

Freikolbenlineargenerator

Vom Proof of Concept ins Auto

Um die Grenzen der Traktions-Akkus zu überwinden, finden Range-Extender zunehmend Beachtung. Ein Forscherteam am DLR hat dafür einen Freikolbenlineargenerator entwickelt, der die Bewegungsenergie eines freischwingenden Kolbens einer Verbrennungskraftmaschine in elektrische Energie umwandelt. Als Höhepunkt der langjährigen Entwicklungsarbeit konnte das Team kürzlich den „Proof of Concept“ erbringen. Nun geht es um die Potenziale der Technologie sowie die offenen und die gelösten Herausforderungen.

Autoren: R. Virsik, A. Heron, S. Schneider

KEYWORDS

Freikolbenlineargenerator, FKLG, Range-Extender, Verbrennungsmotor, Reichweite

Der am DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) entwickelte Freikolbenlineargenerator (FKLG) arbeitet als brennstoffbetriebener Stromgenerator. Sein Einsatzbereich erstreckt sich vom Range-Extender in der Elektromobilität über hybride Antriebsstränge bis hin zur hocheffizienten flexfueltauglichen Komponente in einem Blockheizkraftwerk. Simulationen zeigen, dass ein Wirkungsgrad von 36 % vom Kraftstoff bis zum Strom realistisch ist. Der FKLG ist hub- und verdichtungsvariabel, weshalb sein Wirkungsgrad auch bei Teillast nur geringfügig sinkt. Außerdem lassen sich damit Funktionen wie die Flexfuelfähigkeit und neuartige Brennverfahren wie HCCI (Homogene Kompressionszündung) [2] darstellen.

Mit seiner Bauhöhe von unter 150 mm passt der FKLG sogar in die typischen Batteriebaukäufe. Der OEM muss das Fahrzeugkonzept also nicht anpassen. Aufgrund der Bauweise ist zudem ein günstiges Geräusch- und Vibrationsverhalten zu erwarten, das gerade bei Elektrofahrzeugen wichtig ist.

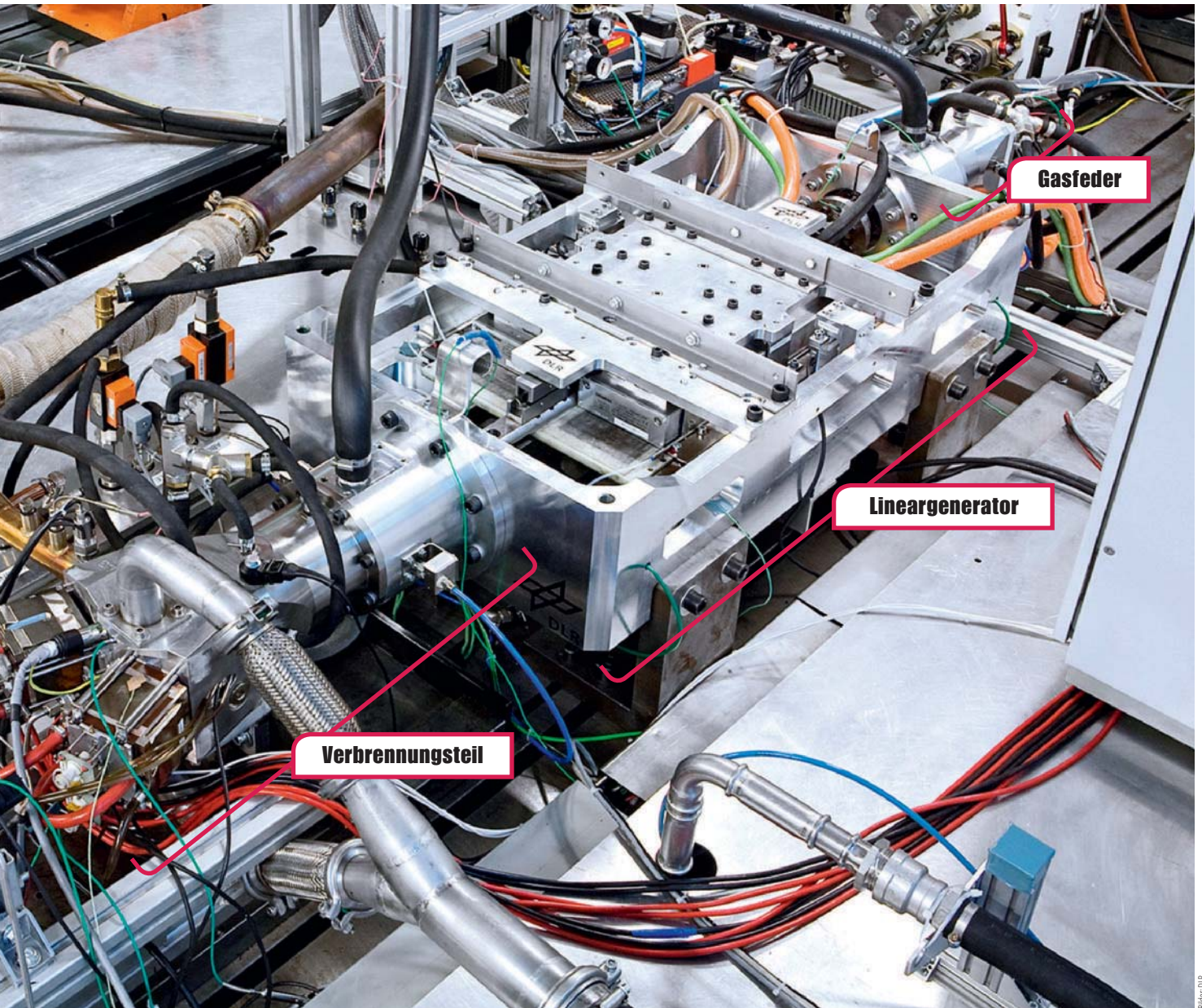
DAS PRINZIP DES FKLG

Der Freikolbenlineargenerator vom DLR besteht aus den drei Teilsystemen Verbrennungseinheit, Lineargenerator und Gasfeder [8]. Die Verbrennungseinheit arbeitet im Zweitaktverfahren. Die bei der Verbrennung freigesetzte Energie bewegt den Kolben auf einer linearen Bahn (Bild 2a). Dabei komprimiert er die Gasfeder auf der gegenüberliegenden Seite; die Feder lenkt die Bewegung um und schiebt den Kolben wieder zurück. So schwingt der Kolben hin und her. Der Lineargenerator ist zwischen den Kolben integriert und koppelt elektrische Energie aus dem System aus. Mit dem Einsatz der Gasfeder hat das DLR eine Anordnung geschaffen, die sich von den meisten Freikolbenprojekten [1] unterscheidet. Sie ermöglicht die Hubvariabilität des Kolbens und erleichtert die Regelung des Systems.

Der FKLG aus Verbrennungseinheit, Lineargenerator und Gasfeder benötigt einen spiegelsymmetrischen Aufbau: So werden alle bewegten Massen ausgeglichen und es entsteht ein sehr gutes Geräusch- und Vibrationsverhalten. Wie in Bild 2 zu sehen ist, lässt sich der Aufbau in verschiedenen Weisen ausführen. Das obere Bild stellt einen Aufbau mit Einzelbrennräumen dar, das untere verfügt über einen Zentralbrennraum, bei dem die beiden Einzelbrennräume aus Bild 2a zu einem gemeinsamen Brennraum verschmelzen. Der Zentralbrennraum erhöht das Leistungsgewicht, da er bauteilbedingt einige Bauteile einspart.



Bild 1: Funktionsdemonstrator auf dem Prüfstand bestehend aus Verbrennungsteil, Lineargenerator und Gasfeder



Bilder: DLR

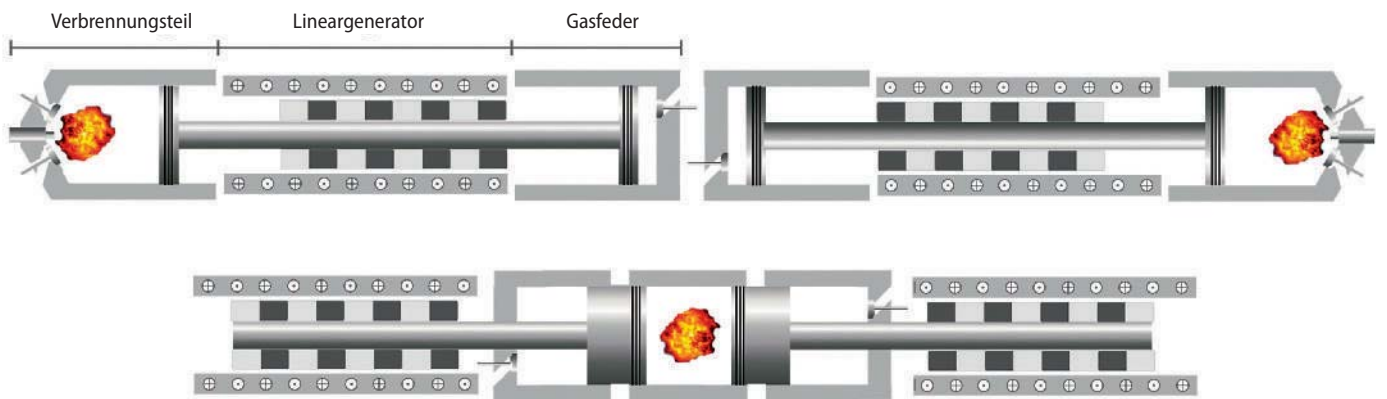


Bild 2: Prinzipskizzen FKLG-Modul: a) Grundprinzip in Einzelbrennraumbauweise und b) in Zentralbrennraumbauweise.

FUNKTIONSDEMONSTRATOR

Auf einem Prüfstand des DLR in Stuttgart ist ein Funktionsdemonstrator der FKLG-Technologie aufgebaut. Dieser Versuchsaufbau eines Einzelkolbensystems ist in Bild 1 dargestellt und entspricht der Prinzipskizze aus Bild 2a, jedoch ohne die spiegelsymmetrische Doppelung in Bild 2b. Seit Inbetriebnahme des Systems hat das Forscherteam mehrere Lastpunkte umgesetzt. Dabei erwiesen sich sowohl der stationäre Betrieb als auch der Wechsel zwischen den Betriebspunkten als stabil. Die maximal entkoppelte elektrische Leistung beträgt aktuell 10 kW. Im realen Fahrzeugeinsatz geht ein Teil dieser Energie an elektrisch angetriebene Nebenaggregate, deren Funktion derzeit die Prüfstandsinfrastruktur übernimmt.

Der Funktionsdemonstrator ist im Vergleich zu einer Konfiguration, wie sie als Range-Extender im Pkw zum Einsatz kommen könnte, deutlich überdimensioniert (Tabelle 1). Beispielsweise verfügt der hier verwendete Lineargenerator mit 12 kN über das Dreifache der maximal benötigten Kraft. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums und den Herausforderungen in Steuerung und Regelung dient diese Überdimensionierung als Sicherheit. Durch den

deutlich kleineren Lineargenerator in einem fahrzeugauglichen System lässt sich die Systemfrequenz steigern und die spezifische Leistung deutlich erhöhen. Die am Funktionsdemonstrator messbaren Zahlenwerte hinsichtlich Leistungsdichte, Abmessungen oder Wirkungsgrad sind daher keinesfalls als endgültige Ergebnisse des FKLG-Konzepts zu verstehen.

LINEARGENERATOR

Für eine fahrzeugaugliche Auslegung betrachtet das DLR-Team zwei Lineargeneratoren der passenden Leistungsklasse. Mit einem eigens entwickelten Simulationsmodell des Lineargenerators konnte das DLR den Verlauf der Verluste berechnen. Bild 6 zeigt, dass der Lineargenerator der ersten Generation seinen maximalen Wirkungsgrad bei 53 Hz erreicht. Da sich diese Arbeitsfrequenz am damaligen Prüfstand nicht nachfahren ließ, wurde der Betriebspunkt am Modell nachgebildet. Der so erzielte Wirkungsgrad von etwa 80 % kann durch einen geblechten Läufer und weitere Maßnahmen auf bis zu 95 % verbessert werden. Leistungsfähigere Materialien bedeuten in der Regel aber steigende Kosten. Da die angestrebte Frequenz eines freischwingenden Systems nur genau eine schwin-

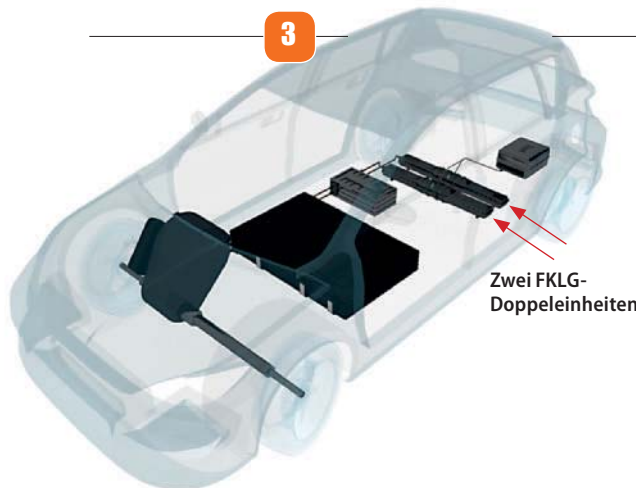
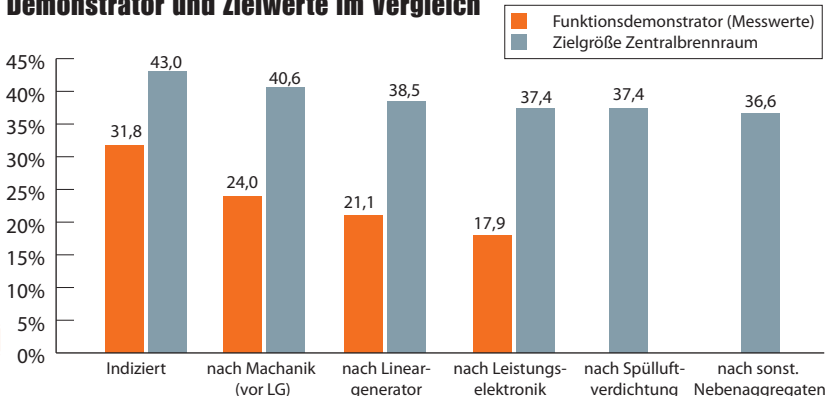


Bild 3: FKLG im Unterboden als Teil des Antriebsstrangs im Pkw (Studie).

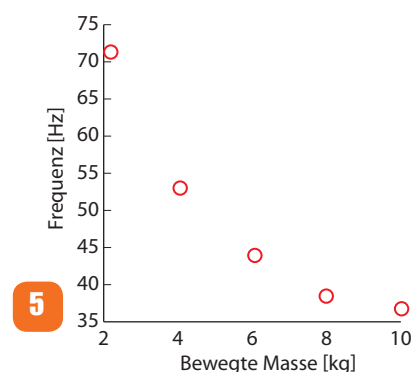
Bild 4: Wirkungsgrade als Messwerte am Funktionsdemonstrator und Zielgrößen für fahrzeugaugliches Zentralbrennraumsystem.

Bild 5: Die Frequenz des FKLG sinkt in Abhängigkeit von der bewegten Masse: Je schwerer der Läufer, desto langsamer wird das Gesamtsystem [9].

Wirkungsgrad des FKLG Demonstrator und Zielwerte im Vergleich



Gewichtsfrage Frequenz je nach Masse



4

5

gende Masse zulässt, muss die Masse des Läufers genau auf das System abgestimmt sein.

Die Abhängigkeit der Frequenz vom Gewicht des Läufers ist in der Bild 5 zu sehen. Um die Frequenz von 50 Hz zu erreichen, geht aus der Abbildung ein Gewicht von 4 bis 5 kg hervor. Der Läufer der ersten Generation wiegt aber ungefähr 10 kg und eignet sich somit nicht für diese Frequenz. Durch verschiedene Leichtbaumaßnahmen [10] ist die Zielgröße jedoch erreichbar.

Die zweite Generation des FKLK ist mit Statorn der Firma Siemens ausgestattet, die von Linearmotoren aus dem Werkzeugmaschinenbau abgeleitet wurden. Durch einige Anpassungen im Bereich der Wicklung konnte Siemens die Betriebsfrequenz erhöhen. Dank des eisenfrei ausgeführten Läufers war auch das Zielgewicht problemlos zu erreichen. Zudem entfallen die Eisenverluste im Läufer, lediglich die Verluste in den Magneten bleiben bestehen, was die Effizienz des Lineargenerator-Teilsystems erhöht. Daraus ergeben sich auch Vorteile für das Kühlsystem, was Entwickler eines hochintegrierten Systems stets mit betrachten müssen. Die Messungen zeigen, dass der Wirkungsgrad im Vergleich zum Lineargenerator der ersten Generation besser geworden ist. Im Betriebspunkt bei 15 Hz stieg der Wirkungsgrad

Tabelle 1: Technische Daten des Funktionsdemonstrators und eines beispielhaften fahrzeugtauglichen FKLK-Moduls.

Eigenschaften
Vom Demonstrator zum serientauglichen System

	Funktionsdemonstrator	Fahrzeugtaugliches Modul (Beispiel)
Aufbau	Ein Brennraum, ein Lineargenerator, eine Gasfeder	Ein Brennraum mit zwei Kolben, zwei Lineargeneratoren, zwei Gasfedern
Brennverfahren	Zweitakt-Otto	Zweitakt-Otto (je nach Betriebspunkt mit HCCI)
Hubraum	321...481 cm ³	299 cm ³
Leistung (indiziert)	12 kW	0...30 kW
Leistung (elektrisch nach Nebenaggregaten)	(Einige Nebenaggregate prüfstandsseitig)	0...26 kW
Betriebsfrequenz	6...21 Hz	50 Hz
Bewegte Masse	5,12 kg	2x5 kg
Bohrung	82,5 mm	63 mm
Hub	60...90 mm	2x48 mm
Ladedruck (absolut)	1,2...2,0 bar	1,2...2,0 bar
Ladungswechsel	Kopfumkehrspülung über zwei Einlass- und ein Auslassventil	Längsspülung über Einlass- und Auslassschlitze
Verdichtung Verbrenner-Teil	7...11 typisch	9...14 (je nach Kraftstoff)
Einspritzung	Direkteinspritzung, zentraler Mehrlochinjektor	Direkteinspritzung, seitlicher Injektor
Verdichtung Gasfeder	2,5...15	Zirka 10
Kraft Lineargenerator	Typisch 4000 N, maximal 12000 N	Typisch 3000 N, maximal 4000 N
Abmessungen (ohne Nebenaggregate)	1940 x 500 x 225 mm ³	970 x 228 x 143 mm ³

Quelle: DLR

**INNOVATIONS-
OFFENSIVE
NR. 22**



Besuchen Sie uns vom **06.-08.05.2014** auf der **SMT**, Stand 7-137, in Nürnberg.

**SICHERE
HOCHLAST-
KONTAKTIERUNG
VON
E-AUTOMOTIVE
STECKERN**

Die Hochstromklemme HKR-612 M ermöglicht die sichere Kontaktierung von bis zu 50 A Dauerlast bei einer Kurzschlusslast bis zu 400 A.

Gleichzeitig bietet die Hochstromklemme eine beschädigungsfreie Kontaktierung von Rundkontakten mit oder ohne Fingerschutzkappen bei Elektro- und Hybridfahrzeugen.

Mehr über unsere Innovationen finden Sie unter:
www.ingun.com/innovations



Literatur**Weitere Informationsquellen**

- [1] R. Mikalsen, A. Roskilly: „A review of free-piston engine history and applications“. Applied Thermal Engineering, 2007, 27, 2339-2352
- [2] J. Haag, F. Kock, M. Chiodi, O. Mack, M. Bargende, C. Naumann, N. Slavinskaya, A. Heron, U. Riedel, C. Ferrari: „Development Approach for the Investigation of Homogeneous Charge Compression Ignition in a Free-Piston Engine“. ICE2013. 11th International Conference on Engines & Vehicles. Capri, Napoli, SAE International, 2013
- [3] H. Tschöke: „Range Extender – Definition, Anforderungen, Lösungsmöglichkeiten“. mtz, 2012, 73, 510-515
- [4] F. Kock, J. Haag, H. E. Friedrich: „The Free Piston Linear Generator – Development of an Innovative, Compact, Highly Efficient Range-Extender Module“. SAE World Congress, SAE International, 2013
- [5] C. Ferrari: „Entwicklung und Untersuchung eines Freikolbenlineargenerators unter besonderer Berücksichtigung des verbrennungsmotorischen Teilsystems mit Hilfe eines neuartigen vollvariablen Prüfstands“. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012
- [6] F. Kock: „Steuerungs- und Regelungsstrategien für das Gesamt- und die Teilsysteme eines Freikolbenmotors am Beispiel des Freikolbenlineargenerators“. Dissertation, Universität Stuttgart, vsl. 2014
- [7] J. Haag, C. Ferrari, J. H. Starcke, M. Stöhr, U. Riedel: „Numerical and Experimental Investigation of In-Cylinder Flow in a Loop-Scavenged Two-Stroke Free Piston Engine“. SAE International, 2012-32-0114, 2012
- [8] M. Gräf, M. Nedele, J. Gräf: „Freikolben-Verbrennungsvorrichtung mit elektrischem Lineartrieb“. Patent DE 102 19 549 B4, 2004
- [9] S.-E. Pohl: „Der Freikolbenlineargenerator – Theoretische Betrachtung des Gesamtsystems und experimentelle Untersuchungen zum Teilsystem der Gasfeder“. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2007.
- [10] F. Rinderknecht: „Entwicklung und Untersuchung eines Lineargenerators für ein Hybridfahrzeug“. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012
- [11] H.E. Friedrich, C. Ferrari: „Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug – REXEL“. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Universität Stuttgart, Fraunhofer ISE, 2012.

um 13 Prozentpunkte auf 88 %. Bei höheren Frequenzen erwarten die Forscher prinzipbedingt Wirkungsgrade größer 90 %.

STEUERUNG UND REGELUNG

Die Steuerung und Regelung des Systems ist eine der entscheidenden Herausforderungen bei Freikolbenmotoren. Um die Kolbenbewegung auch ohne mechanische Verbindung zum Kolben beeinflussen zu können, hat das DLR eine elektronische Kurbelwelle realisiert.

Die Regelung des Funktionsdemonstrators basiert auf Messungen und Berechnungen, wie die Energien im System verteilt sind und an welcher Stelle sich der Kolben gerade befindet. Die Reglerstruktur auf dem Rapid-Control-Prototyping-System [4, 6] berechnet die Stellgrößen mit einem modellprädiktiven, energie-basierten Ansatz, um die Kolbenbewegung und insbesondere die Lage der Totpunkte zu regeln. Dieser Regelungsansatz wurde für den stationären Betrieb in unterschiedlichen Betriebspunkten ausgelegt. Für den Startvorgang wird der Lineargenerator zunächst motorisch betrieben, um die Schwingung des Systems anzuregen, bevor die erste Zündung erfolgt.

WIRKUNGSGRADPOTENZIALE

Beim FKLG führt der Kolben eine lineare Bewegung ohne Querkräfte aus. Aufgrund der prinzipbedingten geringeren mechanischen Verluste bietet dieses

Konzept ein großes Potenzial für hohe Wirkungsgrade durch eine direkte Umwandlung der Bewegungsenergie des Kolbens in elektrische Energie [11]. Für einen kundenakzeptablen Betrieb als Range-Extender oder in seriellen Hybridfahrzeugen muss sich die Leistungsabgabe der Stromerzeugungseinheit an die Stellung des Gaspedals anpassen. Daraus folgt, dass der Wirkungsgrad auch im Teillastbereich hoch bleiben muss. Zwar könnte man die Effizienz des Verbrennungsprozesses auf nur einen definierten Betriebspunkt maximieren, jedoch würde dies zu einem für den Fahrer inakzeptablen Verhalten führen, zum Beispiel bei niedrigen Geschwindigkeiten oder beim Warten an der Ampel.

Das größte Potenzial des FKLG steckt im hohen Wirkungsgrad über einen breiten Betriebsbereich. Ursächlich sind drei systemimmanente Eigenschaften: Reduziert sich der Hub, dann sinken auch die Reibungsverluste und der Verbrennungsprozess lässt sich an die niedrigere Leistungsanforderung anpassen. Man könnte von einem Online-Downsizing sprechen. Zudem kann durch die variable Einstellung der Totpunktlage das Verdichtungsverhältnis für den Teillastbetriebspunkt optimiert werden [9]. Verwendet ein Fahrzeug mehrere FKLG-Module, dann profitiert der Teillastwirkungsgrad auch von der Fähigkeit einer vollständigen Zylinderabschaltung. Da bei jedem einzelnen Modul die freien Massenkräfte vollständig ausgeglichen sind, kann die Motorsteuerung jedes Modul individuell zu-

und abschaltet. Das reduziert die Reibungsverluste weiter und eröffnet mehr Möglichkeiten, den Verbrennungsprozess an die geforderte Leistung anzupassen.

RANGE-EXTENDER

Eine energetische Beschreibung von Range-Extendern muss stets die gesamte Wirkungskette von der im Kraftstoff gespeicherten Energie bis zur elektrisch ausgekoppelten Energie betrachten. Aufgrund des Funktionsprinzips des FKLGs wäre ein isolierter Vergleich der Verbrennungseinheit mit konventionellen Hubkolbenmotoren nicht ausreichend. Bild 4 zeigt die Wirkungskette vom Kraftstoff bis zur elektrischen Energie für einen exemplarischen Betriebspunkt des Funktionsdemonstrators sowie die modellbasierte Abschätzung eines Zentralbrennraumsystems. Die Messwerte des Funktionsdemonstrators sind dabei noch vom frühen Entwicklungsstadium einzelner Komponenten geprägt. Während Gasfeder und Lineargenerator bereits zufriedenstellende Wirkungsgrade liefern, senken die Reibungsverluste im Linearlager den Gesamtwirkungsgrad um 5,9 Prozentpunkte. Bei dem serienreifen Modul in der Leistungsklasse von 26 kW_{el} erwartet das DLR einen Gesamtwirkungsgrad von 36,6 %.

Für den Einsatz im Fahrzeug eröffnen sich neue Integrationsmöglichkeiten. Da das FKLG-System den Lineargenerator bereits mitbringt, muss kein Generator nachträglich an den Verbrennungsmotor adap-

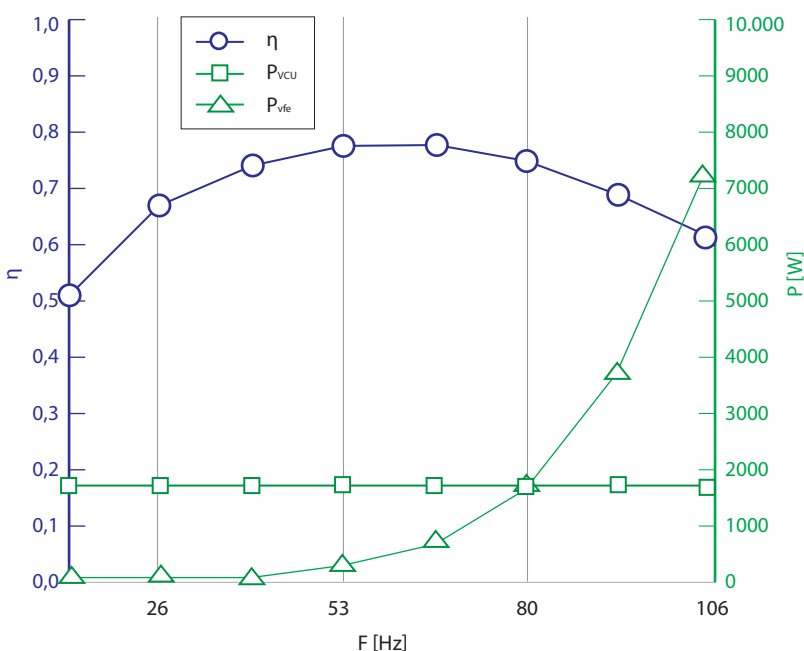
tiert werden. Verbrennungskomponente und Generator bilden eine kompakte Einheit, die zudem sehr flach ausfällt. Das in Tabelle 1 beschriebene Beispielsystem erreicht eine Bauhöhe von weniger als 15 cm. Dadurch kann ein Fahrzeughersteller FKLG-Module im Unterboden oder dem Mitteltunnel verbauen und als kundenindividuelle Ausstattungsalternative zu Batterien anbieten [3]. Verschiedene Anordnungsmöglichkeiten des Lineargenerators erhöhen die Freiheiten beim Flächenbedarf. Das erwähnte Beispielsystem basiert auf der seriellen Anordnung der Lineargeneratoren (Bild 2b) und erreicht dabei eine Grundfläche von $970 \text{ mm} \times 228 \text{ mm}$.

AUSBLICK

Mit dem Proof of Concept hat das DLR die Machbarkeit des Konzepts demonstriert und die elementaren Hürden im Bereich der Hard- und Softwareentwicklung überwunden. Weiteren Entwicklungsbedarf gibt es beim Zweitaktbrennverfahren [5, 7]. Die bisher erlangten Ergebnisse bilden eine Basis für weitere Arbeiten, die zunehmend von der reinen Forschung hin zu einer stärker industriell geprägten Forschung und Vorentwicklung reifen. (lei) //

Die beschriebenen Ergebnisse wurden durch die Arbeiten der Kollegen und Kooperationspartner während der gesamten bisherigen Projektlaufzeit ermöglicht. All jenen die zum Erfolg dieses Projekts beigetragen haben, gilt der ausdrückliche Dank der Autoren.

Verlust und Wirkungsgrad Gemessen am Funktionsdemonstrator



Autoren

Dipl.-Ing. Roman Virsik

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.



Dipl.-Ing Alex Heron

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.



Stephan Schneider, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart.



Bild 6: Frequenzabhängige Verluste P_{VCU} und P_{VFE} sowie Wirkungsgrad η des Lineargenerators der 1. Generation.