheil erprobt. Die hier gemachten Erfahrungen bei der Komponentenauswahl, der

Ergebnisse

Ansteuerung und der thermischen Regelung können sehr flexibel auf reine Hochvoltssysteme übertragen werden. Nachfolgend sind die Voruntersuchungen kurz dargestellt.

Nach Inbetriebnahme des REX-Systems bei car systems Scheil ist das Aggregat bei Argomotive um das Hochvoltbatteriesystem, eine elektronische Belastungseinrichtung sowie eine Abgasmesstechnikbindung ergänzt und in eine neu geschaffenen Prüfstandsumgebung eingebunden worden.

Abbildung 27 zeigt das Schema des Gesamtsystems, wie es schlussendlich als Versuchstand bei Argomotive umgesetzt worden ist.

Range-Extender

Testumgebung Motorenprüfstand
&
Messstellenplan Abgasmachbehandlung
Original TWC – BMW i3

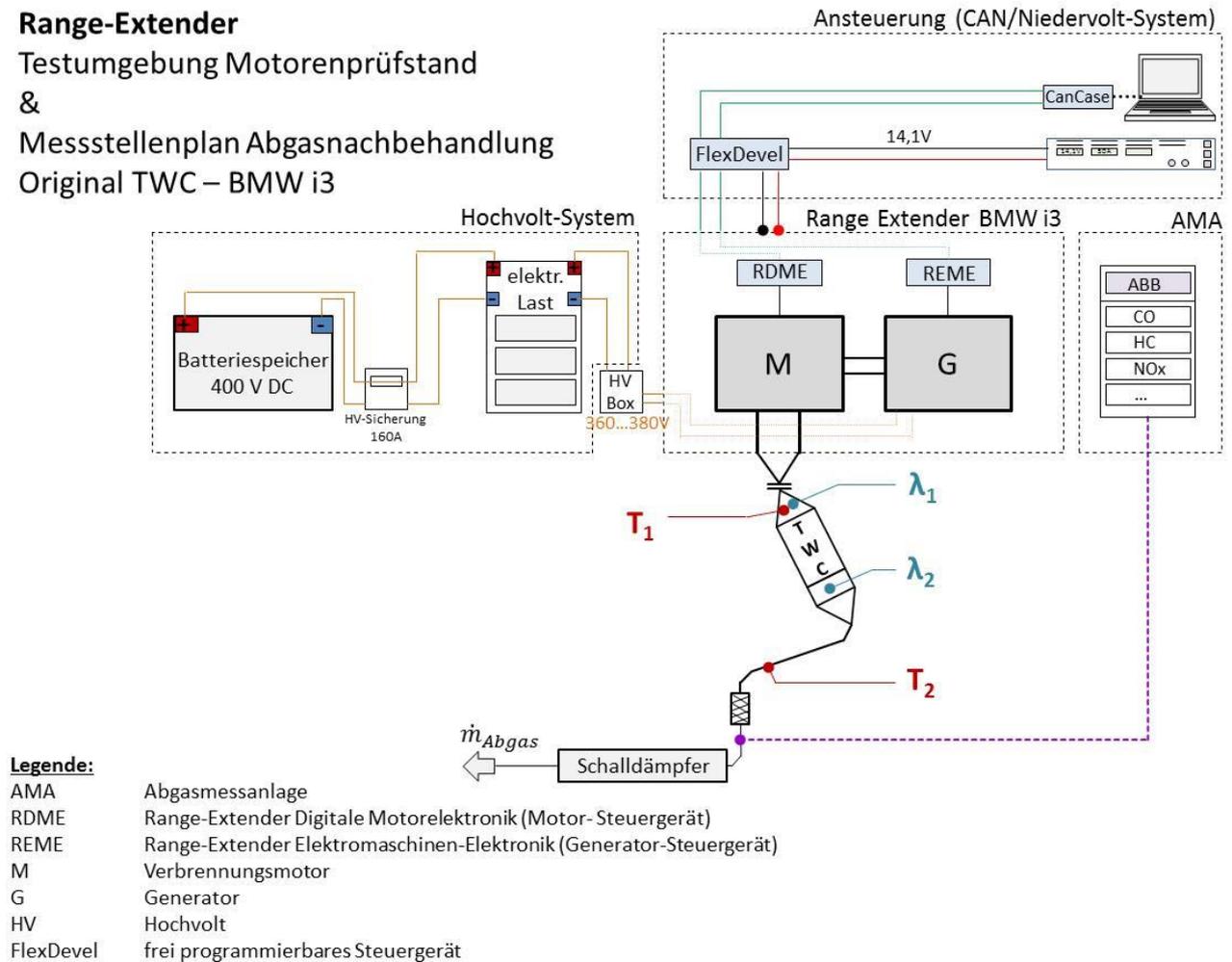


Abbildung 27 Schema Versuchsaufbau am Teststand Argomotive. © Argomotive

Mit dieser Lösung war die Simulation der Zustände zum Be- und Entladen des Batteriespeichers mittels des von der VKM angetriebenen Generators möglich. Die Verhältnisse im Fahrzeug sind mit dem realisierten Aufbau somit weitestgehend nachgebildet.

Zusammenfassung Range-Extender

Es ist in Projektphase 1 gelungen, unter Verwendung des REX des Fahrzeuges BMW i3 REX einen Versuchsaufbau für den Prüfstandsbetrieb zum Zwecke der Erprobung von AGN-Strategien zu realisieren. Durch „Nachfahren“ von im Fahrzeugeinsatz mitgeloggten Fahrzuständen konnten einige wenige ausgewählte Lastzustände hinsichtlich Funktionalität der Emissionsminderung reproduziert und in Bezug auf das Emissionsverhalten der VKM getestet werden. Ein kennfeldweiter

Ergebnisse

Betrieb mit der Möglichkeit der Änderung von Einspritzstrategien war unter den gegebenen Umständen allerdings noch nicht möglich.

Insgesamt ist der erreichte Stand zur Überführung eines existierenden REX-Systems in eine angepasste Lösung für den Einsatz in einen Kleintransporter o. ä. noch als unbefriedigend zu bezeichnen.

Es musste erkannt werden, dass es nicht trivial ist, eine am Markt existierende REX-Lösung für andere Einsatzzwecke problemlos zu adaptieren. Bedingt dadurch, dass innerhalb der Projektphase 1 kein dahingehendes Interesse und Unterstützung beim REX-Hersteller BMW gefunden werden konnte, gestaltete sich die Veränderung an vorhandenen Strukturen des REX-Managements als nicht realisierbar. Es wird heute eingeschätzt, dass dies nicht nur auf den betrachteten Lösungsansatz der Verwendung des REX des BMW i3 sondern auch auf andere potenzielle Strategien zutreffen wird.

Mit dem für die Projektphase 2 geplanten Einsatz eines biogenen Kraftstoffes bedarf es in aller Voraussicht auch zumindest der Anpassung der Einspritzstrategie, also der Anpassung der Einspritzmengen, Einspritzzeiten und Zündzeitpunkte. Es ist hierfür ein weitestgehend freier Zugriff auf die ECU-Applikation und eine damit in Zusammenhang stehende Fachkompetenz von Nöten.

Das vorhandene REX-Aggregat könnte bei Bedarf in eine potenzielle 2. Projektphase überführt werden.

2.1.6. Abgasnachbehandlung

Vorbetrachtung zur AGN-Auslegung

Die Entscheidung zur Wahl und Konzeption einer AGN-Lösung für ein REX-Aggregat, wie es in Phase 2 des Projektes vorzusehen ist, hängt in der hier zu behandelnden Problematik der Nachrüstung eines REX in ein Elektrofahrzeug maßgeblich davon ab, welcher Emissionsstandard die zu betrachtende Verbrennungskraftmaschine (VKM) des final einzusetzenden REX (Phase 2 des Projektes) erfüllen muss.

Aus der Projektzielstellung geht hervor, dass die Erfüllung der Euro-6-Emissionsstufe vorgegeben wird. Dies scheint für eine Nachrüstlösung schlüssig, da sie auf einen hauptsächlichen Fahrzeugeinsatz im urbanen Verkehr abzielt. Es war deshalb primär davon auszugehen, dass in jedem Fall, d. h. sowohl für Verbrennungskraftmaschinen (VKM) mit Selbst- als auch mit Fremdzündung, auf Motoren mit intelligentem, elektronischen Motormanagement zurückgegriffen werden muss. Die Darstellung der angestrebten Emissionsstufe Euro-6, die eine Nachrüstlösung mit der Eignung zur Straßenzulassung eines Fahrzeuges der Klasse leichte Nutzfahrzeuge beinhaltet, stellt somit sowohl die anspruchsvollsten Anforderungen an das Emissionsverhalten des Motors selbst, als auch an das AGN-Konzept. Auch wenn es sich in der Zielstellung um ein Nachrüstungskonzept für ein Fahrzeug mit seriellem Elektroantrieb handelt, muss man die VKM und die AGN als eine Einheit sehen, d. h. VKM und AGN müssen aufeinander abgestimmt sein.

Auf der Suche nach geeigneten Motoren, die in etwa das Leistungsspektrum und das zu erwartende Emissionsverhalten einer VKM für einen REX widerspiegeln können, wurde in einer umfangreichen Recherche folgendes offenbar:

Die Auswahl an geeigneten VKM lässt sich nur aus dem Anwendungsbereich Personenkraftwagen (Pkw) und mit Einschränkungen aus dem Motorradbereich ableiten.

Einfachere und kostengünstigere Kleinmotoren aus dem Bereich stationäre Anlagen kommen aufgrund der Motorabstimmungen, die nach anderen Emissionsstandards konzipiert sind, nicht in

Ergebnisse

Frage. Im Fall von Fremdzündungsmotoren verfügen diese üblich über keine Lambda-Regel zur Kraftstoffeinspritzung. Diese ist aber Voraussetzung für den zielführenden Einsatz eines 3-Wege-Katalysators. In der Kategorie der Dieselmotoren ist das Emissionsniveau dieser Motorenklasse vergleichsweise hoch. Bisher am Markt verfügbare Aggregate erfüllen die vorgegebenen Emissionsgrenzwerte, die bei kleinen Motoren noch deutlich höher liegen als bei größeren Aggregaten oder gar bei Straßenfahrzeugen wie PKW oder Kleintransporter, meist noch allein durch innermotorische und konstruktive Maßnahmen. AGN in Form von Dieseloxydationskatalysatoren (DOC) oder auch von Dieselpartikelfiltern (DPF) sind derzeit kaum in serienmäßiger Anwendung. DeNOx-Systeme gibt es für diese Motorenklasse noch keine. Die Abgasnachbehandlung zum Erreichen des Euro-6-Standards müsste aber aus einem Partikelfiltersystem inklusive einer geeigneten Regenerationsstrategie und aus einer zusätzlichen DeNOx-Maßnahme bestehen. Dies führt zu unverhältnismäßig hohen Systemkosten für die AGN und steht im direkten Widerspruch zu der Forderung geringer Umrüstkosten für ein Elektrofahrzeug mit REX-Erweiterung.

In Konsequenz aller Überlegungen ist trotz der Erkenntnis, dass es zu einer absehbaren Eingrenzung in der Auswahl von potenziellen biogenen Kraftstoffen kommt, in dieser Frage entschieden worden, sämtliche Anstrengungen der AGN-Gestaltung auf Abgase von Kraftstoffen von Benzinmotoren zu konzentrieren. Dies war eine operative Änderung zur ursprünglich im Projektantrag favorisierten Kraftstoffoption, die noch von einer Dieselsubstitution ausgegangen war.

Grundlagen zur TWC-Technik

Die Aufgabe zur AGN-Auslegung an einem Ottomotor fokussiert sich auf die Adaption eines geregelten 3-Wege-Katalysators (Three-Ways-Catalyst mit Abkürzung TWC).

Die Funktion eines 3-Wege-Katalysators wird hier weitestgehend als bekannt vorausgesetzt. Das grundlegende Emissionsverhalten eines Ottomotors stellt sich nach Abbildung 28 dar.

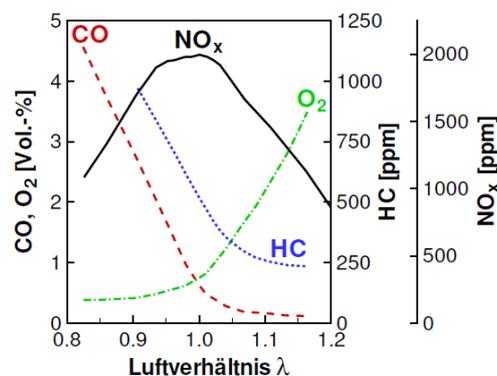


Abbildung 28 Schadstoffemission beim Ottomotor [45].

Durch Regelung der Kraftstoffzufuhr in einem engen Fenster um das stöchiometrische Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda \sim 1$ herum, wie es beim TWC praktiziert wird, gelingt es bei geeigneter Katalysatorauslegung das Emissionsniveau am Auspuffaustritt auf ein Minimum an den Schadstoffkomponenten CO, THC und NO_x abzusenken. In Abbildung 29 ist der Umsatz der Schadstoffe in einem optimal geregeltem 3-Wege-Katalysator (TWC) dargestellt, d. h. im markierten Bereich um $\lambda=1$ werden im betriebswarmen Zustand alle drei Schadstoffkomponenten mit einem Wirkungsgrad $> 90\%$ reduziert.

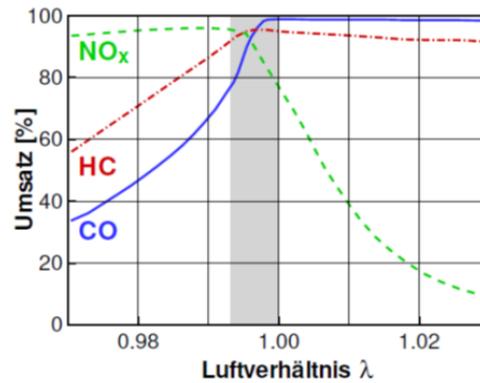


Abbildung 29 Abhängigkeit des Umsatzes der Schadstoffemissionen vom Luftverhältnis bei einem 3-Wege-Katalysator an Ottomotoren [46].

Die sich am Markt etablierte Katalysorteknik des TWC unterliegt einer ständigen Weiterentwicklung. Sowohl die Modifikation der Katalysatorbeschichtung, die konstruktive strömungstechnischen Auslegung der Katalysatoroberflächen mit Turbulenzerhöhung als auch die Anordnung der Katalysatoren im Abgasstrang selbst unterliegen der ständigen Optimierung. Die eigentliche Herausforderung ist heute, dass das Ansprechverhalten des Katalysators, das auch als Light off bezeichnet wird, durch Beschichtungsvariationen in immer niedrigere Temperaturbereiche zu verschieben und bzw. oder die Temperaturen im Katalysator immer schneller in das benötigte Niveau zu heben. Bekanntermaßen wird ein Großteil der noch auftretenden Schadstoffemissionen speziell im Kaltstart freigesetzt. Dem wird durch Fortschreibung der Testverfahren bei der Typzulassung von Fahrzeugen immer verschärfender Rechnung getragen. Die in diesem Projekt angestrebte Emissionsklasse Euro-6d-Temp, die ab 1. September 2019 Gültigkeit für Neuzulassungen von Fahrzeugen haben wird, stellt die derzeit höchsten und komplexesten Anforderungen.

Aufgabenpräzisierung nach Wahl der VKM

Die Aufgabe zur AGN-Systemauslegung reduziert sich mit der Entscheidung zur Kraftstoffwahl von Ottomotorkraftstoffen auf das Design und die Auslegung sowie die Eignungsprüfung und Verifizierung eines 3-Wegekatalysatorsystems. Es war bei der Auswahl einer geeignet erscheinenden VKM darauf zu achten, dass diese kein Direkteinspritzer ist, da sonst auch die Fragestellung nach Einsatz eines Gasoline-Partikelfilters (GPF) zu berücksichtigen gewesen wäre. Diese Technik ist zwar mittlerweile am Markt verfügbar, verkompliziert und verteuert aber die AGN für den Benzinler ähnlich der des Diesels.

Da der final auszuwählende REX mit der dazugehörigen VKM erst in Projektphase 2 zur Verfügung stehen sollte, mussten die Betrachtungen zur AGN an dieser Stelle exemplarisch durchgeführt werden. Dies geschah schlussendlich mit Hilfe eines Versuchsaufbaus, mit dem die Verhältnisse eines REX im Fahrzeugeinsatz weitestgehend abgebildet werden konnten.

Auch die praktische Betrachtung von Auswirkungen auf die AGN-Komponenten, die der Kraftstofftausch von Benzinern nach gültigem Standard auf den nunmehr favorisierten Kraftstoff E85 mit sich bringt, war in Phase 1 des Projektes noch nicht vorgesehen. Damit konnten die Wechselwirkung von Kraftstoff und Abgas und auch die Verträglichkeit und Funktionalität mit den AGN-Komponenten nur theoretisch anhand einer Literaturstudie, die vom Projektpartner Argomotive zusätzlich zu den Kraftstoffuntersuchungen des Projektpartners DBFZ angestrengt worden ist, abgeschätzt werden. Demnach lassen sich aus dem bisherigen Einsatz von E85, der schon seit vielen Jahren speziell in verschiedenen Ländern Europas und Südamerikas im Einsatz ist, nur

Ergebnisse

geringfügige Einflussnahmen auf die Katalysatorfunktion und -lebensdauer ableiten. Es wurden in der Recherche zumindest keine markanten negativen Einflüsse ausgemacht, die prinzipiell auf Schwierigkeiten beim Einsatz von TWC bei biogenen Ersatzkraftstoffen hinweisen. Auf ein Beispiel aus der Literaturrecherche soll trotzdem kurz eingegangen werden.

So untersuchte Winkler et. al. [47] z. B. den Einfluss verschiedener Kraftstoffe auf das Alterungsverhalten von Drei-Wege-Katalysatoren an sechs Fahrzeugen unter Real-Fahrt-Bedingungen mit baugleichen 3-Wege-Kats (1,36 l, 400 cpsi, Al₂O₃ mit 70 g ft⁻³ Pd und 5g ft⁻³ Rh). Die Testfahrzeuge 1 - 3 (Euro-4, Nr. 1 - Benzin, Nr. 2 - E5 und Nr. 3 - E85) hatten etwa die gleiche Ausgangskilometerleistung und absolvierten innerhalb der Untersuchungen 40.000 Testkilometer. Die Fahrzeuge 4 - 6 wurden vergleichsweise mit CNG betrieben. Nach 10.000 km erfolgte für jedes Fahrzeug eine Abgasmessung auf dem Rollenprüfstand. Nach 40.000 km wurden die 3-Wege-Katalysatoren bzw. die daraus gewonnenen Aschen analysiert. Im Ergebnis zeigen sich beim E0-Fahrzeug geringe Beschädigungen am Katalysator und begrenzte Ascheansammlungen am Katalysatoreintritt. Die mit E5 und E85 betriebenen Fahrzeuge offenbarten gravierende Beschädigungen am Washcoat der Katalysatoren. Beim E5-Katalysator war die äußere Washcoat-Schicht gebrochen und kleinere Stückchen hatten sich herausgelöst. Der E85-Katalysator hatte nach dem Testzeitraum deutlich mehr Beschädigungen und Ablösungen am Washcoat, insbesondere im Eintrittsbereich. Gründe für die Beschädigungen werden nicht genannt. Hinsichtlich der Emissionen konnten aber über dem gesamten Testzeitraum im durchgeführten NEFZ-Zyklus keine nennenswerten Verschlechterungen im Emissionsverhalten festgestellt werden. Beobachtet werden konnte allerdings eine beginnende Wirkungsgradverschlechterung der HC-Konversion im Autobahnabschnitt des NEFZ bei den E5 und E85 Fahrzeugen. Die E85-Fahrzeuge emittierten dagegen bei den Emissionstests nur rund die Hälfte an CO gegenüber den E0 und E5 Fahrzeugen.

Resultierend aus der Definition von zwei getrennten Projektphasen stand das Arbeitspaket 4 maßgeblich unter dem hemmenden Einfluss, dass anfänglich nicht klar war, auf welche konkrete VKM zurückgegriffen werden kann. Die Auswahl eines für diese Aufgabenstellung geeigneten REX war in Phase 1 des Projektes nur in vorbereitender Art für die potenzielle Fortführung des Projektes vorgesehen. Damit konnte schlussendlich auch die Arbeit zur Definition und Auslegung einer geeigneten AGN nur eine konstruktive Vorbetrachtung und Potenzialabschätzung für das Nachfolgeprojekt sein.

Unter Zugrundelegung des in Abschnitt 2.1.1 bereits zur Motorwahl Gesagten wurde schlussendlich projektübergreifend entschieden, eine VKM auf Basis eines fremdgezündeten Ottomotors zu betrachten. In Ermangelung von aus dem Projektbudget bezahlbaren Alternativen wurde eine verfügbare VKM, nämlich die des REX einer Pkw-Anwendung, hier die des BMW i3 REX, ausgewählt.

Untersuchungen zur favorisierten Kraftstoffoption E85 waren innerhalb der Projektphase 1 nicht geplant und ohne VKM-Anpassung auch nicht möglich.

Charakterisierung der Einsatzspezifik und der daraus ableitbaren Anforderungen

Nicht nur das Startverhalten, sondern auch die gesamte Betriebsstrategie spielt eine maßgebliche Rolle bei der Katalysatorauslegung. Bei der VKM eines REX können über die Betriebsstrategie verschiedene Ziele verfolgt werden. In [48] wird unterschieden in

- Die Leistung des Verbrennungsmotors ist proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit (Zustand A)
- Die Leistung des Verbrennungsmotors ist proportional zum Entladezustand der Batterie (Zustand B)

Ergebnisse

- Der Betrieb des Verbrennungsmotors erfolgt ausschließlich im Arbeitspunkt mit maximaler Leistung (Zustand C)
- Der Betrieb des Verbrennungsmotors erfolgt nur im Arbeitspunkt mit maximalem Wirkungsgrad (Zustand D)

Bei allen vier Strategien ist das wiederholte Ein- und Ausschalten des Verbrennungsmotors gekoppelt an feste Grenzen des Batterieladezustandes und als weitere Nebenbedingung an eine Fahrzeug-Mindestgeschwindigkeit. Darüber hinaus sind in der Strategie weitere Betriebssituationen berücksichtigt, wie zum Beispiel das Katalysatorheizen oder ein „Notladen“ der Batterie, falls der Ladezustand einen kritischen Wert unterschreitet.

Aus den Betriebsunterlagen des hier eingesetzten Aggregates lässt sich Ähnliches ableiten. In Abhängigkeit von Batterieladezustand und Fahrgeschwindigkeit werden unterschiedliche Kennlinien des Motors abgefahren, die vorzugsweise auf konstanten Drehzahlen arbeiten. In den Lastübergängen kommt es aber auch immer wieder temporär zu dynamischen Drehzahl- und Lastvariationen mit entsprechend verändertem Emissionsverhalten, auf das mittels Lambda-Regelung reagiert werden muss.

Für den hier betrachteten speziellen Anwendungsfall des Verteiler- bzw. Zustellbetriebes von Transportfahrzeugen wäre es vorstellbar, sich auf eine Betriebsstrategie zu einigen, die sich lediglich dem Beherrschen von sogenannten Notsituationen widmet. Dabei wird die VKM nur bei Erreichen eines minimal zulässigen Batterieladezustandes zugeschaltet und in einem konstanten Lastpunkt mit optimalem Wirkungsgrad, ähnlich dem oben genannten Zustand D, betrieben. Die VKM muss dann demnach gerade noch so groß bemessen sein, dass sie zumindest so viel Strom bereitstellt, dass das Fahrzeug noch fahrbar bleibt, ohne ein Verkehrshindernis zu werden. Es spielt dann keine Rolle, wenn die ursprüngliche Leistungsfähigkeit des Antriebes in Sachen Fahrgeschwindigkeit nicht mehr voll zur Verfügung steht.

Der gegenüber einer PKW-Anwendung reduzierte Anspruch an die Leistungsfähigkeit und Dynamik der VKM würde in entsprechender Weise speziell auch die Anforderungen an die Regelung der AGN entschärfen. In quasi stationären Lastzuständen lassen sich die Schadstoffemissionen mit der heutigen Katalysatortechnik sicher beherrschen.

Versuchstechnische Basis für die AGN-Auslegung

Für die Arbeiten zur AGN-Abstimmung reicht herkömmlich eine VKM aus, die dann an einem Motorenprüfstand separat betrieben und mit der die Emissionsminderung nachgewiesen wird. In weiterführender Konsequenz einer ggf. erforderlichen Typzulassung des Fahrzeuges müssten dann allerdings die dazu vorgeschriebenen Testbedingungen (Prüfung auf Abgasrollenprüfstand durch akkreditierte Prüfdienste) eingehalten werden.

Im Fall des ausgewählten REX basiert die VKM auf einem Aggregat für einen Motorroller. Dort handelt es sich allerdings um eine vom REX gänzlich abweichende Applikation (Drehzahl- und Drehmomentband). Der ursprüngliche Ansatz, das Originalaggregat des Motorrollers für die hier benötigte AGN-Abstimmung einzusetzen, musste deshalb verworfen werden. Weiterhin schien es den am Projekt Beteiligten in Hinblick auf eine potenzielle Projektphase 2 zielführend zu sein, bereits in Projektphase 1 ein komplettes REX-Aggregat als Erprobungsträger für die möglichst realitätsnahe Erprobung der realisierten AGN-Entwicklung aufzubauen. Die dazu benötigten Bauteile waren über Bezug aus dem Ersatzteilsortiment als Einzelteile käuflich erwerbbar. Der ursprünglich im Projekt budgetierte Ausbau eines vorhandenen Motorenprüfstandes wurde daher nicht umgesetzt und die freigewordenen Mittel unter Abstimmung mit dem Projektträger für den Aufbau eines REX-Prüfstandes eingesetzt.

Ergebnisse

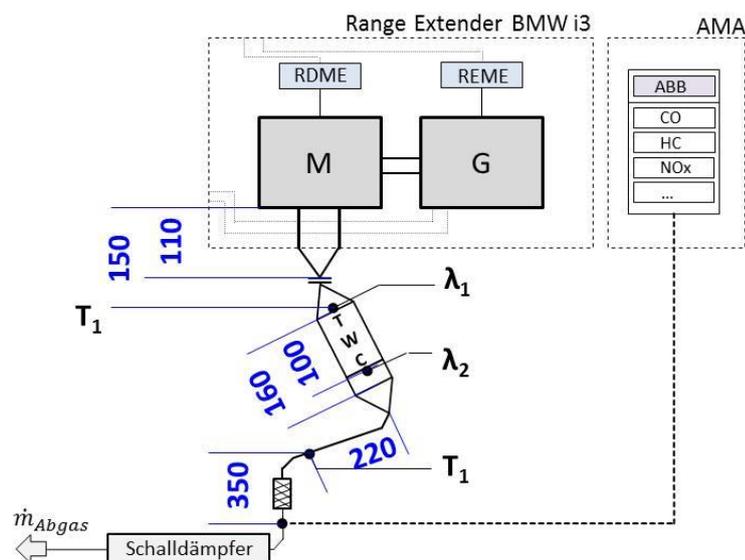
Wie die meiste industrielle Katalysatortechnik ist auch das Wirkverhalten eines TWC sehr temperaturabhängig. Im besonderen Fall ist speziell das Erreichen und Halten einer Mindesttemperatur für das Katalysatorumsatzverhalten entscheidend. Für die Effektivität der Schadstoffminderung ist also neben der dynamischen Regelbarkeit der Kraftstoffzufuhr mittels Lambdasonde, d. h. der Verbrennungsabstimmung, auch die Temperaturführung bis hin zum Katalysator und im Katalysatorinneren ausschlaggebend. Allein die motornahe Anordnung des TWC, die heute bereits Standard ist, reicht für ein sehr schnelles Aufheizen zum Erreichen der Emissionsgrenzwerte, sprich der erforderlichen Emissionsminderung, nicht mehr aus. Die diesbezügliche Besonderheit bei einem Range Extender besteht darin, dass durch den intermittierenden Betrieb der VKM ein wiederholter Startvorgang aus vergleichsweise geringem Temperaturniveau von Nöten sein kann.

In Abbildung 30 sind die originalen Verhältnisse der Einbaulage des Katalysators an der VKM des BMWi3 REX dargestellt. Der Katalysatoreintritt befindet sich nur ca. 110 mm nach Abgaskrümmerausstritt.

Range-Extender

Abmaß – Aufbau 1

Original TWC – BMWi3



Legende:

AMA	Abgasmessanlage
RDME	Range-Extender Digitale Motorelektronik (Motor-Steuergerät)
REME	Range-Extender Elektromaschinen-Elektronik (Generator-Steuergerät)
M	Verbrennungsmotor
G	Generator

Abbildung 30 Anordnung Katalysator am Range Extender im Versuchsaufbau. © Argomotive

Diese Anordnung lässt nur noch eine unwesentliche Verkürzung der Einbaulage durch Konstruktionsveränderungen zu und könnte prinzipiell übernommen werden.

Auf ein abgestimmtes, motorseitiges Thermomanagement konnte im konkreten Fall des betrachteten REX BMW i3 bereits bedingt zurückgegriffen werden. Da es aber keinen ausreichenden Zugriff auf die Motorapplikation gab, konnten in der Projektarbeit bis dahin auch keine Modifikationen zur weiteren Optimierung angewandt und erprobt werden. Die in den hier durchgeführten Untersuchungen verwendete Anfahroutine entstammt einer aus dem Fahrzeug entnommenen und am Prüfstand nachgebildeten realen Situation.

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der tatsächliche umgesetzte Versuchsaufbau der VKM mit integrierter AGN geht aus Abbildung 31 hervor. Er setzt auf den Aufhängungspunkten des Fahrzeugaufbaus auf.



Abbildung 31 Im Projekt realisierter Prüfstands-aufbau des REX-Systems. © Argomotive

Die Einbindung des REX-Aufbaus in eine Prüfstandumgebung mit Belastungseinrichtung und Hochvolt-Batteriespeicher, der sowohl für das Anlassen des Motors als auch für die Energiespeicherung genutzt worden ist, zeigt Abbildung 32.

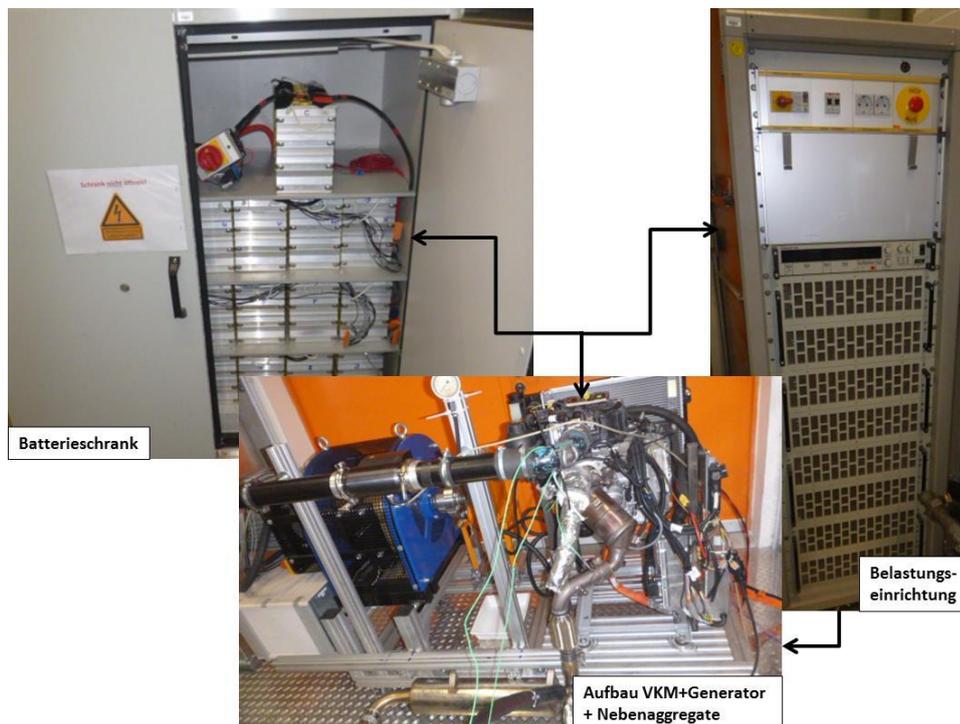


Abbildung 32 Hauptkomponenten des Versuchsstandes. © Argomotive

Die notwendige Verkabelung der Einzelkomponenten ist neu projektiert worden und unter Einhaltung der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen in einer Laborumgebung umgesetzt worden.

Die vom Projektpartner car systems Scheil begonnene Entschlüsselung der Signalverläufe einzelner Fahrzustände, die in einem Fahrzeug BMW i3 REX separat aufgezeichnet worden sind, wurde von

Ergebnisse

Argomotive fortgesetzt. Sie gestaltete sich als sehr aufwendig und konnte nur begrenzt für die Darstellung vereinzelter Lastzustände umgesetzt werden. Es war schlussendlich trotzdem möglich, den Versuchsstand in einzelnen stationären Lastpunkten, sowohl aus dem Kalt- als auch Warmzustand des Motors startend, zu betreiben. Abbildung 33 zeigt beispielhaft einen Motorstart mit anschließender Beharrung bei konstanter Last.

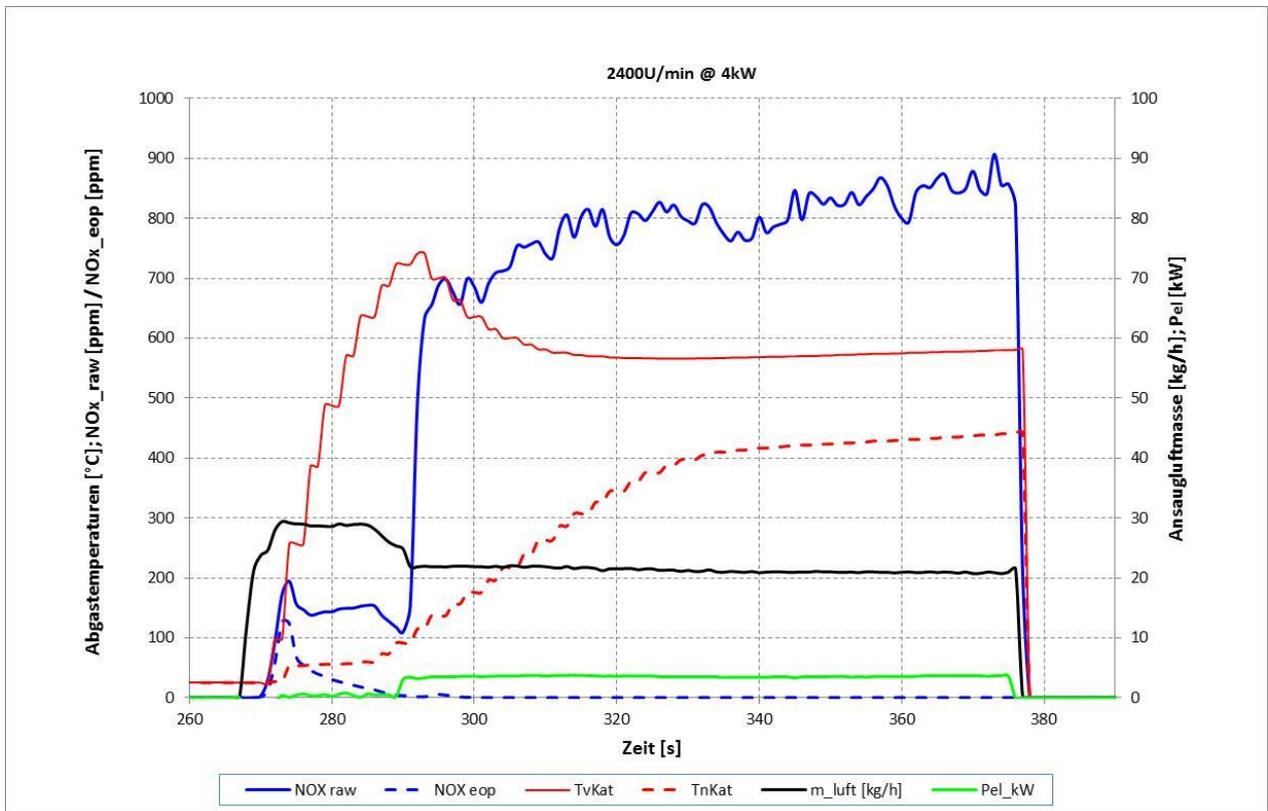


Abbildung 33 Beispiel Anfahrzustand VKM aus kaltem Zustand. © Argomotive

Insgesamt wurden 10 verschiedene Zustände dieser Art mit unterschiedlichen Versuchszeiten reproduziert. Die derart durchgeführten Vermessungen in verschiedenen konstanten Lastzuständen am Versuchsstand haben gezeigt, dass bereits eine sehr schnelle Katalysatoraufheizung realisiert wird. Sie leitet sich zum einen aus der Katalysatoranordnung selbst und zum anderen von motorischen Maßnahmen ab. Die Temperaturaufzeichnung vor (TvKat, roter Graph) und nach TWC (TnKat, rot gestrichelter Graph) mittels externen Temperaturfühler belegt eine zügige Katalysatoraufheizung. Die Temperaturmessstelle nach TWC ist im konkreten Fall mit ca. 1 m relativ weit nach dem Katalysator angeordnet und beinhaltet entsprechend schon eine deutliche Abkühlung durch Wärmeabgabe an die über ein externes Gebläse aufgebraachte Kühlluft. Real ist die Temperaturdifferenz über Katalysator um bis zu 50 °C geringer.

Ergänzend sind in Abbildung 33 die NO_x-Emission vor (NO_x raw_BMW, blauer Graph) und nach TWC (NO_x eop_BMW, blauer Graph gestrichelt), die Ansaugluftmasse (m_Luft, schwarzer Graph) und die abgegebene elektrische Leistung des Generators (Pel, grüner Graph) aufgetragen.

Die dargestellte Emissionsminderung von NO_x im Kaltstart steht hier stellvertretend auch für die anderen gasförmigen Abgasbestandteile CO und THC, die ähnliche Minderungsraten zeigen.

Bedingt durch die nur eingeschränkte Zugriffsmöglichkeit auf das Motormanagement des in Phase 1 des Projektes zur Verfügung stehenden Aggregates können auch nur sehr beschränkte Lastvariationen am Versuchsstand getestet werden.

Ergebnisse

Neben dem als AT-Ersatzteil gekauften serienmäßigen Katalysator des REX BMW i3, dessen genaue Spezifikation nicht bekannt ist, wurde ein weiterer TWC ausgelegt und gebaut. Dabei ist auf eine Euro-6-Beschichtungsvariante eines renommierten Herstellers (Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG) zurückgegriffen worden, die den aktuellen Stand der Technik widerspiegelt. Entgegen dem Serienkatalysator, der in Keramikmonolithbauweise hergestellt ist, handelt es sich bei der Neukonstruktion um einen 400 Zeller Metallträger-Katalysator. Der potenzielle Vorteil von Metallträgerkatalysatoren besteht in der besseren Aufheizcharakteristik gegenüber Keramikbauteilen. Das vergleichsweise schnellere Abkühlverhalten, das wiederum in Sachen Katalysatoraktivität negativ zu bewerten ist, spielt in der betrachteten Anwendung eine eher untergeordnete Rolle. Das vom Beschichter kostenneutral zur Verfügung gestellte Katalysatorvolumen entsprach in etwa dem des Serienkats. Das neu konstruierte Gehäuse war ebenfalls für eine motornahe Einbausituation ausgelegt, wengleich in erster Instanz in der Einbaulage noch nicht ganz der Zustand des Originalteiles erreicht worden ist. Da es in der Projektphase 1 zunächst um grundsätzliche Betrachtungen zur AGN gehen sollte, wurde auf eine aufwendige Konstruktionsanpassung verzichtet. Diese müsste dann, genau wie die Umsetzung von Isolationsmaßnahmen, Teil der fortführenden Arbeit in Phase 2 des Projektes sein, wenn die genau benötigten Katalysatorabmessungen verifiziert worden sind. In Abbildung 34 sind beide Katalysatorvarianten in der Einbausituation gegenübergestellt worden.

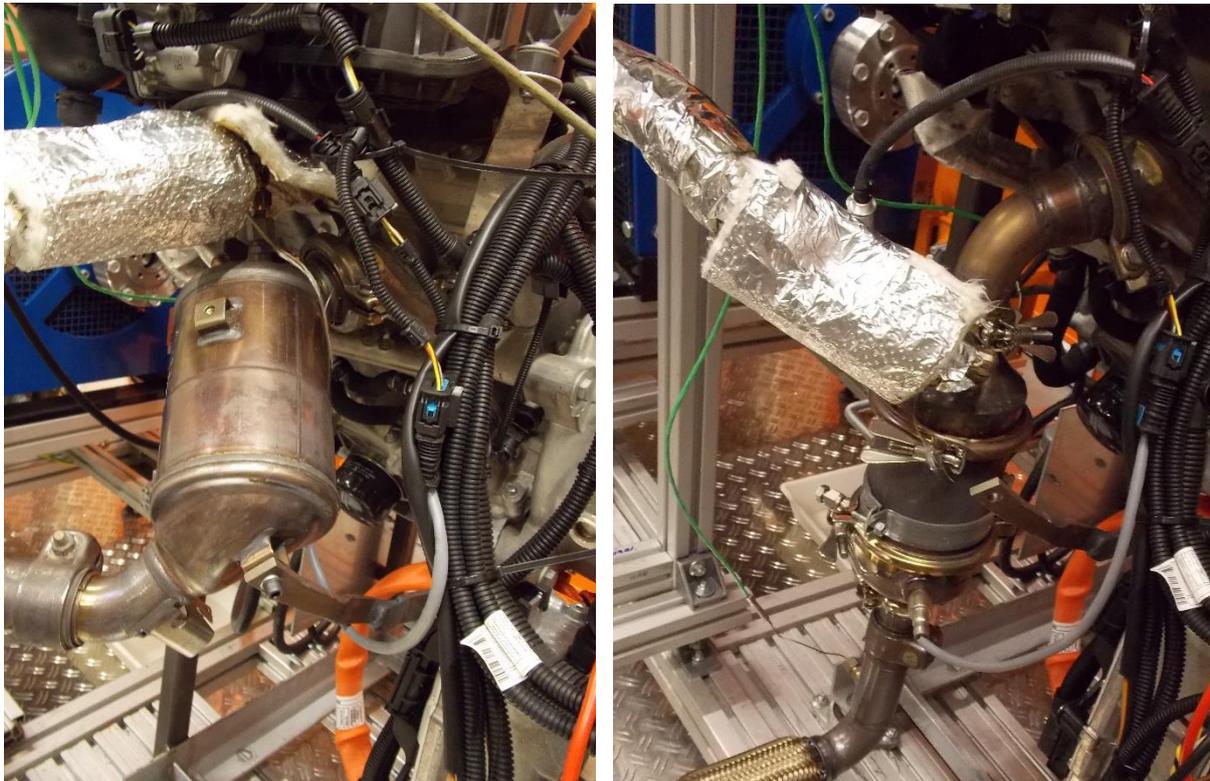


Abbildung 34 Vergleich Katalysatoranordnungen (links: Katalysator Original BMW i3 REX; rechts: Katalysator-Neuteil).
© Argomotive

Ergebnisse Versuchsauswertung

In Abschnitt 2.1.7 wird kurz auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Emissionseinstufung von HEV (Hybrid Electric Vehicle) Fahrzeugen eingegangen. Da es für den seriellen Elektroantrieb mit integriertem Range-Extender (REX) per Definition keine eindeutige Zuordnung zu Emissionsvorschriften bzw. Vorschriften zur Typgenehmigung gibt, wird für die hier durchgeführte Berechnung der REX als serieller Plug-In-Hybrid angenommen und den Emissionsvorschriften für HEV-Fahrzeugen zugeordnet.

Ergebnisse

Die Überprüfung der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für PKW und Kleintransporter erfolgt am Rollenprüfstand mittels Abfahren von Prüfzyklen. Zusätzlich wird ab Euro-6 auch das Verhalten der sogenannten Real Drive Emission (RDE) im Fahrbetrieb auf der Straße hinsichtlich des Emissionsverhaltens limitiert.

Beide Testverfahren waren im Rahmen der Untersuchungen des Emissionsverhaltens in Phase 1 des Projektes aus objektivem Grund nicht möglich, da die Fahrzeugintegration des REX-Systems erst in Phase 2 folgen soll.

Um die aus den Prüfstandstests vorliegenden Messergebnisse trotzdem hinsichtlich der Grenzwerteinhalten einordnen zu können, wird der Bezug zu den Emissionsgrenzwerten Euro-6 in g km^{-1} für NO_x , THC und CO unter Annahme der relevanten WLTC-Zyklusfahrstrecke hergestellt.

Der gewählte Berechnungsansatz ist rein akademischer Art und hat keinen Anspruch auf Übertragung auf die Verhältnisse des REX-Gesamtsystems im Fahrzeug BMW i3 mit Range Extender oder auch andere Fahrzeuge.

Folgende Annahmen werden getroffen:

- Der Test mit leerer Batterie, wie er laut Regelung 83 als Zustand B bzw. Charge-Sustaining Mode (CS) aus VO (EU) 2017/1151. vorgeschrieben ist, wird außer dem Startvorgang in einem stationären Lastzustand der VKM durchlaufen.
- Es werden drei Betriebspunkten mit je konstanter Leistungsabgabe betrachtet, nämlich
 - Betriebspunkt 1: 2400 rpm bei 4 kW elektrischer Leistung
 - Betriebspunkt 2: 2400 rpm bei 8 kW elektrischer Leistung
 - Betriebspunkt 3: 3500 rpm bei 15 kW elektrischer Leistung

Die Lastpunkte wurden am Prüfstand separat in Einzeltests über jeweils 15 min abgefahren. Die Kaltstartemission steht jeweils zu Beginn einer Messung und geht in das Gesamtergebnis mit ein.

- Der REX ist während des gesamten Fahrzyklus ungeachtet des Batterieladezustandes in Betrieb.
- Die im Fahrzyklus zu absolvierenden Fahrzuständen Low, Medium, High und Extra High können durch die Betriebspunkte 1 bis 3 abgedeckt.
- Es erfolgt jeweils eine Mittelwertbildung über der Zykluszeit eines WLTC für die gemessenen gasförmigen Emissionen NO_x -, THC- und CO
- Der Motorstart, d. h. die Kaltstartemissionen, werden im Berechnungsbeispiel berücksichtigt.

Tabelle 14 WLTC-Zyklusdaten für Klasse 3 Fahrzeuge ($\text{P}_{\text{mr}} > 34 \text{ W kg}^{-1}$)

WLTC / Klasse 3	Low	Medium	High	Extra High	TOTAL
Dauer in s	589	433	455	323	1.800
Distanz in m	3.095	4.756	7.158	8.254	23.262

Für die drei ausgewählten Lastpunkte sind die gemittelten Emissionen für eine Beispielrechnung in Tabelle 15 als Einzelwerte zusammengefasst.

Tabelle 15 Emissionsergebnisse aus Prüfstandstests für den Original- und den Neu-Katalysator

Katalysator	BP	Mittelwert (1800 s = 30 min) inkl. Kaltstart			m _{Abg} [kg h ⁻¹]
		NO _x [ppm]	THC [ppm]	CO [ppm]	
Original	1	619,8	3,4	43,2	19,8
	2	6,4	8,2	153,9	35,1
	3	26,9	15,9	299,7	58,2
Neu	1	41,5	12,2	21,1	19,7
	2	29,7	58,1	424,0	34,8
	3	29,9	28,0	253,6	58,8

In Hinblick auf die Euro-6-Grenzwerte für Fahrzeuge der Klasse M (vgl. RL2007/46/EG) ergibt sich nach Umrechnung der Messwerte in g und unter Bezugnahme auf die Zyklusfahrstrecke ein Bild gemäß Tabelle 16.

Tabelle 16 Berechnung Emissionswerte bezogen auf WLTP-Zyklus (1 Durchlauf)

Katalysator	BP	Bezogen auf WLTP-Zykluszeit (1800 s; Low-Medium-High-Extra High)						Überschreitung Grenzwert (Faktor)		
		NO _x [g]	THC [g]	CO [g]	NO _x [g/km]	THC [g/km]	CO [g/km]	NO _x	THC	CO
		Euro-6c Grenzwert:								
					0,06	0,1	1			
Original	1	9,74	0,02	0,41	0,42	0,0007	0,02	6,98	-	-
	2	0,18	0,07	2,61	0,01	0,0030	0,11	-	-	-
	3	1,24	0,22	8,42	0,05	0,0095	0,36	-	-	-
Neu	1	0,65	0,06	0,31	0,03	0,0025	0,01	-	-	-
	2	0,82	0,48	7,13	0,04	0,0208	0,31	-	-	-
	3	1,4	0,39	7,20	0,06	0,0169	0,31	-	-	-

Auch unter Berücksichtigung von sogenannten Verschlechterungsfaktoren, die nach R 83 gem. Abschnitt 5.3.6 anzuwenden sind und für CO mit Faktor 1,6, für THC mit 1,3 und für NO_x mit 1,6 zu Buche stehen, zeigt das angenommene Beispiel, dass die Grenzwerte Euro-6 im stationären Betrieb der VKM eingehalten werden können.

Die sehr deutliche NO_x-Überschreitung im Lastpunkt 1 mit dem Originalkatalysator und auch die grenzwertig ausfallenden NO_x-Emissionen allgemein werden nicht überbewertet, da der Motor aus bereits genanntem Grund keinesfalls mit optimierter Lambdaregelung betrieben worden ist.

Ausblick AGN Konstruktion

Wie bereits erwähnt, liegt die Besonderheit der geplanten Fahrzeuganwendung im intermittierenden Betrieb der generatortreibenden VKM. Sie weist eine komplett andere Charakteristik als bei herkömmlicher Motorbetriebsweise auf, welche in ungünstigeren thermischen Lastprofilen der eingesetzten Katalysatortechnik münden.

In [49] wird u. a. auch der Betrieb von Hybrid-Fahrzeugen mit REX betrachtet. Es wird der sogenannte Heiz-Katalysator als besonderes Hilfsmittel für eine schnellere Katalysatoraufheizung im Kaltstart umworben.

Ergebnisse

Dieser Ansatz wurde in der Projektarbeit aufgegriffen und ein derartiger Heizkatalysator von einem Industriepartner kostenneutral beschafft. Die Einbindung in das AGN-Konzept und die Erprobung erfolgten aus Zeitgründen allerdings nicht mehr. Sollten sich mit der abschließenden Festlegung einer Betriebsstrategie zum Betreiben der VKM in einer Weiterführung des Projektes Probleme mit dem Kaltstartverhalten ergeben, könnte auf diesen Ansatz zurückgegriffen werden.

Schlussfolgerungen Prüfstandstests

Obwohl kein kennfeldweiter Betrieb der VKM und auch kein direkter Zugriff auf die Motorsteuerung möglich waren, konnten ausreichend Erkenntnisse zum Emissionsverhalten gesammelt und die Möglichkeiten zu Abgasnachbehandlung abgeschätzt werden. Das konzipierte neue AGN-System hat sich im Test prinzipiell bewährt und könnte in einer 2. Projektphase hinsichtlich der konstruktiven Auslegung des Canning und der Wärmeisolation weiter optimiert werden.

Zusammenfassung Abgasnachbehandlung

Es wird eingeschätzt, dass für eine Weiterführung des Projektes zwingend die Unterstützung des Herstellers der VKM in das Projekt eingebunden werden muss oder eine Neuauslegung der Motorsteuerung durch dritte geeignete Dienstleister erfolgen muss. Dies trafe auf das momentan eingesetzte und auch auf alle anderen Optionen von VKM zu. Ohne die Möglichkeit des aktiven Eingriffes auf die Motorsteuerung ist weder die weiterführende zielgerichtete Anpassung der AGN noch die Adaption einer Kraftstoffänderung denkbar.

Das für den Prüfstandsbetrieb ausgestattete Aggregat sollte mit leichten Modifikationen in der peripheren Auslegung des Kühlwasserkreislaufes auch für den Fahrzeugeinsatz tauglich sein. Die elektrische Anbindung von Generator sowie Elektromotor und Batterie bedarf sicherlich einer Neuauslegung entsprechend der dann konkret zu benennenden Fahrzeuggegebenheiten.

2.1.7. Fahrzeugintegration und Straßenverkehrszulassung

Planung Fahrzeugintegration

Es erfolgte die Spezifikation der entsprechenden Datenschnittstellen, um den Datenaustausch zwischen Fahrzeug und REX-System gewährleisten zu können. Diese wurden so definiert, dass eine Anpassung auch anderer Fahrzeugtypen möglich ist. Dafür wird ein speziell entwickeltes, individuell programmierbares Steuergerät eingesetzt.

Es wurden verschiedene Möglichkeiten der Spannungs- und Stromregelung betrachtet, um die Ausgangsspannung der REX an unterschiedliche Hochvolt-Systeme anpassen zu können.

Der erforderliche Bauraum wurde definiert, am Demonstratorfahrzeug geprüft und festgestellt, dass das geplante Demonstratorfahrzeug bezüglich Bauraum und Lastaufnahmemöglichkeiten sehr gut geeignet ist (Abbildung 35 f). Das vorhandene Demonstratorfahrzeug hat einen Bauraum für den REX-Einbau von 98 cm (Breite), 50 cm (Höhe) und 52 cm (Länge) verfügbar.

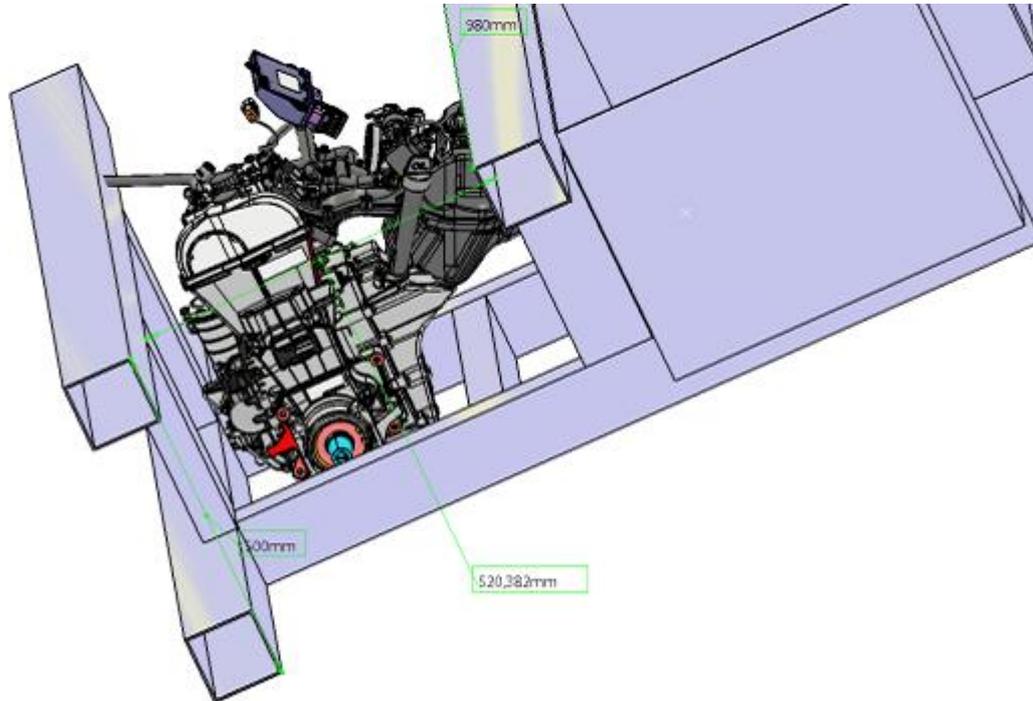


Abbildung 35 Integration des REX in Demonstratorfahrzeug – Seitenansicht. © car systems Scheil

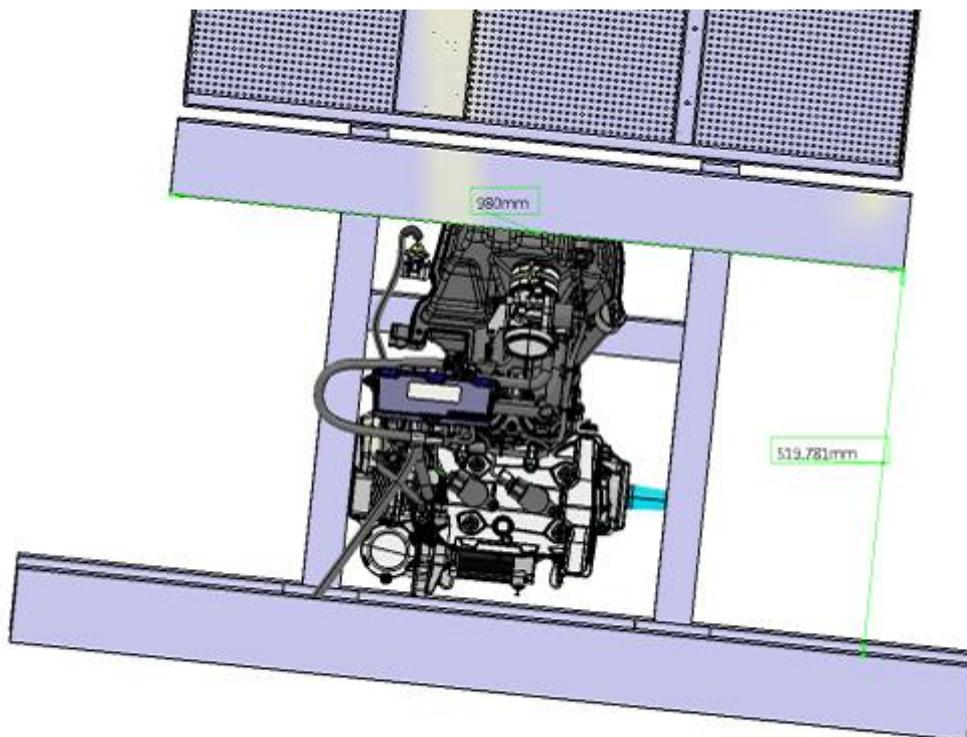


Abbildung 36 Integration des REX in Demonstratorfahrzeug – Top-Down-Ansicht. © car systems Scheil

Typengenehmigung und Abgasgesetzgebung

Der Range-Extender kann begrifflich den Plug-In-Hybrid Fahrzeugen zugeordnet werden. Die hauptsächlich für Hybrid-Elektrofahrzeuge relevanten zur Bewertung der Abgaswerte und Typgenehmigung geltenden Richtlinien lauten:

- **Verordnung (EG) Nr. 715/2007** - Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro-5 und Euro-6)

Ergebnisse

- **Verordnung (EU) 2017/1151** – Ergänzung zu Verordnung (EG) Nr. 715/2007
- **Verordnung (EG) Nr. 510/2011** - Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge
- **Regelung Nr. 83 (UN/ECE)** - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffanforderungen des Motors
- **Regelung Nr. 101 (UN/ECE)** - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen, die nur mit einem Verbrennungsmotor oder mit Hybrid-Elektro-Antrieb betrieben werden, hinsichtlich der Messung der Kohlendioxidemission und des Kraftstoffverbrauchs und bzw. oder der Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite

Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEV) sind laut Regelung Nr. 83 (UN/ECE) Fahrzeuge, die aus nachfolgend aufgezählten fahrzeugeigenen Quellen mit Energie für den mechanischen Antrieb versorgt werden. Die Regelung 83 schließt in diesem Zusammenhang Fahrzeuge ein, bei denen der Kraftstoff nur zum Aufladen der elektrischen Energiespeicher dient [50].

- Energiequelle 1: Kraftstoff
- Energiequelle 2: Elektrisches Energiespeichersystem (z. B. Batterie, Kondensator, Schwungrad, Generator)

Die Emissionsgrenzwerte zur Typgenehmigung von HEV sind in Regelung 83 (UN/ECE) in Punkt 5.3.1.4 geregelt und entsprechen aktuell den Vorgaben der Euro-6 Grenzwerte aus der Verordnung (EG) 715/2007. Das bedeutet, dass Serielle Hybridfahrzeuge wie im Beispiel eines Range-Extenders, auch die Euro-6 Grenzwerte in allen Betriebsphasen einhalten müssen. Zur Typgenehmigung existieren verschiedene Testprozeduren, welche je nach Fahrzeugvariation anzuwenden sind. Die nach Regelung 83 aktuell gültigen Abgasgrenzwerte für die nach Richtlinie 2007/46/EG definierten Fahrzeugklassen M (Personenbeförderung, mind. 4 Räder), N1 und N2 (Fahrzeuge für die Güterbeförderung, mind. 4 Räder) werden für Ottomotoren in Tabelle 17 aufgezeigt. Zusätzlich beschreibt die Regelung Nr. 101 die Messung der CO₂-Emissionen, des Kraftstoffverbrauchs und des Stromverbrauchs bzw. der elektrischen Reichweite von HEV. In der europäischen CO₂-Gesetzgebung (Verordnungen (EG) 443/2009 und (EG) 510/2011) gelten ab 2020 für Pkw 95 g km⁻¹ und für leichte Nutzfahrzeuge 175 g km⁻¹ CO₂-Flottenverbrauch.

Tabelle 17 Emissionsgrenzwerte für Ottomotoren (Regelung 83, 2015), [50]

		Bezugs- masse (BM) kg	Grenzwerte Ottomotoren						
			CO	THC	NMHC	NO _x	THC+NO _x	PM ¹	PN ^{1,2}
Klasse	Gruppe		mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	#/km
M	-	Alle	1.000	100	68	60	-	4,5	6,0x10 ¹¹
N1	I	≤1305	1.000	100	68	60	-	4,5	6,0x10 ¹¹
	II	1305<BM ≤1760	1.810	130	90	75	-	4,5	6,0x10 ¹¹
	III	1760<BM	2.270	160	108	82	-	4,5	6,0x10 ¹¹
N2	-	Alle	2.270	160	108	82	-	4,5	6,0x10 ¹¹

¹ Grenzwerte für PM und PN nur für Fahrzeuge mit Direkteinspritzmotoren

² Wahl des Herstellers PN Grenzwert 6,0*10¹² für Zeitraum von drei Jahren für Typgenehmigung von Neufahrzeugen ab angegebenen Daten nach Regelung 83 Abs. 12.2

Ergebnisse

Seit September 2017 wird für die Typgenehmigung die WLTP-Prozedur (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure) zur Erreichung der Abgasstufe Euro-6c angewendet. Hybrid-Elektrofahrzeuge (HEV) unterliegen ebenfalls den Testzyklen der WLTP-Prozedur. Ab September 2018 gilt die Abgasstufe Euro-6c für alle neu zugelassenen Fahrzeuge. Zusätzlich zur Abgasmessung auf dem Rollenprüfstand ist ab September 2017 auch die Emissionsmessung in einem RDE-Test (Real-Driving-Emissions) auf der Straße durchzuführen (Euro-6d) [51].

Nach Regelung 83 (Absatz 5.2.1) sind HEV mit Fremdzündungsmotor hinsichtlich Ihrer gasförmigen Emissionen den Prüfungen Typ I zu unterziehen. Im Anhang 14 der Regelung 83 sind abhängig von der Art des HEV, ob mit oder ohne Betriebsartschalter, die Prüfungen für Typ I – Prüfung der Abgasemissionen nach einem Kaltstart aufgeführt. Da für den seriellen Range-Extender-Betrieb der Antrieb nur über den Elektromotor bewerkstelligt wird, sind hierzu die Prüfungen des HEV ohne Betriebsartschalter anzuwenden. Für die Prüfzyklen werden zwei Zustände der Batterie mit A (voll) und B (leer) definiert. Diese sind durch eine Konditionierung vor Abgasmessung herzustellen.

Beide Zustände sind vom Testfahrzeug zu absolvieren. Die gemittelten Emissionen je Schadstoff im Zustand A und B müssen die Euro-6 Grenzwerte einhalten. Die ermittelten Messergebnisse werden mit Verschlechterungsfaktoren für den jeweiligen Schadstoff (Regelung 83, Absatz 5.3.6.2) multipliziert. Bei Fahrzeugen mit periodisch arbeitenden Regenerationssystemen (Abgasnachbehandlung) müssen sog. Ki-Faktoren in der Berechnung berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Zustände A und B werden hinsichtlich der elektrischen Reichweite des Fahrzeugs und der durchschnittlichen Strecke ($D_{av} = 25 \text{ km}$) zwischen zwei Batterieaufladungen gewichtet und mit den Euro-6 Abgasgrenzwerten (Regelung 83, Absatz 5.3.4.1) verglichen.

Nach der Einführung der WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) mit den darin enthaltenen WLTC-Zyklen (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles) sind auch Hybrid-Elektrofahrzeuge, welche lt. Eckstein et. al. [52] definitionsgemäß mit PHEV vergleichbar sind, nach diesem Zyklus zu testen. Generell werden die Testfahrzeuge nach Leistung pro Fahrzeugmasse ($P_{mr} - \text{Ratio of rated power to mass}$) eingeteilt, wonach sich der zu absolvierende Testzyklus definiert. Hybridelektrofahrzeuge werden jedoch generell nach Unteranhang 8 Absatz 1.4 der Verordnung VO (EU) 2017/1151 in die Klasse 3 ($P_{mr} > 34 \text{ W kg}^{-1}$) zugeordnet [53]. Die Klasse 3 unterteilt sich weiterhin nach der maximal zu erreichenden Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges nach a) kleiner 120 km h^{-1} und b) größer gleich 120 km h^{-1} . Ein vollständiger WLTC-Zyklus, der von den Testfahrzeugen zu absolvieren ist, besteht aus einer Low-, Medium-, High- und Extra-High Phase. Weiterhin ist für extern aufladbare HEV-Fahrzeuge ein sog. WLTC-Stadtprüfzyklus zu absolvieren, welcher aus einer Low- und einer Medium-Phase besteht und der elektrischen Reichweitenbestimmung [52] dient, vgl. Unteranhang 1 Absatz 3.5 der Verordnung VO (EU) 2017/1151 [5]. Die Fahrzeuge werden im WLTC mit den zwei Modi Entladevorgang (CD - charge depleting, entspricht Zustand A in Reg. 83) und Ladeerhaltungszustand (CS - Charge Sustaining, entspricht Zustand B in Reg. 83) getestet.

Nach einer Vorkonditionierung der Fahrzeuge werden $n+1$ WLTC Zyklen gefahren, bis zu dem Zeitpunkt, indem ein definiertes Abbruchkriterium (relative elektrische Energieänderung $< 0,04$ zwischen Beginn und Ende eines WLTC-Zyklusses) einsetzt. Die gemessenen Emissionen werden je Zyklusabschnitt bestimmt, als auch über den jeweilig absolvierten n -ten WLTC-Prüfzyklus selbst. Zudem werden die erhaltenen Ergebnisse mit sog. Utility-Faktoren gewichtet. Die Utility-Faktoren sollen regionsspezifisch das Nutzungsverhalten der Fahrzeuge abbilden und werden aufgrund der WLTP-Datenbasis über der Charge-Depleting-Reichweite abgelesen. Die Utility-Faktoren werden dabei je absolvierte Phase (Low, Medium, High, Extra-High) als auch über den Gesamtzyklus bestimmt. Die Utility-Faktoren basieren auf Grundlage der elektrischen Reichweite eines Fahrzeuges und sind entgegen der bisherigen Annahme der Wichtung von $D_{av} = 25 \text{ km}$ variabler

Ergebnisse

ausgestaltet [54]. Abbildung 37 verdeutlicht schematisch den Prüfablauf Typ 1 für HEV nach Regelung 83 Anhang 14 und VO (EU) 2017/1151 Anlage 21, Unteranhang 8.

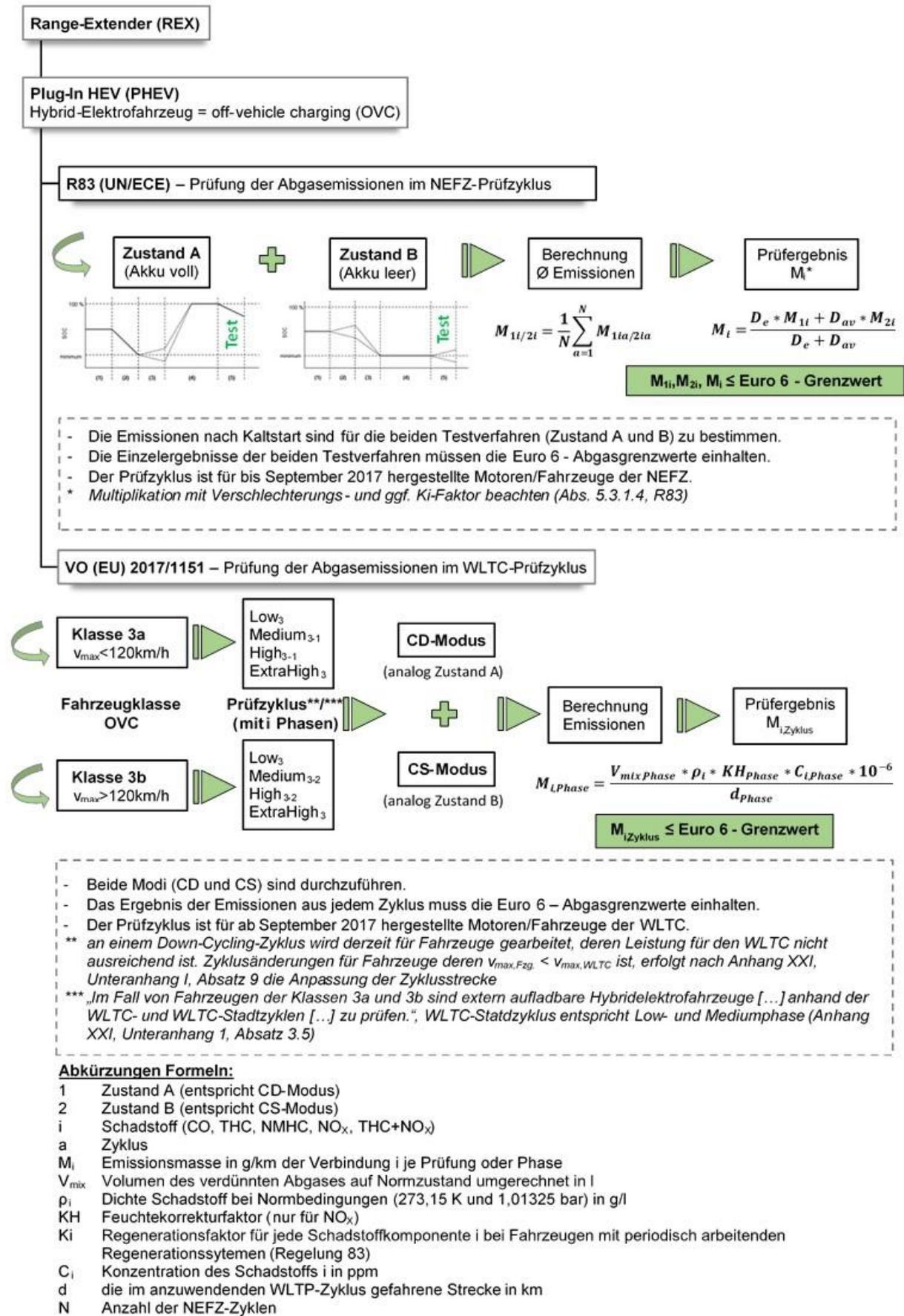


Abbildung 37 Schema zur Abgasgesetzgebung – Einordnung eines RE-Systems, [50, 53]. © Argomotive

Ergebnisse

Abbildung 37 deutet die Komplexität der rechtlichen Rahmenbedingungen seitens der EU an. Es erfolgt mit der neuen Verordnung VO (EU) 2017/1151 eine Unterscheidung der Fahrzeugklassen für extern aufladbare Elektrofahrzeuge, der durchzuführenden Prüfzyklen im WLTC sowie der finalen Berechnung der erfolgten Schadstoffbelastung. Ironischerweise kann selbst die für Sachsen zuständige Zulassungsstelle DEKRA ad hoc kein konkretes Vorgehen für die Zulassung eines nachgerüsteten REX benennen (siehe nachfolgenden Unterabschnitt).

Straßenverkehrszulassung

Die Anforderungen an die Straßenverkehrszulassung wurden mit der DEKRA erörtert und abgestimmt (Auszug aus Angebotslegung seitens DEKRA, Tabelle 18).

Tabelle 18 Auszug Angebotslegung DEKRA

Leistungsinhalt	
Art / Vorschrift	Gutachten nach Par. 21 StVZO
Ziel	Einzelbetriebserlaubnis
Gegenstand / Typ	Umbau eines Personenkraftwagen/ Nutzkraftwagen auf Elektroantrieb mit Range -Exender
Umfang	Prüfungen und Messungen auf Basis der StVZO in Verbindung mit den verbindlichen EU-Vorschriften, d. h. entsprechende EG-Richtlinien und Merkblätter, Gefährdungspotential nach ECE-R100, ECE R83, ECE R101 Prüfungen und Messungen auf Basis der StVZO, insbesondere Bremsanlage, Höchstgeschwindigkeit, Fahrverhalten, Leergewicht, Leuchten, Geräusche, Geschwindigkeitsanzeige, ggf. Wegfahrsperrung und Fabrikschild. EMV und Abgasgutachten ist nicht Bestandteil der Begutachtung durch die Niederlassung Leipzig und muss zur Erstellung eines Gutachtens in Eigener Verantwortung erbracht werden
Leistungsabwicklung	
Kosten (ohne MwSt.)	1.275 € für Begutachtung ggf. zuzüglich Reise- und ggf. Übernachtungskosten ohne Abgasgutachten Beratungsleistung 1.530 € zuzüglich Reise- und ggf. Übernachtungskosten Abgasgutachten durch Technischen Dienst ca. 3500,- bis 4500,-€ falls erforderlich
Prüfort	DEKRA Automobil GmbH, Niederlassung Leipzig, sowie Test Center, 01998 Klettwitz
Leistungsvoraussetzungen	
Prüfdokumentation	Sicherheitskonzept des Herstellers z.B. in Anlehnung an ECE-R 100, EMV-Protokolle für Komplet Fahrzeug, Nachweis des Motorenherstellers über Abgasverhalten, Gegebenenfalls Abgasgutachten für Kompletfahrzeug, Leistungsnachweis für Range-Exender, Nachweis der 30min. Leistung
Prüfmuster	Kompletfahrzeug, ggf. Einzelkomponenten

Ergebnisse

Die weiter oben im Bericht bereits erwähnten Unbestimmtheiten bezüglich einer Einordnung des REX-Fahrzeuges in aktuelle Abgasgesetzgebungen erschweren der Prüfstelle DEKRA ebenfalls genauere Beschreibung der Voraussetzungen für die Erteilung der Straßenverkehrszulassung für Elektrofahrzeuge mit nachgerüsteten REX. Nach Auffassung der DEKRA richten sich die Abgasbestimmungen nach dem Erstzulassungsdatum des Fahrzeuges. Damit wäre bei Verwendung des von car systems Scheil bereitgestellten Elektrofahrzeuges die Schadstoffklasse Euro-4 das Zulassungskriterium. Im Gegensatz dazu müssen Fahrzeuge mit einer Erstzulassung nach 2018 die Vorgaben der Euro-6d einhalten. Die DEKRA weist im weiteren Verlauf darauf hin, dass sie beim Einsatz des BMW i3 Systems keine Bedenken sieht, eventuell noch bei der Bestimmung der Kraftstoffverdunstung aus dem Tank heraus. Sollte BMW ein bestandenes Abgasgutachten den Motor mit beifügen, könnte eine erneute Abgasprüfung eventuell komplett vermieden werden.

Anders verhält es sich, wenn die VKM zusätzlich für den Betrieb von Nebenaggregaten verwendet wird (z. B. Transportkühlung). Hier existieren aktuell noch keine Vorgaben bezüglich der Abgasemissionen. Voraussetzung ist jedoch, dass das Nebenaggregat (Kühlaggregat) mit der VKM verbunden ist und keine Zwischenspeicherung über einen Energiespeicher erfolgt.

Zusammenfassung Fahrzeugintegration und Straßenverkehrszulassung

Mit den dargestellten Forderungen seitens der Straßenverkehrszulassung wird ersichtlich, dass vermeintlich einfache und kostengünstige Lösungen wie simple Notstromaggregate keine Zulassung als Range-Extender mit direktem Zugriff auf den Energiespeicher des Fahrzeugs erhalten würden.

2.1.8. Zusammenfassung Projektphase 1

In dem Vorhaben Entwicklung und Demonstration eines biokraftstoffbetriebenen Range-Extender-Systems zur Reichweitenverlängerung elektrisch betriebener Nutzfahrzeuge im Wirtschaftsverkehr wurden sich in der Projektphase die potenziell verfügbaren und erneuerbaren Kraftstoffe für die Anwendung in einem REX angeschaut. Zusätzlich wurde sich mit den Themen der Verfügbarkeit und der technischen Auslegung Range-Extendern sowie deren Nachrüstung in vorhandene elektrisch angetriebene leichte Nutzfahrzeuge, Abgasnachbehandlung von Range-Extendern und zusätzlich mit den rechtlichen Rahmenbedingungen für die Straßenzulassung von Fahrzeugen mit REX befasst. Dabei haben sich im Laufe der Projektphase 1 viele offene Fragen ergeben, die in einem weiteren Schritt abgearbeitet werden müssen, um letztendlich eine erfolgreiche Demonstration umsetzen zu können. Diese Punkte werden im nächsten Abschnitt 2.1.9 Abgeleitete Forschungsfragen zusammengefasst. Anschließend wird im Abschnitt 2.1.10 Konzept Verbundvorhaben BioRexWiVe Phase 2 das weitere notwendige Vorgehen beschrieben.

Detaillierte Zusammenfassung zu den einzeln bearbeiteten Punkten sind bereits jeweils am Ende der Abschnitte 2.1.1 bis 2.1.7 erfolgt.

2.1.9. Abgeleitete Forschungsfragen

In den nachfolgenden Punkten werden die offenen Arbeitspunkte beschrieben, die eine erfolgreiche Umsetzung aktuell verhindern. Diese Fragen konnten in dem bisherigen Vorhaben nicht abschließend geklärt werden.

Kraftstoffe

Die **Verfügbarkeit** an öffentlichen Tankstellen ist für den Kraftstoff E85 sehr eingeschränkt. Es muss daher geprüft werden, inwiefern **E85-Kraftstoff direkt beim Lieferanten bezogen** werden kann. Es

Ergebnisse

müssen geeignete Lieferanten gefunden werden, die projektunabhängig den Kraftstoff in den geforderten Mengen (ca. 200 l) bereitstellen können. Es ist dabei auch auf die Kosten zu achten.

Es muss beim potenziellen Anwender eine geeignete **Hoftankstelle** installiert werden, die möglichst **einfach im Aufbau und in der Handhabung** ist. Ziel sollte sein, dass diese Hoftankstelle nur die oben genannten geringen Mengen von ca. 200 l als Kraftstofffass bereitstellt. Unabhängig von der Komplexität des Aufbaus der Hoftankstelle müssen **verschiedene Verordnungen** (AwSV, BetrSichV) **und technische Regeln** (TRGS 509, TRwS 781-3) **eingehalten** werden. Dies sollte möglichst mit Hilfe eines **Sachverständigen** geprüft werden. Es ist zu kontrollieren, ob eine E85-Betankung direkt vom Kraftstofffass erfolgen kann.

Der vorhandene REX ist für die Nutzung von EN 228 konformem Ottokraftstoff konzipiert. Im Verlauf des Vorhabens soll ein Wechsel des Kraftstoffs hin zu E85-Kraftstoff erfolgen. Damit müssen entsprechend die **Beständigkeit der kraftstoffführenden Teile** geprüft und ggf. alternative Produkte recherchiert werden.

Demonstrationsfahrzeug

Grundlage für die Demonstration der REX-Anwendung ist die **Verfügbarkeit eines elektrisch angetriebenen Transporters** beim potenziellen Anwender. Es ist im Vorfeld zu prüfen, ob die Anschaffung eines E-Transporters notwendig ist. Hier können verschiedene Optionen möglich sein, z. B. die Anschaffung eines StreetScooters oder der Aufbau eines baugleichen ECO-Crafter zum vorhandenen E-Transporter von car systems Scheil. In diesem Zusammenhang ist auch der Aufbau einer elektrischen Ladesäule notwendig.

Range-Extender

Der vorhandene Range-Extender muss in seiner **kompletten Steuerung neu appliziert** werden. Dies betrifft sowohl die **VKM** als auch den **Generator**.

Dazu muss ein **Reengineering der Kommunikation** innerhalb der Datenstruktur der vorhandenen BMW-Komponenten oder die Programmierung einer **neuen Kommunikation mit neuem Motronic-Steuergerät und Sensoren** erfolgen.

In diesem Zusammenhang ist auch zu klären, ob ein **Tausch des Generators und des Wechselrichters** sinnvoll ist, um die Abhängigkeit von BMW-Ersatzteilen zu reduzieren. Bei einem Tausch muss vorab entsprechend eine **Recherche** bezüglich der **verfügbaren Aggregate** erfolgen.

Zusätzlich muss eine **Anpassung der unterschiedlichen Spannungsebenen zwischen dem vorhandenen BMW-REX und dem vorhandenen Fahrzeug** erfolgen. Dafür muss eine **universell programmierbare Leistungselektronik** entwickelt werden.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Projektphase 2 wird die **Neuapplikation der Motorsteuerung für die geänderten Kraftstoffeigenschaften mit E85** sein. Es wird dabei zunächst von der weitestgehenden Beibehaltung der Leistungsparameter der VKM ausgegangen.

Die Möglichkeit und Sinnfälligkeit für den **Einsatz von „FlexFuel“** mit all den daraus erwachsenden Konsequenzen ist zu **prüfen**.

Die **Anpassung von Baugruppen des Motors** hinsichtlich **Kraftstoffverträglichkeit** muss erfolgen.

Mit dem nur begrenzten Zugriff auf die Motorsteuerung der VKM des REX BMW i3 konnten die Fragen zur Problematik AGN nur ansatzweise beantwortet werden, weil keine **kennfeldweite Auswahl geeigneter Betriebslastpunkte** möglich war.

Ergebnisse

Die Funktion der **Lambda-Regelung** war nur bedingt nachvollziehbar, Änderungen an der Einspritzstrategie waren nicht möglich.

Die im Projekt erstellte AGN-Lösung in Form eines 3-Wegekatalysators genügt in 1. Instanz den für Euro-6 gestellten Anforderungen. Hinsichtlich Auslegung und **Temperaturmanagement** besteht aber noch Optimierungsbedarf.

Insbesondere interessant wird die Beantwortung der Frage sein, inwieweit **die Funktion des Abgasnachbehandlungssystems durch einen Wechsel des Kraftstoffes** hin zu E85 oder STF beeinflusst wird. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den resultierenden Emissionsänderungen mit dem vorhandenen Konstruktionsansatz sowie bei eventuellen Problemen und bzw. oder Reserven in der Katalysatorauslegung.

Nachdem der **REX** funktionsfähig ist, muss dessen **Fahrzeugintegration** vorbereitet werden. Es müssen entsprechend Komponenten, wie beispielsweise Tank oder AGN, sinnvoll und platzsparend am REX angebracht werden. Ein kompaktes **Gestell** sollte den REX umgeben, sodass es flexibel an das vorhandene Fahrzeug angebracht werden kann. Eventuelle **Sonderfunktionen** wie Gabelstaplertaschen am Gestell oder Schnellkupplungen zu den angrenzenden Schnittstellen sind im Sinne einer **flexiblen Handhabung** ebenfalls zu bedenken.

Letztendlich muss der REX in das vorhandene Fahrzeug integriert werden. Dabei sind sowohl **Sicherheitsaspekte** (z. B. Schutz vor drehenden oder heißen Teilen, Abgas) als auch **Bauraum** oder **Handhabe** des REX zu beachten. Die Steuerung des REX muss an die **vorhandene Fahrzeugsteuerung angekoppelt werden** und ggf. muss ein **Funktionsschalter** in dem Fahrzeugcockpit **integriert werden**. Ggf. sind für eine Straßenverkehrszulassung bei der DEKRA Stabilitätsberechnungen und Festigkeitsbestimmungen anzufertigen. Weiterhin ist zu ermitteln, inwieweit die Integration des REX-Systems in das Fahrzeug auch Maßnahmen zur Lärmemissions- und Wärmedämmung bedarf.

Straßenverkehrszulassung

Die Unklarheiten bei der **Straßenverkehrszulassung** wurden in dem Bericht bereits umfassend beschrieben. Es muss nach erfolgter REX-Integration mit der verantwortlichen Zulassungsstelle das Vorgehen am dann konkret benanntem Fahrzeug abgeklärt werden, sodass alle **notwendigen Prüfungen** erfolgen können und die Straßenzulassung erteilt werden kann.

Demonstration

Letztendlich muss die **Anwendung des REX-Fahrzeuges** bei einem geeigneten Anwender **demonstriert werden**. Dazu sind im Vorfeld die Fahrbewegungen des Fuhrparks auszuwerten, um ein **Konzept für die Integration in den Fuhrpark** zu ermöglichen. Danach soll die Fahrzeuganwendung dokumentiert werden, indem **objektive Kriterien wie Einsatzverhalten des Fahrzeuges und REX oder reale Abgasemissionen aufgezeichnet** werden, aber auch **subjektive Aspekte (Fahrverhalten, Einschränkungen usw.) der Nutzer abgefragt** werden.

2.1.10. Konzept Verbundvorhaben BioRexWiVe Phase 2

In Projektphase 2 soll das Konzept entsprechend an einem Elektrofahrzeug für den leichten Wirtschaftsverkehr umgesetzt und erprobt werden sowie daraus resultierende Empfehlungen zur Auslegung des Range-Extender-Systems final zusammengefasst werden.

Die Verknüpfung der Arbeitsschwerpunkte des FuE-Kooperationsprojektes ist in der folgenden Übersicht dargestellt (Abbildung 38). Die Arbeitsschwerpunkte werden nachfolgend kurz erläutert.

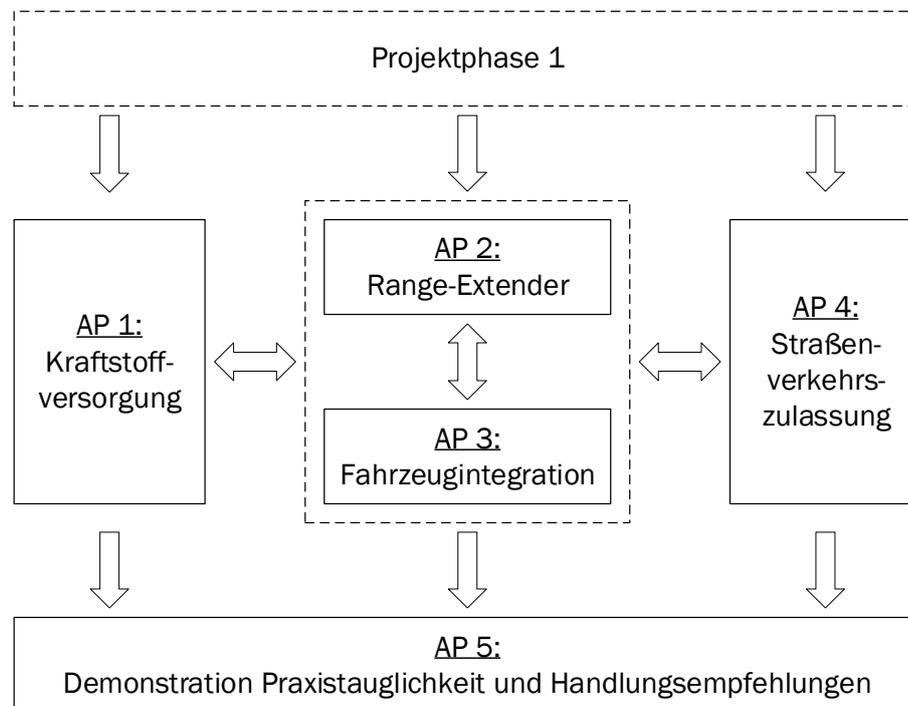


Abbildung 38 Strukturplan BioRexWiVe Projektphase 2

Arbeitspaket 1 befasst sich mit der **Kraftstoffversorgung** innerhalb des Projektes. Alternative Reinkraftstoffe sind aktuell schwer erhältlich, hier müssen für den Anwender geeignete Lösungen gefunden werden. Dazu zählt neben der Beschaffung von Kraftstoff auch die Installation einer geeigneten handhabbaren Hoftankstelle. Zusätzlich sollen in dem Arbeitspaket ein Konzept für den kraftstoffbedingten Umbau des REX erarbeitet werden.

Arbeitspaket 2 befasst sich mit dem Umbau des **REX** für die Anwendung im leichten Nutzfahrzeug. Hier müssen neben den kraftstoffbedingten Umbaumaßnahmen eine Modifizierung der Abgasnachbehandlung erfolgen sowie Neuapplikation der gesamten REX-Einheit inkl. Sensorik. Und eine darauffolgende Optimierung des Motorbetriebs auf die spezielle REX-Anwendung hin.

Arbeitspaket 3 befasst sich mit der **Fahrzeugintegration** des REX. Neben der Beschaffung eines elektrisch angetriebenen leichten Nutzfahrzeuges soll der in AP 2 konstruierte REX in das Fahrzeug integriert werden. Zusätzlich sollen in dem AP erste Testfahrten bezüglich Funktionalität, Abgasemissionen und Verbrauch durchgeführt werden.

Arbeitspaket 4 befasst sich mit der **Straßenverkehrszulassung**. In der Projektphase 1 haben sich bei der in Sachsen zuständigen Zulassungsstelle offenen Punkte bezüglich einer rechtlichen Einordnung von nachgerüsteten REX in Elektrofahrzeugen ergeben. Diese Hindernisse müssen gemeinsam mit der Zulassungsstelle geklärt werden, so dass anschließend eine Straßenzulassung erfolgen kann.

Arbeitspaket 5 befasst sich mit der **Demonstration der Praxistauglichkeit**. Nach erfolgter Straßenzulassung soll das Fahrzeug in die Fahrzeugflotte des Anwenders überführt werden und nachfolgend für ein halbes Jahr genutzt werden. Dabei sind das Fahrverhalten und teilweise das Abgasverhalten zu überwachen. Abschließend soll die spezielle Anwendung des REX in andere Anwendungsfelder mit Hilfe eines Erfahrungsberichts überführt werden.

Als Projektstart wird 01.02.2019 angestrebt. Die geplante Projektlaufzeit von Phase 2 beträgt 30 Monate (2,5 Jahre). Eine Darstellung des Zeit- und Arbeitsplanes kann Tabelle 19 entnommen werden. Dabei sind insbesondere die für die praktischen Untersuchungen veranschlagten Zeiträume

Ergebnisse

zunächst vorläufig, da detaillierte Spezifizierungen der Versuchs- und Durchführungsplanung zu Beginn des Projektes in Absprache der Projektpartner erfolgen wird.

Tabelle 19 Zeitplan BioRexWiVe Projektphase 2

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
AP 1 Kraftversorgung										
AP 2 Range-Extender										
AP 3 Fahrzeugintegration										
AP 4 Straßenverkehrszul.										
AP 5 Demonstration										
Meilensteine	M1.1	M2.1		M2.2	M1.2		M3.3		M4.1	M5.3
					M2.3		M3.4		M5.2	
					M2.4					
					M3.1					
					M3.2					
					M5.1					

Ergebnisse

2.2. Verwertung

Die Arbeiten des Verbundvorhabens wurden maßgeblich von mittelständischen Unternehmen, die sich auf dem Gebiet der Antriebstechnologie bzw. Abgasnachbehandlung spezialisiert haben, getragen. Mit dem Vorhaben gelingt den beteiligten Wirtschaftspartnern ein Vorstoß in den Bereich der Elektromobilität und Biomassenutzung, die die Nachhaltigkeit des Verkehrssektors fördern sollen.

Bei erfolgreicher Umsetzung der zweiten Projektphase können die Wirtschaftspartner das entsprechende Produkt in ihr Portfolio aufnehmen. Dies ermöglicht nicht nur bei einer entsprechenden Vermarktung bestehende Arbeitsplätze zu sichern, sondern ggf. neue Arbeitsplätze zu schaffen.

Weiterhin wird das Verbundvorhaben bei Durchführung der Umsetzungsphase mit großem Interesse durch das Expertengremium des IEA AMF (Advanced Motor Fuels Implementing Agreement der International Energy Agency) verfolgt und die gewonnenen Erkenntnisse international transferiert.

Zusätzlich wird bei einer erfolgreichen Umsetzung der Demonstrator in einem Ausbildungsfahrzeug vom Projektpartner car systems Scheil integriert und steht zum einem der Ausbildung neuer Fachkräfte als auch als Schulungsmaterial für assoziierte Partner zur Verfügung.

2.3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Zuwendungsempfänger keine wesentlichen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens von anderer Stelle bekannt geworden. Eine Ausnahme bildet das Vorhaben GreenRex, bearbeitet durch Fraunhofer ICT, Rheinmetall Automotive, FEV, RWTH Aachen, StreetScooter und KIT, dass die Entwicklung eines biogasbetriebenen Range-Extenders für leichte Nutzfahrzeuge (hier StreetScooter) vorangetrieben hat. Zu einer Marktimplementierung des Konzepts ist es jedoch nach derzeitigen Kenntnisstand nicht gekommen [55].

2.4. Veröffentlichungen

Erkenntnisse aus dem Projekt wurden teilweise in dem Vortrag „Synergies of electro mobility and sustainable biofuels. A case study for Saxony (Germany)“ auf dem 11. Internationalen Kraftstoffkolloquium der Technischen Akademie Esslingen e. V. am 28.06.2017 einem breiten Fachpublikum präsentiert.

Das Projekt wurde im Rahmen eines Vortrages über aktuelle Projekte der car systems Scheil GmbH & Co. KG auf der Mitteldeutschen Handwerksmesse Leipzig im Februar 2018 vorgestellt.

Zusätzlich sollen die gewonnenen Erkenntnisse in weiteren wissenschaftlichen und technischen Vorträgen eingebracht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] FERRARI, Cornelius ; OFFINGER, Stefan ; SCHIER, Michael ; PHILIPPS, Franz ; WIDENHORN, Axel ; HENKE, Martin ; PHILIPP, Ulrich ; WOLANY, Adalbert ; RINDERKNECHT, Frank ; REICHERT, Stefan: *Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug – REXEL*. Stuttgart, 2012
- [2] HOFMANN, Peter: *Hybridfahrzeuge*. Vienna : Springer-Verlag Vienna, 2010
- [3] TSCHÖKE, Helmut: *Informationsreihe MTZ Wissen Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 73 (2012), Nr. 5, S. 413–419
- [4] REIF, Konrad: *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010 (Bosch Fachinformation Automobil)
- [5] WALLENTOWITZ, Henning ; FREIALDENHOVEN, Arndt: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges : Technologien, Märkte und Implikationen*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [6] WEIBOLD, Thomas: *Steyr Motors entwickelt Range Extender für E-Autos : STEYR. Zweizylinder-Dieselmotor erhöht die Reichweite von Elektroautos. Kooperation mit Automobil-Cluster*. 19.03.2012
- [7] GOPPELT, Gernot: *Im Wechseltakt: Range-Extender-Antrieb von Mahle : Im Range-Extender-Antrieb von Mahle sorgt ein Gegenläufer für Laufruhe*. 08.10.2012
- [8] ENGIRO GMBH: *RE 20-3*. URL <https://www.engiro.de/de/produkte/antriebssysteme/range-extender/alle-range-extender/re-20-3/> – Überprüfungsdatum 2018-10-19
- [9] ENGIRO GMBH: *Neuer 40 kW Range Extender für Nutzfahrzeuge*. URL <https://www.engiro.de/de/home/getarticle/News/detail/neuer-40-kw-range-extender-fuer-nutzfahrzeuge/> – Überprüfungsdatum 2018-10-19
- [10] SKARICS, Rudolf: *Einen Verlängerten, bitte : Praxistest: Mit dem BMW i3 und Range Extender über den Berg und durch die Wälder*. URL <https://www.heise.de/autos/artikel/Praxistest-mit-dem-BMW-i3-und-Range-Extender-3084304.html> – Überprüfungsdatum 2018-10-19
- [11] RHEINMETALL ATOMOTIVE: *Geräuscharmer Range Extender nimmt Reichweitenangst*. URL <https://www.rheinmetall-automotive.com/produkte/range-extender/> – Überprüfungsdatum 2018-10-19
- [12] UNBEKANNT: *StreetScooter*. URL <https://www.streetscooter.eu/> – Überprüfungsdatum 2018-08-09
- [13] NICOLAI, Birger: *Post-Zusteller haben Angst, den Streetscooter zu nutzen : Probleme im Winter*. URL <https://www.welt.de/wirtschaft/article171801021/E-Auto-der-Deutschen-Post-Winterprobleme-mit-dem-StreetScooter.html> – Überprüfungsdatum 2018-10-19
- [14] KOLB, Sandra: *EBU: Streetscooter fällt im Test durch : E-Mobilität*. URL https://www.swp.de/suedwesten/staedte/ulm/ebu_streetscooter-faellt-im-test-durch-24681656.html – Überprüfungsdatum 2018-10-19
- [15] BUNDESVERWALTUNGSGERICHT: (Beschränkte) Verkehrsverbote für (bestimmte) Dieselfahrzeuge - Luftreinhalteplan Düsseldorf BVERWG 7 C 26.16. In: <http://www.bverwg.de/de/270218U7C26.16.0> (2018-02-27). URL <http://www.bverwg.de/de/270218U7C26.16.0>

Literaturverzeichnis

- [16] BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG: *Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2016 : Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung*. Bonn, 2017
- [17] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E. V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland : 1990 bis 2016*. URL <https://www.ag-energiebilanzen.de/> – Überprüfungsdatum 2018-06-04
- [18] DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates vom 20. April 2015 zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichterstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselkraftstoffen* (idF v. 20. 4. 2015) (2015). URL <https://eur-lex.europa.eu> – Überprüfungsdatum 2018-06-04
- [19] NAUMANN, Karin (Hrsg.); OEHMICHEN, Katja (Hrsg.); REMMELE, Edgar (Hrsg.); THUNEKE, Klaus (Hrsg.); SCHRÖDER, Jörg (Hrsg.); ZEYMER, Martin (Hrsg.); ZECH, Konstantin (Hrsg.); MÜLLER-LANGER, Franziska (Hrsg.): *Monitoring Biokraftstoffsektor*. 3. Auflage. Leipzig : Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2016 (DBFZ-Report Nr. 11)
- [20] SCHUBERT, Nikolai (Hrsg.): *Fuels - conventional and future energy for automobiles : 11th International Colloquium : June 27 - 29, 2017*. Ostfildern : Technische Akademie Esslingen e.V, 2017
- [21] SUAREZ-BERTOIA, R. ; ZARDINI, A. A. ; KEUKEN, H. ; ASTORGA, C.: *Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC)*. In: *Fuel* 143 (2015), S. 173–182
- [22] DARDIOTIS, Christos ; FONTARAS, Georgios ; MAROTTA, Alessandro ; MARTINI, Giorgio ; MANFREDI, Urbano: *Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions*. In: *Fuel* 140 (2015), S. 531–540
- [23] CZERWINSKI, Jan ; COMTE, Pierre ; STEPIEN, Zbigniew ; OLEKSIK, Stanislaw: *Effects of Ethanol Blend Fuels E10 and E85 on the Non-Legislated Emissions of a Flex Fuel Passenger Car*. In: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2016 (SAE Technical Paper Series).
- [24] VAN BASSHUYSEN, Richard (Hrsg.): *Handbuch Verbrennungsmotor : Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2005 (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [25] FOONG, Tien Mun ; MORGANTI, Kai J. ; BREAR, Michael J. ; DA SILVA, Gabriel ; YANG, Yi ; DRYER, Frederick L.: *The octane numbers of ethanol blended with gasoline and its surrogates*. In: *Fuel* 115 (2014), S. 727–739
- [26] WELTSCHEV, Margit: *Untersuchungen zur Beständigkeit von Dichtungswerkstoffen unter dem Einfluss von Kraftstoffen und Heizöl mit biogenen Anteilen*. In: *Materials Testing* 58 (2016), Nr. 10, S. 894–899
- [27] WALKER, F. J.: *Effects of Bio-Fuels on Common Static Sealing Elastomers*. In: *Rubber Chemistry and Technology* 82 (2009), Nr. 3, S. 369–378
- [28] Norm DIN ISO 815-1:2016-09. *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung des Druckverformungsrestes - Teil 1: Bei Umgebungstemperaturen oder erhöhten Temperaturen (ISO 815-1:2014)*
- [29] BLOBNER, Ulrich ; RICHTER, Bernhard: *Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere : Zugversuch von Ringen (O-Ringe / Rechteckringe)*. Prüftechnische Grundlagen und wissenswerte Besonderheiten. Dezember 2014

Literaturverzeichnis

- [30] RICHTER, Bernhard: *Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere : Härteprüfung*. Mai 2014
- [31] Norm DIN ISO 7619-1:2012-02. *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Eindringhärte - Teil 1: Durometer-Verfahren (Shore-Härte) (ISO 7619-1:2010)*
- [32] BLOBNER, Ulrich ; RICHTER, Bernhard: *Fachwissen Prüfverfahren für Elastomere : Druckverformungsrestprüfung (DVR-Prüfung): Prüftechnische Grundlagen und Empfehlungen für die praktische Anwendung*. Juni 2015
- [33] Norm DIN ISO 815-1:2016-09. *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung des Druckverformungsrestes - Teil 1: Bei Umgebungstemperaturen oder erhöhten Temperaturen (ISO 815-1:2014)*
- [34] FRIEDRICH, Christoph; TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover (Mitarb.); Technische Informationsbibliothek (TIB) (Mitarb.); Stadtwerke Leipzig (Mitarb.) : *Abschlussbericht für das Verbundprojekt "Flottenaufbau mit Multiplikatoren und wissenschaftliche Begleitung"*
- [35] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (FNR) (Hrsg.): *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2013*. 10. Aufl. 2013
- [36] SCHEFTELOWITZ, Mattes ; THRÄN, Daniela: *Biomasse im EEG 2016 : Hintergrundpapier zur Situation der Bestandsanlagen in den verschiedenen Bundesländern*. Leipzig, 04.03.2016
- [37] REICHMUTH, Matthias ; LORENZ, Christian ; BEESTERMÖLLER, Christina ; NABE, Christian ; MARKGRAF, Christiane ; SCHLIEßER, Johannes ; GERSTENBERGER, Juliane ; KRAMER, Alexander ; MEGYESI, Angelika ; NEUMANN, Romek: *Marktanalyse Ökostrom*. April 2014
- [38] GARCÍA SÁNCHEZ, Juan Antonio ; LÓPEZ MARTÍNEZ, José María ; LUMBRERAS MARTÍN, Julio ; FLORES HOLGADO, María Nuria ; AGUILAR MORALES, Hansel: *Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System*. In: *Energy Conversion and Management* 74 (2013), S. 332–343
- [39] CHERRY, Christopher R. ; WEINERT, Jonathan X. ; XINMIAO, Yang: *Comparative environmental impacts of electric bikes in China*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (2009), Nr. 5, S. 281–290
- [40] ICHA, Petra ; KUHS, Gunter: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2017 : Aktualisierung auf Basis von Climate Change 15/2017*. Dessau-Roßlau, Mai 2018
- [41] THRÄN, Daniela (Hrsg.); PFEIFFER, Diana (Hrsg.); ADLER, P. (Mitarb.); BROSOWSKI, A. (Mitarb.); FISCHER, E. (Mitarb.); HERRMANN, A. (Mitarb.); MAJER, S. (Mitarb.); OEHMICHEN, K. (Mitarb.); SCHMERSAHL, R. (Mitarb.); SCHRÖDER, T. (Mitarb.); STECHER, K. (Mitarb.); STINNER, W. (Mitarb.); ZELLER, V. (Mitarb.); ZEYMER, M. (Mitarb.) : *Methodenhandbuch – Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte : Methoden zur Bestimmung von Technologiekenwerten, Gestehungskosten und Klimagaseffekten von Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“*. Leipzig, 2013 (Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ 4)
- [42] POHL, Andreas ; SCHINDLER, Thomas ; SCHUTH, Franziska: *Abschlussbericht zum Verbundhaben "Elektrifizierung von Mercedes-Benz Kleintransportern in Entwicklung und Produktion" im Rahmen des FuE-Programms "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität"*. Oktober 2011

Literaturverzeichnis

- [43] HOLZMANN, Alexander: *Elektromobilität : Test des Elektro-Transporter "Streetscooter"*. URL <https://www.handwerk-magazin.de/test-des-elektro-transporter-streetscooter/150/4/361496>. – Aktualisierungsdatum: 2018-09-25
- [44] CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (CARB): *2012 Amendments To The Zero Emission Vehicle Regulations* (idF v. 2012) (2012). URL <https://www.arb.ca.gov/regact/2012/zev2012/zevfsor.pdf>
- [45] ERTL, Gerhard (Hrsg.); KNÖZINGER, Helmut (Hrsg.); WEITKAMP, Jens (Hrsg.): *Handbook of heterogeneous catalysis*. Weinheim (Federal Republic of Germany) : VCH a Wiley Company, 2008
- [46] KOOP, Jan: *Detaillierte Modellierung der Pt-katalysierten Schadstoffminderung in Abgasen moderner Verbrennungsmotoren*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2008. Karlsruhe : Univ.-Verlag Karlsruhe, 2008
- [47] WINKLER, Alexander ; EYSSLER, Arnim ; MÄGLI, Alexandra ; LIATI, Anthi ; DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, Panayotis ; BACH, Christian: *Fuel impact on the aging of TWC's under real driving conditions*. In: *Fuel* 111 (2013), S. 855–864
- [48] SPANNHAKE, Stefan: *Der optimale Range Extender*. In: *Mobility 2.0* (2014), Nr. 3, S. 20–23
- [49] MAUS, Wolfgang ; BRÜCK, Rolf ; KONIECZNY, Roman ; HIRTH, Peter: *Die Zukunft der Katalysatortechnik für elektrifizierte Antriebsstränge : 30th International Vienna Motor Symposium 2011*. Wien, Mai 2011
- [50] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA (UNECE): *Regelung Nr. 83 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Emission von Schadstoffen aus dem Motor entsprechend den Kraftstoffanforderungen des Motors [2015/1038]* (in Kraft getr. am 22. 1. 2015). In: *Amtsblatt der Europäischen Union* 58 (2015-01-22), L 172, S. 1–249
- [51] DIESELNET.COM: *Emission Standards : EU: Cars and Light Trucks*. Emission Testing. URL <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php> – Überprüfungsdatum 2018-09-25
- [52] ERNST, Christian-Simon Ernst ; HARTER, Christian ; OLSCHESKI, Ingo ; ECKSTEIN, Lutz: *CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020*. Aachen, August 2018
- [53] DIE EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Verordnung (EU) 2017/1151 der Kommission vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission (Text von Bedeutung für den EWR)* (in Kraft getr. am 1. 6. 2017). In: *Amtsblatt der Europäischen Union* 60 (2017-06-01), L 175, S. 1–643
- [54] RIEMERSMA, Iddo ; MOCK, Peter: *Too low to be true? How to measure fuel consumption and CO₂ emissions of plug-in hybrid vehicles, today and in the future*. 28.07.2017
- [55] UNBEKANNT: *GreenREX*. URL www.greenrex.de – Überprüfungsdatum 2018-08-09

Anhang 1: Teilvorhaben Biokraftstoffe

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben „Biokraftstoffe“ befasst sich mit der Auswahl und Bewertung geeigneter Kraftstoffoptionen im Betrieb mit Range-Extender-Systemen im Wirtschaftsverkehr. Dabei wurde neben der Kraftstoffbewertung auch auf die praktische Anwendung von nicht marktüblichen Kraftstoffen eingegangen.

Zusätzlich erfolgte in Zusammenarbeit aller Projektpartner die komplexe Auslegung des REX-Systems, Bewertung beispielhafter Fahrprofile und aller begleitenden Fragestellungen wie beispielsweise Fahrzeugzulassung.

Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 Erstellung und Fortschreibung Lastenheft (anteilig)

AP 2 Auswahl eines Rang-Extender-Aggregates (anteilig)

AP 3 Biokraftstoffe (anteilig)

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Biokraftstoffe

Auf Grundlage der aktuellen politischen Diskussion wurde die betrachtete Kraftstoffmatrix hin zu Benzinsubstituten verschoben. In Folge dessen wurden E85 und der synthetische Kraftstoff STF weiter betrachtet. Während Ethanol ein bereits weitverbreitetes Substitut mit hohen THG-Minderungseffekten darstellt, könnte STF eine zukünftige Option darstellen. Ethanol wird aktuell im Wesentlichen in E5 und E10-Kraftstoff verwendet. Der hier im Projekt fokussierte E85-Kraftstoff ist seit einigen Jahren nur noch schwer erhältlich, so dass im weiteren Verlauf – auch mit Blick auf eine Projektfortführung – die Anwendung von E85 abgewägt werden muss. Bezüglich der Anwendung im Verbrennungsmotor wäre E85 sehr gut geeignet. Abgasemissionen sind mit konventionellem Benzin vergleichbar und Einschränkungen in Hinblick auf Lagerstabilität wurden nicht identifiziert. Die Materialverträglichkeit gegenüber Elastomere ist zwar eingeschränkt, fällt aber im Vergleich zu heute gebräuchlichen E10-Kraftstoff geringer aus. Der synthetische Kraftstoff STF könnte unter Umständen bezüglich Lagerstabilität und Materialverträglichkeit eine interessante Alternative darstellen. Hier existiert aber aktuell noch keine Verfügbarkeit in entsprechenden Mengen. Die schlechte Verfügbarkeit beider Kraftstoffe lässt auch die Handhabung nur mittels Betriebshoftankstellen zu, die aber auf Grund der geringen Mengen einfach dargestellt werden müssen (z. B. Betankung aus einem Kraftstofffass). Für die Anwendung solcher Betriebshoftankstellen sollte bei der praktischen Umsetzung ein Sachverständigenbüro beratend hinzugezogen werden.

Fahrprofile

Im Zeitraum Januar 2017 bis März 2017 wurde der Fahrbetrieb von vier Fahrzeugen im relevanten leichten Wirtschaftsverkehr im Raum Leipzig aufgezeichnet. Dabei wurden orts- und zeitspezifische Daten gespeichert und bei einem Fahrzeug zusätzlich ein Fahrtenbuch mit dem täglichen Kraftstoffverbrauch geführt. Bei den Fahrzeugen handelt es sich um jeweils ein Fahrzeug des Typs Renault Kangoo, Renault Trafic, Mercedes (Typ 124 Kombi) und Volkswagen Caddy-Maxi.

Anhang 1: Teilvorhaben Biokraftstoffe

Zusätzlich wurden die Daten (orts- und zeitspezifische Daten, Stromverbrauch) von zwei rein elektrisch betriebenen leichten Nutzfahrzeugen durch die Stadtwerke Leipzig zur Verfügung gestellt. Die Fahrzeugdaten sowie die zum Fahrzeug gehörigen Fahrleistungen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Mit den sechs Fahrzeugen wurde in 488 Fahrten (bzw. Tagen) in Summe 15.000 km zurückgelegt. Durchschnittlich entspricht das einer zurückgelegten Strecke von 30,7 km pro Fahrt bzw. Tag bei einer mittleren Geschwindigkeit von 44 km h⁻¹. Die maximale aufgezeichnete Fahrstrecke betrug 443 km und die maximale Geschwindigkeit 175 km h⁻¹. Die linke Grafik der Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Fahrten in Abhängigkeit der zurückgelegten Fahrtstrecke. Es wird dabei erkenntlich, dass bei knapp 90% aller Fahrten eine Strecke von weniger als 50 km pro Tag zurückgelegt wird. Die rechte Grafik der Abbildung 20 zeigt die Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit über die Fahrtdauer. Über 90% der Fahrzeit beträgt die Fahrgeschwindigkeit unter 100 km h⁻¹.

Range-Extender

Das vorhandene und als Demonstrationsobjekt ausgewählte elektrisch betriebene Nutzfahrzeug von car systems Scheil hat eine geschätzte maximale elektrische Reichweite von 80 km im Leipziger Stadtverkehr. Diese Reichweite entspricht in etwa auch den realen Reichweiten der 20 kWh Variante des StreetScooter [43]. Auf Grundlage dieser Distanz und der Auswertung in Tabelle 9 benötigt das Elektrofahrzeug bei nur 29 Fahrten bzw. Tagen eine Reichweitenverlängerung mittels Range-Extender. Das entspricht einem Anteil von ca. 6% aller Fahrten. Dabei liegt die ausstehende Fahrstrecke zwischen 0,2 und 364 km, wenn man davon ausgeht, dass die Batterie zu Fahrtbeginn jeweils zu 100% geladen ist.

Dem Elektrofahrzeug steht für die 80 km eine Batteriekapazität von 15 kWh und ein Elektromotor mit einer maximalen elektrischen Leistung von 20 kW zur Verfügung. Wenn man für die Fahrzeugbatterie und den Generator des Range-Extenders jeweils einen Wirkungsgrad von 0,9 ansetzt, müsste der Verbrennungsmotor des Range-Extender mindestens 25 kW aufbringen, um die maximale Leistung des Fahrzeugelektromotors im Fall leerer Batterien bereitstellen zu können (Tabelle 11).

Die in Tabelle 12 dargestellten Range-Extender-Systeme sind aktuell nur eingeschränkt verfügbar. Diese Systeme verfügen jeweils über einen benzinbetriebenen Ottomotor als VKM. Entsprechend der Leistungsanforderung von 25 kW ist das System Engiro RE 20-3 u. a. auf Grund des zu geringen Leistungsbereichs für die Anwendung nicht geeignet. Mit der eingesetzten VKM bietet es auch nicht die Möglichkeit einer zielgerichteten Abgasnachbehandlung. Der RE 40 ist mit 40 kW überdimensioniert und als 3-Zylinderaggregat auch vergleichsweise groß und schwer. Er entfällt ebenfalls für die geforderte Anwendung. Auf Grund der besten Verfügbarkeit wurde in der hier betrachteten Projektphase 1 das System von BMW favorisiert. Der Leistungsbereich von maximal 28 kW liegt minimal über den geforderten 25 kW, sodass der Range-Extender ggf. mit Nebenaggregaten belastet werden kann.

Es ist anzumerken, dass der i3 Range-Extender nur als Austauschaggregat über BMW beschafft werden kann. Damit sind sowohl ein höherer logistischer Aufwand als auch Installationsbedarf notwendig, da alle Zusatzkomponenten wie Kraftstoffpumpe, Steuergerät usw. ebenfalls beschafft und adaptiert werden müssen. Die dazugehörigen Steuergeräte des BMW i3 REX sind für Anwender nicht frei zugänglich bzw. programmierbar, sodass eine Änderung der Steuerung der Verbrennungskraftmaschine nur sehr aufwendig dargestellt werden kann. Um eine hinterlegte Applikation zu verstehen, anpassen und verwenden zu können, müssten verschiedenste Fahrsituationen des gesamten Fahrzeugs BMW i3 in den Steuergeräten simuliert werden, welches

Anhang 1: Teilvorhaben Biokraftstoffe

auf Grund der Kodierung der CAN-Signale sich als sehr aufwendig erwiesen hat und auch künftig ein Problem darstellen wird.

Die Verbrennungskraftmaschine ist für den Betrieb von Super-Benzin ausgelegt. Eine Umstellung auf E85-Kraftstoff bedarf weiteren Planungs- und Umrüstaufwandes sowie Anpassungen von Steuerung und Regelung der Kraftstoffzufuhr.

Der Verbrennungsmotor des BMW i3 Range-Extenders hat nach eigenen Beobachtungen einen Kraftstoffverbrauch von ca. 6 Liter Super-Benzin (E5 nach DIN EN 228) auf 100 km Fahrstrecke. Wird stattdessen E85 als Kraftstoff verwendet, sollte sich der aus der Literatur bekannte Mehrverbrauch von ca. 30% einstellen, das einem Gesamtverbrauch von 7,8 Litern entspricht.

Auf Grundlage der beiden Verbräuche für Super-Benzin und E85 kann das benötigte Tankvolumen dimensioniert werden. Tabelle 13 stellt drei verschiedene Varianten der Auslegung vor, wobei Bezug auf die hier im Bericht beschriebenen Fahrstrecken genommen wird.

Mit Variante 1 können mittels Range-Extender zusätzlich zur elektrischen Reichweite weitere 80 km zurückgelegt werden. Diese Eingrenzung entspricht den gesetzlichen Vorgaben für Elektrofahrzeuge in Kalifornien, bei dem die Range-Extender-Reichweite nicht die Batterieelektrische Reichweite überschreiten darf, um noch als Elektrofahrzeug deklariert werden zu können [44]. Bei dieser Reichweite müsste im E85-Betrieb das Tankvolumen dann ca. 6,3 Liter entsprechen. Mit dieser Dimensionierung von 6,3 Liter und vollständig aufgeladener Batterie könnten mit einer Tankfüllung weitere 20 Fahrten und somit 479 Fahrten aus den aufgezeichneten Fahrprofilen mit dem Fahrzeug zurückgelegt werden.

In Variante 2 können 90% (26 Fahrten) der 29 Fahrten mit einer Tankfüllung abgedeckt werden. Damit könnten auf Grundlage der aufgezeichneten Fahrprofile eine Distanz von 190 km unter Nutzung des Range-Extenders zurückgelegt werden. 190 km entsprechen bei einem E85-Verbrauch von 7,8 Litern einem Tankvolumen von ca. 15 Litern.

In Variante 3 können alle Fahrten mit einer Tankfüllung abgedeckt werden. Dafür müsste ein Tankvolumen von 29 Litern bei E85-Kraftstoff zur Verfügung stehen.

Variante 3 wird auf Grund des hohen Tankvolumens und der nicht vorhandenen Notwendigkeit unbegrenzter Reichweiten als nicht praktikabel betrachtet, sodass letztendlich die Entscheidung zwischen Variante 1 und 2 erfolgt. Unter der Annahme, dass eine Umrüstung nur für den deutschen bzw. europäischen Markt erfolgen soll, kann das Tankvolumen letztendlich auch größer als 6,3 Liter dimensioniert werden.

Anhang 2: Teilvorhaben Abgasnachbehandlung

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben „Abgasnachbehandlung“ befasste sich mit der Entwicklung eines geeigneten Abgasnachbehandlungssystems für die Anwendung an der Verbrennungskraftmaschine (VKM) eines Range-Extenders im Wirtschaftsverkehr.

Unter Zugrundelegung der getroffenen Entscheidung zur einzusetzenden Verbrennungskraftmaschine (VKM) war eine geeignete AGN-Strategie zu entwerfen, ein entsprechender Prototyp zu entwickeln und zu bauen sowie dessen Funktionalität am Motorenprüfstand zu testen und zu bewerten.

Bei der AGN-Auslegung waren die Bedingungen einer späteren Fahrzeugintegration zu berücksichtigen.

Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 Erstellung und Fortschreibung Lastenheft (maßgeblich)

AP 2 Auswahl eines Rang-Extender-Aggregates (anteilig, begleitend)

AP 4 Abgasnachbehandlung (maßgeblich)

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Für einen konkretisierten Einsatzfall eines potenziellen Range-Extender-Systems in einem Kleintransporter des Einsatzgebietes leichter Wirtschaftsverkehr ist eine geeignete AGN-Maßnahme definiert und in einem neu geschaffenen Prototyp in Form einer TWC-Technik umgesetzt worden.

Auf grundlegende Entscheidungen bezüglich der Auswahl einer geeigneten Verbrennungskraftmaschine (VKM) wurde im Bericht in Abschnitt 2.1.1 ausführlich hingewiesen. Demnach kam es schlussendlich zu der Festlegung, die künftigen Anstrengungen auf ein auf dem Otto-Prinzip basiertes Grundaggregat zu fokussieren.

Die Beschaffung einer realitätsnahen VKM stellte eine Herausforderung dar, da sie nur bedingt am Markt frei verfügbar ist. Eine konkrete VKM stellt aber die Grundvoraussetzung für die zielgerichtete Entwicklung und Optimierung einer AGN-Technik dar, da VKM und AGN immer konkret aufeinander abgestimmt sein müssen.

Mit der Beschaffung des Range Extenders des Fahrzeuges BMW i3 REX war die VKM mit dem 2-Zylinder Motor W20 mit einem Hubraum von 647cm³ vorgegeben und die Katalysatorabmessung definierbar. Die Konstruktion eines Cannings und die Anbindung am Motor wurden von den Einbaubedingungen am konkreten Aggregat abgeleitet.

Als Katalysatorträger wurde eine Metallfolienbauweise zurückgegriffen, der von einem renommierten Beschichter, nämlich der Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG, freundlicher Weise kostenneutral zur Verfügung gestellt worden ist. Die ursprünglich als Fremdleistung geplanten Kosten für die Beschaffung der AGN-Komponenten konnten somit eingespart werden und wurden auch nicht abgerufen.

Für die Erprobung der AGN-Funktionalität wurde eine Prüfstands Umgebung geschaffen, die im Wesentlichen die späteren Komponenten eines Elektrofahrzeuges beinhaltet bzw. diese nachbilden

Anhang 2: Teilvorhaben Abgasnachbehandlung

kann. Dies stellt eine Änderung gegenüber der ursprünglichen Planung dar, die von einem herkömmlichen Betrieb einer VKM an einem Motorenprüfstand ausgegangen war.

Der Aufbau des neu geschaffenen Prüfstandes ist im Bericht in Abb. 25 umfassend dokumentiert.

Eine entsprechende Verifizierung der als Prototyp neu geschaffenen AGN-Komponenten wurde in Form von Testläufen von stationären Lastzuständen mit Emissionsmessungen durchgeführt. Auf Schwierigkeiten hinsichtlich des nicht frei verfügbaren Motorkennfeldzugriffes wurde gleichfalls im Bericht mehrfach eingegangen.

Der realisierten AGN-Maßnahme konnte unter den vorhandenen Gegebenheiten trotzdem ein positives Ergebnis hinsichtlich des Emissionsabbaus bescheinigt werden. Es wird eingeschätzt, dass die als Prototyp eingesetzte Komponente weiteres Entwicklungs- und Optimierungspotenzial besitzt.

Der neu geschaffene Prüfstandsaufbau und der AGN-Prototyp stehen für weitere Untersuchungen in einer möglichen Projektfortsetzung zur Verfügung.

Die Frage der AGN-Funktionalität in Verbindung mit einem alternativen Kraftstoff (E85) im Einsatz in einem Range Extender bleibt bis dato unbeantwortet, da noch keine Tests absolviert worden sind. Dies war aber auch noch nicht Gegenstand der Arbeit in Projektphase 1.

In Auswertung einer Literaturrecherche sind jedoch keine prinzipiellen Bedenken hinsichtlich einer negativen Wirkung von E85 auf die AGN-Komponenten ausgemacht worden.

Der Beschreibung und Bestimmung der Wechselwirkung der motorischen Emissionsentstehung und der Emissionsreduktion mittels der TWC-Technik unter Verwendung von Kraftstoffsubstituten wird in künftigen Entwicklungsschritten aus Sicht der AGN-Applikation große Bedeutung beigemessen. Zum Teil widersprüchlichen Angaben zum Emissionsverhalten sind konkrete Untersuchungen mit Blick auf die kraftstoffbeeinflusste Funktionalität der AGN-Komponenten zu widmen.

Es wird eingeschätzt, dass bei Fortführung des Projektes auch in Fragen der Abstimmung und Optimierung der AGN zumindest der uneingeschränkte Zugriff auf die Motorsteuerung notwendig sein wird.

In besonderer Betrachtung sind bei Projektfortsetzung auch spezielle Tests für die Bewertung der Langzeitstabilität der AGN-Komponenten einzuplanen. Dabei kann auf dem erreichten Erkenntnisstand zur Systemauslegung aufgesetzt werden.

Die z. T. prägnanten Änderungen in der Aufgabenstellung zur AGN-Auslegung, die sich im Verlauf der Projektphase 1 aus objektiven Gründen ergeben haben, führten zu einem reduzierten Investitionsbedarf und auch zu einem reduzierten Bedarf an Verbrauchsmaterial. So wurde die Gestaltung der Prüfstandsperipherie durch Einsatz von eigener oder geliehener Technik mit geringerem finanziellem Aufwand möglich. Da es zu keinem Einsatz von Dieselmotorentchnik kam, fielen die notwendigen Investitionen für die Prüfstands Anpassung geringer aus. Die nicht eingesetzten Mittel können ggf. einer Projektphase 2 zugeführt werden.

Anhang 3: Teilvorhaben Fahrzeugintegration

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Es soll ein Range Extender ausgewählt, beschafft und für den Prüfstandsbetrieb angepasst werden. Auf dem Prüfstand soll die Möglichkeit einer Nutzung alternativer Kraftstoffe hinsichtlich Abgasnachbehandlung ermittelt werden.

Weiterhin sollen Vorbetrachtungen für eine Fahrzeugintegration hinsichtlich mechanischer Integration, Schnittstellen, Datenkommunikation, Steuerung, Leistungselektronik und Straßenverkehrszulassung angestellt werden. Die Ergebnisse sollen dazu verwendet werden können, diesen Range Extender universell als Nachrüstlösung für vorhandene E Fahrzeuge anbieten zu können.

Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 Erstellung und Fortschreibung Lastenheft (anteilig)

AP 2 Auswahl eines Rang-Extender-Aggregates (maßgeblich)

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Vorbetrachtung / Lastenheft

In Zusammenarbeit aller Projektpartner wurde das Lastenheft erstellt. Hier konnten Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten und aktuellen Umsetzungen von Elektrofahrzeug, Konvertierungen sowie dem Praxisbetrieb von Elektrofahrzeugen eingebracht werden.

Das Lastenheft wurde je nach aktuellem Arbeitsstand und Erkenntnissen fortgeschrieben.

Recherche

Es wurden Recherchen zu aktuell verfügbaren Range Extendern in Abstimmung mit den Projektpartnern durchgeführt. Im Ergebnis konnte kein geeignetes universelles Produkt ermittelt werden, womit die Entscheidung getroffen wurde, einen REX von BMW einzusetzen (siehe gemeinsamer Bericht). Der REX war nicht als komplexe Baugruppe beschaffbar, so dass dieser aus einzelnen Komponenten wie Grundmotor, Starter- Generator und peripheren Bauteilen montiert werden musste. Dazu waren Recherchen zu benötigten Teilen und deren Bezugsmöglichkeiten erforderlich.

Fahrprofile

Als Grundlage für die Auslegung des REX wurden Datenlogger in verschiedene Fahrzeuge eingebaut, um Einsatzszenarien von Handwerksbetrieben im Realbetrieb aufnehmen zu können.

Im Zeitraum Januar 2017 bis März 2017 wurde der Fahrbetrieb von vier Fahrzeugen im relevanten leichten Wirtschaftsverkehr im Raum Leipzig aufgezeichnet. Dabei wurden orts- und zeitspezifische Daten gespeichert und bei einem Fahrzeug zusätzlich ein Fahrtenbuch mit dem täglichen Kraftstoffverbrauch geführt. Bei den Fahrzeugen handelt sich um jeweils ein Fahrzeug des Typs Renault Kangoo, Renault Trafic, Mercedes 124 Kombi und Volkswagen Caddy-Elektro.

Die Datensätze der Fahrprofile wurden dann zur Auswertung durch das DBFZ bereitgestellt.

Anhang 3: Teilvorhaben Fahrzeugintegration

Versuchsaufbau

Nach Beschaffung der Einzelkomponenten des BMW-REX durch Agromotive wurden diese durch car systems Scheil zu einem REX-Aggregat montiert und um weitere, erforderliche Komponenten, wie z. B. Wasserkühler, Lüfter und Sensoren für Thermomanagement und Kraftstoffpumpe mit Druckregelung, zu einem funktionsfähigen Aufbau ergänzt. Dazu wurde ein Rahmengestell für die Geräteaufnahme projektiert und gefertigt. Entsprechende Medienanschlüsse für den Laborbetrieb wurden geschaffen.

Nach Inbetriebnahme des REX-Systems bei car systems Scheil ist das Aggregat bei Argomotive um das Hochvoltbatteriesystem, eine elektronische Belastungseinrichtung sowie eine Abgasmesstechnikanbindung ergänzt und in ein Prüfstandssystem eingebunden und mit unserer Unterstützung in Betrieb genommen worden.

Ansteuerung REX

Um den REX als Einheit von Verbrennungsmotor und Generator später im Prüfstandsbetrieb betreiben zu können, war es zunächst erforderlich, die Datenkommunikation im komplexen System eines BMW i3 Fahrzeugs, welches vom DBFZ bereitgestellt werden konnte, in verschiedenen Betriebszuständen im Realbetrieb zu loggen und umfassend auszuwerten. Es wurde die Datenstruktur teilweise ermittelt und entschlüsselt sowie einzelne CAN-Bussignale identifiziert und selektiert. Mit diesen Informationen war dann ansatzweise eine Restbussimulation möglich. Die aufgenommenen Daten wurden analysiert und ausgewertet, sowie die Möglichkeiten von Datenanpassungen ermittelt. Um aktuelle Daten zu erhalten, war es erforderlich, an dem Musterfahrzeug Steuergeräte-Programmupdates durchzuführen.

Um die Funktionsfähigkeit der original BMW Steuergeräte für Motorsteuerung und Hochvoltsteuerung herzustellen, wurden diese programmiert. Weiterhin wurde ein individuell programmierbares Zusatzsteuergerät zur Ansteuerung der Peripherie, Realisierung der Restbussimulation und zur Funktionalität als Gateway, sowie als Schnittstelle zum Steuerrechner (und später zum Fahrzeug) konzipiert, programmiert und eingebunden.

Aus den aufbereiteten Datensätzen wurde ein Ansteuerprofil für den Prüfstandbetrieb erstellt und programmiert, welches eine Ansteuerung über den Leitreechner und eine Abfrage verschiedener Daten bzw. Istwerte ermöglicht. Diese Datensätze bilden die Basis zur Kommunikation mit dem Fahrzeug bei Fahrzeugintegration, wobei hier bei potenzieller Projektfortführung basierend auf dem erreichten Arbeitsstand noch individuelle Anpassungen, je nach später betrachtetem Fahrzeugtyp, erforderlich werden. Es hat sich herausgestellt, dass auf Grund der sehr komplexen Datenstruktur im BMW i3 REX und bei erlebter mangelnder Kooperation seitens BMW eine komplette Restbussimulation nur mittels sehr aufwendiger Reengineeringleistung zur Entschlüsselung der Datenstrukturen gewährleistet werden kann. Diese wäre jedoch erforderlich, um den REX mit den vorhandenen BMW-Steuergeräten gänzlich individuell im gesamten Range von Drehzahl und Leistung ansteuern zu können. Hier ist künftig zu entscheiden, ob es wirtschaftlicher ist, den Motor mit einer separat erstellten Motronic-Steuerung neu zu konfigurieren. Diese Abwägung sollte jedoch Inhalt einer folgenden Projektphase sein, wofür ggf. auch ein weiterer Projektpartner hinzugezogen werden könnte.

Datenkommunikation

Es erfolgte die Spezifikation der entsprechenden Datenschnittstellen, um den Datenaustausch zwischen Fahrzeug und REX-System gewährleisten zu können. Diese wurden so definiert, dass eine Anpassung auch anderer Fahrzeugtypen möglich ist. Dafür wird ein speziell entwickeltes, individuell programmierbares Steuergerät eingesetzt.

Spannungsanpassung / Leistungselektronik

Die perspektivisch angestrebte Kopplung des Range-Extender-Systems in verschiedene Fahrzeugtypen setzt voraus, dass das System bzgl. Spannungslage und Leistungsregelung auf die Gegebenheiten des jeweiligen Fahrzeugtyps eingestellt werden kann. Daher wurde im Rahmen des Projekts das Hochvoltssystem (HV-System) des verfügbaren Fahrzeuges BMW i3 REX analysiert und die Möglichkeit zur Anpassung an unterschiedliche Spannungsebenen zur Fahrzeugintegration in ein Fahrzeug im Sinne der Projektzielstellung ansatzweise untersucht.

Für eine eventuell erforderliche Anpassung der Spannungslage ist eine zusätzliche Leistungsregelung erforderlich. Um dies zu perspektivisch zu realisieren wurden erste Recherchen zu Möglichkeiten der HV-Spannungsanpassung und Stromregelung durchgeführt. Je nach Spannungsdifferenz sind einstufige oder zweistufige (über Zwischenspannung) Konzepte geeignet. Eine größere Auswahl an Leistungs- und Regelungskomponenten bietet die Firma Vicor. Der modulare Ansatz und die Angebotsbreite (Spannungsebenen, isolierende und nicht isolierende Wandlermodule sowie Abwärts- als auch Aufwärtswandler) könnten uns in die Lage versetzen, eine Eigenentwicklung für die spezifischen Anforderungen einer Leistungsregelung im Fahrzeug zu realisieren.

Mit Hilfe von Versuchsaufbauten haben wir bereits Erfahrungen bis zu einer Leistung von 1,5 kW und dem Einsatz von Vicor-Komponenten sammeln können. So wurden prototypisch Leistungsstufe und Steuerung inkl. Fahrzeugkopplung für einen Energietransfer von 48 VDC zu 320 VDC mit Zwischenspannung in Funktions- und Systemtests erprobt. Die hier gemachten Erfahrungen bei der Komponentenauswahl, der Ansteuerung und der thermischen Regelung können sehr flexibel auf reine Hochvoltssysteme übertragen werden. Nachfolgend sind die Voruntersuchungen kurz dargestellt.

Systemtest Energietransfer 48VDC → 320VDC bis zu 1,5kW

- Funktions- und Performancetests am hauseigenen Versuchsfeld (Abbildung 39)



Abbildung 39 Versuchstand car systems Scheil. © car systems Scheil

Erprobung Stromregelung 48 V Entladung, Leistungsstufe und Ansteuerung für 1,5 kW

- Erprobung A-Muster der Leistungsstufe für 48 V Boost Converter bis 1,5kW (Abbildung 40)

Anhang 3: Teilvorhaben Fahrzeugintegration

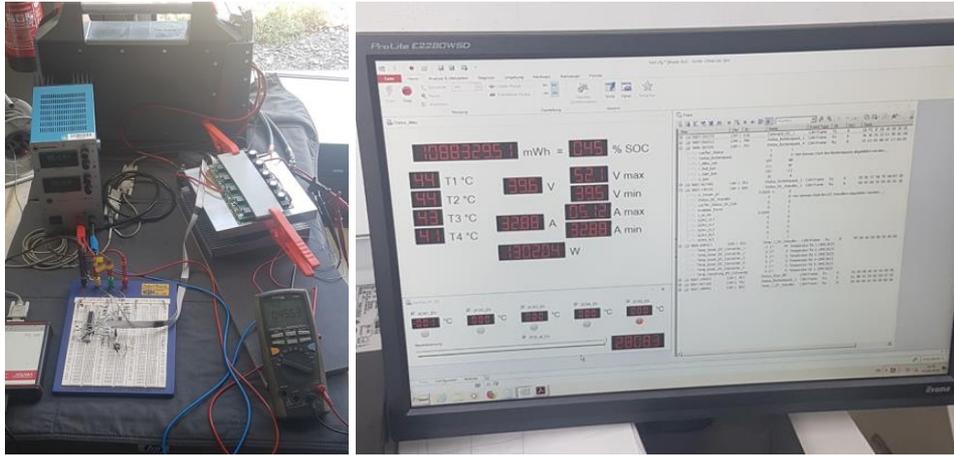


Abbildung 40 Erprobung Stromregelung 48-V-Einbindung. © car systems Scheil

Bauraum

Der erforderliche Bauraum wurde definiert, am Demonstratorfahrzeug geprüft und festgestellt, dass das geplante Demonstratorfahrzeug bezüglich Bauraum und Lastaufnahmemöglichkeiten sehr gut geeignet ist. Das vorhandene Demonstratorfahrzeug hat einen Bauraum von 98 cm (Breite), 50 cm (Höhe) und 52 cm (Länge) verfügbar. Siehe Abbildung 35 und Abbildung 36

Straßenverkehrszulassung

Die Anforderungen an die Straßenverkehrszulassung wurden mit der DEKRA erörtert und abgestimmt, siehe Ausschnitt der Angebotslegung DEKRA in Tabelle 18.

Die im gemeinsamen Bericht bereits erwähnten Unbestimmtheiten bezüglich einer Einordnung des REX-Fahrzeuges in aktuelle Abgasgesetzgebungen erschweren der Prüfstelle DEKRA ebenfalls genauere Beschreibung der Voraussetzungen für die Erteilung der Straßenverkehrszulassung für Elektrofahrzeuge mit nachgerüsteten REX. Nach Auffassung der DEKRA richten sich die Abgasbestimmungen nach dem Erstzulassungsdatum des Fahrzeuges. Damit wäre bei Verwendung des von car systems Scheil bereitgestellten Elektrofahrzeuges die Schadstoffklasse Euro 4 das Zulassungskriterium. Im Gegensatz dazu müssen Fahrzeuge mit einer Erstzulassung nach 2018 die Vorgaben der Euro 6d einhalten. Die DEKRA weist im weiteren Verlauf darauf hin, dass sie beim Einsatz des BMW i3 Systems keine Bedenken sieht, eventuell noch bei der Bestimmung der Kraftstoffverdunstung aus dem Tank heraus. Sollte BMW ein bestandenes Abgasgutachten dem Motor mit beifügen, könnte eine erneute Abgasprüfung eventuell komplett vermieden werden.

Ergebnis

Die Integration des REX in das bei car systems Scheil vorhandene Schulungsfahrzeug als Demonstrator ist möglich. Im Ergebnis der einzelnen Punkte wurde erkannt, dass eine universelle Fahrzeugintegration technisch möglich ist. Jedoch ist aus dem in Bericht beschriebenen Gründen eine umfangreiche Anpassung der vorhandenen Range-Extender hinsichtlich Steuerung erforderlich. Es müssen zudem die Kriterien für die Straßenzulassung anhand der jeweils vorliegenden Komponenten und Fahrzeuge individuell ermittelt werden.

Dies konnte auf Grund des Umfanges in diesem Projekt nicht als abschließende Vorbereitung für eine reibungslose, universelle Fahrzeugintegration umgesetzt werden.

Anhang 3: Teilvorhaben Fahrzeugintegration

Deshalb ist aus Sicht von car systems Scheil eine zweite Projektphase erforderlich, in der ein Range-Extender in einem Demonstrator eingebaut wird und in diesem Zusammenhang die sich aus dem bisherigen Projektverlauf ergebenden Erkenntnisse Berücksichtigung finden.

Ausführlich ist dies auch im Punkt „Zusammenfassung Range Extender“ und im Abschnitt 2.1.9 des gemeinsamen Berichtes beschrieben.