


AUS ABGASEN ENERGIE GEWINNEN

Steigende Kraftstoffpreise haben zu einer stetig wachsenden Nachfrage nach energieeffizienteren Fahrzeugen geführt. Neben dem Einsatz verbesserter Antriebstechniken lässt sich die Effizienz auch durch Rückgewinnung andernfalls verlorener Energie steigern. Thermoelektrizität stellt dabei eine Möglichkeit dar, die Verlustwärme von Verbrennungsmotoren in elektrische Energie umzuwandeln.

TEXT: Dr. Angelika Veziridis, Urs Cabalzar, Matthias Trottmann, Dr. Anke Weidenkaff **FOTOS:** Empa  www.EuE24.net/PDF/EEK8816450

Die negativen Konsequenzen einer möglichen globalen Erwärmung, Ressourcenverknappung und steigende Rohstoffpreise sind Motivationen für Konsumumstellung und Energieeinsparung. Im Bereich der Mobilität lässt sich ein Trend hin zu kleineren und effizienten Autos verzeichnen. Die Automobilindustrie trägt dieser Nachfrage vor allem durch innovative Antriebstechnologie (optimierte Brennräume, Magermix-Motoren, Direkteinspritzung, drehzahlsenkende Getriebe etc.) Rechnung. Allerdings werden auch mit den sparsamsten Verbrennungsmotoren nur etwa 30 Prozent der Kraftstoffenergie für die eigentliche Fortbewegung genutzt. Ein Großteil (40 bis 60 Prozent) wird in Form von Wärme über Kühlwasser und Abgas an die Umgebung abgegeben. Die Rückgewinnung dieser Verlustwärme stellt eine bedeutende Maßnahme dar, den Kraftstoffverbrauch in Zukunft weiter zu optimieren.

Derzeit beschränkt sich die Nutzbarmachung der Motorabwärme von Kraftfahrzeugen auf die Aufheizung von einzelnen Komponenten (Katalysator, Kühlmittel, Schmierstoffe) oder der Fahrgastzelle. Der Hauptanteil wird allerdings als Abwärme in die Umgebung abgeleitet. Eine weitergehende Nutzung oder sogar die Speicherung der Abgaswärme setzt ihre Umwandlung in eine geeignete Energieform voraus. Das ist auch vor dem Hintergrund eines zunehmenden Strombedarfs des Bordnetzes eine attraktive Maßnahme [1].

In dieser Hinsicht stellen Thermoelektrische Generatoren (TEG), die Wärme direkt in Elektrizität umwandeln, eine sehr vielversprechende Technologie dar.

Motorabwärme mit TEG nutzbar machen

Denn im Vergleich zur Wandlung der Abwärme in mechanische Energie (bspw. unter Einsatz von Dampfmaschinen) haben TEG deutliche Vorteile: Sie arbeiten ohne bewegliche Teile und sind in einem größeren Temperaturbereich einsetzbar. Sie sind somit flexibler und wandeln Energie emissionsarm, geräuschlos und nahezu wartungsfrei. Dabei kommt ein p- und n-Halbleiterpaar zum Einsatz, an dem sich eine elektrische Spannung ausbildet, wenn es einem Temperaturgradienten ausgesetzt ist. Diese Spannung ist materialabhängig und proportional zur anliegenden Temperaturdifferenz.

$$U = (S_p - S_n) (T_2 - T_1) \quad (\text{Gleichung 1})$$

S: Seebeck-Koeffizienten der p- und n-Leiter

T: Temperatur

Die Effizienz solcher TEG ist derzeit noch sehr gering und bewegt sich zwischen drei und fünf Prozent. Dennoch wird dieser Technologie von Seiten der Automobilindustrie mittler-



Abbildung 1: Rippenkonstruktion des Wärmetauschers aus Kupfer.

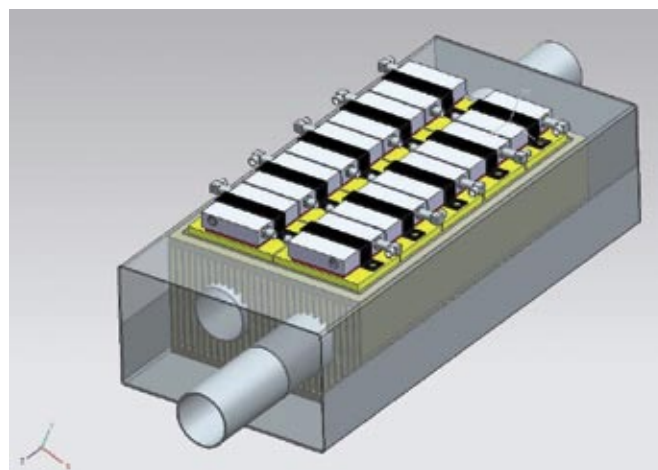


Abbildung 2: CAD-Modell des thermoelektrischen Generators.

weile großes Interesse entgegengebracht, da im Abgasstrang Abwärme auf hohem Temperaturniveau quasi kostenfrei zur Verfügung steht und bei optimaler Wärmeentnahme hohe Generatorspannungen garantiert (Gleichung 1).

Die elektrische Rekuperationsleistung wird allerdings durch zwei praktische Parameter begrenzt: Zum einen sind die derzeit leistungsfähigsten TE Materialien längerfristig nur bis zu Temperaturen von 260 °C stabil, so dass sie vor Überhitzung geschützt werden müssen. Zum anderen darf der Einbau von Wärmetauschern mit möglichst großen Übergangsflächen den Abgasgedruck nur bedingt ansteigen lassen, da sich andernfalls ein Karftstoffmehrverbrauch ergibt, der den Effekt des TEG aufhebt. Um bei höheren Motorlasten eine Überhitzung der Module und einen übermäßigen Anstieg des Abgasgedrucks zu verhindern, behelfen sich die Entwickler derzeit mit dem Einbau von Bypassvorrichtungen, durch die abhängig vom Betriebspunkt mehr oder weniger Abgas geleitet werden kann. Eine solche Konstruktion erhöht allerdings die Komplexität des Systems, da sie mehr Platz und eine betriebsabhängigen Steuerung erfordert. Zudem steht das den Bypass durchströmende Abgas für die TE-Wandlung nicht mehr zur Verfügung.

Auf Grundlage technischer und wirtschaftlicher Bewertungskriterien wurde im Rahmen einer von der Swisselectric, einer Organisation der großen schweizerischen Stromverbundunternehmen, geförderten Bachelor-Arbeit eine alternative Konstruktion für ein thermoelektrisches Abwärmerückgewinnungssystem in Fahrzeugen entwickelt und auf einem Laborprüfstand getestet [2]. Dazu wurden konventionelle TE-Module auf Basis von Bismutellurid verwendet (siehe Kasten).

Die Wärmeentnahme erfolgt über Rippen, angeordnet in einem rechteckigen Kanal mit großem Strömungsquerschnitt. Als besonders geeignet erscheint die Integration der Rippen-

konstruktion in den mittleren Schalldämpfer, da dieser funktionsbedingt bereits ein großes Volumen aufweist und Temperaturmessungen belegen, dass hier ohnehin viel Wärmeenergie entnommen wird. Allerdings werden der Schalldämpfer um 90° gedreht, um eine bessere Modulaufgabe zu erhalten, und die Außenmaße leicht vergrößert, um trotz Rippenkonstruktion die durchströmte Querschnittsfläche konstant zu halten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bypass-Systemen hat diese Vorgehensweise den Vorteil, dass der Generator in einer bestehenden Fahrzeugkomponente integriert ist und nur geringe zusätzlichen Anforderungen an den Bauraum stellt.

Temperatur mechanisch reguliert

Die Rippenkonstruktion besteht aus Platten und Leisten, die über Gewindestangen zusammengepresst werden. Als Material wurde aufgrund seiner Hochtemperaturbeständigkeit und seiner hohen Wärmeleitfähigkeit Kupfer verwendet (hinsichtlich des Gewichts würden allerdings auch technische Keramiken, Aluminiumnitrid oder Siliziumnitrid oder -carbid, eine geeignete Alternative darstellen). Die Rippenkonstruktion ist mit einem Mantel aus rostfreiem Stahl umgeben.

SPEZIFIKATIONEN DER TE-MODULE

Dimensionen:	56 mm x 56 mm x 4,1 mm
Lehrlaufspannung:	8,6 V
Kurzschlussstrom:	8,6 A
Innenwiderstand:	1 Ω
Seebeck-Koeffizient:	0,043 V/K
Wärmeleitwert:	0,96 W/K
Max. Betriebstemperatur:	260 °C
Elektr. Leistung [$\Delta T = 200$ K]:	18,3 W

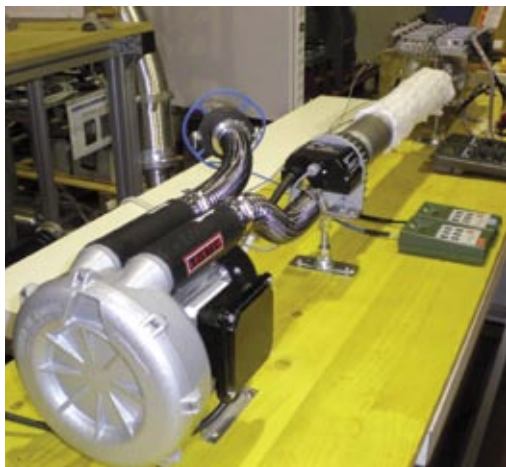


Abbildung 3: Prüfstand.

Die Kühlung der Module wird über wasserdurchflossene Aluminium-Kühlkörper sichergestellt, die auf der Oberseite der Module aufliegen. Für die Temperaturregulierung an der heißen Modulseite hat man einen mechanischen Ansatz gewählt, da eine elektronische Steuerung eine zusätzliche Energieversorgung benötigt. Dazu liegen die Module nicht direkt auf den Wärmetauscher auf, sondern sind durch Aluminiumplatten von diesem getrennt. Die Aluminiumplatten können mit Hilfe von Bimetallstreifen Module und Kühlkörper von der Wärmequelle entkoppeln. Die gesamte Anordnung wird mit Federn vorgespannt in den Wärmetauscher eingeschraubt. Bei maximaler Betriebstemperatur hebt die Kraft der Bimetallstreifen die Aluminiumplatte an und unterbricht den thermischen Kontakt. Der Abgasstrom wurde mit Hilfe eines Gebläses und eines Lufterhitzers simuliert. Mit den verwendeten Komponenten ließ sich ein Massenstrom von 7 g/s bei einer Temperatur von 500 °C realisieren. Es resultiert ein Wärmestrom von 3,4 kW, was etwa einem Drittel des in einem durchschnittlichen Fahrzeug auftretenden Wertes entspricht. 2,2 kW wurden dem Gasstrom im Wärmetauscher entnommen, allerdings ging 1 kW über die Oberfläche des Schalldämpfers verloren. Von den verbleibenden 1,2 kW konnten 42 W durch den TEG trotz Ausfalls zweier Module rekuperiert werden. Dementsprechend ergibt sich ein thermoelektrischer Wirkungsgrad von 3,5 Prozent bezogen auf den tatsächlichen Wärmetransfer durch die Module. Der Druckverlust war mit ca. 70 Pa unter den gegebenen Strömungsbedingungen relativ gering.

Zusammenfassung

Die Funktion des konstruierten Generators konnte mit Hilfe des beschriebenen Prüfstands nachgewiesen werden [3].

Durch den Einsatz leistungsfähigerer und betriebssicherer Module wäre noch eine Steigerung der Effizienz möglich, so dass sich genug elektrische Energie für die Versorgung des Bordnetzes generieren ließe. Ein klarer Nachteil besteht in der geringen Temperaturstabilität der derzeitigen TE-Materialien, was die Größenordnung der Energierückgewinnung stark einschränkt. Zusätzlich zur thermischen Instabilität stellen auch Verfügbarkeit und Toxizität der in den Materialien enthaltenen Elemente große Probleme dar. Daher bedarf es vor allem im Bereich der Materialentwicklung weiterer Fortschritte, um dieser Technologie langfristig zum Durchbruch zu verhelfen. In unserem Labor forschen wir an neuartigen TE-Materialien auf Basis nanostrukturierter perowskitartiger Oxide, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften besonders auch für den Einsatz im Abgasstrang von Fahrzeugen eignen [4,5]. □

Literatur

- [1] Jänsch, Daniel (Hrsg.), Thermoelektrik: Eine Chance für die Automobilindustrie, Expert-Verlag, 2009.
- [2] Cabalzar, Urs, Bachelor Thesis, Berner Fachhochschule, 2009.
- [3] Trottmann, M., Weidenkaff, A., Populoh, S., Brunko, O., Veziridis, A., Bach, C., Cabalzar, U., Demonstration of High Temperature Thermoelectric Waste Heat Recovery from Exhaust Gases of a Combustion Engine, in: Jänsch, Daniel (Hrsg.), Thermoelectrics Goes Automotive (Thermoelektrik II), Expert-Verlag, 2011, 92-99.
- [4] Robert, R., Romer, S., Reller, A., Weidenkaff, A., Nanostructured Complex Cobalt Oxides as Potential Materials for Thermoelectric Power Generators, Adv. Eng. Mater., 7 (2005), 303-308.
- [5] Veziridis, A., Weidenkaff, A., Neue Materialien für thermoelektrische Generatoren, energy 2.0 Compendium 2011, publish-industry verlag, 280-282.

> MORE@CLICK EEK8816450