

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN _____	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title ThoREx – Thermally Optimised Range Extender	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dipl. Ing. Daniel Klein B.Eng. Hannes Marlok	5. end of project April 2016
	6. publication date _____
	7. form of publication _____
8. performing organization(s) (name, address) MAHLE Powertrain GmbH Pragstr. 26-46 70376 Stuttgart	9. originator's report no. _____
	10. reference no. 16N12568
	11. no. of pages 7
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references _____
	14. no. of tables _____
	15. no. of figures _____
16. supplementary notes _____	
17. presented at (title, place, date) _____	
18. abstract <p>The integration of waste heat recovery systems in a range extender vehicle implies a variety of interactions between, for example, combustion engine, engine cooling, air conditioning, electrical system and the vehicle or engine electronics. In the present project description MAHLE Powertrain GmbH takes over the tasks to measure the MAHLE Range Extender demonstrator engine on an engine dynamometer and in vehicle to determine the boundary conditions for the simulation of the complete system ThoREx.</p>	
19. keywords Range Extender, thermal measurement, thermodynamics, cold start performance, heat demand, exhaust gas aftertreatment, emissions	
20. publisher _____	21. price _____

Schlussbericht

ZE: MAHLE Powertrain GmbH	Förderkennzeichen: 16N12568
Vorhabensbezeichnung: Thermisch optimierter Range Extender	
Laufzeit des Vorhabens: Juni 2013 – Mai 2016	
Berichtszeitraum: Juni 2013 – Februar 2014	

I.

1. Aufgabenstellung

Ziel ist die Steigerung des Effizienzpotentials im kundenrelevanten Realbetrieb eines Range-Extender-Antriebsystems durch die Integration von Abwärmenutzungssystemen. Solch ein Vorhaben erfordert zahlreiche Interaktionen zwischen z.B. Verbrennungsmotor, Motorkühlsystem, Klimaanlage, elektrischem Bordnetz und Fahrzeug- bzw. Motorelektronik. Durch die Elektrifizierung eines Hybridfahrzeuges, wird es möglich die erzeugte elektrische Energie zu speichern und zu verwerten. Dies ermöglicht den Einsatz von Technologien zur Steigerung des Gesamtwirkungsgrades, welche bis jetzt als unrentabel eingestuft wurden. Da die Elektrifizierung für eine Verknappung der Abwärme der Komponenten im Antriebsstrang sorgt, sind Systeme zur Speicherung der Wärme und zur Bereitstellung von Kühlleistung erforderlich.

Zusammengefasst lassen sich die Zielsetzungen des Verbundvorhabens wie folgt definieren:

- Speicherung verbrennungsmotorischer Abwärme im Temperaturbereich $> 300^{\circ}\text{C}$
- Integration eines thermoelektrischen Generators in das Abschirmsystem eines verbrennungsmotorischen Systems
- Bauraumoptimierte „Heat-to.Cool“-Technologie

Werden die oben genannten technologischen Ansätze kombiniert, kann die im Range Extender anfallende Abwärme zu jedem beliebigen Zeitpunkt gewandelt und/oder gespeichert werden. Durch die Realisierung dieses thermisch optimierten Range Extenders (ThoREx) wird der Gesamtwirkungsgrad zu jedem Zeitpunkt optimiert.

Da sich bei MAHLE Powertrain bereits ein Range Extender Motor in der Entwicklung befindet und ein funktionierender Prototyp existiert, wurde dieser als ideale Basis für das Verbundprojekt betrachtet.

Diese Basis ermöglicht dem Projektkonsortium das Thermomodul unter realen Randbedingungen und Messwerten zu entwickeln.

Die Arbeit der Firma MAHLE bestand in der Kennfeldvermessung des eigenen Aggregates auf dem internen Motorenprüfstand. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Messung des Kraftstoffverbrauches, der Leistung und der thermischen Werte zur Berechnung des Wärmestroms. Die aufbereiteten und validierten Daten sowie die Betriebsstrategie des Range Extender Demonstrationsfahrzeuges werden den Projektpartnern für eine Simulation zur Verfügung gestellt. Des Weiteren unterstützte MAHLE bei der Erstellung von Simulationsmodellen durch Hardwarespezifikationen und Messdaten des MAHLE Range Extender Demonstrationsfahrzeuges.

2.-3. Voraussetzungen, Planung und Ablauf

Das Vorhaben ist in vier Arbeitspakete gegliedert (AP1 Konzeptphase, AP2 Umsetzungsphase, AP3 Testphase, AP4 Auswertungsphase) die von acht Projektpartnern bearbeitet werden. Die Mahle Powertrain GmbH übernahm lediglich einen kleinen Teil des Vorhabens in der ersten Hälfte der Konzeptphase deren Lead die Firma Thesys übernahm. Die in der Planung des Vorhabens angesetzten Gesamtkosten der MPT von 94.080,00 € entsprachen etwa 2% der Gesamtvorhabenskosten von 5.075.500,00€.

In der ersten Hälfte der Konzeptphase wurden die Eingangsgrößen und Randbedingungen für die Simulation durch die Projektpartner Fhg NAS und Thesys durch die MAHLE Powertrain am befeuerten Motor gemessen. Das Ziel dieser Untersuchung war es die Systemtemperaturen und Drücke eines Range Extenders für charakteristische stationäre Betriebspunkte (Minimap, Kaltstart) als Simulationsrandbedingungen aufzunehmen. Der genaue Umfang der Untersuchungen ist in der Folgenden Tabelle zusammengefasst:

Arbeitspaketinhalt:

- Messung von charakteristischen Betriebspunkten an einem realen Range Extender Motor in Absprache mit dem Simulationsteam bei Thesys und Fhg NAS. Abstimmung der Eingangsbedingungen für die Modelle, welche teilweise geometrische Werte, Stoffströme, Temperaturen, Drücke und Leistungen beinhalten.

- Thermodynamische Analyse im Zuge der Datenaufbereitung und -validierung, zur Klärung der Ermittelbarkeit der geforderten Größen . Analyse der vorhandenen bzw. beschaffbaren Messtechnik zur Abschätzung der zu erwartenden Messabweichung.
- Thermomanagement und Wärmestromberechnung in enger Absprache mit den Projektpartnern. Definition der Positionen der Messelemente am Verbrennungsmotor und an dessen Peripherie. Die Positionen werden so gewählt, dass der äußere Einfluss bzw. die Fehleranfälligkeit minimal ist.
- Sensitivitätsanalysen der Eingangsgrößen

Die Planung der Vorhabensdurchführung ist im Folgenden zusammengefasst.

- Applikation der Betriebspunkte in Hinblick auf Kraftstoffverbrauch und Leistung
- Messung des Kraftstoffverbrauchs, Leistung sowie thermischer Werte zur Wärmestromberechnung
- Emissionsmessung zur Auslegung der Strategie des Aufwärmens und der Abgasnachbehandlung
- Bestimmung des Wärmehaushalts zur Feststellung des „heat to cool“ Potentials
- Analyse zur Festlegung der optimalen Betriebspunkte unter Berücksichtigung des Kraftstoffverbrauchs, Leistung

Die erarbeiteten Daten werden aufgearbeitet und den Projektpartner Thesys und Fhg NAS zur Verfügung gestellt. Der genaue Umfang der Motorvermessung wird mit den Projektpartnern abgestimmt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bei konventionellen Verbrennungsmotoren sind aufgrund der großen Energiedichte fossiler Brennstoffe und des dadurch resultierenden „Energieüberschusses“ zwei Faktoren gegeben, die den Bedarf an Antriebswärmemanagement bis heute geschwächt haben.

Die Energie, die zur Erwärmung der Abkühlung des Fahrzeugs oder des Antriebs notwendig war konnte durch den Motor bzw. den Kraftstofftank bereitgestellt werden. Die Fahrzeugreichweite wurde hierdurch nicht merklich eingeschränkt.

Da aktuelle Batterien nur eine geringe Energiespeicherdichte aufweisen, sind elektrisch betriebene Fahrzeuge aktuell noch stark reichweitenbeschränkt. Auch kann die Abwärme von elektrischen Antrieben den Fahrzeuginnenraum nur unzureichend aufheizen. Die Klimatisierung (heizen und kühlen) muss somit mit der elektrischen Energie aus dem

Antriebsenergiespeicher betrieben werden. Ein weiteres Problem liegt in der Eigenschaft, dass die elektrische Energie der verwendeten Batterien stark temperaturabhängig ist. Diese Eigenschaften sorgen für eine stark temperaturabhängige Reichweite.

Bei Range Extender Fahrzeugen kann die kostenintensive Batterie kleiner dimensioniert werden, da der kleine Verbrennungsmotor mit einem Generator gekoppelt ist und so im Bedarfsfall elektrische Energie erzeugen kann.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit mit Dritten, außerhalb des Verbundes, war nicht geplant. Startressourcen und das erforderliche Know-How waren bei Elring Klinger Motorentchnik vorhanden.

II.

1.-3. Verwendung der Zuwendung, wichtigste Positionen und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Projekt waren neben Kosten für Fremdleistungen der MAHLE Powertrain Ltd. lediglich Personalkosten in Höhe von 47.402,51€ zu verbuchen. Die Kosten sind der Gesamtnachkalkulation entnommen und bewegen sich im Rahmen der Gesamtvorkalkulation (66.080,00€). Die Kosten für Fremdleistungen der MAHLE Powertrain Ltd. von 24.941,49€ entstanden bei der Vermessung der Range Extender Motors sowie des Fahrzeugs und konnten aufgrund von Synergien mit dem Versuchsplan der MAHLE Powertrain Ltd. gering gehalten werden. Dies war möglich, da der Versuchsträger in England bei der MPT Ltd. auf dem hierfür bereits eingerichteten Prüfstand aufgebaut und betrieben wurde und somit Prüfstandsrüstzeiten und Inbetriebnahme auf ein Minimum reduziert werden konnten. Auch die für den Abgleich der Simulation nötigen Fahrzeugtests konnten, im Rahmen der vor Ort geplanten Erprobung, mit abgedeckt werden. Der Großteil der Teilvorhabenskosten ging auf Personalkosten zurück. Neben den Aufwendungen für die Planung der Motoren- und Fahrzeugvermessungen entstanden etwa 50% der Personalkosten durch die Arbeitsinhalte der Datenaufbereitung und -validierung, der thermodynamischen Analyse sowie der Wärmestromberechnung und Sensitivitätsanalyse der Eingangsgrößen. Zudem war die Unterstützung mit MAHLE-spezifischem Knowhow im Themengebiet Range Extender und Hybridisierung nötig um die Randbedingungen der Simulation zu definieren. Die enge Absprache mit den für die Simulation verantwortlichen Projektpartnern (TheSys/FhG NAS) ging deutlich über die in der Arbeitspaketbeschreibung definierten Umfänge hinaus. Die von MAHLE gelieferten Arbeitsumfänge beschränkten sich

dabei nicht auf den Range Extender Verbrennungsmotor, sondern umfassten außerdem das Gesamtsystem Fahrzeug inklusive aller elektrischen Komponenten.

Im Rahmen des ThoREx Förderprojekts war es erforderlich, dass die Mahle Powertrain GmbH eine komplette thermische Vermessung des Motors durchführt. Mit Hilfe der erlangten Daten konnte das Modelle des ThoREx Fahrzeugs erstellt und validiert werden. Dieses bildet das thermische Verhalten des Gesamtsystems wieder und erlaubt den Einfluss von Betriebsstrategievarianten auf Gesamtwirkungsgrad, thermisches Verhalten sowie Ladezustand zu simulieren. Mit Hilfe der erstellten Simulation wird es in Zukunft möglich sein die Elektromobilität mithilfe reichweitenerhöhender Antriebstechnik voranzutreiben und somit einen Mehrwert für die Nutzer, die Industrie und den Standort Deutschland zu generieren.

4 Voraussichtlichen Nutzens

Der absehbare voraussichtliche Nutzen lässt sich in drei Bereiche gliedern. Aus technischer Sicht werden neue Möglichkeiten der Effizienzsteigerung eines Range Extenders erarbeitet. Wirtschaftlich betrachtet bietet sich die Möglichkeit zum Kompetenzzugriff für die Weiterentwicklung von Abwärmenutzung im Range Extender bis zur Serienreife. Eine wissenschaftliche Verwertung besteht in Form von Veröffentlichungen oder Vorträgen zu verbrennungsmotorischen Effizienzpotentialen durch abwärmebasierte thermische Betriebspunktoptimierung.

Im Anschluss an das Projekt müssen die erarbeiteten Lösungen am realen Motor gründlich geprüft werden, um die Effizienzsteigerung bewerten zu können. Bei positivem Projektverlauf ist eine weitere Erforschung neuer Technologien denkbar.

Im Anschluss an das Projekt ist Projektende angedacht. Die gewonnenen Ergebnisse sind für die Weiterentwicklung von Range Extendern einzusetzen. Eine Weiterentwicklung zu einem „Range Extender Modul“ mit integrierter Restwärmenutzung ist möglich.

5. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Teilvorhabens ist es noch zu keiner Veröffentlichung der Ergebnisse gekommen, da die durchgeführten Arbeiten lediglich die Grundlage des Gesamtprojektes bilden, auf der neue Erkenntnisse durch die Projektpartner erarbeitet werden. Die zukünftigen Veröffentlichungen befinden sich noch in der Planung. Um den Mehrwert des Vorhabens für MAHLE vollständig auszuschöpfen werden Veröffentlichungen zielführend,

die das gesteigerte Potential einer Range Extender Anwendung zeigen und die hemmenden Reichweitensorgen der Kunden gegenüber elektrischer Mobilität reduzieren.

III.

1-2. Ergebnis und Erfahrungen

Das Ergebnis des Teilvorhabens ist die Kenntnis des kompletten Wärmehaushalts des Systems Range Extender sowie der relevanten Betriebsdrücke im relevanten Anwendungskennfeld auf deren Basis durch die Projektpartner ein Simulationsmodell für die gesamtheitliche Systemoptimierung erstellt werden kann. Dieses bildet die Grundlage für die Komponenten sowie Betriebsstrategieauslegung des ThoREx Projektes ohne die die förderpolitischen Ziele nicht erreicht werden können.

3. Verwertungsplan

Die Etablierung von Range Extender Fahrzeugen ist von der Marktakzeptanz abhängig zu machen, diese wiederum ist eine Funktion der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit. Ist der Marktanteil an Hybridfahrzeugkonzepten bis 2030 auf bis zu 20% anzukommen, werden die gegenwärtigen Bedenken ausgeräumt werden müssen um für Nutzer das geforderte ökonomische Umfeld zu schaffen. Die Erfolgsaussicht wird das Risiko dieses Unterfangens für Endnutzer und Wirtschaft deutlich absenken. Der hier erarbeitete Lösungsansatz sieht eine weitreichende Verwertung der anfallenden Energieströme vor, was zu einem sehr hohen Wirkungsgrad führt. Des Weiteren können Wärme und Energie zwischengespeichert und somit zu jedem Zeitpunkt bedarfsgerecht abgegeben werden, um auf diese Weise maximale Flexibilität zu gewährleisten.

Alle Enthalpieströme des Motors werden zeitabhängig erfasst und charakterisiert. Gerade vor diesem Hintergrund geht MAHLE Powertrain davon aus, dass das bestehende Projekt die Schwelle zum Einstieg in diese Technologie deutlich herabsenken wird.

In diesem Zusammenhang ist eine Weiterentwicklung zu einem Range Extender Modul mit integrierter Restwärmenutzung angedacht. Dies ist durch die Verbundstärke der beteiligten Hersteller und Entwickler zu realisieren, da in der Gemeinschaft ein nahezu kompletter Antriebstrang abgebildet und erprobt werden kann.

4. Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Nicht lösungsorientierte Arbeiten wurden unterbunden.

5. Präsentationsmöglichkeiten

Präsentationsmöglichkeiten der Ergebnisse des Teilvorhabens sind nicht sinnvoll. Im Zuge der vollständigen Verwertbarkeit der Ergebnisse werden die Ergebnisse in Zukunft auf Konferenzen präsentiert. Ziel wird es sein das gesteigerte Potential einer Hybridisierung zu zeigen und die Reichweitensorgen der Kunden gegenüber elektrischer Mobilität zu reduzieren.

6. Einhaltung der Kosten

Der geplante Zeitplan und die kalkulierten Kosten konnten eingehalten bzw. sogar unterboten werden. Die Simulationsrandbedingungen wurden, wie im Zeitplan definiert, vor Ende April 2014 zur Verfügung gestellt.

IV. Berichtsblatt

Siehe Anhang

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN _____	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel ThoREx - Thermisch optimierter Range Extender	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl.-Ing. Klein, Daniel B. Eng. Marlok, Hannes	5. Abschlussdatum des Vorhabens April 2016
	6. Veröffentlichungsdatum _____
	7. Form der Publikation _____
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Mahle Powertrain GmbH Pragstraße 26-46 70376 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution _____
	10. Förderkennzeichen 16N12568
	11. Seitenzahl 7
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben _____
	14. Tabellen _____
	15. Abbildungen _____
16. Zusätzliche Angaben _____	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) _____	
18. Kurzfassung <p>Die Integration von Abwärmenutzungssystemen in einem Range Extender Fahrzeug bedingt vielfältige Interaktionen zwischen z.B. Verbrennungsmotor, Motorkühlsystem, Klimaanlage, elektrischem Bordnetz und Fahrzeug- bzw. Motorelektronik. Im Rahmen der vorliegenden Teilprojektbeschreibung übernimmt die Mahle Powertrain GmbH die Aufgaben, den Mahle Range Extender Demonstrator Motor auf dem Motorenprüfstand und im Fahrzeug zu vermessen um die Randbedingungen einer Simulation des Gesamtsystems ThoREx zu bestimmen.</p>	
19. Schlagwörter Range Extender, thermische Vermessung, Thermodynamik, Kaltstartverhalten, Wärmebedarf, Abgasnachbehandlung, Emissionen	
20. Verlag _____	21. Preis _____