

Thermoelektrische Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen

Daniel Jansch, Mike Laudien, Jens Kitte

Einleitung

Das dominierende Thema der Automobilentwicklung ist im Moment die Reduzierung der CO₂-Emissionen, um dem Klimawandel zu begegnen. Der Klimawandel und die langfristig steigenden Preise für fossile Energieträger stellen die Automobilindustrie vor eine große Herausforderung: Sie muss das Bedürfnis nach individueller Mobilität befriedigen, zugleich aber auch den Wunsch ihrer Kunden nach Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Komfort, Fahrleistung und Fahrspaß erfüllen. Zudem verschärfen die Staaten ihre Emissionsgrenzen für den Ausstoß von Kohlendioxid und Schadstoffen.

Hinzu kommt, dass der Fahrzeugbestand in den Schwellenländern – etwa in Indien und China – in den kommenden Jahrzehnten deutlich ansteigen dürfte. Das kann dazu führen, dass das Öl knapp wird: Nach Berechnungen der Internationalen Energieagentur IEA wird die Nachfrage bis zum Jahr 2030 um 45 Prozent auf 106 Millionen Barrel pro Tag steigen (im Vergleich zu 2006) [1]. Viele Experten bezweifeln, dass so viel Öl gefördert werden kann. Sicher ist, dass sich die Rahmenbedingungen für Mobilität und Verkehr langfristig weiter verschärfen werden. Wachsender Energiebedarf, begrenzte fossile Energieressourcen, zunehmende Umweltbelastungen sowie wirtschaftliche und politische Krisen könnten nachhaltige Mobilität empfindlich einschränken oder sogar gefährden.

Die Automobilindustrie muss auch auf diese Entwicklungen eine Antwort finden. Neben der Entwicklung neuer Technologien, wie den Elektro- und Hybridantrieben, gehört dazu auch mehr Effizienz bei konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Das ist aber nur möglich, wenn alle Komponenten weiterhin auf den Prüfstand gestellt und optimiert werden. Fahrzeugentwickler haben besonders in den letzten beiden Jahrzehnten hinsichtlich Kraftstoffeffizienz und Abgasemissionen ohne Frage viel erreicht. Dabei wurden Kundenwünsche bezüglich Leistung und Komfort sowie gesetzliche Vorgaben wie Abgasnachbehandlung oder mehr Sicherheit erfolgreich umgesetzt. Seit der Erfindung des Otto- und des Dieselmotors vor mehr als 100 Jahren hat es enorme Fortschritte gegeben, insbesondere was den Wirkungsgrad der Motoren angeht. Moderne Motoren sind heute wesentlich sparsamer als ihre Vorgänger.

Andererseits ist erkennbar, dass weitere, darüber hinausgehende Anstrengungen notwendig sind, insbesondere zur Senkung des fossilen Primärenergieverbrauchs. Die bisher so erfolgreichen Entwicklungsrichtungen werden weiter verfolgt und zu spürbaren Verbesserungen führen – zum Beispiel zu minimalem Energiebedarf (Fahrzeuggewicht, Luft- und Rollwiderstand), minimalen Wandlungsverlusten (effizientere Antriebsmotoren und Nebenaggregate) und bedarfsgerechter Energiebereitstellung (elektrische Kühlmittelpumpe, elektrische Lenkkraftunterstützung).

Die vollständige Umwandlung der im Kraftstoff gebundenen chemischen Energie in mechanische Nutzenergie wird aber nie möglich sein. Immer wird der größere Anteil der zugeführten Energie als Abwärme vom Verbrennungsmotor freigesetzt (siehe Bild 1). Es ist deshalb zu erwarten, dass jetzt Maßnahmen in den Vordergrund treten, die die bisher ungenutzt an die Umgebung abgegebene Wärmeenergie verwenden. Sie können zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz künftiger Verkehrsfahrzeuge einen signifikanten Beitrag leisten.

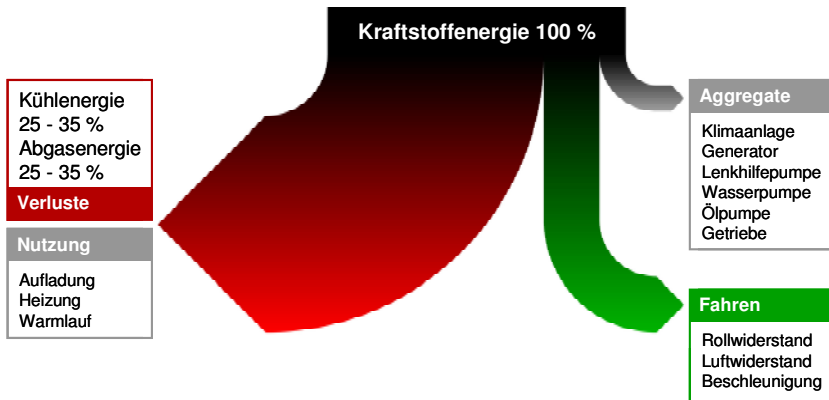


Bild 1: Energieverteilung in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Bis heute wird von diesem Abwärmepotenzial nur ein relativ geringer Anteil genutzt oder zurück gewonnen: Ein Teil wird während der Warmlaufphase an die Antriebskomponenten und die Abgasnachbehandlung übertragen, zudem werden die Heizung und eventuell vorhandene Komponenten für die Aufladung versorgt. Es bleibt ein riesiges Potenzial für alle Maßnahmen, die diese Verlustwärme nutzen können und dadurch wertvolle fossile Primärenergie einsparen. Die Erschließung dieses noch weitgehend ungenutzten Potenzials ist eine wirksame Methode, gleichzeitig die Sicherheit der Energieversorgung zu erhöhen, die Umweltbelastungen zu verringern, die Wettbewerbsfähigkeit zu verbessern und die Entwicklung eines großen, zukunftsorientierten Marktes für energieeffiziente Technologien und Produkte zu fördern. Schon die Nutzung eines kleinen Teils dieser „brachliegenden“ Energie – eine entsprechende Verbreitung der Technologie vorausgesetzt – würde enorme Mengen fossiler Energie einsparen und damit einen großen Teil zur nachhaltigen Sicherung individueller Mobilität beitragen.

Abwärmenutzung

Es gibt viele Möglichkeiten, die Abwärmeenergie in modernen Fahrzeugen zu nutzen:

- Sie kann gespeichert werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt zu verwenden.
- Sie kann direkt verwendet werden, um Aggregate (Motor, Getriebe), Komponenten (Katalysator) und Medien (Kühl-, Schmiermittel) aufzuheizen.
- Sie kann zum Antrieb von Wärmepumpen verwendet werden, um sie aufzuwerten (Hitze, Kälte).
- Sie kann gewandelt werden, um sie in andere höherwertige Energieformen zu überführen.

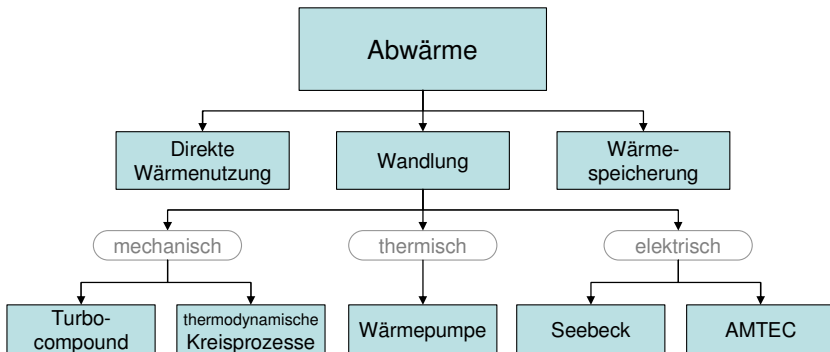


Bild 2: Optionen für die Nutzung der Abwärme

Die Speichertechnologien für thermische Energie sind zwar seit langer Zeit bekannt, haben sich jedoch im Automobil noch nicht durchgesetzt. Für neue Antriebskonzepte gewinnen sie aber zunehmend an Bedeutung – entsprechende Veröffentlichungen und Forschungsaktivitäten weisen darauf hin. Bei zeitweise abgestelltem Verbrennungsmotor (z. B. bei Stopp-Start-Systemen oder in Hybridfahrzeugen, die rein elektrisches Fahren ermöglichen) könnten Wärmespeicher Aggregate und Komponenten auf Betriebstemperatur halten und einen ausreichenden Betrieb der Führer-, Fahrgast- und Laderaumheizung sicherstellen. Auch werden sie möglicherweise eine Rolle bei anderen Nutzungskonzepten spielen: Wenn es darum geht, dynamische Wärmeströme zu „glätten“, um nachgeschaltete (Wandlungs-) Prozesse aufrechtzuerhalten. Dies gilt vor allem dann, wenn betriebsbedingt die Abwärme stark reduziert wird oder völlig ausbleibt. Weitere interessante Ansätze zielen auf die Verkürzung der Warmlaufphase

nach längerem Fahrzeugstillstand (z. B. über Nacht), mit der Option, den Wärmespeicher elektrisch über Netzanschluss aufzuladen (externe Konditionierung).

Stand der Technik ist die direkte und indirekte Verwendung der Motorabwärme. Vor allem wird heute bei vielen Motoren Abgasenergie im Rahmen der Abgasturboaufladung genutzt, um eine Gesamtwirkungsgradsteigerung der Verbrennungskraftmaschine zu erzielen. Eine noch wenig in der Serie [2, 3, 4] verbreitete Variante ist die Nutzung der Abgasabwärme zum beschleunigten Aufheizen des Motorkühlwassers. Hierdurch kann die optimale Betriebstemperatur der Antriebsaggregate schneller erreicht sowie die Heizung für Führer-, Fahrgast- und Laderaum früher versorgt werden. Ersteres führt zu einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und Letzteres zur Erhöhung der Sicherheit und zur Komfortverbesserung.

Thermisch angetriebene Wärmepumpen sind technologisch ebenfalls relativ gut erschlossen. Stationäre Aggregate vom dreistelligen kW- bis in den mehrstelligen MW-Bereich sind in der Industrie und der Gebäudetechnik heute Stand der Technik (z. B. am Flughafen München) [5]. Auch stationäre Anlagen im unteren kW-Bereich werden bereits von mehreren Herstellern angeboten mit dem Ziel, diese bei niedrigen Arbeitstemperaturen durch Sonnenkollektoren oder Motorabwärme zu betreiben [6]. Dabei handelt es sich um Absorptionsmaschinen.

Maschinen, die nach anderen Verfahren – Vuilleumier-Prozess, Dampfstrahler, Thermoelektrik – arbeiten, sind zwar bekannt, jedoch bis heute bestenfalls in Großanlagen (Dampfstrahlkälteanlagen) oder als Prototypen realisiert. Über Systeme für den mobilen Einsatz, z. B. in Fahrzeugen, ist nur wenig bekannt, sie werden aber diskutiert [7]. Grundsätzlich kann jedoch davon ausgegangen werden, dass alle in Frage kommenden Technologien prinzipiell auch für den mobilen Einsatz geeignet sind. Besonders aussichtsreich scheint der mobile Betrieb mit Abgas. Wegen des überreichlichen Energieangebots und der hohen Antriebstemperatur ist eine Darstellung kleiner kompakter Systeme mit hoher Leistungsdichte aussichtsreich. Derartige Systeme verbessern die Energieeffizienz von Fahrzeugen und Arbeitsmaschinen, indem sie den zusätzlich geforderten Energiedienst liefern (Heizen, Kühlen, Trocknen/Entfeuchten) ohne zusätzlichen Kraftstoffaufwand, da sie quasi umsonst durch Verlustwärme angetrieben werden.

Für die Wandlung der Abwärmeenergie in mechanische oder elektrische Energie stehen eine ganze Reihe technischer Optionen zur Verfügung [8]:

Für die direkte Wandlung von Wärme in mechanische Energie kommen verschiedene Technologien in Frage: Turbocompounding, Dampfkreis- und Gaskreisprozesse. Sie sind alle bekannt, zumindest in stationären Anlagen hinreichend erprobt und kommen grundsätzlich auch für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen in Frage. Die so gewonnene mechanische Energie kann für den Antrieb des Fahrzeugs genutzt, also mit ent-

sprechenden Kennungswandlern in den Antriebsstrang eingekoppelt werden. Alternativ kann sie auch für den Antrieb der Nebenaggregate im Fahrzeug Verwendung finden, z. B. indem sie in einem weiteren Wandlungsprozess im Generator in Elektrizität umgewandelt wird. Das Turbocompound-System wurde früher bereits für Flugzeugkolbenmotoren kommerziell eingesetzt [9] und wird heute von verschiedenen Nutzfahrzeugherstellern [10] (z. B. Scania) für schwere Nutzfahrzeugmotoren angeboten [11]. Kraftstoffeinsparungen von 2 % bis 4 % werden angegeben. Die anderen Technologien sind Gegenstand von Forschungsprojekten und wurden teilweise in Form von Prototypen in Fahrzeugen vorgestellt. Honda gelang eine Effizienzverbesserung bei 100 km/h Konstantfahrt von 3,8 % [12]. Experten erwarten von solchen Systemen Verbrauchsreduzierungen in der Größenordnung von mehr als 10 % [13].

Für die direkte Wandlung von Wärme in elektrische Energie gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die wichtigsten sind thermionische, thermophotovoltaische und thermoelektrische Energiewandlung sowie die elektrochemische Stromerzeugung mit Festelektrolytgeneratoren (alkali metal thermal electric converter, AMTEC) [14 - S.327]. Sie sind prinzipiell auch für den Fahrzeugeinsatz geeignet. Die Technologien sind teilweise noch im Forschungs- bzw. Entwicklungsstadium. In einigen wenigen Bereichen sind Systeme aber auch schon seit langem im Einsatz: Beispielsweise in der Raumfahrt oder auch kommerziell für spezielle industrielle Anwendungen (Offshore) [15]. Derzeit scheint unter Verwendung der vorhandenen Technologien, Materialien und Komponenten ein Systemwirkungsgrad von bis zu 10 % erreichbar. Aktuell dargestellte thermoelektrische Systeme liegen jedoch noch darunter. In Einzelfällen konnten im Labor Wirkungsgrade von bis zu 16 % (z. B. AMTEC [16]) demonstriert werden, wobei die Prognosen weit höher reichen. Während Thermionik, Thermophotovoltaik und der AMTEC-Konverter insbesondere mit Blick auf den Automobileinsatz einen noch geringen Reifegrad aufweisen, verfügt die Thermoelektrik heute über den höchsten Entwicklungsstand, so dass dieser Technologie seitens der Automobilindustrie derzeit ein großes Interesse entgegen gebracht wird [17].

Thermoelektrik

Thermoelektrik beschreibt Erscheinungen in elektrisch leitenden, festen Stoffen, bei denen elektrische Spannungen und Temperaturdifferenzen in Wechselwirkung stehen. Der Physiker Thomas Johann Seebeck entdeckte 1821 die elektrische Wirkung von thermischen Gradienten in elektrischen Leitern: „Temperaturdifferenz führt zu elektrischer Spannung“. Die Ursache sind Thermodiffusionsvorgänge – Ladungsträger wandern von der warmen zur kalten Seite. Die erzeugte elektrische Spannung ist proportional zur Temperaturdifferenz und abhängig von den Eigenschaften des Materials, beschrieben durch den „Seebeck-Koeffizienten“

$$S = U_{\text{thermo}} / (T_{\text{Hei\ss}} - T_{\text{kalt}}) \text{ (in V/K)}.$$

13 Jahre später fand der Physiker Jean Peltier heraus, dass es auch andersherum geht: „Elektrischer Strom führt zu Temperaturdifferenz“. Um die Effekte technisch zu nutzen, wird Halbleitermaterial verwendet, von dem je ein p- und n-dotiertes Element thermisch parallel und elektrisch über Kontaktbrücken (Pads) in Reihe zu einem thermoelektrischen „Schenkel“ (Dice) zusammen gefasst werden. Um höhere Leistungen zu erhalten, werden mehrere dieser Schenkel in Serie geschaltet und ergeben dann ein thermoelektrisches Modul (TEM).

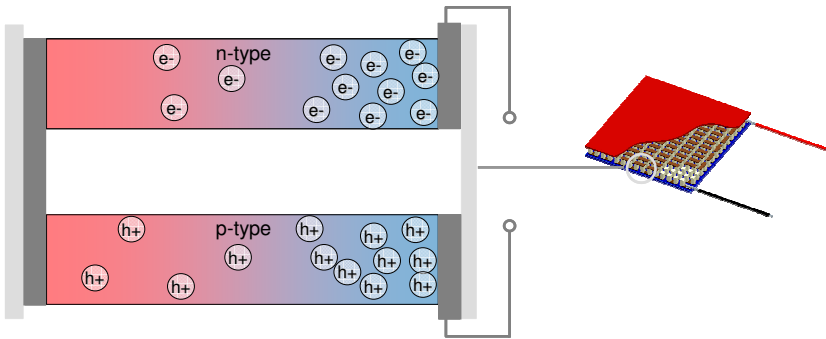


Bild 3: Thermodiffusion im thermoelektrischen Schenkelpaar eines TEM

Die thermoelektrische Umwandlung beruht nicht auf mechanischen oder chemischen Prozessen. Daraus ergibt sich der große Vorteil thermoelektrischer Module: Sie besitzen keine bewegten Teile und verbrauchen sich nicht. Diese Energiewandler sind feste, massive Bauteile ohne flüssige oder gasförmige Anteile. Sie sind deshalb sehr robust, lautlos, emissionsfrei, umweltfreundlich, wartungsfrei und langlebig sowie bezüglich Baugröße und -form weitestgehend frei gestaltbar und hinsichtlich ihrer Leistung beliebig skalierbar (von μW bis W). Eine interessante Variante würden flexible Module auf Folienbasis darstellen, an deren Entwicklung Forscher bereits arbeiten.

Die fast 200 Jahre alte Technologie, die aus Wärme elektrischen Strom oder aus elektrischem Strom Wärme und Kälte erzeugen kann, scheint wie geschaffen für das Automobil. Bei zukünftigen Antriebssystemen mit neuen Komponenten (Elektroantrieb, Batterien) und Funktionen (Motorabschaltung, rein elektrisches Fahren) wird elektrische Energie in größeren Mengen zur Verfügung stehen und eingesetzt werden – bei gleichzeitigem Bedarf an Heizung und Kühlung. Hier können thermoelektrische Wärmepumpen möglicherweise in Zukunft eine verstärkte Rolle spielen. Erste Systeme

me zur Sitzklimatisierung sind bereits in Serie [18 – S.1460]. Weitere Ideen und Konzepte sind in der Diskussion.

Wärme gibt es in aktuellen Fahrzeugen im Überfluss. Andererseits wird hier auch in zunehmendem Maße elektrische Energie benötigt: Mit jeder neuen Fahrzeuggeneration ist der mittlere Strombedarf bisher angestiegen. Ursachen sind die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge (Kühlmittelpumpe, Lenkkraftunterstützung, Fahrwerk, Bremse, Klimatisierung) sowie neue Sicherheits- und Komfortsysteme (z. B. Navigation, Assistenzsysteme). Im Kundenbetrieb liegt der Strombedarf aktueller Personewagen weit über dem Grundbedarf von 100 W bis 200 W [19]. Klein- und Kompaktfahrzeuge kommen je nach Ausstattung und Betriebsbedingungen auf 300 W bis 500 W, bei Mittel- und Oberklassefahrzeugen sind es inzwischen 600 W bis 800 W – bei Vollausrüstung auch darüber. Nutzfahrzeuge erreichen ähnliche Größenordnungen. Bisher kommt der Strom den Fahrer teuer zu stehen: Er wird mit geringem Wirkungsgrad aus teurem Kraftstoff erzeugt und kostet ein Vielfaches der Elektrizität im Haushalt – je nach Fahrzeug und Betriebsweise kann die Stromerzeugung bis zu zehn Prozent des Kraftstoffverbrauchs ausmachen [20].

Hier können thermoelektrische Energiewandler helfen. Da sie Verlustwärmeenergie statt mechanischer Energie vom Verbrennungsmotor nutzen, erzeugen sie quasi kostenlos Strom. Dadurch wird der Stromanteil reduziert, den der verbrennungsmotorisch angetriebene Generator liefern muss. Bei günstigen Betriebsbedingungen könnten thermoelektrische Generatoren sogar vollständig die Bordnetzversorgung übernehmen. Die Folgen wären weniger Kraftstoffverbrauch, weniger CO₂-Ausstoß und weniger Schadstoffemissionen. Damit verbessern thermoelektrische Wandler signifikant Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit kommender Automobilgenerationen.

Besonders aussichtsreich ist der Einsatz der Technologie, wenn viel thermische Energie bei hohen (Abgas-) Temperaturen über lange Zeiträume zur Verfügung steht. Derartige Betriebszustände treten häufig bei Nutzfahrzeugen im Langstreckenverkehr (Fernlastzüge, Reisebusse), aber auch bei Transportern, Kleinbussen oder großen Limousinen auf. Arbeits- und Landmaschinen arbeiten auch bei solchen Betriebszuständen, ebenso stationäre Anlagen, wie Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Stromaggregate. Die Technologie kann besonders effektiv zur Verbrauchsreduzierung durch Entlastung des konventionellen Generators beitragen, wenn der Strombedarf im Betrieb durch viele Abnehmer groß ist, z. B. im Reisebus. Mit entsprechenden Speichern kann der Strom auch für Motor- und Fahrzeugstillstandszeiten gespeichert werden, um Komfort sicherzustellen (z. B. Standklimatisierung) und Auxiliary Power Units (APU) zu entlasten.

Weniger effektiv ist die Technologie, wenn nur geringe Exergieströme zur Verfügung stehen, wie z. B. bei Stadtfahrten insbesondere von Kleinfahrzeugen. Dort werden

thermoelektrische Systeme nur wenig Strom liefern und dementsprechend auch nur wenig zur Kraftstoffeinsparung beitragen. Deshalb werden sie in den genormten Zyklen (NEFZ, Japan 10-15mode, FTP-75) kaum auffallen und damit die CO₂-Bilanz auch nur minimal positiv beeinflussen können. Um dennoch die Entwicklung solcher „versteckter“ CO₂-Einsparttechnologien zu fördern, hat die EU die „Eco Innovations“-Regelung erlassen [21].

Die ideale Konstellation für hohe Energieeffizienz und geringen CO₂-Ausstoß im „Gemischtbetrieb Stadt-/Fernverkehr“ ist die Kombination von kinetischer und thermischer Rekuperation, auch wenn die wirtschaftliche Umsetzung eine enorme Herausforderung sein wird.

Obwohl die thermoelektrischen Effekte lange bekannt sind und schon praktische Anwendung finden, konnten sie sich im breiten industriellen Einsatz zur Stromerzeugung nicht durchsetzen. Hauptgründe sind der bislang bescheidene Wirkungsgrad der Systeme im Vergleich zu anderen Formen der Energieerzeugung und die hohen Kosten des verfügbaren thermoelektrischen Materials (Thermoelektrika). Zum Einsatz kommen thermoelektrische Module als Generatoren (Seebeck-Module, TEG) bis heute hauptsächlich in Forschungsprojekten, wie z. B. für die Stromversorgung mobiler medizinischer Systeme aus Körperwärme [22], für nichtkommerzielle Weltraum- und Militärapplikationen, für industrielle Nischenanwendungen wie Energieerzeugung bei Offshore-Anlagen [15] und für Freizeitprodukte wie Armbanduhren [23] und Campingausrüstungen [24]. Ungleich stärker verbreitet sind thermoelektrische Module als Wärmepumpe bzw. Kühler (Peltier-Module, TEC). Sie werden u. a. eingesetzt zur Kühlung elektronischer Komponenten und in medizinischen Geräten, zur Temperierung von Laserdioden, für Temperaturkalibriergeräte [25, 26] und zur Fahrzeugsitzklimatisierung [18]. Die wohl am meisten verbreiteten Endverbraucher-Anwendungen sind die mobile Kühlbox sowie Getränkekühler bzw. -wärmer.

Von der Automobilindustrie wird die Technologie schon seit langem beobachtet. Vereinzelt gab es im letzten Jahrhundert kleinere Forschungsprojekte, die die Möglichkeiten der Technologie ausloten sollten [27, 28, 29] und auch zeigen, dass die Technologie grundsätzlich für den Einsatz im Fahrzeug geeignet ist. Die Erwartungen und Anforderungen der Fahrzeughersteller wurden jedoch offensichtlich nie erfüllt, so dass thermoelektrische Generatoren bisher nicht den Weg in die Serie geschafft haben. Anders ist die Situation bei thermoelektrischen Kühlern: Wie bereits erwähnt, gelang es der Firma Amerigon, mit der Sitzklimatisierung Peltier-Systeme in größeren Stückzahlen im oberen Fahrzeugsegment in Serie zu bringen.

Materialforschung

Benötigt werden thermoelektrische Materialien und Module, die den Anforderungen der Fahrzeugindustrie entsprechen. Im Vordergrund stehen Kosten und Effizienz der Thermoelektrika. Aber auch Verfügbarkeit, Umweltrelevanz und Toxizität sowie Herstell-, Verarbeit- und Recyclbarkeit sind wichtige Themen.

Wie effizient ein thermoelektrisches Material Wärmeenergie in elektrische Energie umwandelt, charakterisiert die 1909 durch Edmund Altenkirch [30] eingeführte dimensionslose Gütezahl

$$ZT = (S^2 \cdot \sigma / \lambda) \cdot T \text{ („Figure of Merit“)} .$$

Gute thermoelektrische Materialien müssen demnach nicht nur sehr gut thermische in elektrische Energie umwandeln, ausgedrückt durch einen möglichst hohen Seebeck-Koeffizienten S . Sie müssen auch durch eine gute elektrische Leitfähigkeit σ einen effizienten Stromtransport im Material ermöglichen. Die Voraussetzung für die Wirksamkeit des thermoelektrischen Materials – die Aufrechterhaltung einer möglichst großen Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten eines Schenkels – ist drittens eine geringe thermische Leitfähigkeit λ . Leider lassen sich elektrische und thermische Leitfähigkeit nicht völlig unabhängig voneinander optimieren: Gute elektrische Leiter sind gleichzeitig auch gute thermische Leiter und umgekehrt. Beide Eigenschaften sind über die freien Ladungsträger miteinander verknüpft. Diese leiten elektrischen Strom und transportieren gleichzeitig Wärme.

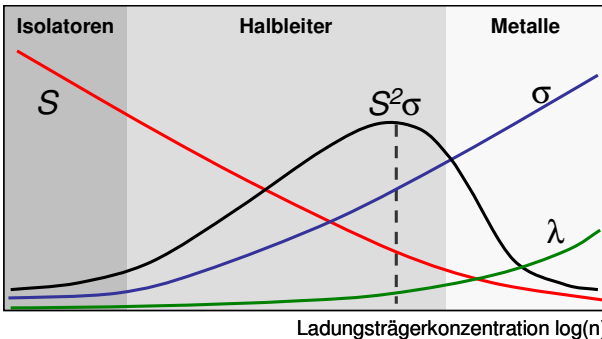


Bild 4: Thermoelektrische Eigenschaften in Abhängigkeit von Ladungsträgerkonzentration

Allerdings tragen auch Phononen erheblich zum Wärmetransport bei. Dieser Anteil der Wärmeleitfähigkeit wird heute durch verschiedene aussichtsreiche Maßnahmen beeinflusst, ohne die elektrische Leitfähigkeit zu behindern. Die Bewegung der Phononen lässt sich u. a. durch eine Nanostrukturierung oder durch Einlagerung von „Rattleratomen“ in Materialien mit käfigartigen Strukturen (Skutterudit) bremsen [31].

Der Wirkungsgrad eines thermoelektrischen Materials ist definiert als das Verhältnis der abgegebenen elektrischen Leistung P_{el} bezogen auf die zugeführte Wärme Q_{zu} :

$$\eta_{TE} = P_{el} / Q_{zu} .$$

Er wird nach oben gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik durch den Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta_{Carnot} = (T_{heiß} - T_{kalt}) / T_{heiß}$$

begrenzt und ist eine direkte Funktion des oben beschriebenen Materialkennwerts (ZT) und der herrschenden Temperaturbedingungen ($T_{kalt} / T_{heiß}$):

$$\eta_{TE} = \eta_{Carnot} \cdot ((1 + ZT)^{1/2} - 1) / ((1 + ZT)^{1/2} + (T_{kalt} / T_{heiß})) .$$

Das bedeutet: Hohe thermoelektrische Materialwirkungsgrade stellen sich bei hohen ZT-Werten und bei hohen Temperaturdifferenzen mit möglichst niedrigen unteren Arbeitstemperaturen ein.

Bis heute werden im kommerziellen Bereich vor allem Verbindungshalbleiter aus Elementen der V. und VI. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente (Bi_2Te_3) verwendet, die bei Raumtemperatur besonders gut arbeiten. Für spezielle Anwendungen bei mittleren Temperaturen von 200 °C bis 600 °C werden IV-VI-Verbindungen eingesetzt (PbTe). Legierungen aus Silizium und Germanium (SiGe) sind besonders für hohe Temperaturen geeignet. Ihre maximalen ZT-Werte liegen zwischen 0,7 und 0,9, was für Temperaturdifferenzen von 100 °C bis 600 °C zu theoretischen Materialwirkungsgraden zwischen 3 % und 12 % führt (bezogen auf 100 °C am „kalten Ende“). Theoretische Wirkungsgrade bis 20 % sind möglich, wenn es gelingt, den ZT-Wert zu verdoppeln (Bild 6).

Seit Anfang der neunziger Jahre haben theoretische Überlegungen Forscher dazu ermuntert, nach Wegen zu suchen, die die Materialeffizienz auf ZT-Werte >1 verbessern (Bild 5 nach FAIRBANKS [32]).

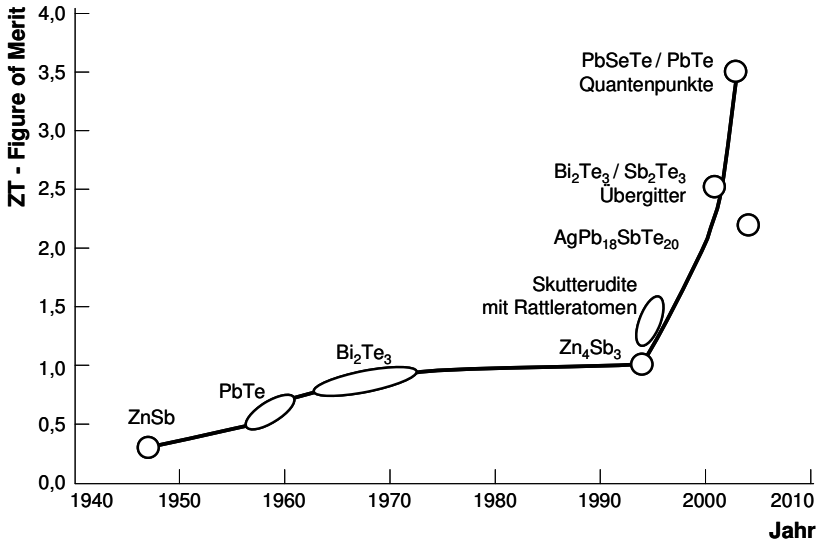


Bild 5: Entwicklung „Figure of Merit“

Im Vordergrund steht die systematische Suche nach Hochtemperaturmaterialien, die maximale Einsatztemperaturen jenseits von 250 °C zulassen. Viele aktuelle Forschungsaktivitäten zielen mit unterschiedlichen Ansätzen auf eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit unter Beibehaltung guter Seebeck-Koeffizienten und hoher elektrischer Leitfähigkeit. Heute untersuchen Experten weltweit mehr als 10 Materialgruppen, die über das gesamte Periodensystem der Elemente verteilt sind und eine Vielzahl von Chancen sowie großes Optimierungspotenzial bieten [31, 33, 34].

- Telluride PbTe, Bi₂Te₃, Sb₂Te₃, ZrTe₅, La_{3-x}Te₄, ...
- Selenide PbSe, Bi₂Se₃, K₂Bi₈S₁₃, ...
- Oxide NoCo₂O₄, Ca₃Co₄O₉, Bi₂Sr₃Co₂O_x, ...
- Boride, Carbide B₄C, CaB₆, ...
- Silicide FeSi₂, Mg₂Si, Mn₁₅Si₂₆, ...

• Skutterudite	$\text{CoSb}_3, \text{La@Fe}_3\text{CoSb}_{12}, \text{Ce@CoSb}_3, \text{RuPdSb}_6, \dots$
• Clathrate	$\text{Zn}_4\text{Sb}_3, \text{Sr}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}, \text{Cs}_8\text{Sn}_{44}, \text{Co}_4\text{TeSb}_{11}, \dots$
• Half-Heusler	$\text{TiNiSn}, \text{HfPdSn}, \dots$
• Ag-Verbindungen	$\text{AgPb}_x\text{SbTe}_{2+x}$ (LAST), $\text{Ag}_{1-x}\text{Sb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}_{2-x}$ (TAGS), ...
• Tl-Verbindungen	$\text{Tl}_9\text{BiTe}_6, \text{Tl}_2\text{SnTe}_5, \dots$
• Si/Ge-Verbindungen	$\text{Si}_{0,80}\text{Ge}_{0,20}$
• Zintl Phasen	$\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$

Für die Materialauswahl müssen neben den reinen thermoelektrischen Eigenschaften auch andere Faktoren berücksichtigt werden. Einige der in Frage kommenden Rohstoffe sind beispielsweise selten, und die Vorkommen liegen teilweise in wirtschaftlich stark wachsenden oder politisch „schwierigen“ Ländern. Die Preise unterliegen starken Schwankungen. Prognosen für Verfügbarkeit und Kosten fallen deshalb z. T. extrem unscharf aus. Ein Beispiel ist Tellur, dessen Preis seit Anfang 2007 stark angestiegen ist – im Wesentlichen angetrieben durch Spekulation. Bismut, Antimon und Germanium haben sich in den letzten Jahren auch deutlich verteuert. Der Einsatz von Blei ist wegen der Umweltbelastung problematisch. Zu den preiswertesten Kandidaten für TEGs zählen hingegen Zn_4Sb_3 und CoSb_3 . In „Schwerpunkte und Trends der Thermoelektrik: Ein nationaler und internationaler Überblick“ [33] sind einige Preise für ein Kilogramm Rohmaterial (Ge(99,99 %): 1.600 \$/kg, Te: 260 \$/kg, Bi: 40 \$/kg und Sb: 6 \$/kg) sowie für thermoelektrische Materialien zusammengetragen, bestimmt aus den aktuellen Rohstoffpreisen für 99,95 %-Qualitäten: Sie liegen zwischen einigen wenigen Dollar bis zu mehreren hundert Dollar pro Kilogramm. Und schließlich sind die Vorkommen einiger Materialien begrenzt. Auch hier als Beispiel Tellur: Die bislang bekannten Reserven von 34.000 Tonnen reichten bei gleich bleibendem Verbrauch sicher mehr als hundert Jahre. Unter der Annahme, dass in jeden PKW 1,5 Kilogramm Tellur als Bestandteil eines TEG eingebaut werden, sinkt die Reichweite jedoch auf nur wenige Jahre. Minimaler Materialeinsatz und Recyclingkonzepte sind deshalb wichtige Themen bei der nachhaltigen Entwicklung von TEGs für den Masseneinsatz [35]. In über zehn Materialgruppen sind erfreulicherweise aussichtsreiche Kandidaten enthalten, die gute thermoelektrische Ergebnisse liefern sowie leicht verfügbare und kostengünstige Rohstoffen verwenden.

In zahlreichen Veröffentlichungen [31, 33, 36] werden eine Vielzahl von Möglichkeiten beschrieben, effiziente thermoelektrische Materialien zu entwickeln: Wahl der Materialklasse und Anpassung der chemischen Zusammensetzung, Erzeugung mikroskopischer Strukturen und morphologische Änderung der Materialien sowie Anwendung

spezieller Verarbeitungsprozesse. So konnte beispielsweise der ZT-Wert von Bismut-tellurid – er liegt bei handelsüblichem Material bei kaum mehr als 0,9 – durch Vermahlen und anschließendes Heißpressen auf 1,4 erhöht werden [37]. Auch werden in der aktuellen Forschung Wege verfolgt, die durch eine gezielte Veränderung der chemischen Zusammensetzung („Doping“) den Wirkungsgrad steigern. Dadurch können sowohl die elektronischen Eigenschaften als auch die thermische Leitfähigkeit optimiert werden. Die Firma BASF konnte damit bei Bleitelluriden großen Erfolg erringen: Der ZT-Wert für homogenes Material verbesserte sich bis auf 1,7 [31].

Neben den bewährten und relativ gut erforschten Materialien Bi_2Te_3 , PbTe , SiGe und CoSb_3 befinden sich derzeit viele andere im Teststadium. Mittelfristig gibt es Hoffnung für oxidische Thermoelektrika: In „Materialentwicklung für Oxidische Thermoelektrische Konverter“ [38] wird erläutert, dass in der Substanzklasse der Übergangsmetalloxide (Keramiken) mit perowskitartigen Strukturen eine Vielzahl thermoelektrisch aktiv p-leitender und n-leitender Verbindungen existieren, die zum Teil eine große Thermokraft (Kobaltite: $S > 100$ [V/K] mit $ZT=1$) und eine sehr gute thermochemische Stabilität in Luft – auch bei Temperaturen bis $1000\text{ }^\circ\text{C}$ – aufweisen. Ihre Besonderheit liegt in der flexiblen Kristallstruktur, die weitreichende Änderungen der Zusammensetzung zulässt [39].

Zu den Hoffnungsträgern gehören auch Skutterudite und Zintl-Phasen, mit denen in den letzten Jahren große Erfolge erzielt wurden. Beide Verbindungsklassen bieten viele Möglichkeiten zur Variation der chemischen Zusammensetzung, um die thermoelektrischen Eigenschaften zu optimieren. Eine neue Generation der Thermoelektrika aus der Familie der Skutterudite, die ohne problematische Elemente auskommen, wird in „Ground State and Thermoelectric Properties of Filled Skutterudites“ [40] und „Thermo-Electric-Materials with Better Efficiencies and Lower Costs: A Contradiction“ [34] beschrieben. Neue Zusammensetzungen für p- und n-seitige Skutterudite wurden gefunden, die einen besseren Trade-off zwischen Wirkungsgrad und Kosten zeigen als bisher untersuchte Materialien. So konnten hohe Seebeck-Koeffizienten von $> 200\text{ }\mu\text{V/K}$ und Materialwirkungsgrade größer 10 % mit Materialkombinationen gemessen werden, die gleichzeitig eine Reduktion der spezifischen Kosten um den Faktor 2 ermöglichen. Auch das japanische Unternehmen Furukawa Co. Ltd in Tokio entwickelt Material für Module auf der Basis von Skutteruditen, die in ca. drei Jahren kommerziell verfügbar sein sollen. Furukawa gibt maximale ZT-Werte von 1,1 (p-type) und 1,3 (n-type) an. Dabei soll der ZT-Wert für beide Typen in einem Temperaturbereich von 350 bis $550\text{ }^\circ\text{C}$ oberhalb von 1,0 liegen [41].

Neben neuen Materialien spielen in der aktuellen Forschung auch nanoskalige Konzepte eine große Rolle – etwa thermoelektrische Materialien aus Nanodrähten oder Supergittern. Liegen die besten im Labor realisierten ZT-Werte heute bei ca. 1,5 bis 1,7, kann man theoretisch deutlich höhere ZT-Werte durch die Verschlechterung der

thermischen Leitfähigkeit λ erzielen. Mit Hilfe von Nano-Strukturen wären ZT-Werte von mehr als 2,5 in Reichweite, die deutlich höhere Materialwirkungsgrade zur Folge hätten.

Soviel „Effizienz“ ist für den Anfang nicht unbedingt nötig. Für den Einsatz im Automobil würden ZT-Werte von 1,5 bis 2,0 ausreichen. Wichtig sind kostengünstige Materialien, deren ZT-Werte über den gesamten, dem Einsatzzweck entsprechenden Temperaturbereich größer 1,0 sind. Für den Einsatz in Fahrzeugabgasanlagen liegt dieser zwischen 200 °C und 700 °C.

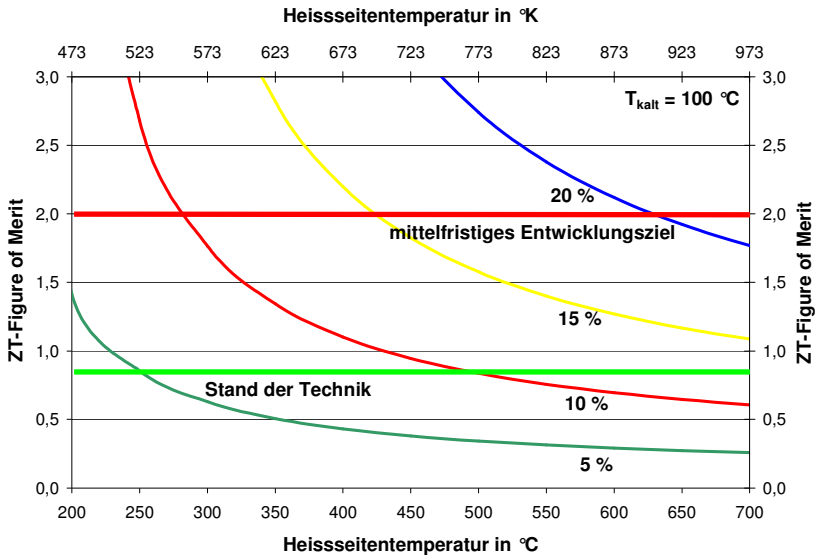


Bild 6: ZT-Bedarf in Abhängigkeit von der Heißeittemperatur für 5 %, 10 %, 15 % und 20 % Materialwirkungsgrad

Materialintegration

Neben den Eigenschaften des thermoelektrischen Materials selbst haben auch die Güte der Einkoppelung des Materials in den Wärmestrom sowie die Auslegung und die Qualität der verwendeten Komponenten und Systeme einen entscheidenden Einfluss auf die Systemeffizienz. Die Materialeigenschaften werden über die Integration in die Anwendung übertragen. Die Entwicklung und Herstellung thermoelektrischer Systeme, seien es Generatoren oder Wärmepumpen, stellen deshalb eine genauso große Herausforderung dar wie die Entwicklung und Herstellung eines für den

Einsatzzweck optimalen Materials. Nur wenn die Integration optimal gelingt und die Anforderungen der jeweiligen Anwendung erfüllt werden, kommen die – oft unter hohen Kosten erworbenen – Materialqualitäten zum Tragen.

Bei aktuellen Anwendungen erfolgt diese Integration des thermoelektrischen Materials in der Regel zunächst durch ein thermoelektrisches Modul (TEM). Die Einsatzart – Wärmepumpe oder Generator – bestimmt nur unwesentlich den Aufbau dieser Module. Von außen lässt sich bislang nicht unterscheiden, ob ein Modul zur Energieerzeugung oder für die Temperierung entwickelt und hergestellt wurde. Trotzdem existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle für die verschiedenen Industrie- und Endverbraucher-Anwendungen zum Heizen und Kühlen (Peltier-Module, TEC). Sie unterscheiden sich in Form, Größe und Leistung. Für große Leistungen werden auch mehrstufige, so genannte kaskadierte Peltier-Module geliefert. Mit ihnen können größere Temperaturdifferenzen erreicht werden.



Bild 7: Aktuelle thermoelektrische Module

Thermoelektrische Module werden auch heute noch überwiegend in Handarbeit gefertigt [42]. Sie bestehen aus mehreren Paaren p- und n-dotierter Elemente thermoelektrisch aktiven Materials („Schenkel“), die über Kontaktbrücken miteinander elektrisch verschaltet sind. Die elektrische Kontaktierung der Schenkel mit den Brücken erfolgt bei handelsüblichen Modulen über einen Lötprozess. Hochwertige Module verfügen zusätzlich über Diffusionsbarrieren auf beiden Seiten der Schenkel, um eine unerwünschte Materialveränderung durch diffundierendes Lot zu vermeiden. Das Lot begrenzt oft auch die Höhe der maximalen Einsatztemperatur der Module. TEMs für hohe Temperaturen erfordern deshalb sorgfältig ausgewählte und zuverlässige Verbindungstechniken. Mittels Kabeln oder Anschlussdrähten, die an jeweils freie Brücken angelötet werden, erfolgt der Anschluss an Spannungsversorgung bzw. Verbraucher. Bei den meisten handelsüblichen Modulen befinden sich diese Kontaktbrücken auf dünnen Keramikplatten (Substraten). Sie übernehmen bei möglichst guter thermischer Leitfähigkeit den mechanischen Verbund und die in der Regel notwendige elektrische Isolierung zu metallischen Wärmeübertragern. Für spezielle Anwendungen werden auch „substratfreie“ Module hergestellt.

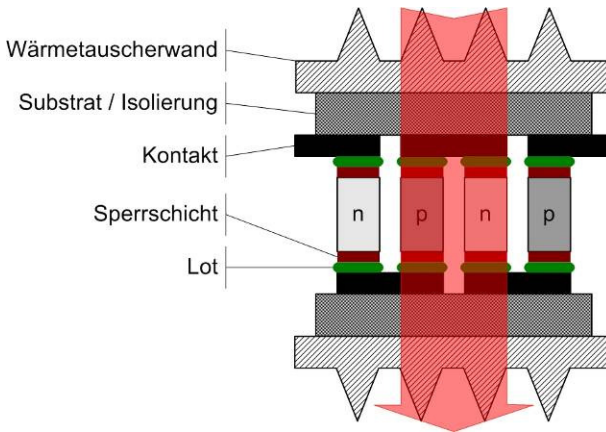


Bild 8: Aufbau und Wärmestrom eines konventionellen TEM

Um ein thermoelektrisches Modul einsetzen zu können, sind Wärmeübertrager erforderlich. Sie sorgen für den notwendigen Wärmestrom durch das Modul. Ihre Aufgabe ist, Wärmeenergie der Quelle aufzunehmen, durch das Modul zu leiten, sie auf der anderen „kalten“ Modulseite wieder zu übernehmen und an die Senke abzuführen. Wärmeaufnahme, -transport und -abgabe müssen möglichst verlustarm und „rückwirkungsfrei“ erfolgen. Der bisher verfolgte Weg, das thermoelektrisch aktive Material in den Wärmestrom über Module und zusätzliche Wärmetauscher zu integrieren, reduziert den Systemwirkungsgrad erheblich. Bei ungünstiger Applikation können Systeme oft kaum mehr als die Hälfte des Materialwirkungsgrads „in die Anwendung“ retten. Die Gründe sind vielschichtig: Als Hauptverursacher gelten in der Regel die im Wärmestrom liegenden thermoelektrisch nicht aktiven Komponenten wie Wärmesammler und -übertrager, elektrische Isolierung, elektrische Kontakte, Lot und Diffusionsbarrieren sowie vor allem deren Verbindungsstellen. Die ideale Integration wäre, das Schenkelpaar „direkt zwischen Quelle und Senke zu halten“, ohne Widerstände im Wärmestrom zwischen Wärmesammler und thermoelektrisch aktivem Material und ohne Leckströme zwischen den Schenkeln.

Die Verfügbarkeit hocheffizienter thermoelektrischer Generatoren und Wärmepumpen auf der Basis von thermoelektrischem Material hoher Güte (ZT-Werte) im relevanten Temperaturbereich ist der Schlüssel für die breite Einführung der Technologie. Der baldige Einsatz in Serienfahrzeugen erfordert daher, dass Grundlagenforschung und Produktentwicklung eng zusammenarbeiten. Ihre Aufgabe ist es, hocheffiziente, wirtschaftliche und fahrzeugtaugliche Lösungen und Konzepte für die mechanische, thermische und elektrische Integration der Thermoelektrika in Generatoren und Wär-

mepumpen zu entwickeln. Das Ziel sind Systeme, die bei den im Straßenverkehr üblichen Betriebsbedingungen einen ausreichenden Kundennutzen (eingesparter Kraftstoff, geringere CO₂- und Abgasemissionen) sowie eine akzeptable Amortisationszeit sicherstellen. Hinsichtlich der Betriebssicherheit und der Lebensdauer müssen sie den Anforderungen an heutige Fahrzeuge entsprechen. Besonders den thermischen, thermomechanischen und mechanischen Belastungen, die während des Fahrzeugbetriebs z. B. in Fahrzeugabgasanlagen auftreten, müssen die Systeme ein Fahrzeugleben lang ohne wesentlichen Leistungsverlust standhalten. Herstellung, Erstmontage, Betrieb, Wartung, Reparatur und Entsorgung der Systeme sollten mit den in der Branche gegebenen Rahmenbedingungen, Ressourcen und Prozessen gut harmonisieren.

Moderne Lösungsansätze führen heute weg von den konventionellen TEG-Aufbautechnologien, die den Verbund zwischen Modul und Wärmeübertrager üblicherweise mittels kraftschlüssiger Sandwich-Konstruktion realisieren. Vielversprechend sind einfache, robuste und wirtschaftliche Konzepte mit einem Wärmeübertragerdesign, in das die Schenkel „barrierefrei“, stoffschlüssig und mit minimalem Bau- und Gewicht integriert sind und die einen kostenoptimalen Herstellungsprozess zulassen. Im Mittelpunkt steht dabei die thermische Anbindung der Thermoelektrika an Wärmequelle und -senke: Die Abwärme wird bei der größtmöglichen Temperaturdifferenz ohne störende Rückwirkungen über die Schenkel effektiv aufgenommen und abgegeben. Dazwischen wird sie gleichmäßig und möglichst ohne Leckage über das gesamte thermoelektrische Material verteilt. Alle Module liefern dann den größtmöglichen Ertrag und erreichen hohe Flächen- bzw. Volumenleistungen – für die Automobilentwickler ist das sicher eine lösbare Aufgabe.

Fahrzeugintegration

Die Integration eines Thermogenerators in ein Fahrzeug ist eine Herausforderung, aber mit bestehendem Know-how jederzeit lösbar. Der Aufwand für die Fahrzeugintegration wird vom Einsatzort bestimmt. Die Einsatzorte wiederum richten sich nach der Einsatzstrategie. Hier ist zu unterscheiden, ob hochintegrative Thermogeneratoren für autarke Sensorik angewendet werden sollen oder leistungsstarke Thermogeneratoren als Energielieferanten (z. B. in Form von Strom).

Als Anwendungsorte in einem Fahrzeug kommen nahezu alle Wärmequellen in Frage. Die Sinnhaftigkeit der Anwendung richtet sich in erster Linie nach dem Energiegehalt der Wärmequelle und der möglichst in der Nähe befindlichen potentiellen Wärmesenke. Die IAV GmbH hat verschiedenste Wärmequellen hinsichtlich ihres Potenzials durchgerechnet und hat dabei vier potentielle Anwendungsorte für Hochleistungs-Thermogeneratoren ermittelt:

- Das Motoröl (Austritt Motor) mit der Umgebungsluft als Wärmesenke,
- die Ladeluftstrecke (Vorlauf Ladeluftkühler) mit dem Kühlwasser als Wärmesenke (Hier wäre ggf. ein Nieder-Temperaturkühlwasserkreislauf empfehlenswert.),
- der / die AGR-Kühler,
- als Hauptwärmequelle die Abgasanlage.

Jeder Ort stellt bezüglich der Fahrzeugintegration eine Herausforderung dar: An das Package, an die Vereinbarkeit mit den bereits in diesem Bauraum vorhandenen Systemen und an die Systemintegrationsfähigkeit der Komponente.

Bei der Fahrzeugintegration sind grundsätzlich verschiedene Aspekte zu unterscheiden: Geometrische, mechanische, thermische, hydraulische und elektrische. Bei der geometrischen Integration stellt sich die Frage nach dem erforderlichen bzw. verfügbaren Bauraum. Für die mechanische Integration sind Aspekte wie das Gewicht und die daraus resultierenden Schwingungen oder Lastbeanspruchungen wichtig. Auch müssen eventuell Stellelemente (Abgasklappen bei Bypasssystemen) für die Anpassung an die hohe Dynamik (Bauteileschutz unter Vollast) eingebaut werden. Ferner sind die üblichen Serienentwicklungsfragestellungen wie Montagefähigkeit und Wartungsfreundlichkeit zu beachten.

Der wesentliche Punkt bei der hydraulischen Integration ist der sich ergebende Druckverlust über dem Wärmeübertragungssystem. Die Druckdifferenz führt zu einer Erhöhung des statischen Druckes im Abgasstrang. Die vor dem Wärmeübertrager befindlichen Komponenten sowie der Ladungswechsel der Verbrennungskraftmaschine werden folglich negativ beeinflusst, was den Verbrauch steigern kann. Die Minimierung des Druckverlustes im Wärmetauscher unter Berücksichtigung der restlichen Integrationsvarianten sollte hierbei das Ziel sein.

Bei der thermischen Integration ist die Herausforderung, eine in allen Fahrzeugzuständen funktionierende Wärmesenke darzustellen. Die Kapazität dieser Wärmesenke hängt natürlich von der Größe und dem Wirkungsgrad des Thermogenerators ab. Hierbei ist darauf zu achten, den Aufwand bei Kühlmittelführung, Kühlmittelvorhaltung sowie zusätzlichen Wärmetauschern und möglichen Förderpumpen gering zu halten. Der Idealzustand wäre die Integration der Wärmesenke in den bestehenden Motor-Kühl-Kreislauf.

Die dritte Herausforderung ist die elektrische Integration. Hierbei sind die Aufbereitung des Stromes, die Entwicklung einer leistungsfähigen DC-DC-Wandlung, eine Regelung für den Thermogenerator, ein möglichst kurzer elektrischer Leitungsweg zu den Verbrauchern und eine Nutzungsstrategie für die gewonnene Energie erforderlich.

Stichworte wie Downsizing des Generators (Freilauf, Leistungsreduzierung) und innovatives Batteriemangement sind hier zu nennen.

Soll der Thermogenerator in die Abgasanlage eingebaut werden, ist seine Integration hinter den Abgasnachbehandlungssystemen sinnvoll – unabhängig vom Brennverfahren (ottomotorisch oder dieselmotorisch).

Um den Wirkungsgrad des Thermogenerators im Teillastbereich hinreichend hoch zu halten, muss er bei Volllast des Motors mit einem Bypass teilweise umgangen werden. Somit sind eine Abgasklappe und eine Sekundärverrohrung notwendig.

Der Einsatz eines Thermogenerators kann aber auch zu Einsparungen führen – etwa durch Verkleinerung oder kompletten Verzicht auf den Endschalldämpfer. Diese Aufgabe könnte ein Thermogenerator bei richtiger Auslegung mit übernehmen. Die Schalldämpfung muss aber auch dann funktionieren, wenn der Bypass aktiv ist. Hier gibt es Überlegungen, den Bypass in den Thermogenerator zu integrieren.

Bei der Integration in die Abgasanlage ist auf Grund des höheren Systemgewichts eine kardanische Aufhängung der Abgasanlage notwendig. Aus heutiger Sicht müsste es eine schwingungsseitige Entkopplung des Thermogenerators vom Abgasnachbehandlungssystem geben, da sonst mit Materialermüderscheinungen über die Lebensdauer zu rechnen ist. Auch hier gibt es bereits Lösungsansätze, die finanziell überschaubar sind.

Es erscheint sinnvoll, die AGR-Kühler zusätzlich mit einem Thermogenerator zu verbinden. Allerdings ist hier anzumerken, dass die AGR-Rate im höheren Lastbereich abnimmt bzw. gegen Null läuft und dann kein Potenzial zur Energiegewinnung mehr vorhanden ist. Im Teillastbereich ist dies umgekehrt. Es scheint durchaus sinnvoll zu sein, in einem Fahrzeug zwei Systeme einzusetzen – also den hohen Massenstrom in der Teillast durch die AGR-Kühler zu nutzen und in der Volllast einen Thermogenerator für die Abgasanlage als Energielieferant zu nutzen.

Simulation

Die Simulation als begleitendes Werkzeug im Entwicklungsprozess reduziert den Zeit- und Kostenaufwand. Sie kommt in jeder Entwicklungsphase zum Tragen. Die Simulation leistet einen wesentlichen Beitrag zur Beschleunigung einzelner Aufgabenpakete in der Gesamtprozesskette im Rahmen der Integration thermoelektrischer Systeme. In der IAV ist hierfür eine Modellierungs- und Simulationsplattform entwickelt worden, die es beispielsweise ermöglicht, im Vorfeld Aussagen über wesentliche „Optimierungsstellschrauben“ treffen zu können.

Bei der Materialintegration unterstützt sie unter gegebenen Randbedingungen beispielsweise die Analyse und Bewertung verschiedener Materialspezifikationen. Um eine optimale Energieausbeute zu gewährleisten, ist die Abstimmung zwischen thermischer Quelle und Senke, geometrischen Dimensionen und thermoelektrischen Materialien zwingend erforderlich.

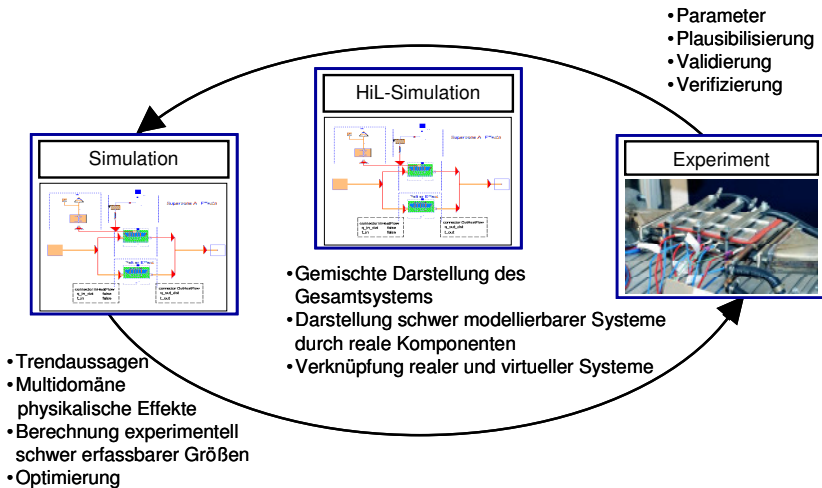


Bild 9: TEG-Simulationsplattform - Modulebene

Auch bei der Fahrzeugintegration spielt die Simulation eine begleitende Rolle. Die hohe Komplexität heutiger Systeme erfordert zwingend auf der einen Seite theoretische Voruntersuchungen und auf der anderen Seite Unterstützung im globalen Entwicklungsprozess, um sowohl Zeit als auch Entwicklungskosten zu sparen. Ein wichtiger Punkt ist hierbei die Darstellung der erwähnten interdisziplinären Wechselwirkungen.

Die Gesamtsystemsimulation hat die wesentliche Aufgabe, den globalen Integrationsprozess unter der Prämisse einer Gesamtsystemoptimierung zu begleiten und zu beschleunigen. Ein weiterer Punkt ist die Einbindung der Material- bzw. der Modulebene in die Gesamtsystembetrachtung.

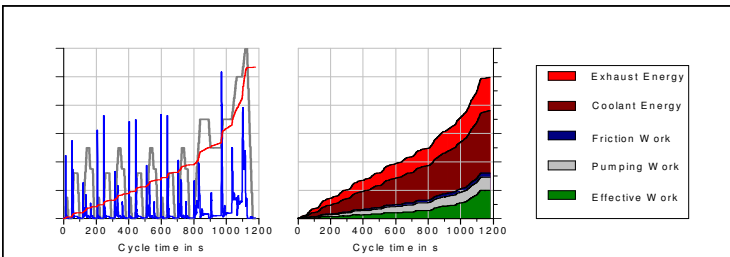
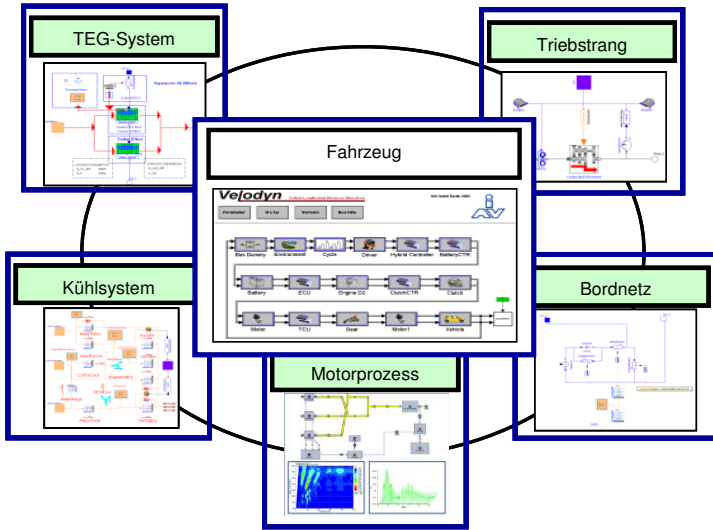


Bild 10: TEG-Simulationsplattform - Gesamtsystemebene

Um Simulationszeit zu sparen, sollte die Simulationsumgebung eine bedarfsgerechte Definition der Detailtiefe einzelner Teilsysteme ermöglichen. Das entsprechende Subsystem, das detailliert einer Bewertung unterzogen werden soll, wird mit einem angemessen geringen Abstraktionsgrad abgebildet. Die Modellierung der umgebenden

Teilsysteme erfolgt mit geeignet hohem Abstraktionsgrad, um schließlich die globalen Wechselwirkungen darstellen zu können.

Das thermoelektrische System kann beispielsweise als Kennfeldmodell aber auch als detailliertes 3D-Modell simuliert werden. Der Definition des Abstraktionsgrades bzw. der Detailltiefe geht die Bestimmung der Modellspezifikation voraus, die einen essenziellen Baustein im Modellierungs- und Simulationsprozess darstellt.

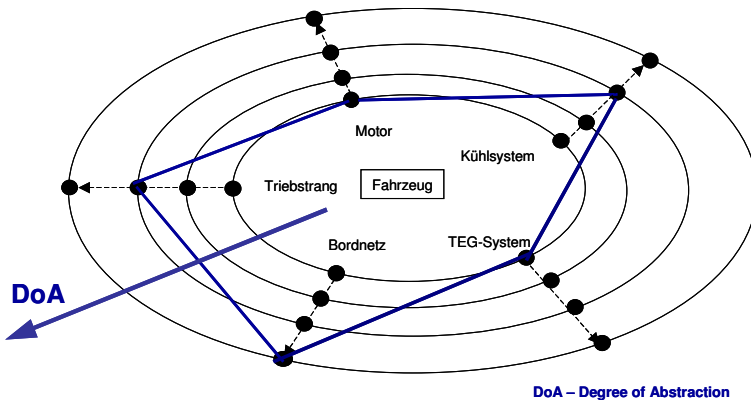


Bild 11: Teilsystemverknüpfungen auf verschiedenen Detailebenen

In Bild 11 ist beispielhaft die Verknüpfung der einzelnen relevanten Subsysteme mit bedarfsorientierten Detailtiefen dargestellt. Die Definition der Detailltiefe wird aus der Modellspezifikation abgeleitet. Die dominierend von der Konzeptcharakteristik und den abzubildenden Effekten abhängt. Unterschieden werden hierbei die Primäreffekte und die möglichen Sekundäreffekte, die besonders im Rahmen der Gesamtsystemsimulation und deren systemübergreifende Wechselwirkungen eine wichtige Rolle spielen. Das kann dazu führen, dass ein Ergebnis auf Basis der einzelnen Module mit ihren Primäreffekten bei einer Gesamtsystembetrachtung durch die Sekundäreffekte verändert wird. Sofern es um die effiziente Darstellung thermoelektrischer Systeme im Fahrzeug geht, ist die Simulation ein unverzichtbarer Bestandteil in der Entwicklungskette.

Zusammenfassung und Ausblick

Seit der Erfindung des Otto- und des Dieselmotors hat es enorme Fortschritte gegeben, insbesondere was Energieeffizienz und Schadstoffemissionen angeht. Dabei wurden Kundenwünsche sowie gesetzliche Vorgaben erfolgreich umgesetzt. Moderne Fahrzeugmotoren gehören heute zu den effizientesten Energiewandlern. Die Rahmenbedingungen für Mobilität und Verkehr werden jedoch weiter verschärft. Wachsender Energiebedarf, begrenzte fossile Energieressourcen, zunehmende Umweltbelastungen sowie wirtschaftliche und politische Krisen könnten die Mobilität empfindlich einschränken. Weitere Anstrengungen der Automobilindustrie sind erforderlich – Fahrzeugentwickler suchen deshalb verstärkt nach neuen, innovativen Technologien und Konzepten, um die Umweltverträglichkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit kommender Automobilgenerationen weiter zu verbessern.

Langfristig sind hierfür sicherlich neuartige Verkehrs-, Fahrzeug- und Antriebskonzepte erforderlich. Kurz- und mittelfristig können geeignete Maßnahmen die Effizienz aktueller Antriebe noch stark verbessern. Großes Potenzial bietet hierbei die konsequente Nutzung der bei Verbrennungsmotoren unvermeidlich anfallenden Verlustwärme. Es gibt eine große Zahl vielversprechender Möglichkeiten, ungenutzte Wärmeenergie zur Effizienzsteigerung einzusetzen.

Von besonderem Interesse sind Ansätze, die Wärme direkt in mechanische oder elektrische Energie wandeln. Neben den bekannten Systemen, die durch einen thermodynamischen Kreisprozess Wärme in Arbeit umwandeln, sind Technologien im Fokus, die aus Wärme direkt elektrische Energie erzeugen – denn im Fahrzeug wird elektrische Energie zunehmend benötigt. Wandler, die dazu in der Lage sind, unterliegen auch dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik und sind folglich ebenfalls durch den Carnot-Wirkungsgrad limitiert. Die Umwandlung beruht aber nicht auf chemischen oder mechanischen Prozessen, sondern auf einem „thermoelektrischen Kreisprozess“. Daraus ergibt sich der große Vorteil dieser Systeme: Sie besitzen keine bewegten Teile und benötigen keine flüssigen oder gasförmigen Medien. Sie sind deshalb robust, lautlos, emissionsfrei, umweltfreundlich, wartungsfrei und langlebig. Außerdem kann ihre Baugröße und -form weitgehend frei gestaltet werden, und ihre Leistung ist beliebig skalierbar (von μW bis W). Daraus folgen eine geringere Komplexität und damit Vorteile bzgl. Raumbedarf, Gewicht, Integrationsaufwand und Kosten.

In der Vergangenheit verhinderten der eher bescheidene Wirkungsgrad und die hohen Kosten im Vergleich zu anderen Wandler-Systemen einen breiten kommerziellen Einsatz. Die Technologie verfügt aber über große, noch unerschlossene Potenziale. Weltweit wird seit einigen Jahren intensiv an neuen Materialien geforscht. Bis heute sind mehr als 10 Materialgruppen identifiziert, die gute thermoelektrische Eigenschaften aufweisen. Sie enthalten vielversprechende Kandidaten, die den Anforderungen der

Fahrzeugindustrie hinsichtlich Effizienz, Kosten, Verfügbarkeit, Umweltrelevanz und Toxizität sowie Herstell-, Verarbeit- und Recyclbarkeit entsprechen könnten. Aktuelle Prognosen von Fachleuten aus der Materialforschung versprechen deutlich höhere Materialgütegrade (ZT-Werte) als heute verfügbar. Berichtet wird von Labormustern mit ZT-Werten zwischen 1,0 und 1,5.

Dennoch müssen die F&E-Maßnahmen weiter intensiviert werden. Ihr Ziel muss sein, in einem überschaubaren Zeitraum Thermoelektrika mit ZT-Werten von 1,5 bis 2,0 und Module bzw. Systeme mit Wirkungsgraden von 10 % in einem weiten Temperaturbereich (200 °C und 700 °C) zu entwickeln und in Serie zu bringen. Erst wenn Generatoren und Wärmepumpen hoher Qualität und Zuverlässigkeit zu wirtschaftlichen Systemkosten zur Verfügung stehen, wird die Technologie breiten Zugang zur Automobilindustrie finden. Dazu müssen jetzt Grundlagenforschung und Produktentwicklung eng zusammenarbeiten. Das sollte möglich sein – wenn die notwendigen F&E-Ressourcen und -Budgets bereitgestellt werden, z. B. im Rahmen staatlich und industriell geförderter Grundlagen- und Anwendungsforschung.

In „Schwerpunkte und Trends der Thermoelektrik: Ein nationaler und internationaler Überblick“ [33] werden die F&E-Trends und die Forschungsförderung ausführlich beschrieben. Erwähnt werden Europa, Russland und die Ukraine, die USA, China, Japan und Korea als die weltweit maßgeblichen Thermoelektrik-Standorte. In Deutschland starten zu diesem Thema aktuell zwei Forschungsprogramme: Im Jahr 2008 hat die DFG beschlossen, das neue Schwerpunktprogramm 1368 „Nanostrukturierte Thermoelektrika: Theorie, Modellsysteme und kontrollierte Synthese“ einzurichten. Dieses Programm soll u. a. wesentliche Beiträge liefern, um grundlegende Erkenntnislücken zu schließen [43]. Und im Mai 2008 hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des WING-Programms des BMBF die Rahmenbekanntmachung „Wissenschaftliche Vorprojekte in Werkstoff- und Nanotechnologien“ veröffentlicht. Im Fokus der Fördermaßnahme stehen werkstoffwissenschaftliche Themen. Projektvorschläge u. a. zum Schwerpunktthema Thermoelektrika werden erwartet, die die Entwicklung innovativer Materialien mit höherer Effizienz zum Ziel haben, „um das große Potenzial von Thermoelektrika nutzen zu können“ [44]. In den Unterlagen zum 7. EU-Forschungsrahmenprogramm taucht als „keyword“ zum ersten Mal „thermoelectric“ auf [33]. Im Rahmen des 4. Aufrufs zur Einreichung von Projektanträgen (voraussichtlich im Juli 2009) werden zusätzlich Themen zum energieeffizienten Bauen und umweltfreundlichen Auto ausgeschrieben, die über das Konjunkturprogramm der EU-Kommission finanziert werden. Im Bereich Nanotechnologie wird voraussichtlich u. a. das Thema „Nanotechnologiebasierte thermoelektrische Energiewandler“ adressiert [45].

Noch in der Antragsphase ist das von den Partnern Valeo Thermal Systems (F), Fraunhofer IPM (D), Termo-Gen (S), Robert Bosch GmbH (D), Siemens AG – Cor-

porate Technology (D), Centro Ricerche FIAT (I) und ROM Innovation (F) formulierte Projekt „EU Project „HeatReCar“: Waste Heat Recovery by Thermoelectric Power Conversion in Light-Duty Trucks“. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Erprobung eines thermoelektrischen Generators (TEG) für einen Kleintransporter, der 3 kW elektrische Leistung bei Volllast und etwa 1 bis 2 kW unter Teillastbedingungen erzeugt und damit 5 % bis 7 % Kraftstoffeinsparung erreichen soll. Dabei werden thermoelektrische Materialien mit einem ZT-Wert von etwa 1,2 zum Einsatz kommen [46].

Heute bringt die Automobilindustrie der Thermoelektrik großes Interesse entgegen [17]. Die Möglichkeiten der Technologie werden sehr positiv eingeschätzt und nicht mehr ignoriert – wie noch im letzten Jahrhundert, wo sie kaum Beachtung fand. Das zeigen auch die Aktivitäten großer Automobilhersteller: Es kann davon ausgegangen werden, dass viele Unternehmen schon länger nach Möglichkeiten suchen, Abwärme zur Effizienzsteigerung zu nutzen. Dabei haben sie auch die Thermoelektrik im Blick, oder sie werden sie in Zukunft berücksichtigen, wenn sich die Hoffnungen in den nächsten Jahren bestätigen sollten. Nach Ansicht von BMW sollten TEG-Prototypen eine Effizienz von mindestens 10 % haben, was nach Meinung des Unternehmens schon 2009 Realität werden könnte. Schon ab 2012/2013 soll die Technologie serienreif sein [47, 48]. Sie könnte ab 2012 in einer Kleinserie getestet werden und bis 2015 in die Großserie gehen [49].

Die IAV beteiligt sich an der Beantwortung der Frage, ob die Thermoelektrik eine Chance für die Automobilindustrie ist. Wir teilen die Meinung vieler Experten, dass Thermoelektrika Multitalente sind, deren Möglichkeiten bei Weitem noch nicht ausgeschöpft wurden. Im Fokus stehen z. Z. Systeme, die die Abgaswärmeenergie nutzen. Aber auch andere Energiequellen, Anwendungen und Einsatzkonzepte werden künftig berücksichtigt – beispielsweise autarke Sensoren, Aktuatoren und Systeme, die aus Umgebungs- und Verlustenergie mit elektrischer Energie versorgt werden.

Die folgenden Aktivitäten stehen bei der IAV GmbH im Mittelpunkt:

- Der Entwurf effizienter, wirtschaftlicher und fahrzeugtauglicher Konzepte für die rückwirkungsarme mechanische, thermische und elektrische Integration der Wandler in Systeme und Fahrzeuge. Dabei müssen stets auch die Betriebssicherheit, die Dauerhaltbarkeit, der Herstellungs-, Einbau- (Serie, Nachrüstung), Reparatur- und Wartungsaufwand sowie Package, Volumen, Gewicht, NVH und Akustik berücksichtigt werden.
- Der Entwurf flexibler und robuster Betriebsstrategien und Energiemanagementkonzepte. Sie müssen den Umstand berücksichtigen, dass der Energiebedarf des Fahrzeugs und das Energieangebot des Verbrennungsmotors nicht immer im Einklang stehen.

- Detaillierte Gesamtfahrzeug-Simulationsrechnungen, um das Potenzial der Technologie sowie der verschiedenen Konzepte und Strategien für den Fahrzeugeinsatz abzuschätzen.
- Die Erprobung von Prototypen auf Prüfständen sowie unter realen Betriebsbedingungen in IAV-Experimentalfahrzeugen mit heutigen und künftigen thermoelektrischen Generatoren. Mit den Fahrzeugen ist es möglich, Generatoren in der Abgasanlage oder in anderen Fahrzeugsystemen zu betreiben, zu vermessen, zu analysieren und zu optimieren. Außerdem besteht die Möglichkeit, während realer Kundenfahrten im Verkehr auf der Basis online gemessener Betriebsdaten (z. B. Bordnetz-Strombedarf, Abgastemperatur, Modul- Oberflächentemperaturen), das Verhalten virtueller Thermoelektrika sowie thermoelektrischer Module und Systeme zu simulieren, dabei Parameter zu variieren, zu analysieren und online im Fahrzeug anzuzeigen.

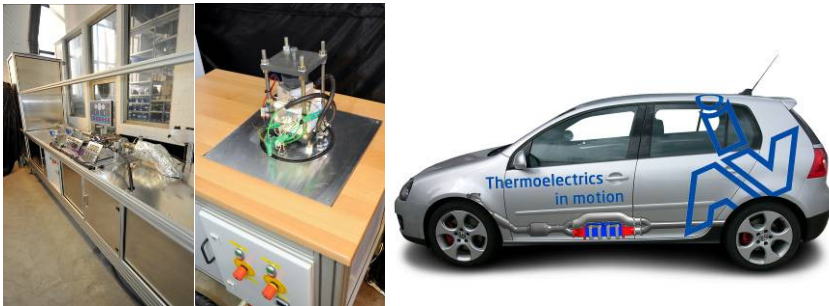


Bild 12: TEG-Prüfstände und Experimentalfahrzeug der IAV

Für die Forschung und Entwicklung neuer Konzepte und Komponenten stehen ihr die Ressourcen eines weltweit engagierten Entwicklungspartners der Automobilindustrie zur Verfügung – mit 25 Jahren Erfahrung in allen Bereichen des Automobilbaus.

Literatur

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2008 – Zusammenfassung, 2008,
http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_german.pdf
- [2] PEUGEOT, Partner Tepee – The MPV that lets you enjoy the freedom of the open road, Press Info, 2008, Seite 13
http://www.peugeot.com/media/317188/partnertepee_0801infopresse_en.pdf
- [3] LEXUS, Lexus Stages World Debut of All New RX 350 and RX 450h at Los Angeles Auto Show, Press Release, 2008,
http://www.lexus.com/fcv/RXandRXh/RXandRXh_popup.html?s_ocid=FCV_RX/RXh_RelatedLinks
- [4] LE FRIEC, O. / WRIGHT, T., Faurecia und die 62. Internationale Automobil-Ausstellung in Frankfurt, Pressemappe, 2007,
http://www.faurecia.com/data/de/download/press_kit/faurecia_press_kit_frankfurt_2007_de.pdf
- [5] SCHWEIGLER, C. / FLAMENSBECK, M. / DEMMEL, S. / ZIEGLER, F., Optimierte Kraft-Wärme-Kopplung am Flughafen München – Einsatz des SE/DL-Absorptionskaltwassersatzes, 1997
- [6] KÜHN, A. / ZIEGLER, F., Betrieb einer 10 kW Absorptionskälteanlage als Wärmepumpe, In: KI – Kälte Luft Klimatechnik, März 2009, S. 30
- [7] TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN FACHGEBIET ENERGIEANLAGENTECHNIK, Heat2Cool, Forschungsgebiete,
<http://www.eta.tu-berlin.de/heat2cool.html>
- [8] FEULNER, P., Zusätzliche Energiewandler in zukünftigen Antrieben, In: MTZ 09/2008 Jahrgang 69, S. 714-721
- [9] Super Constellation Flyer Association, Curtiss Wright R-3350 Engine,
<http://www.superconstellation.org/TechnicalInformation/motor/motor-de.html>
- [10] VOITH TURBO, Effiziente Antriebstechnik mit Voith TurboCompound-Systemen für schwere Nutzfahrzeuge, 2008,
http://www.voithturbo.com/applications/documents/document_files/1565_d_g_2098_d_turbocompound_2008-09.pdf

- [11] SCANIA, Scania Turbocompound, 2008,
<http://www.scania.de/lkw/technology/turbocompound/>
- [12] ROSEBRO, J., Honda Researching Advanced Hybrid Drive with Rankine Cycle Co-Generation, 2008,
<http://www.greencarcongress.com/2008/02/honda-researchi.html>
- [13] FREYMANN, R. / STROBL, W. / OBIEGLO, A., Der Turbosteamer: Ein System zur Kraft-Wärme-Kopplung im Automobil, In: MTZ 05/2008 Jahrgang 69, S. 404-412
- [14] DIEKMANN, B. / HEINLOTH, K., Energie – Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung, 2. Auflage, Stuttgart 1997
- [15] GLOBAL THERMOELECTRIC, Global Power Solutions, 2006,
<http://www.globalte.com/index.php?pageId=2&sId=12>
- [16] RYAN, M. A. / FLEURIAL, J.-P., Direct Thermal-to-Electric Energy Conversion for Outer Planet Spacecraft, 2002,
<http://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/0834.pdf>
- [17] DONNER, S., Strom aus dem Auspuff, In: Handelsblatt 15.05.2009,
http://www.handelsblatt.com/technologie/energie_technik/strom-aus-dem-auspuff;2276223
- [18] BELL, L. E. et al, Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems, In: Science 321, 2008, S. 1457-1461
- [19] REIMANN, W. / MÄNNEL, R., Verbrauchseinfluss der elektrischen Energie im Fahrzeug, In: ATZelextronik, 01/2008, S. 6-11
- [20] JÄNSCH, D., Thermoelektrik in Kraftfahrzeugen, Präsentation Innovationsforum „Neue thermoelektrische Werkstoff, Technologien und Bauelemente“, Halle 2008
- [21] EUROPÄISCHES PARLAMENT, Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen, Legislative Entschließung – Angenommene Texte, P6_TA-PROV(2008)0614, 17.12.2008, Straßburg,
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P6-TA-2008-0614+0+DOC+XML+V0//DE>
- [22] VAN BAVEL, M. et al., Heiße Synapsen, In: Elektronik JOURNAL 09a/2008, S. 38-40

- [23] SEIKO WATCH CORPORATION, SEIKO World's First, 2007, http://www.seikowatches.com/heritage/worlds_first.html
- [24] PELAM INTERNATIONAL LTD, Lampen Radio, 2006, http://www.pelam.de/pdf_datasheet.php?products_id=530
- [25] AMETEK DENMARK A/S, Jofra™ - Baureihe „Advanced Temperature Calibrator“, Produktdatenblatt SS-CP-2285-DE, Ausgabe 0712, 2007
- [26] DRUCK & TEMPERATUR LEITENBERGER GMBH, LR-Cal – Temperaturkalibratoren, portabel und präzise, Produktdatenblatt Release 060522, 2006, http://www.druck-temperatur.de/dt/daten/tempkal_komplett_d.pdf
- [27] VAZQUEZ, J. / SANZ-BOBI, M. A. / PALACIOS, R. / ARENAS, A., State of the Art of Thermoelectric Generators Based on Heat Recovered from the Exhaust Gases of Automobiles, 2002, <http://www.iit.upcomillas.es/docs/02JVA03.pdf>
- [28] BREITLING, T. / SIEGERT, R. / STEFFENS, D. / BAUMGÄRTNER, W. Potenziale des Energiemanagement für den Realverbrauch, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 1-12
- [29] SOMMERLATTE, J. / NIELSCH, K. / BÖTTNER, H., Thermoelektrische Multitalente – Nanostrukturierte Materialien versprechen effiziente thermoelektrische Konverter, In: Physik Journal 6 (2007) Nr. 5, 2007, S. 35-41
- [30] ALTENKIRCH, E., Über den Nutzeffekt der Thermosäule, In: Physikalische Zeitschrift, 10, 1909, S. 560
- [31] DEGEN, G. / HAASS, F., Halbleiterentwicklung für thermoelektrische Materialien, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 84-91
- [32] FAIRBANKS, J., Thermoelectric Applications in Vehicles Status 2008, <http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf>
- [33] BÖTTNER, H., Schwerpunkte und Trends der Thermoelektrik: Ein nationaler und internationaler Überblick, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 70-79

- [34] PRENNINGER, P. / GRYTSIV, A. / ROGL, P. / BAUER, E., Thermo-Electric Materials with Better Efficiencies and Lower Costs: A Contradiction?, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 124-136
- [35] PATYK, A. Thermoelektrik: Eine Chance für nachhaltige Mobilität?, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 27-44
- [36] FLEURIAL, J.-P., Recent Advances in Thermoelectric Power Generation Technology and Terrestrial Application Opportunities, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 13-26
- [37] POUDEL, B. et al, High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys, In: Science Vol. 320. no. 5876, 2008, S. 634-638
- [38] WEIDENKAFF, A. et al, Materialentwicklung für Oxidische Thermoelektrische Konverter, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 80-83
- [39] WENGER, D. Den Perowskiten verschrieben, 2006, <http://www.sciencz.de/ticker/art7161.html>
- [40] BAUER, E. et al, Ground State and Thermoelectric Properties of Filled Skutterudites, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 92-103
- [41] HAMADA, M., Furukawa Develops High-Performance Thermoelectric Conversion Material, 2008, http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20080821/156657/
- [42] RÄPPLÉ, M., Industrielle Fertigung von Thermoelektrischen Modulen, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 114-123
- [43] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT, Aktuelles, Schwerpunktprogramm 1386: "Nanostrukturierte Thermoelektrika: Theorie, Modellsysteme und kontrollierte Synthese, Information für die Wissenschaft Nr. 376. Juni 2008, http://www.dfg.de/aktuelles_presse/information_fuer_die_wissenschaft/schwerpunktprogramme/info_wissenschaft_37_08.html

- [44] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 1. Aufruf im Rahmen der Fördermaßnahme "Werkstofftechnologien von morgen - Wissenschaftliche Vorprojekte in Werkstoff- und Nanotechnologien", 2008, <http://www.bmbf.de/de/12535.php>
- [45] UNIVERSITÄT REGENSBURG – REFERAT IV/5, FORSCHUNGSFÖRDERUNG – EU-ANGELEGENHEITEN – DRITTMITTEL, Newsletter 10/2009, http://www.physik.uni-regensburg.de/aktuell/rund09/Newsletter_2009-10.pdf
- [46] GRIEPENTROG, G. / HÜTTINGER, S. / VIDIELLA, G., EU HeatReCar Project: Waste Heat Recovery by Thermoelectric Power Conversion in Light-Duty Trucks, In: JÄNSCH, D., Thermoelektrik – Eine Chance für die Automobilindustrie, Renningen 2009, S. 267-276
- [47] PRIEMER, B., Kurz vor fünf, In: Auto Motor und Sport 04/2009, S. 12-17
- [48] KRIX, P., Mit Abwärme in die Zukunft, In: Automobilwoche 09.03.2009
- [49] STUMPP, B., Energie aus der Abwärme, In: Automobil-Produktion Januar 2009, S. 48-49