

1 Einleitung

Der Preis und die Verfügbarkeit von Energie stellen die Grundlage zur wirtschaftlichen Entwicklung der industrialisierten Welt dar. Diese Faktoren bestimmen die Produktionsbedingungen, das Konsumverhalten und nicht zuletzt die Mobilität. Die durch eine weltweite Industrialisierung und Motorisierung zu erwartende Verknappung des Erdöls macht den fossilen Verkehr massiv betroffen (Schindler 2011). Für den Personen- und Güterverkehr auf Mittel- und Langstrecken reichen die Kapazitäten der zurzeit zur Verfügung stehenden Energiespeicher für Elektroantriebe noch nicht aus, weshalb die mit Verbrennungsmotor getriebene Fahrzeuge in naher Zukunft wahrscheinlich ihre dominante Rolle behalten werden (Linde 2011, Gies 2008, Schramm 2014). Im Hinblick auf die EU-Auflagen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes der Automobilflotte und den damit verbundenen Trend der letzten Dekade zur Etablierung energieeffizienter, umweltschonender Systeme, dient die Weiterentwicklung von verbrennungsmotortriebenen Fahrzeugen unter anderem dazu, die CO₂-Emissionen zu reduzieren (Brünglinghaus 2011). Unter dem Oberbegriff „Wärmemanagement“ bemühen sich die Automobilhersteller mit unterschiedlichen Ansätzen durch Nutzung von Verlustwärme aus dem Verbrennungsprozess den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors zu steigern und damit den Kraftstoffverbrauch und so den CO₂-Ausstoß der Automobilflotte zu senken (Clemens 2008, Lux 2008, Bals 2008). Durch den Einsatz von Abgasrückführung und Abgasnachbehandlung konnten bereits Verbesserungen in der Erfüllung von Abgasnormen und eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs erzielt werden. Trotz dieser Maßnahmen werden mehr als 50% der im Kraftstoff chemisch gebundenen Energie in Form von Wärme an die Umgebung freigesetzt. Die Entwicklung von Systemen zur Energierückgewinnung aus Abgaswärme im Fahrzeug spielt somit im Hinblick auf die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs der Automobilflotte eine bedeutende Rolle (Flik 2009). Die Abgastemperatur liegt je nach Fahrzeugtyp und Betriebspunkt des Motors zwischen 450°C und 850°C. Das in der Abgaswärme gespeicherte Arbeitsvermögen wird beim Verbrennungsprozess nicht mehr genutzt und kann zur Rekuperation eingesetzt werden.

Durch die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugkomponenten wächst stetig der Bedarf für elektrische Energie, welche dem elektrischen Bordnetz des Fahrzeugs zum Betrieb von Nebenaggregaten zur Verfügung gestellt werden muss. Die im Abgas gespeicherte Wärme-Energie kann entweder durch einen nachgeschalteten Wärme-Kraft-Prozess in mechanische Arbeit oder mit Hilfe von thermoelektrischen Generatoren (TEG) direkt in elektrische Energie überführt werden. Im Gegensatz zur Nutzung von Wärme-Kraftmaschinen bietet Thermoelektrik Möglichkeiten zum Aufbau von

Generator-Anlagen für die Kraftfahrzeugtechnik mit geringerer Komplexität und vergleichbaren oder sogar höheren System-Wirkungsgraden (Vining 2008, Banzhaf 2010). Thermo-elektrische Generatoren besitzen keine beweglichen Teile, sind verhältnismäßig leicht und können kompakt aufgebaut werden. Die heute auf dem Markt verfügbaren thermoelektrischen Materialien sind in einem breiten Temperaturbereich einsetzbar. Mit Hilfe von Thermoelektrik ist Wandlung von Wärme in Elektrizität schon bei relativ niedrigen Temperaturen (ca. 100°C und höher) möglich, was diese Technologie besonders beim Einsatz im Automobilbereich auszeichnet (Meusel 2001, Xi 2007, Schlecht 2008). Im folgenden Unterkapitel soll Thermoelektrik kurz vorgestellt, und ihre Entwicklung chronologisch skizziert werden.

1.1 Eine kurze Geschichte von Thermoelektrik

Thermoelektrik ist eine Technologie, welche die Wandlung von Wärme in elektrische Energie und umgekehrt, elektrische Energie in Transport von Wärme ermöglicht. Die grundlegenden physikalischen Effekte wurden bereits Anfang bis Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt¹. Auf der Suche nach möglichen Elektrizitätsquellen erwies sich diese Technologie in Hinblick auf elektrische Energieerzeugung gegenüber zeitgenössischen galvanischen Batterien allerdings als nicht konkurrenzfähig. Grund dafür waren unter anderem die niedrigen Thermospannungen der damals bekannten, rein metallischen thermoelektrischen Materialpaare. Gleichzeitig jedoch trug Thermoelektrik maßgeblich zur Entwicklung von Messtechnik zur Temperatur erfassung bei. Mit Hilfe dieser Technologie wurde es erst möglich Messgeräte zu entwickeln, welche eine Temperaturdifferenz von bis zu 1 µK auflösen konnten (Walmsley 1911). Thermoelektrik ist bis heute die meistverbreitete Technologie zur Temperaturmessung, sie zeichnet sich vor allem durch sehr kurze Systemantwortzeiten aus (Bernhard 2004).

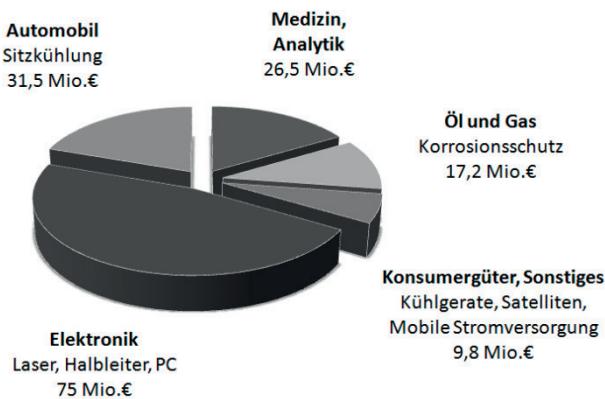
Die ersten bahnbrechenden Erfolge in der Entwicklung thermoelektrischer Materialien wurden in den späten 50er und 60er Jahren des 20. Jh. erzielt, nachdem Halbleitermaterialien für den Einsatz in thermoelektrischen Anwendungen entdeckt wurden (Li 2011). Vor allem die Materiallegierungen $\text{Bi}_{x-1}\text{Te}_x$ und $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ lenkten ein starkes Interesse der Materialforschung auf sich (Tritt 2001, Dresselhaus 1999).

Praktische Anwendung fand Thermoelektrik schnell in der Luft- und Raumfahrt. Bereits Mitte der 60er wurden die Erdbeobachtungssatelliten mit Hilfe von RTGs (*Radioisotope Thermoelectric Generator*) mit Elektrizität versorgt (Handler 1971). Das wohl

¹ Seebeck-Effekt (1822), Peltier-Effekt (1834) und Thomson-Effekt (1851). Vergleiche 2.1.

prominenteste Projekt bei dem Thermoelektrik eine zentrale Rolle spielte, war der Start von Voyager Satellitensystemen in den späten 70er Jahren, welche mit RTGs betrieben bis heute zuverlässig im Einsatz sind (NASA 2015). Anfang der 80er Jahre schien die Weiterentwicklung von Materialien für thermoelektrische Anwendungen ihren Höhepunkt erreicht zu haben. Die geringe thermoelektrische Güte der Materialien ($ZT \approx 1$) und der relativ niedrige Systemwirkungsgrad ($\eta \approx 5\%$) thermoelektrischer Generatoren waren gegenüber konkurrierenden Technologien zur Wandlung von Wärme in Elektrizität nicht durchsetzungsfähig. Thermoelektrik nahm Platz in Nischenanwendungen, überall dort wo die Eigenschaften wie Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit, geringer Bauraum und ein geräuschemissionsfreier Betrieb von Systemen eine übergeordnete Rolle spielten. Thermoelektrische Systeme wurden fortan in der Medizintechnik, bei militärischen Anwendungen und in der Raumfahrt eingesetzt (Rowe 1999, Vining 2008).

Abbildung 1.1 Marktanteile von Thermoelektrik (Schlecht 2008).



Seit den 90er Jahren weckte Thermoelektrik wieder ein starkes Interesse in der Materialforschung (Dresselhaus 1999). Zum einen wuchs der Bedarf für präzise Kühltechnik, welche zur Kühlung von elektronischen Komponenten messtechnischer Baugruppen, in Leistungselektronik und beim Betrieb von Hochleistungs-Laserdioden eingesetzt werden konnte. Zum anderen stieg zunehmend der Bedarf für dezentrale, mobile Quellen elektrischer Energie an. Gerade dort, wo Wärme als Abfallprodukt zur Verfügung steht, scheint der Einsatz von Thermoelektrik zur Energierückgewinnung sinnvoll (Rowe 1999). Der weltweite Markt für Thermoelektrik wird heute auf ein

Volumen von mehr als 500 Millionen Euro pro Jahr eingeschätzt, Tendenz steigend (Schlecht 2008). Gerade auf dem Gebiet von Kühlanwendungen -Peltier-Technik- konnte sich diese Technologie in der letzten Dekade etablieren (siehe **Abbildung 1.1**).

In den vergangenen zwei Dekaden führten unterschiedliche Methoden bei der Materialaufbereitung zu einer deutlichen Steigerung der Wirkungsgrade thermoelektrischer Generatoren (Li 2011). Diese Entwicklung ermöglicht die Realisierung von thermoelektrischen Generatoranlagen zur Erzeugung elektrischer Energie aus Verlustwärme, welche sich ökologisch und wirtschaftlich amortisieren (Schlecht 2008).

1.2 Stand der Forschung und Technik

Höchstmögliche Effizienz bei Wandlung von Wärme in Elektrizität ist eines der zentralen Ziele bei der Entwicklung thermoelektrischer Materialien für die Anwendungen in der Energieerzeugung. Der Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren (TEG) - η_{TEG} - hängt zum Einen vom Systemwirkungsgrad des thermodynamischen Prozesses und zum Anderen von der thermoelektrischen Güte des Materials ab. Thermoelektrische Güte ZT bringt den differentiellen Seebeck-Koeffizienten S_{np} und die elektrische sowie die thermische Leitfähigkeiten σ und κ der Materialkombination eines Thermopaars² bei einer absoluten Temperatur T in Beziehung:

$$Z \cdot T = \frac{S_{np}^2 \cdot \sigma}{\kappa} \cdot T \Rightarrow Z = \frac{S_{np}^2 \cdot \sigma}{\kappa_{el} + \kappa_{ph}}, \quad (1.1)$$

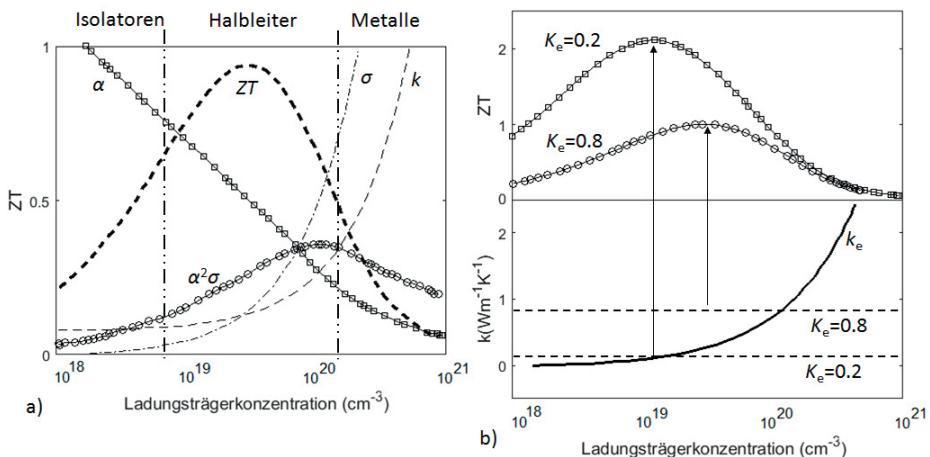
$$\eta_{TEG} = \eta_{Carnot} \cdot \eta_{Material} \Rightarrow \eta_{TEG} = \left(1 - \frac{T_k}{T_w}\right) \cdot \eta_{Material}(ZT). \quad (1.2)$$

Ein optimiertes thermoelektrisches Materialpaar sollte demnach einen höchstmöglichen (differentiellen) Seebeck-Koeffizienten aufweisen, eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen und zugleich thermisch isolierend wirken (vgl. **Abbildung 1.2**) (Prytz 2007). Eine Erhöhung des Seebeck-Koeffizienten resultiert in höheren elektrischen Ausgangsspannungen eines Thermopaars ($U_{th} = S_{np} \cdot \Delta T$). Niedrige thermische Leitfähigkeit

² Ein Thermopaar ist die kleinste diskrete thermoelektrische Einheit eines TEGs. Ein thermoelektrisches Modul besteht aus N Thermopaaren, welche zunächst beliebig, thermisch und elektrisch, miteinander verbunden werden können.

bedeutet einen geringen parasitären Wärmetransport durch das thermoelektrische Material, welcher zur Erwärmung der Wärmesenke und somit zur Verringerung der dem System zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenz ΔT führt. Letztlich sinken ohmsche Verluste im Material bei einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Thermopaars. Die ohmschen Verluste führen ebenso zur Erwärmung der kalten Systemseite und senken somit den Wirkungsgrad eines TEGs bei Generation elektrischer Leistung (Dresselhaus 2009).

Abbildung 1.2 Zusammenhang zwischen S , σ und κ (Snyder 2008)



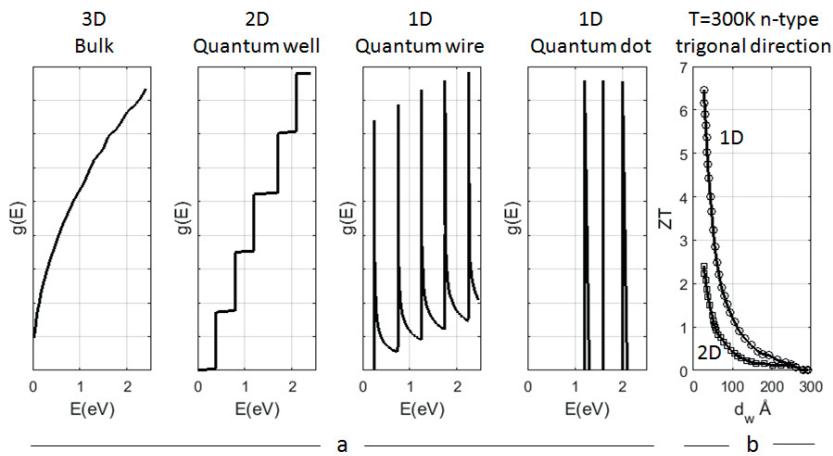
Eine Optimierung thermoelektrischer Materialien stellt aufgrund der physikalischen Kopplung³ der drei Größen S_{np} , σ und κ eine enorme Herausforderung für die Materialforschung dar (vgl. Abbildung 1.2) (Dresselhaus 2009, Koga 1997). Die Problemstellungen sind sehr vielschichtig und beschäftigen zugleich Synthesechemiker, Physiker und Materialwissenschaftler (Prytz 2007, Sootsman 2009). Fortschritte auf dem Gebiet der Nanotechnologie führten in der letzten Dekade zu neuen Ansätzen hinsichtlich der Steigerung thermoelektrischer Güte. Sie verfolgen die Methode eines niedrig-dimensionalen Materialentwurfs (*low-dimensional materials*), welche die Abhängigkeit der ZT-Parameter entzerrt und mehr Spielraum zu Optimierung bietet

³ Das Wiedemann-Franzsches Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen der elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten in Metallen wie folgt beschreibt: $\kappa/\sigma = L \cdot T$, wobei L die Lorenz-Zahl ist ($L = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^2$) (Ibach 2009).

(Bhushman 2010, Snyder 2008). Der Seebeck-Koeffizient eines thermoelektrischen Materials hängt von der Zustandsdichte der Ladungsträger in einem bestimmten Energieintervall (Energieband) bzw. ihrer Ableitung ab (vgl. **Abbildung 1.3**) (Wood 1988, Hicks 1996, Hu 1999, Hicks 1993).

$$S_{n,p} \approx \frac{1}{g(E)} \cdot \left. \frac{\partial g(E)}{\partial E} \right|_{E=E_f} \quad (1.3)$$

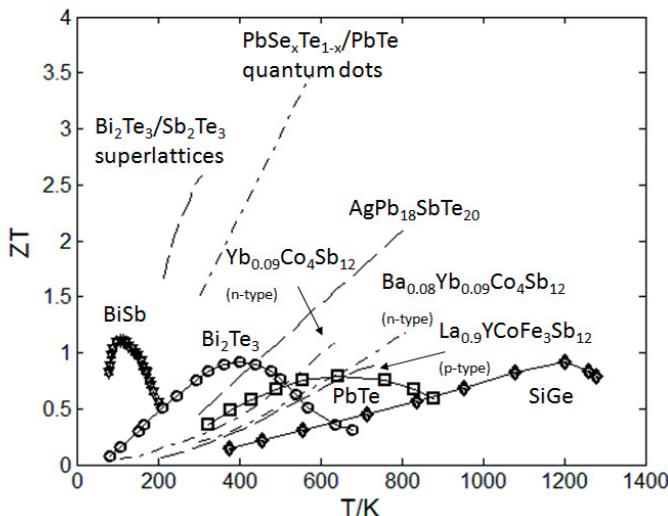
Abbildung 1.3 a) Zustandsdichten von Elektronen als Funktion der Ladungsträgerenergie in Halbleitern (Bhushman 2010)
b) die Auswirkung auf ZT (Dresselhaus 1999)



Zwei unterschiedliche Ansätze zur Abstimmung der ZT-Parameter werden in der Materialentwicklung verfolgt. Zum Einen besteht mit Hilfe des niederdimensionalen Designs eine Möglichkeit zur Erhöhung des sogenannten Leistungsfaktors $S_{np}^2 \cdot \sigma$ des thermoelektrischen Materials (Li 2011, Dresselhaus 2009, Sootsman 2009). Zum Anderen ist es möglich, durch Bildung von Multischichtstrukturen die thermische Leitfähigkeit des Halbleiter-Materials zu reduzieren, in dem der phononische Wärmetransport durch Phononenstreuung gedämpft wird, ohne dabei die elektrische Leitfähigkeit des Materials signifikant zu beeinflussen (Schlecht 2008, Prytz 2007, Snyder 2008). In den letzten zehn Jahren lieferten die mit Hilfe von Nanotechnologie entwickelten Materialen

reproduzierbare thermoelektrische Güte von $ZT \approx 2$ (Vining 2008, Harman 2005).

Abbildung 1.4 Thermoelektrische Materialen (Stand der Technik) (Yang 2009)



Materialentwickler beschäftigten sich mit alternativen Materialgruppen für thermoelektrische Hochtemperaturanwendungen. So zeigte sich aufgrund geringer thermischer Leitfähigkeit und akzeptabler elektrischer Eigenschaften z.B. die Eignung von Skutteruditen zur Herstellung thermoelektrischer Materialien (Prytz 2007). Vorhersagen und experimentelle Untersuchungen ergaben praktisch erreichbare ZT -Werte von 1,6 bei Temperaturen über 900 K (Li 2011, Nolas 1999, Vandersande 1994). Für den Einsatz bei Hochtemperaturanwendungen eignen sich ebenso die half-Heusler Materialverbindungen, welche jedoch eine relativ niedrige Güte aufwiesen ($ZT \approx 0,8$) (Li 2011, Sootsman 2009, Yang 2004). Materialpaarung aus Silizium-Germanium gewann aufgrund der hohen Verfügbarkeit, nicht toxischer Bestandteile und niedriger Masse wieder an Interesse in der Materialentwicklung. In Verbindung mit nanotechnologischem Materialdesign und durch Kombination, bzw. Kaskadierung unterschiedlicher Materialien wurden maximale Generatorwirkungsgrade von 10 bis 18% bei einer Heißseitentemperatur von ca. 500 K zunächst vorhergesagt und später nachgewiesen (Slack 1991, Cook 2014).

Abbildung 1.4 zeigt die Entwicklung aktueller thermoelektrischer Materialien bei Steigerung von ZT (vgl. auch Sootsman 2009). Nicht alle hier aufgeführten Materialverbindungen konnten bis heute in eine Generatormodul-Architektur überführt werden, sei es aus Mangel mechanischer oder thermischer Stabilität, aufgrund geringer Materialverfügbarkeit oder zu hohen Herstellungskosten. Neben den relativ neuen Skutteruditen besitzen bisher die auf Bi_2Te_3 und PbTe basierenden Materialien die besten thermoelektrischen Eigenschaften und können stabil zu thermoelektrischen Generatoren industriell verarbeitet werden.

1.2.1 Motivation für die Automobil-Industrie

Die Entwicklung von Kraftfahrzeugen befindet sich in ständigem Wandel. Dabei beeinflussen drei Faktoren die Veränderungen der Antriebskonzepte: die Gesetzgebung, der Kunde und die Verfügbarkeit von Ressourcen (Wallentowitz 2011). Die Verknappung von Rohöl bei weltweit steigendem Verbrauch führt zur stetigen Erhöhung von Kraftstoff-Preisen. Der Kunde fordert aus Kostengründen und in Hinblick auf die Umweltverträglichkeit einen verringerten Kraftstoffverbrauch, ohne jedoch dabei auf Sicherheit und Komfort oder auf den „Fahrspaß“ (Fahrdynamik) verzichten zu wollen (Wiedemann 2009). So führt die stetige Zunahme an elektrischen Fahrzeugkomponenten sowie der Fahrzeugmasse zu mehr Energieverbrauch, was sich wiederum negativ auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Gleichzeitig versucht die Gesetzgebung mit gezielten Förder-, bzw. Strafmaßnahmen die Fahrzeughersteller zur Entwicklung energieeffizienter Antriebe anzuregen und somit den globalen CO_2 -Ausstoß zu senken (vgl. 5.5). Umweltschutz wurde in der letzten Dekade sehr intensiv diskutiert, Reduktion der klimaschädlichen Treibhausgase war dabei das zentrale Thema der Klimagipfel vergangener Jahre. Die hierbei definierten Ziele sind die Deckelung der Erderwärmung auf 2°C bis 2050 und, damit einhergehend die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020 um 25 bis 40 % und bis 2050 um 80 %. (Brünglinghaus 2011, EP 2012). Laut Aussagen der Deutschen Automobil Treuhand GmbH (DAT) und dem Verband der Automobilindustrie (VDA) trägt der Straßenverkehr mit einem Anteil von 9,7 % zu den weltweiten Treibhausgasemissionen bei. In Deutschland und gesamt Europa sind es etwa 20 % des gesamten CO_2 -Ausstoßes (VDA 2012, DAT 2012). „Der Pkw-Verkehr wird seinen Beitrag leisten müssen, die anthropogenen Treibhaus-Emissionen zu mindern. Nicht nur die Europäische Union, sondern viele Staaten, allen voran die großen Märkte in China und USA, haben gesetzliche Vorschriften zur Verbrauchsminderung und damit CO_2 -Reduktion erlassen“, heißt es in der Automobiltechnischen Zeitschrift (ATZ) in ihrem Titelbeitrag „Entwicklungsziel CO_2 -Minderung“ Anfang 2011 (ATZ 2011). Um den für 2050 definierten Zielen zu begegnen, müssen die durchschnittlichen CO_2 -Emissionen

eines Pkw in Deutschland schon bis zum Jahr 2040 Werte zwischen 13 und 43 g/km erreichen (McKinsey 2010). In Europa wird der Flottengrenzwert für alle neu zugelassene Pkw ab 2015 auf 120g/km (bei Anrechnung relevanter Innovationen auf 130g/km im *Kundenzyklus*) begrenzt. Ab 2020, abhängig von technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit, wird der Grenzwert weiter gesenkt, diskutiert werden derzeit 95g/km (Brüninghaus 2011). Werden die vorgesetzten Ziele nicht erreicht, drohen den Automobilherstellern ab 2015 Strafzahlungen, welche sich je nach Flotte und Hersteller in Milliardenhöhe ergeben können (vgl. 5.3.4).

Abbildung 1.5 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorgetriebener Fahrzeuge.

Maßnahme	Verbrauchsreduktion	Fahrzyklus	Quelle
Optimierung der Aerodynamik	12%	NEFZ	(Hucho 2009, Trampert 2006)
Optimierung Klimaanlage	5%	NEFZ	(Kemle 2008, Arndt 2007)
Wärmeschutzverglasung	5%	NEFZ	(Offermann 2012)
Optimierung der Leuchtmittel	1%	NA	(Hamm 2012)
Optimierte Lekungskonzepte	4%	NA	(Trampert 2006)
Benzindirekteinspritzung	14%	NA	(Winterhagen 2007)
Optimierung der Reibverluste im Motor	5%	NEFZ	(Trampert 2006)
Erhöhung spez. Leistung (Downsizing)	4,7-10%	Artemis, NEFZ	(Trampert 2006, Balazs 2012)
Gewichtsreduktion	1-10%/100kg	NEFZ	(Espig 2006, Rhode-Br. 2012)
Optimierung Automatikgetriebe	6,5%	NA	(Brüninghaus 2010)
Fahrerassistenzsysteme ("Green Driving")	10%	Kundenzyklus	(Dornieden 2012)
Optimale Fahrweise (bedingt durch den Fahrer)	25%	Kundenzyklus	(DAT 2012)
Wärmenutzung Verkürzung Warmlaufphase	0,8-3%	NEFZ	(Hepke 2010)
thermoelektrische Wärmerekuperation (berichtet)	2%	NEFZ	(Liebl 2009)
thermoelektrische Wärmerekuperation (erwartet)	5-7%	NA	(MTZ 2009)
Hybridisierung des Antriebsstrangs	16-55%	Artemis, NEFZ	(Balazs 2012)

Die Energieeffizienz der Mobilität lässt sich nicht leicht quantitativ abbilden. Ein bemanntes Fahrzeug bildet eine Einheit im übergeordneten komplexen System „Straßenverkehr“. Die Schnittstelle Mensch-Maschine wird durch subjektive und emotionale Faktoren beeinflusst (Braess 2008). Abhilfe bei der Bewertung der Effizienz von Kraftfahrzeugen sollen die definierten Fahrzyklen schaffen, welche sich international teilweise stark unterscheiden (vgl. 5.3.3). Nicht zuletzt muss in der Gesamtbetrachtung der Energieaufwand bei der Herstellung der Teilkomponenten und bei der Fertigung von Fahrzeugen mit berücksichtigt werden (Warsen 2012, Yodoward 2001).

Mit Strategien wie „effiziente Dynamik“, „BlueEFFICIENCY“, „BlueMotion“, „ECOnetic“ oder „ecoFLEX“ versuchen alleine die deutschen Automobilhersteller den Vorgaben von Reglementierungen seitens des Gesetzgebers und den Kundenwünschen

nachzukommen. Innovative Motorentechnologien genau wie die verlustarmen Getriebe- und Antriebskomponenten werden weiter entwickelt, Fahrwiderstände der Reifen optimiert. Karosserieleichtbau und strömungsgünstige Aerodynamik tragen ebenso zur Steigerung der Effizienz bei (Audi 2012). **Abbildung 1.5** gibt einen Überblick über Technologien zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs verbrennungsmotorgetriebener Personenkraftfahrzeuge. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung wurden hier isoliert dargestellt, weshalb die Gesamtauswirkung auf das System kleiner als die Summe einzelner Sparpotentiale ist. Beobachtet man die Entwicklung in der Praxis, so ist festzustellen, dass trotz steigenden Anspruchs an Sicherheit und Komfort seit Anfang der Neunziger Jahre Neuwagen Deutscher Hersteller um ca. 25 % sparsamer geworden sind (Bohr 2008).

1.3 Problemstellung und Einordnung der Arbeit

In den vergangenen fünf Jahren hat sich die Forschungsaktivität auf dem Gebiet der Energierekuperation aus Verlustwärme in Kraftfahrzeugen intensiviert. Gerade die Automobilhersteller im US-amerikanischen, europäischen und asiatischen Raum beschäftigen sich mit der Entwicklung von Prototypen thermoelektrischer Generatoranlagen für den Einsatz in Pkw (Friedrich 2010, Jänsch 2009, Crane 2013). Eine thermoelektrische Generator-Anlage (TEGA) zur Energie-Rückgewinnung aus Abgaswärme besteht aus Baugruppen zur Wärmeübertragung (Wärmetauscher, thermische Ankopplung), einer mit der Leistung des Fahrzeugs skalierbaren Anzahl thermoelektrischer Generatoren (TEG) und benötigten elektrischen Wandlern zur Anpassung elektrischen Verhaltens zwischen der Generatoranlage und dem Bordnetz des Kraftfahrzeugs. Neben dem konventionellen elektrischen Generator bildet eine TEGA also eine weitere thermodynamische Kopplung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem elektrischen Kreis des Fahrzeugs (Korzhuev 2010). Im Vergleich zu bereits erschlossenen Problemstellungen bei der Entwicklung von Radioisotopengeneratoren (RTG) für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrttechnik stellt sich beim Einsatz eines TEGs im Kraftfahrzeug eine Reihe spezieller Anforderungen an die Systemkomponenten des thermoelektrischen Generators. Die in Verbindung mit dem Fahrzyklus eines Kraftfahrzeugs stehende zyklische, nicht periodische, thermische Belastung eines TEGs setzt im Vergleich zum RTG neue Anforderungen an die Herstellung thermoelektrischer Module. Die Auswahl der zur thermischen Ankopplung verwendbaren Materialien ist durch die thermische Fluktuation ebenfalls stark eingeschränkt (Reibkorrosion, Hitzebeständigkeit, Lebensdauer, usw.). Hier muss also das dynamische TEG-Verhalten bezüglich der Leistungsstabilität und der Lebensdauer von Systemkomponenten näher

untersucht werden. Ebenfalls ist zu klären, an welcher Stelle des Abgassystems die Montage einer TEGA optimal ist, und ob es sinnvolle Kombinationsmöglichkeiten gibt. Welche Art von Wärmetauschern (direkte, indirekte Ankopplung an Abgas, bzw. Kühlfluid) ist vorteilhaft bezüglich des Systemwirkungsgrads? Ist ein separater Kühlkreis für den TEG sinnvoll? Welche Materialien zur Wärmeankopplung können eingesetzt werden?

Der maximale Wirkungsgrad der heute auf dem Markt erhältlichen Bi_2Te_3 -Module beträgt ca. 5 % (Maximalwert), der ideale Arbeitstemperaturbereich liegt zwischen 273 K und max. 520 K. Da der Wirkungsgrad der TE-Module stark vom Wirkungsgrad des zugehörigen Carnot-Prozesses abhängt, wurde in den vergangenen Jahren massiv an der Entwicklung und Herstellung von Hochtemperaturmodulen gearbeitet. Gegenwärtig gibt es Laborexemplare, die einen Wirkungsgrad von 14 bis 20 % aufzeigen (Müller 2011, Cook 2014). Um verlässliche Prognosen über die Leistungs-Fähigkeit und Lebensdauer von Hochtemperatur-Modulen treffen zu können, muss eine Möglichkeit zur zuverlässigen Charakterisierung von Hochtemperatur-TEGs geschaffen werden. Die Geometrie des TEGs und die dadurch bedingte Anzahl und Anordnung der TE-Module (TEM) ruft eine ihnen charakteristische inhomogene Temperaturverteilung innerhalb des Generators hervor. Da die TEMs sowohl im Generator- als auch im Wärmepumpbetrieb (Peltier) arbeiten können, kann es je nach Temperaturverteilung im Generator (thermisch bedingte mechanische Ausdehnung) und je nach elektrischer Schaltung der TEMs (Parallel-, oder Reihenschaltung) zu parasitären Peltier-Strömen kommen. Die Peltier-Ströme verursachen einen aktiven Wärmeaustausch zwischen den einzelnen thermoelektrischen Modulen im TEGA und vermindern damit stark den Wirkungsgrad der thermoelektrischen Generatoranlage. Hier besteht also noch ein Optimierungsbedarf hinsichtlich der Auswahl von Materialien zur Herstellung einer thermischen Ankopplung zwischen dem TE-Modul und dem Wärmetauscher. Ebenso wichtig ist die Frage der Handhabung der elektrischen Zusammenschaltung der TE-Module innerhalb des Generators. Im Rahmen dieser Arbeit sollen thermoelektrische Module auf BiTe-Basis, aber auch Hochtemperaturmodule (PbTe) detailliert messtechnisch untersucht und bewertet werden. Anhand der Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen wird ein dynamisches TEGA-Modell erstellt und evaluiert. In Kombination mit einem Simulationsmodell, das die Fahrzeugdynamik und das Wärmemanagement eines Pkw abbildet (Koppers 2013), sollen daraufhin die Potentiale von Thermoelektrik insbesondere im Hinblick auf die Kombinationsmöglichkeiten der Nieder- und Hochtemperaturtechnik neu bewertet werden. Schließlich soll anhand der mit Hilfe der Simulation gezeigten Kraftstoffeinsparpotentiale und damit in Verbindung stehenden Nachlässe bei Flottenstrafzahlungen die Wirtschaftlichkeit von Thermoelektrik im Pkw gezeigt werden.