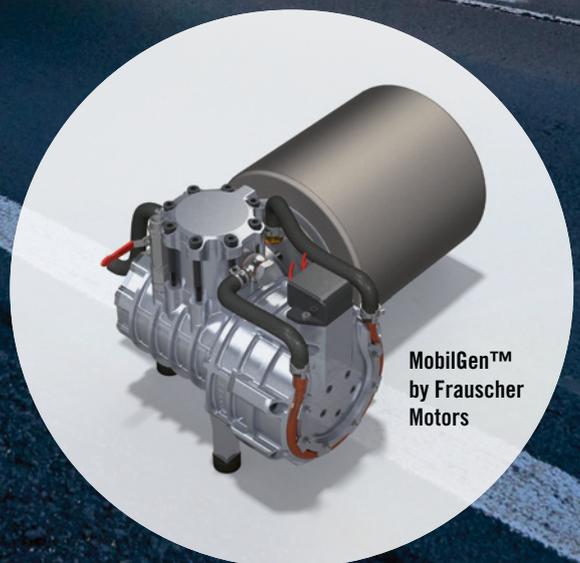


ATZ extra

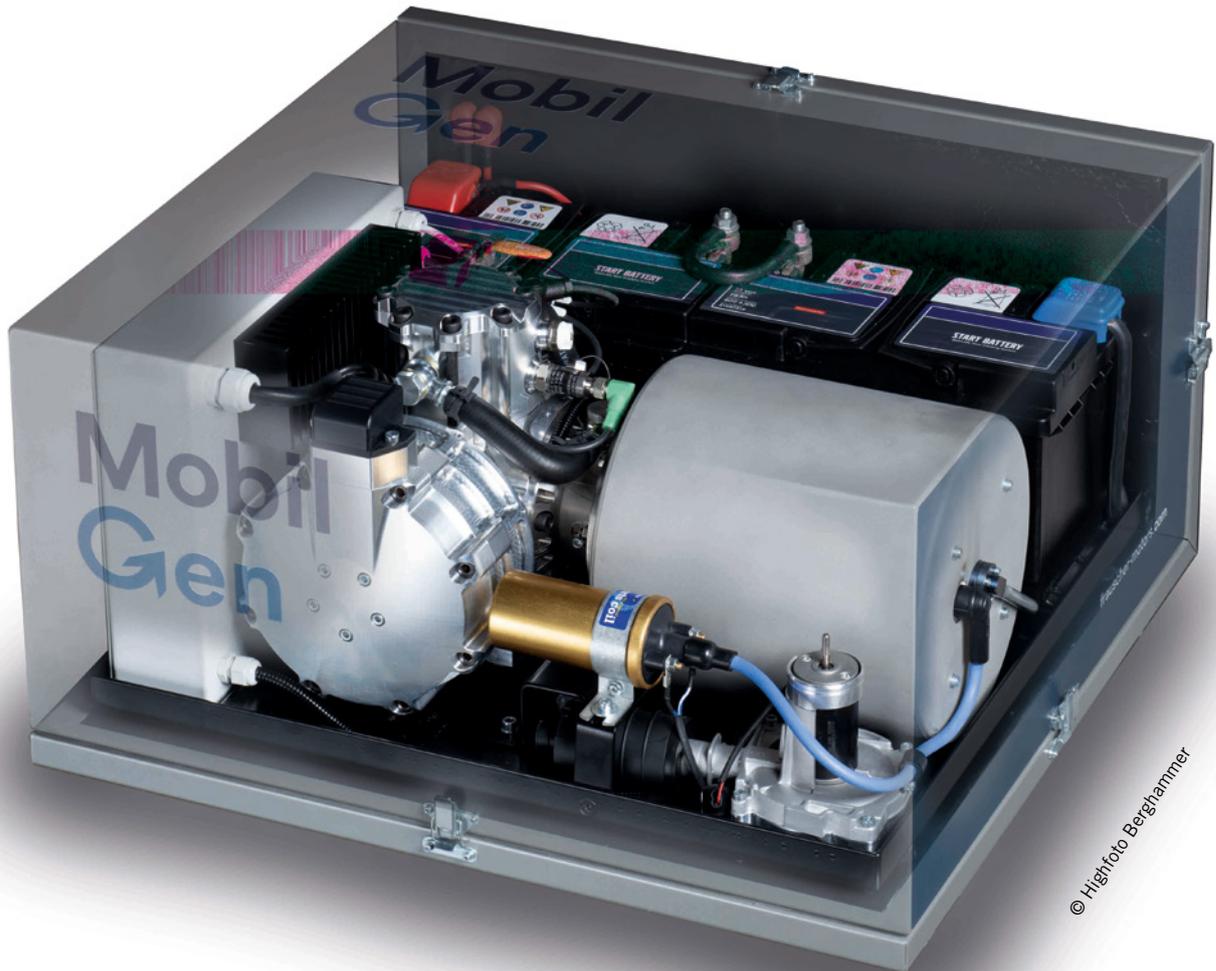


FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

Stirlingmotor zur Klimatisierung von Lkw



MobilGen™
by Frauscher
Motors



Klimatisierung von Lkw mit Hotelfunktion

Angesichts steigender Temperaturen werden immer häufiger Forderungen nach verpflichtendem Einbau von Standklimaanlagen in Lkw laut. Allerdings reicht für eine ausdauernde Kühlung die Kapazität der Bordbatterien nicht aus, um die Klimaanlage mit Energie zu versorgen. In diesem Fall hilft dann nur das Anlassen des Dieselmotors mit den Folgen Lärm, Verschleiß, Energieverschwendung und Umweltbelastung. Ein neuartiger Stirlingmotor von Frauscher Motors könnte Abhilfe schaffen.

Frauscher Motors entwickelt mit MobilGen eine einfache Lösung für die Versorgung von elektrischer Energie und Wärme in parkenden Lkw mit Hotelfunktion. Dabei konnten auf die in den letzten Jahren erheblichen Fortschritte in der Stirlingmotorenfor-

schung zurückgegriffen werden, die im Zuge eines neu entwickelten Verfahrens zu effizienten, sauberen und leisen Antrieben geführt haben. Im Folgenden wird der Entwicklungsprozess bis hin zu einem Demonstrationsaggregat beschrieben.

ALPHAGAMMA-STIRLING-TECHNOLOGIE

Grundlage für das MobilGen-Projekt waren die Erfolge im Einsatz einer neuen Stirlingmotorentechnik, die das Alpha-Prinzip (besteht aus einem Kompressions-

AUTOREN



Josef Frauscher

ist CEO der Frauscher Thermal Motors GmbH und Gründer der Frauscher Sensortechnik GmbH in Sankt Marienkirchen (Österreich).



Hans Jürgen Brandt

ist Leiter Prüfstands- und Prozesstechnik der Frauscher Thermal Motors GmbH in Sankt Marienkirchen (Österreich).



Franz Diermaier

ist Leiter Konstruktion und Simulation der Frauscher Thermal Motors GmbH in Sankt Marienkirchen (Österreich).

kolben und einem Expansionskolben) mit dem Gamma-Prinzip (besteht aus einem Verdrängerkolben und einem Arbeitskolben) verbindet. Das Kernelement bildet ein patentierter Stufenkolben [1], der die Kompressionsarbeit weitgehend vom Kurbeltrieb fernhält. Die Folge davon ist eine starke Reduzierung der Kolbenkräfte im Vergleich zu den bekannten Prinzipien [2]. Die verringerten Kolbennormalkräfte lassen einen wartungsfreien Betrieb mit trocken laufenden Kolbenführungen zu, wie sie beispielsweise aus Trockenlauf-Kompressoren bekannt sind. Dank eines Massenausgleichs erster Ordnung begnügt sich das Aggregat mit lediglich fünf bewegten Teilen, nämlich zwei Kolben, zwei Pleuel und der Kurbelwelle. In einem vorangegangenen Projekt für die Oxidation von Schwachgas erzielten Alphagamma-Motoren der 7,5-kW-Klasse in Verbindung mit Asynchrongeneratoren elektrische Gesamtwirkungsgrade (unterer Heizwert des Brennstoffs zu elektrischer Ausgangs-

leistung) von mehr als 30 % [3]. Dies war die Ausgangslage, um die Anwendung einer Kraft-Wärme-Kopplung in mobiler Betriebsumgebung zu untersuchen.

HERAUSFORDERNDES LASTENHEFT

Durch Gespräche mit Vertretern der Lkw-Branche wurden die Anforderungen an ein entsprechendes Aggregat eruiert. Zusammengefasst lauten diese:

- keine Erhöhung der Fahrzeugmasse
- Einbauraum etwa innerhalb des Volumens gebräuchlicher Batteriekästen
- keine zeitliche Begrenzung für die Stromversorgung von handelsüblichen Standklimaanlagen
- uneingeschränkte Bereitstellung von Wärme im Ausmaß bekannter Standheizungen
- Kraftstoffnutzung gleich oder besser als bisherige Systeme
- Abgasemission unter Einhaltung der Grenzwerte gemäß Euro Stufe V
- Dauerbetrieb ohne störende Schwingungs- und Schallemissionen
- geeignet für unterschiedliche Kraftstoffe: Diesel, LNG, CNG, synthetische Kraftstoffe
- Wartungsfreiheit
- automotiv Test- und Zulassungsbedingungen.

Bei diesen Vorgaben handelt es sich um Maximalforderungen. Bei den

Interviews war der dringende Bedarf an solchen Lösungen herauszuhören, der auch in diversen Fahrerblogs zum Ausdruck kommt.

Zunächst war zu klären, ob generell die Aussicht auf Erfüllung der Anforderungen „keine Erhöhung der Fahrzeugmasse“ und „Einbauraum etwa innerhalb des Volumens gebräuchlicher Batteriekästen“ besteht. Die Bordstromversorgung schwerer Nutzfahrzeuge mit Hotelfunktion besteht meistens aus zwei in Reihe geschalteten Bleibatterien mit je 12 V bei einer Kapazität von 225 Ah, um sowohl die Starterfunktion als auch die Versorgung der Verbraucher bei abgestelltem Fahrzeug zu gewährleisten. Ein derartiger Batteriesatz nach DIN EN-50342-4 weist eine Masse von etwa 120 kg auf und beansprucht mindestens ein Volumen von circa 558 x 518 x 250 mm. Unter der Annahme, dass eine eigene Stromquelle alle elektrischen Verbraucher des geparkten Fahrzeugs abdeckt, reduziert sich die erforderliche Batteriekapazität auf einen Batteriesatz mit 75 Ah, der bei stets voller Ladung zum Starten des Dieselmotors ausreicht [4]. Dadurch wird Platz frei für den Einbau eines entsprechend bemessenen Generators, **BILD 1**. Die Einsparung allein an Batteriemasse beträgt 77 kg. Um der Anforderung gemäß „keine Erhöhung der Fahrzeugmasse“ gerecht zu werden, wurde diese

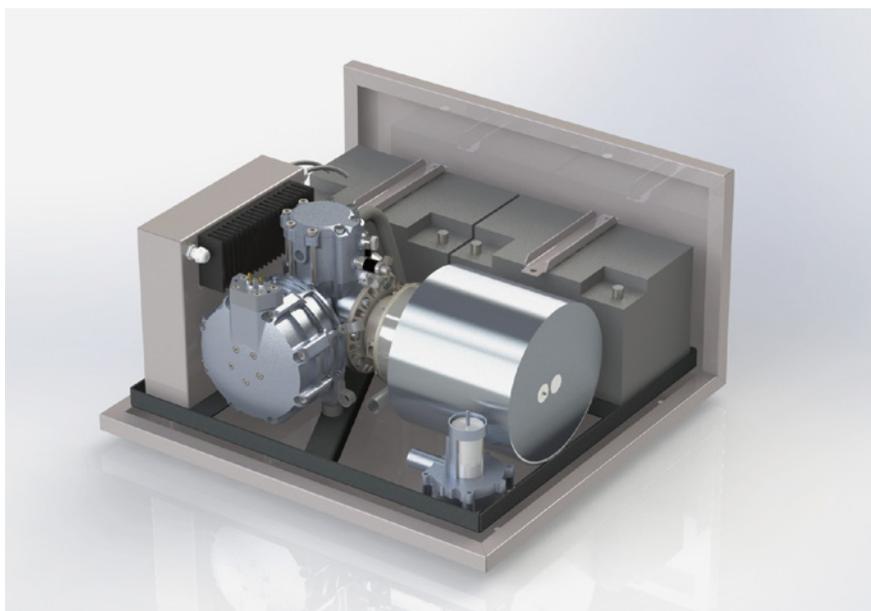


BILD 1 Studie der Anordnung des Aggregats im Batteriekasten (© Frauscher)



BILD 2 Erster Prototyp des Aggregates mit Kühler-Wärmetauscher (© Highfoto Berghammer)

Masse zunächst kalkulatorisch als oberer Grenzwert für die Masse des Generators samt Zubehör berücksichtigt.

FESTLEGUNG DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG

Zur Orientierung des elektrischen Leistungsbedarfs wurde als größter Ver-

braucher die Standklimaanlage herangezogen. Die Datenblätter der Hersteller beispielsweise von Dachklimaanlagen weisen Stromaufnahmen bis zu 24 A auf. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Fahrzeug integrierte elektrische Klimakompressoren noch deutlich mehr Leistung beanspruchen. Man wählte schließlich eine Gleichstrom-Bruttoleistung des Aggregats von 1 kW als Basis

für die weiteren Berechnungen. Dies entspricht einem Strombedarf von circa 40 A im 24-V-Bordnetz. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die Starterbatterie trotz ihrer knapp bemessenen Kapazität in der Lage ist, kurzzeitige Überschreitungen des Strombedarfs abzudecken, da sie in der weiteren Folge ohnedies wieder aufgeladen wird. Um einen Wert für die erforderliche Wellenleistung der Stirlingmaschine zu erhalten, war der Wirkungsgrad des Generators samt Gleichrichtung zu ermitteln. Auf einem eigens dafür aufgebauten Prüfstand konnten die Kennfelder permanentmagnetregter Synchrongeneratoren präzise erfasst werden. Mithilfe von effizienten Schottky-Gleichrichterbrücken gelang es, die Generator- und Gleichrichterverluste auf 17 % im Nennleistungsbereich zu begrenzen. Daraus konnte die mechanische Abgabeleistung der Stirlingmaschine mit 1,2 kW als Ausgangswert für die thermodynamische Dimensionierung fixiert werden. Für die thermodynamische Dimensionierung wurde ein polytropes Simulationsmodell genutzt, welches die Wärmeübergänge und Druckverluste in Form einer Weiterentwicklung der idealen adiabaten Analyse nach Urieli und Berchowitz [5] berücksichtigt. Die Berechnung ergab eine Maschine mit einem Expansionsvolumen von 70 cm³ bei einer Prozessgastemperatur von 980 K und einem mittleren Prozessdruck von 45 bar.

HERAUSFORDERUNG STANDHEIZUNG

Dass der Stirlinggenerator zur Energieerzeugung für die Kabinenheizung nur dann in Betracht kommt, wenn ein hoher Nutzungsgrad und Einsparungen bei Fahrzeugkomponenten erreicht werden können, stand von vornherein außer Diskussion. Der Betrieb des Aggregats kann nur dann akzeptiert werden, wenn die Geräuschemissionen keine Störung der Nachtruhe sowohl für den Lenker des Fahrzeugs als auch für seine unmittelbare Umgebung verursachen. Im Gegensatz zu Motoren mit innerer Verbrennung wird bei Stirlingmotoren mit integrierter Verbrennungsluftvorwärmung bis zu 90 % der Abwärme über den Kühlkreislauf abgeführt, weshalb sich der Aufwand für einen Abgaswärmetauscher nicht lohnt. Insofern kann das Aggregat zunächst wie ein wassergeführtes Stand-

BILD 3 Gewichtsoptimiertes Aggregat einschließlich Starterbatterien im Gehäuse (© Highfoto Berghammer)



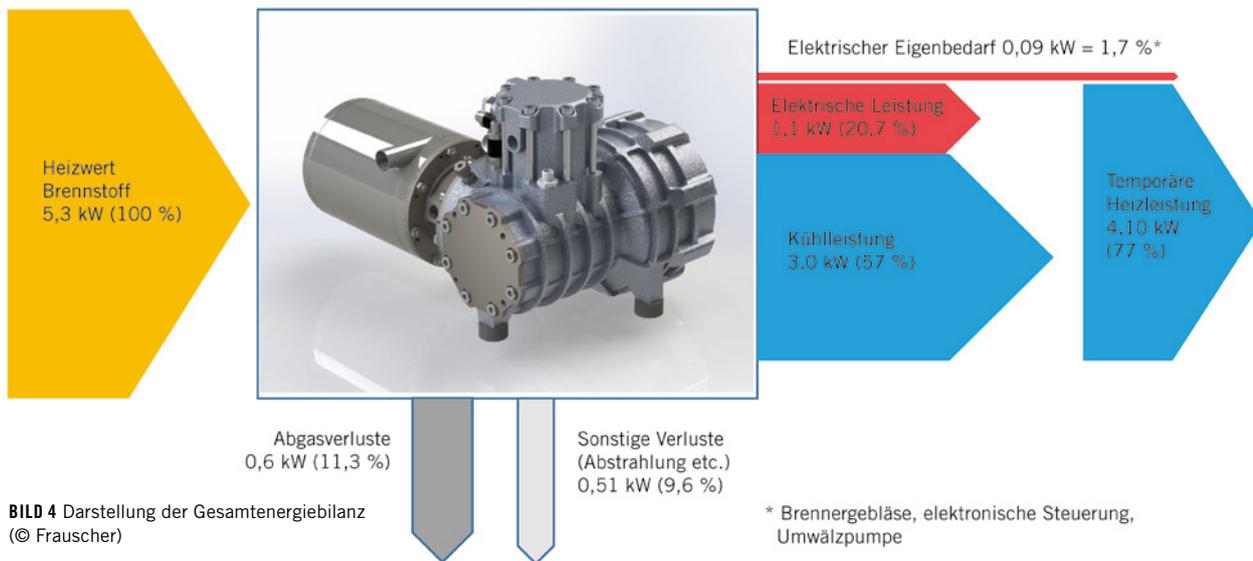


BILD 4 Darstellung der Gesamtenergiebilanz
(© Frauscher)

heizungsgerät mit den bekannten Möglichkeiten der Wärmenutzung betrachtet werden. Im Anwendungssegment findet man marktgängige Standheizungen mit einer thermischen Leistung im Bereich von 4 bis 5 kW, oft einhergehend mit einer Einbindung in das Kühlsystem des Hauptmotors. Allerdings offenbarten die thermodynamischen Berechnungsergebnisse auf Basis der mechanischen Abgabeleistung von 1,25 kW eine Kühlleistung in der Größenordnung von 2,5 kW, also deutlich unter dem erforderlichen Wert. Die Entscheidung für den Start der Prototypenfertigung wurde schließlich dadurch erleichtert, weil im Heizbetrieb ohnedies ein Großteil der elektrischen Abgabeleistung nicht benötigt wird und somit zur Erhöhung der Heizleistung herangezogen werden kann.

PROTOTYPENPHASE IN ZWEI STUFEN

Um das Entwicklungsrisiko überschaubar zu halten, entschied sich das Team für einen Zweistufenplan zum Aufbau von Demonstrationseinheiten. Im ersten Abschnitt war geplant, ein Aggregat ausschließlich für Tests und Analysen in den Bereichen Brenner, Kinematik und Thermodynamik (Wärmetauscher) ohne Rücksicht auf die Gesamtmasse zu entwickeln. Die im Zuge dessen optimierten Komponenten sollten schließlich unverändert in ein Leichtbaugehäuse integriert werden. **BILD 2** zeigt das in der ersten Phase gefertigte Aggregat. Die ers-

ten Prüfstandergebnisse des 48 kg schweren Aggregats lagen Anfang 2021 mit ernüchternden Ergebnissen vor. Das Aggregat lieferte lediglich etwa 500-W-Gleichstromleistung. Während sich die Komponenten der Kinematik und des Brenners auf Basis der bisherigen Erfahrungen treffsicher dimensioniert zeigten, mussten im Lauf der folgenden Monate zahlreiche Optimierungsmaßnahmen in den Wärmetauscherkomponenten Kühler, Erhitzer und Regenerator durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang konnte die schon im Pflichtenheft festgelegte Fertigungsstrategie, die eine weitgehend automatisierte Herstellung mittels CNC-Technik in Verbindung mit einem Hochtemperaturlötverfahren festschrieb, beibehalten werden. Nach aufwändigen Verbesserungsmaßnahmen lieferte das Aggregat bessere Werte bezüglich Leistung und Wirkungsgrad, bis schließlich im August 2021 erstmals die Zielgrößen erreicht wurden. Im Anschluss wurden an der Gewichtsoptimierung und den Einbau des Aggregats in ein schallgedämmtes Gehäuse gemeinsam mit den Bordbatterien gearbeitet. **BILD 3** zeigt das Resultat, dargestellt ohne Abdeckhaube.

ERGEBNISSE

Die Analysen und Messwerte sind in **BILD 4** und in der **TABELLE 1** zusammengefasst. Besonders hervorzuheben ist die positive Massenbilanz. Die Gewichtsoptimierung ergab eine Masseneinspa-

rung für das Aggregat von ursprünglich 48 auf 34 kg. Unter Berücksichtigung der Einsparung an Batteriemasse kann damit eine Reduzierung der Gesamtmasse des Fahrzeugs von mehr als 40 kg erzielt werden. Weitere Gewichtsminderungen, beispielsweise durch Entfall der Standheizung, sind dabei noch nicht berücksichtigt. Erfreulicherweise offenbarten sich im Lauf der Optimierungsphase noch erhebliche Leistungsreserven infolge der Erhöhung des Prozessmitteldrucks. Dieser konnte schließlich mit 56 bar festgelegt werden, einhergehend mit einer Steigerung der Wellenleistung auf 1,42 kW und einer Kühlleistung von 3 kW. Der elektrische Gesamtwirkungsgrad von 20,7 % dürfte durchaus mit den im Fahrbetrieb erzielten Werten mithalten. Zu berücksichtigen ist dabei die Bilanz aus der Effizienz des Dieselmotors abzüglich der Verluste beim Riemenantrieb, beim Generator und Gleichrichter und auch bei den Lade- und Entladeverlusten der Bleibatterien. In Bezug auf die Geräuschemissionen liegen die Messergebnisse im erwarteten Bereich. Die Kapselung reduziert das ohnehin charakteristisch leise Betriebsgeräusch der Stirlingmaschine auf ein angenehmes Niveau. Erwähnenswert sind außerdem die Abgasemissionen, die Dank der atmosphärischen Verbrennung mit aktiver Flammenkühlung in der unteren Hälfte der für Euro Stufe V geltenden Grenzwerte liegen. Das für Erdgas, CNG und LNG geeignete Brennerkonzept stammt aus den Erkenntnissen im

Bezeichnung	Wert	Einheit	Anmerkung
Aggregat			
Typenbezeichnung/Serie			MobilGen G70 Nr. #100
Elektrischer Gesamtwirkungsgrad	22,4	%	Gleichstromleistung zu unterem Heizwert Propangas
Schalldruckpegel nach MR 2006/427EG	59,5	dB(A)	In geschlossener Batteriebox
Masse Aggregat	34	kg	Ohne elektronische Steuerung und Batteriebox
Motor			
Verfahren			Alphagamma Stirling
Prozessgas			Helium
Obere Prozessgastemperatur	650	°C	
Mittlerer Prozessdruck	55,9	bar	
Hubvolumen	70	cm ³	Expansionsvolumen
Zylinder-Phasenwinkel	90	°	
Mechanische Nennleistung	1,42	kW	An der Kurbelwelle
Drehzahl	1987	1/min	
Kühlleistung	2,99	kW	Heizleistung für Kabine
Kühlwassertemperatur	36,3	Grad C	Bis 50 °C
Kühlwassermenge	0,39	m ³ /h	0,3–0,5 m ³ /h
Lebensdauer	>5000	h	Ziel, in Erprobung
Generator			
Aufbau		Drehstrom	Permanenterregte Vielpolmaschine
Elektrische Leistung	1,19	kW	Bei 27,9 V nach Gleichrichter
Brenner			
Art			Mündungsmischender Gasbrenner
Maximale Leistung	5,3	kW	Unterer Heizwert
Brennstoff			Propangas, Erdgas, CNG, LNG
Gasdruck	50	mbar	Propangas
Luftdurchsatz	17,4	kg/h	
Gebläsedruck	30	mbar	
Abgastemperatur	219	°C	Bei 25 °C Umgebungstemperatur
Abgaswert O ₂	5,0 – 8,0	%	Bei Propangasbetrieb
Abgaswert CO	4,42	g/kWh	Bei Propangasbetrieb, O ₂ = 5,3 %
Abgaswert NO _x	1,53	g/kWh	Bei Propangasbetrieb, O ₂ = 5,3 %

TABELLE 1 Technische Daten und Messwerte (© Frauscher)

bereits erwähnten Schwachgasprojekt. Herausfordernd wird zweifelsohne der noch zu entwickelnde Dieselbrenner, der für eine breite Marktakzeptanz des Aggregats unabdingbar ist.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Projekt MobilGen eignet sich zur Demonstration eines technischen Lösungswegs für die Versorgung von Wärme und Strom in Nutzfahrzeugen, Yachten und Reisemobilen. Die Anforderungen an Masse, Einbauvolumen, Leistung, Wirkungsgrad sowie Laufruhe sind erfüllt und nachweisbar. Weitere Projektschritte, wie beispielsweise die Entwicklung eines Flüssigkeitsbrenners, der elektronischen Steuerung und des Nachweises der Wartungsfreiheit, sollten nach aktuellem Planungsstand bis Mitte des Jahres 2023 abgeschlossen sein.

LITERATURHINWEISE

- [1] Deutsches Patent DE102017109967A
- [2] Frauscher, J.; Diermaier, F.; Brandt, H. J.; Gschwendtner, M.: Stirling-Engine in a novel Alphagamma Configuration. Online: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/89/e3sconf_isec2021_08006.pdf, aufgerufen: 29. April 2022
- [3] Stressler H.; Aigenbauer S.: Test-Report Lean Gas Test. Online: https://www.frauscher-motors.com/wp-content/uploads/2020/03/KI%C3%A4rgas_en.pdf, aufgerufen: 29. April 2022
- [4] Volvo Trucks (Hrsg.): Volvo-Verkaufsunterlage. Online: <https://www.volvotrucks.at/de-at/trucks/features/dual-battery-system.html>, aufgerufen: 29. April 2022
- [5] Urieli, I.; Berchowitz, D.: Stirling Cycle Analysis. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984

IMPRESSUM:

Sonderausgabe 2022 in Kooperation mit Frauscher Thermal Motors GmbH, Gewerbestraße 7, 4774 St. Marienkirchen, Austria; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabusch

TITELBILD: © am | stock.adobe.com

Wie eine Fahrzeugbatterie, aber mit 100.000 (hunderttausend!) Amperestunden*

Was utopisch klingt, wird Realität: Das kleine Stirling-Kraftpaket findet im Bauraum handelsüblicher Batteriekästen direkt neben den Starterbatterien Platz und stellt eine zeitlich unbegrenzte Versorgung elektrischer Energie auf dem geparkten Fahrzeug zur Verfügung.

Der Komfortgewinn für den Fahrer ist beträchtlich. Der MobilGen versorgt nicht nur die Standklimaanlage des Fahrzeuges, sondern liefert genug Wärme für die Kabinenheizung – und das alles ausdauernd im Flüsterton.

Extrem saubere Abgase und eine erhebliche Komponenten- und Gewichtseinsparung runden die innovativen Eigenschaften des neuen Aggregates ab.

Verschaffen Sie sich gerne im Rahmen eines Vorführtermins einen Eindruck von der neuen Technologie auf Demonstrationsniveau. Anfragen per E-Mail an info@frauscher-motors.com

Mobil Gen™

by Frauscher
Motors

*Ladeenergie bei 24 Volt innerhalb eines vorsichtig hochgerechneten Wartungszyklus von 2.500 Stunden.

