

Charakterisierung und Simulation einer thermoelektrischen Generatoranlage zur Energie-Rekuperation aus Abgasen im Pkw

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dimitri Tatarinov

aus Omsk

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sachau

Tag der mündlichen Prüfung: 19.06.2015

MEIN DANK gilt allen die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Die hier vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der Arbeitsgruppe „Thermoelektrik“ im Fachbereich Technik an der Hochschule Trier, in kooperativer Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen und der Fakultät Technologie und Bionik an der Hochschule Rhein-Waal.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm, für die herzliche Aufnahme in seinen Arbeitskreis und seine wissenschaftliche und persönliche Betreuung sowie das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sachau danke ich für die Übernahme der Aufgabe des Zweitgutachters. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Georg Bastian für seine fachliche Betreuung meiner Untersuchungen. Seine stete Bereitschaft zur Diskussion und die Fähigkeit, fachübergreifende Ansätze zusammenzuführen, haben mich immer wieder zu neuen Ideen angeregt.

Meinen Kollegen möchte ich für die intensive Zusammenarbeit herzlich danken. Die Erfahrungen und das Wissen aus anderen Projekten haben das gegenseitige Vorankommen unterstützt. Herrn Dipl.-Phys. Arne Vogelsang danke ich an dieser Stelle für seine stets unkonventionellen Praktiken und für das Teilen seiner Expertise auf dem Feld der Physik. Ich möchte mich bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Koppers für seine unerschöpfliche Hilfsbereitschaft bedanken. Ohne seine Anregungen hätte sich mir die Schnittstelle zwischen den thermoelektrischen Systemen und der Kraftfahrzeugtechnik nicht so umfassend erschlossen. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Hupe und Herrn M.Sc. Klaus Stöß für die vielen lebhaften fachlichen Diskussionen bedanken. Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern der Hochschule Trier die mich bei meiner Forschungsarbeit für diese Arbeit unterstützt haben.

Ich bedanke mich zudem bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Bereitstellung der Forschungsmittel.

At last but (absolutely) not least möchte ich meiner Frau Juliane für den Rückhalt, den sie mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit gegeben hat, für ihr unermüdliches Korrekturlesen und für ihre Unterstützung bei der Betreuung unserer Kinder vom Herzen danken.

„I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind.“

William Thomson (*1824, †1907)

Kurzfassung

Die Automobilhersteller müssen den reglementarischen Anforderungen in Bezug auf den CO₂-Austoß einerseits und den Kundenanforderungen andererseits gerecht werden. Die Entwicklung neuer Technologien in der Mobilität ist vor allem vom Kundenverhalten und von unterschiedlichen Reglementierungen abhängig, welche zugleich auch die Rahmenbedingungen für die Hersteller abstecken.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden thermoelektrische Systeme zur Rückgewinnung thermischer Energie in der Kraftfahrzeugtechnik anhand theoretischer Grundlagen und mithilfe experimenteller Untersuchungen im Detail charakterisiert und ausgelegt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ging schließlich ein Simulationsmodell hervor, welches Prognosen über die Effektivität einer thermoelektrischen Generatoranlage (TEGA) bei Rekuperation von Abgaswärme in Pkw ermöglicht. Unterschiedliche Fahrzeugtypen wurden anhand verschiedener internationaler Fahrzyklen in die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bzw. dessen relativer Einsparung durch TEGA berücksichtigt. Die dadurch zu erwartende Reduktion des CO₂-Ausstoßes wurde ermittelt und vor dem Hintergrund europäischer reglementarischer Maßnahmen sowie aktueller Rohstoffpreise im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Technologie interpretiert.

Diese Ergebnisse wurden in drei unterschiedlichen Szenarien aus Sicht der zukünftigen Technologieentwicklungen dargestellt, diskutiert und mit aktuellen Berichten aus praktischen Anwendungen von thermoelektrischen Systemen zur Energierückgewinnung aus Abgasenthalpie verglichen.

Abstract

The car manufacturers are struggling with the regulations in terms of CO₂ emissions and fuel efficiency of their vehicles on the one hand and with customer requirements on fully equipped cars on the other hand. Therefore new trends in the development of technologies in automotive are mainly driven by the matter of manufacturing costs, customer behaviour and governmental regulations.

In this study, thermoelectric generator systems (TEGS) were examined with respect to their capability of energy recuperation from the exhaust gas in passenger cars. Therefore TEGS were first described theoretically taking the fundamental thermoelectric phenomena into account and later characterized by practical experiments. As a result of this analysis a simulation model was developed, which allows the evaluation of the effectiveness of thermoelectric generator systems in terms of fuel reduction in automotive applications. Various passenger vehicle models were studied on basis of different international driving cycles, calculating the fuel reduction caused by the application of TEGS. The accordingly expected reduction of the CO₂ emissions was calculated as well as the technology's cost-efficiency, taking the European regulations and the current fuel prices into account.

This study concludes by presenting various scenarios from the perspective of the development progress of thermoelectric as a technology. The calculation results are discussed and compared with reports of current published prototype studies in the field of automotive applications.

Verzeichnis häufig verwendeter Symbole

η_{TEG}	Wirkungsgrad eines thermoelektrischen Generators	
η_{Carnot}	Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses	
η_{Material}	Wirkungsgrad bedingt durch die Materialkombination	
ZT	Thermoelektrische Güte	
S_{np}	Seebeck-Koeffizient eines Materialpaars	V/K
σ	elektrische Leitfähigkeit	S
ρ_{el}	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \text{ m}^2/\text{m}$
K	thermischer Leitwert	W/K
κ	thermische Leitfähigkeit (TEG Komponenten)	W/(m K)
κ_{el}	thermische Leitfähigkeit (Ladungsträger)	W/(m K)
κ_{ph}	thermische Leitfähigkeit (phononisch)	W/(m K)
T	Temperatur	K
T_w	Temperatur der warmen Systemseite	K
T_k	Temperatur der kalten Systemseite	K
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen der heißen und der kalten Systemseite	K
T_M	mittlere Temperatur zwischen der heißen und der kalten Systemseite	K
U_{th}	elektrische Ausgangsspannung eines Thermopaars	V
I_{th}	durch U_{th} verursachter elektrischer Strom	A
I_L	der Laststrom des TEGs	A
U_k	Kontaktspannung zwischen zwei unterschiedlichen Metallen	V
U_L	die Lastspannung der TEGs	V
U_{leer}	die Leerlaufspannung des TEGs	V
R_i	elektrischer Innenwiderstand	Ω
R_L	der Lastwiderstand am TEG	Ω
P_{el}	elektrische Ausgangsleistung des TEGs	W
P_{max}	maximale elektrische Ausgangsleistung des TEGs	W
\dot{Q}_{in}	der vom TEG aufgenommene Wärmestrom (Systemeingang)	W

\dot{Q}_{out}	der vom TEG abgegebene Wärmestrom (Systemausgang)	W
A	Fläche	m^2
l	Länge	m
\dot{Q}_{Π}	der durch den Peltier-Effekt hervorgerufene Wärmestrom	W
Π	Peltier-Koeffizient	V
\dot{Q}_{τ}	der durch den Thomson-Effekt hervorgerufene Wärmestrom	W
\dot{Q}_s	der durch die Strahlung hervorgerufene Wärmestrom	W
\dot{Q}_k	konvektiv übertragener Wärmestrom	W
T_w	die Temperatur an der Wand	K
T_F	die Temperatur im Fluid weit entfernt von der Wand	K
α_k	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$
λ	thermische Leitfähigkeit (Wärmetauschersystem)	$\text{W}/(\text{m K})$
τ	Thomson-Koeffizient	V m/K
\dot{q}	Wärmestromdichte bei Wärmeleitung	W/m^2
\dot{q}_s	Wärmestromdichte bei Wärmestrahlung	W/m^2
j	elektrische Stromdichte	A/m^2
ρ	Dichte des entsprechenden Materials	kg/m^3
c	Wärmekapazität des entsprechenden Materials	$\text{W}/(\text{kg K})$
r	Reflektionsgrad	
ε	Emissionsgrad	
τ	Transmissionsgrad	
M_λ	spektrale spezifische Ausstrahlung	$\text{W}/\text{m } \mu\text{m}$
λ_{max}	Wellenlänge bei maximaler Abstrahlleistung	m
D	die Packungsdichte des thermoelektrischen Materials	
τ	Zeitkonstante eines dynamischen Systems	s
\dot{V}_w	Volumenstrom der Kühlflüssigkeit	m^3/s

T_{we}	Die Vorlauftemperatur der Kühlflüssigkeit	K
T_{wa}	Die Rücklauftemperatur der Kühlflüssigkeit	K
T_h	Die Temperatur der Wärmequelle (Heizung)	K
T_g	die Temperatur des Abgases	K
P_h	die Heizleistung der Wärmequelle	W
p_{mod}	der auf den TEG wirkende (Normal-) Druck	Pa
\dot{Q}_g	der durch den Abgas transportierte Wärmestrom	W
L_c	die Breite des Abgaswärmetauschers	m
b_{WT}	die Länge der Rippen (Wärmetauscher)	m
η_R	Rippenwirkungsgrad (Wärmetauscher)	
d_R	die Rippenstärke	m
λ_R	die thermische Leitfähigkeit einer Rippe	W/(m K)
$T_{h(i)}$	die diskrete Temperatur am TEG	K
λ_{TE}	die thermische Leitfähigkeit des TEGs	W/(m K)
λ_g	die thermische Leitfähigkeit des Abgases	W/(m K)
A_q	die Querschnittsfläche des Abgaskanals	m ²
A_{TH}	die gesamte Kontaktfläche des TE-Materials (TEG)	m ²
A_h	die angeströmte Fläche (Wärmetauscher)	m ²
\dot{m}_g	der Abgasmassenstrom	kg/s
c_{pg}	Wärmekapazität des Abgases	W/(kg K)
ρ_g	die Dichte des Abgases	kg/m ³
Nu	die Nusselt-Zahl	
Re	die Reynold-Zahl	
Pr	die Prandtl-Zahl	
ν	die kinetische Viskosität	m ² /s
u_∞	die Fluidgeschwindigkeit weit von der Wand	m/s
l_s	die Schenkellänge (TEG)	m
d_s	die Schenkelstärke (TEG)	m
b_s	die Schenkelbreite (TEG)	m
η_R	Rippenwirkungsgrad (Wärmetauscher)	
m_F	die Fahrzeugmasse	kg
S_n	zulässiger CO ₂ Ausstoß	g/km
x^{CO_2}	vom Hersteller angegebener CO ₂ Ausstoß	g/km
S_{soll}	Flottensollwert für den CO ₂ Ausstoß	g/km
S_{ist}	Flottenistwert für den CO ₂ Ausstoß	g/km

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Marktanteile von Thermoelektrik	5
Abbildung 1.2	Zusammenhang zwischen S , σ und κ	7
Abbildung 1.3	a) Zustandsdichten von Elektronen als Funktion der Ladungsträger-Energie in Halbleitern und b) die Auswirkung auf ZT	8
Abbildung 1.4	Thermoelektrische Materialien (Stand der Technik)	9
Abbildung 1.5	Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der verbrennungsmotorgetriebenen Fahrzeuge	11
Abbildung 2.1	Seebeck-Effekt im offenen und geschlossenen Stromkreis	15
Abbildung 2.2	Makroskopische Transportvorgänge in einem elektrischen Leiter, Temperaturgradient entlang des Leiters verursacht eine Differenz des elektrischen Potentials	16
Abbildung 2.3	a) Teilspannungen an einem Thermopaar b) Kurzschlussstrom bei geschlossener Thermoschleife	19
Abbildung 2.4	Peltier-Effekt in stromdurchflossenem Thermopaar	20
Abbildung 2.5	Wärmetransport bedingt durch Wärmeleitung in einem Thermopaar	23
Abbildung 2.6	a) Spektrale spezifische Ausstrahlung $M\lambda(\lambda, T)$ und b) ihre Winkel-Abhängigkeit	28
Abbildung 3.1	Prinzip der Segmentierung von Thermoschenkeln	33
Abbildung 3.2	Elektrisches Ersatzschaltbild eines TEGs	37
Abbildung 3.3	Thermisches Ersatzschaltbild eines TEGs	38
Abbildung 3.4	Typische Kennlinien eines TECs	41
Abbildung 3.5	Schematische Darstellung einer planar aufgebauten TEGA	42
Abbildung 3.6	Thermoelektrische Wärmetauschersysteme	44
Abbildung 3.7	Inhomogene Druckverteilung führt zur	

	ungleichmäßigen Verteilung der Temperatur	46
Abbildung 3.8	Kombinationen zur thermischen Systemankopplung	47
Abbildung 3.9	Transienter Verlauf parasitärer Peltier-Ströme	49
Abbildung 3.10	Ergebnis inhomogener Temperaturverteilung TEGA	50
Abbildung 3.11	Varianten von elektrischer Gruppierung von TEGs	52
Abbildung 3.12	Benötigte DC/DC-Wandler und ihre Charakteristik	53
Abbildung 4.1	Gesamtansicht der Messvorrichtung	55
Abbildung 4.2	Stabilität der Wärmesenke bei Untersuchungen von Hochtemperatur-Modulen	56
Abbildung 4.3	Prüfling-Haltevorrichtung im Laborbetrieb	57
Abbildung 4.4	Charakteristische Materialeigenschaften von IR-Fenstern	59
Abbildung 4.5	Funktionszeichnung der Messumgebung (Vakuumkammer)	60
Abbildung 4.6	Systemleistungsbilanz bei der Vermessung eines TEGs	61
Abbildung 4.7	Abschätzung der Fehler bei Bestimmung von Systemgrößen	64
Abbildung 4.8	Eigenschaften untersuchter TE-Module	65
Abbildung 4.9	Eigenschaften untersuchter thermischer Kontaktmaterialien	66
Abbildung 4.10	a) U-I-Kennlinien und b) differentieller Seebeck-Koeffizient	68
Abbildung 4.11	a) Elektrische u. b) thermische Leitfähigkeiten	69
Abbildung 4.12	Interpolation von $S_{n,p}$, σ und κ in Abhängigkeit von Temperatur	69
Abbildung 4.13	a) Leistungsanpassung und b) Ausgangsleistung $P_{TEG}(\Delta T)$	71
Abbildung 4.14	a) Wirkungsgrade und b) Systemwärmeströme TEGs	71
Abbildung 4.15	Leistungseigenschaften in Abhängigkeit der Packungsdichte TEG	72

Abbildung 4.16	Leistungsanpassung bei Reihen- und Parallelschaltung von TEGs	73
Abbildung 4.17	Einfluss thermischer Kontaktierung auf die Leistung eines TEGs	74
Abbildung 4.18	a) Druckverteilung am Modul, b) Ausgangsleistung $P_{\text{TEG}}(\Delta p)$	75
Abbildung 4.19	Modul-Degradation bei zyklischer Belastung	75
Abbildung 4.20	Messungen mit Hilfe von Thermografie	76
Abbildung 4.21	a) Leistungsanpassung und b) U-I-Kennlinien (Bi ₂ Te ₃ und PbTe)	78
Abbildung 4.22	a) Diff. Seebeckkoeffizient, b) Wirkungsgrade (Bi ₂ Te ₃ und PbTe)	78
Abbildung 4.23	a) el. Leitfähigkeit und b) therm. Leitwert (Bi ₂ Te ₃ und PbTe)	79
Abbildung 4.24	a) Systemwärmeströme, b) el. Leistung (Bi ₂ Te ₃ und PbTe)	79
Abbildung 4.25	a) Temperaturverlauf $T_h(t)$, b) Wärmestrom durch TEGs NEFZ	81
Abbildung 4.26	a) el. Leistung NEFZ, b) Wirkungsgrade (Bi ₂ Te ₃ und PbTe)	81
Abbildung 5.1	Energiefluss im Pkw und die Ergänzung durch TEGA	84
Abbildung 5.2	Einteilung elektrischer Verbraucher im Pkw	85
Abbildung 5.3	Schema des gesamten Antriebstrang-Modells	87
Abbildung 5.4	TEG-Modell u. seine Ein- und Ausgangsgrößen	89
Abbildung 5.5	Evaluation des Bi ₂ Te ₃ -TEG Modells	89
Abbildung 5.6	Elektrisches Verhalten des Bi ₂ Te ₃ -PbTe-Hybrids (ZT=0,9)	90
Abbildung 5.7	Thermoelektrische Generatoranlage zur Energie-Rückgewinnung aus Abgaswärme im Pkw	91
Abbildung 5.8	Wärmeübertragung im Abgaskanal	92
Abbildung 5.9	Geometrische Größen der TEGA im Bezug auf ein TEG-Segment	95
Abbildung 5.10	a) Variation Anzahl TEGs, b) Temperaturverteilung TEGA	95

Abbildung 5.11	Berechnung der Temperatur- und Wärmestromverteilung	96
Abbildung 5.12	Vereinfachte Gesamtdarstellung des Simulationsmodells	97
Abbildung 5.13	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	98
Abbildung 5.14	Zer HYZEM-Fahrzyklus	99
Abbildung 5.15	US-Fahrzyklen HWFET und SFTP US06	100
Abbildung 5.16	Strafzahlungen pro Neuzulassung bis 2018	102
Abbildung 5.17	Vergleich reduzierter Flotten deutscher Hersteller	102
Abbildung 5.18	Anteile der Segmente Fahrzeugbestand (KBA)	103
Abbildung 5.19	Darstellung dyn. Simulationsergebnisse	105
Abbildung 5.20	Mittlere TEGA-Wirkungsgrade (ZT=0,9)	106
Abbildung 5.21	Mittlerer Massenstrom des Abgases (ZT=0,9)	107
Abbildung 5.22	Mittlere Temperatur am Eingang der TEGA (ZT=0,9)	107
Abbildung 5.23	Mittlere el. Ausgangsleistung TEGA (ZT=0,9)	108
Abbildung 5.24	Entlastung des Drehstromgenerators durch TEGA (ZT=0,9)	108
Abbildung 5.25	Kraftstoffverbrauch ohne TEGA	110
Abbildung 5.26	Relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA (ZT=0,9)	110
Abbildung 5.27	Entlastung des Drehstromgenerators durch TEGA (ZT=1,2)	111
Abbildung 5.28	Relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA (ZT=1,2)	112
Abbildung 5.29	Relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA (ZT=1,8)	113
Abbildung 5.30	Entlastung des Drehstromgenerators durch TEGA (ZT=1,8)	113
Abbildung 5.31	Jahresfahrleistungen und der Einsatzzweck von Pkw	115
Abbildung 5.32	Kostengegenüberstellung Szenarien I-III	117

Inhalt

1	Einleitung.....	3
1.1	Eine kurze Geschichte von Thermoelektrik.....	4
1.2	Stand der Forschung und Technik.....	6
1.2.1	Motivation für die Automobil-Industrie.....	10
1.3	Problemstellung und Einordnung der Arbeit.....	12
2	Physikalische Grundlagen.....	14
2.1	Thermoelektrische Effekte.....	14
2.1.1	Der Seebeck-Effekt.....	14
2.1.2	Der Peltier-Effekt.....	19
2.1.3	Der Thomson-Effekt.....	21
2.2	Wärmeübertragung.....	22
2.2.1	Wärmeübertragung durch Wärmeleitung.....	22
2.2.2	Wärmeübertragung durch Strahlung.....	27
2.2.3	Konvektive Wärmeübertragung.....	30
3	Charakterisierung thermo-elektrischer Generatorsysteme.....	32
3.1	Aufbau und Funktionsweise thermoelektrischer Module.....	32
3.1.1	Der thermoelektrische Generator.....	35
3.1.2	Die thermoelektrische Wärmepumpe.....	39
3.2	Systemintegration in Kraftfahrzeugen.....	42
3.2.1	Thermomechanische Systemintegration.....	43
3.2.2	Elektrische Systemintegration.....	48
4	Experimentelle Untersuchungen.....	54
4.1	Beschreibung der Messtechnik.....	54
4.1.1	Thermische Messumgebung.....	55
4.1.2	Elektrische Messumgebung.....	56
4.1.3	Mechanische Messumgebung.....	57
4.1.4	Sensorik und Messdatenerfassung.....	58
4.1.5	Einbindung der Infrarot Messtechnik.....	58
4.2	Bestimmung thermoelektrischer Systemparameter.....	61
4.3	Beschreibung von Testmethoden.....	64
4.4	Auswertung der Messreihen.....	67
4.4.1	Messreihen zum thermoelektrischen Systemverhalten.....	67
4.4.2	Kombination von Nieder- und Hochtemperaturmodulen.....	77

4.5	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	82
5	<i>Thermoelektrische Energierückgewinnung im Pkw</i>	83
5.1	<i>Identifizierung potentieller Abwärmequellen im Antriebsstrang</i>	83
5.2	<i>Simulation thermoelektrischer Abwärme-Rekuperation</i>	85
5.3	<i>Modellbildung</i>	86
5.3.1	<i>Das Fahrzeugmodell</i>	86
5.3.2	<i>Modellierung thermoelektrischer Komponenten</i>	88
5.3.3	<i>Darstellung verwendeter Fahrzyklen</i>	97
5.3.4	<i>Auswahl untersuchungsrelevanter Fahrzeugtypen</i>	100
5.4	<i>Bestimmung des Energieertrags eines TE-Systems im Pkw</i>	104
5.4.1	<i>Szenario I: Stand gegenwärtiger Prototyp-Entwicklungen</i>	106
5.4.2	<i>Szenario II: Realistische Entwicklung vollintegrierter TE-Systeme</i>	111
5.4.3	<i>Szenario III: Plausible Entwicklung fortgeschrittener TE-Systeme</i>	112
5.5	<i>Wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen</i>	114
	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	118
	<i>Literatur</i>	121
	<i>Anhang</i>	140

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 verbrennungsmotorgetriebenen Fahrzeugen unter anderem dazu, die CO₂-Emissionen zu reduzieren (Brüninghaus 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 Temperaturerfassung 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).

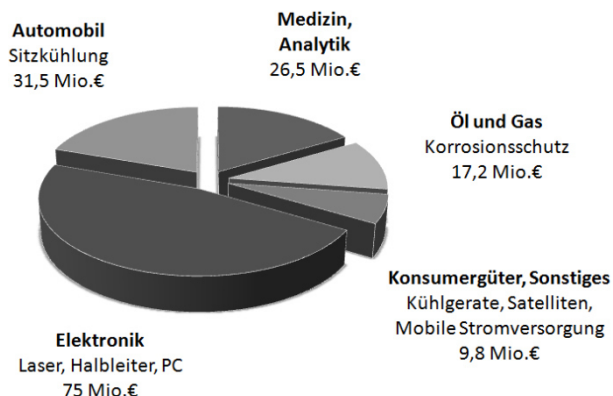
Die ersten bahnbrechenden Erfolge in der Entwicklung thermoelektrischer Materialien wurden in den späten 50er und 60er Jahren des 20. Jh. erzielt, nachdem Halbleitermaterialien für den Einsatz in thermoelektrischen Anwendungen entdeckt wurden (Li 2011). Vor allem die Materiallegierungen $\text{Bi}_{1-x}\text{Te}_x$ 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:

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

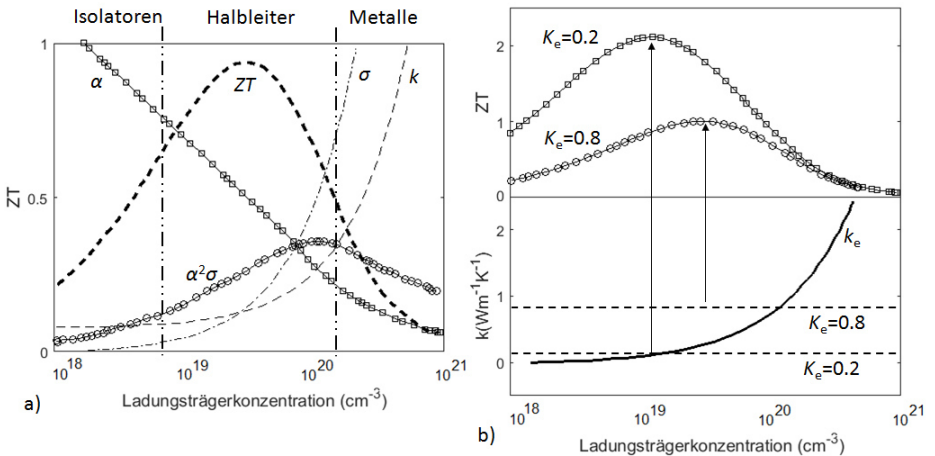
$$\eta_{TEG} = \eta_{Carnot} \cdot \eta_{Material} \Rightarrow \eta_{TEG} = \left(1 - \frac{T_k}{T_w}\right) \cdot \eta_{Material}(ZT). \quad (1.2)$$

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)



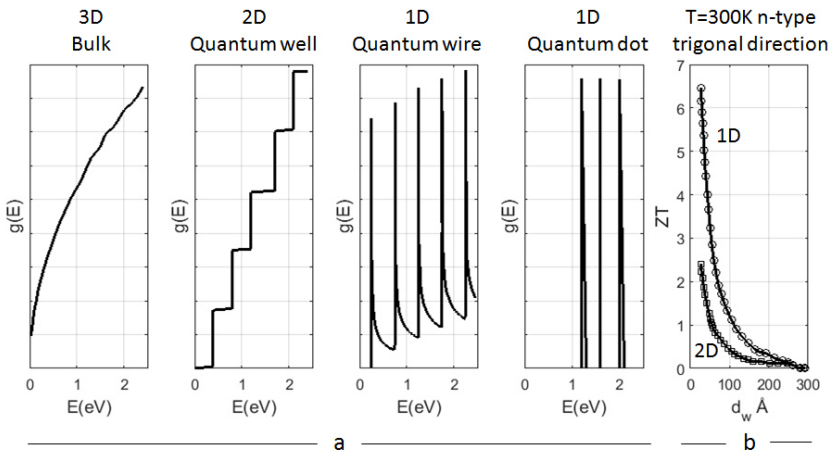
Eine Optimierung thermoelektrischer Materialien stellt aufgrund der physikalischen Kopplung³ der drei Größen S_{np} , σ und κ eine enorme Herausforderung für die Materialforschung dar (vgl. **Abbildung 1.2**) (Dresselhaus 2009, Koga 1997). Die Problemstellungen sind sehr vielschichtig und beschäftigen zugleich Syntheschemiker, 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-Franz'sches 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).

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

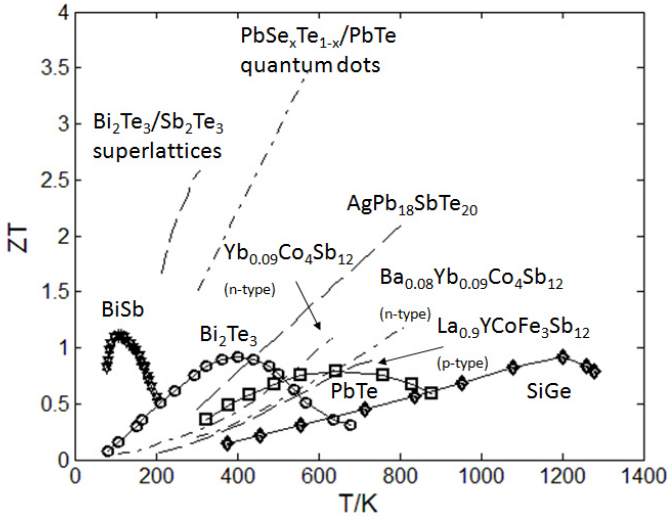
Abbildung 1.3 a) Zustandsdichten von Elektronen als Funktion der Ladungsträgerenergie in Halbleitern (Bhushman 2010)
 b) die Auswirkung auf ZT (Dresselhaus 1999)



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 Materialien

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

Abbildung 1.4 Thermoelektrische Materialien (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 Heißeittemperatur 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“ (Fahrndynamik) 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 %. (Brüninghaus 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 begeben, 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 Wärmerecuperation (berichtet)	2%	NEFZ	(Liebl 2009)
thermoelektrische Wärmerecuperation (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 Energierückgewinnung 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.

2 Physikalische Grundlagen

Die folgenden Unterkapitel behandeln die für das Verständnis der Funktionsweise thermoelektrischer Generatoren, bzw. Generator-Systeme benötigten Grundlagen. Neben der Beschreibung thermoelektrischer Effekte werden detailliert die Wärmetransport-Mechanismen betrachtet. Damit soll sich einerseits das Verständnis für die Notwendigkeit verschiedener aktueller Materialforschungen und andererseits eine Abschätzung für den Wirkungsgrad von thermoelektrischen Systemen für Anwender ergeben.

2.1 Thermoelektrische Effekte

Der erste thermoelektrische Effekt wurde 1821 vom Estnisch-Deutschen Physiker T. J. Seebeck⁴ entdeckt und beschreibt die aufgrund von Temperaturdifferenz an zwei unterschiedlichen, elektrisch verbundenen elektrischen Leitern entstehende elektromagnetische Wechselwirkung⁵ (elektromagnetische Kraft EMK) (Velmre 2007). Etwa dreizehn Jahre später entdeckte der französische Naturwissenschaftler J. Peltier⁶ einen zweiten thermoelektrischen Effekt, welcher auch nach ihm benannt wurde. Der Peltier-Effekt beschreibt den Transport von Wärme in einem thermoelektrischen Materialpaar, welches elektrischem Stromfluss ausgesetzt wird. Den Zusammenhang zwischen dem Seebeck- und dem Peltier-Effekt hatte der britische Physiker W. Thomson⁷ in 1855 hergeleitet. Der Thomson-Effekt beschreibt aus thermodynamischer Sicht die Beziehung zwischen Seebeck- und Peltier-Koeffizienten (Goldsmid 2010).

2.1.1 Der Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt beschreibt das Auftreten eines stationären elektrischen Stroms I_{th} in einer geschlossenen Leiterschleife, bestehend aus einem elektrisch leitenden Materialpaar, welches zwischen den Verbindungsstellen einem Temperaturgradient

⁴ Thomas Johann Seebeck (*1770, †1831).

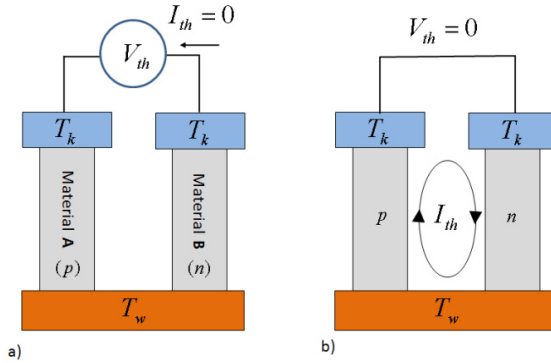
⁵ Alessandro Volta (*1745, †1827), italienischer Physiker, einer der Begründer der Elektrizitätslehre) entdeckte bereits 1794 Wechselwirkungen zwischen Wärme und Elektrizität (Anatyчук 1994). Unklar ist allerdings ob Volta die Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannung (hervorgehoben durch unterschiedliche chemische Potentiale der Materialien) oder die Thermodiffusionsspannung (der eigentlichen Ursache für Thermoelektrizität) beobachtete (vgl. 2.1.1).

⁶ Jean Charles Peltier (*1785, †1845).

⁷ William Thomson, (Lord Kelvin), 1. Baron Kelvin (*1824, †1907).

ausgesetzt ist (Walmsley 1911).

Abbildung 2.1 Seebeck-Effekt im offenen und geschlossenen Stromkreis



Der elektrische Stromfluss ruft aufgrund der Verschiebung elektrischer Ladungsträger (Thermoeffusion) ein elektrisches Feld in einem Leiterpaar hervor (vgl. **Abbildung 2.1b**). Wird einer der Leiter aufgetrennt, so kann eine Thermospannung U_{th} im stromlosen Fall ($I_{th}=0$) direkt gemessen werden (vgl. **Abbildung 2.1a**). Der Seebeck-Koeffizient S_{AB} bestimmt die Höhe der am offenen Ende einer Thermoschleife bei gegebener Temperaturdifferenz entstehenden elektrischen Spannung.

Das elektrische Strom- und Spannungsverhalten wird durch das Ohmsche Gesetz ($j=\sigma \cdot E$) beschrieben, welches homogene elektrische Leiter bei konstanter Temperatur voraussetzt⁸. Sollen thermoelektrische und thermodynamische Materialeigenschaften mitberücksichtigt werden, muss der Ausdruck für die im Leiter erzeugte elektrische Feldstärke erweitert werden⁹ (Pelster 2005):

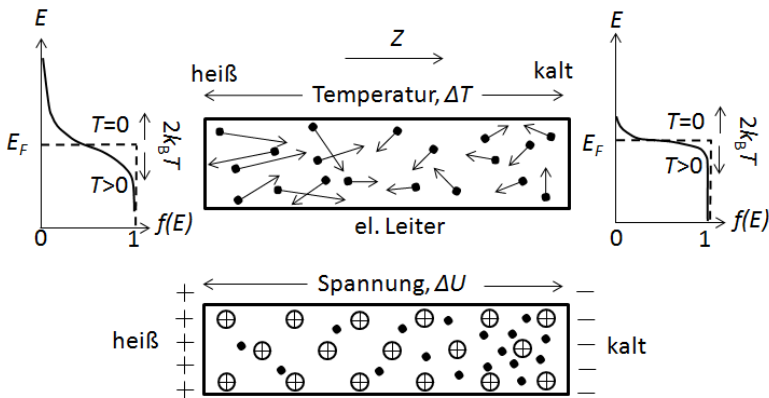
$$E = \frac{j}{\sigma} + S \cdot \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{e} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial z} \tag{2.4}$$

⁸ Die allgemein bekannte Form $I=U/R$, wird jedoch hier wegen nachfolgender Herleitung mit Hilfe der Stromdichte $j/(A/m^2)$, der elektrischen Feldstärke $E/(V/m)$ und der elektrischen Leitfähigkeit des Materials $\sigma/(\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$ ausgedrückt.

⁹ z beschreibt hier die Ortskoordinate in Richtung der mittleren Geschwindigkeit der Ladungsträger (vgl. **Abbildung 2.2**). T/K steht für die absolute Temperatur, $e=1,6021765 \cdot 10^{-19}C$ ist der Betrag der Elementarladung, $\mu/(W \cdot s)$ steht für das chemische Potential des Leiters und $S/(V/K)$ beschreibt den Seebeck-Koeffizienten.

Der erste Term der Gleichung (2.4) beschreibt den Grund für die elektrische Spannung, welche in einem stromdurchflossenen Leiter mit endlicher elektrischer Leitfähigkeit entsteht. Im lastfreien Fall ($I_{th}=0$, unterbrochener Stromkreis) ist dieser Term gleich Null (vgl. **Abbildung 2.1a**). Der zweite Term beschreibt die Ursache für die Thermodiffusionsspannung U_{th} welche aufgrund des Seebeck-Effekts entsteht. Der letzte Term zeigt die „innere“ elektrische Feldstärke, die infolge der Materialpaarung und damit einhergehender Unterschiede der chemischen Potentiale der verwendeten Materialien entsteht (Ursache für die Kontaktspannung U_k).

Abbildung 2.2 Makroskopische Transportvorgänge in einem elektrischen Leiter. Temperaturgradient entlang des Leiters verursacht eine Differenz des elektrischen Potentials nach (Pelster 2005 und Kasap 2001)



Mit Hilfe des klassischen Elektronengas-Modells können die makroskopischen Energietransportvorgänge veranschaulicht werden. Ein elektrischer Leiter (oder Halbleiter) wird an einem Ende erwärmt und am anderen gekühlt (vgl. **Abbildung 2.2**). Die Majoritätsladungsträger an der heißen Stelle des Materials besitzen eine höhere Energie und damit eine höhere (mittlere) Geschwindigkeit als die an der kalten Seite. Als Konsequenz wandern (diffundieren) die freien Ladungsträger zur energetisch niedrigeren, kalten Seite des Materials und hinterlassen dabei die festen, invers geladenen Ladungsträger. Die dadurch aufgebaute elektrische Feldstärke verhindert schließlich eine weitere Bewegung freier Ladungsträger. Im stationären thermischen Zustand „versammeln sich“ also die Majoritätsladungsträger an der kalten Seite des Materials (Kasap 2001). Die Richtung des elektrischen Feldes im p-Halbleiter

(Löcherleitung: $q=+e \rightarrow S>0$) ist dabei der im n-Halbleiter ($q=-e \rightarrow S<0$) entgegengesetzt (vgl. (2.6)).

Der Seebeck-Koeffizient S und das chemische Potential μ sind von der Fermienergie E_f und von der thermischen Energie $k_B \cdot T$ abhängig¹⁰, wobei μ die mittlere Energie der zum Ladungstransport beitragenden Ladungsträger ausdrückt (Pelster 2005). Die Ladungsträger im Bereich $\mu \pm k_B \cdot T$ (nahe der Fermikante) können also in freie Zustände übergehen und zum Ladungstransport beitragen (vgl. **Abbildung 2.2**). Der Seebeck-Koeffizient ist eine materialspezifische Größe, welche allein die Entstehung der Thermodiffusionsspannung (Seebeck-Spannung) in einem Thermopaar (Thermoschleife) beschreibt.

Der (absolute) integrale Seebeck-Koeffizient kann in Abhängigkeit von Temperatur und Fermienergie wie folgt abgeschätzt werden¹¹ (Kasap 2001, Bernhard 2004, Strasser 2004):

$$S(T) \approx \frac{\pi^2 \cdot k_B^2 \cdot T}{3 \cdot e \cdot F_f} \cdot C \quad (2.5)$$

Eine an offenen Enden einer Thermoschleife, bestehend aus zwei Materialhälften A und B, anliegende Thermospannung U_{th} kann unter Berücksichtigung von (2.4) nach der Kirchhoffschen Maschenregel¹² aus Teilspannungen des Systems folgendermaßen berechnet werden (vgl. **Abbildung 2.3a**):

$$\text{Allgemein gilt: } U = \int_{z_1}^{z_2} E dz$$

¹⁰ Die Fermi-Dirac-Verteilung $f(E)$ beschreibt die Besetzungswahrscheinlichkeit elektronischer Zustände, für Ladungsträger mit der Energie E . Die Besetzungswahrscheinlichkeit oberhalb und unterhalb der Fermikante ($T=0K$) liegt bei 50 % (Dobrincki 2003). $k_B=1,3806488 \cdot 10^{-23}$ J/K ist die Boltzmann-Konstante.

¹¹ Dabei signalisiert "absolut" einen homogenen Leiter und nicht ein Leiterpaar, „integrale“ verdeutlicht die Abhängigkeit von der mittleren kinetischen Energie der Ladungsträger (thermischer Mittelwert). C ist eine numerische Korrekturkonstante, welche Vereinfachungen des klassischen Elektronengasmodells kompensieren soll (Bernhard 2004). Das ideale Elektronengasmodell berücksichtigt z.B. nicht die Stoßprozesse der Ladungsträger und deren Streuung bedingt durch strukturelle Defekte, bzw. durch Überlappung von Energiebändern entstehende Prozesse (Kasap 2001).

¹² Die Kirchhoffschen Regeln werden zur Analyse elektrischer Netzwerke eingesetzt. Sie sind benannt nach ihrem Erfinder, dem Deutschen Physiker G. R. Kirchhoff (*1824; † 1887).

$$\begin{aligned}
 U_{thA}^{warm \rightarrow kalt} &= \int_{T_1}^{T_2} S_A dT - \frac{1}{e} \int_{z_w}^{z_k} d\mu = S_A \cdot (T_2 - T_1) - \frac{1}{e} \cdot [\mu_A(T_2) - \mu_A(T_1)] \\
 U_{thB}^{kalt \rightarrow warm} &= - \int_{T_1}^{T_2} S_B dT + \frac{1}{e} \int_{z_w}^{z_k} d\mu = -S_B \cdot (T_2 - T_1) + \frac{1}{e} \cdot [\mu_B(T_2) - \mu_B(T_1)] \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

Geht man davon aus, dass die Temperaturunterschiede an den Übergängen von Material A zum Material B und umgekehrt vernachlässigbar klein sind, spielt die Temperaturabhängigkeit der Kontaktspannungen keine Rolle mehr (Rowe 1995). Bei gleicher Temperatur haben sie den gleichen Betrag und sind entlang der gesamten Thermoschleife entgegengesetzt. Damit heben sie sich gegenseitig auf (vgl. **Abbildung 2.3a**). Die gesamte Thermospannung des Thermopaars beträgt dann:

$$U_{th} = (S_A - S_B) \cdot (T_2 - T_1) = S_{AB} \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

Der differentielle Seebeck-Koeffizient des Thermopaars S_{AB} ist die Differenz aus beiden absoluten Koeffizienten der jeweiligen Materialien (vgl. (2.7)). Er kann mit Hilfe des bereits erwähnten Elektronengas-Modells folgendermaßen abgeschätzt werden (vgl. (2.5)) (Pelster 2005, Prytz 2007, Kyarad 2007):

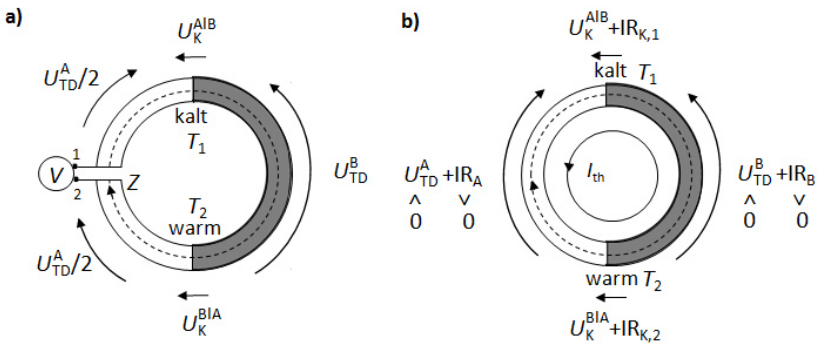
$$S_{AB}(T) \approx \frac{\pi^2 \cdot k_B^2 \cdot T}{6 \cdot e} \cdot \left(\frac{C_A}{F_{fA}} - \frac{C_B}{F_{fB}} \right) \quad (2.8)$$

Im geschlossenen Stromkreis fließt aufgrund der gesamten elektrischen Leitfähigkeit des Materialpaars und der Thermospannung der elektrische Strom I_{th} (vgl. **Abbildung 2.3b**, bzw. **Abbildung 2.1b**).

Aus der Bedingung $\sum U_i + I \cdot R_i = 0$ und unter der Annahme, dass das Thermopaar symmetrisch aufgebaut ist, die Längen $l_{A,B}$ und Querschnitte $A_{A,B}$ der Leiter oder der Thermoschenkel also gleich sind, wird der Thermostrom berechnet zu¹³:

$$I_{th} = - \frac{1}{\left(\frac{1}{\sigma_A} + \frac{1}{\sigma_B} \right) \cdot \frac{l}{A}} \cdot U_{th} = - \frac{1}{R_i} \cdot U_{th} \tag{2.9}$$

Abbildung 2.3 a) Teilspannungen an einem Thermopaar b) Kurzschlussstrom bei geschlossener Thermoschleife (Pelster 2005)



2.1.2 Der Peltier-Effekt

Der Peltier-Effekt beschreibt aus phänomenologischer Sicht die Umkehrung des Seebeck-Effekts. Wird also durch ein geschlossenes Thermopaar (Material A, B) elektrischer Strom getrieben, entsteht in Abhängigkeit von der Stromrichtung ein Wärmetransport von einer Verbindungsstelle beider Materialien zur anderen. Gegenüber dem stromlosen isothermen Zustand bildet sich jetzt ein Temperaturgradient entlang des Thermopaares (vgl. **Abbildung 2.4**).

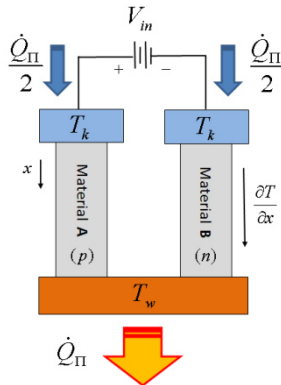
¹³ R_i steht hier für den gesamten Innenwiderstand des Thermopaares.

Der generierte Wärmestrom \dot{Q}_Π ist dem elektrischen Strom I proportional und definiert als¹⁴ (Bernhard 2004):

$$\dot{Q}_\Pi = (\Pi_A(T) - \Pi_B(T)) \cdot I = \Pi_{AB} \cdot I \tag{2.10}$$

Der Peltier-Koeffizient ist ebenso wie der Seebeck-Koeffizient eine materialspezifische Größe und kann im einfachsten Fall mit Hilfe des Elektronengas-Modells beschrieben werden.

Abbildung 2.4 Peltier-Effekt in stromdurchflossenem Thermopaar



Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung wird in einem Leiter (oder Halbleiter) ein Ladungsungleichgewicht aufrecht erhalten. Die freien Ladungsträger werden also in einen höheren Energiezustand getrieben und absorbieren dabei an einem Ende des Materials thermische Energie aus der Umgebung. Diese Wärmemenge wird zum anderen Ende des Leiters transportiert und, da die Ladungsträger dort in den energetisch niedrigeren Zustand zurückfallen, wieder an die Umgebung abgegeben (elektrische Wärmepumpe).

Unter der Annahme, dass bei der Temperatur T jeder einzelne Ladungsträger im Mittel die Energie $3/2 \cdot k_B \cdot T$ trägt, lässt sich der vom elektrischen Strom getriebener

¹⁴ Analog zum Seebeck-Koeffizienten unterscheidet man zwischen absoluten, integralen und differentiellen Peltier-Koeffizienten (Π_A , Π_B und Π_{AB}). Wie später gezeigt wird, stehen beide Größen, Peltier- und Seebeck-Koeffizient, in direkter Beziehung zueinander (vgl. 2.1.3).

Wärmestrom berechnen zu (Bredl 2012):

$$\dot{Q}_{\Pi} = \frac{3 \cdot k_B \cdot T}{2 \cdot e} \cdot I \quad (2.11)$$

Der Peltier-Koeffizient lässt sich dann in Abhängigkeit von der Temperatur folgendermaßen ausdrücken (Bredl 2012):

$$\Pi_{A,B}(T) = \frac{\dot{Q}_{\Pi}}{I} = \frac{3 \cdot k_B}{2 \cdot (\pm e)} \cdot T \quad (2.12)$$

Der Peltier-Koeffizient beschreibt den reversiblen Transport einer Wärmemenge, wenn eine elektrische Ladung die Verbindungsstelle zwischen den Materialien (A, B) passiert. Seine Einheit ist demnach:

$$\left[\Pi_{A,B} \right] = \frac{W_S}{A_S} = \frac{W}{A}$$

Ebenso wie der Seebeck-Effekt beruht der Peltier-Effekt nicht auf der Differenz chemischer Potentiale unterschiedlicher Materialverbindungen (Bernhard 2004, Rowe 1995).

2.1.3 Der Thomson-Effekt

Der Thomson-Effekt beschreibt den Wärmetransport in einem stromdurchflossenen Leiter in Abhängigkeit der Flussrichtung des elektrischen Stroms (Bernhard 2004). Die aufgrund dieses Effekts entstehende Wärmeleistung \dot{Q}_{τ} wird mit dem Thomson-Koeffizienten τ skaliert:

$$\dot{Q}_{\tau} = \pm \tau \cdot I \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.13)$$

Der aufgrund des Thomson-Effekts hervorgerufene Wärmestrom \dot{Q}_{τ} beträgt bei Metallen etwa 1 % des Peltier-Stroms \dot{Q}_{Π} und wird bei Berechnungen für praktische Anwendungen oft vernachlässigt. Der Thomson-Koeffizient τ steht allerdings in direkter Beziehung zu den Seebeck- und Peltier-Koeffizienten und verbindet somit theoretisch diese zwei thermoelektrische Phänomene folgendermaßen (Bernhard 2004, Rowe 1995, Goldsmid

2010, Strasser 2004):

$$\frac{\partial S_{AB}}{\partial T} = \frac{\tau_A - \tau_B}{T} \rightarrow S_{AB} = \int_0^{T_1} \frac{\tau_A}{T} dT - \int_0^{T_1} \frac{\tau_B}{T} dT \quad (2.14)$$

$$\Pi_{AB} = S_{AB} \cdot T \quad (2.15)$$

Der Peltier-Koeffizient wird stets über den Seebeck-Koeffizienten ausgedrückt, da dieser einfacher zu vermessen ist (Tritt 2001, Garrido 2012).

2.2 Wärmeübertragung

Als Wärme bezeichnet man den Energietransport, welcher nur aufgrund eines Temperaturunterschieds zwischen dem System und seiner Umgebung stattfindet. Die Wärme fließt dabei in Richtung der abfallenden Temperatur und kann durch Wärmeleitung, durch Konvektion oder Wärmestrahlung übertragen werden (Baehr 2008, Aktins 2008).

Sowohl die thermoelektrischen Kühler (TECs) als auch die thermoelektrischen Generatoren (TEGs) bestehen in der Regel aus einer Anordnung mehrerer Thermopaare auf Halbleiterbasis, welche zunächst thermisch wie auch elektrisch beliebig verschaltet werden können. Sie stellen geometrische Gebilde dar, in welchen sowohl unterschiedliche Materialien mit ihren spezifischen thermischen Eigenschaften aufeinander geschichtet sind, als auch mit Gas gefüllte Freiräume entstehen (vgl. 3.1). Die Wärmeübertragung in einem thermoelektrischen Modul ist demnach immer eine Mischung der drei möglichen Transportmechanismen. Wie aus der Beschreibung thermoelektrischer Effekte erkennbar, hängt z.B. der Transport der Ladungsträger unmittelbar mit der elektronischen Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien zusammen. In den folgenden Unterkapiteln sollen deshalb die Vorgänge bei der Wärmeübertragung in Festkörpern und in Fluiden näher beleuchtet werden. Dabei sollen die Betrachtungen stets auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Geometrien und Materialeigenschaften thermoelektrischer Module bezogen werden.

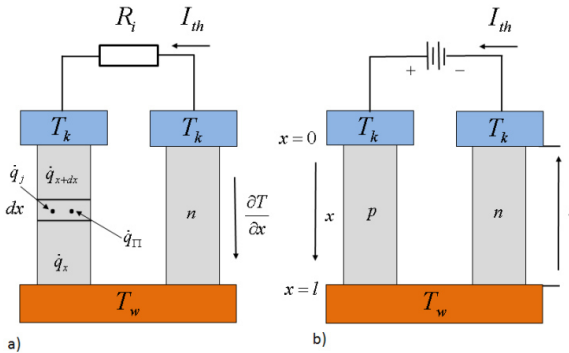
2.2.1 Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

Klassische Wärmeleitung ist definiert als Energietransport zwischen benachbarten Atomen eines Festkörpers bedingt durch eine Temperaturdifferenz (Holman 1990, Baehr

2008). Phänomenologisch ist dieser Prozess mit wenigen Größen wie der Temperatur T , der Wärmestromdichte \dot{q} sowie der Wärmeleitfähigkeit des Materials oder Mediums κ nach Fourier beschrieben¹⁵. Geht man von stationären Temperaturfeldern aus, so folgt (Glück 1990):

$$\dot{q} = -\kappa(T) \cdot \text{grad}(T) = -\kappa(T) \cdot \left[\frac{\partial T}{\partial x} \cdot e_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot e_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot e_z \right] \tag{2.16}$$

Abbildung 2.5 Wärmetransport bedingt durch Wärmeleitung in einem Thermopaar



Der Temperaturgradient $\text{grad}(T)$ steht senkrecht zu isothermen Flächen und zeigt in Richtung des stärksten Temperaturanstiegs, wobei das Minuszeichen den Wärmetransport von der heißen zur kalten Seite des Systems signalisiert. Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit ist je nach Materialbeschaffenheit stark oder weniger stark ausgeprägt (Snyder 2008).

Thermoelektrische Module weisen oft eine dreifache Aufeinanderfolge von Metall-Halbleiter-Metall Verbindungen auf. Im Generator- sowie im Wärmepumpe-Betrieb werden durch das Material sowohl ein von außen eingehender Wärmestrom \dot{q}_x als auch aufgrund des elektrischen Stromflusses entstehenden Anteile der Jouleschen¹⁶ und

¹⁵ J. B. J. Fourier (*1768, †1830) französischer Mathematiker und Physiker.

¹⁶ Das Joulesche Gesetz besagt, dass sich die Wärmeleistung eines stromdurchflossenen Leiters linear zum Leiterwiderstand R und quadratisch zum Strom I verhält. $P_J = R \cdot I^2$, benannt nach dem britischen Physiker J. P. Joule (*1818, †1889).

Peltier-Wärmeströme $-\dot{q}_j$ und \dot{q}_Π geleitet (Garrido 2012). Anhand des klassischen Modells zur Beschreibung der Wärmeleitung entlang einer Ortskoordinate im stationären Temperaturfeld mit Wärmequellen lässt sich der Wärmetransportvorgang in einem Thermoschenkel veranschaulichen (vgl. **Abbildung 2.5**). Die gesamte Systemwärmebilanz (2.17) besagt, dass die Summe aus der transportierten Wärme vor dem Element dx und der Wärmeanteile, welche in dem Element dx durch Jouleschen- oder Peltier-Effekte entstehen oder transportiert werden, gleich dem sein soll, was nach dem Element dx an Wärme abtransportiert wird bzw. zu welcher Temperaturänderung dieser Vorgang führt (Heikes 1961, Böckh 2011).

$$\dot{q}_x + \dot{q}_j + \dot{q}_\Pi = \dot{q}_{x+dx} + \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

Die einzelnen Summanden bedeuten hierbei:

- der von der kalten Systemseite eintretender Wärmeanteil:

$$\dot{q}_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}$$

- die durch den elektrischen Stromfluss erzeugte Wärme:

$$\dot{q}_j = \frac{j^2}{\sigma}$$

- der durch den Peltier-Effekt bedingte Wärmetransport:

$$\dot{q}_\Pi = S_{AB}(T) \cdot j \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

- die das Element dx verlassene Wärme:

$$\dot{q}_{x+dx} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx}$$

Der Summand \dot{q}_{x+dx} kann mit Hilfe der Taylor-Reihe angenähert werden. In linearer Näherung ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{j^2}{\sigma} dx + S_{AB}(T) \cdot j \cdot \frac{\partial T}{\partial x} dx &= -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \left(-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) dx + \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} dx \\
 \Rightarrow \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{j^2}{\sigma} + S_{AB}(T) \cdot j \cdot \frac{\partial T}{\partial x} &= \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Mit konstanten Stoffgrößen und nach Einführung der Größe α für die Temperaturleitfähigkeit des verwendeten Materials lässt sich der Wärmetransport in einem Thermoschenkel ohne Berücksichtigung der Konvektion und Wärmestrahlung folgendermaßen beschreiben (Helmers 1998, González-Mendizabal 1998):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{S_{AB}(T) \cdot j}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{j^2 \cdot \rho_{el}}{\kappa} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{\alpha = \frac{\kappa}{\rho \cdot c}; \rho_{el} = \frac{1}{\sigma}} \tag{2.19}$$

Unter der Annahme, dass für den Startpunkt $t=0$ die Temperatur der kalten Seite $T=T_k$ ($x=0$) und die der warmen Seite des Thermopaars $T=T_w$ ($x=l$) wären, würde der Anteil der transportierten Wärme an der kalten Systemseite bei $x=0$ auf die Peltier-Wärme fallen, da (vgl. **Abbildung 2.5**) (Yang 2005):

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = S_{AB}(T) \cdot j \cdot T$$

Hierbei setzt man voraus, dass die Thermoschenkel die gleiche Geometrie besitzen und ihre Querschnitte sich nicht entlang der x -Koordinate ändern. Bei $x=l$, an der warmen Seite des Systems, käme der Wärmeanteil dazu, welcher durch die Wärmeleitung und aufgrund des Temperaturunterschieds ΔT hervorgerufen werden würde (Heikes 1961).

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \kappa \cdot (T_w - T_k) = \kappa \cdot \Delta T$$

Die Joulesche Wärme würde sich jeweils zur Hälfte ihres Betrages, abhängig vom Betriebsmodus (Generator oder Wärmepumpe), positiv oder negativ auf die Wärmebilanz des Systems auswirken. Der allgemeine, bekannte Ausdruck zur

Beschreibung der Wärmeströme in den thermoelektrischen Modulen würde dann für den stationären Fall lauten:

$$\dot{Q}_{ges} = S_{AB}(T) \cdot T_{k,w} \cdot I_{th} \pm K \cdot \Delta T \pm \frac{1}{2} \cdot I_{th}^2 \cdot R_i \Big|_{K=\kappa \cdot \frac{A}{l}} \quad (2.20)$$

Hier steht R_i für den Innenwiderstand des thermoelektrischen Moduls (oder eines Thermopaars), K beschreibt den Wärmeleitwert des Materials und I_{th} die Höhe des elektrischen Stroms (vgl. (2.9)).

Je nach Beschaffenheit des Materials wird die Wärme phononisch (Gitterschwingungen), elektronisch (Ladungstransport) oder durch „innere“ thermische Strahlung übertragen. Letzteres tritt bei Halbleitern auf und ist abhängig vom energetischen Abstand zwischen den Valenz- und Leitungsbändern des Materials, den Wechselwirkungen von freien Ladungsträgern und von der Absorption von Phononen im infraroten Bereich. Die thermische Leitfähigkeit des verwendeten Materials müsste demnach folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\kappa_{ges} = \kappa_{el} + \kappa_{ph} + \kappa_s \quad (2.21)$$

Die Wärmeleitfähigkeit, welche auf dem Transport von Ladungsträgern beruht, hängt dem Wiedemann-Franz-Gesetz¹⁷ zufolge mit der Lorenzzahl L und mit der elektrischen Leitfähigkeit des Materials σ zusammen. Wobei

$$\kappa_{el} = L \cdot \sigma \cdot T \quad \text{und}$$

$$L = \frac{1}{3} \pi^2 \frac{k_B^2}{e^2} \quad \text{für entartete Halbleiter und}$$

$$L = \frac{k_B^2}{e^2} \quad \text{für nicht entartete Halbleiter steht.}$$

Bei den Halbleitermaterialien für thermoelektrische Anwendungen haben κ_{el} und κ_{ph} etwa die gleiche Größenordnung, weshalb hier keiner der Summanden für κ_{ges}

¹⁷ Ein empirisches Gesetz, das die Abhängigkeiten zwischen den elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten des Materials beschreibt. Benannt nach den deutschen Physikern G. H. Wiedemann (*1826, †1899) und R. Franz (*1826, †1902)

vernachlässigt werden kann (Stiewe 2009). Der Einfluss von Wärmetransport durch Strahlung innerhalb des thermoelektrischen Materials gewinnt mit zunehmender Temperatur an Bedeutung, weil die Strahlungsleistung mit T^4 skaliert. Quantitative Messungen oder Simulationen existieren allerdings bislang noch nicht. Bekannt ist hingegen, dass Strahlungswärmetransport im Festkörper eine wichtige Rolle spielt und etwa bei Wärmedämmstoffen dominieren kann (Anderson 1973, Fricke 1988).

2.2.2 Wärmeübertragung durch Strahlung

Aufgrund der nicht verschwindenden inneren Energie eines Materials emittiert jeder Körper Wärmeenergie in Form von elektromagnetischen Wellen im mittleren Wellenlängenbereich (Grigul 1988). Mit Hilfe dieser Temperatur- oder Wärmestrahlung kann thermische Energie zwischen mehreren Körpern materiellos übertragen werden.

Die Wärmestrahlung kann absorbiert (ε), transmittiert (τ) oder reflektiert (r) werden. Dabei gilt:

$$r + \varepsilon + \tau = 1 \quad (2.22)$$

Der Emissionskoeffizient oder der Emissionsgrad ε steht hier für die Eigenschaft des Materials, Wärmestrahlung sowohl zu emittieren als auch diese zu absorbieren. Nach dem Gesetz von Kirchhoff¹⁸ emittiert ein Körper mit $\varepsilon=1$ in jede Richtung des Halbraums das Maximum an Strahlungsenergie (schwarzer Strahler). Zugleich besagt das Gesetz, dass ein guter Temperaturstrahler gleichzeitig ein guter Absorber von Wärmestrahlung ist (Baehr 2008).

Das sogenannte T^4 -Gesetz¹⁹ beschreibt die abgestrahlte Wärme eines Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur. Demnach ist die maximal mögliche Stromdichte der von der Oberfläche eines Körpers abgestrahlten Temperaturstrahlung gegeben durch²⁰:

$$\dot{q}_s = \sigma_{SB} \cdot T^4 \quad (2.23)$$

¹⁸ Benannt wurde das Gesetz nach G. R. Kirchhoff (*1824, †1887). Es stellt thermodynamisch einen Zusammenhang zwischen dem Emissions- und Absorptionsvermögen eines schwarzen Körpers dar.

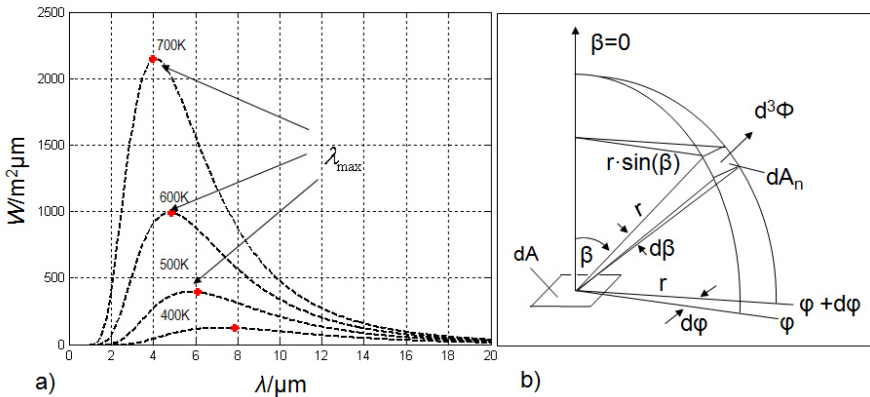
¹⁹ Zunächst experimentell von J. Stefan (*1835, †1893) aufgestellt, später von L. Boltzmann (*1844, †1906) mit Hilfe der elektromagnetischen Strahlungstheorie und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik beschrieben [Baehr 2008].

²⁰ Mit $\sigma_{SB}=5,6704 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ die universelle Stefan-Boltzmann-Konstante.

Real vorkommende Materialien sind keine schwarze Körper und haben deshalb einen Emissionsgrad $\varepsilon < 1$. Ebenso sind die Reflexions- bzw. die Transmissionsgrade der in Praxis verwendeten Materialien größer Null.

Die Beschaffenheit der Oberfläche spielt bei der Reflektion von Strahlung eine Rolle. Die nicht reflektierte Strahlung dringt in den Körper ein und wird darin absorbiert (Erhöhung der inneren Energie, die Temperatur steigt) oder zum Teil hindurch gelassen (Transmission, kein Beitrag zur Erhöhung der inneren Energie). Die Stärke und Beschaffenheit des Materials sind bei Gewichtung der absorbierten bzw. der durchgelassenen Strahlungsanteile entscheidend. So dürfte thermische Bestrahlung von dünnem Glas (oder auch einer Halbleiterscheibe) oder polierten Metallen aus zwei unterschiedlichen Gründen zu keinem großen Temperaturanstieg des bestrahlten Körpers führen. Im ersten Fall ginge ein großer Teil der Strahlung durch das Material hindurch und im zweiten Fall würde sie zum größten Teil reflektiert werden. Die kleinste Dämpfung (größte Transmission) erfährt thermische Strahlung in gasgefüllten Räumen, im Vakuum ist die Dämpfung nahe Null.

Abbildung 2.6 a) Spektrale spezifische Ausstrahlung $M_\lambda(\lambda, T)$ und b) ihre Winkelabhängigkeit (Baehr 2008)



Die Temperaturstrahlung einer Quelle breitet sich in alle Richtungen des dreidimensionalen Raums aus (vgl. **Abbildung 2.6b**). Die Strahlungsintensität bzw. ihre Dichte ist vom Raumwinkel, von der Wellenlänge oder Frequenz und von der Temperatur abhängig. Die durch Strahlung abgegebene Wärmestromdichte wird auch

spezifische Ausstrahlung M genannt und beschreibt den pro Flächenelement dA ausgestrahlten Wärmestrom \dot{q}_s . Die Temperatur- und Wellenlängen- bzw. Frequenzabhängigkeit wird mit der Verteilungsfunktion für *spektrale spezifische Ausstrahlung* $M_\lambda(\lambda, T)$ nach dem Planckschen Strahlungsgesetz berücksichtigt²¹ (vgl. **Abbildung 2.6a**) (Baehr 2008, Schuster 2004, Her05).

$$M_f(f, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot f^3}{c^2 \cdot \exp\left(\frac{h \cdot f}{k_B \cdot T}\right) - 1} \quad (2.24)$$

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right) - 1} \quad (2.25)$$

$$\dot{q}_s = M(\lambda, T) = \frac{d\Phi(\lambda, T)}{dA} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(\lambda, T) d\lambda \quad (2.26)$$

Die maximale Wärmeleistung wird stets bei der Wellenlänge λ_{\max} bei gegebener Temperatur ausgestrahlt:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898K \cdot \mu m}{T} \quad (2.27)$$

Analoge Zusammenhänge gelten sowohl für strahlende als auch für bestrahlte Körper (Baehr 2008). Ausgehend von einer homogenen Temperaturverteilung emittiert ein Körper mit dem Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda, T)$ und der Fläche A in Abhängigkeit von dessen Temperatur einen Wärmestrom von²²:

$$\dot{Q}_s = \int_A \varepsilon(\lambda, T) \cdot \dot{q}_s dA = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T^4 \quad (2.28)$$

²¹ Max Planck (*1858, †1947) deutscher theoretischer Physiker, Nobelpreisträger und Pionier in der Quantenphysik. Mit Planckschen Wirkungsquantum $h=6,62609657 \cdot 10^{-34} \text{ J*s}$, Lichtgeschwindigkeit $c=299,792458 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ und die Boltzmann-Konstante $k_B=1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

²² Der allgemein bekannte Ausdruck $dQ/dt=A*\varepsilon*\sigma*T^4$ setzt die genaue Kenntnis der ε -Kennlinie des Materials oder eine relativ geringe betrachtete Temperaturspanne voraus.

Strahlungsgebundene Wärmeübertragung spielt in thermoelektrischen Modulen gerade bei Hochtemperaturmodulen (Heißseitentemperaturen 300-700°C) eine nicht zu vernachlässigende Rolle (Laube 2012, Ziolkowski 2010). Aufgrund von oft simpel gehaltener Geometrie von thermoelektrischen Modulen müssen klassische Modelle zur Beschreibung der Wärmeübertragung durch Strahlung hier nicht speziell angepasst werden, und sind detailliert in der Literatur beschrieben (Schuster 2004, Baehr 2008, Grigul 1988).

2.2.3 Konvektive Wärmeübertragung

Wird Wärme mittels einer Strömung transportiert, so spricht man von konvektiver Wärmeübertragung. Konvektion findet in Gasen und Fluiden statt und ist bei makroskopischer Betrachtung vom Wärmeenergie-Transport durch Wärmeleitung stets begleitet. Je nach Beschaffenheit und Ausbreitungsgeschwindigkeit des Fluids kann der eine oder andere Transportmechanismus überwiegen (Merker 1987).

Für technische Anwendungen ist oft der Wärmeübergang vom Festkörper in das wärmetransportierende Fluid von Bedeutung. Die Beziehung zwischen der Wärmestromdichte an einer Oberfläche (Wand), der Wandtemperatur und der Temperatur des Fluids in hinreichend großer Entfernung ist gegeben durch:

$$\dot{q}_k = \alpha_k \cdot (T_W - T_F) \quad (2.29)$$

Der Wärmestrom berechnet sich demnach zu:

$$\dot{Q}_k = \alpha_k \cdot (T_W - T_F) \cdot A \quad (2.30)$$

wobei α_k den örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten definiert und A für die Berührungsfläche Fluid/Festkörper steht. Betrachtet man den Wärmeübergang unmittelbar in Wandnähe (Wandabstand $y \rightarrow 0$, wobei x die Bewegungsrichtung des Fluids definiert), so wird hier die Wärme überwiegend durch die Wärmeleitung des Fluids transportiert. Der Wärmeübergang kann somit anhand der Temperatursteigung bzw. des Temperaturunterschieds zwischen der Wand und dem Fluid beschrieben werden, wobei λ für die Wärmeleitfähigkeit des Fluids steht (Baehr 2008) (vgl. 2.2.1).

$$\alpha_k = \frac{\dot{q}_k}{T_W - T_F} = -\lambda \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{T_W - T_F} \quad (2.31)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist somit von lokalen Temperatur- und Geschwindigkeitsfeldern abhängig und ist analytisch nur sehr aufwändig durch das Lösen von Kontinuitäts- bzw. Bewegungsdifferential-Gleichungen zu beschreiben²³. Nur in einfachen Fällen wie z.B. bei laminarer Rohrströmung oder bei längs angeströmten ebenen Platten lassen sich die Wärmeübergangskoeffizienten analytisch berechnen (Baehr 2008, Merker 1987, Glück 1990). In der Regel ist eine experimentelle Bestimmung von α_k zur Berechnung konvektiv übertragener Wärmeströme notwendig. Die Ähnlichkeitstheorie nach Nußelt²⁴ ermöglicht die Formulierung von Ähnlichkeitskriterien zur Lösung oben genannter Differentialgleichungen in Form von dimensionslosen Kennzahlen²⁵. Diese Kennzahlen bilden ein Ordnungssystem, nach welchem die Untersuchungsparameter komprimiert dargestellt die Übertragung von experimentell gewonnenen Erkenntnissen auf ähnliche Systeme erlauben (Glück 1990).

Bei der Untersuchung thermoelektrischer Generatoren oder Generatoranlagen spielt Konvektion eine entscheidende Rolle. Bei später beschriebenen messtechnischen Untersuchungen wird z.B. versucht, die konvektive Wärmeübertragung weitgehend zu unterdrücken, um so den parasitären Wärmetransport innerhalb der Messumgebung zu verhindern. Eine Abschätzung des parasitären Wärmetransports wird später bei der Beschreibung von Messtechnik durchgeführt (vgl. 4.3).

Beim Einsatz thermoelektrischer Generatoranlagen zur Energierückgewinnung aus Abgaswärme eines Verbrennungsmotors ist die Kenntnis vom Wärmeeintrag aus dem Abgas in den Generator wichtig, um so den Wirkungsgrad der Anlage abschätzen zu können. Die Auslegung von Abgaswärmetauschern hängt von der Leistung des Motors, vom eingesetzten Typen thermoelektrischer Generatoren (Temperaturbereich) und von der Verfügbarkeit des Bauraums im Fahrzeug ab. Weiterhin kann der Abgaswärmetauscher nur auf einen relativ schmalen Arbeitsbereich des Motors optimal ausgelegt werden (Auslegungspunkt). Da der reelle Betrieb des Motors stark von der Fahrweise abhängt, sind die Temperatur- und Geschwindigkeitsfelder im Abgasstrang als nicht stationär und die Strömung meist als turbulent anzunehmen. Ein kurzer Überblick über mögliche Auslegungen und Typen von Wärmetauschern für thermoelektrische Generatoranlagen bietet Kapitel 3.2.1. Die Berechnungen zum Wärmeeintrag aus dem Abgas in das TEG-System werden im Kapitel 5.3.2 detailliert beschrieben.

²³ Navier-Stokes-Gleichung, Kontinuitätsgleichung des Massentransports und die Energiegleichung (Glück, Merker 1987).

²⁴ W. Nußelt (*1882, †1957), deutscher Physiker und Begründer der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung.

²⁵ Nußelt-Zahl Nu ; Reynolds-Zahl Re ; Grashof-Zahl Gr ; Prandtl-Zahl Pr

3 Charakterisierung thermo-elektrischer Generatorsysteme

3.1 Aufbau und Funktionsweise thermoelektrischer Module

Thermoelektrische Module werden je nach ihrem praktischen Einsatz unterschiedlich ausgelegt und tragen entsprechend verschiedene Bezeichnungen. Wird ein thermoelektrisches Modul zu Kühlzecken verwendet, so spricht man von Peltier-Elementen oder thermoelektrischen Kühlern (TEC).

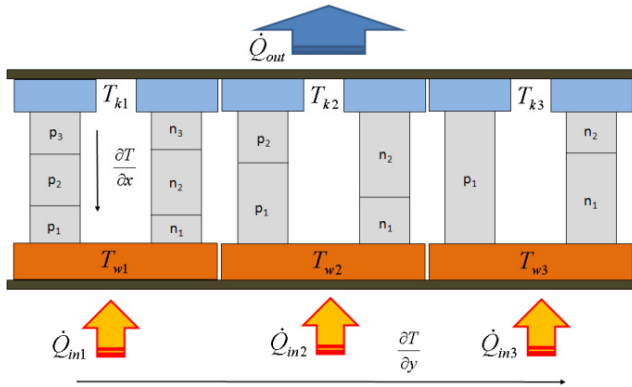
Bei Anwendungen zur Erzeugung elektrischer Energie aus Abwärme²⁶ werden die Module als thermoelektrische Generatoren (TEG) bezeichnet. Dabei richtet sich die Auslegung thermoelektrischer Materialien sowie der Materialien zur thermischen bzw. elektrischen Kontaktierung hauptsächlich nach der höchsten Temperatur und ihrer Dynamik der jeweiligen Anwendung. In der Regel werden solche Bauelemente nach einem Baukastenprinzip konzipiert und bestehen aus einer N -Zahl mäanderförmig gestaffelter Thermopaare, welche elektrisch in Reihe und thermisch parallel kontaktiert sind. Zur Erzielung höherer Temperaturdifferenzen zwischen der warmen und kalten Modulseite werden bei Kühlanwendungen mehrstufige TECs eingesetzt, sodass hier zusätzliche Thermopaarebenen thermisch in Reihe dazu geschaltet werden. Die kleinste diskrete Einheit eines thermoelektrischen Moduls ist das aus zwei Thermoschenkeln bestehende Thermopaar, welches sich geometrisch sowie materialspezifisch an die jeweilige Anwendung anpassen lässt (vgl. **Abbildung 2.1**).

Parameter wie elektrischer Innenwiderstand R_i , thermische Leitfähigkeit κ_{mod} oder die maximale elektrische Leistung P_{max} des Moduls können so mit der Anzahl der verbauten Thermopaare skaliert werden. Geometrische Eigenschaften der Thermoschenkel und ihre Packungsdichte bestimmen dabei die maximale Leistungsdichte bzw. das Masse-Leistungsverhältnis und die Wirtschaftlichkeit der Module (Mayer 2006, Oh 2010, Yazawa 2012). Die Anpassung von TEGs an den gewünschten Temperaturbereich wird durch Segmentierung der Thermoschenkel realisiert (vgl. **Abbildung 3.1**), indem unterschiedliche Materialien (vgl. **Abbildung 1.4**) in Richtung des Temperaturgradienten

²⁶ Abwärme wurde im Entwurf der Wärmenutzungsverordnung für Deutschland als „[...] die eine Anlage verlassene Wärme, ausgenommen der Wärme, deren Erzeugung der Zweckbestimmung der Anlage entspricht“, definiert (Pehnt 2010).

aufeinander geschichtet werden (Junior 2010, Caillat 2001).

Abbildung 3.1 Prinzip der Segmentierung von Thermoschenkeln



Bei der Segmentierung von Thermopaaren muss für die Kompatibilität verwendeter Materialien Sorge getragen werden. Nur Materialien mit identischem Kompatibilitätsfaktor s können zum Aufbau eines segmentierten Thermopaars verwendet werden, ohne dass die Effektivität einzelner Materialien gestört wird. Die Kompatibilität der Materialien ist beschrieben durch (Snyder 2003):

$$s = \frac{\left(1 + Z_{A,B}T\right)^{\frac{1}{2}} - 1}{S_{A,B} \cdot T} \tag{3.32}$$

Die Leistungsfähigkeit von TEGs und TECs wird mit der sogenannten thermoelektrischen Güte, einer dimensionslosen Kennzahl ZT beschrieben (vgl. 1.2, (1.1)). Unter Berücksichtigung des Wiedemann-Franz'schen Gesetzes kann die thermoelektrische Güte auch mit Hilfe der Lorenzzahl L beschrieben werden (vgl. 2.2.1), was den Zusammenhang zwischen den elektronischen und den phononischen Wärmeleitfähigkeiten κ_{el} und κ_{ph} des Materials verdeutlicht (siehe auch **Abbildung 1.2**) (Snyder 2008).

$$ZT = \frac{S_{AB}^2 \cdot \sigma}{\kappa_{el} + \kappa_{ph}} \cdot T = \frac{S_{AB}^2}{L \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{ph}}{\kappa_{el}}\right)} \Bigg|_{L = \frac{\kappa_{el}}{\sigma \cdot T}} \quad (3.33)$$

Hier sind die differentiellen Systemgrößen S_{AB} , κ und σ gemeint. Soll die thermoelektrische Güte aus materialspezifischen, absoluten integralen Größen berechnet werden, so wird dazu folgender Ausdruck eingesetzt (Heikes 1961):

$$ZT = \frac{(S_A - S_B)^2}{\left[(\rho_A \cdot \kappa_A)^{\frac{1}{2}} + (\rho_B \cdot \kappa_B)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \cdot T \Bigg|_{\rho = 1/\sigma} = \frac{(S_A - S_B)^2}{\left[\left(\frac{\kappa_A}{\sigma_A} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\kappa_B}{\sigma_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \cdot T \quad (3.34)$$

Sind die elektronischen und phononischen Wärmeleitfähigkeiten κ_{el} und κ_{ph} der Materialien bekannt, kann ZT folgendermaßen berechnet werden (vgl. (3.33)):

$$ZT = \frac{(S_A - S_B)^2 \cdot T}{\left[\left(\frac{\kappa_{elA} + \kappa_{phA}}{\sigma_A} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\kappa_{elB} + \kappa_{phB}}{\sigma_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (3.35)$$

bzw.:

$$ZT = \frac{(S_A - S_B)^2}{L \cdot \left[\left(1 + \frac{\kappa_{phA}}{\kappa_{elA}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(1 + \frac{\kappa_{phB}}{\kappa_{elB}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad \left| \quad L = \frac{\kappa_{el}}{\sigma \cdot T} \right. \quad (3.36)$$

Wie bereits erwähnt, können thermoelektrische Module sowohl für Kühlanwendungen als auch zur Erzeugung elektrischer Energie aus Abwärme eingesetzt werden. Während die thermoelektrische Güte ZT für beide Betriebsmodi gleich definiert ist, werden die restlichen Systemeigenschaften je nach Anwendung unterschiedlich beschrieben. Die Generator-Anwendung steht im Zentrum der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, weshalb die Funktionsweise eines TEGs im Folgenden detailliert erläutert werden soll.

3.1.1 Der thermoelektrische Generator

Thermoelektrische Generatoren koppeln Wärmeübertragung mit dem Transport elektrischer Ladungsträger und ermöglichen so eine Wandlung der Wärmeströme in elektrische Leistung. Der Wirkungsgrad eines thermoelektrischen Generators wird stets durch den Carnot-Wirkungsgrad limitiert und ist definiert als (vgl. (1.2)):

$$\eta_{TEG} = \left(1 - \frac{T_k}{T_w} \right) \cdot \frac{(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} + \frac{T_k}{T_w}} \quad \left| \quad T_M = \frac{T_k + T_w}{2} \right. \quad (3.37)$$

Der Wirkungsgrad eines TEGs kann aus praktischer Hinsicht als Quotient aus generierter elektrischer Leistung P_{el} und dem durch das System aufgenommenen Wärmestrom \dot{Q}_{in} definiert werden. Unter der Berücksichtigung der Wärmetransportmechanismen in

einem thermoelektrischen Generator kann der Systemwirkungsgrad folgendermaßen beschrieben werden (Snyder 2003) (vgl. (2.7), (2.10), (2.15), (2.18)):

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\int_{T_k}^{T_w} S_{AB} dT - I^2 \int_{l=0}^{l=x} \rho_{AB} dx}{I \cdot T_w \cdot S_{AB} + K_{AB} \cdot \Delta T} \quad \left| \rho_{AB} = \frac{1}{\sigma_{AB}} \right. \quad (3.38)$$

bzw. (vgl. (3.41), (3.42), (3.43))

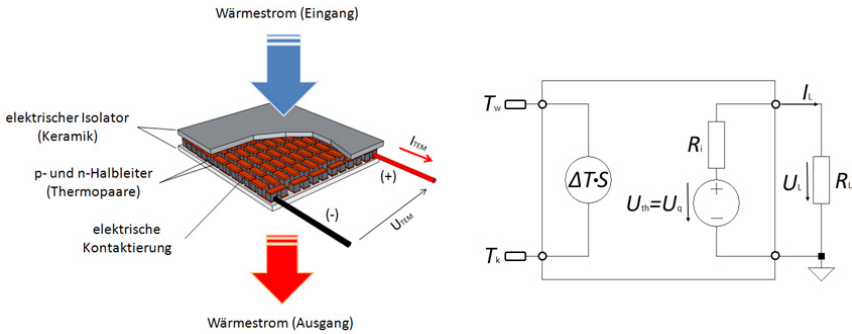
$$\eta_{TEG} = \frac{R_L \cdot I^2}{I \cdot T_w \cdot S_{AB} + K_{AB} \cdot \Delta T - R_i \cdot I^2 / 2} \quad (3.39)$$

In der Praxis fällt der Wirkungsgrad aufgrund von Verlusten bei Wärmeübertragung etwas geringer als durch (3.38) und (3.39) beschrieben aus. Gründe dafür sind die durch Bautoleranzen und thermische Materialverformung bedingten inhomogene Druck- und daraus resultierende inhomogene Temperaturverteilungen auf den Modulen sowie die thermischen Verluste an die Umgebung durch Konvektion und Strahlung (Tatarinov 2012a, Montecucco 2014).

Abbildung des elektrischen Verhaltens eines TEGs

Aus elektrotechnischer Sicht kann ein TEG als eine temperaturgesteuerte Spannungsquelle beschrieben werden (vgl. **Abbildung 3.2**).

Abbildung 3.2 Elektrisches Ersatzschaltbild eines TEGs.



Aufgrund der am Thermopaar abfallenden Temperaturdifferenz $\Delta T = T_w - T_k$ wird die Thermospannung $U_{th} = \Delta T \cdot S(T)$ generiert, welche der Quellenspannung U_q und im lastfreien Fall der Leerlaufspannung U_{leer} entspricht. Der Laststrom I_L , die Lastspannung U_L und die elektrische Ausgangsleistung P_{el} des Thermopaars werden jeweils in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L und der Temperatur folgendermaßen berechnet:

$$I_L = \frac{U_q}{R_i + R_L} = \frac{\Delta T \cdot S(T)}{R_i + R_L} \tag{3.40}$$

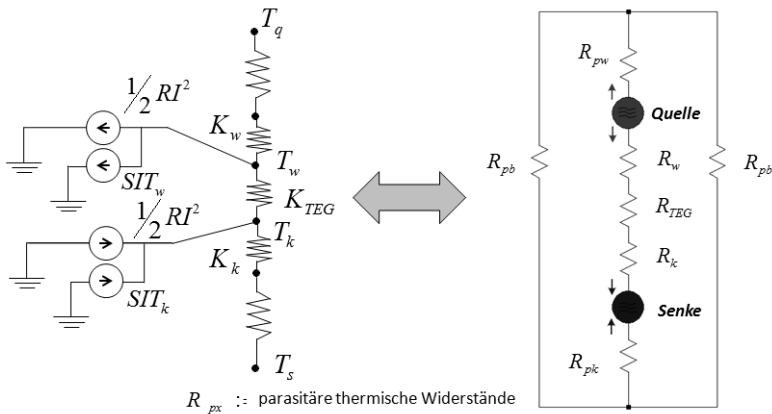
$$U_L = I_L \cdot R_L = U_q - I_L \cdot R_i = \Delta T \cdot S(T) \cdot \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_L} \right) \tag{3.41}$$

$$P_{el} = U_L \cdot I_L = \frac{\Delta T^2 \cdot S(T)^2}{R_i + R_L} \cdot \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_L} \right) = \frac{\Delta T^2 \cdot S(T)^2}{(R_i + R_L)^2} \cdot R_L \tag{3.42}$$

Abbildung des thermischen Verhaltens eines TEGs

Ein funktionsfähiges thermoelektrisches Generatorsystem besteht immer aus einer Wärmequelle (T_q), einer Wärmesenke (T_s) und entsprechend aus Materialschichten zur Herstellung stabiler thermischer Kontakte (k_w) und (k_k) (vgl. **Abbildung 3.3**).

Abbildung 3.3 Thermisches Ersatzschaltbild eines TEGs (Yazawa 2012)



Wie im Kapitel 2.2.1 bereits erläutert, teilt sich der durch das TEG fließende Wärmestrom in drei Anteile auf: 1. Peltier- und 2. Joulesche-Wärme, sowie 3. der Wärmeanteil, welcher aufgrund thermischer Leitung des Materials transportiert wird.

Der an der heißen Seite des Thermopaares absorbierte Wärmestrom \dot{Q}_{in} sowie der an ihrer kalten Seite abgeführte Wärmestrom \dot{Q}_{out} werden folgendermaßen berechnet (vgl. (2.20)) (Chen 2005):

$$\dot{Q}_{in} = S(T) \cdot I_L \cdot T_w - R_i \cdot \frac{I_L^2}{2} + K_{TEG} \cdot \Delta T \tag{3.43}$$

$$\dot{Q}_{out} = S(T) \cdot I_L \cdot T_k + R_i \cdot \frac{I_L^2}{2} + K_{TEG} \cdot \Delta T \tag{3.44}$$

Hier steht K_{TEG} für die Wärmeleitzahl des gesamten Moduls und wird in Abhängigkeit von der Fläche des TEGs A , seiner Stärke d und der Packungsdichte des thermoelektrischen Materials D berechnet (vgl. (2.21)).

$$K_{TEG} = \kappa_{ges} \cdot \frac{A_{TEG}}{d_{TEG}} \cdot D \quad (3.45)$$

Wieviel Wärme von einer gegebenen Anzahl von Thermopaaren aus der Systemwärmequelle abgeführt wird und zu welcher Temperaturdifferenz zum benachbarten Thermopaar ($\Delta T_{wi}=T_{w2}-T_{w1}$) dieser Prozess führt, kann anhand von \dot{Q}_{in} bzw. \dot{Q}_{out} berechnet werden. Diese Berechnungen werden später bei der Erläuterung des Simulationsmodells einer thermoelektrischen Generatoranlage (TEGA) für den Einsatz in Pkw detailliert dargestellt (vgl. 5.3.2).

3.1.2 Die thermoelektrische Wärmepumpe

Thermoelektrische Kühler oder thermoelektrische Wärmepumpen nutzen den reversiblen Peltier-Effekt und werden in der Praxis vielseitig eingesetzt. Bei der Dimensionierung thermoelektrischer Kühlanlagen hängen drei Systemgrößen eng zusammen: die gewünschte Temperaturdifferenz zwischen der kalten und warmen

Systemseite $\Delta T=T_w-T_k$, der an der kalten Systemseite absorbierte Wärmestrom \dot{Q}_k sowie die dafür benötigte elektrische Leistung $P_{el}=R_L \cdot I^2$. Die Leistungszahl²⁷ ε einer thermoelektrischen Wärmepumpe ist definiert als das Verhältnis aus dem Wärmestrom \dot{Q}_k und der dafür benötigten elektrischen Leistung P_{el} (vgl. (3.39) und Kraftmakher 2005).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_k}{P_{el}} = \frac{S(T) \cdot I \cdot T_k - R_i \cdot I^2 / 2 - K_{TEG} \cdot \Delta T}{S(T) \cdot I_L \cdot \Delta T + R_i \cdot I^2} \quad (3.46)$$

Die maximale Leistungszahl eines TECs ist durch den Carnot-Wirkungsgrad limitiert und wird berechnet zu:

²⁷ In der Literatur auch oft als COP (Coefficient Of Performance) bezeichnet.

$$\varepsilon_{\max} = \left(\frac{T_w}{T_w - T_k} \right) \cdot \frac{(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} - T_k / T_w}{(1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} + 1} \Bigg|_{T_M = \frac{T_k + T_w}{2}} \quad (3.47)$$

Dabei wird der Wirkungsgrad durch das Verhältnis von tatsächlicher zu maximaler Leistungszahl ausgedrückt (vgl. (3.48)). Für Materialien mit $ZT \geq 2$ ist der Wirkungsgrad thermoelektrischer Kühler mit dem konventioneller kompressorbasierter Wärmepumpen vergleichbar (Yang 2009).

$$\eta_{TEC} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \quad (3.48)$$

Die Wärmeströme an der kalten bzw. an der warmen Systemseite werden in Abhängigkeit von Materialeigenschaften und der Höhe des elektrischen Stroms folgendermaßen beschrieben (vgl. (3.43) und (3.44)):

$$\dot{Q}_w = S(T) \cdot I \cdot T_w + R_i \cdot I^2 / 2 - K_{TEC} \cdot \Delta T \quad (3.49)$$

$$\dot{Q}_k = S(T) \cdot I \cdot T_k - R_i \cdot I^2 / 2 - K_{TEC} \cdot \Delta T \quad (3.50)$$

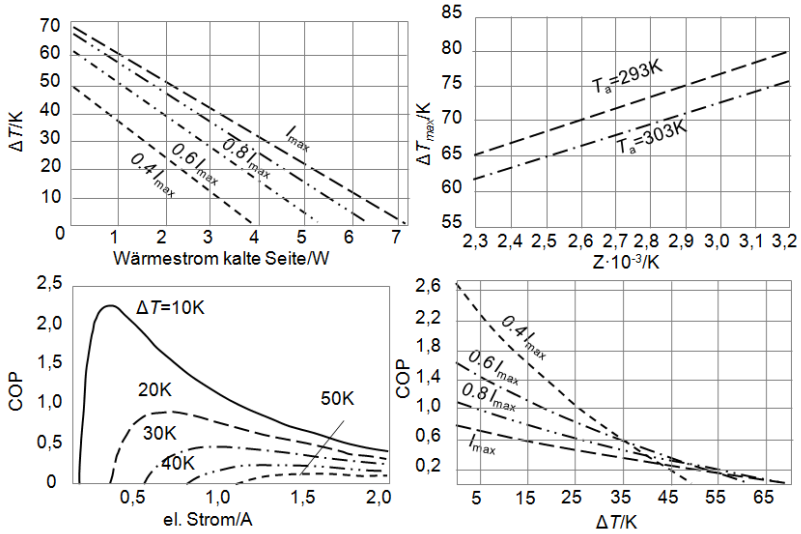
Thermoelektrische Wärmepumpen werden entweder auf die maximale Leistungszahl, den maximal absorbierten Wärmestrom oder auf die maximale Temperaturdifferenz zwischen der kalten und warmen Systemseite ausgelegt (Junior 2010, Goldsmid 2010).

$$I_{opt, \varepsilon} = \frac{S_{AB} \cdot \Delta T}{R_i \cdot (1 + ZT_M)^{\frac{1}{2}} - 1} \Bigg|_{T_M = \frac{T_k + T_w}{2}} \quad (3.51)$$

$$I_{opt, \dot{Q}_k} = \frac{S_{AB} \cdot T_k}{R_i} \quad (3.52)$$

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} \cdot ZT_k^2 \quad (3.53)$$

Abbildung 3.4 Typische Kennlinien eines TECs
(Kraftmakher 2005, tec-microsystems 2015)



Grafische Lösungsansätze ermöglichen eine schnelle Abschätzung der Kühlleistung sowie der Temperaturdifferenz des Systems und sind in der Praxis oft zielführend: (vgl. **Abbildung 3.4**):

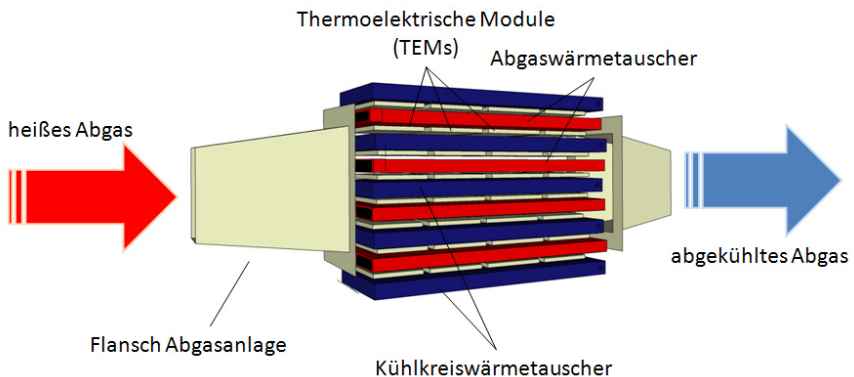
$$\Delta T = \Delta T_{max} \cdot \left(1 - \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_{max}} \right) \tag{3.54}$$

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_{max} \cdot \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \right) \tag{3.55}$$

3.2 Systemintegration in Kraftfahrzeugen

Eine thermoelektrische Generatoranlage (TEGA) zur Energie-Rückgewinnung aus Abgaswärme in Kraftfahrzeugen besteht in der Regel aus einer Anzahl thermoelektrischer Generatoren und mehreren Peripheriebaugruppen, welche in ihrer Funktion aufeinander abgestimmt werden. Wärmetauscher und Materialien für thermische Kontaktierung müssen mechanisch und thermisch entsprechend der verwendeten TEG-Module angepasst werden. Die elektrische Ausgangsleistung einzelner thermoelektrischer Generatoren muss zusammengeführt und (spannungs-) angepasst dem Bordnetz des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt werden. Dabei spielt die Geometrie der TEGA bei mechanischen Systemeigenschaften wie Bauraum und Stabilität der Verbindungsstellen eine Rolle (Vázquez 2002, Saqr 2008).

Abbildung 3.5 Schematische Darstellung einer planar aufgebauten TEGA (Tatarinov 2012a)



Neben dem konventionellen elektrischen Generator bildet eine TEGA eine weitere thermodynamische Kopplung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem elektrischen Bordnetz des Fahrzeugs (Korzhev 2010, Tatarinov 2012a). Die planaren Generatorarchitekturen sind im Hinblick auf die mechanische Stabilität in der Regel einfacher zu handhaben als die zylindrischen oder hexagonalen Generatoranlagen (vgl. **Abbildung 3.5**) (Kumar 2013, Crane 2009, Vázquez 2002, Aharon 1991, Suzuki 2003, Saqr 2008, Aixala 2009).

Im Vergleich zu bereits erschlossenen Problemstellungen bei der Verwendung von TEGs in Radioisotopen-Generatoren (RTG, vgl. 1.1) stellen sich bei der Entwicklung thermoelektrischer Generatoranlagen für den Einsatz in Kraftfahrzeugen eine ganze Reihe spezieller Anforderungen an Materialien und Systemkomponenten. Die in der Praxis entstehenden Problemstellungen sollen im Folgenden kurz umrissen und ihre Lösungsansätze skizziert werden.

3.2.1 Thermomechanische Systemintegration

Die in Verbindung mit den dynamischen Fahrzyklen eines Kraftfahrzeugs entstehenden thermischen und mechanischen Belastungen einer thermoelektrischen Generatoranlage stellen hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit ihrer Systemkomponenten. Die Auswahl von Materialien zur thermischen Kontaktierung thermoelektrischer Generatoren an die Wärmetauscher ist jedoch aufgrund der thermischen Dynamik und den hohen Temperaturen sehr eingeschränkt. Faktoren wie die Hitzebeständigkeit und die Elastizität der Materialien sowie die Reibkorrosion der Verbindungsstellen bestimmen dabei die Lebensdauer der Generatoranlagen. Die Quantifizierung thermischer Ausdehnung und damit zusammenhängender mechanischer Spannungen und Scherkräfte soll helfen die Materialien optimal einander anzupassen, um eine höhere Lebensdauer der Generatoranlagen zu erzielen (Huang 2008). Ebenso ist eine genaue Betrachtung einiger Details in der thermomechanischen Systemauslegung wichtig, um eine maximale Ausbeute der Wärmeenergie aus dem Abgas zu erreichen. So hängt z.B. die Positionierung der TEGA sowohl von der Leistung des Verbrennungsmotors als auch vom verwendeten thermoelektrischen Material ab (thermische Stabilitätsgrenze, maximale Betriebs-Temperatur). Meist werden die Prototypen thermoelektrischer Generatoranlagen für den Einbau nach den abgasnachbehandelnden Systemen ausgelegt, was rein praktischen Gründen geschuldet ist²⁸ (Chau 2007, Häfele 2011).

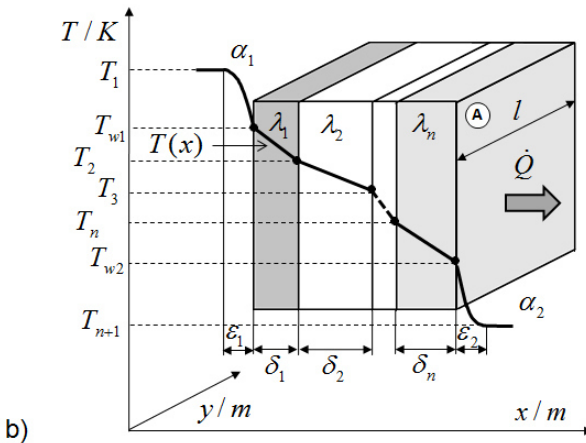
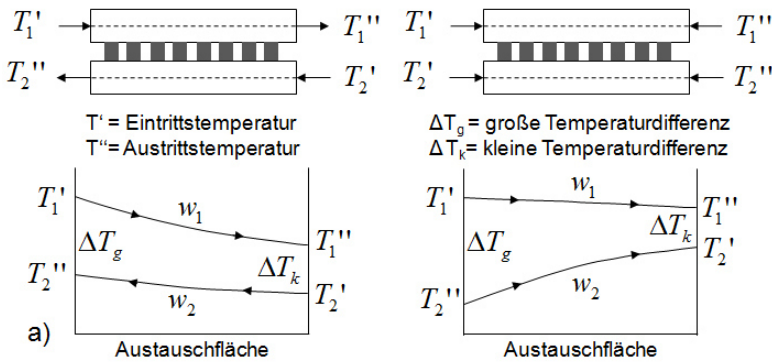
Auslegung von Wärmetauschern

Wärmetauscher ermöglichen die Wärmeübertragung von einem Medium zum anderen und werden zur Auskopplung von Abwärme aus wärmeführenden Stoffströmen eingesetzt. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen den rekuperativen und regenerativen Wärmetauschern. Der Hauptunterschied zwischen den zwei Typen besteht darin, dass bei den rekuperativen Wärmetauschsystemen keine Vermischung der wärmetransportierenden Medien zustande kommt, wobei die regenerativen

²⁸ Hier möchte man z.B. das sensible Temperaturverhalten abgasnachbehandelnder Systeme nicht stören und gegebenen Bauraum für eine TEGA nutzen.

Wärmetauscher jedoch diese Möglichkeit zulassen (Pehnt 2010). Im Falle der Wiedergewinnung elektrischer Energie aus Abgaswärme handelt es sich um rekuperative Wärmetauschersysteme. Eine thermoelektrische Generatoranlage stellt hierbei einen Sonderfall dar, da die Trennwände aus thermoelektrischen Generatormodulen bestehen. Diese Wärmetauschersysteme können zwischen Gleichstrom- und Gegenstrom-Wärmetauschern unterschieden werden (vgl. **Abbildung 3.6a**).

Abbildung 3.6 Thermoelektrische Wärmetauschersysteme (Pehnt 2010, Stan 2012)



Der übertragende Wärmestrom \dot{Q} ist proportional zur mittleren Temperaturdifferenz ΔT_m und zur Wärmeaustauschfläche A . U (früher auch k -Wert genannt) ist eine

materialabhängige Größe und fasst den Wärmeübergangskoeffizienten für den jeweiligen Übergang (Fluid \leftrightarrow Wand) α_i , die Wärmeleitfähigkeit λ_i des Materials der jeweiligen Systemschicht, und die Dicke der jeweiligen Materialschicht δ_i zusammen (Pehnt 2010, Hacker 2004, Stan 2012) (vgl. **Abbildung 3.6b**).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (3.56)$$

Die mittlere Temperaturabsenkung des wärmeleitenden Mediums zwischen Eintritt- und Austritt des Wärmetauschers wird durch die logarithmische mittlere Temperatur ΔT_m beschrieben (vgl. **Abbildung 3.6a**) (Pehnt 2010).

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_g - \Delta T_k}{\ln\left(\frac{\Delta T_g}{\Delta T_k}\right)} \quad (3.57)$$

Die Auslegung der Wärmetauscher auf der heißen Systemseite hat direkten Einfluss auf die Temperaturverteilung an den wärmeabsorbierenden Flächen des Generators in Flussrichtung des Abgases. Zur Anpassung der Temperaturverteilung in Bewegungsrichtung y des wärmeleitenden Mediums kann die Wärmeaustauscherfläche derart variiert werden, dass der vom Wärmetauscher transportierte Wärmestrom in Abhängigkeit vom Ort folgendermaßen abgeschätzt werden kann (vgl. (2.30) und (2.31)):

$$\dot{Q} = U \cdot A(y) \cdot \Delta T_m = \frac{A(y)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot \frac{\Delta T_g - \Delta T_k}{\ln\left(\frac{\Delta T_g}{\Delta T_k}\right)} \quad (3.58)$$

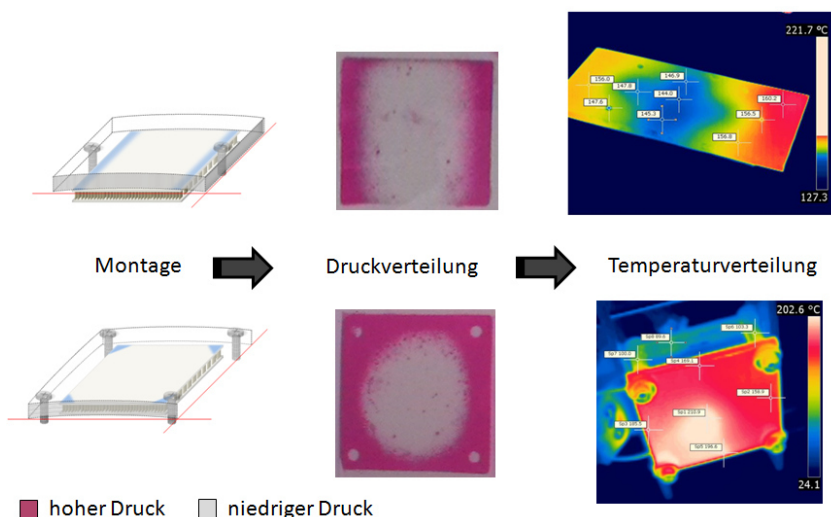
Die Wärmeübergangskoeffizienten α_i können anhand experimentell ermittelter Nusselt-Zahlen Nu_i unter Kenntnis der charakteristischen Strömungslänge l und der Leitfähigkeiten der Fluide λ_{fi} abgeschätzt werden (Stan 2012) (vgl. 2.2.3).

$$Nu_i = \frac{\alpha_i \cdot l}{\lambda_i} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}) \quad (3.59)$$

Das Ziel einer optimalen thermomechanischen Auslegung einer TEGA ist die Maximierung der Absorption der im Abgas enthaltenen Wärme, ohne dabei eine signifikante Erhöhung des Abgasgedrucks zu erzeugen (Häfele 2011). Die absorbierte

Wärme soll mit möglichst geringen Temperaturgradienten zwischen dem Abgas und der Oberfläche der TEG-Module übertragen werden. Eine homogene Druckverteilung auf dem Modul muss also gewährleistet werden, um die Temperatur-Inhomogenitäten zu verhindern (vgl. auch Bürkle 2011, Liu 2014 und **Abbildung 3.7**).

Abbildung 3.7 Inhomogene Druckverteilung führt zur ungleichmäßigen Verteilung der Temperatur

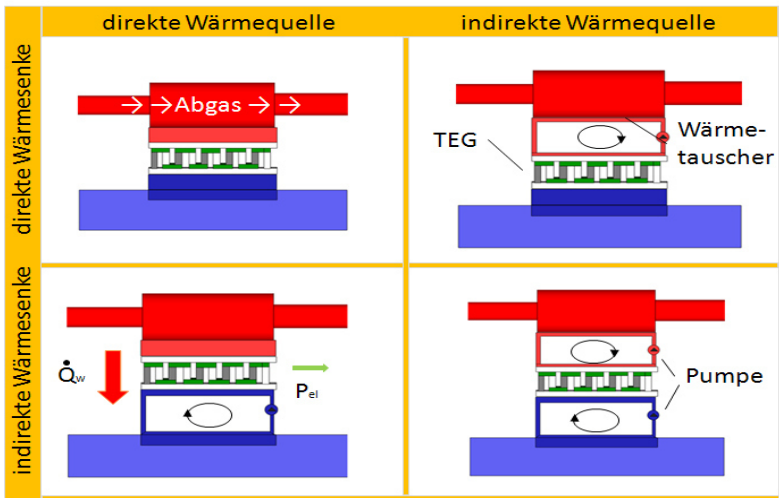


Die Wahl des zur thermischen Ankopplung verwendeten Materials und der optimalen Einstellung mechanischen Drucks auf die Module hat ebenfalls eine starke Auswirkung auf die Ausgangsleistung des TEGs. **Abbildung 4.18** zeigt die Ergebnisse eines Experiments, indem unterschiedliche Materialien zur Wärmeankopplung untersucht wurden. In einem optimalen Arbeitspunkt des TE-Moduls wurde der Anpressdruck auf das Modul verändert. Druckabhängig ist hier im ungünstigsten Fall mit einer Leistungsminderung von bis zu 13% auszugehen. Abhängig davon, welches Material zur Herstellung thermischer Kontakte eingesetzt wurde, kann mit einem Leistungseinbruch von bis zu 10% gerechnet werden (Tatarinov 2012a).

Praktisch realisierbare Temperaturdifferenzen zwischen dem Abgas und TEG-Modul betragen je nach Betriebspunkt des Motors ca. 50-150 K (Hepke 2010, Zellbeck 2009).

Die Zeitkonstante τ des Wärmetauschersystems liegt in einer Größenordnung von 50 s^{29} . Zeitgenössische thermoelektrische Wärmetauschersysteme setzen auf Federtechnik, welche für die Kraftaufbringung bei thermischer Kontaktierung von TEG-Modulen an die wärmeübertragenden Wände der Wärmetaucher eingesetzt wird (Salzberger 2010, Salzberger 2009, Oestele 2011, Spieth 2011). Dabei arbeiten Gas-Kühlflüssigkeit-Wärmetaucher im Auslegungspunkt erfahrungsgemäß mit einem thermischen Wirkungsgrad von über 90 % (Hacker 2004).

Abbildung 3.8 Kombinationen zur thermischen Systemankopplung (Tatarinov 2012a)



Der Wärmetransport zwischen Abgas, thermoelektrischem Generator und dem Kühlkreis kann auf vier verschiedenen Wegen realisiert werden (vgl. **Abbildung 3.8**). Eine indirekte Wärmeankopplung bietet den Vorteil der Regelbarkeit, ist jedoch erfahrungsgemäß oft mit mehr Material- und Konstruktionsaufwand und so mit zusätzlichem Gewicht und Kosten verbunden. Außerdem würde jede zusätzliche wärmeübertragende Komponente die dem System zur Verfügung stehende Temperatur-Differenz reduzieren. Wärmetransport mit Hilfe von Wärmerohren (*heatpipes*) wäre hier eine gewinnbringende Lösung. Die durch die TEG-Module abgeführte Wärme kann in den Hauptkühlkreis des Fahrzeugs zugegeben werden, wodurch sich die Warmlaufphase des

²⁹ Die Zeitkonstante beschreibt das Systemverhalten bei einer thermischen Anregung, in diesem Fall für eine Sprungantwort des Systems (vgl. **Abbildung 3.10b** und **Abbildung 3.9a**).

Motors verkürzen ließe (Tatarinov 2012a). Dies würde sich positiv auf Verschleiß und Kraftstoffverbrauch auswirken.

3.2.2 Elektrische Systemintegration

Das elektrische Bordnetz eines Kraftfahrzeugs hat sich in den letzten 15 Jahren zu einem hochkomplexen Verbundsystem entwickelt. Im Vergleich zu klassischen elektrischen Netzen in Kraftfahrzeugtechnik, in denen die Batterie einen passiven elektrischen Speicher darstellt und die elektrischen Verbraucher sich ebenfalls passiv verhalten, fungiert ein modernes Bordnetz als ein aktives Energiemanagementsystem. Um die Sicherheitsanforderungen einhalten zu können, muss die Kommunikation zwischen den einzelnen Funktionsgruppen zuverlässig und die Reaktionszeiten echtzeitfähig sein. Der elektrische Energiebedarf eines Mittelklassewagens liegt heute bei etwa 1,3 kW und wird sich Abschätzungen zufolge in Zukunft weiter erhöhen (Hesse 2011).

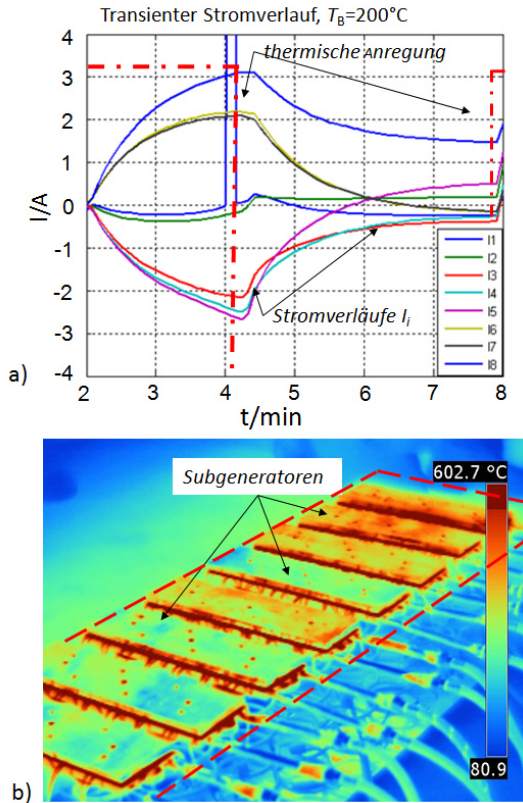
Die Integration einer thermoelektrischen Generatoranlage in ein Kraftfahrzeug unterliegt neben den Ansprüchen an Sicherheit und Zuverlässigkeit der Anforderung, elektrisch erzeugte Energie mit minimalen Verlusten an das Bordnetz zu liefern. Die Reversibilität thermoelektrischer Effekte kann im ungünstigsten Fall den Systemwirkungsgrad stark limitieren, weshalb die Problemstellungen bei der Anbindung thermoelektrischer Generatoranlagen an das Bordnetz näher beleuchtet werden müssen.

Parasitäre Peltier-Wärmeströme

Wenn ein elektrischer Strom durch das thermoelektrische Materialpaar fließt, wird aufgrund des Peltier-Effekts zugleich Wärme transportiert (vgl. 2.1.2). Im Generator-Betrieb steht dieser Effekt für die Ursache eines Anteils transportierter Wärme (vgl. (3.43) und (3.44)). Hier muss jedoch ein anderes Phänomen berücksichtigt werden. Die Geometrie der TEGA und die dadurch bedingte Anzahl und Anordnung thermoelektrischer Generatormodule ruft eine charakteristische inhomogene Temperaturverteilung auf den thermisch kontaktierten Generatorflächen hervor (vgl. **Abbildung 3.10a**). Gründe dafür sind 1) die thermisch bedingte mechanische Materialausdehnung, 2) eine Inhomogenität der Halbleitermaterialien sowie 3) eine Inhomogenität der Materialien zur thermischen Kontaktierung (Salzberger 2009, Tozaki 2006). Ein thermoelektrisches Modul arbeitet bei einer Temperaturdifferenz zwischen beiden Systemseiten als Generator (vgl. 3.1.1). Wird elektrische Spannung an den Anschlüssen eines Moduls angelegt, wechselt das Modul in den Wärmepumpenbetrieb (Peltier-Element, vgl. 3.1.2). Eine inhomogene Temperaturverteilung innerhalb einer Generatoranlage kann daher negative Folgen haben: Der generierte Strom würde partiell zum Pumpen von Wärme verwendet und stünde nicht extern zur Verfügung. Zusätzlich

würde bei diesem Prozess die Temperaturdifferenz zwischen der heißen und kalten Systemseite verringert, womit der gesamte Systemwirkungsgrad weiter reduziert wäre.

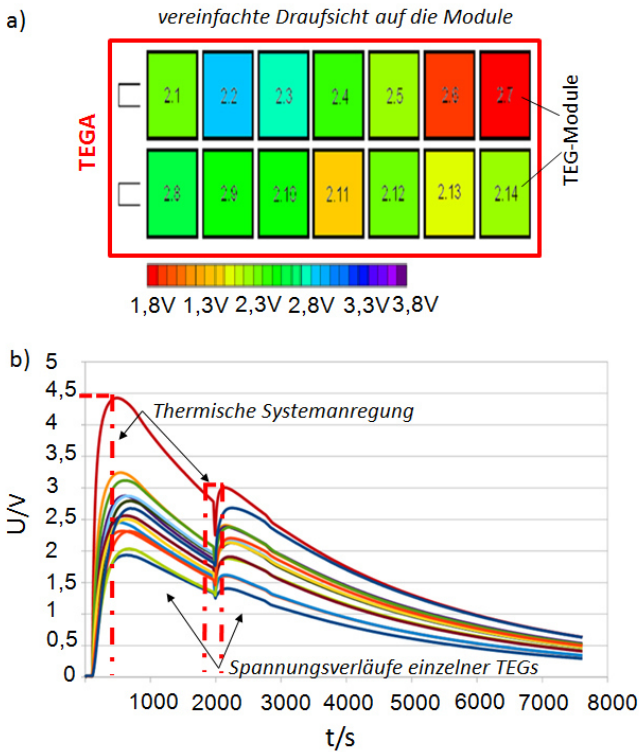
Abbildung 3.9 Transienter Verlauf parasitärer Peltier-Ströme (Tatarinov 2012a)



Die negative Auswirkung der parasitären Peltier-Wärmeströme auf den Systemwirkungsgrad einer TEGA kann am Beispiel eines Generators zur Energierückgewinnung aus industrieller Abwärme gezeigt werden. Ein Generatorprototyp, zusammengesetzt aus acht Subgeneratoren, wurde dabei einem Feldtest unterzogen. **Abbildung 3.9a** zeigt Stromverläufe einzelner Subgeneratoren bei ungünstigen Rahmenbedingungen. In diesem Fall wurden alle acht Subgeneratoren, jeder bestehend aus 14 elektrisch in Reihe geschalteten TEG-Modulen, elektrisch parallel

geschaltet. Aufgrund der stark inhomogenen Temperaturverteilung auf den Wärmeaustauschflächen der TEGA (vgl. **Abbildung 3.9b**) wurde so Wärme, bedingt durch den Peltier-Effekt, innerhalb des Systems zwischen den hoch- und niedertemperierten Subgeneratoren transportiert. In Folge produzierte die thermoelektrische Generator-Anlage am Ausgang nahezu keine elektrische Leistung (Tatarinov 2012a).

Abbildung 3.10 Ergebnis inhomogener Temperaturverteilung TEGA (Tatarinov 2012a)



Das gleiche Phänomen lässt sich auch innerhalb eines Subgenerators beobachten. **Abbildung 3.10a** zeigt die Anordnung thermoelektrischer Generatormodule (TEM-Feld) in einem der oben beschriebenen Subgeneratoren. Wie bereits erwähnt, wurden die TEG-Module miteinander elektrisch in Serie geschaltet. **Abbildung 3.10b** zeigt den Spannungsverlauf einzelner TEG-Module, aufgetragen gegen die Abkühlzeit der

Wärmequelle von insgesamt ca. 120 Minuten. Aufgrund der inhomogenen Temperatur- und mechanischen Druckverteilung auf den Modulen sowie der Streuung elektrischer und mechanischer Modulparameter variieren hier stark die Ausgangsspannungen einzelner TEGs. Da sich die Ausgangsspannung quadratisch auf die elektrische Ausgangsleistung des Generators auswirkt (vgl. (3.41), (3.42)), würde hier im Vergleich zum Idealfall die gesamte Leistung der TEGA um ca. 30 % vermindert werden.

Gerade im Hinblick auf die relativ niedrigen Wirkungsgrade thermoelektrischer Systeme ist die Analyse der Ursachen solcher Temperaturinhomogenitäten unabdingbar.

Elektrische Anpassung an das Bordnetz des Fahrzeugs

Thermoelektrische Generatormodule zeichnen sich in der Regel durch ihre relativ niedrigen Innenwiderstände (etwa $100\text{ m}\Omega$ - $10\ \Omega$) aus. Durch den Wärmetransport von der heißen zur kalten Systemseite entsteht ein Temperaturgradient in der gesamten TEGA in Bewegungsrichtung x des wärmeleitenden Mediums (vgl. **Abbildung 5.7**). Die thermoelektrischen Generatormodule werden innerhalb der TEGA in x -Richtung einer zunehmend niedrigeren Heißeittemperatur ausgesetzt (vgl. **Abbildung 5.10**). Die am jeweiligen TEG abfallende Temperaturdifferenz ΔT ist somit ebenfalls nicht konstant, sodass die thermoelektrischen Generatormodule zum Austritt des Wärmetauschers stetig kleinere Spannungen generieren³⁰. Bei Reihenschaltung aller TEG-Module steigt der Gesamtinnenwiderstand sowie die Ausgangsspannung der Generatoranlage und somit die Ausgangsleistung limitierenden Ohmschen Verluste (Espinosa 2010). Eine Serienschaltung aller in der Anlage verbauter TEGs würde gleichzeitig zu einer hohen Unzuverlässigkeit führen, da der Ausfall nur eines Generatormoduls einen Ausfall der gesamten Anlage bedeuten würde. Eine elektrische Parallelschaltung aller Module hingegen würde zu einem extrem niedrigen Innenwiderstand der Anlage ($10\ \mu\Omega$ -Bereich) und damit zu sehr hohen Dauerströmen (100 A und höher) führen. Eine generelle Parallelschaltung aller TEGs wäre auch wegen der bereits beschriebenen Problematik der parasitären Peltier-Wärmeströme nicht zielführend³¹ (vgl. auch Montecucco 2014).

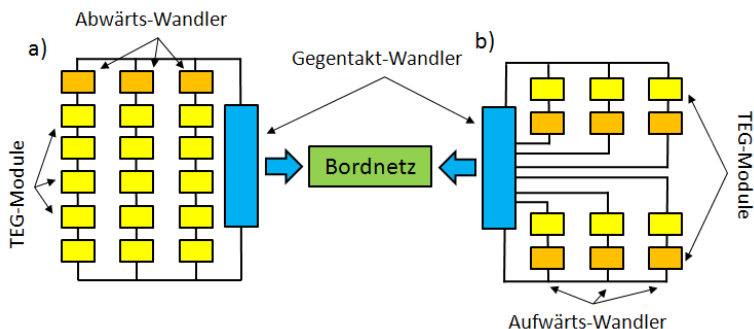
Mehrere Möglichkeiten zur elektrischen Schaltung von TEGs sind denkbar (Nagayoshi 2007, Huang 2012). So könnten z.B. die thermoelektrischen Generatormodule, welche bei gegebener Anlagenarchitektur die gleiche Temperatur-Differenz erfahren, gruppenweise parallel geschaltet werden (Variante 1) (Nagayoshi 2009). Solche Gruppen

³⁰ Aufgrund der Tatsache, dass der Temperaturgradient an der kalten Systemseite im Vergleich zu dem an der Seite des Abgases vernachlässigbar klein ist, ändert sich die Temperaturdifferenz.

³¹ Der Einsatz von Rücklauf-Dioden, wie sie etwa in der Photovoltaik eingesetzt werden, zur Verhinderung der hier beschriebenen parasitären Peltier-Wärmeströme ist aufgrund des relativ hohen Verhältnisses von Dioden-Schwellspannung zur Ausgangsspannung des TEG-Moduls nicht effektiv.

würden dann, ausgestattet mit Gleichspannungswandlern³², spannungsangepasst (z.B. 14 Volt-Ebene) das Bordnetz des Fahrzeugs mit elektrischer Energie versorgen (vgl. **Abbildung 3.11b**) (Nagayoshi 2011).

Abbildung 3.11 Varianten elektrischer Gruppierungen von TEGs.

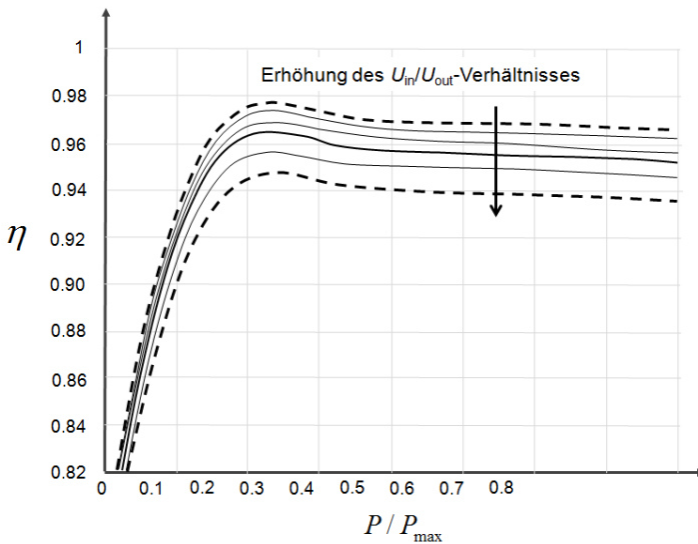


Eine ähnliche Variante stellt eine verkettete Anordnung in Serie geschalteter TEGs, welche jeweils mit einer elektronischen Ausfallüberwachungsvorrichtung ausgestattet und über einen gemeinsamen DC/DC-Konverter elektrische Leistung in das Bordnetz des Fahrzeugs einspeisen, dar (Variante 2) (vgl. **Abbildung 3.11a**). Eine etwas andere Überlegung wäre eine dynamische, elektrische Gruppierung einzelner TEGs innerhalb der Generatoranlage (Variante 3). In diesem Fall kann eine Rechneinheit die elektrischen Ausgangsgrößen eines jeden TEGs erfassen und die günstigste Zusammenschaltung (z.B. bezogen auf den maximalen Wirkungsgrad oder die maximale Leistung der Anlage) mit Hilfe einer Matrix-Schaltung realisieren. Dieser Ansatz würde eine möglichst kleine Flächensegmentierung der TEG-Module und eine umfangreiche elektronische Peripherie erfordern. Die erwartete Wirksamkeit solcher Systeme ist vielversprechend und konnte bereits zumindest im Kleinformat getestet werden (vgl. Quan 2013). Der zweite oben benannte Ansatz (vgl. **Abbildung 3.11a**) bedarf ebenso einiger elektronischer Baugruppen und setzt speziell angefertigte TEGs für die Realisierung voraus. Die erste Variante zur Bündelung und Anpassung elektrischer Energie in einer TEGA (vgl. **Abbildung 3.11b**) kann im Gegensatz zu den anderen zwei

³² Gleichspannungswandler (Drosselregler, Ladungspumpen, allgemein auch als DC/DC-Wandler bekannt) sind elektronische Baugruppen, welche Anpassung der von einer Spannungsquelle bereitgestellten elektrischen Gleichspannung an die Eingangsspannung vom Verbraucher elektrischer Gleichspannung ermöglichen. Je nach Leistung können solche Baugruppen integriert oder diskret aufgebaut sein (Linder 2004).

vorgestellten Techniken mit konventionellen Baugruppen realisiert werden. Alle drei Varianten kommen ohne den Einsatz von DC/DC-Wandlern nicht aus, da die von der TEGA erzeugte elektrische Energie konditioniert an das Bordnetz des Fahrzeugs angepasst werden muss (Chau 2007, Maganga 2014). DC/DC-Wandler arbeiten in der Regel bei steigender Eingangsspannung mit höherem Wirkungsgrad, was bei der Auslegung der TEGA im Hinblick auf die höchstzulässige Bordspannung berücksichtigt werden muss (vgl. **Abbildung 3.12**).

Abbildung 3.12 Benötigte DC/DC-Wandler und ihre Charakteristik (Hauer 2001)



Das Bordnetz des Fahrzeugs muss die von TEGA angebotene Energie, ähnlich wie die im EEG³³ verankerte Abnahmeregelung von Energie aus regenerativen Energiequellen, bevorzugt aufnehmen. Im später vorgestellten Simulationsmodell der thermoelektrischen Generator-Anlage wird die erste Variante des elektrischen Konzepts der TEGA zugrundegelegt.

³³ Gesetz zur Neuordnung des Rechtrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Stand 2012 [EEG12].

4 Experimentelle Untersuchungen

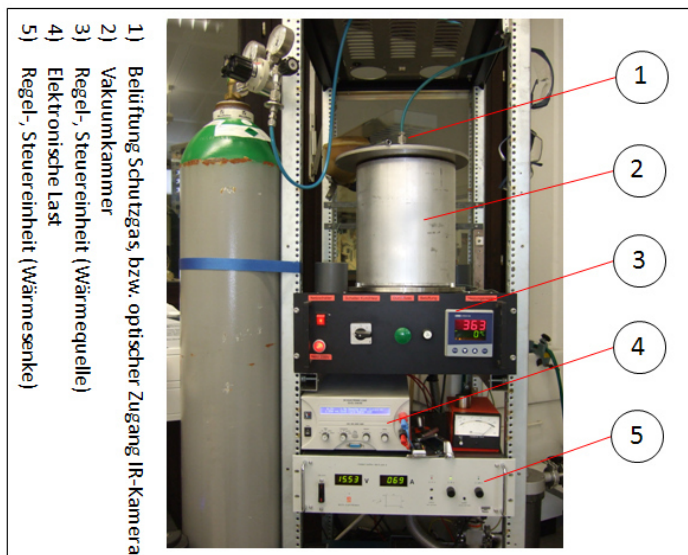
Für die Entwicklung thermoelektrischer Generatoranlagen zur Energierückgewinnung aus Abwärme ist die genaue Kenntnis der temperatur- und druckabhängigen Systemparameter thermoelektrischer Generatormodule unabdingbar. In den Datenblättern sind meist Herstellerangaben für den optimalen Arbeitspunkt des jeweiligen Modultyps zu finden. Dabei sind sowohl die elektrischen Modul-Parameter (R_i , P_{ei} und $S_{A,B}$) als auch die thermischen Kenngrößen des Moduls (\dot{Q}_{in} , \dot{Q}_{out}) direkt mit dem Wirkungsgrad des TEGs im Zusammenhang stehende, teilweise stark temperaturabhängige Größen. Ein effizientes Systemdesign kann nur dann realisiert werden, wenn sowohl das elektrische als auch das thermische Systemverhalten über den gesamten Temperaturbereich bekannt sind.

Einige etablierte Messtechniken wie die Laser-Flash- oder 3Ω -Messmethoden liefern ausreichend genaue Ergebnisse bei der Charakterisierung thermischer Eigenschaften thermoelektrischer Materialien³⁴ (Abas 2007, Schoderböck 2009, Baba 2001, Mion 2005, Gryadunov 1991). Messungen mit Hilfe der sogenannten Potential-Seebeck-Mikrosonde (PSM) ermöglichen detaillierte Untersuchungen elektrischer Eigenschaften thermoelektrischer Materialien (Stober 2012). Messinstrumente zur ganzheitlichen Evaluierung thermoelektrischer Generatormodule lenkten in den letzten fünf Jahren ein starkes Interesse technischer Entwickler auf sich. Einige Prototypen unterschiedlicher Komplexität wurden in der Vergangenheit von verschiedenen Forschungsgruppen entwickelt und vorgestellt (Kraftmakher 2005, Tozaki 2006, Anatyshuk 2011, Tatarinov 2012b). Im folgenden Kapitel soll die Anlage, welche für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen entwickelt und eingesetzt wurde, in Aufbau und Funktionsweise beschrieben werden.

4.1 Beschreibung der Messtechnik

In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe „Thermoelektrik“ an der Hochschule Trier wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Messplatz zur Bestimmung relevanter thermoelektrischer Systemparameter aufgebaut, fortlaufend optimiert und weiter entwickelt.

³⁴ Bei der Bestimmung thermischer Eigenschaften wie der thermischen Leitfähigkeit oder der Wärmekapazität eines Materials sind Messfehler von 5 bis 20% üblich (Snyder 2008).

Abbildung 4.1 Gesamtansicht der Messvorrichtung.

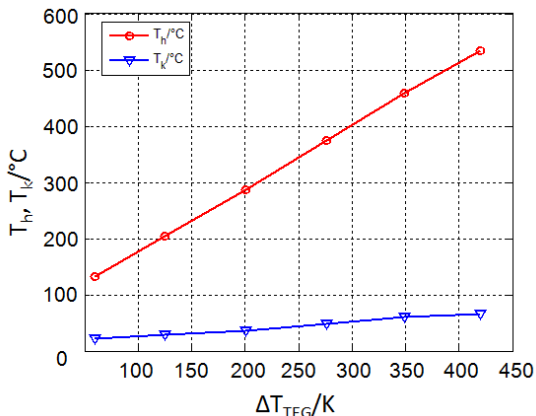
Aktuell ermöglicht die Messvorrichtung die Charakterisierung einzelner TEG-Module bis zu einer Stärke von 25 mm und einer Kantenlänge von 70 mm. Die Prüflinge können unter einer Schutzgasatmosphäre (Argon, oder Stickstoff) oder auch unter Vakuum von bis zu 0,03 mbar bei einer maximalen Temperaturdifferenz von 500 K untersucht werden. **Abbildung 4.1** zeigt die Frontansicht des Messplatzes. Die gesamte Messvorrichtung ist hauptsächlich aus drei Funktionsgruppen zusammengesetzt, welche hier kurz beschrieben werden sollen.

4.1.1 Thermische Messumgebung

Die Heiß- bzw. Kaltseitentemperaturen können mit Hilfe von zwei separaten Regelkreisen auf die gewünschte Temperatur (stationär oder dynamisch bei $\tau \approx 60$ s) eingestellt werden³⁵.

³⁵ τ steht für die Zeitkonstante des Systems und entspricht der Sprungantwort der Heizung.

Abbildung 4.2 Stabilität der Wärmesenke bei Untersuchungen von Hochtemperatur-Modulen



Die Wärmequelle stellt einen ohmschen Heizer mit ca. 2,5 kW Verlustleistung dar. Die Wärmesenke ist ein fluider Wärmetauscher mit aktiv gekühlter Kühlflüssigkeit³⁶. Als Wärmepumpe wird ein Peltier-Kühlsystem eingesetzt. Der primäre Kühlkreis verfügt über einen Ausgleichsbehälter, sodass die Kaltseitentemperatur zwischen 5°C und 120°C eingestellt werden kann (vgl. **Abbildung 4.2**). Beiden Seiten des zu untersuchenden TEGs können somit gewünschte Temperaturverläufe vorgegeben werden (z.B.: Temperaturverläufe des Kühlkreises bzw. des Abgases eines Fahrzeugs beim Durchfahren eines Fahrzyklus).

4.1.2 Elektrische Messumgebung

Die variable elektrische Belastung der Prüflinge während der Untersuchung ist wichtig, da einerseits bestimmte Arbeitspunkte im stationären Zustand erfasst werden müssen und andererseits eine stufenlose Abtastung von Steuerparametern notwendig ist. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Abtasten des elektrischen Lastwiderstands eines TEGs im thermisch quasistationären Zustand des Systems zur Bestimmung von Leistungsanpassungskurven (vgl. **Abbildung 4.13a**). Eine Elektronische Last³⁷ bietet in Verbindung mit einer Rechnerschnittstelle eine optimale Lösung zur Emulation

³⁶ Typische glykolhaltige Kühlflüssigkeit für den Einsatz in Kraftfahrzeugtechnik.

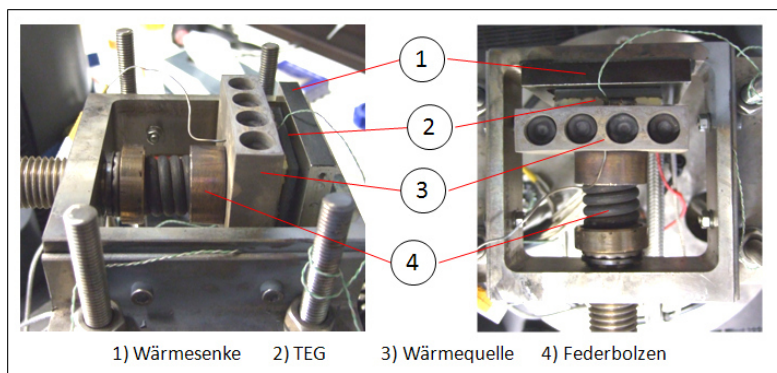
³⁷ Hier verwendeter Typ: EA-EL 3160-60 des Herstellers „Elektro-Automatik“.

unterschiedlicher elektrischer Verbraucher bzw. Verbrauchernetze.

4.1.3 Mechanische Messumgebung

Die Charakterisierung von TEG-Modulen erfordert neben den thermischen und elektrischen Rahmenbedingungen eine praxisnahe mechanische Funktionsumgebung. Zur Herstellung optimaler thermischer Kontakte zwischen dem Prüfling und der Wärmequelle bzw. der Wärmesenke muss eine konstante Kraft auf das System wirken. Darüberhinaus sollte im Idealfall eine homogene Druckverteilung auf den für den thermischen Kontakt relevanten Moduloberflächen herrschen (vgl. 3.2.1). Die in **Abbildung 4.3** dargestellte Haltevorrichtung zum Einspannen der Prüflinge befindet sich im Inneren der Vakuumkammer (vgl. **Abbildung 4.1**). In der Haltevorrichtung werden die Prüflinge zwischen der Wärmequelle und der Wärmesenke platziert, die benötigte Kraft zum Zusammenpressen des Systems kann mit dem Federbolzen eingestellt werden.

Abbildung 4.3 Prüfling-Haltevorrichtung im Laborbetrieb.



Die Wärmesenke ist durch einen Isolator thermisch getrennt am Rahmen der Haltevorrichtung befestigt. Zur Dämpfung parasitärer Wärmeübertragung über die Haltevorrichtung auf die kalte Seite des Prüflings sind der Rahmen sowie der Federbolzen aus Edelstahl hergestellt.

4.1.4 Sensorik und Messdatenerfassung

Die gesamte Messvorrichtung wird mit einer LabVIEW³⁸ Software bedient, welche einerseits die Steuerung der Einzel-Komponenten und andererseits die Abfrage von Sensoren und die Sicherung der Messdaten übernimmt. Erfasst werden neben der U -, I -, R -Kennlinien des Generators die Vor- und Rücklauftemperatur T_{we} , T_{wa} sowie der Volumenstrom der Kühlflüssigkeit \dot{V}_w , Temperatur und Momentanleistung der Wärmequelle T_h und P_h sowie der auf den TEG wirkende mechanische Druck p_{mod} . Die sensorische Gruppe besteht aus einem Durchflussmesser (*Volumenzähler*), mehreren Spannungswandlern und Temperatursensoren. Die Auswertung der Messdaten geschieht nachträglich mit Hilfe von MATLAB³⁹.

4.1.5 Einbindung der Infrarot Messtechnik

Infrarot- oder Wärmebildtechnik hat die Aufgabe, die Eigenstrahlung eines Körpers bei Umgebungstemperatur für das menschliche Auge sichtbar zu machen. Wärmebildkameras arbeiten berührungslos und liefern die räumliche Temperaturverteilung eines Objekts in Form eines Infrarot-Bildes (Schuster 2004). Im Gegensatz zu einer punktuellen Temperatur-Erfassung mit Hilfe von Thermoelementen bietet Thermographie eine Möglichkeit, die Temperaturverteilung des TEG-Systems zwei-dimensional zu erfassen und darzustellen. Neben der absoluten Temperaturmessung entsteht so ein kontinuierlicher⁴⁰ Temperatur-Verlauf der zu untersuchenden Oberfläche. So können beispielsweise die ortsaufgelösten Temperaturgradienten der zu interessierenden Stellen eines TEG-Systems abgebildet werden (vgl. **Abbildung 4.20**). Problematisch ist hierbei allerdings, dass die Präzision der Erfassung von absoluten Temperaturen unter der Inhomogenität der Emissionskoeffizienten abstrahlender Flächen leidet (vgl. 2.2.2). Zusätzlich muss die eingesetzte Wärmebildkamera⁴¹ auf die verwendeten Linsen (*Objektive*) und auf das IR-Fenster, welches einen optischen Zugang von außen in die Vakuumkammer der Messvorrichtung ermöglicht, kalibriert sein. Sollte allerdings nur die relative Temperaturverteilung auf dem Prüfling erfasst werden, so ist das letztere Problem zweitrangig. Gegen die Inhomogenität von Emissionskoeffizienten verwendeter Materialien kann eine dünne

³⁸ Ein Produkt von National Instruments: <http://germany.ni.com/> (Stand 04.04.2012)

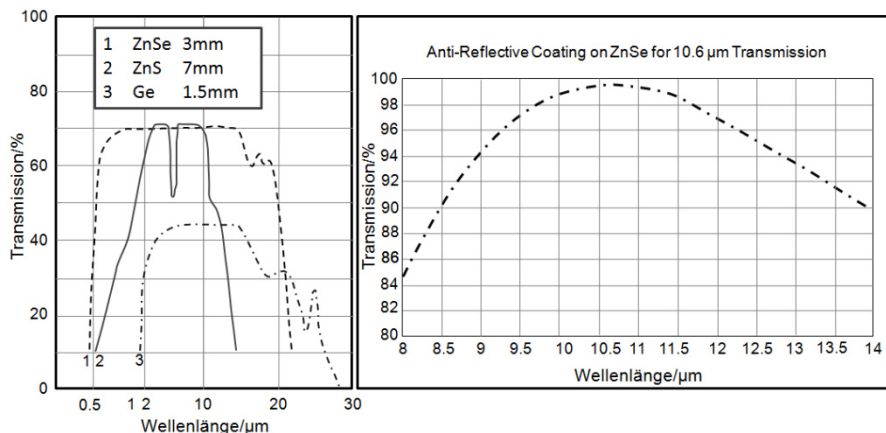
³⁹ Ein Produkt von MathWorks: <http://www.mathworks.de/> (Stand 04.04.2012)

⁴⁰ Die Kontinuität des Temperaturbildes ist durch die Temperatur- und Ortsauflösung der eingesetzten Infrarot-Kamera beschränkt.

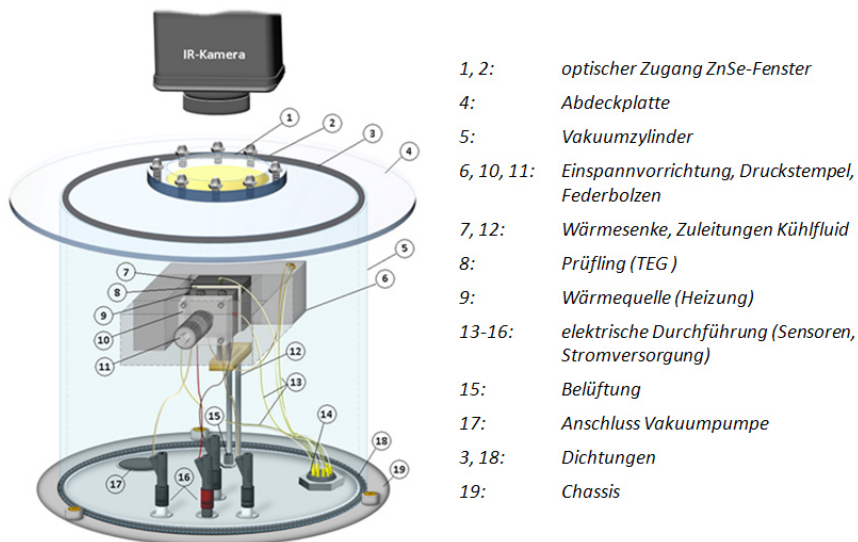
⁴¹ Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde die IR-Kamera von FLIR, Modell: *Thermo-Cam S65* eingesetzt: <http://www.flir.com> (Stand 04.04.2012)

Beschichtung der abstrahlenden Oberflächen mit geeignetem deckendem Lack mit bekanntem Emissions-Koeffizienten Abhilfe leisten.

Abbildung 4.4 Charakteristische Materialeigenschaften von IR-Fenstern



Laut den Herstellerangaben liegt der Spektralbereich der im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten IR-Kamera zwischen 7,5 µm und 13 µm. Um einen optischen Zugang von außen in das Innere der Messvorrichtung für eine langwellige Wärmestrahlung in diesem Spektralbereich zu ermöglichen, wurde ein Sichtfenster aus ZnSe in die Abdeckplatte der Vakuumkammer platziert (vgl. **Abbildung 4.1**). **Abbildung 4.4a** zeigt die Transmissionsverläufe in Frage kommender Materialien zur Herstellung eines IR-Fensters. In dem benötigten Wellenbereich zeigt das ZnSe-Fenster einen linearen Transmissions-Verlauf bei ca. 70 % (nicht entspiegelt). Die Transmissionsbandbreite des Sichtfensters aus Germanium (Ge) liegt zwar auch im Bereich von 7,5 bis 13 µm, dämpft jedoch die Strahlungsintensität deutlich stärker. Das in der Messvorrichtung verbaute ZnSe-Fenster verfügt über eine Antireflexionsbeschichtung, welche die Dämpfung der Strahlungs-Intensität minimiert (vgl. **Abbildung 4.4b**).

Abbildung 4.5 Funktionszeichnung der Messumgebung (Vakuumkammer)

Die Erweiterung der Messvorrichtung mit einer Wärmebildkamera erlaubt eine Draufsicht auf den Prüfling, wie die **Abbildung 4.3** zeigt, im infraroten Spektralbereich. Mit Hilfe einer zweidimensionalen Abbildung der System-Temperaturverteilung können Temperaturgradienten an thermischen Kontaktstellen untersucht werden (vgl. **Abbildung 4.20a, b**). Darüberhinaus sind Defekte an außen liegenden Thermopaaren detektierbar (vgl. **Abbildung 4.20c, d**). Die Temperaturverteilung im Inneren des TEGs und an seinen Flächen orthogonal zum Wärmestrom können mit Hilfe dieser Technik nicht belastbar erfasst werden, da hier eine Summeninformation von überlagerter Wärmestrahlung nach außen getragen wird⁴².

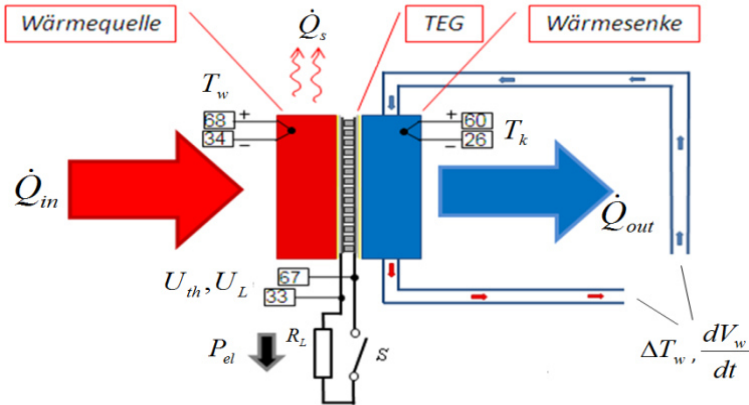
Die oben beschriebenen Funktionsgruppen im Inneren der Vakuum-Kammer skizziert **Abbildung 4.5**.

⁴² Diese Aussage trifft zu bei Halbleitermaterialien, welche bei bestimmten Wellenlängen Infrarotstrahlung durchlassen (Transmission, vgl. 2.2.2).

4.2 Bestimmung thermoelektrischer Systemparameter

Zur optimalen Auslegung thermoelektrischer Generatoranlagen ist die Kenntnis des aufeinander wirkenden elektrischen und thermischen Modulverhaltens in praxisnaher Betriebsumgebung von zentraler Bedeutung. Die an der heißen Seite des Systems zur Verfügung stehende Wärme wird durch das thermoelektrische Generatormodul an die Wärmesenke abgeleitet. Aus den Wärmeströmen \dot{Q}_{in} und \dot{Q}_{out} , verknüpft mit der thermischen Leifähigkeit des TEGs k , resultiert die Temperaturdifferenz zwischen der heißen und kalten Modulseite ΔT . Dabei haben elektrische Moduleigenschaften einen Einfluss auf das thermische Modulverhalten. Zum einen hängen thermische Transporteigenschaften des TEGs von der Höhe des durch das thermoelektrische Material fließenden elektrischen Stroms I_L und damit von der elektrischen Leitfähigkeit des Moduls σ und dem elektrischen Lastwiderstand R_L ab (vgl. (2.18) und (2.20)). Zum anderen ist der Wirkungsgrad des TEGs η_{TEG} als Koeffizient aus elektrischer Ausgangsleistung P_{el} und dem System zugeführten Wärmestrom \dot{Q}_{in} definiert (vgl. (3.38)).

Abbildung 4.6 Systemleistungsbilanz bei der Vermessung eines TEGs



Eine messtechnische Bestimmung elektrischer Systemparameter stellt oft keine Schwierigkeiten dar. Kommerziell erhältliche thermoelektrische Module besitzen zwar einen niedrigen Innenwiderstand ($R_i \approx 0,1-3 \Omega$), sodass der Leitungswiderstand

mitberücksichtigt werden muss. Dieses Problem kann allerdings mit einer zweckmäßigen Kompensations-Schaltung, welche in den zeitgenössischen Messgeräten zur Strom- und Spannungsmessung in der Regel integriert ist, ausgeglichen werden (Anatychuk 2011).

Eine größere Herausforderung stellt die Erfassung von Systemwärmeströmen dar. Unterschiedliche messtechnische Lösungen werden in der Literatur vorgestellt und diskutiert (Rauscher 2005, Vázquez 2003, Anatychuk 2011, Gryadunov 1991). Dabei werden bei der Entwicklung der Messtechnik hauptsächlich zwei Methoden zugrunde gelegt:

1. Eine indirekte Erfassung der Systemwärmeströme mit Hilfe von Messungen der Temperaturverteilung in einem Referenzmaterial in Richtung des Wärmestroms an der kalten und heißen Systemseite.
2. Eine direkte Erfassung der Wärmeleistung, welche der heißen Systemseite zur Verfügung steht (Absolutheizermethode, adiabatische Messung Ohmscher Verlustleistung der Wärmequelle).

Die erste Methode setzt die exakte Kenntnis der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Referenzmaterials und eine homogene Temperaturverteilung orthogonal zum Wärmestrom voraus und führt in der Praxis zu einer Messunsicherheit von bis zu 20% (Snyder 2008, Rauscher 2005). Die Quantifizierung des Wärmetransports durch ein TEG-Modul mit Hilfe des Absolutheizers liefert Messabweichungen von 3 bis 10% (Anatychuk 2011, Rauscher 2005). Bei beiden Messmethoden skaliert die Messabweichung mit der Größe der Modulfläche, der Packungsdichte des thermoelektrischen Materials und der Temperatur der Wärmequelle.

Die Bestimmung thermoelektrischer Parameter der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten TEGs basiert auf einer Kombination der oben beschriebenen Messansätze zur Ermittlung von Systemwärmeströmen. Dabei wird \dot{Q}_{in} (der Wärmestrom welcher vom System absorbiert wird) durch die Integration der Heizleistung über die Schaltzeit des Temperaturreglers und anschließende Mittelwertbildung über die Messdauer ermittelt.

Der Wärmestrom am Ausgang des Systems (\dot{Q}_{out}) wird anhand der gemessenen Größen

$\Delta T_w = T_{wa} - T_{we}$ und \dot{V}_w bestimmt (vgl. 4.1.4). Das Messsystem wird mit Hilfe eines Referenzmaterials über den gesamten Temperaturbereich kalibriert. Die zugrunde liegende Idee zur Evaluierung thermoelektrischer Generatorsysteme zeigt **Abbildung 4.6**. Der konvektive Wärmetransport innerhalb der Messkammer kann bei einem Systemdruck von $< 0,1$ mbar vernachlässigt werden (Lee 2006), sodass folgende

energetische Systembilanz gelten muss:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out} + \dot{Q}_s + P_{el} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.60)$$

Dabei wird der vom System absorbierte Wärmestrom \dot{Q}_{in} positiv und der das System verlassende Wärmestrom \dot{Q}_{out} negativ angenommen. Die einzelnen Summanden aus (4.60) werden folgendermaßen berechnet:

$$\dot{Q}_s = A_h \cdot \varepsilon_h \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.61)$$

$$\dot{Q}_{in} = P_h - \dot{Q}_s - P_{el} = \frac{\hat{U}_h^2}{2 \cdot R_h} - A_h \cdot \varepsilon_h \cdot \sigma \cdot T^4 - I_L^2 \cdot R_L \quad (4.62)$$

$$\dot{Q}_{out} = -c_w \cdot \rho_w \cdot \dot{V}_w \cdot \Delta T_w \quad (4.63)$$

$$P_{el} = \frac{U_L^2}{R_L} = I_L^2 \cdot R_L \quad (4.64)$$

Mit Hilfe der Gesetzmäßigkeiten zur Berechnung von Fehlerfortpflanzung können unter Berücksichtigung von Messfehlern einzelner Größen die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Systemparametern thermoelektrischer Systeme wie folgt abgeschätzt werden:

$$\Delta P_h = \sqrt{\left(\frac{\partial P_h}{\partial \hat{U}_h} \cdot \Delta \hat{U}_h \right)^2 + \left(\frac{\partial P_h}{\partial R_h} \cdot \Delta R_h \right)^2} \quad (4.65)$$

$$\Delta \dot{Q}_s = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_s}{\partial A_h} \cdot \Delta A_h \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_s}{\partial \varepsilon_h} \cdot \Delta \varepsilon_h \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_s}{\partial T} \cdot \Delta T \right)^2} \quad (4.66)$$

$$\Delta \dot{Q}_{out} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial \dot{V}_w} \cdot \Delta \dot{V}_w \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial T_{we}} \cdot \Delta T_{we} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial T_{wa}} \cdot \Delta T_{wa} \right)^2} \quad (4.67)$$

$$\Delta P_{el} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{el}}{\partial U_L} \cdot \Delta U_L\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{el}}{\partial R_L} \cdot \Delta R_L\right)^2} \tag{4.68}$$

Abbildung 4.7 zeigt die TEG-Systeme charakterisierende Messgrößen und die unter Berücksichtigung von Messfehlern zu bestimmenden Systemgrößen. Die maximalen relativen Fehler wurden mit Hilfe von (4.65-4.68) entweder anhand der empirisch ermittelten oder von Herstellern einzelner Messgeräte oder Sensoren angegebenen Messfehlern berechnet.

Abbildung 4.7 Abschätzung der Fehler bei Bestimmung von Systemgrößen

Messgröße	Messfehler/%	Systemgröße	rel. Fehler
\dot{U}_h/V	1,0	P_h/W	2,83%
R_h/Ω	2,0		
R_L/Ω	2,0	$dQ_{in}/dt/W$	3,89%
U_L/V	0,1		
I_L/A	0,2	P_e/W	2,01%
$dV_w/dt/(m^3/s)$	10,0		
dT_w/K	2,0	$dQ_{out}/dt/W$	10,20%
T/K	2,0		
A_h/m^2	1,5	$dQ_s/dt/W$	1,90%
ϵ_h	1,0		

4.3 Beschreibung der Testmethoden

Die im Folgenden vorgestellten experimentellen Untersuchungen von TEG-Systemen sollen einerseits einen Überblick über den Stand der Modultechnik verschaffen, andererseits sollen die daraus gewonnenen Ergebnisse zum Abgleich zwischen den Messungen und den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen dienen. Die durchgeführten Messungen sollen grundsätzlich vier Faktoren hinsichtlich eines praktischen Einsatzes von TEGs zeigen:

- Modul-Charakterisierung unterschiedlicher auf dem Markt erhältlicher TEGs in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen der warmen und kalten Systemseite ΔT bzw. abhängig vom mechanischen Moduldruck

ρ_{mod} . Die hierbei gewonnenen Daten sollen später zum Abgleich des Simulationsmodells, welches die gesamte thermoelektrische Generatoranlage (TEGA) zur Energierückgewinnung aus Abgaswärme abbildet, dienen.

- Die Auswirkung verwendeter Materialien für die thermische Kontaktierung auf die Leistungsfähigkeit und den Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren.
- Der Einfluss modulinterner parasitärer Wärmeströme auf die Leistungsfähigkeit und Wirkungsgrad eines TEGs (Laube 2012) (vgl. 2.2.2 letzter Absatz).
- Die TEG-Design bedingte Streuung thermoelektrischer Modulparameter, bzw. die Reproduzierbarkeit der Messreihen und Fehleranalyse.

Aus der Gesamtschar der Messergebnisse wird anschließend die optimale Variante einer TEGA konzipiert und in ein Simulationsmodell zur Abschätzung von Potentialen thermoelektrischer Generatoranlagen zur Energierückgewinnung aus Abwärme in der Kraftfahrzeugtechnik überführt.

Abbildung 4.8 Eigenschaften untersuchter TE-Module (vergrößert im Anhang)

Probe	b_j/mm	d_j/mm	l_j/mm	l_i/mm	D	N_{tp}	A_{mod}/cm^2
P1	2,5	2,5	1,5	6,17	0,5	126	31
P2	1,63	1,63	1,2	4,7	0,56	263	25
P3	1,8	1,8	1,7	3,8	0,51	161	16
P4	2	2,1	1,4	5,21	0,43	127	25
P5	1,8	1,8	1,6	3,34	0,42	161	25
P6	1,28	1,84	1,47	4,36	0,27	127	16
P7	1,3	1,3	1,4	4,11	0,27	127	16
P8	4	4	9	9	0,45	31	22

Probe	TE-Material	Kapselung	Versiegelung	Maße Modul/mm	Verwendungszweck
P1	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Silikon	56x56x4,1	TEG
P2	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Silikon	50x50x4,3	TEG
P3	Bi_2Te_3	Cu	keine	40x40x2,2	TEC
P4	Bi_2Te_3	Al_2O_3	keine	50x50x3,5	TEC
P5	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Epoxidharz	50x50x4,3	TEG
P6	Bi_2Te_3	Al_2O_3	keine	40x40x3,8	TEG
P7	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Silikon	40x40x3,8	TEC
P8	PbTe	Alumosilikat/Silikon	keine	47x47x9	TEG

Das Diagramm zeigt ein dreidimensionales Modell eines TE-Moduls. Die Abmessungen sind wie folgt definiert: b_s ist die Breite der Oberseite, l_s die Länge der Oberseite, d_s die Dicke des Moduls und l_x die Länge der Unterseite.

Untersucht wurden acht thermoelektrische Module unterschiedlicher Hersteller, verschiedener Geometrie⁴³ und Bestandmaterialien (Proben 1 bis 8). Alle TEGs besaßen eine Isolationsschicht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Kupfer, lediglich Prüfling P8 war nicht isoliert. Die Hälfte der Proben (P1, P2, P5, P7) war seitlich mit Hilfe von Silikon oder Epoxidharz versiegelt. Die restlichen Proben (P3, P4, P, P8) waren seitlich offen. Es wurden TEG-Module auf Basis der Materialpaarung Bi_2Te_3 und PbTe untersucht (vgl. **Abbildung 1.4**). **Abbildung 4.8** gibt einen detaillierten Überblick über die Eigenschaften der untersuchten TEG-Module⁴⁴.

Zur Untersuchung unterschiedlicher thermischer Kontaktmaterialien wurden zwei Typen thermoelektrischer Module verwendet (P1, P7). Beide TEG-Module wurden bei identischen messtechnischen Rahmenbedingungen (Temperatur, Innendruck) mit unterschiedlichen Kontaktmaterialien und unterschiedlichen Systemdrücken untersucht. **Abbildung 4.9** gibt einen Überblick über die Eigenschaften untersuchter Materialien zur thermischen Kontaktierung.

Abbildung 4.9 Eigenschaften untersuchter thermischer Kontaktmaterialien

Bezeichnung	Material	Eigenschaften	Stärke	Wärmeleitf.
GR125	Graphitfolie	heterogene Leitfähigkeit z (x/y)	125 μm	7,5 (>100) W/(mK)
GR250	Graphitfolie	heterogene Leitfähigkeit z (x/y)	250 μm	7,5 (>100) W/(mK)
GR350	Graphitfolie	heterogene Leitfähigkeit z (x/y)	350 μm	7,5 (>100) W/(mK)
GR500	Graphitfolie	heterogene Leitfähigkeit z (x/y)	500 μm	7,5 (>100) W/(mK)
GR800	Graphitfolie	heterogene Leitfähigkeit z (x/y)	800 μm	7,5 (>100) W/(mK)
LP3	Leitpaste	Silikonbasis	50 μm	3 W/(mK)
LP5	Leitpaste	Silikonbasis, graphithaltig	50 μm	5 W/(mK)
LP10	Leitpaste	graphithaltig, dünnflüssig	30 μm	10 W/(mK)
CuSi	Leitpaste	Kupfer- Silizium-Paste	80 μm	195 W/(mK)
MePa	Metallfolie	galiumhaltig	30 μm	82 W/(mK)

Die Messbedingungen, die Präparation der TEGs vor der Messung⁴⁵, die Umgebungstemperatur und der Druck in der Messkammer, wurden für alle Prüflinge

⁴³ Hierbei ist anzumerken, dass alle untersuchten Module die auf dem Markt übliche quadratische Form besaßen. Die geometrischen Unterschiede waren in den Kantenlängen und in der Höhe der Module zu finden.

⁴⁴ Unter „Verwendungszweck“ ist die vom Hersteller angegebene Nutzungsbestimmung zu verstehen (TEG:=Generator, TEC:=Wärmepumpe).

⁴⁵ Alle Prüflinge wurden für die jeweilige Messreihe mit Isopropanol gereinigt und getrocknet.

gleich gehalten. Die Untersuchungen temperaturabhängiger Parameter thermoelektrischer Generatoren auf Bi_2Te_3 -Basis wurden bei einem Messkammerinnendruck von 0,03 mbar durchgeführt. Das Verhalten von Bi_2Te_3 -TEGs in Abhängigkeit vom auf das System wirkenden Anpressdruck wurde bei normalem Raumdruck von ca. 1088 mbar untersucht. Alle Messungen am PbTe-TEG wurden unter einer Argon-Schutzatmosphäre bei Normaldruck durchgeführt.

4.4 Auswertung der Messreihen

Die folgende Messdatenauswertung dient zur Beschreibung des Verhaltens thermoelektrischer Generatoren in praxisnaher Betriebsumgebung. Dabei werden die von der Temperatur und dem Systemdruck abhängigen TEG-Parameter beim quasistationären und dynamischen Systemverhalten dargestellt und diskutiert. Anschließend wird eine optimale Kombination von Nieder- und Hochtemperatur-Modulen zur Realisierung einer Generatoranlage zur Rekuperation thermischer Energie aus Abgasen verbrennungsmotorgetriebener Fahrzeuge ausgewählt und die gemessenen Parameter später auf das vorgestellten Simulationsmodell übertragen (vgl. 5.3.2).

4.4.1 Messreihen zum thermoelektrischen Systemverhalten

Die Effizienz thermoelektrischer Generatoren hängt maßgeblich von der Qualität der Systemintegration aus thermischer und aus elektrischer Sicht ab. Die nachfolgend vorgestellten Messergebnisse sollen das typische Verhalten thermoelektrischer Module aufzeigen und systemrelevante Kennlinien unterschiedlicher Module insbesondere für die elektrische Systemintegration liefern.

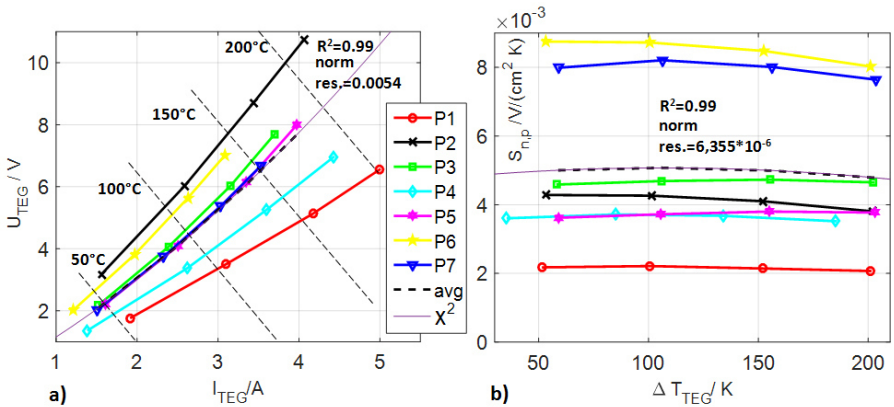
Temperaturabhängige elektrische Modulkenlinien

Die I - U -Kennlinie beschreibt bei klassischen Zweipolen (*Eintor, one-port*) den Zusammenhang zwischen den elektrischen Systemgrößen Strom und Spannung beim Betrieb des Bauelements. Die Kenntnis von I - U -Kennlinien ist bei der Anpassung elektrischer Quellen an die Verbraucher von zentraler Bedeutung.

Thermoelektrische Generatoren stellen zwar aus elektrischer Sicht Zweipole dar, auf der Systemebene wirken sie jedoch als Zweitore oder aktive Vierpole, weil sie sowohl elektrische als auch thermische Ein- und Ausgänge besitzen (vgl. **Abbildung 3.2**). Da die elektrische Spannung bei TEGs aufgrund der durch Thermodiffusion bedingten Bewegung elektrischer Ladungsträger erzeugt wird, scheint hier die U - I -Darstellung

sinnvoller. Die U - I -Kennlinien aller vermessenen Generatoren im gesamten Betriebstemperaturbereich haben übereinstimmend einen quadratischen Charakter, was auf den Zusammenhang zwischen der Temperaturverteilung im Modul aufgrund der Jouleschen Wärme zurückzuführen ist (vgl. (2.4), (2.17), (3.43) bzw. (3.44)). Die Streuung der Kennlinien ist dadurch zu erklären, dass die untersuchten TE-Module unterschiedliche Innenwiderstände aufweisen.

Abbildung 4.10a) U - I -Kennlinien und b) differentieller Seebeck-Koeffizient

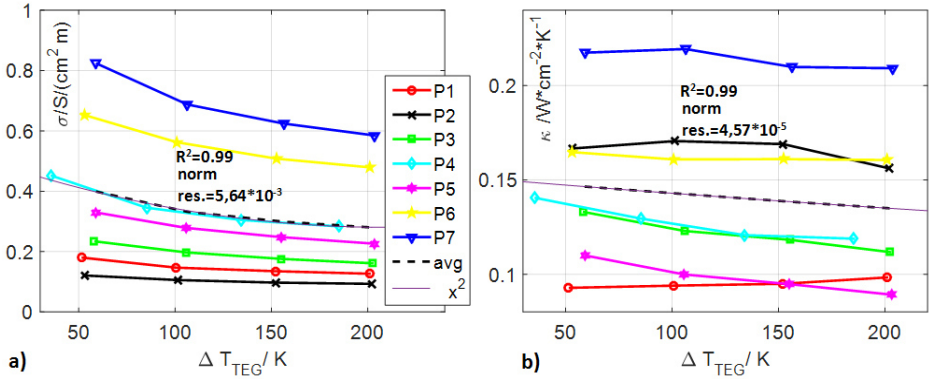


Die mittlere U - I -Kennlinie der untersuchten TE-Module kann nach der quadratischen Interpolation wie folgt beschrieben werden (siehe auch **Abbildung 4.10a**):

$$U_{\max}(I_{\max}) = 0,163 \cdot \frac{V}{A^2} \cdot I_{\max}^2 + 1,382 \cdot \frac{V}{A} \cdot I_{\max} + 0,387 \cdot V \tag{4.69}$$

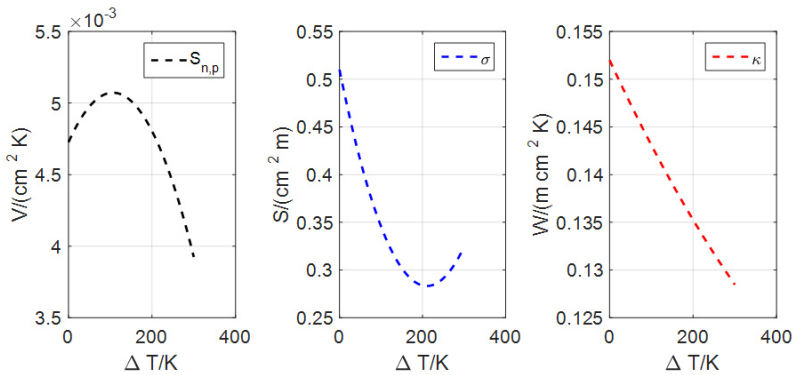
Da die Flächen sowie die Packungsdichten der untersuchten TEGs teilweise stark unterschiedlich ausfallen (vgl. **Abbildung 4.8**), werden die thermoelektrischen Systemgrößen in folgenden Auswertungen immer auf die orthogonal zum Wärmestrom stehende normierte Fläche des thermoelektrischen Materials bezogen. Die Systemgrößen einzelner Prüflinge können dann unter Berücksichtigung der jeweiligen Modulfläche und entsprechenden Packungsdichte ermittelt werden.

Abbildung 4.11 a) Elektrische und b) thermische Leitfähigkeiten



Die elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten sowie die differentiellen Seebeck-Koeffizienten haben eine direkte Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit und den Wirkungsgrad der untersuchten thermoelektrischen Generator-Module (vgl. (3.34) und (3.37)).

Abbildung 4.12 Interpolation von $S_{n,p}$, σ und κ in Abhängigkeit von Temperatur



Die mittleren Kennlinien von σ , κ und $S_{n,p}$ werden später zur Abbildung einer thermoelektrischen Generatoranlage (TEGA) im Abgasstrang von Kraftfahrzeugen

eingesetzt, weshalb sie hier explizit festgehalten werden sollen (siehe **Abbildung 4.10b** und **Abbildung 4.11**). Die quadratische Interpolation der Mittelwerte von Messdaten liefert folgende Zusammenhänge (vgl. **Abbildung 4.12** und siehe auch Perez-Aparicio 2007):

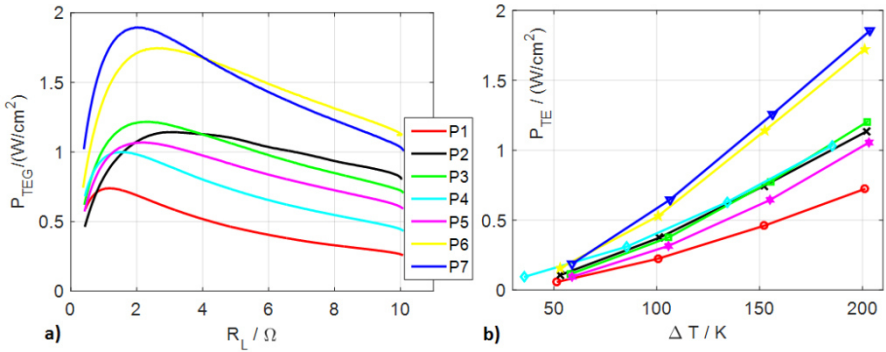
$$S_{n,p}(T) = \left(-3,062 \cdot 10^{-8} / K^2 \cdot T^2 + 6,514 \cdot 10^{-6} / K \cdot T + 4,726 \cdot 10^{-3} \right) \frac{V}{cm^2 K} \quad (4.70)$$

$$\sigma(T) = \left(5,121 \cdot 10^{-6} / K^2 \cdot T^2 - 2,155 \cdot 10^{-3} / K \cdot T + 0,51 \right) \frac{S}{cm^2 m} \quad (4.71)$$

$$\kappa(T) = \left(5,27 \cdot 10^{-8} / K^2 \cdot T^2 - 9,424 \cdot 10^{-5} / K \cdot T + 0,152 \right) \frac{W}{cm^2 mK} \quad (4.72)$$

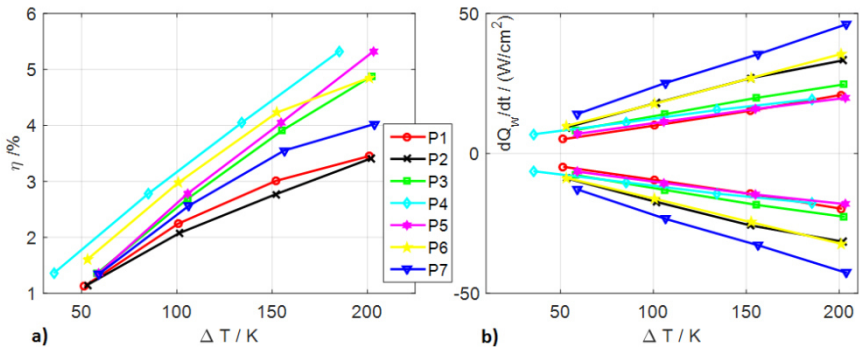
Aus den Messungen der elektrischen Leistungsanpassung können die Innenwiderstände einzelner TE-Module bestimmt werden. Die Innenwiderstände der Prüflinge sind an Maxima der Leistungskurven an der R_L -Achse ablesbar (vgl. **Abbildung 4.13a**). Die teilweise starken Streuungen der maximalen Ausgangsleistungen und somit die der Innenwiderstände lassen sich mit unterschiedlichen Längen der Thermopaare und mit Abweichungen in der Materialverarbeitung und Modulherstellung begründen (z.B.: unterschiedliche Dotierung des Halbleitermaterials, unterschiedliche Verbindungsmaterialien vom Halbleiter zur Leiterbrücke, verschiedene Methoden zur thermischen Kontaktierung innerhalb der Module usw.). Die maximalen Ausgangsleistungen von thermoelektrischen Generatoren verschiedener Hersteller unterscheiden sich unter Verwendung identischer thermoelektrischer Materialien (hier Bi_2Te_3) um bis zu 60% (vgl. **Abbildung 4.13b**).

Abbildung 4.13 a) Leistungsanpassung und b) Ausgangsleistung $P_{TEG}(\Delta T)$



Abbildungen **Abbildung 4.13b** und **Abbildung 4.14** verdeutlichen den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Wirkungsgrad, elektrischer Leistung und dem Systemwärmestrom in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz im Betrieb thermoelektrischer Generatoren.

Abbildung 4.14 a) Wirkungsgrade und b) Systemwärmeströme TEGs

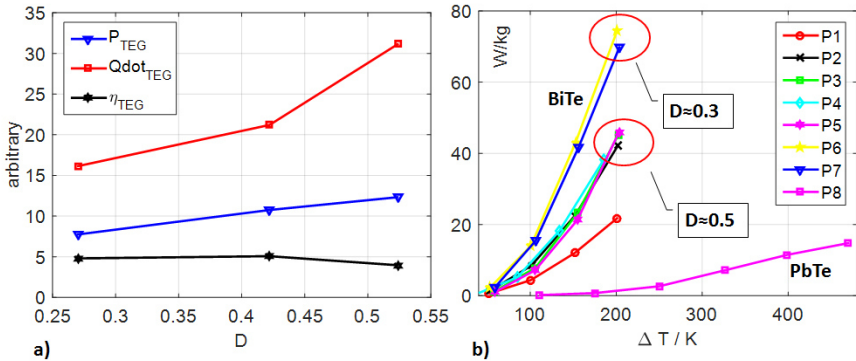


Die Modularchitektur und die Material- sowie die Verarbeitungsqualität hauptsächlich an den Grenzschichten zwischen den unterschiedlichen Materialien ist ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit thermoelektrischer Generatoren. Unter Verwendung

identischer Materialien schwanken die Wirkungsgrade untersuchter Generatoren bis zu $\pm 30\%$. Eine optimale Auslegung thermoelektrischer Generatormodule ist immer von ihrer speziellen Verwendung abhängig. Ein Gütefaktor G_{TEG} zur Bewertung thermoelektrischer Generatoren für den Einsatz in der Kraftfahrzeugtechnik könnte folgendermaßen beschrieben werden:

$$\left[G_{TEG} = \frac{P_{el}}{m_{TE}} \cdot \eta_{TEG} = \frac{P_{el}^2}{V_{TE} \cdot \rho_{TE} \cdot \dot{Q}_{in}} \right] = \frac{W}{kg} \tag{4.73}$$

Abbildung 4.15 Leistungseigenschaften in Abhängigkeit der Packungsdichte TEG



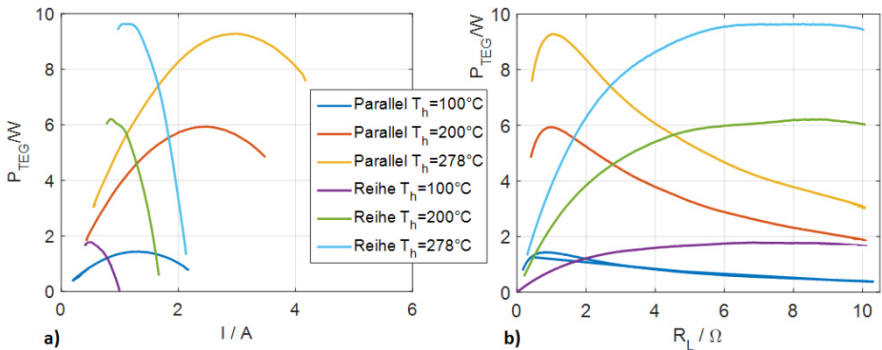
Für die technische Bewertung thermoelektrischer Generatormodule wird also hier die im Modul verarbeitete Masse des thermoelektrischen Materials ins Verhältnis zur elektrischen Ausgangsleistung und des elektrischen Modulwirkungsgrads gesetzt (vgl. auch Rowe 2011). Die Packungsdichte der Thermopaare im jeweiligen Modul wird somit indirekt mitberücksichtigt. Die Wirtschaftlichkeit der Module kann anhand der Materialkosten (€/kg) bewertet werden. **Abbildung 4.15** zeigt den Einfluss der Packungsdichte und der Masse des Materials auf die Güte der Module (b) sowie auf die einzelnen thermoelektrischen Modulparameter (a).

Skalierung des Innenwiderstandes für die Leistungsanpassung

Wie oben bereits kurz angesprochen, weisen TEGs in Abhängigkeit von ihrem Innenwiderstand unterschiedliche Kurven bei der Leistungsanpassung auf (vgl.

Abbildung 4.13a). Dabei hat die Steilheit der $P_{el}(R_L)$ -Kurve in der Nähe ihres Maximums praktisch relevanten Einfluss auf die Qualität der einzusetzenden DC/DC-Wandler zur Anpassung der generierten Leistung an das Verbrauchernetz. Je steiler die $P_{el}(R_L)$ -Kurve, desto präziser und schneller müssen die Wandler ausgelegt werden, um eine optimale Signalkonditionierung zu erreichen (vgl. Tatarinov 2012b). Bei einem Zusammenschluss mehrerer TEGs zu einer Generatoranlage (TEGA) stellt sich häufig die Frage nach einer sinnvollen elektrischen Aufteilung und der Verbindung solcher TEG-Kaskaden. **Abbildung 4.16** zeigt das Ergebnis eines Experiments, in dem drei identische Prüflinge (P2) in einem Fall elektrisch parallel und im anderen Fall in Serie miteinander verbunden und bei sonst identischer Systemumgebung auf Leistungsanpassung vermessen wurden. Die $P_{el}(R_L)$ -Kennlinien zeigen, wie erwartet, deutliche Unterschiede der Leistungsverläufe zwischen der Parallel- und Reihenschaltung der Prüflinge. Die Maximalleistung der Reihenschaltung ist etwas höher als die der Parallelschaltung, was mit dem Einfluss parasitärer Peltier-Ströme zu erklären ist (vgl. 3.2.2). Die deutlich flacher verlaufenden Leistungs-Kurven der Reihenschaltung in der Nähe ihrer Maxima bieten mehr Freiheitsgrade bei der Anpassung der elektrischen Ausgangs-Leistung der TEG-Kaskaden an das Verbrauchersystem.

Abbildung 4.16 Leistungsanpassung bei Reihen- und Parallelschaltung von TEGs



Einfluss von thermischer Kontaktierung und Druckverteilung auf die Leistungsfähigkeit thermoelektrischer Systeme

Zwei Prüflinge verschiedener Hersteller wurden näher untersucht, um den Zusammenhang zwischen den verwendeten Materialien zur thermischen Kontaktierung

der TE-Module an die Wärmequelle (bzw. -senke) und der elektrischen Ausgangsleistung des Systems zu zeigen (vgl. auch Tatarinov 2012b). Beide Messreihen liefern übereinstimmende Ergebnisse, die besagen, dass nicht die absolute thermische Leitfähigkeit der hierzu verwendeten Materialien, sondern ihre Struktur und Elastizität, die Fähigkeit also, die Hohlräume zwischen dem TEG und der Wärmesenke zu schließen, für eine optimale thermische Ankopplung ausschlaggebend sind (vgl. **Abbildung 4.17**).

Abbildung 4.17 Einfluss thermischer Kontaktierung auf die Leistung eines TEGs

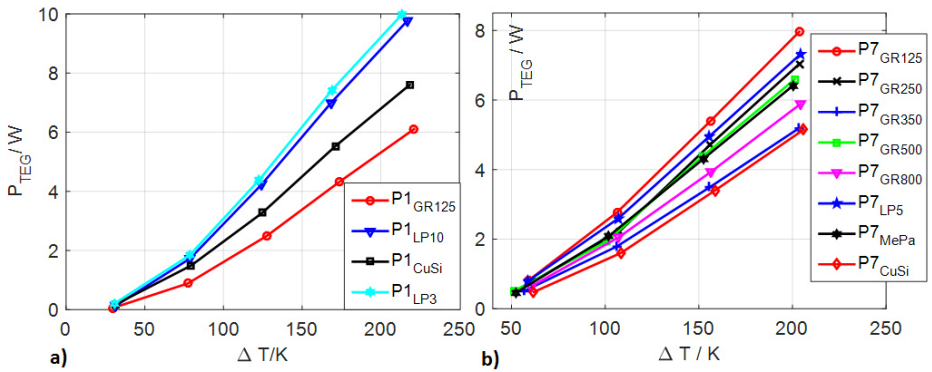


Abbildung 4.18a verdeutlicht die thermische Ausdehnung eines TE-Moduls bei $\Delta T=0$ und bei maximaler Temperatur der Wärmequelle. Die gefärbten Flächen des Prüflings zeigen die Intensität des Anpressdrucks an. Gleichzeitig ist die Inhomogenität der Druckverteilung auf den Modulflächen bei Nenndruck deutlich sichtbar, was auf die relativ hohen Toleranzen der Oberflächenbeschaffenheit hindeutet und hier einen Optimierungsbedarf aufzeigt. Die Wirkung des Systemdrucks auf die Ausgangsleistung des Systems wird aus der **Abbildung 4.18b** sichtbar. Dabei steigt die generierte Leistung aufgrund der Erhöhung des Systemwärmestroms bei elastischen Kontaktmaterialien mit zunehmendem Druck (GR125-800). Die Eigenschaften flüssiger Materialien zur thermischen Ankopplung bleiben bei steigendem Druck etwa konstant (LP5, MePa, CuSi).

Abbildung 4.18 a) Druckverteilung am Modul, b) Ausgangsleistung $P_{TEG}(\Delta p)$

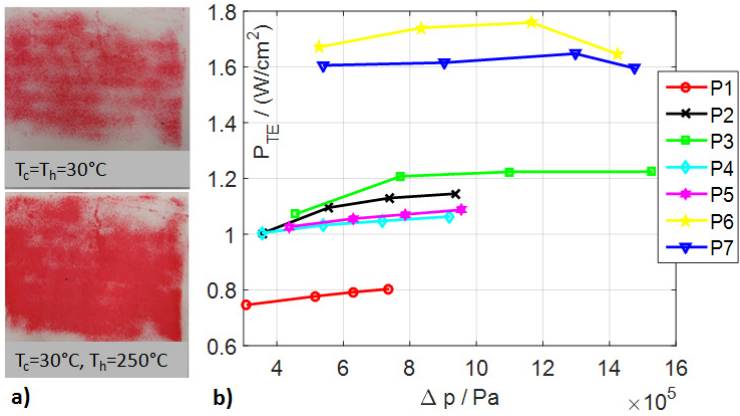
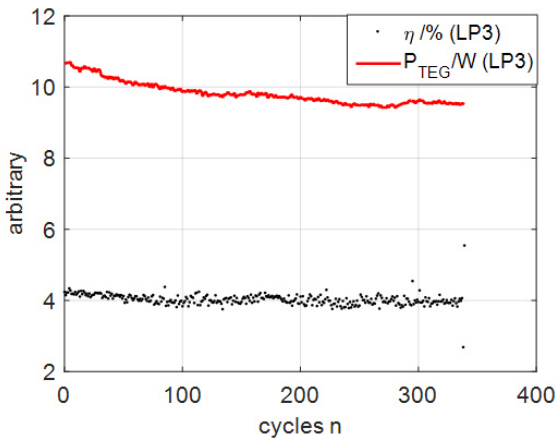


Abbildung 4.19 Modul-Degradation bei zyklischer Belastung



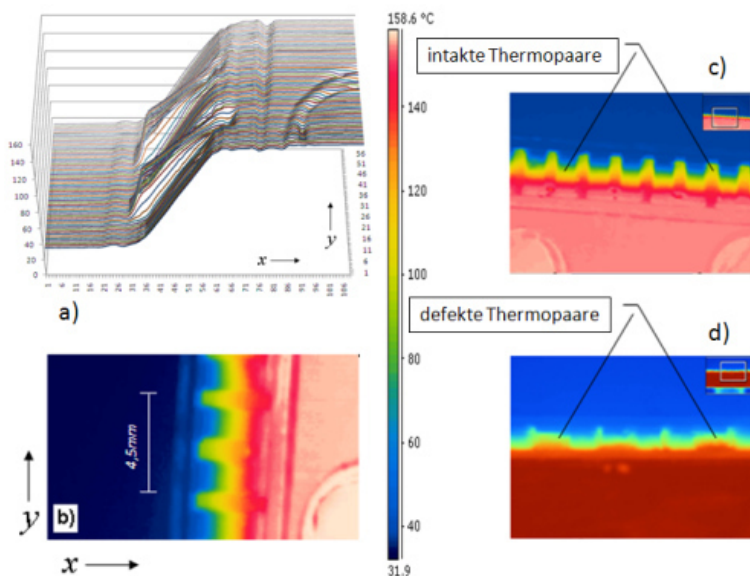
Gerade der Einsatz thermoelektrischer Generatoren im Automobilbereich verlangt nach hoher zyklischer Stabilität. Das in der

Abbildung 4.19 dargestellte Untersuchungsergebnis zeigt das Modul-Verhalten bei zyklischer Belastung in den ersten 48 Betriebsstunden des Prüflings (P1). Bei diesem

Experiment wurde die Wärmequelle periodisch auf T_{\max} aufgeheizt und anschließend auf T_k abgekühlt. Diese Untersuchung zeigt einen Leistungsabfall des Prüflings um ca. 13 %, wobei der Wirkungsgrad in etwa konstant bleibt. Diese Beobachtung deutet auf eine Ausformung thermischer Kontaktflächen hin und nicht auf die Degradation des TE-Materials (vgl. auch Hatzikraniotis 2010).

Untersuchungen auf lokale Moduldefekte lassen sich unter anderem mit Hilfe von Thermografie durchführen. So lassen sich homogene Materialeigenschaften von Thermoschenkeln durch die Beobachtung der Temperaturverteilung auf den Stirnflächen der Module überprüfen (**Abbildung 4.20a, b**). Eine nicht optimale Auswahl von Verbundmaterialien wie z.B. Materialien mit stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder eine ungünstige Geometrie von Thermoschenkeln führt gerade bei einer zyklischen thermischen Modulbelastung zum Bruch von Thermopaaren. Der Unterschied zwischen intakten und beschädigten Thermoschenkeln kann auf den Infrarotbildern in **Abbildung 4.20c, d** beobachtet werden.

Abbildung 4.20 Messungen mit Hilfe von Thermografie



4.4.2 Kombination von Nieder- und Hochtemperaturmodulen

Thermoelektrische Systeme zur Rekuperation thermischer Energie aus Abgasen verbrennungsmotorgetriebener Fahrzeuge müssen neben den zahlreichen Anforderungen zur Systemintegration einen weiten Betriebstemperaturbereich abdecken (ideal 250 bis 1100 K). Etablierte Materialpaarungen zur Herstellung thermoelektrischer Generatoren funktionieren jedoch nur in bestimmten Teilabschnitten dieses Temperaturbereichs mit zufriedenstellenden Wirkungsgraden (vgl. **Abbildung 1.4**). Zur Herstellung einer effizienten thermoelektrischen Generatoranlage (TEGA) für den Kfz-Bereich müssen daher unterschiedliche thermoelektrische Materialien kombiniert werden. Eine bekannte Methode zur Kombination unterschiedlicher Materialien ist die Segmentierung thermoelektrischer Schenkel (vgl. **Abbildung 3.1**). Denkbar ist ebenfalls der Einsatz separater Generatorblöcke auf Basis unterschiedlicher Materialien, die dynamisch je nach Motorlast selektiv mit dem Abgas angeblasen werden⁴⁶. In später folgenden Berechnungen wird ein solches TEGA-Simulationsmodell basierend auf einem Bi_2Te_3 -PbTe Modulhybrid vorgestellt. Die charakteristischen Eigenschaften beider Modulfamilien, die für die Simulation maßgeblich sind, sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Elektrische Charakteristik und Leistungsanpassung

Abbildung 4.21 macht die Unterschiede der elektrischen Charakteristik der untersuchten Bi_2Te_3 und PbTe Module sichtbar. PbTe TEGs besitzen aufgrund einer relativ niedrigen Anzahl von Thermopaaren einen deutlich niedrigeren Innenwiderstand und liefern somit bei gleicher Leistung höhere Ströme und generieren dabei mehr Verluste in Form von Joule- und Peltier-Wärme. Abhilfe könnte hier die Erhöhung der Anzahl von Thermopaaren im Modul bei konstant bleibender Materialfläche und Packungsdichte schaffen, soweit die Materialstabilität es zulässt. Dadurch würde sich bei konstant bleibender Leistung die Ausgangsspannung der Module erhöhen und der Strom fallen, womit sich auch die Ohmschen- und Peltier-Verluste reduzieren ließen. Die Überlappung temperaturabhängiger thermoelektrischer Eigenschaften von Nieder- und Hochtemperaturmodulen veranschaulicht die **Abbildung 4.22**. Hier wird auch deutlich, dass die Bi_2Te_3 -Module bei niedrigen Temperaturen mit besseren Wirkungsgraden arbeiten.

⁴⁶ Industrielle Prototypen thermoelektrischer Generatorsysteme für den Einsatz in der Kraftfahrzeugtechnik auf Basis von Bi_2Te_3 sehen z.B. einen Bypass vor, um die Überhitzung der Module zu verhindern (Häfele 2011).

Abbildung 4.21 a) Leistungsanpassung und b) U-I-Kennlinien (Bi_2Te_3 und PbTe)

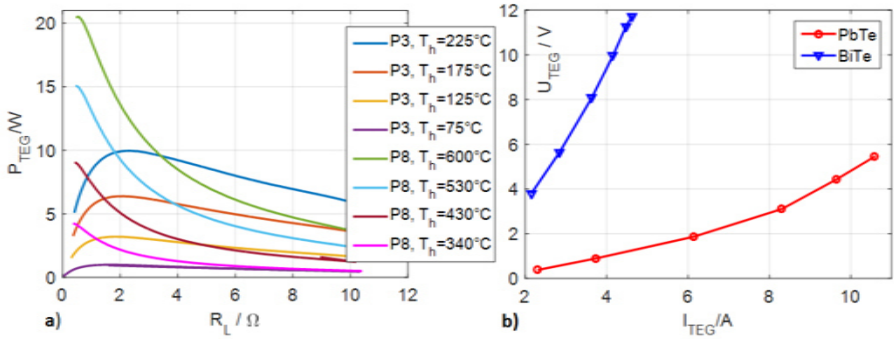
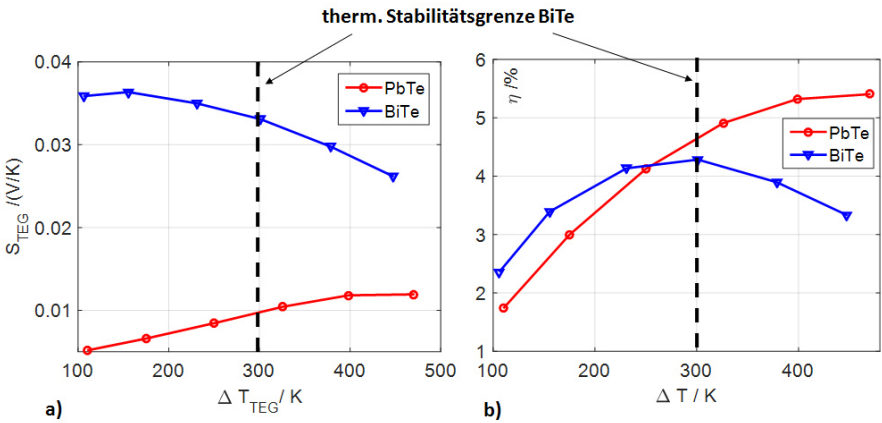


Abbildung 4.22 a) Diff. Seebeckkoeffizient, b) Wirkungsgrade (Bi_2Te_3 und PbTe)



Die im Rahmen dieser experimentellen Untersuchungen gewonnenen TEG beschreibenden Parameter bilden später im Kapitel 5 die Basis zur Abbildung einer thermoelektrischer Generatoranlage in der Simulationsumgebung zur Abschätzung des Ertrags der aus der Abgaswärme rückgewonnenen Energie. Deshalb sollen an dieser Stelle auch die Verläufe der elektrischen Leitfähigkeit und die thermischen Leitwerte unterschiedlicher Modulgattungen festgehalten werden (vgl. **Abbildung 4.23**).

Abbildung 4.23 a) el. Leitfähigkeit und b) therm. Leitwert (Bi_2Te_3 und PbTe)

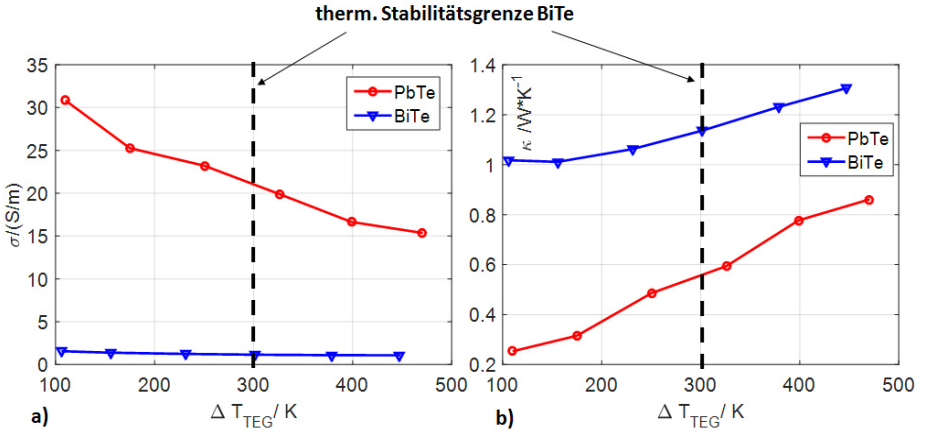
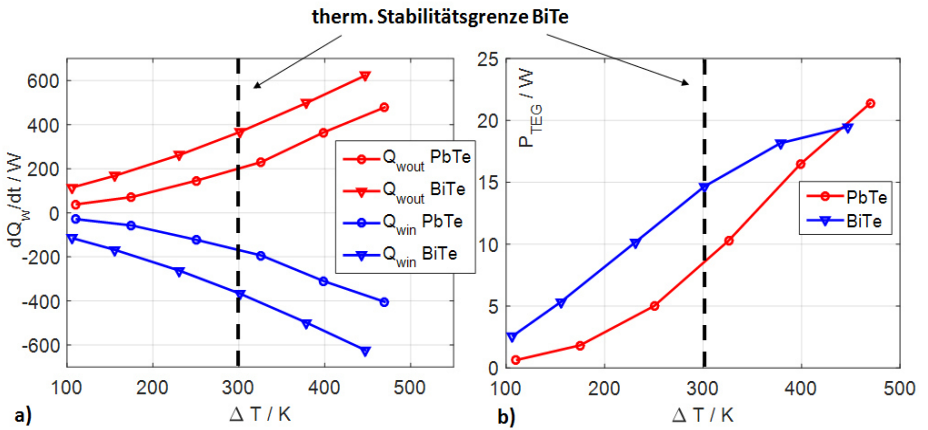


Abbildung 4.24 a) Systemwärmeströme, b) el. Leistung (Bi_2Te_3 und PbTe)



Die quantitative Beschreibung der Aufnahme von Wärmeströmen durch die TE-Generatoren bei gegebener Temperaturdifferenz und der daraus konvertierten elektrischen Leistung stellt die Grundlage zur Berechnung des gesamten Generatorsystems dar. Das zu erstellende Simulationsmodell stützt sich in der Beschreibung einzelner Generatoren auf die hier empirisch ermittelten Kennlinien (vgl. **Abbildung 4.21b**, **Abbildung 4.22a** und **Abbildung 4.23**) und wird mit Hilfe gemessener Systemgrößen (vgl. **Abbildung 4.21a**, **Abbildung 4.22b** und **Abbildung 4.24**) evaluiert und angepasst.

Auswertung dynamischer Messreihen (NEFZ)

Die Temperaturverläufe T_g der Abgase beim Durchfahren des NEFZ⁴⁷-Fahrzyklus eines 4-Zylinder Mittelklasse- und eines 6-Zylinder Oberklassefahrzeugs wurden an unterschiedlichen Stellen der Abgasanlage (AGA) aufgezeichnet und verglichen (vgl. auch Häfele 2011). Die Messwerte des 4-Zylinder Fahrzeugs waren dabei mit den Messwerten des einen Strangs der doppelstrahligen AGA des 6-Zylinder Fahrzeugs vergleichbar (es handelte sich um etwa die Hälfte der Motorabwärme). Die Temperaturverläufe der Kühlsysteme beider Fahrzeuge wurden ebenfalls aufgenommen und als Kennlinie für die Messapparatur hinterlegt. Die Heißeitentemperatur T_h ist nach dem Ausdruck

$$T_h = T_g \cdot (1 - x) \quad (4.74)$$

skaliert, um den Temperaturgradienten in Bewegungsrichtung des Abgases in der TEGA nachzubilden (vgl. **Abbildung 4.25a** und **Abbildung 5.11**) und als dynamischer Sollwert dem Temperaturregler der Wärmequelle der Messanlage vorgegeben. Die aufgenommenen Wärmeströme sowie die daraus generierte elektrische Leistung sind in den **Abbildung 4.25b** und **Abbildung 4.26a** dargestellt.

⁴⁷ NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEDC: New European Driving Cycle) ist ein synthetischer Fahrzyklus zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen. (vgl. 5.3.3)

Abbildung 4.25 a) Temperaturverlauf $T_h(t)$, b) Wärmestrom durch TEGs (NEFZ)

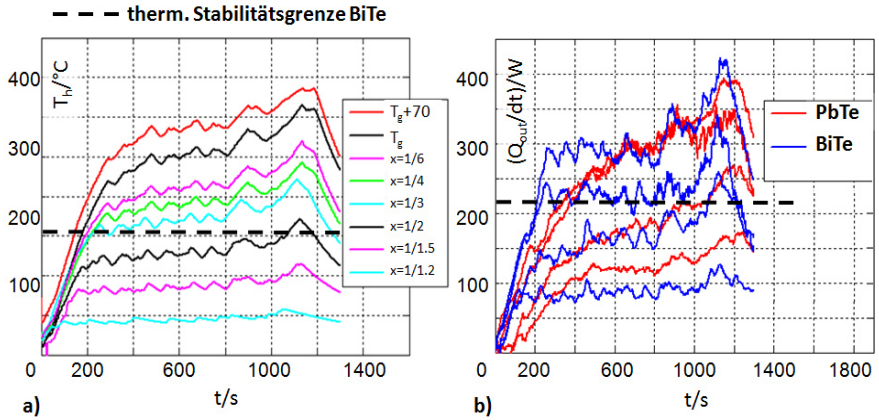
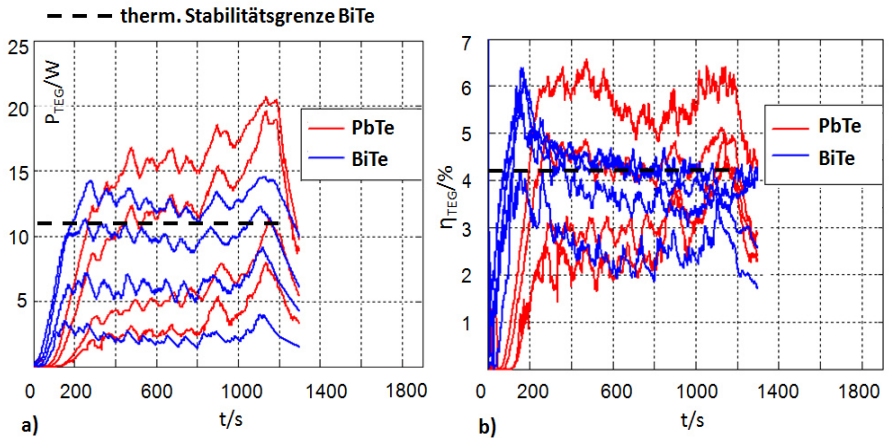


Abbildung 4.26 a) el. Leistung NEFZ, b) Wirkungsgrade (Bi_2Te_3 und PbTe)



Deutlich sichtbar arbeiten die Bi_2Te_3 basierten TEGs im niedrigen Temperaturbereich (ca. 273-573 K) mit besseren Wirkungsgraden als die PbTe-Generatormodule, weshalb gerade bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten (z.B.: Innerortsverkehr) aufgrund von relativ geringen Abgastemperaturen auf eine Bi_2Te_3 -Komponente nicht verzichtet werden kann (vgl. **Abbildung 4.26b**).

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen geben eine detaillierte Auskunft über das stationäre temperatur-, druckabhängige sowie das dynamische Systemverhalten thermoelektrischer Generatormodule unterschiedlicher Hersteller auf Bi_2Te_3 - bzw. PbTe-Basis. Verschiedene Materialien zur thermischen Kontaktierung von TEGs an Wärmetauschersysteme wurden ebenfalls quantitativ charakterisiert. Das elektrische und thermische Systemverhalten einzelner thermoelektrischer Generatoren konnte als Bauelementkennlinien aufgenommen sowie die grundlegenden Zusammenhänge zur elektrischen Gruppierung einzelner TEGs innerhalb der Generatoranlage beleuchtet werden.

Bereits jetzt konnte gezeigt werden, dass der Einsatz unterschiedlicher thermoelektrischer Materialpaarungen, angepasst an den Betriebstemperaturbereich der Anwendung, zur Maximierung der Energieausbeute aus dem Abgas unabdingbar ist, da keine bekannten thermoelektrischen Materialien zur Verfügung stehen, welche den gesamten Temperaturbereich zufriedenstellend abdecken (vgl. **Abbildung 1.4 Thermoelektrische Materialien (Stand der Technik) (Yang 2009)**). Der Einsatz thermoelektrischer Generatoranlagen, welche lediglich auf Basis eines Materialpaars aufgebaut sind, würde keine zufriedenstellende Ergebnisse liefern.

Die hier aufgezeichneten Messdaten dienen als Grundlage zur der im nächsten Kapitel dargestellten Simulation einer thermoelektrischen Generatoranlage im Pkw.

5 Thermoelektrische Energierückgewinnung im Pkw

Die Potentiale von Rückgewinnung der bei Verbrennungsprozessen eines Otto-Motors entstehenden Abwärme mit Hilfe von thermoelektrischen Generatoranlagen (TEGA) sollen im folgenden abschließenden Kapitel aufgezeigt und diskutiert werden. Dazu wird ein Simulationsmodell vorgestellt, welches eine dynamische, Fahrzyklus- und Fahrzeugtypabhängige Berechnung von Kraftstoff- und somit von CO₂-Austoß-Einsparpotentialen ermöglicht. Die Wirtschaftlichkeit von TEGA in Pkw wird anhand von Berechnungen ausgewählter Fahrzeugtypen in Verbindung mit unterschiedlichen Fahrzyklen und unter Berücksichtigung der legislativen Vorgaben zu CO₂-Grenzwerten bewertet.

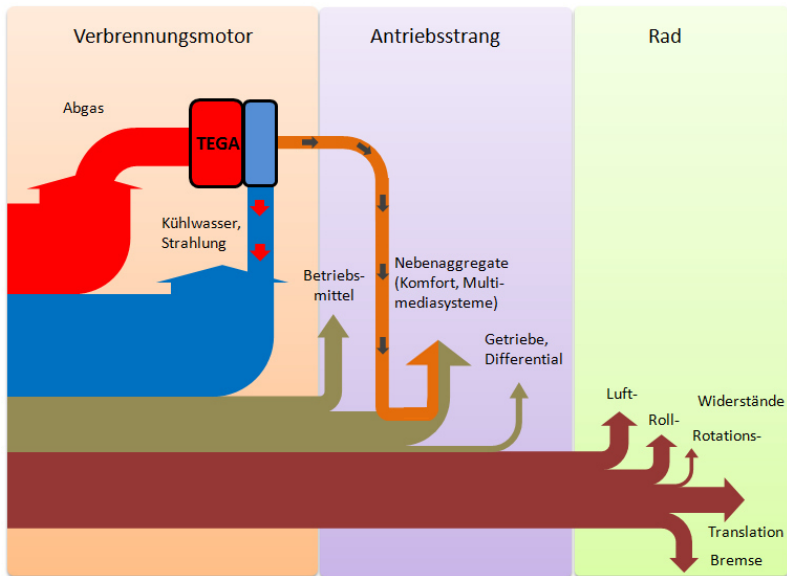
5.1 Identifizierung potentieller Abwärmequellen im Antriebsstrang

Die Wandlung von der im Kraftstoff chemisch gebundenen Energie in mechanische Arbeit mittels Wärmekraftmaschinen ist immer mit Verlusten behaftet. Der mechanische Wirkungsgrad moderner Verbrennungsmotoren für den Einsatz im Pkw beträgt etwa 28-37 % (Brauner 2009). Die restliche Energie wird durch das Abgas und durch das Kühlsystem in Form von Wärme zum großen Teil ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Thermoelektrische Generatoren arbeiten im Hinblick auf die Energierückgewinnung aus Abwärme und je nach verwendetem Basismaterial ab einer Systemtemperaturdifferenz von ca. 70 K mit technisch signifikanten Wirkungsgraden, sodass die Hauptquelle von rekuperierbarer Abwärme die Abgasenthalpie darstellt.

Die Rückgewinnung der im Kühlkreislauf zur Verfügung stehenden thermischen Energie liefert aufgrund relativ niedriger Temperaturdifferenz nur etwa ein Zehntel der aus der Abgasenthalpie rückgewonnenen Energie (Kim 2011). Auch kraftstoffrückführende Leitungen bei Dieselfahrzeugen sowie Motoröl oder Bremssysteme können prinzipiell als Wärmequellen fungieren, fallen aber entweder aufgrund zu niedriger energetischer Potentiale (Temperatur, Massenströme, Wärmekapazitäten) oder wegen schlechter technischer Realisierbarkeit aus der Betrachtung heraus (Rosendahl 2012). **Abbildung 5.1** zeigt den Energiefluss eines Kraftfahrzeugs und die grundlegende Idee von thermoelektrischer Energierückgewinnung.

Die potentielle Kraftstoffeinsparung resultiert aus der mechanischen Entlastung des Generators um den Anteil der durch TEGA generierten elektrischen Leistung unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads des Generators (vgl. **Abbildung 5.12**). Die mit Hilfe von Thermoelektrik aus dem Abgas rückgewonnene Energie liegt also in elektrischer Form vor und muss auch vollständig durch die Verbraucher oder Batterie abgenommen werden, um die maximale Kraftstoffverbrauchsreduktion zu gewährleisten.

Abbildung 5.1 Energiefluss im Pkw und die Ergänzung durch TEGA



Die elektrischen Verbraucher eines Kraftfahrzeugs können zunächst in Dauer-, Langzeit- und Kurzzeitverbraucher eingeteilt werden, wobei sich die Grundlast aus den ersten beiden Gruppen und die Spitzenlast aus dem gesamten elektrischen Energiebedarf aller Verbraucher zusammensetzt. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugkomponenten (Motormanagement, Sicherheits- und Komfortsysteme) hat sich der Energiebedarf elektrischer Verbraucher in Pkw in der letzten Dekade etwa verdreifacht (Fabis 2006). Für weitere Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass bei zeitgenössischen Fahrzeugen der Mittel- und oberen Mittelklasse die Dauerlast bei 760 W, die Grundlast bei etwa 1,3 kW und die Spitzenlast bei ca. 6,3 kW liegt (vgl. **Abbildung 5.2**).

Abbildung 5.2 Einteilung elektrischer Verbraucher im Pkw (Riedl 2005, Hesse 2011)

Dauerverbraucher	P_{el}/W	Kurzzeitverbraucher	P_{el}/W
Zündung	20	Blinkleuchte	21
el. Kraftstoffpumpe	60	Bremsleuchte	42
e. Kraftstoffeinspritzung	60	Deckenleuchte	5
Gebälse Lüftung/Klimatisierung	190	el. Fensterheber	150
Motormanagement	180	el. Kühlaggregat	200
el. Wasserpumpe	250	el. Schiebedach	175
		Heckscheibenheizung	120
Langzeitverbraucher	P_{el}/W	Heckscheibenwischer	35
		Hörner und Fanfaren	30
Autoradio	15	Motorantenne	60
Navigationssystem	15	Nebelscheinwerfer	45
Begrenzungsleuchten	4	Rückfahrleuchte	44
Instrumentleuchten	2	Scheiben- u. Scheinwerferreinigung	70
Kennzeichenleuchte	10	el. Sitzverstellung	125
Parkleuchte	5	el. Spiegelverstellung	20
Scheinwerfer Abblend-/Fernlicht	120	Sitzheizung	350
Schlussleuchte	10	Lenkradheizung	50
el. Kühlergebläse	200	Starter	1900
Scheibenwischer Windschutzscheibe	110	Zigarettenanzünder	100
		Katalysatorheizung	1500
Summe Dauerverbraucher/W	760		
Summe Langzeitverbraucher/W	491	Summe Kurzzeitverbraucher/W	5042
Grundlast P_0/W	1251	Spitzenlast P_{max}/W	6293

5.2 Simulation thermoelektrischer Abwärme-Rekuperation

Am Lehrstuhl für Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen werden seit 20 Jahren Fahrzeugsimulationsmodelle verschiedener Komplexität erarbeitet und erfolgreich in unterschiedlichen Projekten eingesetzt⁴⁸ (Schramm 2010, Koppers 2013). Die Modelle ermöglichen Untersuchungen von dynamischem Fahrzeugverhalten sowie die Optimierung unterschiedlicher Antriebskonzepte in Hinblick auf die Systemeffizienz

⁴⁸ z.B.: DRIVASSIST (www.drivassist.de, Stand 11.10.2013) oder cologne-mobil (cologne-mobil.de, Stand 11.10.2013)

(Schramm 2011, Hesse 2012). Für die Untersuchungen der Potentiale thermoelektrischer Generatoranlagen hinsichtlich der Kraftstoffeinsparung wurden die bereits bestehenden Modelle für Verbrennungsmotoren mit thermischen Modellen erweitert und mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten thermoelektrischen Modell verknüpft. Die Schnittstelle zwischen dem thermoelektrischen und mechanischen Modell stellt dabei das elektrische Bordnetzmodell des Fahrzeugs dar (Koppers 2013, Tatarinov 2013). Die gesamte Simulation soll ausgehend von den im Kapitel 4.4 dokumentierten Ergebnissen eine verlässliche Abschätzung zum Beitrag von Thermoelektrik zur Reduzierung des durch den Betrieb von Personenkraftwagen verursachten CO₂-Ausstoßes ermöglichen. Das hier vorgestellte Modell zielt auf die ganzheitliche Abbildung einer thermoelektrischen Generatoranlage im Kraftfahrzeug zur Energierückgewinnung aus Abgasenthalpie.

5.3 Modellbildung

Die gesamte Modellbeschreibung ist bereits in (Koppers 2013 und Tatarinov 2013) dargestellt, weshalb im Folgenden nur wesentliche Eckpunkte zur ganzheitlichen Systemdarstellung festgehalten werden sollen.

5.3.1 Das Fahrzeugmodell

Fahrzeugdynamik

Die Modellierung der Fahrzeugdynamik ist hier auf die Abbildung von Längsdynamik des Kraftfahrzeugs reduziert. Es werden hauptsächlich die Fahrwiderstände (Luftwiderstand, Rollreibung und Steigungswiderstand) sowie die Überwindung statischer und rotatorischer Massen berücksichtigt. Fahrzeugparameter wie die Gesamtmasse des Fahrzeugs inklusive der TEGA, Luftwiderstandsbeiwert, Rollwiderstandsbeiwert sowie Querspanntfläche werden vom jeweiligen untersuchten Fahrzeugtyp übernommen.

Antriebsstrang und Verbrennungsmotor

Der Antriebsstrang setzt sich aus Teilmodellen für Verbrennungsmotor, Getriebe und Achsdifferential zusammen. Die Modelle des Differentials und des Automatikgetriebes werden mit entsprechenden Übersetzungsverhältnissen und Wirkungsgraden abgebildet. Um eine optimale Ausnutzung der fünf zur Verfügung stehenden Gänge bei sich ändernder Motorlast einzuhalten, werden die Schaltvorgänge in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem aktuellen Gang und der Leistungsanforderung

eingeleitet.

Für die Abbildung der Abgasenthalpie wird das dem Fahrzeugtyp entsprechende Motorenverbrauchskennfeld zugrunde gelegt. Das Motormodell liefert Daten für den Kraftstoffverbrauch, Massenströme und Temperaturen für das Kühlwasser und das Abgas in Abhängigkeit der Motorlast, welche als Eingangsgrößen für die Berechnung der thermoelektrischen Energierückgewinnung verwendet werden.

Das elektrische Bordnetz

Das Modell des elektrischen Fahrzeugbordnetzes bildet die Verbraucher, den Generator und die Batterie ab und stellt die Verbindung zwischen der mechanischen Energieaufbereitung und den elektrischen Verbrauchern dar. Die elektrischen Verbraucher umfassen durch ein Leistungsprofil die Komfort- und Multimediasysteme sowie sicherheitsrelevante Komponenten und Betriebsmittel (vgl. Hesse 2011). Das Batteriemodell berücksichtigt den temperaturabhängigen Ladezustand (vgl. Jackey 2007). Das Modell des Generators wird mit einem Kennlinienfeld hinterlegt, welches den Wirkungsgrad des Generators in Abhängigkeit vom Laststrom und der Drehzahl herausgibt. Unter der Berücksichtigung der Bordnetzzustände (Leistungsanforderung elektrischer Verbraucher und Ladezustand der Batterie) und der Generator Drehzahl wird das zum Antrieb des Generators benötigte Drehmoment als Last für den Verbrennungsmotor übergeben und dient als Bezugsgröße bei Abschätzung des Ertrags der thermoelektrisch rückgewonnenen Energie (Koppers 2013).

Abbildung 5.3 Schema des gesamten Antriebstrang-Modells

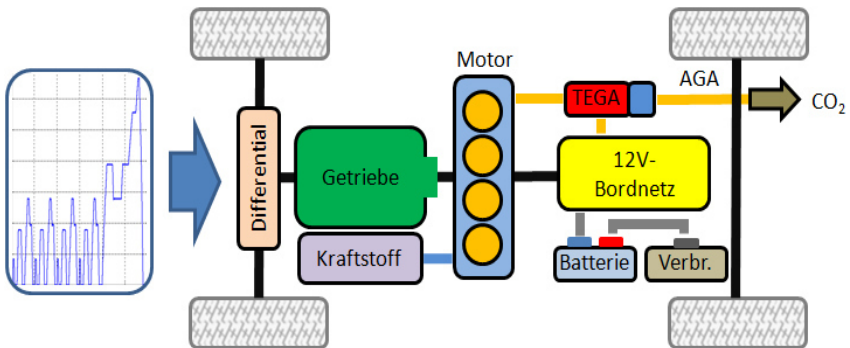


Abbildung 5.3 stellt schematisch die thermische- und elektromechanische Kopplung der einzelnen Teilmodelle dar.

5.3.2 Modellierung thermoelektrischer Komponenten

Das thermoelektrische Generatormodul (TEG)

Ein TEG stellt die kleinste diskrete Einheit der gesamten thermoelektrischen Generatoranlage (TEGA) zur Energierückgewinnung aus Abgasenthalpie eines verbrennungsmotorgetriebenen Fahrzeugs dar. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte TEG-Modell bildet die praxisrelevanten Systemparameter eines thermoelektrischen Generators ab. Es berechnet im wesentlichen Systemgrößen wie den Wirkungsgrad eines Generatormoduls η_{TEG} , die aufgenommenen und abgegebenen

Wärmeströme \dot{Q}_{in} , \dot{Q}_{out} und das Strom-Spannungsverhalten eines TEGs in Abhängigkeit von der am System abfallenden Temperaturdifferenz ΔT , dem elektrischen Lastwiderstand R_L und von den thermoelektrischen Materialeigenschaften. Das Modell repräsentiert einen aus N -Thermopaaren bestehenden TEG und kann somit später skalierbar, auf das TEGA-Konzept angepasst, in die dynamische Simulation des Kraftfahrzeugs eingebunden werden. Die mathematische Abbildung eines TEGs ist, wie bereits im Abschnitt 3.1.1 detailliert dargestellt, in drei logisch zusammenhängende, gekoppelte Funktionsgruppen aufgeteilt: das elektrische, das thermische und das materialbedingte Modulverhalten (vgl. auch Koppers 2013, Tatarinov 2013). Die drei Funktionsgruppen sind zusammengefasst zu einem Modellblock, welcher am Eingang die Temperaturen der kalten und heißen Systemseite und den Wert des Lastwiderstands des TEGs annimmt und daraus die thermische und elektrische Systemparameter, wie z.B. die elektrische Ausgangsleistung, die Systemwärmeströme, den TEG-Wirkungsgrad und die Kennzahl für die thermoelektrische Güte ZT berechnet (vgl. (3.36)-(3.38), (3.40)-(3.44), **Abbildung 5.4** und **Abbildung 3.2**). Die Materialeigenschaften sowie die Geometrie und die Anzahl der Thermopaare sind mit den Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen an Prüflingen sowie mit den Herstellerangaben abgeglichen. Die Ergebnisse aus der Simulation zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Labormessungen, bzw. mit den Herstellerangaben. Die Abweichungen zwischen den Messergebnissen und der Simulation beruhen hauptsächlich auf den Messabweichungen bei der Erfassung von Systemwärmeströmen. Hier wächst bei steigender Temperatur die parasitäre Wärmeübertragung durch Strahlung und Wärmeleitung in der Messvorrichtung, welche nur sehr aufwendig kompensiert werden können (vgl. 4.2).

Abbildung 5.4 TEG-Modell und seine Ein- und Ausgangsgrößen (Tatarinov 2013)

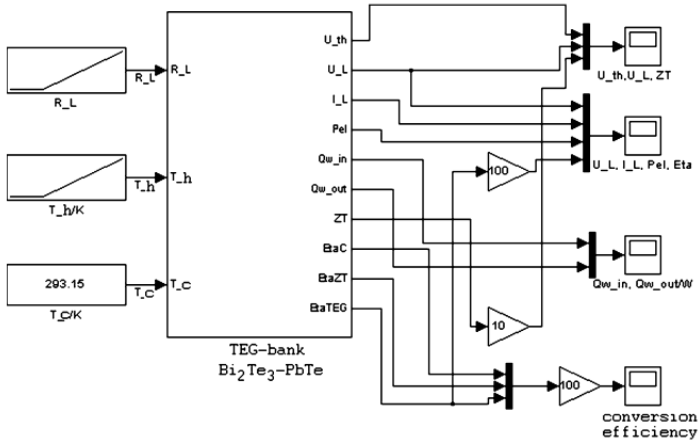


Abbildung 5.5 Evaluation des Bi_2Te_3 -TEG Modells (Tatarinov 2013)

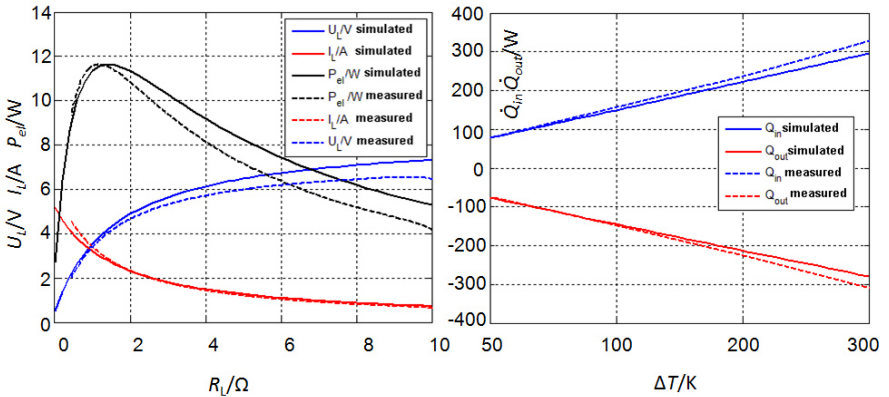
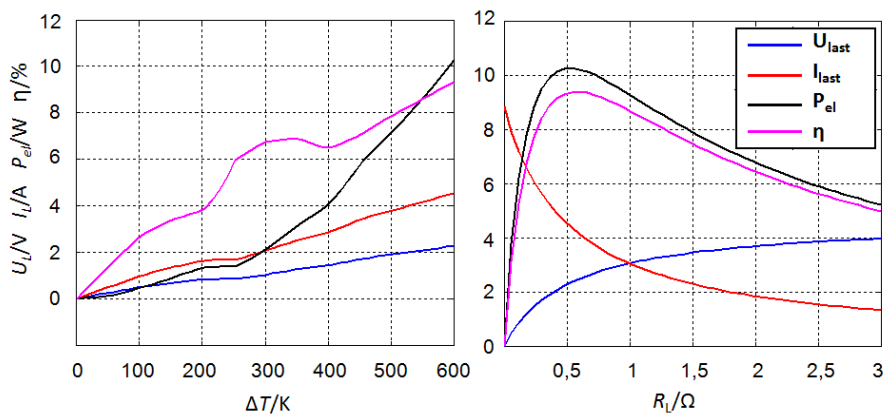


Abbildung 5.5 zeigt eine Gegenüberstellung des elektrischen Verhaltens am Beispiel eines Bi_2Te_3 -TEGs (Prüfling P6) in Abhängigkeit vom Lastwiderstand R_L bei $\Delta T=180\text{K}$ (links) und die Verläufe der Systemwärmeströme in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ΔT zwischen der warmen und kalten Systemseite (rechts).

Das nachfolgend vorgestellte TEGA-Modell basiert auf einem Hybrid-TEG, welches zwischen den Moduleigenschaften von Bi_2Te_3 - und PbTe -Generatormodule in Abhängigkeit von der Temperatur der heißen Systemseite wechselt und somit einen optimalen Arbeitspunkt der TEGA sicherstellt (vgl. 4.4.2 und **Abbildung 4.22**, **Abbildung 4.24** und **Abbildung 5.6**).

Abbildung 5.6 Elektrisches Verhalten des Bi_2Te_3 - PbTe -Hybrids ($ZT=0,9$)



Die gesamte thermoelektrische Generatoranlage (TEGA)

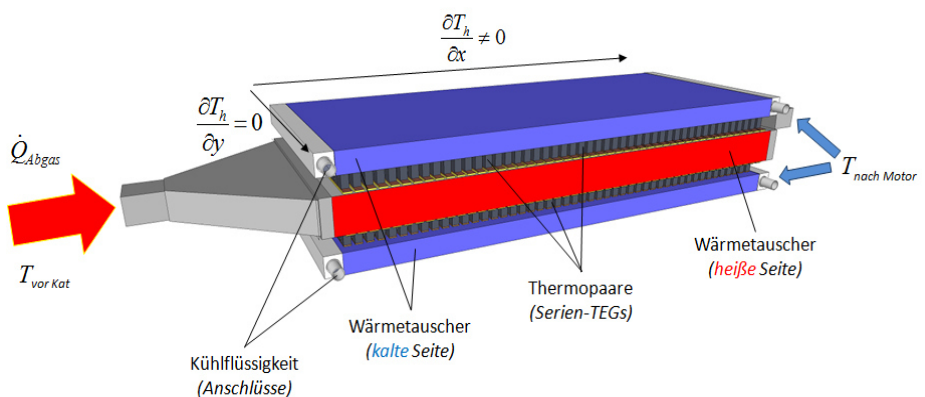
Der prinzipielle Aufbau einer thermoelektrischen Generatoranlage für den Einsatz im Pkw und die damit verbundenen Problemstellungen bei der praktischen Umsetzung wurden bereits im Abschnitt 3.2 detailliert erläutert. Die Überführung der Simulation von einem TEG zu einer TEGA bringt drei Herausforderungen mit sich: 1) Die Abbildung mehrerer, räumlich aufeinander angeordneter TEGs und einer damit verbundenen Temperatur- und Wärmestromverteilung entlang der Generatoranlage in Flussrichtung des Abgases (siehe auch Ono 1998). 2) Es muss eine zweckmäßige Zusammenführung der von jedem einzelnen TEG generierten elektrischen Leistung gefunden werden (Sagr 2008) und 3) Damit der Wärmeeintrag in das thermoelektrische System nicht nur aus Erfahrungswerten abgeleitet wird, muss die Bewertung der Abgasströmung im Wärmetauschersystem und damit die der Wärmeübertragung vorgenommen werden⁴⁹.

⁴⁹ Der Wärmeeintrag in die Wärmesenke und damit verbundener Temperaturgradient zwischen dem Kühlwasser und dem TEG wurde messtechnisch erfasst und in den Modulcharakteristika mitberücksichtigt.

Abbildung 5.7 stellt die TEGA dar mit folgenden für die Simulation angenommenen Randbedingungen:

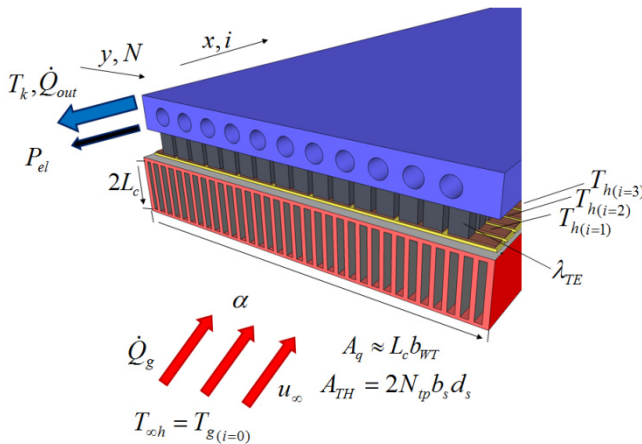
- Die Temperaturverteilung orthogonal zur Strömungsbewegung des Abgases ist homogen
- Die Schenkelbreite (hier 2 mm) ist so gewählt, dass der Temperaturabfall entlang der Strömung des Abgases pro Schenkelpaarreihe vernachlässigbar klein ist (vgl. auch **Abbildung 4.8**)
- Der Temperaturgradient zwischen dem Vor- und dem Rücklauf des Kühlwassers auf der kalten Systemseite ist aufgrund der hohen Wärmekapazität des Kühlfluids und des hohen Massenstroms vernachlässigbar klein ($\Delta T_k < 10$ K)
- Die Flussrichtung der Kühlflüssigkeit ist der des Abgases entgegengesetzt
- Die TEGA ist zwischen dem Krümmer und der abgasnachbehandelnden Anlage (Katalysator) platziert
-

Abbildung 5.7 Thermoelektrische Generatoranlage zur Energierückgewinnung aus Abgaswärme im Pkw (Koppers 2013).



Eine räumliche Diskretisierung des Modells und die anschließende iterative Berechnung der Parameter ΔT , \dot{Q}_{in} , \dot{Q}_{out} und P_{el} schafft Abhilfe bei der Bestimmung der Temperatur- und Restwärmeverteilung entlang der Abgasströmung. Die elektrische Leistung jedes iterativen Rechenschritts und somit die des jeweiligen TEGs wird über die Funktion eines elektrischen DC/DC-Wandlers aufsummiert und an das Bordnetz angepasst, wobei die einzelnen TEGs im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden (vgl. auch Huang 2012, Espinosa 2010 und Takao 2009).

Abbildung 5.8 Wärmeübertragung im Abgaskanal



Die Abschätzung der an der heißen TEG-Seite vorliegenden Temperatur bedarf der Bewertung der Abgasströmung. Aus der Berechnung des mittleren Wärmeübertragungskoeffizienten α und unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads bei der Wärmeübertragung kann die Temperatur des ersten TEGs nach Gaseintritt bestimmt

werden und somit der anfängliche Wärmestrom am Eingang des TEGs \dot{Q}_i . Die an den nachfolgenden TEGs zu erwartenden Temperaturen werden dann nach dem Ausdruck

$$T_h(i+1) = T_h(i) - \frac{\dot{Q}(i)}{\dot{m}_g \cdot c_{pg}} \tag{5.75}$$

bestimmt, wobei \dot{m}_g für den Abgasmassenstrom und c_{pg} für die Wärmekapazität des

Abgases stehen (vgl. **Abbildung 5.11**).

Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient kann mit Hilfe der Nusselt-Zahl und anhand der charakteristischen Länge der umströmten Rippe L_c (Wärmetauscher) und der Wärmeleitfähigkeit des Abgases λ_g folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{L_c} \quad (5.76)$$

Die Bestimmung der Nusselt-Zahl basiert auf der Strömungsbewertung, welche unter Verwendung der Reynold- und Prandtl-Zahlen erfolgt. Die Reynold-Zahl kann mit Hilfe der kinetischen Viskosität ν des Abgases, der charakteristischen Länge L_c der umströmten Rippe und der Abgasgeschwindigkeit u_∞ folgendermaßen bestimmt werden:

$$Re = \frac{u_\infty \cdot L_c}{\nu} \quad (5.77)$$

Dabei kann die Geschwindigkeit des Abgases mit Hilfe der angenommenen Querschnittsfläche A_T des Abgaskanals und der Dichte des Abgases ρ_g berechnet werden.

$$u_\infty = \frac{\dot{m}_{pg}}{A_q \cdot \rho_g} \quad (5.78)$$

Die Bewertung der Abgasströmung geschieht nach folgenden Kriterien:

Laminare Strömung wenn: $Pr > 0,6$ und $Re < 5 \cdot 10^5$:

$$Nu_L = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,3} \quad (5.79)$$

Turbulente Strömung wenn: $2000 > Pr > 0,6$ und $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$:

$$Nu_T = \frac{0,664 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot \left(Re^{0,6} - 1 \right)} \quad (5.80)$$

Die an der TEG-Oberfläche zu erwartende Temperatur kann aus folgender Systembilanz (adiabat) gewonnen werden, wobei λ_{TE} , l_s und A_{TE} die materialspezifischen und geometrischen Eigenschaften von Thermopaaren darstellen (vgl. auch **Abbildung 5.8**)

und η_R für den Rippenwirkungsgrad steht:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_g &= \dot{Q}_k + P_{el} \\ \rightarrow \eta_R \cdot \alpha \cdot A_h \cdot (T_g - T_h) &= \frac{\lambda_{TE}}{l_s} \cdot A_{TE} \cdot (T_h - T_k) + P_{el}\end{aligned}\quad (5.81)$$

Bei der Berechnung von Wärmeübertragung vom Abgas zum Thermoschenkel wird der Wirkungsgrad der Flächenvergrößerung (Rippen vom Wärmetauscher) folgendermaßen mitberücksichtigt (Baehr 2008) (λ_R steht für die Wärmeleitfähigkeit der Rippe und d_R für ihre Stärke):

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda_R \cdot d_R}} \quad (5.82)$$

$$\eta_R = \frac{\tanh(m \cdot L_c)}{m \cdot L_c} \quad (5.83)$$

Die am thermoelektrischen Generatormodul zu erwartende Temperatur wird unter Vernachlässigung von thermischen Übergangswiderständen (diese sind bereits im TEG-Modell mitberücksichtigt) wie folgt berechnet:

$$T_h = \frac{\eta_R \cdot \alpha \cdot A_h \cdot T_g + \frac{\lambda_{TE} \cdot A_{TE}}{l_s} \cdot T_k - P_{el}}{\frac{\lambda_{TE} \cdot A_{TE}}{l_s} + \eta_R \cdot \alpha \cdot A_h} \quad (5.84)$$

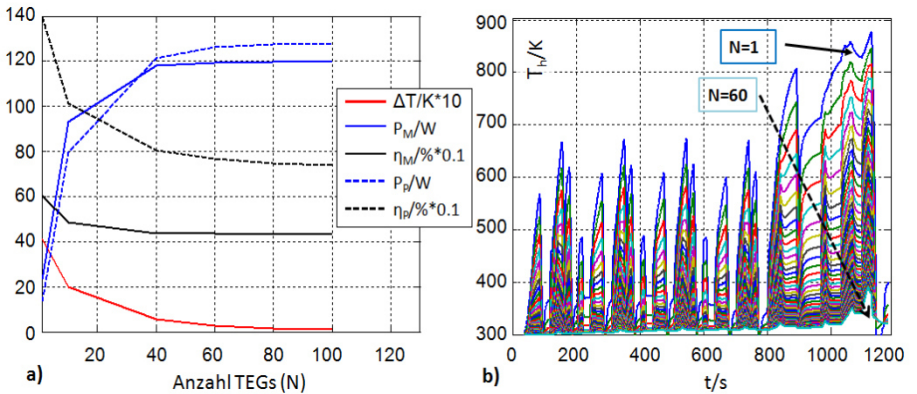
Abbildung 5.9 stellt eine Übersicht von modellbeschreibenden Größen dar, wobei sich die Maße jeweils auf ein TEG-Segment beziehen (vgl. auch **Abbildung 4.8** und **Abbildung 5.8**).

Abbildung 5.9 Geometrische Größen der TEGA im Bezug auf ein TEG-Segment

TEG		
Schenkellänge	l_s	8 mm
Kantenlänge Schenkel	$d_s=b_s$	4 mm
Anzahl Schenkel	N_{tp}	248
Packungsdichte TEG	D	50%
TEGA		
Länge Rippe	L_c	40 mm
Querschnitt Abgaskanal	A_h	0,0126 m ²
Angeströmte Fläche	A_h	0,008 m ²
Fläche TE-Material	A_{TH}	0,008 m ²
Anzahl Rippen	N_R	40

Das qualitative Verhalten von TEGA in Abhängigkeit von der Anzahl N der eingesetzten Generatormodule (a) und die Temperaturverteilung der heißen Seite entlang der Strömungsrichtung des Abgases (b) zeigt die **Abbildung 5.10**.

Abbildung 5.10 a) Variation Anzahl TEGs, b) Temperaturverteilung TEGA



Ab einer Anzahl von TE-Modulen $N \approx 60$ zeigt das thermoelektrische System aufgrund der zu gering ausfallenden Temperaturdifferenz kaum Änderung von generierter Leistung oder die des Wirkungsgrads, weshalb das TEGA-Model auf sechzig TEGs limitiert wird (vgl. auch Kumar 2013).

Abbildung 5.11 Berechnung der Temperatur- und Wärmestromverteilung (Tatarinov 2013)

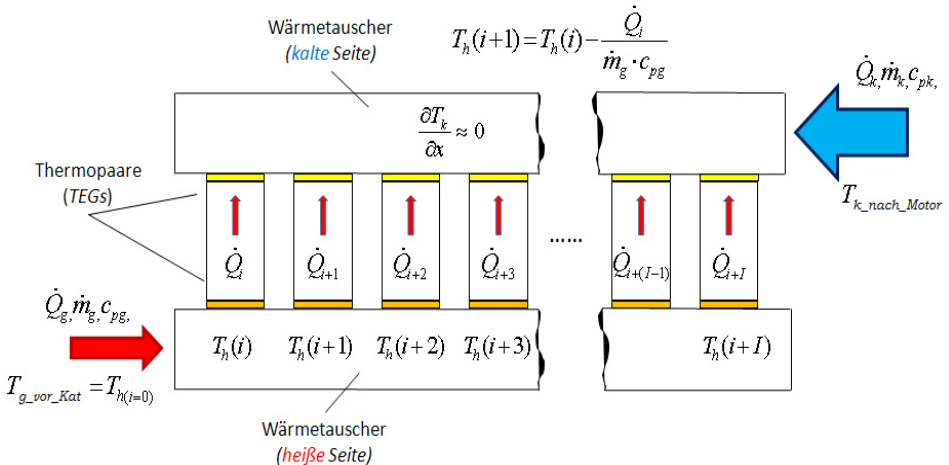
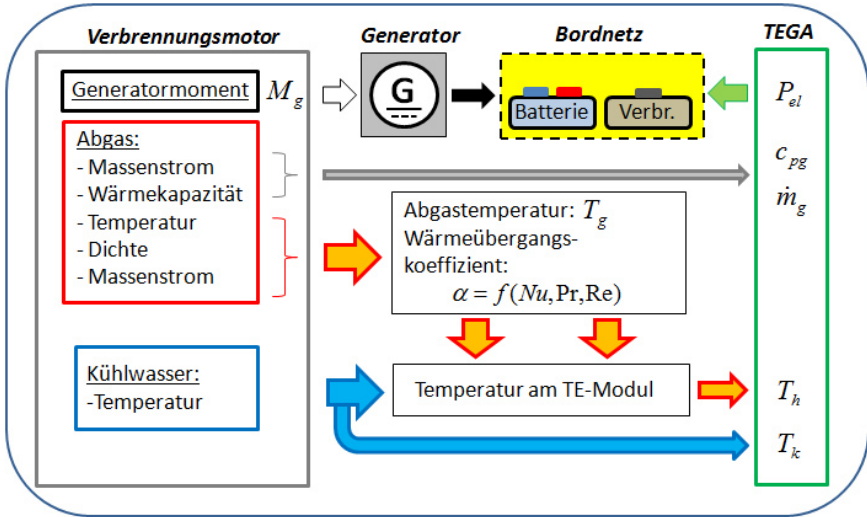


Abbildung 5.11 zeigt schematisch mehrere Iterationsschritte bei der Berechnung der in der **Abbildung 5.10** b) dargestellten Temperaturverteilung der Heißeitentemperatur in Längsrichtung der TEGA. **Abbildung 5.12** stellt vereinfacht die Wechselwirkung zwischen dem Verbrennungsmotor, der TEGA und dem Bordnetz dar, wobei vor allem die Einflussgrößen und Mechanismen zur Einbindung der TEGA ins Fahrzeug im Vordergrund stehen.

Abbildung 5.12 Vereinfachte Gesamtdarstellung des Simulationsmodells



5.3.3 Darstellung verwendeter Fahrzyklen

Mit Hilfe des eben vorgestellten Fahrzeugmodells soll die Wirksamkeit einer thermoelektrischen Generatoranlage zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugflotten und einer daraus resultierenden Minderung des CO₂-Ausstoßes abgeschätzt werden. Dazu wird das Modell anhand unterschiedlicher Fahrzyklen untersucht und später die daraus entstandenen Daten mit und ohne TEGA gegenübergestellt und diskutiert.

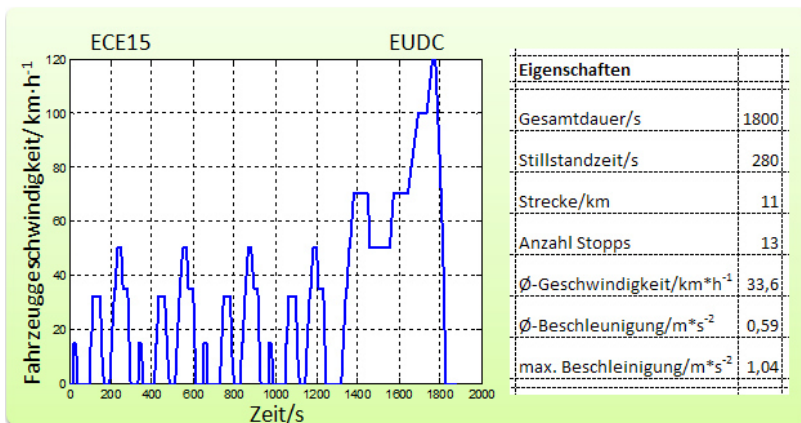
Der Neue Europäische Fahrzyklus

Der sogenannte „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) dient seit den 70er Jahren als Grundlage für die Abgasrichtlinie nach 70/220/EWG und stellt seit 1996 die gesetzliche Grundlage für die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs von Neufahrzeugen in den EU-Ländern dar (Dudenhöffer 2009). NEFZ ist ein zweiteiliger, synthetischer Fahrzyklus und besteht aus einem sich mehrfach wiederholenden Stadtteil (ECE15⁵⁰) und einem

⁵⁰ Economic Commission For Europe 15 (ECE15)

außerstädtischen Teil (EUDC⁵¹). Im Prüfzyklus sind Beschleunigungs-, Verzögerungs-, Leerlauf- und Konstantfahrphasen enthalten, wobei das Getriebe in fest vorgegebenen Punkten geschaltet wird. Die Bewertung des Kraftstoffverbrauchs mittels NEFZ wird normgerecht auf einem Rollenprüfstand durchgeführt, unter anderem bei abgeschalteten elektrischen Verbrauchern und Nebenaggregaten, welche nicht für den Fahrbetrieb benötigt werden (Boland 2010). Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird im Rahmen dieser Untersuchung auf die letzte Vorschrift verzichtet und die Bewertung bei eingeschalteten Nebenverbrauchern durchgeführt. **Abbildung 5.13** stellt das Geschwindigkeitsprofil des synthetischen Fahrzyklus dar und bietet eine Zusammenfassung seiner Eigenschaften.

Abbildung 5.13 Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

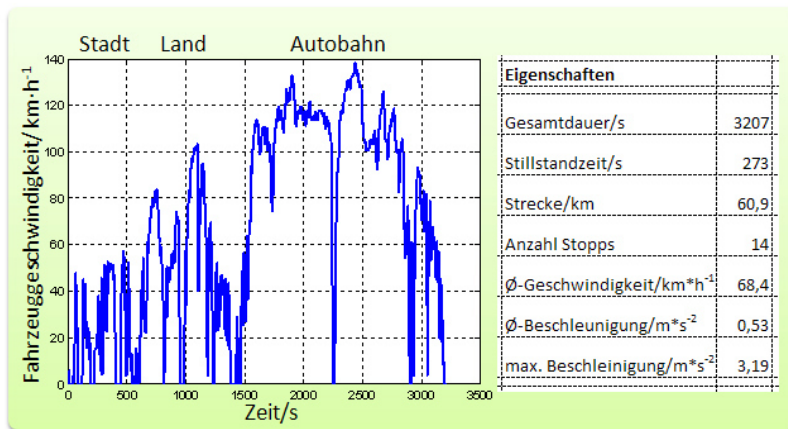


Der Neue Europäische Fahrzyklus gerät wegen seiner realitätsentfernten Abbildung des Kraftstoffverbrauchs immer wieder in Kritik. Untersuchungen zeigen durchschnittliche Abweichungen bei der Bestimmung des CO₂-Ausstoßes von 27 %, wobei die Ergebnisse von -9 % bis +61 % streuen (Dudenhöffer 2009). Dieser Fahrzyklus ist dennoch für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen von zentraler Bedeutung, da eine Vielzahl von veröffentlichten Forschungsergebnissen, die thermisches und elektrisches Fahrzeugverhalten anhand von NEFZ beschreiben, für eine Gegenüberstellung zur Verfügung steht (u. a. Kitte 2009, Goßlau 2011).

⁵¹ Extra-Urban Driving Cycle (EUDC)

Der HYZEM-Zyklus

Abbildung 5.14 Der HYZEM-Fahrzyklus



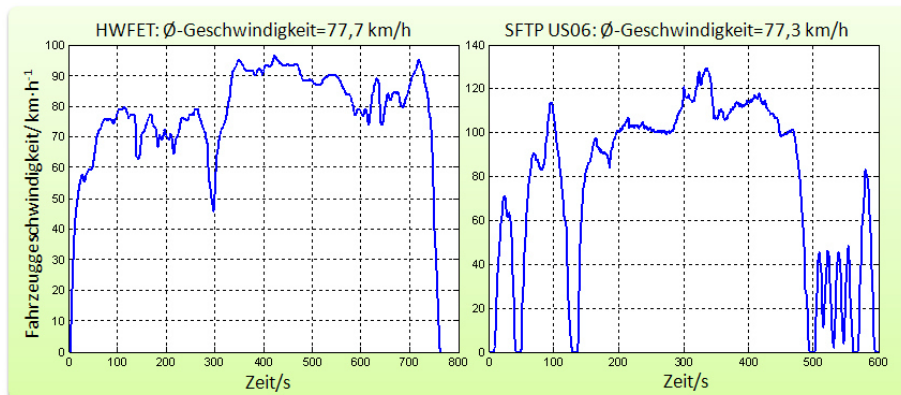
Das in **Abbildung 5.14** dargestellte dynamische Fahrgeschwindigkeits-Profil und entsprechende Kenndaten beschreiben den HYZEM⁵²-Fahrzyklus. Dieser Fahrzyklus ist dreiteilig und bildet Stadt-, Land- und Autobahnfahrten ab. Der HYZEM-Zyklus entstand aus Fahrtdaten von 77 privaten Fahrzeugen in vier europäischen Ländern im Rahmen des ARTEMIS-Projekts⁵³ und zählt zur umfangreichsten Beschreibung von Fahrverhalten in Europa (Ambrosio 2009). Bei dem HYZEM-Zyklus wird im Rahmen dieser Untersuchungen davon ausgegangen, dass er das realistische Fahrverhalten in Europa abbildet.

⁵² HYZEM: Hybrid Technology Development Approaching Zero Emission Mobility

⁵³ ARTEMIS: Assessment and reliability of transport emissions models and inventory systems (Andrè 2004, Andrè 2006).

HWFET- und SFTP US06

Abbildung 5.15 US-amerikanische Fahrzyklen HWFET und SFTP US06



Zwei US-amerikanische Fahrzyklen -HWFET⁵⁴ und SFTP US06⁵⁵- wurden für die hier vorgestellten Untersuchungen ausgewählt, um die Reichweite der Ergebnisse auf internationale Arbeitsgruppen zu erhöhen (vgl. Tatarinov 2013). Beide Fahrzyklen bilden das Fahrverhalten auf US-amerikanischen Autobahnen (highways) ab. HWFET ist aufgrund seiner relativ niedrigen Geschwindigkeit mit europäischen Überlandfahrten zu vergleichen (Koppers 2013). **Abbildung 5.15** stellt die Geschwindigkeitsprofile und die Durchschnittsgeschwindigkeiten beider Fahrzyklen dar.

5.3.4 Auswahl untersuchungsrelevanter Fahrzeugtypen

Untersuchungen zur Abschätzung von Strafzahlungen bei der Überschreitung von CO₂-Emissionsgrenzwerten wurden bereits am Beispiel der BMW-Flotte detailliert dargestellt (Wallentowitz 2011). Um die wirtschaftliche Wirksamkeit von TEGA im Pkw aus Sicht der Hersteller und Fahrzeughalter zu zeigen, wurden weitere deutsche Fahrzeug-Marken untersucht. **Abbildung 5.17** gibt eine Übersicht rechnerisch zulässiger S_n und der von Herstellern angegebenen x^{CO₂} Emissions-Grenzwerte und der daraus voraussichtlich

⁵⁴ HWFET: Highway Fuel Economy Test

⁵⁵ SFTP US06: Supplemental Federal Test Procedure United States 06

resultierenden Strafzahlungen für die dargestellten reduzierten Pkw-Flotten⁵⁶. Die Fahrzeugparameter, wie die Masse der jeweiligen Fahrzeuge m_F und der CO₂-Emissionswert x^{CO_2} , wurden aus den Herstellerangaben zu den entsprechenden Modellen gängiger Varianten und vergleichbarer Motortechnologie gewonnen. Die Angaben zu Neuzulassungen stammen aus der Statistik des deutschen Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA). Die zur Ermittlung von Strafzahlungen benötigten Größen wurden nach Wallentowitz folgendermaßen berechnet (Wallentowitz 2011):

$$S_n = 130 + 0,0457 \cdot (M - M_0) \quad (5.85)$$

$[S_n]=g/km$, wobei M für das tatsächliche Leergewicht eines Fahrzeugs steht und M_0 konstant 1372 kg beträgt. Der durchschnittliche, massegewichtete CO₂-Ausstoß einer Flotte berechnet sich zu:

$$S_{soll} = \frac{1}{N} \cdot \sum S_n \quad (5.86)$$

wobei N die Anzahl aller Neuzulassungen bedeutet. Der tatsächliche, durchschnittliche Flottenausstoß berechnet sich aus den Herstellerangaben für den CO₂-Ausstoß eines neu zugelassenen Fahrzeugs in g/km, also x^{CO_2} , und der Anzahl aller Neuzulassungen N .

$$S_{ist} = \frac{1}{N} \cdot \sum x^{CO_2} \quad (5.87)$$

Die Differenz $\Delta S = S_{ist} - S_{soll}$ ist ausschlaggebend für die Höhe der Strafzahlungen. Die stark nicht lineare Abhängigkeit der Strafzahlungen Z von ΔS zeigt **Abbildung 5.16**.

Untersucht wurden fünf deutsche Automobilmarken, welche sowohl eine breite Segmentierung aufweisen (Kleinwagen bis obere Mittelklasse) als auch preislich heterogen platziert sind. Volkswagen wurde bei dieser Betrachtung absichtlich außen vor gelassen, da Konzerne von dieser Größe über eine freiere Gestaltung des Flottenausstoßes durch eine sehr hohe Vielfalt an Modellen und hohe Absatzzahlen verfügen. Lediglich Audi wurde hier neben Daimler, BMW, Opel und Ford als eigenständige Premiummarke der Volkswagen AG hinzugezogen.

⁵⁶ Hier wurden nur die vier bis fünf beliebtesten Modelle der jeweiligen Hersteller, die im Untersuchungsraum in Deutschland neu zugelassen wurden, abgebildet (Die 50 häufigsten Modellreihen der Jahre 2009-2012 laut KBA).

Abbildung 5.16 Strafzahlungen pro Neuzulassung bis 2018 (Wallentowitz 2011)

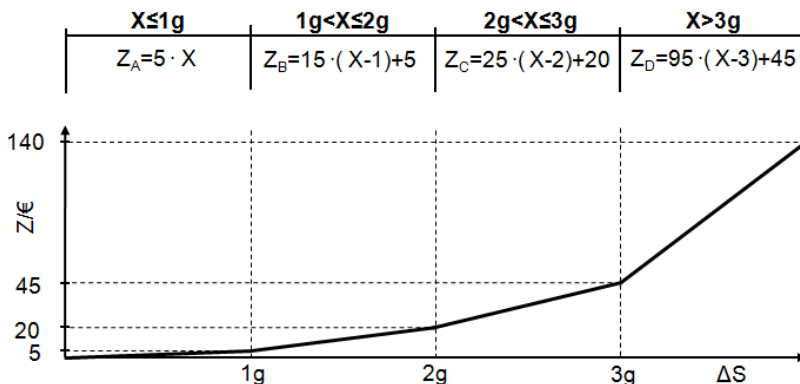


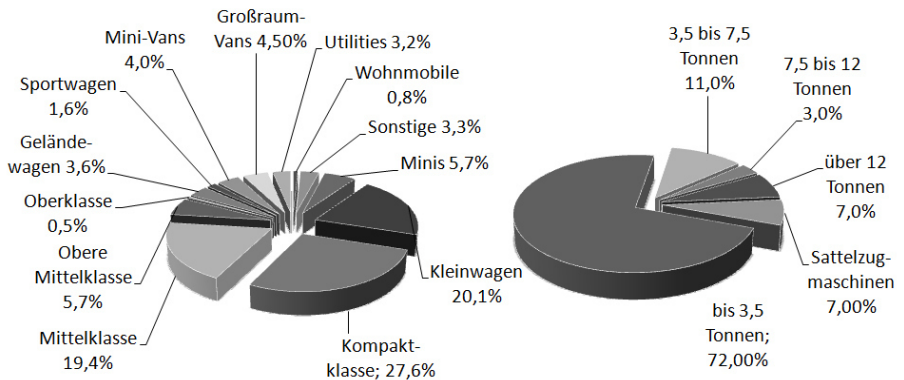
Abbildung 5.17 Vergleich reduzierter Flotten deutscher Hersteller (vergrößert im Anhang)

Hersteller	Modell	m_n /kg	S_{n3} /(g/km)	S_{n2} /(g/km)	ΔS_n /(g/km)	N_{02} 2012	Werte reduzierte Flotte	Strafzahlungen
Daimler	A-Klasse	1370	129,91	136	6,09	31973	Neuzulassungen gesamt Daimler	197475
	B-Klasse	1395	131,05	144	12,95	59420	Flottenausstoß Daimler S_{201} (g/km)	134,43
	C-Klasse	1500	135,85	149	13,15	69052	Flottenausstoß Daimler S_{12} (g/km)	147,64
	E-Klasse	1615	141,11	161	19,89	37030	ΔS_n	13,21
							gesamt	200.456.586,11 €
Audi	A3	1285	126,02	130	3,98	45999	Neuzulassungen gesamt	209396
	A4	1530	137,22	151	13,78	57633	Flottenausstoß S_{201} (g/km)	138,74
	A5	1590	139,96	155	15,04	52710	Flottenausstoß S_{12} (g/km)	150,38
	A6	1715	145,68	159	13,32	32887	ΔS_n	11,65
	Q5	1975	157,56	169	11,44	20167		
							gesamt	181.415.939,45 €
BMW	Mini	1160	120,31	122	1,69	36302	Neuzulassungen gesamt	217060
	1er	1380	130,37	132	1,63	59241	Flottenausstoß S_{201} (g/km)	136,85
	3er	1555	138,36	143	4,64	62506	Flottenausstoß S_{12} (g/km)	147,03
	5er	1785	148,87	167	18,13	48107	ΔS_n	10,18
	X5	2145	165,33	247	81,67	10904		
							gesamt	157.903.549,87 €
Opel	Corsa	1160	120,31	124	3,69	55747	Neuzulassungen gesamt	178133
	Astra	1373	130,05	134	3,95	66981	Flottenausstoß S_{201} (g/km)	129,23
	Meriva	1435	132,88	144	11,12	25449	Flottenausstoß S_{12} (g/km)	134,82
	Zafira	1610	140,88	149	8,12	29956	ΔS_n	5,60
							gesamt	51.947.932,97 €
Ford	KA	998	112,91	115	2,09	23568	Neuzulassungen gesamt	139613
	Fiesta	1140	119,40	124	4,60	50874	Flottenausstoß S_{201} (g/km)	124,12
	Focus	1360	129,45	137	7,55	47936	Flottenausstoß S_{12} (g/km)	130,15
	Mondeo	1560	138,59	150	11,41	17235	ΔS_n	6,03
							gesamt	46.473.942,06 €

Bei etwa vergleichbaren Neuzulassungszahlen schneiden Hersteller, die Kleinwagen anbieten, hinsichtlich der Flottendurchschnittsemissionen deutlich besser ab und liegen somit in Bezug auf Strafzahlungen pro Neuzulassung bis zu 70 % niedriger.

Da die Kleinwagen überwiegend auf Kurzstrecken und Innerorts eingesetzt werden und verhältnismäßig schwach motorisiert sind, ist ein wirtschaftlicher Nutzen thermoelektrischer Generatoranlagen hier nicht zu erwarten. Der Einfluss von TEG-Anlagen zur Senkung der CO₂-Emissionen auf die voraussichtliche Entwicklung der Strafzahlungen wird daher bei Fahrzeugen der Kompakt-, Mittel- und oberer Mittelklasse untersucht, da diese Segmente etwa 50 % aller neuzugelassenen Fahrzeuge darstellen (vgl. **Abbildung 5.18**). Ein Vertreter aus der Familie „leichte Nutzfahrzeuge“ wurde in die Untersuchung mit einbezogen, da dieser Fahrzeugtyp mit einem Anteil von 72 % aller Lkw sehr stark verbreitet ist.

Abbildung 5.18 Anteile der Segmente Fahrzeugbestand (KBA, Shell 2010)



5.4 Bestimmung des Energieertrags eines TE-Systems im Pkw

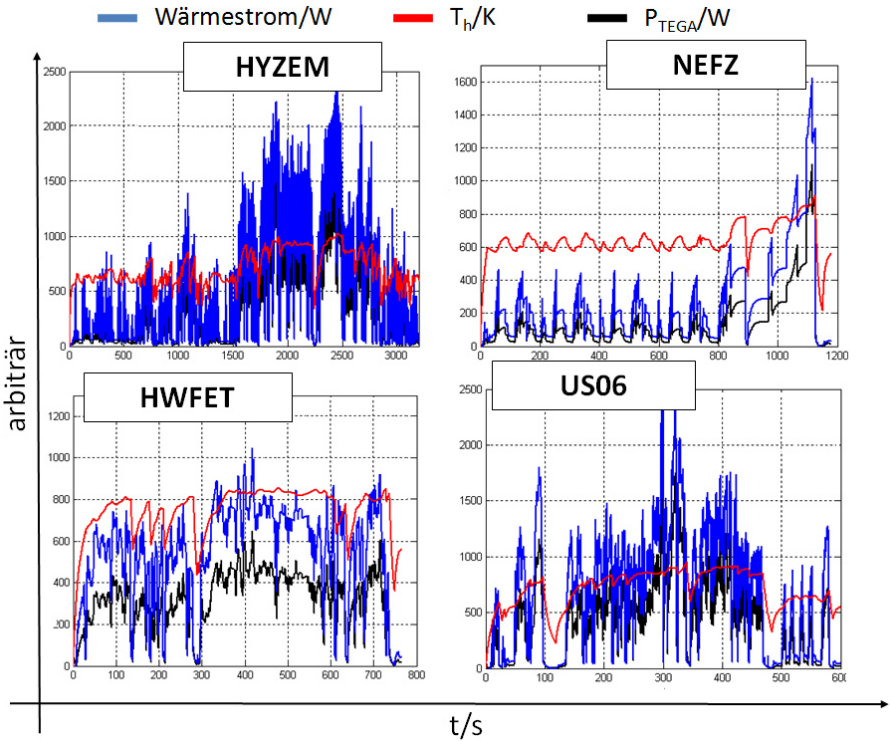
In folgendem Abschnitt sollen die Simulationsergebnisse vorgestellt und diskutiert werden. Die Darstellung der Potentiale thermoelektrischer Generatoranlagen zur Kraftstoffeinsparung durch Rekuperation der Abgasenthalpie wird hier anhand von Berechnungen unterschiedlicher Fahrzeugtypen nach folgenden Szenarien vorgestellt:

- Szenario I: „Stand gegenwärtiger Prototyp-Entwicklungen“. Berechnungen mit Hilfe von real gemessenen thermoelektrischen Systemparametern (vgl. 4.4) und daraus resultierenden TEG-Charakteristika, welche durchschnittlich in einer thermoelektrischen Güte von $ZT=0.9$ resultieren.
- Szenario II: „Realistische Entwicklung vollintegrierter TE-Systeme“. Berechnungen anhand einer angenommenen Systemoptimierung im Hinblick auf die Integration von TEG-Modulen in die Wärmetauscher und einer Steigerung der Material-Güte ($ZT=1,2$)
- Szenario III: „Plausible Entwicklung fortgeschrittener TE-Systeme“. Berechnungen unter der Annahme einer Vollintegration von nanotechnologisch optimierten thermoelektrischen Materialien ($ZT=1,8$).

Die Materialeigenschaften sowie die Geometrie und die Anzahl der Thermopaare sind mit den Ergebnissen aus den experimentellen Untersuchungen an Prüflingen sowie mit den Herstellerangaben abgeglichen. Die Ergebnisse aus der Simulation zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Labormessungen, bzw. mit den Herstellerangaben. Die Abweichungen zwischen den Messergebnissen und der Simulation beruhen hauptsächlich auf den Messabweichungen bei der Erfassung von Systemwärmeströmen. Hier wächst bei steigender Temperatur die parasitäre Wärmeübertragung durch Strahlung und Wärmeleitung in der Messvorrichtung, welche nur sehr aufwendig kompensiert werden können (vgl. 4.2).

Die von den elektrischen Verbrauchern aufgenommene Leistung ist bei allen hier untersuchten Fahrzeugmodellen vergleichbarkeitshalber konstant bei 1,5 kW gehalten.

Abbildung 5.19 Darstellung dynamischer Simulationsergebnisse (Tatarinov 2013)

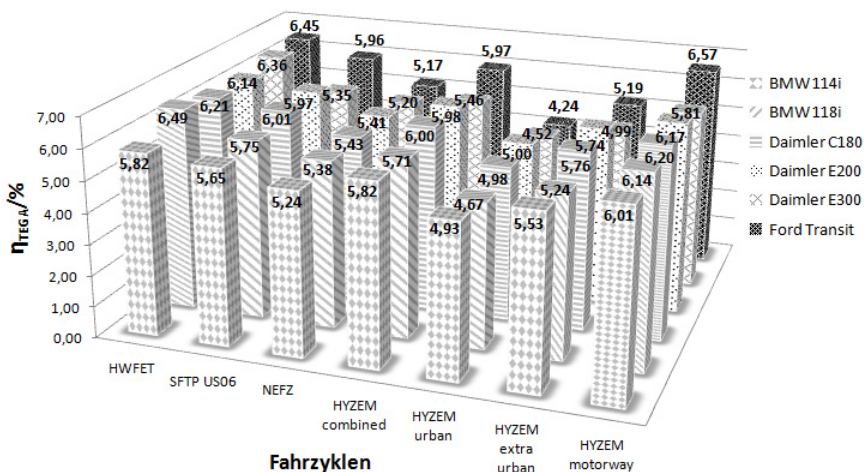


Die Simulation generiert die dynamischen Ergebnisse relevanter Systemparameter wie sie in der **Abbildung 5.19** exemplarisch für die Verläufe der Heiseitentemperatur und die der elektrischen Ausgangsleistung sowie der des Wärmestroms für ein generisches Fahrzeugmodell (Kompaktklasse) dargestellt sind (Tatarinov 2013). Für die weiteren Betrachtungen werden jedoch lediglich die für den jeweiligen Fahrzyklus gebildeten zeitlichen Mittelwerte unterschiedlicher Systemgrößen gegenübergestellt.

5.4.1 Szenario I: Stand gegenwärtiger Prototyp-Entwicklungen

Die Simulationsergebnisse zeigen eine relativ gleichmäßige Verteilung der TEGA-Wirkungsgrade für unterschiedlichen Pkw, welche hier durchschnittlich bei ca. 4,5 bis 6,5% liegen (vgl. **Abbildung 5.20**).

Abbildung 5.20 Mittlere TEGA-Wirkungsgrade (ZT=0,9)



Neben den Heißseitentemperaturen beeinflusst die Größe der Abgasströme maßgeblich die Leistungsfähigkeit der TEGA, was besonders gut beim Modell für „Ford Transit“ zu beobachten ist. Die Annahme, dass der Einsatz thermoelektrischer Generatoranlagen in Kleinwagen nicht zielführend ist, da sie üblicherweise kleinmotorisiert sind und überwiegend innerorts zum Einsatz kommen (niedrige Heißseitentemperaturen und Abgasmassenströme), kann hier zumindest teilweise Bestätigung finden (vgl. **Abbildung 5.21** und **Abbildung 5.22**). Die maximale Leistung des Verbrennungsmotors zusammen mit seiner Lastanforderung bestimmen die Ausgangsleistung der TEGA. Höhere Leistungen sind also bei starkmotorisierten Fahrzeugen auf Überlandstraßen und Autobahnen zu erwarten (vgl. **Abbildung 5.23**).

Abbildung 5.21 Mittlerer Massenstrom des Abgases (ZT=0,9)

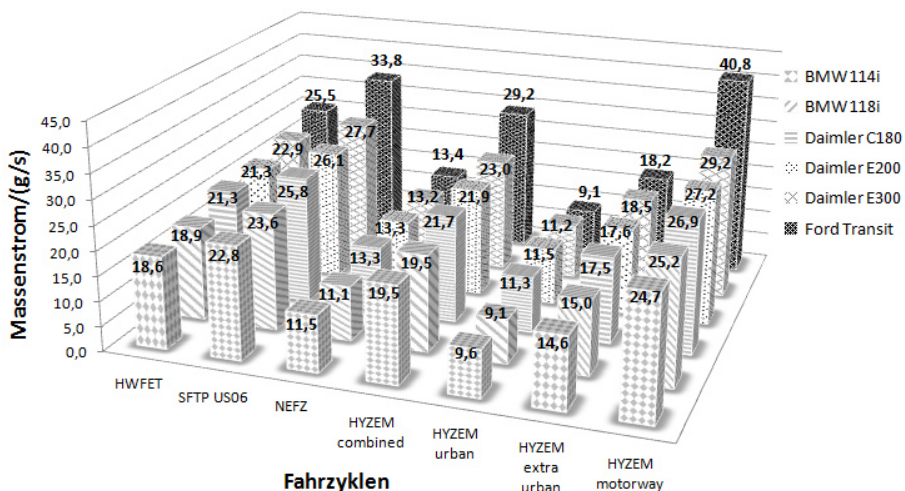


Abbildung 5.22 Mittlere Temperatur am Eingang der TEGA (ZT=0,9)

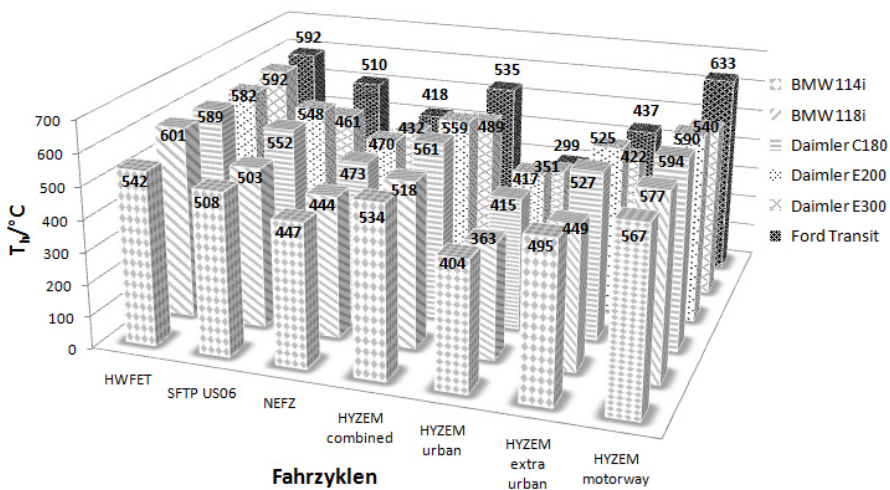


Abbildung 5.23 Mittlere elektrische Ausgangsleistung TEGA (ZT=0,9)

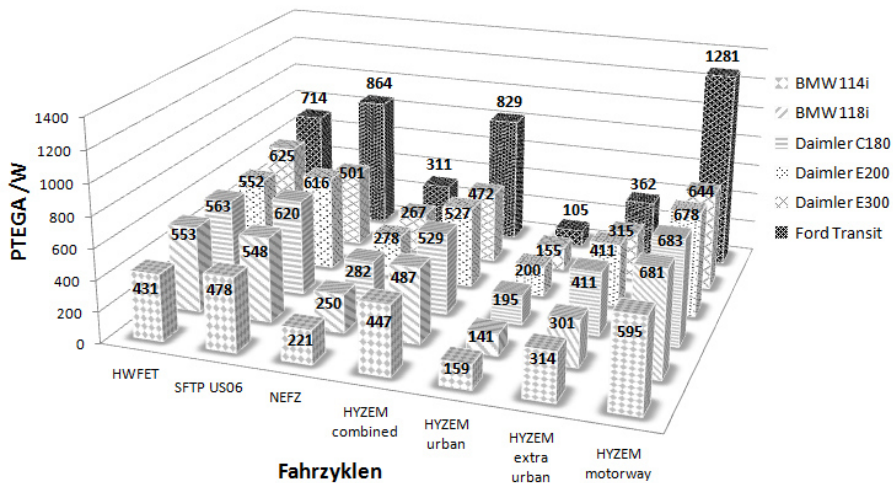
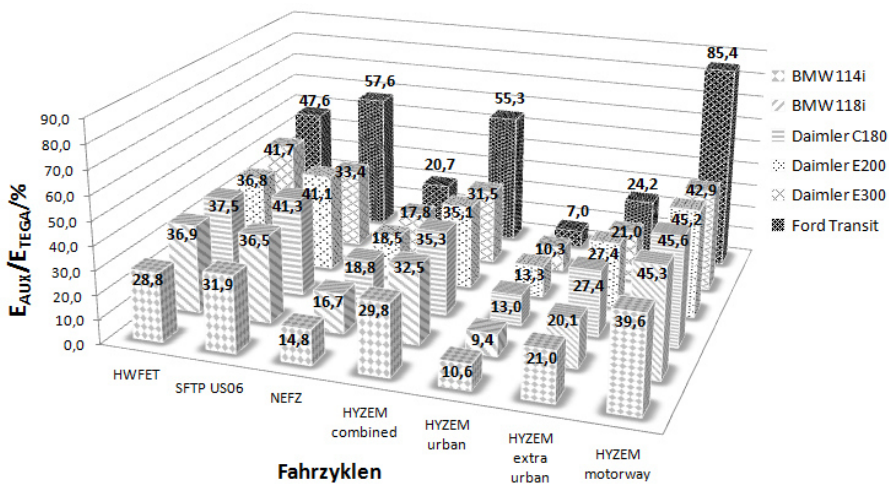


Abbildung 5.24 Entlastung des Drehstromgenerators durch TEGA (ZT=0,9)



Das Verhältnis von der durch die elektrischen Verbraucher aus dem Bordnetz eines Fahrzeugs aufgenommenen und der durch die thermoelektrische Generatoranlage zur Verfügung gestellten elektrischen Leistung stellt die Entlastung des Generators durch die TEGA dar. Im Durchschnitt kann abhängig vom Fahrzyklus von einem Anteil der durch TEGA gedeckten Bordnetz-Versorgung von 20 bis 40% bei Pkw ausgegangen werden, vorausgesetzt die Batterie kann die überschüssige Energie speichern⁵⁷. Bei dem Nutzfahrzeug liegt der Wert zwischen 20 und 85 % (vgl. **Abbildung 5.24**).

Der absolute Kraftstoffverbrauch und die relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA sind in den Abbildungen **Abbildung 5.25** und **Abbildung 5.26** dargestellt. Leichte, stark motorisierte Fahrzeuge, welche ohnehin einen moderaten Kraftstoffverbrauch aufweisen, heben sich bei der relativen Kraftstoffeinsparung mit durchschnittlich 4,3 % ab (vgl. 118i und C180). Schwere Fahrzeuge mit höherem Kraftstoffverbrauch schneiden hierbei mit einem Gesamtdurchschnitt von ca. 3,4 % schlechter ab. Die Getriebeübersetzungsverhältnisse beeinflussen sowohl den absoluten Kraftstoffverbrauch als auch die relative Kraftstoffeinsparung. Dieser Effekt wird bei dem „Kontrast“-Modell -Ford Transit- deutlich sichtbar. Obwohl der Kraftstoffverbrauch hier mit zunehmender Durchschnittsgeschwindigkeit stärker ansteigt als bei anderen untersuchten Fahrzeugen, fällt die relative Kraftstoffeinsparung verhältnismäßig gering aus⁵⁸. Das liegt vor allem daran, dass das Verhältnis aus der elektrisch verbrauchten Leistung und der Motorleistung in diesem Fall sehr niedrig ist.

⁵⁷ Optimale Rückgewinnung thermischer Energie durch TEGA setzt die Anpassung der Batteriekapazität und der Leistung des Drehstrom-Generators auf das thermoelektrische System voraus. Das Energiemanagementsystem sollte dabei auf die maximale Abnahme thermoelektrisch erzeugter Energie regeln.

⁵⁸ Aus einem ungünstigen Übersetzungsverhältnis ergibt sich bei höheren Geschwindigkeiten hohe Drehzahlen, was bei relativ geringer Last zu hohem Kraftstoffverbrauch führt. (Vergleiche dazu die Ergebnisse vom aufgeteilten HYZEM-Fahrzyklus.)

Abbildung 5.25 Kraftstoffverbrauch ohne TEGA

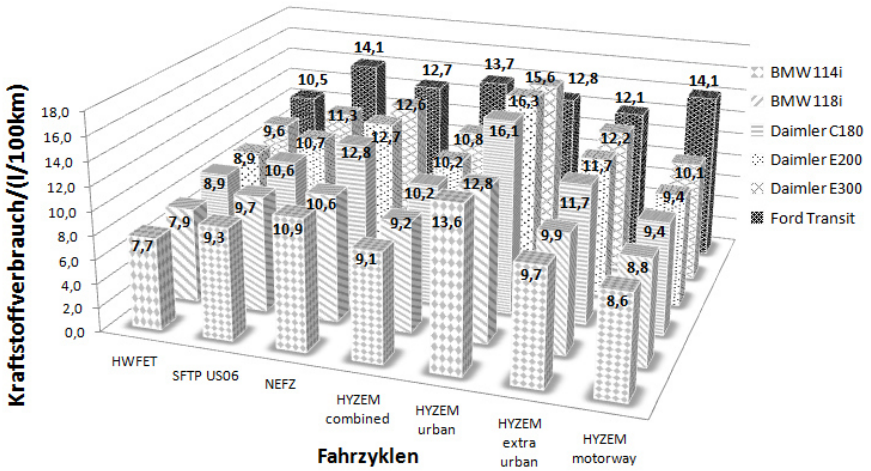
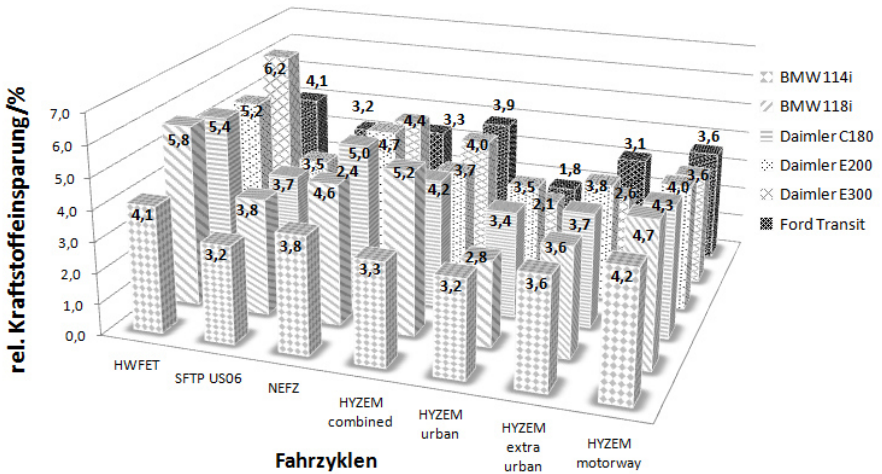


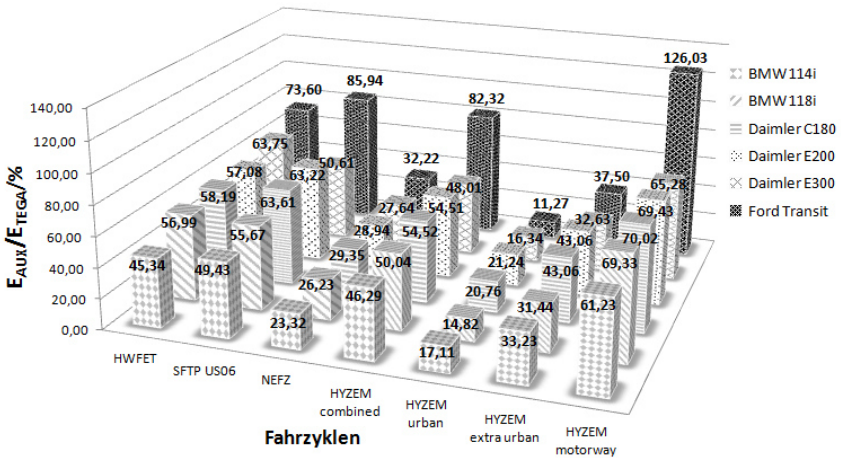
Abbildung 5.26 Relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA (ZT=0,9)



5.4.2 Szenario II: Realistische Entwicklung vollintegrierter TE-Systeme

Vollintegrierte Generatorsysteme bieten einen deutlich besseren Wärmeeintrag aus dem Abgas in das thermoelektrische Material, da sich der thermische Serienwiderstand verringert. Durch die Senkung der thermischen Leitfähigkeit des TE-Materials (Steigerung von ZT) verändert sich auch die Temperaturverteilung im TEGA, was sich in einem flacheren Temperaturgradienten entlang der Abgasströmung widerspiegelt. Dadurch steigen die Ausgangsleistung und der Wirkungsgrad der TEGA. Die Prototypentwicklungen zeigen, dass eine Vollintegration von thermoelektrischen Komponenten in die Wärmetauscher eine Anhebung der TEGA-Leistung von bis zu 30% ermöglicht (Ranalli 2013).

Abbildung 5.27 Entlastung des Drehstromgenerators durch TEGA ($ZT=1,2$)

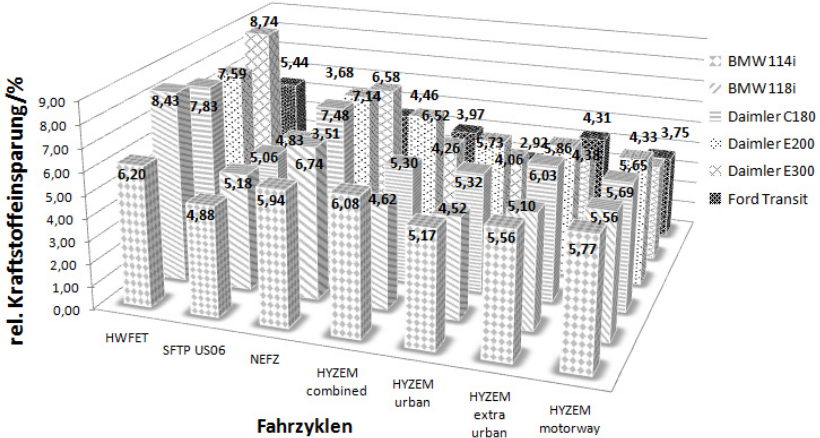


Sollte es gelingen, durch die Optimierung des Materials eine thermoelektrische Güte von durchschnittlich $ZT=1,2$ zu erreichen, ergäben sich bei mittleren Heißeitentemperaturen zwischen 450 und 650 °C Systemwirkungsgrade von 7 bis 9 %⁵⁹. Die TEGA deckt in diesem Fall je nach Fahrzyklus durchschnittlich 30 bis 60 % des elektrischen Leistungsbedarfs bei Pkw ab, im Falle eines leichten Nutzfahrzeugs generiert TEGA bei höheren

⁵⁹ Detaillierte Simulationsergebnisse sind dem Anhang beigefügt.

Geschwindigkeiten durchschnittlich mehr elektrische Leistung als benötigt wird (vgl. **Abbildung 5.27**).

Abbildung 5.28 Relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA (ZT=1,2)



Die relative Kraftstoffeinsparung steigt hier bei Pkw der Kompakt- und Mittelklasse im Vergleich zu „Szenario I“ auf ca. 5 bis 8 %. Beim leichten Nutzfahrzeug hingegen bleibt die relative Kraftstoffeinsparung mit 3,5 bis 5 % etwa konstant, was damit zusammenhängt, dass die TEGA den Drehstromgenerator beinahe vollständig entlastet. Bei höheren Geschwindigkeiten ist das Potential der Energieeinsparung in diesem Fall also fast erschöpft (vgl. **Abbildung 5.28**).

5.4.3 Szenario III: Plausible Entwicklung fortgeschrittener TE-Systeme

Die Entwicklungen im Bereich des nanotechnologischen Materialdesigns machen eine thermoelektrische Materialgüte von durchschnittlich $ZT=1,8$ möglich, auch wenn solche Materialien bis jetzt nur als Laborprototypen existieren. Auf dieser Grundlage lassen sich thermoelektrische Generatoranlagen mit einem Wirkungsgrad von bis zu 13 % bei einer durchschnittlichen Heißseitentemperatur von 680 °C realisieren⁶⁰.

⁶⁰ Detaillierte Simulationsergebnisse sind dem Anhang beigelegt.

Abbildung 5.29 Relative Kraftstoffeinsparung durch TEGA (ZT=1,8)

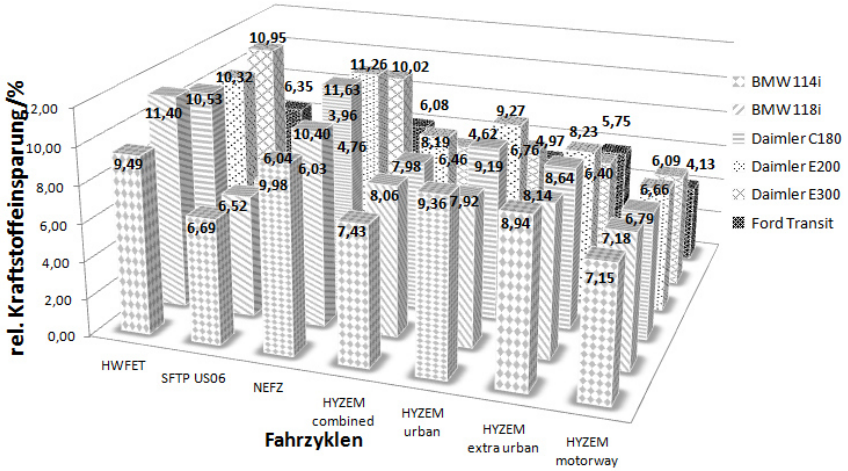


Abbildung 5.30 Entlastung des Drehstromgenerators durch TEGA (ZT=1,8)

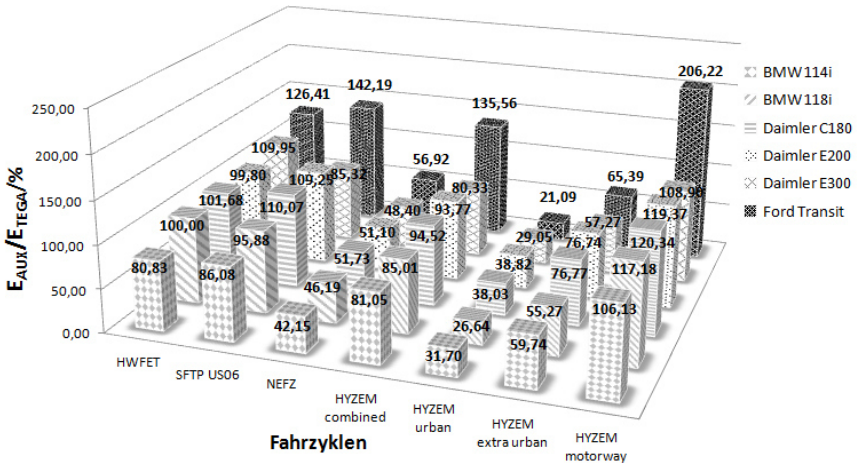


Abbildung 5.29 zeigt Potentiale bei Kraftstoff-Einsparung auf, sollten TEG-Module dieser Güte eine Serienreife erreichen.

Bei gleich bleibender Auslegung der Energiemanagementsysteme, also ohne Neuabstimmung der TEGA, der Batterie und des Drehstromgenerators, kann eine dauerhafte Abnahme der generierten elektrischen Energie bei $ZT=1,8$ nur in vereinzelt Fahrscenarien gewährleistet werden. Im Stadtverkehr oder auf relativ kurzen, schnell gefahrenen Strecken können Kraftstoffersparnisse bei Pkw von durchschnittlich 10,5 % erreicht werden (vgl. **Abbildung 5.29** NEFZ, HYZEM-urban oder HWFET). Mit zunehmender Geschwindigkeit bzw. zurückgelegter Entfernung weist die relative Kraftstoffeinsparung einen negativen Trend auf (vgl. **Abbildung 5.29** und **Abbildung 5.30** HYZEM combined, -urban, -extra urban und -motorway). Spätestens hier wird deutlich sichtbar, dass die Kraftstoffeinsparung verhältnismäßig stark zurückgeht, sobald die TEGA den elektrischen Leistungsbedarf komplett deckt und die überschüssig generierte Energie nicht abgenommen werden kann. Aus dem gleichen Grund bleibt die relative Kraftstoffeinsparung beim Modell „Ford Transit“ im Vergleich zu Szenarien I und -II beinahe unverändert gering bei durchschnittlich 5 % (vgl. **Abbildung 5.26**, **Abbildung 5.28** und **Abbildung 5.29**).

5.5 Wirtschaftliche und reglementarische Rahmenbedingungen

Die Entwicklung neuer Technologien in der Mobilität wird hauptsächlich von drei Faktoren angetrieben, welche zugleich auch die Rahmenbedingungen für die Hersteller abstecken. Die Gesetzgebung gibt den Herstellern Anreize zur Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Von Seite des Kunden entstehen durch die fortsetzende Änderung seines Verhaltens und seiner Ansprüche neue Anforderungen an das Produkt „Auto“. Die Verknappung fossiler Kraftstoffe oder das Bewusstsein dessen, dass die Verfügbarkeit zumindest begrenzt ist, treibt ebenso die innovative Entwicklung von Antriebssystemen an. Der Kunde entscheidet letztlich über den Erfolg einzelner Konzepte und somit über Erfolg oder Niederlage eines Produkts. Seine Entscheidungen werden durch Kostenaspekte und Anforderungen an Leistung, Sicherheit und Design des Automobils beeinflusst. Imageaspekte sind ebenfalls maßgebend bei der Fahrzeugwahl. In den letzten Jahren gewann der Faktor „Umweltverträglichkeit“ zunehmend an Stellenwert und findet sich in den Top Ten in der Liste der Kundenanforderungen (Wallentowitz 2011).

Das EU-Parlament hat einen Gesetzesentwurf, der eine Senkung der CO₂-Emissionen von Pkw bis 2020 auf 95 g/km (Flottendurchschnitt) für 95 % aller Neuwagen vorschreibt, verabschiedet. Weiterhin soll ein neuer Fahrzyklus, der das reale Fahrverhalten besser

abbildet, eingeführt werden. „So bald wie möglich“ soll von den Vereinten Nationen ein weltweiter WLTP-Prüfzyklus ⁶¹ für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge definiert werden (voraussichtlicher Zeithorizont für die Einführung 2017) (EP 2014a). Der Einsatz innovativer Technologien zur Kraftstoffverbrauchsreduktion wird je nach Fahrzeugtyp und Fahrzyklus mit einem Nachlass von 7 bis 10 g/km für das „Gesamtpaket“ berücksichtigt, wobei die Zuordnung der Anteile einzelner Technologien sowie der dafür zugrunde liegende Fahrzyklus zunächst nicht transparent definiert sind (EP 2008, EP 2014b). Im Zeitraum zwischen 2015 und 2020 soll übergangsweise der Grenzwert von 130 g/km (europäischer Flottenzielwert) eingehalten werden. Die auf Hersteller bezogenen Grenzwerte sind abhängig vom Portfolio angebotener Fahrzeuge und werden nach (5.86) berechnet (vgl. auch **Abbildung 5.17**). Die Höhe der Strafen liegt grundsätzlich bei 95 €/g pro eine Neuzulassung für jedes Gramm CO₂ über dem Grenzwert. Die Höhe der Strafzahlungen wird bis 2018 zunächst gewichtet, wie in **Abbildung 5.16** dargestellt, abgestuft eingeführt (Puls 2013).

Abbildung 5.31 Jahresfahrleistungen und der Einsatzzweck von Pkw (DAT 2013)

<input type="checkbox"/> Jährliche Fahrleistung		<input type="checkbox"/> Nutzung der Pkw/Kombi	
<i>Aller Pkw/Kombi</i>			
Fahrleistung	Anteil	Nutzungsart	Anteil
bis unter 5.000 km	4%	rein private Fahrten (Einkauf, Wochenenden, Urlaub)	60%
5.000 bis unter 13.000 km	23%	Fahrten zwischen Wohnung und Arbeitsstätte	33%
10.000 bis unter 13.000 km	27%	rein geschäftliche oder dienstliche Fahrten	7%
13.000 bis unter 16.000 km	19%		
16.000 bis unter 20.000 km	5%		
20.000 bis unter 25.000 km	10%		
25.000 bis unter 30.000 km	5%		
30.000 bis unter 35.000 km	3%		
35.000 bis unter 50.000 km	2%		
50.000 km und mehr	1%		
keine Angabe	1%		
Durchschnitt	14.300 km		

Eine Kostengegenüberstellung des Einflusses der Kraftstoffeinsparung durch Benutzung von thermoelektrischen Generatoranlagen zur Rekuperation von Abgaswärme auf die voraussichtlich entstehenden Strafzahlungen (Herstellerseite) bzw. die Aufwandskosten für den Kraftstoff im Betrieb des Fahrzeugs (Kundenseite) zeigt **Abbildung 5.32**, wobei

⁶¹ World Light Duty Test Procedure

von folgenden Annahmen für diese Abschätzung ausgegangen wurde:

- Die TEGA erhöht die Gesamtmasse des Fahrzeugs, wodurch sich der zulässige CO₂-Ausstoß S_n für ein Fahrzeug zunächst erhöht, auch wenn nur geringfügig (vgl. (5.85)). Ein Mehrverbrauch durch Zusatzmasse wird im TEGA-Modell bereits berücksichtigt.
- Die Gesamtkosten zur Herstellung einer TEGA inklusive der elektronischen Baugruppen sind etwa doppelt so hoch wie die Materialkosten für die Herstellung der dafür benötigten TEG-Module (Salzberger 2009). Die Einbaukosten (ins Fahrzeug) wurden hierbei nicht mitberücksichtigt. Die in der Literatur zu findenden Angaben zu Rohstoffpreisen unterliegen sehr hohen Schwankungen. So variieren z.B. die Preisangaben von Bismutellurid von 140 bis 500 USD/kg (vgl. Yazawa 2012, Brehm 2009 und Böttner 2009). Für diese Untersuchungen wurden die höchsten Preise angenommen („worst-case“).
- Die Jahresfahrleistungen und der Einsatzzweck (etwaige Zuordnung des Fahrzyklus) von Pkw wurden aus den Angaben in der **Abbildung 5.31** abgeleitet.
- Die Abschätzung basiert auf Mittelwerten aus den Berechnungen für den CO₂-Ausstoß von reduzierten Flotten von BMW, Daimler und Audi (vgl. 5.3.4 und **Abbildung 5.17**) und auf Mittelwerten (Fahrzyklus übergreifend) aus Simulationsergebnissen für die relative Kraftstoffeinsparung.
- Die (Bonus-) Anrechnung innovativer Technologien zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes werden hier mit gemäßigten 0,5 g/km berücksichtigt (Herberger 2008).

Bei einer berechneten Kraftstoffeinsparung von etwa 4 % lässt sich eine durchschnittliche Reduktion des durchschnittlichen CO₂-Ausstoßes von ca. 6 g/km erreichen. Dies würde eine Strafminderung für die betrachtete, reduzierte Flotte nach der Regelung bis 2018 um durchschnittlich 80 % bedeuten. Ein optimiertes thermoelektrisches Design (Szenario III) könnte mit mittlerer CO₂-Reduktion von 8 bis 12 g/km gänzlich zur Einhaltung der Grenze von 130 g/km bei einem Pkw der Mittelklasse führen. Die Materialkosten von weniger als 1,5 €/W sind hier auf der Grundlage von Bismut- und Bleitellurid-Modulen berechnet. Sollten Skutterudite mit vergleichbaren Leistungsdaten eingesetzt werden, so könnten die Materialkosten jedenfalls halbiert werden.

Abbildung 5.32 Kostengegenüberstellung Szenarien I-III

	ZT=0,9	ZT=1,2	ZT=1,8		
mittlere rel. Kraftstoffreduktion/%	4,16	5,30	8,00	Preis Kraftstoff/ (€/l)	1,45
CO ₂ -Reduktion/(g/km)	6,15	7,84	11,83	Jahresfahrleistung/km	20000
S _{ist} mit TEGA/(g/km)	141,70	140,02	136,02	Kurs USD/EUR	0,8899
ΔS _n TEGA/(g/km)	4,12	2,43	-1,56	Jahreszulassungszahl (reduzierte Flotte)	207977
Strafminderung pro Neuzulassung/€	-631,81	-752,06	-782,82	Kraftstoffverbrauch ohne TEGA/(l/100km)	10,13
Kraftstoffeinsparung/(€/Jahr)	122,21	155,70	235,02	CO ₂ Ausstoß ohne TEGA S _{ist} (g/km)	147,85
mittlere Leistung P _{TEGA} /W	475,00	731,00	1245,00	zugelassener CO ₂ Ausstoß mit TEGA S _{solli} (g/km)	137,58
Kosten TEGA /(€/W)	1,44	0,94	0,55	Strafzahlungen pro Neuzulassung ohne TEGA/€	782,82
Kosten TEGA/(USD/kW)	1622,65	1054,39	619,08	Rohstoffpreis/(USD/kg)	220
TEGA Kosten (Material)/EUR	685,90	685,90	685,90	Rohstoffvolumen V _{TEGA} /m ³	13,7E-05
Bonus der Technologie/ (g/km)	0,5	0,5	0,5	Dichte Rohstoff ρ _{TEGA} /(kg/m ³)	7746,4
				Masse TEGA m _{TEGA} /kg	20

Ausgehend von einer Jahreskilometerleistung von 20.000 km läge die Amortisationszeit einer thermoelektrischen Generatoranlage im Pkw aufgrund des Kostenrücklaufs für den Kraftstoff, abhängig von Technologiereife zwischen etwa 3 und 10 Jahren, und entspräche somit im besten Fall etwa den üblichen Amortisationszeitrahmen für ein Bündel von Maßnahmen zur Kraftstoffverbrauchssenkung wie z.B. eine Kombination aus Downsizing, Start-Stopp-System, variabler Ventilsteuerung usw. (vgl. Bohr 2008, IKA 2012).

Die verschärften Anforderungen an die Grenzwerte für den CO₂-Ausstoß bei Pkw ab 2020 von 95 g/km können also auch nicht mithilfe von Thermoelektrik erfüllt werden. Sollte die Entwicklung zukünftiger Verbrennungsmotoren zu weniger Hubraum und kühleren Abgastemperaturen führen, müsste die mithilfe einer TEGA zu erwartende generierte Leistung nochmal nach unten korrigiert werden. Für starkmotorisierte und verhältnismäßig leichte Fahrzeuge kann die Nutzung von Thermoelektrik zur Energierückgewinnung aus Abgaswärme im Hinblick auf die Reduktion des CO₂-Ausstoßes und hinsichtlich der Senkung der Strafzahlungen dennoch interessant sein.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Automobilhersteller müssen den reglementarischen Anforderungen in Bezug auf den CO₂-Ausstoß einerseits und den Kundenanforderungen andererseits gerecht werden. Die Entwicklung neuer Technologien in der Mobilität ist vor allem vom Kundenverhalten und von unterschiedlichen Reglementierungen abhängig, welche zugleich auch die Rahmenbedingungen für die Hersteller abstecken.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden thermoelektrische Systeme zur Rückgewinnung thermischer Energie in der Kraftfahrzeugtechnik anhand theoretischer Grundlagen und mithilfe experimenteller Untersuchungen im Detail charakterisiert und ausgelegt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ging schließlich ein Simulationsmodell hervor, welches Prognosen über die Effektivität einer thermoelektrischen Generatoranlage (TEGA) bei Rekuperation von Abgaswärme in Pkw ermöglicht. Unterschiedliche Fahrzeugtypen wurden anhand verschiedener internationaler Fahrzyklen in die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bzw. dessen relativer Einsparung durch TEGA berücksichtigt. Die dadurch zu erwartende Reduktion des CO₂-Ausstoßes wurde ermittelt und vor dem Hintergrund europäischer reglementarischer Maßnahmen sowie aktueller Rohstoffpreise im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Technologie interpretiert.

Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz thermoelektrischer Generatorsysteme in Pkw zur Senkung des CO₂-Ausstoßes hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und ihrer Technologiekosten mit Maßnahmen zur Getriebeoptimierung (stufenloses Getriebe, Doppelkupplungsgetriebe) oder mit Funktionen wie Start-Stopp-Systeme vergleichbar ist (vgl. auch IKA 2012). Eine endgültige Aussage für oder gegen den Einsatz von TEGA im Pkw lässt sich allerdings aufgrund dieser Studie allein nicht formulieren, da der Wirkungsgrad und die damit direkt verknüpfte Wirtschaftlichkeit solcher Systeme stark vom Einbauraum, den Antriebskonzepten und dem Fahrverhalten abhängt. So führen z.B. beinahe alle motorseitigen Optimierungen des Kraftstoffverbrauchs zur Senkung des Leistungsertrags thermoelektrischer Systeme im Abgasstrang (geringere Temperaturen des Abgases). Die Diskrepanz zwischen den theoretisch möglichen und den praktisch realisierbaren Konzepten zur Systemintegration wird zwar zunehmend kleiner, bietet jedoch noch Optimierungsspielraum. Aktuelle Veröffentlichungen berichten über Testergebnisse an Prototypfahrzeugen (BMW, Ford), welche netto Kraftstoffeinsparung mithilfe thermoelektrischer Generatoren von bis zu 1,2% zeigen (Crane 2013). Hier wird auch deutlich, dass der aktuelle Stand von Systemintegration thermoelektrischer Generatoren in Pkw noch weit hinter der Serienreife liegt. Der starke Unterschied

zwischen den theoretisch möglichen und den zurzeit realisierten Ergebnissen ist hauptsächlich folgenden Störfaktoren geschuldet:

1. dem Mangel an kosteneffektiven thermoelektrischen Materialien und Verbindungstechniken zur Herstellung von Hochtemperaturgenerator-Modulen sowie thermisch stabilen Materialien zur thermischen Ankopplung der Module an die Wärmequelle (Temperaturstabilität oberhalb von 600°C),
2. dem Widerstand von Seiten der Automobilhersteller, thermoelektrische Generatoranlagen zwischen den Krümmer und dem abgasnachbehandelnden Katalysator zu platzieren, was einen Zugewinn von Heisseitentemperaturen von 100-200 K) bedeuten würde und
3. der Tatsache, dass in der Prototypenentwicklung stets versucht wird, die Generatoranlagen auf Basis nur einer Materialpaarung zu realisieren (vgl. 4.5, 2. Absatz).

Sollte es gelingen diese Hemmnisse zu überwinden, zeichnet sich eine Anwendung thermoelektrischer Systeme insbesondere beim Einsatz in verhältnismäßig leichten und zugleich stark motorisierten Fahrzeugen als wirtschaftlich ab, was die thermoelektrische Rekuperation von Abgaswärme bei Fahrzeugen der Mittel- und oberen Mittelklasse sinnvoll erscheinen lässt. Die Anforderungen an die Grenzwerte für den CO₂-Ausstoß bei Pkw ab 2020 von 95 g/km werden dennoch nicht allein mit Hilfe von Thermoelektrik erfüllt werden können. Öffentlich geförderte Projekte mit dem Ziel, unter anderem eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 5% im Pkw zu erreichen, laufen gegenwärtig⁶². Welche praktisch realisierten Ergebnisse diese Vorhaben vorweisen werden, bleibt abzuwarten. Andere Anwendungsfelder zur Rekuperation thermischer Energie in mobilen und stationären Systemen sind auch denkbar. So konnte eine kosteneffektive Integration einer TEGA im Lastkraftwagen bereits im Rahmen eines von der Michigan State University durchgeführten, öffentlich geförderten Projekts gezeigt werden (Schock 2011).

Auch der Rennsport ist zunehmend bemüht, sein Image mit umweltfreundlichen Technologien zeitgemäß zu gestalten. Die Rennmotoren werden in mehr als 70 % der

⁶² DOE #DE-EE0005387 vom U.S. Department of Energy Office of Vehicle Technologies (Crane 2013) oder TEG2020 "Entwicklung modularer leistungsstarker und flexibel einsetzbarer thermoelektrischer Generatoren zur thermischen Rekuperation in Verbrennungs-kraftmaschinen und -anlagen" (BMBF) oder ThermoPower „Strom aus Wärme mit thermoelektrischen Generatoren“ (BMBF) oder IN-TEG „Innovative Materialien und Generatoren für die thermoelektrische Energiegewinnung der Zukunft“(BMBF)

Fälle bei Volllast betrieben und stellen somit sehr günstige Voraussetzungen für die Wärmerückgewinnung bereit (vgl. Trzesniowski 2012). Der Einsatz einer thermoelektrischen Generatoranlage könnte z.B. bei Hybrid-Formel 1 zur kurzfristigen Energiebereitstellung als eine Komponente eines ERS-Systems⁶³ interessant sein.

Die Rekuperation der Abgaswärme bei Krafträdern mittels Thermoelektrik stellt ein weiteres spannendes Untersuchungsfeld dar. Aufgrund des relativ geringen Bedarfs an elektrischer Energie könnte eine TEGA den herkömmlichen Generator in einem Kraftrad möglicherweise ganz ablösen.

Stationäre thermoelektrische Anwendungen wie etwa in Blockheizkraftwerken oder die Abwärmenutzung aus industriellen Prozessen sind ebenso zur Optimierung der Systeme hinsichtlich ihrer Energieeffizienz denkbar.

⁶³ ERS steht für Energy Recovery System (vgl. Nimmervoll 2013).

Literatur

- Abas, R. A; Hayashi, M; Seetharaman, S: Thermal Diffusivity Measurements of CMSX-4 Alloy by the Laser-flash Method. In: International Journal of Thermophysics 1 (2007), S. 109-122, DOI: 10.1007/s10765-007-0163-5.
- Aharon, Z. H; Nashua, N. H (Erfinder): Schutzrecht United States Patent US005228923A (Dezember 1991).
- Aixala L; Monnet, V: RENOTER Project: Waste Heat Recovery on Passenger Car and Heavy-Duty Truck Diesel Engine thanks to thermoelectricity. In: Jänsch, D. (Hrsg.): Thermoelektrik. Eine Chance für die Automobilindustrie, expert Verlag Renningen, IAV, 2009, S. 273-289. - ISBN 978-3-8169-2877-5.
- Ambrosio, C; Genovese, M; Ferre, A: Energy Efficient Vehicles for Road Transport. In: Mission Profile Report, D1.2.1, v 1.0, 2009. <http://www.eevert.net/Documents/D1.2.1%20Mission%20Profile%20report.pdf> (Stand 26.03.2014).
- Anatychuk, L. I: Seebeck Or Volta? In: Journal of Thermoelectricity (1994), Nr. 1, S. 9-10.
- Anatychuk, L. I; Havrylyuk, M. V: Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules. In: Journal of Electronic Materials 5 (2011), S. 1292-1297, DOI: 10.1007/s11664-011-1619-8.
- Anderson, E. E; Viskanta, R: Spectral and Boundary Effects on Coupled Conduction-Radiation Heat Transfer through Semitransparent Solids. In: Wärme- und Stoffübertragung 1 (1973), S. 14-24.
- Andrè, M: Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part A: The ARTEMIS European driving cycles. In: Report INRETS-LTE 0411, June 2004. http://inrets.fr/ur/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/road3/method31/Artemis_cycles_report_LTE0411.pdf (Stand 26.03.2014).
- Andrè, M: Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions – Part B: Driving cycles according to vehicle power. In: Report INRETS-LTE 0412, June 2006. http://www.inrets.fr/fileadmin/ur/lte/artemis/road3/method31/LTE0412_SpecifCycles.pdf (Stand 26.03.2014).

- Arndt, M; Sauer, M; Wolz, M: Verbrauchssenkung durch verbesserte Klimaanlage-Regelung. Bedarfsgerechte Lüftung mit dem Climate-Control-Sensor. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2007), Nr. 5, S. 404-410. - ISSN 0001-2785 10810.
- Atkins, P. W; Paula, J: Kurzlehrbuch Physikalische Chemie. WILEY-VCH Verlag Weinheim, 2008. - ISBN 978-3-527-31807-0
- ATZ, Verfasser unbekannt: Dossier. Entwicklungsziel CO2-Minderung. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2011), Nr. 2, S. 86f. - ISSN 0001-2785 10810.
- Audi, Effizienz: serienmäßig in jedem Audi. Internetauftritt AUDI AG. <http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/effizienz/effizienztechnologien.html> (Stand 10.10.2012).
- Baba, T; Ono, A: Improvement of the laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements. In: Meas. Sci. Technol 12 (2001), S. 2046-2057.
- Baehr, H. D; Stephan, K: Wärme- und Stoffübertragung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. - ISBN 978-3-540-87689-2.
- Balazs, A; Nijs, M; Pischnger, S: Optimierte Auslegung von Hybridantriebssträngen unter realen Fahrbedingungen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2012), Nr. 6, S. 534-541. - ISSN 0001-2785 10810.
- Bals, R; Pfeifer, E; Lewe, P: Direkte Abwärmenutzung am Ottomotor. In: Brill, U. (Hrsg.): Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VI. expert Verlag Renningen, Essen, 2008, S. 50-68. - ISBN 978-3-8169-2820-1.
- Banzhaf, M; Edwards, S; Pantow, E: Thermomanagement für künftige Nutzfahrzeuge. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2010), Nr. 9, S. 650-655. - ISSN 0001-2785 10810.
- Bernhard, F (Hrsg.): Technische Temperaturmessung. Physikalische und messtechnische Grundlagen, Sensoren und Messverfahren, Messfehler und Kalibrierung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. - ISBN 3-540-62672-7.
- Bhushan B (Hrsg.): Nanotechnology. Springer Handbook of Nanotechnology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. -ISBN 9783642025242.
- Böckh, P; Wetzel, T: Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. - ISBN-13 978-3642159589.

- Bohr, B: Klimaschutz, der sich rechnet! In: Automobiltechnische Zeitschrift (2008), Nr. 5, S. 381. - ISSN 0001-2785 10810.
- Boland, D: Wirkungsgradoptimaler Betrieb eines aufgeladenen 1,0 l Dreizylinder CNG Ottomotors innerhalb einer parallelen Hybridarchitektur. Universität Stuttgart, Diss., 2010.
- Böttner, H: Schwerpunkte und Trends der Thermoelektrik: Ein nationaler und internationaler Überblick. In: Jänsch, D (Hrsg.): Thermoelektrik. Eine Chance für die Automobilindustrie, expert Verlag Renningen, IAV, 2009, S. 70-79. - ISBN 978-3-8169-2877-5.
- Braess H. H: Mobilitätseffizienz als Vergleichsgröße. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2008), Nr. 9, S. 717. - ISSN 0001-2785 10810.
- Brauner, G: Elektrische Energieversorgung und Mobilität in Europa. In: 30. Internationales Wiener Motorensymposium, Band 2, Wien, 2009, S. 83-91.
- Bredl, C. D: Thermoelektrizität. In: Physikalisches Grundpraktikum. Technische Universität Darmstadt (2012), S. 16-22. http://www.physik.tu-darmstadt.de/study/praktika/bsc_gp/gpm_2/index.de.jsp (Stand 08.11.2012)
- Brehm, H; Heckenberger, T: Anforderungen an thermoelektrische Generatoren zum Einsatz im Abgasstrang von Automobilen. In: Jänsch, D (Hrsg.): Thermoelektrik. Eine Chance für die Automobilindustrie, expert Verlag Renningen, IAV, 2009 - ISBN 978-3-8169-2877-5.
- Brünlinghaus C; Winterhagen, J: Stuttgarter Symposium 2010. Weltauto ohne Chance. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2010), Nr. 5, S. 310-313. - ISSN 0001-2785 10810.
- Brünlinghaus, C; Winterhagen, J: CO₂-Grenzwerte stellen die Weichen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2011), Nr. 2, S. 88-91. - ISSN 0001-2785 10810.
- Bürkle, A; Hettel, A; Jebasinski, R; Oesterle, J; Tchamgoue, H: Numerical Optimisation of Contact Pressure with Respect to the Heat Exchange Properties of a Thermo-Electric Generator. In: Thermoelectrics goes automotive, expert Verlag Renningen, IAV, 2011, S 178-190, - ISBN 978-3-8169-3064-8.
- Caillat, T; Fleurial, J. P; Snyder, G. J: Development of High Efficiency Segmented Thermoelectric Unicouples. In: Proceedings ICT 2001 20th International Conference on Thermoelectrics, S. 282-285.

- Chau, K. T; Chan C.C: Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles. In: Proceedings of the IEEE 4 (2007), S. 821-835.
- Chen, M; Lu, S. S; Liao, B: On the Figure of Merit of Thermoelectric Generators. In: Journal of Energy Resources Technology 127 (2005), S. 37-41. DOI 10.1115/1.1811120.
- Clemens, H; Colisi, J; Hoetger, M: Das Amovis Abwärmekonzept: 15 Jahre praktische Erfahrung mit Mikrodampfprozessen. In: Brill, U (Hrsg.): Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VI. expert Verlag Renningen, Essen, 2008, S 32-49,- ISBN 978-3-8169-2820-1.
- Cook, B. A; Chan, T. E; Dezi, G: High-Performance Three-Stage Cascade Thermoelectric Devices with 20% Efficiency. In: Journal of Electronic Materials, Vol. 44, Nr. 6, 2014, S. 1936-1942, DOI 10.1007/s11664-014-3600-9.
- Crane, D. T; Lagrandeur, J. W: Progress Report on BSST-Led US Department of Energy Automotive Waste Heat Recovery Program. In: Journal of Electronic Materials 39 (2009), Nr. 9, S. 2142-2148. - DOI 10.1007/s11664-009-0991-0.
- Crane, D. T; et al.: TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. In: Journal of Electronic Materials 42 (2013), Nr. 7, S. 1582-1591. - DOI 10.1007/s11664-012-2327-8.
- DAT, Deutsche Automobil Treuhand GmbH: Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen und dem Stromverbrauch. Ausgabe 2012, 4. Quartal. <http://www.dat.de/leitfaden/LeitfadenCO2.pdf> (Stand 10.10.2012).
- DAT, Deutsche Automobil Treuhand GmbH (Hrsg.): DAT Report 2013. http://www.dat.de/uploads/media/DAT-Report_2013_kfz-betrieb.pdf (Stand 26.03.2014).
- Dobrowski, P; Krakau, G; Vogel, A: Physik für Ingenieure. Teubner Verlag Wiesbaden, 2003. - ISBN 3-519-46501-9.
- Dornieden, B; Junge, L; Pascheka, P: Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2012), Nr. 3, S. 230-235. - ISSN 0001-2785 10810.
- Dresselhaus, M. S; Dresselhaus, G; Sun, G; Koga, T: Low-dimensional thermoelectric materials. Conference Proceedings. In: Physics Of The Solid State 41 (1999), Nr. 5, S. 679-682.

- Dresselhaus, M. S; Chen, G; Ren, Z. F; Dresselhaus, G; Henry, A; Fleurial, J.-P: New Composite Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications. In: The Member Journal Of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM) 61 (2009), Nr. 4, S. 86-90.
- Dudenhöffer, F; John, E. M: EU-Normen für Verbrauchsangaben von Autos: Mehr als ein Ärgernis für Autokäufer. In: ifo Schnelldienst, 62, (2009), Nr. 13, S. 14-17. - ISSN 0018-974 X.
- EEG, Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. In: Bundesgesetzblatt 42 (2011) Teil I 4. August 2011. http://www.bhkw-infozentrum.de/download/bundesgesetzblatt_neuregelung_eeg.pdf (Stand 18.04.2014).
- EP, Europäisches Parlament: Begrenzung der CO₂-Emissionen von Pkw. Pressemitteilung. [http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140221IPR36626/html/Begrenzung-der-CO₂-Emissionen-von-Pkw](http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140221IPR36626/html/Begrenzung-der-CO2-Emissionen-von-Pkw) (Stand 26.02.2014).
- EP, Europäisches Parlament: CO₂-Emissionen: Umweltfreundliche Lieferwagen bis 2020. [http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140110IPR32384/html/CO₂-Emissionen-Umweltfreundlichere-Lieferwagen-bis-2020](http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140110IPR32384/html/CO2-Emissionen-Umweltfreundlichere-Lieferwagen-bis-2020) (Stand 26.03.2014).
- EP, Europäisches Parlament: Standpunkt des Europäischen Parlaments im Hinblick auf den Erlass der Verordnung (EG) 2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen (EP-PE_TC1-COD(2007)0297). <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=TC&reference=P6-TC1-COD-2007-0297&language=DE&format=PDF> (Stand 26.03.2014).
- EP, Europäisches Parlament. Standpunkt des Europäischen Parlaments. „[...] zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen“. <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+TC+P6-TC1-COD-2007-0297+0+DOC+PDF+V0//DE> (Stand 10.10.2012).

- Espig, M; Johannaber, M; Wohlecker: Simulation der Verbrauchsverbesserung durch Gewichtreduzierung in Pkw. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* (2006), Nr. 12, S. 466-474. - ISSN 0001-2785 10810.
- Espinosa, N; Lazard, M; Aixala, L; Scherrer, H: Modeling a Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery. In: *Journal of Electronic Materials* 9 (2010), S. 1446-1455. DOI 10.1007/s11664-010-1305-2.
- Fabis, R. M: Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen. Technische Universität Berlin, Diss., 2006.
- Flik, M; Edwards, S; Pantow, E: Emissionssenkung bei Nutzfahrzeugen durch Thermomanagement. In: 30. Internationales Wiener Motorensymposium. Wien 2009. VDI Verlag Düsseldorf, 2009, S. 308-329. - ISSN 978-9449.
- Fricke, J; Caps, R: Heat Transfer in Thermal Insulations-Recent Progress in Analysis. In: *International Journal of Thermophysics* 9 (1988), S. 885-895.
- Friedrich, H; Schier, M; Häfele, C; Weiler, T: Strom aus Abgasen – Fahrzeug gerechte Entwicklung thermoelektrischer Generatoren. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* (2010), Nr. 4, S. 292-299. - ISSN 0001-278510810.
- Garrido, J; Casanovas, A: New Method for Evaluating the Peltier Coefficient Based on Temperature Measurements in a Thermoelectric Module. In: *Journal of Electronic Materials* 7 (2012), S. 1990-1995, DOI:10.1007/s11664-012-1966-0.
- Gies, S: Revolution oder Evolution. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* (2008), Nr. 10, S. 863. - ISSN 0001-2785 10810.
- Glück, B: Wärmeübertragung. Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren. In: Bausteine der Heizungstechnik. Verlag für Bauwesen Berlin, 1990. - ISBN 3-345-00515-8.
- Goldsmid, H. J. (Hrsg.): Introduction to Thermoelectricity. In: Springer series in material science 121. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. - ISBN 978-3-642-00715-6.
- González-Mendizabal, D; Bortot, P; Lopez de Ramos, A. L: A Thermal Conductivity Experimental Method Based on the Peltier Effect. In: *International Journal of Thermophysics* 4 (1998), S. 1229-1238.

- Goßlau, D; Steinberg, P: Vergleich gesetzlicher Fahrzyklen mit dem realen Kundenverhalten. In: Jänsch, D (Hrsg.): Thermoelektrik. Eine Chance für die Automobilindustrie, expert Verlag Renningen, IAV, 2009, S. 143-153, - ISBN 978-3-8169-2877-5.
- Gryadunov A. I, Aliev, A. S: Rapid Methods for Determination of Thermal Conductivity Coefficients of Thermoelectric Materials in Semiconductor Thermobatteries. Translated from: Inzhenerno-fizicheskii Zhurnal 2 (1991), S. 296-300.
- Hacker, G; Burzler, S; Matern, M. A: Der Luftwärmetauscher - ein Thema für den Physikunterricht aus der Bauphysik. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (2004), 1/3, S. 20-27.
- Häfele, C; Schier, M; Hahn, S; Weiler, T; Friedrich, H: Experimentelle Fahrzeug-Untersuchungen im Hinblick auf exergetische Potentiale und Gesamtsystemrückwirkungen bei der Integration Thermoelektrischer Generatoren. In: Jänsch, D. (Hrsg.): Thermoelectrics goes automotive, expert Verlag Renningen, IAV, 2011, S. 42-70, - ISBN 978-3-8169-3064-8.
- Hamm, M: LED-Abblendlicht mit 77% Energieeinsparung. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2012), Nr. 2, S. 142-147. - ISSN 0001-2785 10810.
- Handler, Committee On Oceanography National Research Council: Radioactivity in The Marine Environment. In: Panel On Radioactivity In The Marine Environment. Printing and Publishing Office, National Academy of Sciences (Hrsg.), Printing and publishing Office Washington, 1971.
- Harman, T. C; Walsh, M. P; Laforge, B. E; Turner, G. W: Nanostructured Thermoelectric Materials. In: Journal of Electronic Materials 34 (2005), Nr. 5, S. L19-L22.
- Hatzikraniotis, E; Zorbas, K. T; Samaras, I; Kyratzi, T; Paraskevopoulos, K. M: Efficiency Study of a Commercial Thermoelectric Power Generator (TEG) Under Thermal Cycling. In: Journal of Electronic Materials 9 (2010), S. 2112-2116. DOI:10.1007/s11664-009-0988-8.
- Hauer, K. H: Analysis Tool for Fuel Cell Vehicle Hardware and Software (Controls) with an Application to Fuel Economy Comparisons of Alternative System Designs. University of California Davis, Diss., 2001.
- Heikes R. R; Roland, W. U: Thermoelectricity: Science And Engineering. Interscience Publishers New York, London, 1961.

- Helmers, L; Müller, E; Schilz, J; Kaysser, W. A: Graded and stacked thermoelectric generators-numerical description and maximization of output power. In: Materials Science and Engineering B56 (1998), S. 60-68.
- Hepke, G: Direkte Nutzung von Abgasenthalpie zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen. Technische Universität München, Diss., 2010.
- Herberger, R; Jahn, H; Wetzel, F; Umweltbundesamt (Hrsg.): Kostenschätzung für die CO₂-Emissionsminderung bei Pkw. Emissionspotentiale und ihre Kosten. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3505.pdf> (Stand 26.03.2014).
- Herrmann, F: Was ist Wärmestrahlung? In: Praxis-Magazin. PdN-PhiS. (2005) 5/54. http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/publication/praxis/waermestrahlung_praxis.pdf (Stand 08.11.2012)
- Hesse, B: Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit. Universität Duisburg-Essen, Diss., 2011.
- Hesse, B. G; Hiesgen, M; Koppers; D. Schramm: Einfluss verschiedener Nebenverbraucher auf Elektrofahrzeug. In: Prof, H; Schönhartig, J; Schramm, D; Ziegler, J (Hrsg.): Zukünftige Entwicklung in der Mobilität. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012, S. 91-104. - ISBN 978-3-8349-3232-7.
- Hetzer, U: Batterie- und Energiemanagement in Pkw und Lkw. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2006), Nr. 2, S. 102-105. - ISSN 0001-2785 10810.
- Hicks, L. D; Harman, T. C; Dresselhaus, M. S: Use of quantum-well superlattices to obtain a high figure of merit from nonconventional thermoelectric materials. In: Applied Physics Letters 63 (1993), S. 3230-3232. - DOI 10.1063/1.110207.
- Hicks, L. D; Harmann, T. C; Sun, X; Dresselhaus, M. S: Experimental study of the effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. In: Physical Review 53 (1996), Nr. 16, S. 493-496.
- Holman, J. P: Heat Transfer. McGraw-Hill, 1990. - ISBN 0-07-909388-4.
- Hu, J; Odeom T. W; Lieber, C. M: Chemistry and Physics in One Dimension: Synthesis and Properties of Nanowires and Nanotubes. In: Accounts Of Chemical Research 32 (1999), Nr. 5, S. 435-445. - DOI 10.1021/ar9700365.

- Huang, M. J; Chou, P. K; Lin, M. C: An Investigation of the Thermal Stresses Induced in a Thin-Film Thermoelectric Cooler. In: Journal of Thermal Stresses 31 (2008), S. 438-454. DOI 10.1080/01495730801912512.
- Huang C. J; Chen, W. C; Ni, C. L: Thermoelectric energy harvesting with 1 mV low input voltage and 390 nA quiescent current for 99.6 % maximum power point tracking. In: Proceedings of the 38th European Solid-State Circuit conference (ESSCIRC) 2012, S. 105-108. - DOI 10.1109/ESSCIRC.2012.6341267.
- Hucho, W. H: Grenzwert-Strategie. Halbierung des cw-Wertes scheint möglich. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2009), Nr. 1, S. 16-23. - ISSN 0001-2785 10810.
- Ibach, H; Lüth, H: Festkörperphysik. Einführung in die Grundlagen. Springer Berlin, Heidelberg, 2009. - ISBN 978-3-540-85795-2.
- IKA, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen (Hrsg.): CO₂-Reduzierungspotentiale bei Pkw bis 2020. Abschlussbericht 113510. Aachen, Dezember 2012. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/co2-reduzierungspotenziale-bei-pkw-bis-2020-abschlussbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (Stand 02.04.2014).
- Jackey, R: A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection, White Paper, The Mathworks, Inc., 2007.
- Jänsch, D; Laudien, M; Kitte, J: Thermoelektrische Abwärmenutzung in Kraftfahrzeugen. In: ATZ-online (25.06.2009). <http://www.atzonline.de/Events/Vortrag/312.html> (Stand 10.10.2012)
- Junior, C: Analyse thermoelektrischer Module und Gesamtsysteme. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2010.
- Kasap, S. O: Thermoelectric Effects In Metals: Thermocouples. In: An E-Booklet, S. O. Kasap (1997-2001). <http://www.kasap.usask.ca/selected/> (Stand 08.11.2012)
- Kemle, A; Manski, R; Weinbrenner, M: Klimaanlage mit erhöhter Energieeffizienz. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2009), Nr. 9, S. 650-656. - ISSN 0001-2785 10810
- Kim, S; Park, S; Kim, Su; Rhi, S: A Thermoelectric Generator Using Engine Coolant for Light-Duty Internal Combustion Engine-Powered Vehicles. In: Journal of Electronic Materials 40 (2011), Nr. 5, S. 812-816. - DOI 10.1007/s11664-011-1580-6.

- Kitte, J; Friedrich, I; Jänsch, D; Sommer, A: Opportunities of Waste Heat Recovery or Heat Conditioning via Thermoelectricity in Passenger Cars: A Comparison of the System Integration Challenges. In: Jänsch, D (Hrsg.): Thermoelektrik. Eine Chance für die Automobilindustrie, expert Verlag Renningen, IAV, 2009, S. 249-272. - ISBN 978-3-8169-2877-5.
- Koga, T; Sun, X; Cronin, S. B; Dresselhaus, M. S; Wang K. L; Chen, G: Models for low-dimensional thermoelectricity. In: Journal of Computer-Aided Materials Design, (1997) 4, S. 175-182.
- Koppers, M; Tatarinov, D; Bastian, G: Thermoelektrische Generatoranlage zur Energierückgewinnung im Kraftfahrzeug. In: Prof, H; Schönhartig, J; Schramm, D; Pascha, W (Hrsg.): Schritte in die künftige Mobilität. Springer Gabler, Wiesbaden, 2013, S. 93-110,- ISBN 978-3-8349-4307 -1.
- Korzhuev, M. A; Katin, I. V: On the Placement of Thermoelectric Generators in Automobiles. In: Journal of Electronic Materials 39 (2010), Nr. 9, S. 1390-1394. DOI 10.1007/s11664-010-1332-z.
- Kraftmakher, Y: Simple experiments with a thermoelectric module. In: European Journal Of Physics 26 (2005) S. 959-967. DOI 10.1088/0143-0807/26/6/003.
- Kumar, S; Heister, S. D; Xu X; Salvador, J. R; Meisner, G. P: Thermoelectric Generator for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part II: Parametric Evaluation and Topological Studies. In: Journal of Electronic Materials 42 (2013), Nr. 6, S. 944-955. DOI: 10.1007/s11664-013-2472-8.
- Kyarad, A: Thermoelektrische und Photovoltaische Effekte in Metall-Halbleiter Multilagstrukturen. Universität Regensburg, Diss., 2007.
- Laube, S; Tatarinov, D; Morschel, M; Bastian, G: Impact of thermal bypasses in high temperature TE-modules. In: 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conference Proceedings (2012), S. 431-434. DOI: 10.1063/1.4731588.
- Lee, C. C; Wang, D. T; Choi, W. C: Design and construction of a compact vacuum furnace for scientific research. In: Review Of Scientific Instruments 77 (2006), S. 125104-1 - 125104-5. DOI: 10.1063/1.2402910.
- Li, L; Chen, Z; Zhou, M; Huang, R: Developments in semiconductor thermoelectric materials. In: Front. Energy (2011), Nr. 5, S. 125-136,- DOI 10.1007/s11708-011-0151-1.

- Liebl, J; Neugebauer, S; Eder, A; Linde, M; Mazar, B; Stütz, W: Der thermoelektrische Generator von BMW macht Abwärme nutzbar. In: Motortechnische Zeitschrift (2009), Nr. 4, S. 272-281.
- Linde, M; Mazar, B; Eder, A: Der ARG-TEG: Ein Pilotprojekt auf dem Weg zur Industrialisierung der Thermoelektrik im Kraftfahrzeug. In: Jänsch, D (Hrsg.): Thermoelectrics goes automotive, expert Verlag Renningen, IAV, 2011, S. 71-82. - ISBN 978-3-8169-3064-8.
- Linder, H; Bauer, H; Lehmann, C: Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag Leipzig, 2004. - ISBN 3-466-22546-3
- Liu, X; Yu, C. G; Chen, S: Experiments and Simulations on a Heat Exchanger of an Automotive Exhaust Thermoelectric Generation System Under Coupling Conditions. In: Journal of Electronic Materials 43 (2014), Nr. 6, S. 2218-2223,- DOI 10.1007/s11664-014-3015-7.
- Lux, G; Winter, S; Hofman, P; Geringer, B: Thermomanagement zur Verbrauchsabsenkung in Hybridantriebssträngen. In: Brill, U. (Hrsg.): Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs VI. expert Verlag Renningen, Essen, 2008, ISBN 978-3-8169-2820-1.
- Maganga, O; et al.: Hardware Implementation of Maximum Power Point Tracking for Thermoelectric Generators. In: Journal of Electronic Materials 43 (2014), Nr. 6, S. 2239-2300, DOI 10.1007/s11664-014-3046-0.
- Mayer, P. M; Ram, R. J: Optimisation of Heat Sink-Limited Thermoelectric Generators. In: Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering 10 (2006), S. 143-155. DOI 10.1080/10893950600643063.
- McKinsey & Company, Inc.: Beitrag der Elektromobilität zu langfristigen Klimaschutzziele und Implikationen für die Automobilindustrie. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2010. <https://www.bmu.de/verkehr/downloads/doc/45884.php> (Stand 10.10.2012).
- Merker, G. P; Grigul, U: Konvektive Wärmeübertragung. In: Grigul, U (Hrsg.): Wärme und Stoffübertragung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1987. - ISBN 3-540-16995-4.
- Meusel, J: Präparation thermoelektrischer Verbindungshalbleiterschichten und Untersuchung der Eigenschaften in Korrelation zu den Wachstumsbedingungen. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Diss., 2001.

- Mion, C: Investigation of the Thermal Properties of Gallium Nitride using the Three Omega Technique. Raleigh, NC, North Carolina State University, Diss., 2005.
- Montecucco, A; Siviter, J; Knox, A. R: The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. In: Applied Energy 123 (2014), S. 47-54.
- MTZ Forum der Meinungen: Wie kann die Abgas-Restenergie effektiv genutzt werden? In: Motortechnische Zeitschrift (2009), Nr. 4, S. 82f.
- Müller, W; E: Stille Reserve. Thermoelektrische Energiewandler erzeugen Strom aus Abwärme. In: DLR Nachrichten 120 (2011), S. 69-71. http://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/kommunikation/publikationen/120_nachrichten/20_Strom_aus_Abwaerme.pdf (Stand 21.03.2011).
- Nagayoshi, H; Tokumisu, K; Kajikawa, T: Novel Maximum Power Tracking Control System for Thermoelectric Generator and Evaluation of Mismatch Power Reduction. In: Proceedings of the 5th European Conference on Thermoelectrics (2007), S.80ff.
- Nagayoshi, H; Tokumisu, K; Maiwa, H; Kajikawa, T: High Efficiency Maximum Power Point Tracking Power Conditioner For TEG Systems. In: Proceedings of the 6th European Conference on Thermoelectronics (2009), S. P2-23-1-P2-23-3.
- Nagayoshi, H; Tokumisu, K; Maiwa, H; Kajikawa, T: Development of 100-W High-Efficiency MPPT Power Conditioner and Evaluation of TEG System with Battery Load. In: Journal of Electronic Materials 5 (2011), S. 657-661. DOI 10.1007/s11664-010-1499-3.
- NASA, Voyager. The Interstellar Mission. <http://voyager.jpl.nasa.gov> (Stand 17.08.2015).
- Nimmervoll, C: Keine Chance mehr ohne Hybrid. In: Motorsport TOTAL.com. http://www.motorsport-total.com/f1/news/2013/01/2014_Keine_Chance_mehr_ohne_Hybrid_13011605.html (Stand 06.10.2015).
- Nolas, G. S; Morelli, D. T; Tritt, T. M: Skutterudites: A Phonon-Glass-Electron Crystal Approach to Advanced Thermoelectric Energy Conversion Applications. In: Annu. Rev. Matter. Sci. 29 (1999), S. 89-116.
- Oestele, J (Erfinder): Schutzrecht Europäische Patent Anmeldung EP 2 383 533 A2 (April 2011).

- Offermann, V; Glüsing, A. K: Optimierte Wärmeschutzverglasung für thermischen Komfort und Kraftstoffeffizienz. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2012), Nr. 9, S. 711-715. - ISSN 0001-2785 10810.
- Oh, M. W; Ahn, J. H; Lee, J. K: Estimation of Power Generation from Thermoelectric Devices: Model Analysis and Performance Measurements. In: Electronic Materials Letters 3 (2010), S. 129-134. DOI 10.3365/eml.2010.09.129.
- Ono, K; Suzuki, R. O: Thermoelectric power generation: Converting low-grade heat into electricity. In: JOM, 50, (1998), Nr. 12, S. 49-51.
- Pehnt M: Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-14250-5
- Pelster, R; Pieper, R; Hüttl, I: Thermospannungen- viel genutzt und fast immer falsch erklärt! In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (2005), Nr. 1, S. 10-22.
- Perez-Aparicio, J. L; Taylor, R. L; Gavela, D: Finite element analysis of nonlinear fully coupled thermoelectric materials. In: Computational Mechanics 40 (2007), S. 35-45, DOI10.1007/s00466-006-0080-7.
- Prytz, Ø: Electronic structure and bonding in thermoelectric skutterudites. University of Oslo, Department of Physics, Diss., 2007.
- Puls, T: CO₂-Regulierung für PKW. Fragen und Antworten zu den europäischen Grenzwerten für Fahrzeughersteller. Institut der deutschen Wirtschaft Köln, 2013. [http://www.iwkoeln.de/_storage/asset/107033/storage/master/file/2626704/download/Broschüre%20CO₂%20Grenzwerte%20Druck.pdf](http://www.iwkoeln.de/_storage/asset/107033/storage/master/file/2626704/download/Broschüre%20CO2%20Grenzwerte%20Druck.pdf) (Stand 26.03.2014).
- Quan, R. et al.: A Novel Optimization Method for the Electric Topology of Thermoelectric Modules Used in an Automobile Exhaust Thermoelectric Generator. In: Journal of Electronic Materials 42 (2013), Nr. 7, S. 1469-1475. -DOI 10.1007/s11664-012-2291-3.
- Ranalli, M; Adldinger, M; Kossakovski, D; Womann, M: Entwicklung Thermomanagement. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2013), Nr. 9, S. 714-719.
- Rauscher, L; Fujimoto, S; Kaibe, H. T; Sano, S: Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow. In: Measurement Science and Technology 16 (2005), S. 1054-1060. DOI:10.1088/0957-0233/16/5/002.

- Rhode-Brandenburger, K: „die Gewichtsspirale ist durchbrochen“. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2012), Nr. 5, S. 378-380. - ISSN 0001-2785 10810
- Riedl, H: Das große Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik, Motorbuch Verlag, 2005. – ISBN 978-3613024892.
- Rosendahl, L. A; Mortensen, P. V; Enkeshfi, A. A (Erfinder): Schutzrecht International Patent WO2012/041321 A1 (April 2012).
- Rowe, D. M (Hrsg.): CRC Handbook of Thermoelectrics. CRC Press LLC, Florida, 1995. - ISBN 0-8493-0146-7.
- Rowe, D. M: Thermoelectrics, An Environmentally-Friendly Source Of Electrical Power. In: Renewable Energy 16 (1999), S. 1251-1256.
- Rowe, D. M; Smith, J; Thomas, G; Min, G: Weight Penalty Incurred in Thermoelectric Recovery of Automobile Exhaust Heat. In: Journal of Electronic Materials 40 (2011), Nr. 5, S. 478-488. - DOI 10.1007/s11664-011-1571-7.
- Salzberger K; Penninger P; Grytsiv, A; Progl, P: Skutterudites: Thermoelectric Materials for Automotive Applications? In: Journal of Electronic Materials 9 (2009), S. 2074-2078. DOI 10.1007/s11664-009-1005-y.
- Salzberger, K (Erfinder): Schutzrecht International Patent WO2010/112571 A2 (März 2010).
- Sagr, K. M; Mansour, M. K; Musa, M. N: Thermal Design Of Automobile Exhaust Based Thermoelectric Generators: Objectives And Challenges. In: International Journal of Automotive Technology 2 (2008), S. 155-160. DOI 10.1007/s122390080020y.
- Schindler, J: Öl Dämmerung. Deepwater Horizon und das Ende des Ölzeitalters. oekom Verlag München, 2011. -ISBN 978-3-86581-246-9.
- Schlecht, S; Böttner, H: Energiewandler mit großem Zukunftspotential. In: Nachrichten aus der Chemie 56 (2008), Nanostrukturierte Thermoelektrika, S. 136-139. www.gdch.de (Stand 2012).
- Schock, H; et al.: Thermoelectric Conversion of Waste Heat to Electricity in an IC Engine Powered Vehicle. In: Final Report DEFC2604NT42281 Submitted to: US Department of Energy (2011). <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1045212> (Stand 20.11.2014).

- Schoderböck, P; Klocker, H; Sigl, L. S; Seeber, G: Evaluation of the Thermal Diffusivity of Thin Specimens from Laser Flash Data. In: International Journal of Thermophysics 30 (2009), S. 599-607. DOI10.1007/s10765-009-0561-y.
- Schramm, D; Hiesgen, G: Individuell abgestimmter Fahrsimulator, UNIKATE, Universität Duisburg-Essen-Berichte aus Forschung und Lehre Ausgabe 39, 2011, S. 82-93, ISSN 1869-3881.
- Schramm, D; Hiller, M; Bardini, R: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- Schramm, D; Koppers, M: Das Automobil im Jahr 2025. Vielfalt der Antriebstechnik, essentials, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN 978-3-658-04184-7.
- Schuster, N; Kolobrodov, V. G: Infrarotthermographie. WILEY-VCH Verlag Weinheim, 2004. - ISBN-13 978-3-527-40509-1
- Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.): Shell LKW-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030.
http://elib.dlr.de/64553/1/shell_truck_study_2030.pdf (Stand 26.03.2014).
- Siegel, R; Howell, J. R; Lohrengel, J; Grigul, U (Hrsg.): Wärmeübertragung durch Strahlung. In: Wärme und Stoffübertragung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988. - ISBN 3-540-18496-1.
- Slack, G. A; Hussain, M. A: The maximum possible conversion efficiency of silicon-germanium thermoelectric generators. In: Journal of Applied Physics 70 (1991), S. 2694-2718. - DOI 10.1063/1.349385.
- Snyder, G. J; Tristan, S. U: Thermoelectric Efficiency and Compatibility. In: Physical Review Letters 14 (2003), S. 148301-1 - 148301-4. DOI 10.1103/PhysRevLett.91.148301.
- Snyder, G. J; Toberer, E. S: Complex thermoelectric materials. In: Nature Materials (2008), Nr. 7, S. 105-114.
- Sootsman, J. R; Chung, D. Y; Kanatzidis, M. G: Alte und neue Konzepte für thermoelektrische Materialien. In: Angewandte Chemie 121 (2009), S. 8768-8792. - DOI 10.1002/ange.200900598.
- Spieth, A (Erfinder): Schutzrecht Europäische Patent Anmeldung EP 2 378 578 A2 (März 2011).

- Stan, C: Thermodynamik des Kraftfahrzeugs. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2012.
- Stiewe, C: Nanostrukturierte CoCb₃-Skutterudite: Neue Materialien für die Thermogeneratoren. Justus-Liebig-Universität Gießen, Diss., 2009.
- Stober, F: Synthese, Charakterisierung und Untersuchung thermoelektrischer Eigenschaften ausgewählter Metallboride. Technische Universität Darmstadt, Diss., 2012.
- Strasser, M: Entwicklung und Charakterisierung mikrostrukturierter thermoelektrischer Generatoren in Silizium-Halbleitertechnologie. Technische Universität München, Diss., 2004.
- Suzuki, R. O; Tanaka, D: Mathematical simulation of thermoelectric power generation with the multi-panels. In: Journal of Power Sources 122 (2003), S. 201-209. DOI 10.1016/S0378-7753(03)00396-3.
- Takao, K; Ota, C; Nishio, J: Design Consideration of High Power Density Inverter with Low-on-voltage SiC-JBS and High-speed Gate Driving of Si-IGBT. In: Proceedings of 24th Annual IEEE Conference for Applied Power Electronics (2009), S. 397-400. - DOI 10.1109/APEC.2009.4802688.
- Tatarinov, D; Bastian, G; Schramm, D: Thermoelektrische Systeme zur Energierückgewinnung im Kraftfahrzeug. In: Prof, H; Schönhartig, J; Schramm, D; Ziegler, J. (Hrsg.): Zukünftige Entwicklung in der Mobilität. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012, S. 213-225. - ISBN 978-3-8349-3232-7.
- Tatarinov, D; Wallig, D; Bastian, G: Optimized Characterization of Thermoelectric Generators for Automotive Applications. In: Journal of Electronic Materials 6 (2012), S. 1706-1712. DOI:10.1007/s11664-012-2040-7.
- Tatarinov, D; Koppers, M; Bastian, G; Schramm, D: Modeling of a Thermoelectric Generator for Thermal Energy Regeneration in Automobiles. In: Journal of Electronic Materials 42 (2013), Nr. 7, S. 2274-2281. - DOI 10.1007/s11664-013-2642-8.
- tec-microsystems, www.tec-microsystems.com (Stand 09.01.2015).
- Tozaki, K; Sou, K: Novel Determination of Peltier Coefficient, Seebeck Coefficient and Thermal Resistance of Thermoelectric Module. In: Japanese Journal of Applied Physics 6A (2006), S. 5272f.

- Trampert, S: Entwicklungstrends von Motor und Getriebe. Vor dem Hintergrund der ACEA-Selbstverpflichtung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* (2006), Nr. 6, S. 466-474. - ISSN 0001-2785 10810.
- Tritt, T. M (Hrsg.): *Semiconductors and semimetals*. In: *Recent Trends in Thermoelectric Materials research I*. Vol. 69, Academic Press, San Diego, USA, 2001.
- Trzesniowski, M: *Rennwagentechnik*. Vieweg Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012. -DOI- 10.1007/978-3-8348-2209-3_12.
- Vandersande, J. W; Allevalo, C; Caillat, T: *Thermoelectric Development*. Final Report. Department of Energy. Jet Propulsion Laboratory California (JPL). Institute of Technology (1994). <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/56567> (Stand 18.04.2014).
- Vázquez, 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*. In: *Proceedings of 7th European Workshop on Thermoelectrics*, Paper #17, Pampelona, Spain (2002).
- Vázquez, J; Palacios, R; Sanz-Bobi, M. A; Arenas, A: *Test Bench for Measuring the Electrical properties of Commercial Thermoelectric Modules*. In: *Proceedings of Twenty-Second International Conference on Thermoelectrics - ICT 2003*. Aug 2003, Montpellier, France, S. 159-162.
- VDA, *Verband der Automobilindustrie (VDA): Handeln für den Klimaschutz. CO2 Reduktion in der Automobilindustrie*. <http://www.vda.de/de/downloads/487/> (Stand 10.10.2012).
- Velmre, E: *Thomas Johan Seebeck (1770-1831)*. In: *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* 13 (2007), Nr. 4, S. 276-282. - ISSN 1736-7530.
- Vining, C. B: *The Limited Role for Thermoelectrics in the Climate Crisis*. In: *Journal of Thermoelectricity* (2008), Nr. 4, S. 7-19. - ISSN 1607-8829.
- Wallentowitz, H; Freialdenhoven, A: *Treiber für Veränderungen. Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges*. Vieweg-Teubner Verlag Wiesbaden 2011, ISBN 9783834899101.
- Walmsley, R. M: *Electricity In The Service Of Man*. A popular and practical treatise on the applications of electricity to modern life. Cassell And Company, LTD. London, et.al., 1911.

- Warsen, J; Krinke, S: Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2012), Nr. 7-8, S. 560-565. - ISSN 0001-2785 10810.
- Wiedemann, J: Energieeffizienz ohne Verzicht? In: Automobiltechnische Zeitschrift (2009), Nr. 4, S. 239. - ISSN 0001-2785 10810.
- Winterhagen, J: Genfer Salon 2007: Autohersteller greifen CO2-Debatte aktiv auf. In: Automobiltechnische Zeitschrift (2007), Nr. 4, S. 292-296. - ISSN 0001-2785 10810
- Wood, C: Materials for thermoelectric energy conversion. In: Reports on Progress in Physics 51 (1988), S. 459-539.
- Xi, H; Luo, L; Fraise, G: Development and applications of solar-based thermoelectric technologies. In: ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007), S. 923-936.
- Yang, J; Chen, L; Paul, G; Uher, C (Erfinder): Schutzrecht United States Patent 20040112418A1 (Juni2004).
- Yang, R; Chen, G; Kumar, A. R; Snyder, G. J; Fleurial, J. P: Transient cooling of thermoelectric coolers and its application for microdevices. In: Energy Conversion and Management 46 (2005), S. 1407-1421. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.07.004 <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/publications/pdf/YangTransientECM05.pdf> (Stand 08.11.2012).
- Yang, J; Stabler, F. R: Automotive Applications of Thermoelectric Materials. In: Journal of Electronic Materials 7 (2009), S. 1245-1251. DOI 10.1007/s11664-009-0680-z.
- Yazawa K; Shakouri, A: Scalable Cost/Performance Analysis for Thermoelectric Waste Heat Recovery Systems. In: Journal of Electronic Materials 6 (2012), S. 1845-1850. DOI 10.1007/s11664-012-2049-y.
- Yodoward, P; Khedari, J; Hirunlabh, J: The Potential of Waste Heat Thermoelectric Power generation From Diesel Cycle and Gas Turbine Cogeneration Plants. In: Energy Sources 23 (2001), S. 213-224.
- Zellbeck, H; Risse, S; Thiel, M; Kutz, H: Potentiale und Möglichkeiten zur effizienten Verlustwärmennutzung. In: Jänsch, D (Hrsg.): Thermoelektrik. Eine Chance für die Automobilindustrie, expert Verlag Renningen, IAV, 2009, S. 185-201. - ISBN 978-3-8169-2877-5.

Ziolkowski, P; Poinas, P; Leszczynski, J; Karpinski, G; Müller, E: Estimation of Thermoelectric Generator Performance by Finite Element Modeling. In: Journal of Electronic Materials 9 (2010), S. 1934-1943. DOI:10.1007/s11664-009-1048-0.

Anhang

Zusammenfassung ergänzender Simulationsergebnisse (Szenario I)

Abbildung 0.1 Änderung des Ladezustands Starterbatterie (ohne TEGA)

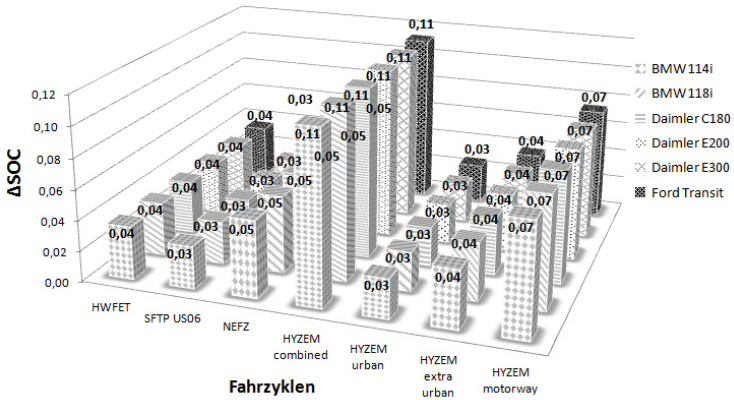
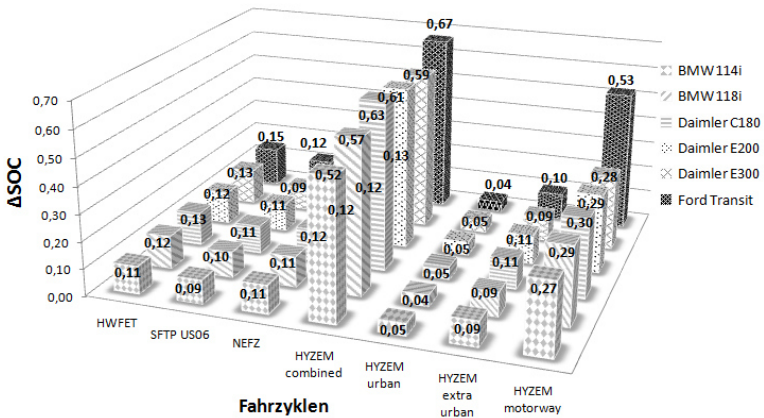


Abbildung 0.2 Änderung des Ladezustands Starterbatterie (ZT=0,9)



Zusammenfassung ergänzender Simulationsergebnisse (Szenario II)

Abbildung 0.3 Mittlere Leistung TEGA (ZT=1,2)

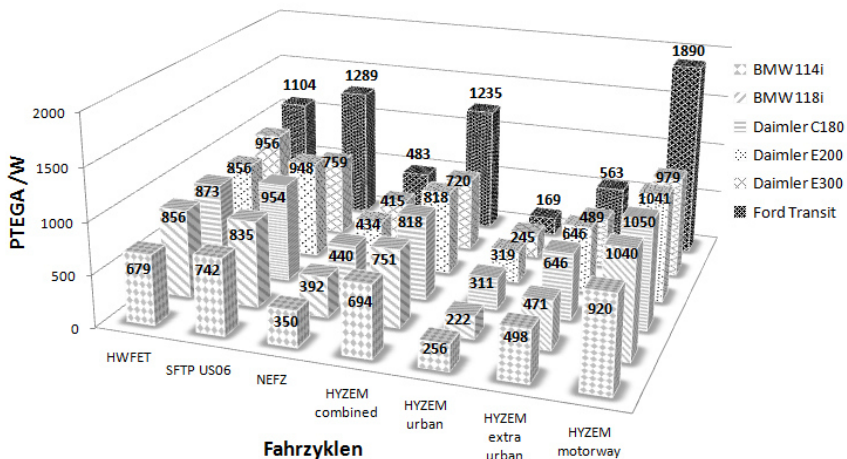


Abbildung 0.4 Mittlerer Massenstrom Abgas (ZT=1,2)

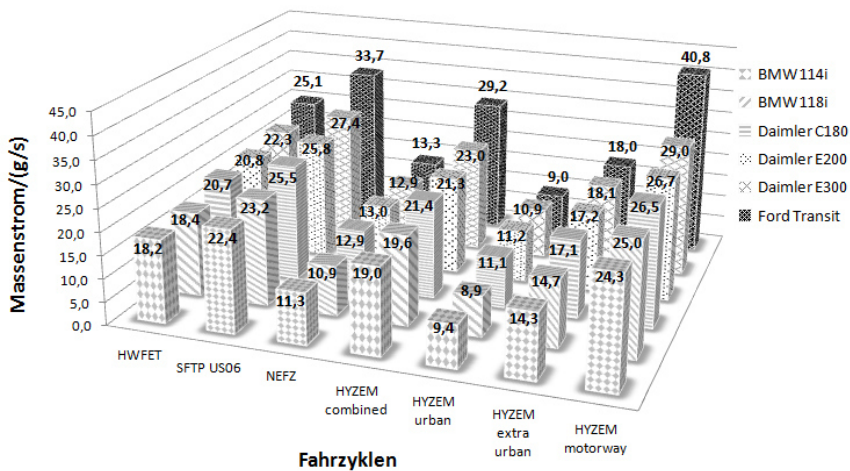


Abbildung 0.5 Mittlere Temperatur TEGA (ZT=1,2)

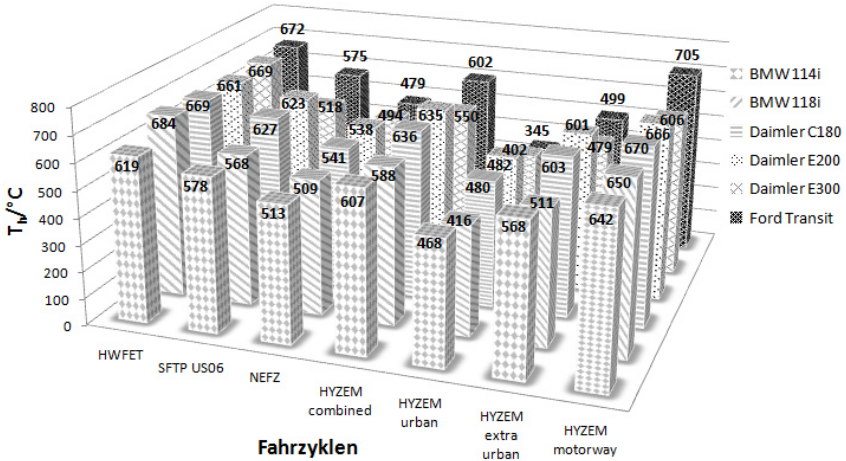


Abbildung 0.6 Wirkungsgrad TEGA (ZT=1,2)

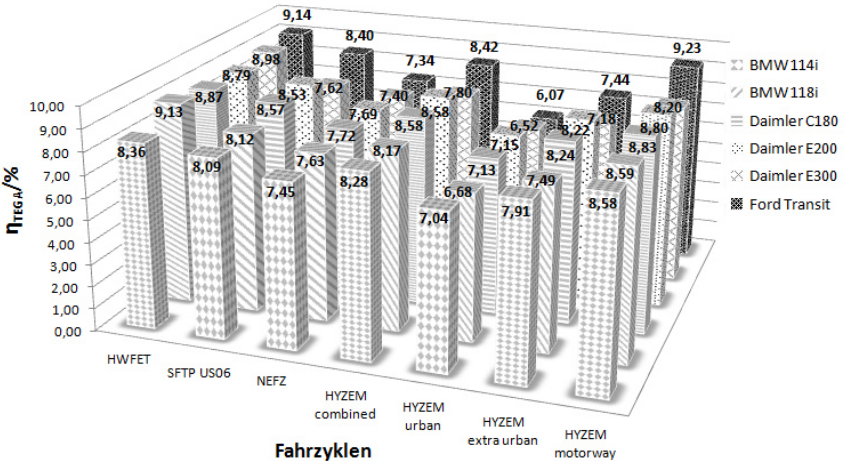
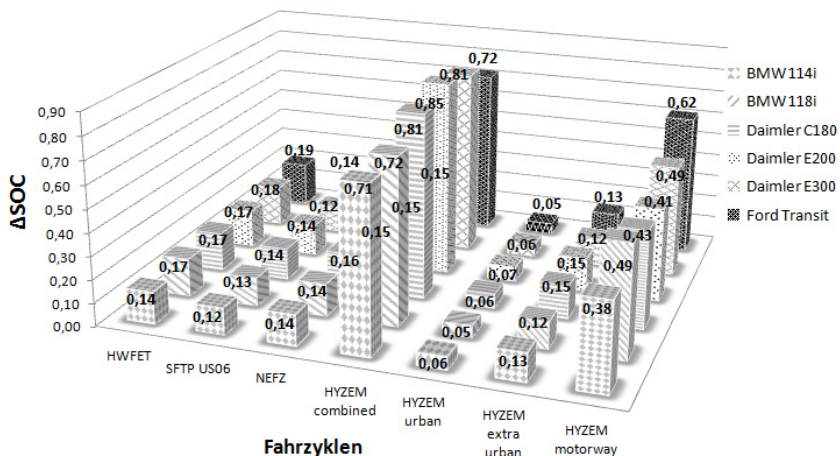


Abbildung 0.7 Änderung des Ladezustands Starterbatterie (ZT=1,2)



Zusammenfassung ergänzender Simulationsergebnisse (Szenario III)

Abbildung 0.8 Mittlere Leistung TEGA (ZT=1,8)

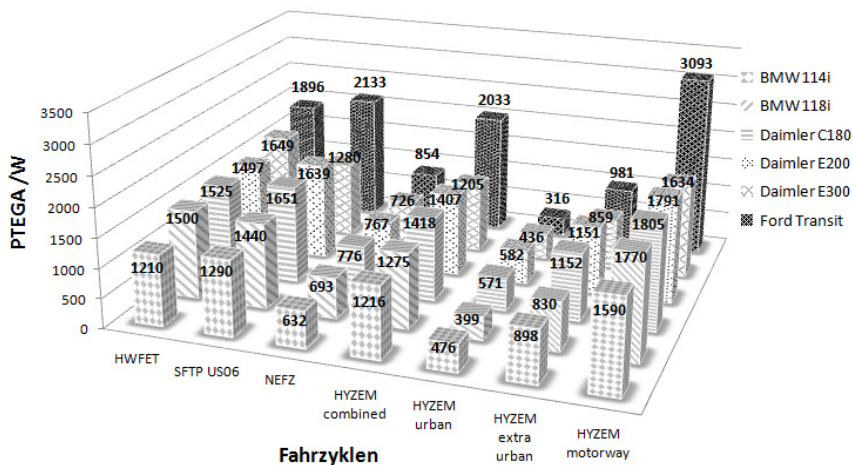


Abbildung 0.9 Mittlere Massenstrom Abgas (ZT=1,8)

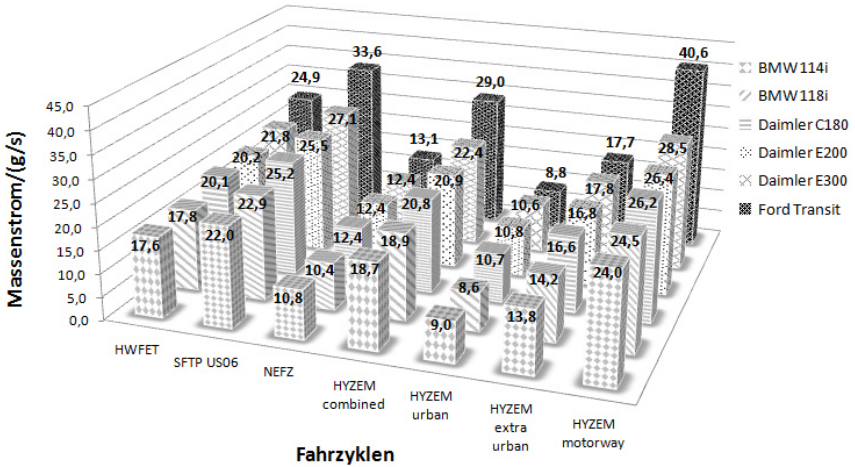


Abbildung 0.10 Mittlere Temperatur TEGA Eingang (ZT=1,8)

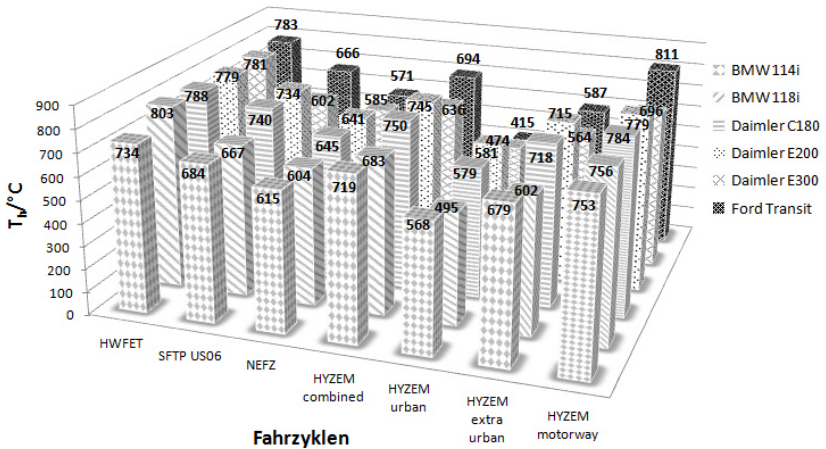


Abbildung 0.11 Wirkungsgrad TEGA (ZT=1,8)

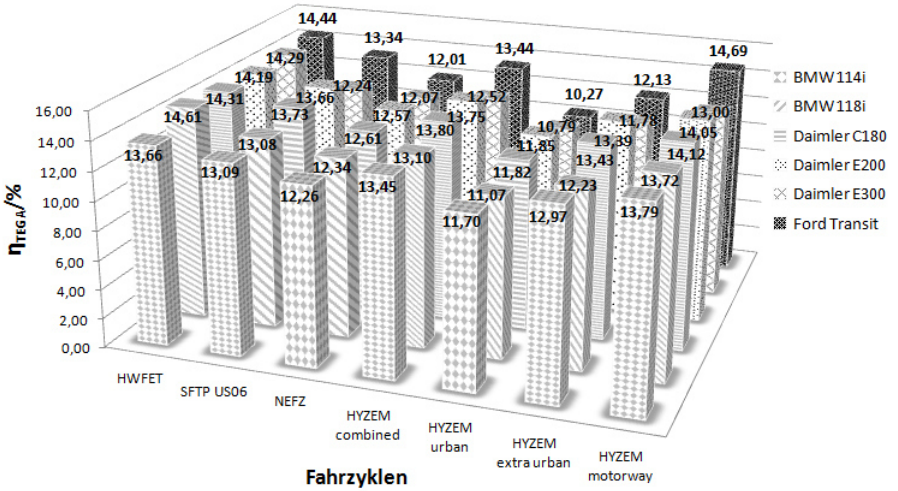
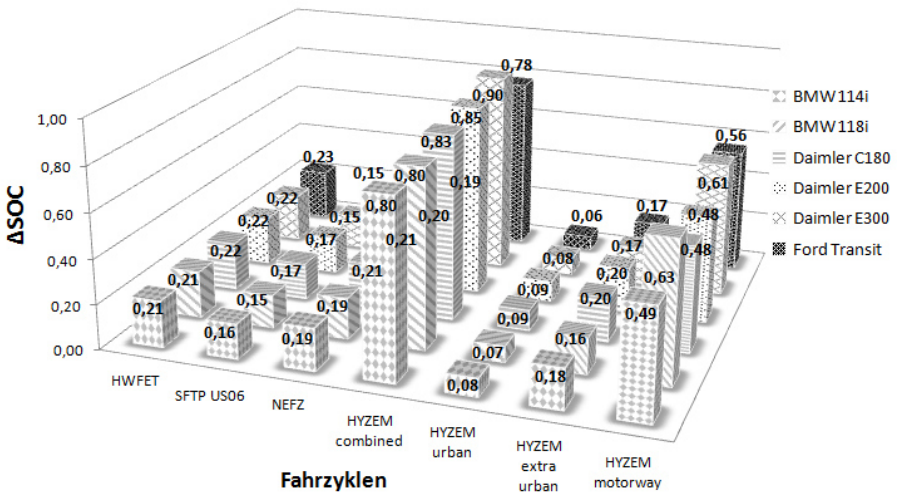


Abbildung 0.12 Änderung des Ladezustands Starterbatterie (ZT=1,8)



Eigenschaften untersuchter TE-Module

Abbildung 0.14

Probe	b_p /mm	d_p /mm	l_p /mm	l_p /mm	D	N_p	$A_{\text{mod}}/\text{cm}^2$
P1	2,5	2,5	1,5	6,17	0,5	126	31
P2	1,63	1,63	1,2	4,7	0,56	263	26
P3	1,8	1,8	1,7	3,8	0,51	161	16
P4	2	2,1	1,4	5,21	0,43	127	26
P5	1,8	1,8	1,6	3,34	0,42	161	26
P6	1,28	1,34	1,47	4,36	0,27	127	16
P7	1,3	1,3	1,4	4,11	0,27	127	16
P8	4	4	9	9	0,45	31	22

Probe	TE-Material	Kapselung	Verriegelung	Maße Modul/mm	Verwendungszweck
P1	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Silikon	56x56x4,1	TEG
P2	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Silikon	50x50x4,3	TEG
P3	Bi_2Te_3	Cu	keine	40x40x2,2	TEC
P4	Bi_2Te_3	Al_2O_3	keine	50x50x3,5	TEC
P5	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Epoxidharz	50x50x4,3	TEG
P6	Bi_2Te_3	Al_2O_3	keine	40x40x3,8	TEG
P7	Bi_2Te_3	Al_2O_3	Silikon	40x40x3,8	TEC
P8	PbTe	Alumini-silikat/Silikon	keine	47x47x9	TEG

Das Diagramm zeigt ein dreidimensionales Modell eines TE-Moduls. Die Abmessungen sind wie folgt definiert: b_p ist die Breite des Moduls, d_p die Dicke, l_p die Länge der aktiven Schicht, l_m die Gesamtlänge des Moduls und l_s die Länge der Kontaktflächen. Die Module sind in einer Reihe angeordnet und durch eine gemeinsame Schicht verbunden.