

Schlussbericht




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

Teilvorhaben: GreenREX Konzept zur Herstellung und Vermarktung

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Zuwendungsempfänger: Rheinmetall Automotive AG	Förderkennzeichen: 01MY13001B
Projektleiter: Dipl.-Ing. Jürgen Niehues	Tel.: 07132 – 33 - 43 41 Email: juergen.niehues @de.rheinmetall.com
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.01.2014 bis: 30.09.2018	
Datum: 25.03.2019	


.....

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1 Aufgabenstellung.....	2
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	4
4.1 Range-Extender-Konzepte.....	4
4.2 Marktanalyse von Erdgas-Fahrzeugen und Erdgas-Infrastruktur.....	6
4.3 Bisherige Arbeiten des Projektpartners Rheinmetall Automotive.....	7
5 Literaturverzeichnis	9
6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
7 Arbeiten und Ergebnisse.....	11
8 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens	18
9 Veröffentlichungen	18

1 Aufgabenstellung

Ziel des Gesamtvorhabens ist die Darstellung eines zu 100% aus regenerativ erzeugbaren Energieträgern betreibbaren Elektrofahrzeugs mit verlängerter Reichweite, was durch eine elektrische Traktionsbatterie und einen Gasmotor realisiert wird. Bei den zu verwendenden Energieträgern handelt es sich um regenerativen Strom und regenerativ erzeugtes Bioerdgas. Ferner die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des Produktes und die Vorbereitung der Vermarktung.

Das zugrundeliegende Teilvorhaben hat als maßgebendes Ziel die Erstellung eines Konzepts zur Herstellung und Vermarktung des zu entwickelnden Bioerdgas-Range-Extenders (GreenREX) unter Einbringung des Know-hows eines langjährig erfahrenen Automobilzulieferers und unter Beisteuerung von Erkenntnissen aus vorhergehenden Entwicklungen innerhalb des Bereichs Elektromobilität, speziell des in dieses Projekt eingebrachten benzinbetriebenen Range-Extenders (BasisREX).

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Als einer der 100 weltweit größten Automobilzulieferer nimmt die Rheinmetall Automotive AG mit ihrer Kompetenz in den Bereichen Luftversorgung, Schadstoffreduzierung, Pumpen, Kolben, Motorblöcke und Gleitlager Spitzenpositionen auf den jeweiligen Märkten ein. Die Produktentwicklung erfolgt in enger Kooperation mit renommierten Automobilherstellern.

In der Abteilung Neue Antriebstechnologien des Zentralbereichs Forschung & Technologie, die dieses Projekt betreute, werden Konzepte für alternative Antriebe mit dem Focus auf Elektromobilität entwickelt; so auch der Range-Extender, der als Basisaggregat in dieses Verbundprojekt eingebracht wurde.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtprojekt gliederte sich in sieben Arbeitspakete (AP). Abbildung 1 ist der Projektstrukturplan mit den übergeordneten Arbeitspaketen, deren Zeitplan mit Meilensteinen und den Verantwortlichen zu entnehmen.

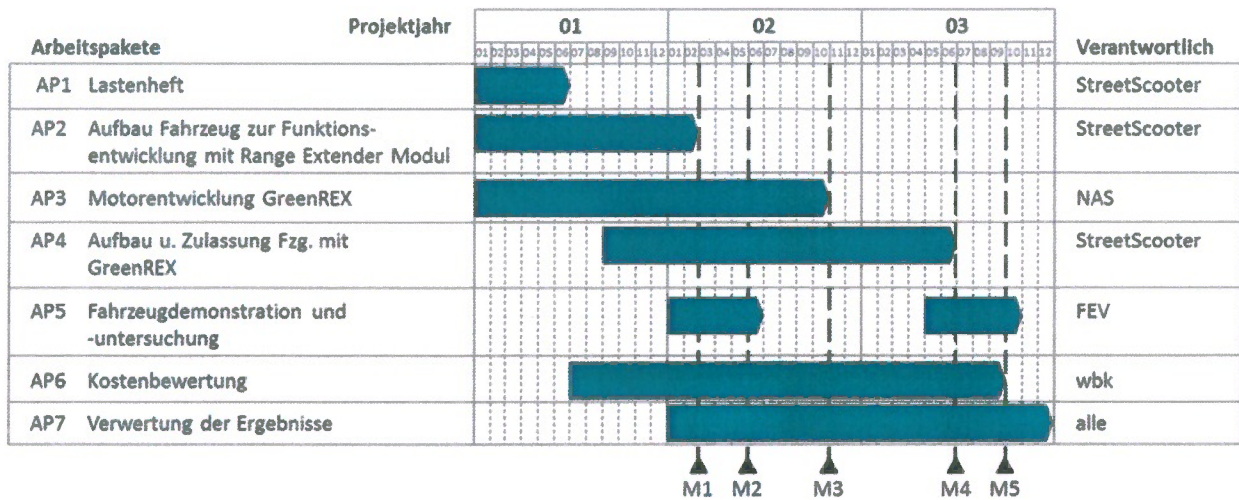


Abbildung 1: Projektstrukturplan

Rheinmetall Automotive (RHA) war mit folgenden Beiträgen an allen Arbeitspaketen beteiligt:

- AP 104:** Definition und Abstimmung von Entwicklungszielen
- AP 204:** RHA-Beitrag zum Aufbau und zur Zulassung des Fahrzeugs mit BasisREX
- AP 312:** RHA-Beitrag zur Komponenten- und Werkstoffauswahl für Gasbetrieb
- AP 404:** RHA-Beitrag zur Zulassung und Feinabstimmung des Fahrzeugs mit GreenREX
- AP 504:** RHA-Beitrag zur Fahrzeugdemonstration und –untersuchung
- AP 607:** RHA-Beitrag zur Kostenbewertung eines Produktionskonzeptes GreenREX
- AP 608:** RHA-Beitrag zur Fertigungsplanung und Vermarktung GreenREX

Eine wesentliche Änderung im Projektablauf ergab sich daraus, dass Streetscooter aus Budgetgründen nicht wie geplant den zweiten Motor (für Gasbetrieb) bestellen konnte. Die Beschaffung wurde auf FhG NAS übertragen. Durch diese Mittelumwidmung mussten Einsparungen vorgenommen werden, die dadurch erreicht wurden, dass auf einen zweiten Motor verzichtet wurde und der BasisREX zum GreenREX umgebaut wurde. Diese Abstimmungen zogen sich so lange hin, dass eine kostenneutrale Verlängerung um 1 Jahr beantragt und genehmigt wurde. Eine weitere Verzögerung ergab sich bei der Beschaffung von Bauteilen für den Umbau auf Gasbetrieb, die vom Zoll deutlich verzögert freigegeben wurden. Anschließend wurde der Aufbau des GreeREX-Fahrzeug durch einen fehlerhaften Generator und einen Batterieschaden aufgehalten, so dass eine Verlängerung um weitere 9 Monate erforderlich wurde.

Tabelle 1 ist der Zeit- und Personaleinsatz für die Arbeitspakete von Rheinmetall Automotive zu entnehmen.

AP Nr.	Start Plan	Start Ist	Ende Plan	Ende Ist	PM bewilligt	PM akkumuliert
104	01/2014	01/2014	10/2014	10/2014	2,5	2,0
204	11/2014	12/2014	02/2015	02/2016	1,8	1,0
312	02/2015	02/2015	04/2015	01/2017	0,75	1,4
404	07/2018	07/2018	08/2015	09/2018	0,9	0,2
504	01/2015	01/2016	09/2018	09/2018	2,4	0,7
607	03/2015	01/2015	06/2016	02/2017	3,0	2,8
608	10/2015	09/2015	09/2018	09/2018	2,0	1,1
Gesamt					13,4	9,2

Tabelle 1: Zeit- und Personaleinsatz für die Arbeitspakete des Arbeitsplans

Bei einigen Arbeitspunkten blieb der Personaleinsatz hinter den geplanten Aufwänden zurück. Das lag hauptsächlich daran, dass gegenüber der ursprünglichen Planung nur ein Fahrzeug auf- bzw. umgebaut wurde. Diese stand auch nur kurz für Abstimmungen und Untersuchungen zur Verfügung und konnte während der Projektlaufzeit als GreenREX noch nicht präsentiert werden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Range-Extender-Konzepte



* Bildquellen: Internetseiten der Hersteller

Abbildung 2: Übersicht über Fahrzeuge mit Range-Extender

Zum Zeitpunkt der Antragstellung waren auf dem Markt wenige serienreife Fahrzeuge mit Range-Extender-Konzept erhältlich. Bei General Motors (GM) wurden für den europäischen Markt der Opel Ampera und für den amerikanischen Markt der Chevrolet Volt angeboten. Der GM-Konzern hatte 2012 insgesamt 6.000 Einheiten des Opel Ampera und 23.641 Einheiten der baugleichen Variante Chevrolet Volt verkauft [5]. Im Juli 2013 wurde vom Automobilhersteller BMW das Modell i3 vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein reines Elektrofahrzeug, für das optional ein benzinbetriebener Range-Extender hinzugekauft werden kann. Das Fahrzeug ist seit Ende 2013 im Handel erhältlich. Abbildung 2 gibt einen Überblick über 2013 in Deutschland erhältliche Range-Extender-Fahrzeuge sowie über einige Konzeptfahrzeuge und Studien, die mit einem Reichweitenverlängerer ausgestattet sind.

Zur Zeit des Projektbeginns gab es viele Lösungsvorschläge unterschiedlicher Unternehmen wie ein Range-Extender, als Verbrennungsmotor ausgeführt, aussehen kann. Die Konzepte reichten von Modulen, die bereits in Konzeptfahrzeuge integriert wurden (z.B. Wankelmotor der AVL List GmbH verbaut im Audi A1 e-tron [3] bis hin zu Aggregaten, die sich in einem frühen Prototypenstatus befinden (z.B. Freikolbenlineargenerator des DLR [4]). In Abbildung 3 sind damalige Entwicklungen im Bereich Range-Extender in einer Übersicht dargestellt.



Abbildung 3: Range-Extender Entwicklungen, Stand 2013

Zum damaligen Zeitpunkt wurden keine Gasmotoren als Range-Extender in serienreifen Fahrzeugen eingesetzt. Anders als der in diesem Gesamtforschungsvorhaben zu entwickelnde Biogaskolbenmotor boten bisherige Konzepte regenerativ betriebbarer Range-Extender andere Lösungsvorschläge (s. Abbildung 4). Der vom DLR entwickelte Freikolbenlineargenerator (FKLKG) sollte künftig als Range-Extender-Modul in Elektrofahrzeugen einsetzbar sein, befand sich aber noch auf einem Stand, der eine Fahrzeugintegration oder gar

eine Serienproduktion nicht zuließ. Der FKLG arbeitet ähnlich wie ein herkömmlicher Verbrennungsmotor. Er wandelt jedoch die lineare Bewegung der Kolben nicht erst in eine Drehbewegung der Kurbelwelle um, sondern erzeugt direkt elektrische Energie [4].

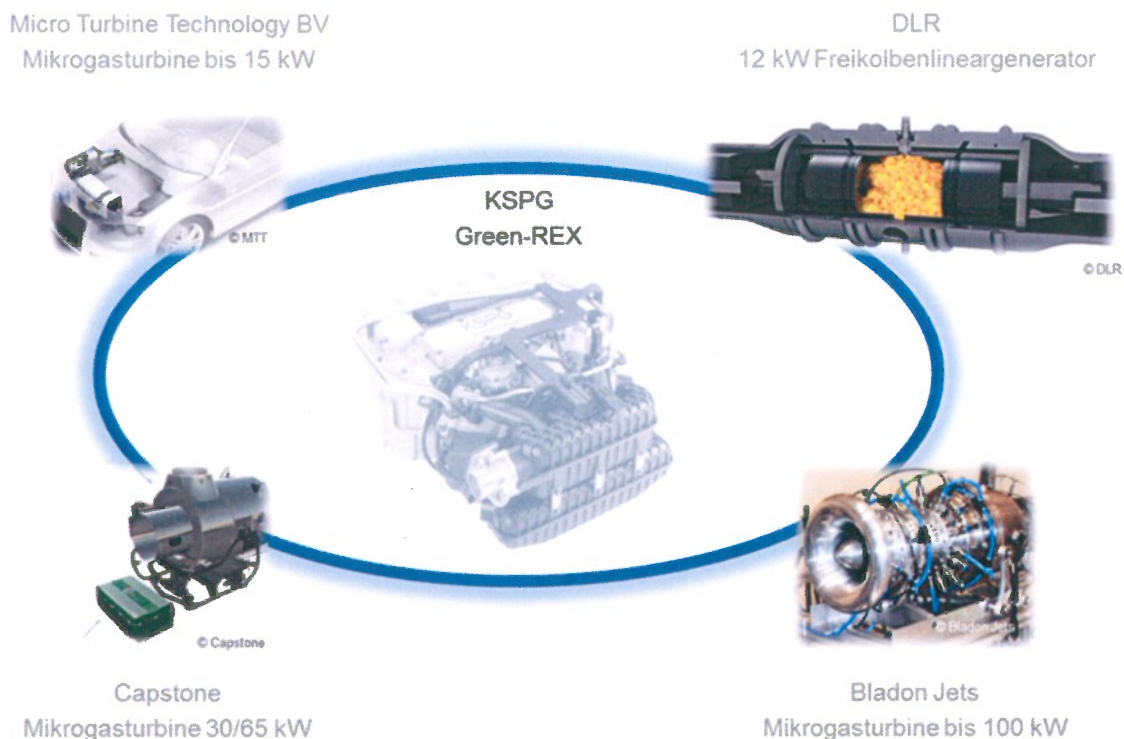


Abbildung 4: Regenerativ betriebbare Range-Extender-Konzepte

Gasturbinen als Range-Extender, wie die in Abbildung 4 dargestellten Konzepte von MTT [7], Capstone [8] und Bladon Jets [9], haben sich bisher aufgrund der hohen Kosten für die notwendigen hochtemperaturfesten Werkstoffe und dem vergleichsweise hohem Bauraumbedarf nicht durchsetzen können. Die Mikrogasturbine der Firma Bladon Jets wurde im Jaguar C-X75 Concept verbaut [10]. Dieses Fahrzeug hat es jedoch nicht über eine Studie hinaus geschafft.

In einer Konzeptstudie von Opel wurde auf der IAA 2013 erstmals ein Erdgas-Range-Extender auf Basis eines Kolbenmotors vorgestellt. Bei der Studie handelte es sich um ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug mit Reichweitenverlängerer. Der Range-Extender ist ein Dreizylinder-Turbo-Benzindirekteinspritzer, der mit CNG betrieben werden kann. Opel betonte, dass für den Monza aber auch andere Antriebskonzepte denkbar seien. [11]

4.2 Marktanalyse von Erdgas-Fahrzeugen und Erdgas-Infrastruktur

Der Fahrzeugbestand an CNG-Fahrzeugen hat sich vom Jahr 2005 bis zum Jahr 2011 mehr als verdreifacht. Waren 2005 nur 21.571 Fahrzeuge zugelassen, waren es Anfang 2011 bereits über 70.000 Fahrzeuge [12]. Laut der erdgas mobil GmbH lag der Bestand an mit CNG betriebenen Fahrzeugen damals bei über 90.000 Fahrzeugen. Einer Studie der Deutschen Energie-Agentur zufolge wären bis zum Jahr 2020 auf Deutschlands Straßen sogar bis zu

1,4 Millionen Erdgasfahrzeuge möglich.[13] Diese Entwicklung zeigte, dass CNG-betriebene Fahrzeuge weiter an Bedeutung gewinnen. Daraus resultiert auch eine verbesserte Versorgung mit Erdgas im Tankstellennetz. Derzeitige auf dem deutschen Markt erhältliche CNG-Fahrzeuge waren [14]: Tabelle 2:

Audi: <ul style="list-style-type: none"> • <u>A3 g-tron</u> (Ende 2013) 	Seat: <ul style="list-style-type: none"> • <u>Mii EcoFuel Start&Stop</u>
Fiat: <ul style="list-style-type: none"> • <u>Punto Natural Power</u> • <u>Panda Natural Power</u> • <u>Doblò Natural Power</u> • <u>Qubo Natural Power</u> • <u>Fiorino Natural Power</u> • <u>Ducato Natural Power</u> • <u>Doblò Cargo Natural Power</u> 	Volkswagen: <ul style="list-style-type: none"> • <u>eco up!</u> • <u>Golf TGI BlueMotion</u> (Sommer 2013) • <u>Passat TSI EcoFuel</u> • <u>Touran TSI EcoFuel</u> • <u>Caddy EcoFuel</u> • <u>Caddy Maxi EcoFuel</u>
Iveco: <ul style="list-style-type: none"> • <u>ECODaily</u> 	Skoda: <ul style="list-style-type: none"> • <u>Citigo CNG Green tec</u>
Mercedes-Benz: <ul style="list-style-type: none"> • B 200 NGD • E 200 NGD (Ende 2013) • Sprinter NGT (September 2013) 	Opel: <ul style="list-style-type: none"> • <u>Zafira 1.6 CNG ecoFLEX Turbo</u> • <u>Zafira Tourer 1.6 CNG ecoFLEX Turbo</u> • <u>Combo 1.4 CNG ecoFLEX Turbo</u>

Tabelle 2: Übersicht 2013 erhältlicher CNG-Fahrzeuge

4.3 Bisherige Arbeiten des Projektpartners Rheinmetall Automotive

Um die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu verlängern hat Rheinmetall Automotive gemeinsam mit der FEV einen kleinen, kompakten Range-Extender entwickelt. Er besteht aus einem 2-Zylinder-Ottomotor in V-Bauweise mit vertikal stehender Kurbelwelle und zwei Generatoren mit Zahnradantrieb. Die Integration der Generatoren und des Verbrennungsmotors in ein gemeinsames Gehäuse erlaubt ein äußerst kompaktes Package. Die stehende Kurbelwelle ermöglicht eine niedrige Bauhöhe, so dass das Modul im Unterflurbereich eingebaut werden kann (Abbildung 5) und damit beispielsweise in der Reserveradmulde eines Kleinwagens Platz findet [15].

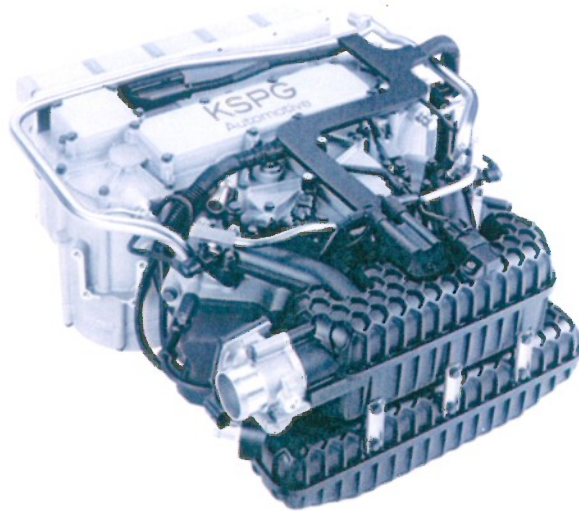


Abbildung 5: Range-Extender von Rheinmetall Automotive

Nach erfolgreicher Erprobung des Verbrennungsmotors wurde das Range-Extender-Modul in die Reserveradmulde eines Stadtfahrzeugs mit Elektroantrieb appliziert (Abbildung 6) und gibt diesem somit die Möglichkeit, neben dem batterieelektrischen Antrieb auch als serielles Hybridfahrzeug betrieben zu werden. Aufgrund seiner speziellen Konstruktion mit aktiver Schwingungskompensation und günstiger Aggregatelage weist das Range-Extender-Modul optimale Werte bei NVH (Noise, Vibration, Harshness) auf, so dass der Eindruck geräuscharmen elektrischen Fahrens beim Anspringen des Range-Extenders wenig beeinträchtigt wird [16].



Abbildung 6: Demonstratorfahrzeug mit Unterflureinbau des RHA-Range-Extenders

5 Literaturverzeichnis

- [1] BMU, „Erneuerbare Energien – Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft,“ 2011. [Online]. Available: http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/publ/44732.php. [Zugriff am 11. September 2013].
- [2] Shell Deutschland Oil GmbH, „Shell PKW Szenarien bis 2030,“ 2009. [Online]. Available: http://www.shell.de/home/content/deu/aboutshell/our_strategy/mobility_scenarios/publication/. [Zugriff am 27. September 2012].
- [3] heise online, „Wankel-Range-Extender Audi A1 e-tron,“ 2 März 2010. [Online]. Available: <http://www.heise.de/autos/artikel/Wankel-Range-Extender-Audi-A1-e-tron-943757.html>. [Zugriff am 11. September 2013].
- [4] DLR, „Der Freikolbenlineargenerator,“ [Online]. Available: http://www.dlr.de/fk/desktopdefault.aspx/tabid-2847/13527_read-33993/. [Zugriff am 11. September 2013].
- [5] ecomento.tv, „General Motors kritisiert mangelnde Unterstützung von Plug-in-Hybriden in Europa,“ 21 März 2013. [Online]. Available: <http://ecomento.tv/2013/03/21/general-motors-kritisiert-mangelnde-unterstuetzung-von-plug-in-hybriden-in-europa/>. [Zugriff am 11. September 2013].
- [6] General Motors Company, „2012 GM Annual Report,“ 2012. [Online]. Available: http://www.gm.com/content/dam/gmcom/COMPANY/Investors/Stockholder_Information/PDFs/2012_GM_Annual_Report.pdf. [Zugriff am 11. September 2013].
- [7] micro turbine technology bv, „Range Extender,“ [Online]. Available: <http://www.mtt-eu.com/de/applications/range-extender>. [Zugriff am 11. September 2013].
- [8] Capstone Turbine Corporation, „Solutions - HEV,“ [Online]. Available: <http://www.capstoneturbine.com/prodsol/solutions/hev.asp>. [Zugriff am 11. September 2013].
- [9] Bladon Jets, „Micro Turbine Range Extenders (MTRE),“ [Online]. Available: <http://www.bladonjets.com/products/range-extenders/>. [Zugriff am 11. September 2013].
- [10] Bladon Jets, „Jaguar C-X75 Concept,“ [Online]. Available: <http://www.bladonjets.com/applications/automotive/jaguar-c-x75-concept-case-study/>. [Zugriff am 11. September 2013].
- [11] Adam Opel A, „Monza Concept: So fährt Opel in Zukunft,“ [Online]. Available: http://www.opel.de/opel-erleben/ueber-opel/aktuell/2013/08/aktuelles_monza-concept.html. [Zugriff am 11. September 2013].
- [12] Kraftfahrzeugbundesamt, „Emissionen, Kraftstoffe,“ 1 Januar 2012. [Online]. Available: http://www.kba.de/cln_031/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/EmissionenKraftstoffe/2012__emissionen__node.html?__nnn=true. [Zugriff am 11. September 2013].
- [13] erdgas mobil GmbH, „Heute schon auf dem Stand von morgen,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.erdgas-mobil.de/privatkunden/zukunft/>. [Zugriff am 11. September 2013].

- [14] erdgas mobil GmbH, „Erdgastankstellenkarte April 2013,“ April 2013. [Online]. Available: [http://www.erdgas-mobil.de/fileadmin/downloads/Tankstellen/ Erdgastankstellenkarte_April_2013.pdf](http://www.erdgas-mobil.de/fileadmin/downloads/Tankstellen/Erdgastankstellenkarte_April_2013.pdf). [Zugriff am 11. September 2013].
- [15] K. P. M. N. F. G. P. E. H.-J. Wittek, „V2-Range-Extender-Modul mit FEVcom - der unauffällige Begleiter im E-Fahrzeug,“ in *20. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik 2011*, Aachen, 2011.
- [16] J. K. E. N. J. S. G. Andert, „Range Extender von - Ein neuer Wegbereiter der Elektromobilität,“ *MTZ*, pp. S. 368-377, Mai 2012.
- [17] McKinsey, „CO₂-Reduzierung bei PKWs: Klassische Verbrennungsmotoren haben das größte Einsparpotenzial,“ 2009. [Online]. Available: http://www.mckinsey.de/downloads/presse/2009/090408_pm_Roads_Toward_a_Low-Carbon_Future.pdf. [Zugriff am 11. September 2013].
- [18] Roland Berger Strategy Consultings, VDMA, „Zukunftsfeld Elektromobilität - Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau,“ Mai 2011. [Online]. Available: http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Zukunftsfeld_Elektromobilitaet_rev_20110509.pdf. [Zugriff am 11. September 2013].
- [19] LIFE e.V., „Fachbegriffe,“ [Online]. Available: http://kompetenzen-erneuerbareenergien.de/fachbegriffe/?tx_a21glossaryadvancedoutput_pi1%5Bchar%5D=b&cHash=64d517013deabbf4d55605dc1ae7efcd. [Zugriff am 11. September 2013].
- [20] <https://www.electrive.net/2017/10/26/nissan-praesentiert-den-serena-e-power/> [Zugriff am 08. März 2019].
- [21] IHS Markit, 18.02.2019.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Konsortium setzte sich aus folgenden Unternehmen bzw. Instituten zusammen:

- Fraunhofer ICT/IWM, Projektgruppe Neue Antriebssysteme NAS
- KIT – Institut für Produktionstechnik wbk
- FEV Europe GmbH
- Streetscooter GmbH
- RWTH Aachen – Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen VKA
- Rheinmetall Automotive AG (bis 2016 KSPG AG)

Darüber hinaus wurde seitens Rheinmetall Automotive nicht mit weiteren Stellen zusammengearbeitet.

7 Arbeiten und Ergebnisse

AP 104:

Definition und Abstimmung von Entwicklungszielen

Personenmonate: 2,0

Unter der Arbeitspaket-Nr. 104 wurde von Rheinmetall Automotive (RHA) Unterstützung bei der Erstellung des Lastenhefts und bei der Definition der Anforderungen gegeben. Dementsprechend wurden Entwicklungsziele und wichtige Punkte für das Lastenheft gemeinsam mit den Projektpartnern festgelegt.

Aus der Erfahrung mit dem RHA-Demonstratorfahrzeugs mit Range-Extender ergeben sich besondere Empfehlungen an die Betriebsstrategie des Range-Extenders. Das Ziel, den Range-Extender akustisch so weit zu optimieren, dass er nur noch ein wenig „summt wie ein Kühlschrankkompressor“, ist wünschenswert, jedoch mit vertretbarem technischem Aufwand kaum erreichbar. Deshalb ist die Betriebsstrategie des Range-Extenders, welche verschiedene Freiheitsgrade besitzt, so zu wählen, dass die vorhandene geschwindigkeitsabhängige Maskierung durch die Roll- und Windgeräusche des Elektrofahrzeugs effektiv genutzt wird. Dazu sollte der Range-Extender im Stand und bei geringen Geschwindigkeiten möglichst nicht laufen. Ein- und Zweipunktstrategien sind sowohl akustisch als auch energetisch nicht zielführend. Ein Leistungsfolgemodus, welcher der abgerufenen Antriebsleistung folgt, und ein Drehzahlfolgemodus, bei dem die Motordrehzahl an die Fahrgeschwindigkeit gekoppelt ist, nutzen die vorhandene Maskierung optimal aus und führen zu einer erhöhten Akzeptanz durch den Fahrer. Energetisch ist es unter Berücksichtigung der Batterielade- und -entladewirkungsgrade ebenfalls sinnvoller, die erzeugte Energie direkt an den Antriebsmotor zu leiten, als sie zunächst in der Batterie zwischenzuspeichern

Basierend auf den Arbeiten zur Definition und Abstimmung der Entwicklungsziele ergaben sich vor allem Erkenntnisse in der Anpassung des Bordnetzes auf 320V nominelle Spannung sowie die mechanische Integration des BasisREX in das Funktionsentwicklungsfahrzeug. Zusammenfassend wurden definiert:

- Elektrische Schnittstellen sowie Bordspannung
- Die CAN-Bus Topologie und die Kommunikationsschnittstellen
- Modifikationen für den Range Extender
- akustische Ziele (Ableitung eines Kapselungskonzeptes)

AP 204:

RHA-Beitrag zum Aufbau und zur Zulassung des Fahrzeugs mit BasisREX

Personenmonate: 1,0

In das Verbundprojekt wurde von RHA ein Range-Extender-Modul, bestehend aus dem kompletten Verbrennungsmotor und den Generatoren, eingebracht. Dazu wurden alle Teile geprüft, freigegeben und an die FEV geliefert.

Zur Verifikation des Basisfahrzeugs wurden seitens RHA Erfahrungen, Messungen und Ergebnisse aus der Erprobung des eigenen Range-Extender-Demonstrators eingebracht und mit den involvierten Projektpartnern diskutiert. Gemeinsame Fahrversuche mit dem Fahrzeug mit dem BasisREX wurden durchgeführt und bewertet.

AP 312:

RHA-Beitrag zur Komponenten- und Werkstoffauswahl für Gasbetrieb

Personenmonate: 1,4

Während benzinbetriebene Ottomotoren in ihrem Verdichtungsverhältnis durch ihre Klopfneigung begrenzt sind, bietet der monovalente Betrieb mit Erdgas aufgrund der wesentlich höheren Klopfestigkeit von Methan das Potenzial zu einer deutlichen Anhebung des Verdichtungsverhältnisses und damit des Wirkungsgrads. Dieses führt zu höheren Spitzendrücken und Temperaturen. Durch die fehlende kühlende Wirkung des flüssigen Kraftstoffs steigt die thermische Belastung der Bauteile weiter an. Desweiteren fehlt beim Gasbetrieb die schmierende Wirkung feinstverteilter Kraftstofftröpfchen; man spricht von einer sogenannten „trockenen“ Verbrennung. Dieser höheren thermischen, mechanischen und tribologischen Belastung ist bei der Auslegung der brennraumumgebenden Komponenten und der kraftführenden Bauteile Rechnung zu tragen.

Bestätigt durch die Modellrechnung ergab sich die Notwendigkeit einer deutlichen Erhöhung der Verdichtung, die üblicherweise auf den Kolben verlagert wird. In Abbildung 7 sind die ausgeführten Kolben für Benzinbetrieb und Gasbetrieb zu sehen. Die höhere Verdichtung wurde durch Verzicht auf die Brennraummulde und eine Erhöhung der Kompressionshöhe erreicht. Die Innenkontur des Kolbens wurde so angepasst, dass das Kolbengewicht gleich blieb. Die zu erwartende höhere thermische und mechanische Belastung war für Kolben und Bolzen noch innerhalb der zulässigen Werte. Der Gefahr des Plattierens (punktueller Verschweißen von Ring- und Nutflanke) des 1. Kolbenrings in der Ringnut aufgrund der „trockenen“ Verbrennung wurde mit einer Hartanodisierung entgegengewirkt.

Eine CNG-bedingt höhere Gaskraft im Ringrücken der Kompressionsringe erhöht die Kolbenringreibung und damit den Laufflächenverschleiß. Das für den Benzinbetrieb ausgelegte Kolbenringpaket besteht aus einem Rechteck-Stahlring als Topring, einem dreiteiligen Stahlring als Ölabbstreifring und einem kostengünstigen phosphatierten Gussring in Form eines Nasenminutenringes dazwischen. Der primär druckbeaufschlagte Topring und der Ölabbstreifring verfügen über chrombeschichtete Laufflächen und sollten dem zu erwartenden Ver-

schleiß standhalten. Bei einer ersten Revision des Triebwerks ist dieses natürlich zu überprüfen. Höherwertige Verschleißschutzschichten sind verfügbar, allerdings zu höheren Kosten.



Abbildung 7: Kolben für Benzin- und Gasbetrieb

Die Zylinderlaufflächen sind aus Grauguss, von denen bei Gasbetrieb keine echten Probleme bekannt sind. Dies gilt auch für erhöhten Verschleiß, der zum Beispiel auf Korrosion zurückzuführen wäre.

Bei den Gleitlagerungen der Haupt- und Pleuellager wurde geprüft, ob sie der höheren mechanischen Belastung standhalten. Die zulässigen Flächenpressungen der ausgeführten Lager wurden durch den höheren Zünddruck nicht überschritten.

Die Ventilsitzringe haben sich als die Achillesverse von Gasmotoren erwiesen. Fehlende Innenkühlung und Mangelschmierung bei Erdgas erhöhen den Reibverschleiß der Ventilsitzringe in kritischer Weise. Abhilfe schaffen hier eine geometrische Anpassung des Ventilsitzes und eine entsprechende Werkstoffwahl des Sitzrings. Beides wurde hier berücksichtigt.

Um der zu erwartenden Leistungseinbuße beim Gasbetrieb entgegenzuwirken, wurden Ventile mit größerem Tellerdurchmesser ausgelegt und der Ansaugtrakt geometrisch optimiert. Nach positiven Berechnungen wurden Zylinderköpfe, Ventile, Ventildedern, Sitzringe und das Saugrohr incl. Berstschutz und Einspritzdüsensitz von RHA konstruiert, beschafft und bereitgestellt.

AP 404:

RHA-Beitrag zur Zulassung und Feinabstimmung des Fahrzeugs mit GreenREX

Personenmonate: 0,2

Erste gemeinsame Fahrversuche wurden nach Umbau auf Gasbetrieb durchgeführt und die Ergebnisse diskutiert.

Die Zulassung des Demonstratorfahrzeugs erfolgt als Erprobungsfahrzeug durch Streetscooter. Da auch RHA eine Ausnahmegenehmigung gem. § 70 StVZO für die Durchführung von Erprobungen an zugelassenen Fahrzeugen hat, ergeben sich dadurch gute Möglichkeiten zur Kundenpräsentation.

AP 504:

RHA-Beitrag zur Fahrzeugdemonstration und –untersuchung

Personenmonate: 0,7

Unter diesem Arbeitspunkt wurde seitens Rheinmetall Automotive gemäß Projektplanung auch der Aufwand für Präsentationen und Veröffentlichungen (siehe Pkt. 9) abgerechnet. In Abbildung 8 ist das Demonstratorfahrzeug nach Umbau auf Gasbetrieb zu sehen. So steht es jetzt für weitere Präsentationen zwecks Akquise von Entwicklungsprojekten zur Vermarktung des GreenREX bereit.



Abbildung 8: Demonstratorfahrzeug nach Umbau auf Gasbetrieb

AP 607:

RHA-Beitrag zur Kostenbewertung eines Produktionskonzeptes GreenREX

Personenmonate: 2,8

Zuerst erfolgte unter Arbeitspunkt 607 „Kostenbewertung eines Serienkonzeptes GreenREX“ gemeinsam mit dem wbk eine Festlegung des zu betrachtenden Produktionsvolumens. Die zu erwartende Stückzahl im ersten Schritt eine Serienfertigung wurde mit 1.500 bis 3.000 Einheiten pro Jahr festgelegt. Diese Festlegung diente als Basis für die folgende Kostenermittlung.

Die Herstellkosten setzen sich aus den Kosten für Zukaufteile, Kosten der Eigenfertigung und den Montagekosten zusammen. Hier wurden alle Bauteile als Zukaufteile betrachtet. Die Kosten der Zukaufteile wurden von RHA für eine Produktionsmenge von 50.000 St./a bereits ermittelt. Für Jahresabnahmemengen von 10.000 St. und 1.500 St. wurden für die teuersten Bauteile, die insgesamt 85% der Kosten ausmachen, Preise angefragt und diese Steigerung auf die restlichen Bauteile übertragen. Tabelle 3 ist die Relation dieser Kosten zu entnehmen. Diese wurde dem wbk für die gesamtheitliche Kostenbetrachtung übermittelt, mit den vom wbk ermittelten Kosten verglichen und diskutiert.

Jahresabnahmemenge	50.000 St.	10.000 St.	1.500 St.
Kostenrelation	100%	135%	160%

Tabelle 3: Kosten für Zukaufteile in Abhängigkeit der Abnahmemenge

Für die Kalkulation der Montagekosten relevante Parameter wie kalkulatorische Zinsen und Raum- und Energiekosten wurden für einen Produktionsstandort von RHA in Deutschland ermittelt und dem wbk bereitgestellt.

Bei Umstellung von Benzinbetrieb auf Gasbetrieb sind am Range-Extender-Modul einige Bauteile zu substituieren, einige in höherwertigeren Materialien auszuführen und Sensoren zu ergänzen. Die Mehrkosten dafür wurden vom wbk ermittelt. Dadurch erhöhen sich die Herstellkosten vom BasisREX zum GreenREX um ca. 2%.

Für den Kunden sind natürlich auch die Kosten für die Peripherie von Bedeutung. Das wbk hat im Falle des GreenREX für 3 Tanks, Füllstutzen, Ventile, Filter, Sensoren, Befestigungselemente und Kleinteile Kosten in Höhe von 450 € ermittelt. Dem stehen beim BasisREX Kosten für Kraftstofftank, Kraftstoffpumpe, Filter, Sensoren, Befestigungselemente und Kleinteile in Höhe von ca. 150 € gegenüber, die vom RHA-Projekteinkauf ermittelt wurden. Die Mehrkosten für die Kraftstoffversorgung beim Gasbetrieb von ca. 300 € sind aber durch verbesserte Einkaufsverhandlungen sicherlich noch zu halbieren.

AP 608:

RHA-Beitrag zur Fertigungsplanung und Vermarktung GreenREX

Personenmonate: 1,1

Für die festgelegte Produktionsmenge von ca. 1.500 St. bis 3.000 St. pro Jahr wurden vom wbk mit Hilfe des Plant-Simulation-Modells verschiedene Layouts einer Motormontage inklusive Generatoreigenfertigung erstellt. Die einzelnen Montageschritte orientierten sich an den Abläufen eine Ottomotoren-Montage und wurden von Experten der Automobilindustrie bereitgestellt. Diese Layouts wurden mit RHA diskutiert und mit deren Erfahrungen verfeinert. Für die Ermittlung der geringsten Montagekosten wurden Layouts unterschiedlicher Ausbringung mit entsprechenden Schichtmodellen kombiniert. Als kostenminimale Variante ergab sich eine manuelle Montage im 2-Schichtbetrieb. Daraus resultieren Montagekosten bei 1.500 St. pro Jahr in Höhe von 255 €/St.. Bei einer Ausbringung von 3.000 St. pro Jahr reduzieren sich die Montagekosten auf 227 €/St.. Die Erweiterungsmöglichkeit auf 3 Schichten pro Tag und der geringe Investitionsbedarf haben dabei einen besonderen Charme.

Seit der Präsentation des RHA-Range-Extenders erfreut er sich eines großen Interesses. Tabelle 4 zeigt das Interesse anhand der monatlichen Anfragen der letzten Jahre. Ein letzter Höhepunkt war 2017 zu verzeichnen; speziell nach der Veröffentlichung in der *elmobility tec*. Den Rückgang der Anfragen im letzten Jahr kann man damit erklären, dass die Reichweiten aktueller Elektrofahrzeuge durch Batterien mit höheren Kapazitäten deutlich größer geworden sind und somit der Wunsch nach einem Range-Extender nachgelassen hat. Dieses wird dadurch bestätigt, dass BMW den i3 in Europa mit einer größeren Batterie und nicht mehr mit einem Range-Extender anbietet. Gleichzeitig bietet Nissan in Japan seit 2018 ein weiteres Fahrzeug mit Range-Extender an [20].

	2015	2016	2017	2018
Anfragen/Monat	3 – 4	5 – 8	6 – 9	3 – 4

Tabelle 4: Anzahl der Anfragen nach einem Range-Extender

Seit dem Projektstart von „GreenREX“ und entsprechenden Veröffentlichungen wurden wir vermehrt von potentiellen Kunden auf die Möglichkeit des Betriebs unseres Range-Extenders mit CNG angesprochen. Aufgrund mangelnder Ergebnisse mussten wir die Anfragen bislang aber noch auf den Projektabschluss mit verwertbaren Ergebnissen vertrösten. Gleichzeitig wurde unsererseits aber bei geeigneter Anwendung auf die künftige Möglichkeit des CNG-Betriebs bereits hingewiesen.

Die Frage, ob wir mit einem Range-Extender, der mit Erdgas (CNG) betrieben wird, noch Vermarktungschancen haben, kann mit Abbildung 9 beantwortet werden. In Europe stagnierte die Produktion von CNG-Fahrzeugen in den letzten Jahren, aber 2019 steigt sie nach Vorhersage von IHS Markit deutlich an und wird sich in den nächsten 5 Jahren verdreifachen.

chen. Die 25% geringeren CO₂-Emissionen und die Möglichkeit dem CNG zunehmend regeneratives Bioerdgas zuzumischen sind dafür wohl die Treiber.

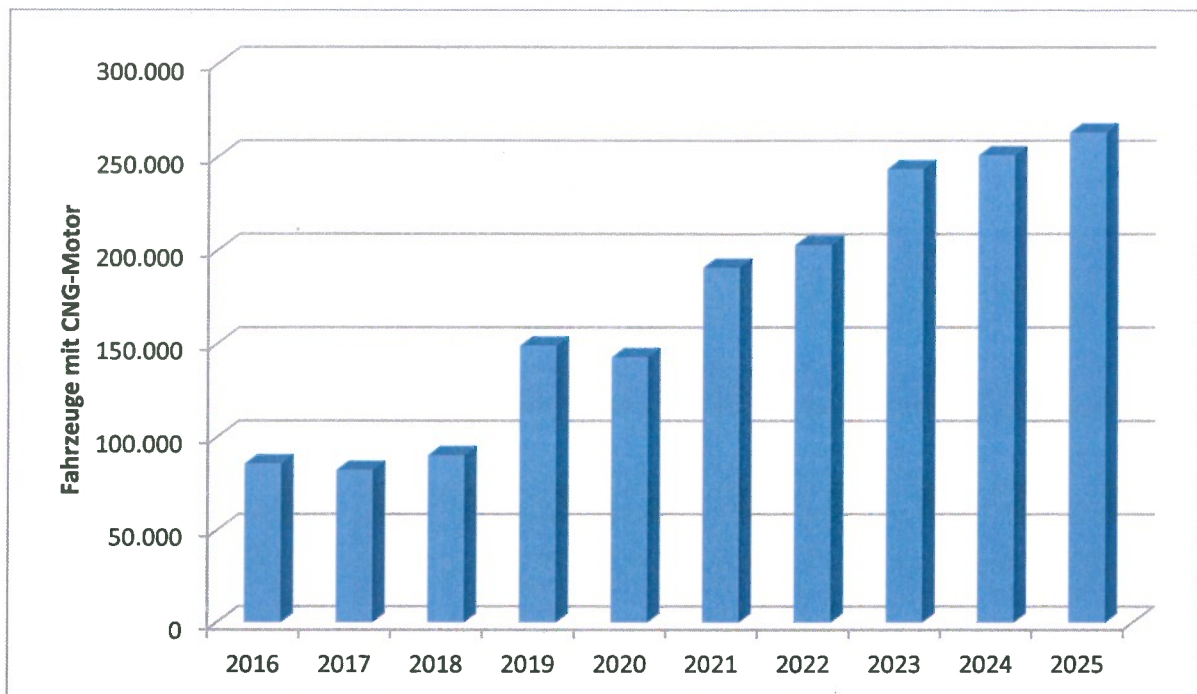


Abbildung 9: Produktion von CNG-Fahrzeugen in Europa [21]

Sobald das Fahrzeug störungsfrei läuft und verlässliche Ergebnisse vorliegen werden wir diese aufbereiten und intensiv in die Vermarktung des GreenREX-Konzeptes einsteigen. Einige potentielle Kunden warten schon darauf. Die Akquisition von Entwicklungsprojekten wird durch folgende Maßnahmen noch weiter unterstützt:

- Internetauftritte
 - Aktualisierung der GreenREX-Homepage mit den wichtigsten Ergebnissen
 - Aktualisierung des Range-Extender-Auftritts auf der RHA-Homepage mit Hinweis auf möglichen CNG-Betrieb
- Veröffentlichungen
 - Pressemitteilungen
 - Bericht im Firmenmagazin
 - Gemeinsame Berichterstattung in ATZ/MTZ, emobility tec,
- Ausstellung des Fahrzeugs auf Messen und Tagungen
 - Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik
 - Hannover-Messe-Industrie
 - IAA Nutzfahrzeuge

Nach erfolgreicher Serienentwicklung und Auftragserteilung ist dann eine Serienfertigung an einem deutschen Standort von Rheinmetall Automotive vorgesehen.

8 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Auf dem Gebiet des Vorhabens sind keine Fortschritte Dritter bekannt geworden.

9 Veröffentlichungen

Seitens Rheinmetall Automotive erfolgten folgende Veröffentlichungen bzw. Beteiligungen an Veröffentlichungen:

- Schwartz, E.; „Erdgas für den Range Extender“; AUTOMOBIL PRODUKTION, November 2014; S. 80 - 81
- N.N.; „Inside Streetscooter“; RHA Kundenmagazin „Heartbeat“; Ausgabe 01-2015; S. 18 - 19
- Hopp, M.; Vortrag mit dem Titel „GreenREX – Grüner Range Extender“ auf der Jahrestagung des Netzwerks „Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft“ der EnergieAgentur NRW mit dem Thema „Mobilität im Wandel“, 20.10.2015
- Hopp, M.; Vortrag mit dem Titel „Weiterentwicklung des KSPG Range Extenders“ auf der HdT-Tagung „Plug-In-Hybride und Range Extender“; 19.04.2016
- Niehues, J.; „Plug-in-Range-Extender – Geräuscharm und CO₂-neutral zu mehr Reichweite“; *emobility tec* 03/2017, S. 36 – 38
- N.N.; „GreenREX“; RHA Kundenmagazin „Heartbeat“; Ausgabe 01-2019 (geplant)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel GreenREX – Elektrofahrzeug mit regenerativ betriebenem On-Board-Energiewandler in Form eines monovalenten Erdgasmotors Teilvorhaben: GreenREX - Konzept zur Herstellung und Vermarktung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Niehues, Jürgen	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2018
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Rheinmetall Automotive AG Karl-Schmidt-Straße 2 – 8 74172 Neckarsulm	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 01MY13001B
	11. Seitenzahl 18
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 21
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 9
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Bis heute sind keine Elektrofahrzeuge mit Reichweitenverlängerung auf dem Markt, die vollständig mit regenerativer Energie betrieben werden können. Andererseits sind Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, die auf Erdgasbetrieb (CNG, compressed natural gas) ausgelegt sind, Stand der Technik. Um einen vollständigen Betrieb mit regenerativen Energien zu ermöglichen, sollte in diesem Projekt ein Elektrofahrzeug mit einem monovalenten Gasmotor als Range-Extender ergänzt und dessen wirtschaftliche Herstellung und Vermarktungsmöglichkeit ermittelt werden. Dazu wurde der von FEV und Rheinmetall Automotive entwickelte, benzinbetriebene Range-Extender in ein leichtes, elektrisches Nutzfahrzeug vom Typ Streetscooter Work eingebaut und in Betrieb genommen. Dieses Aggregat wurde nach umfangreichen Berechnungen auf monovalenten Erdgasbetrieb umgebaut, auf dem Motorenprüfstand erprobt und dann in das genannte Fahrzeug wieder eingebaut und getestet. Gemeinsam mit dem wbk wurde ein Herstellkonzept für die zu erwartende Produktionsmenge von 1.500 bis 3.000 St./a konzipiert und die Kosten ermittelt. Die Mehrkosten des gasbetriebenen Verbrennungsmotors gegenüber dem benzinbetriebenen belaufen sich auf 1 – 2%. Die Mehrkosten für die Peripherie liegen bei akzeptablen ca. 150 €. Das auf geringe	

Investitions- und Betriebskosten ausgelegte Herstellkonzept erleichtert den Einstieg in eine Serienfertigung. Die Vermarktungschancen sind aufgrund weiterhin starken Interesses an Range-Extendern, auch für Gasbetrieb, gut und für die nächsten Jahre wird noch eine deutliche Zunahme an gasbetriebenen Fahrzeugen erwartet.

Das Konzept des monovalenten erdgasbetriebenen Range-Extenders zielt auf leichte, elektrische Nutzfahrzeuge, da hier der Raum für das Aggregat incl. Peripherie zur Verfügung steht. Zur Erweiterung des Anwendungsbereichs bestehen gute Chancen den erdgasbetriebenen Range-Extender auch in stationären Anlagen einzusetzen, beispielsweise in Blockheizkraftwerken zur gleichzeitigen Erzeugung von Wärme und Strom.

19. Schlagwörter
Elektrofahrzeug, Range-Extender, Erdgas, CNG, Bioerdgas

20. Verlag
-

21. Preis
-

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title GreenREX – Electric vehicle with renewable operated on-board energy converter in the form of a monovalent natural gas engine. Subproject: GreenREX – production and marketing concept	
4. author(s) (family name, first name(s)) Niehues, Jürgen	5. end of project 30.09.2018
	6. publication date planned
	7. form of publication -
8. performing organization(s) (name, address) Rheinmetall Automotive AG Karl-Schmidt-Straße 2 – 8 74172 Neckarsulm	9. originator's report no. -
	10. reference no. 01MY13001B
	11. no. of pages 18
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 21
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 9
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract To date there are no electric vehicles with range extension on the market, which can be operated completely with regenerative energy. On the other hand, vehicles with internal combustion engines, which are designed for natural gas operation (CNG, compressed natural gas) are state of the art. In order to enable full operation with regenerative energies, this project should complement an electric vehicle with a monovalent gas engine as a range extender and determine its economic production and marketing potential. For this purpose, the gasoline-powered range extender developed by FEV and Rheinmetall Automotive was installed in a light, electric commercial vehicle of the type Streetscooter Work and put into operation. This unit was rebuilt after extensive calculations on monovalent natural gas operation, tested on the engine test bench and then reinstalled and tested in mentioned vehicle. Together with the wbk, a manufacturing concept for the expected production volume of 1,500 to 3,000 units/year was designed and the costs determined. The extra costs of the gas-fueled internal combustion engine compared to the gasoline-powered amounts to 1 - 2%. The additional costs for the periphery are about 150 € acceptable. The production concept, which is designed for low investment and operating costs, facilitates entry into mass production. The marketing opportunities are good due to continued strong interest in range extenders,	

including gas, and a significant increase in gas-powered vehicles is expected in the next few years.

The concept of the monovalent natural gas driven range extender aims at light, electric commercial vehicles, since here the space for the aggregate incl. periphery is available. To expand the scope of application, there are good opportunities to use the natural gas-powered range extender also in stationary plants, for example in combined heat and power plants.

19. keywords

Electric vehicle, range extender, compressed natural gas, CNG

20. publisher

-

21. price

-