

D i p l o m a r b e i t

Nr. KTB/07/2008

Grundlagen zur Entwicklung eines thermoelektrischen Generators für Kraftfahrzeuge

eingereicht im Fachbereich Maschinenbau und Kraftfahrzeugtechnik der
Westsächsischen Hochschule Zwickau zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: c a n d . i n g . S c h r ö t e r , K a y geb. am: 12.03.1980

**Studiengang Kraftfahrzeugtechnik
Studienrichtung Karosseriebau**

Auftraggeber: Bertrandt Ingenieurbüro GmbH Gaimersheim

Autorenreferat

Diese Arbeit befasst sich mit den Einsatzmöglichkeiten thermoelektrischer Generatoren zur Stromerzeugung im Kraftfahrzeug. Der Umfang des Gebietes erfordert die Behandlung der thermoelektrischen Grundlagen bis hin zu technischen Daten der Module. Für einen direkten Vergleich zu alternativen Möglichkeiten der Stromerzeugung im Fahrzeug wurde die derzeitige Elektroenergieerzeugung und Speicherung betrachtet. Alternative Möglichkeiten wie Solar- und Brennstoffzelle, Abgasturbine und Dampfsystem wurden erläutert, bewertet und gegenübergestellt. Die Ermittlung der vorherrschenden Randbedingungen der Umwelt und im Fahrzeug bilden die Grundlage für die Absteckung der Einsatzgrenzen und Möglichkeiten der thermoelektrischen Generatoren. Zu diesem Zweck wurde eine Abgastemperaturmessung nach dem neuen europäischen Fahrzyklus durchgeführt. Außerdem wurden Einbaubedingungen und Probleme, die sich daraus ergeben, erläutert. Die Entwicklung von drei Konzeptvarianten bildet den Hauptteil der Arbeit, wobei eine überschlägige Wärmetauscherberechnung, Dimensionierung durchgeführt wird und ein Konstruktionsvorschlag erfolgt. Die elektrische Konfiguration und Schaltung der Module sowie der Einsatz von Gleichspannungswandlern rundet das Themengebiet ab. In der Auswertung werden die drei Konzepte miteinander und mit alternativen Systemen verglichen. Es wird dabei Wert auf die möglichen, zu erzeugenden elektrischen Leistungen gelegt. Es erfolgt eine Endempfehlung, die sich auf den derzeitigen Stand der Technik und die notwendigen Entwicklungen bezieht.

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht. Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Reichenbach, den 29.10.2008

.....

Kay Schröter

Inhaltsverzeichnis

I	Verzeichnis der Bilder	I
II	Verzeichnis der Tabellen	III
III	Verzeichnis der Anlagen	IV
IV	Kurzzeichenverzeichnis	V
V	Abkürzungsverzeichnis	VIII
VI	Vorwort	IX
1	Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise	1
2	Thermoelektrische Effekte	4
3	Stromversorgung im Kraftfahrzeug	9
3.1	Der elektrodynamische Generator.....	10
3.2	Die Batterie.....	12
3.3	Bordnetzsysteme.....	13
4	Einführung in Thermoelektrische Generatoren	16
4.1	Stand der Technik	16
4.2	Aufbau des TEG.....	17
4.3	Funktionsweise des TEG.....	19
4.4	Technische Daten des TEG	20
4.5	Einsatzbedingungen des TEG	27
4.6	Entwicklungstrends	29
5	Thermoelektrische Generatoren im Kfz	31
5.1	Motivation und Energierückgewinnung.....	31
5.2	Einsatzbedingungen für TEG im Kfz	33
5.3	Potenzial der Wärmequellen im Kfz	38
6	Alternative Stromerzeugung im Kfz	40
6.1	Brennstoffzelle.....	40
6.2	Solarzelle.....	41
6.3	Abgasturbine	43
6.4	Turbosteamer	44

6.5	Weitere alternative Systeme.....	45
6.6	Vergleich der alternativen Systeme.....	46
7	Konfigurationsmöglichkeiten im Kfz	49
7.1	Kühlwasser - Luft.....	49
7.1.1	Konzeption.....	49
7.1.2	Umgebungsbedingungen und Temperaturen	51
7.1.3	Wärmestrom am Generator	53
7.1.4	Die Wärmetauscher	55
7.1.5	Berechnung der Wärmetauscher und des Gebläses	57
7.2	Abgas - Luft.....	66
7.2.1	Konzeption.....	66
7.2.2	Umgebungsbedingungen und Temperaturen	67
7.2.3	Wärmestrom am Generator	69
7.2.4	Die Wärmetauscher	72
7.2.5	Berechnung der Wärmetauscher und des Gebläses	73
7.3	Abgas - Kühlwasser	79
7.3.1	Konzeption.....	79
7.3.2	Umgebungsbedingungen und Temperaturen	80
7.3.3	Wärmestrom	81
7.3.4	Die Wärmetauscher	82
7.3.5	Berechnung der Wärmetauscher	83
8	Elektrische Konfiguration und Schaltung	87
9	Auswertung	94
9.1	Auswertung der Systemvarianten.....	94
9.2	Vergleich mit alternativen Systemen	96
9.3	Probleme und notwendige Entwicklungen.....	98
9.4	Potenzial der TEG	99
9.5	Fazit	100

10 Zusammenfassung

102

Anlagen

I Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1: Entdeckung des Seebeck- Effektes	4
Bild 2.2: Thermospannung	5
Bild 2.3: Thermoelement	5
Bild 3.4: Kompakt- Drehstromgenerator	10
Bild 3.5: Verluste des elektrodynamischen Generator	11
Bild 3.6: Wirkungsgrad des elektrodynamischen Generator	11
Bild 3.7: Verfügbare Batteriekapazität	13
Bild 3.8: elektrische Verbraucher im Kfz	14
Bild 4.9: p- Dotierung	18
Bild 4.10: n- Dotierung	18
Bild 4.11: Aufbau eines Peltierelements	19
Bild 4.12: Aussehen des Peltierelements	19
Bild 4.13: Auftretende Wärmearten am TEG	24
Bild 4.14: Verlauf von Leistung, Wärme und Wirkungsgrad	26
Bild 4.15: Dämpfung durch Kleber	27
Bild 5.16: Carnotprozess	31
Bild 5.17: Verluste Ottomotor	32
Bild 5.18: Konzept der Energierückgewinnung aus Abwärme	33
Bild 5.19: Geschwindigkeits- Zeit- Diagramm nach NEFZ	36
Bild 5.20: Verlauf der Abgastemperatur nach NEFZ	36
Bild 6.21: Aufbau und Funktion der Brennstoffzelle	41
Bild 6.22: Aufbau und Funktion der Solarzelle	42
Bild 6.23: Jährliche Sonneneinstrahlung der Sonne	42
Bild 6.24: Abgasturbolader	44
Bild 6.25: Turbosteamer- System von BMW	45
Bild 7.26: Aufbau des Systems Kühlwasser - Luft	50
Bild 7.27: Einfluss Umwelttemperatur auf Wirkungsgrad und Leistung	52
Bild 7.28: Leistung des Kühlwassers	54
Bild 7.29: Aufbau des Wärmetauscher Kühlwasser - Luft	57
Bild 7.30: Abmessung der Kühlwasserkanäle	59
Bild 7.31: Abmessung des Luft- Wärmetauschers	63
Bild 7.32: Verlauf Leistung TEG und Gebläse	66
Bild 7.33: Aufbau des Systems Abgas - Luft	67
Bild 7.34: Einfluss der Umwelttemperatur auf Wirkungsgrad und Leistung	68
Bild 7.35: Aufbau des Wärmetauscher Abgas - Luft	73
Bild 7.36: Verlauf der übertragbaren Leistung	74
Bild 7.37: Wärmetauscherkanäle	75
Bild 7.38: Abmessung des Luft- Wärmetauschers	77
Bild 7.39: Aufbau des Systems Abgas - Kühlwasser	80
Bild 7.40: Aufbau des Wärmetauschers Abgas - Kühlwasser	82
Bild 7.41: Abmessung des Wasserwärmetauschers	85
Bild 8.42: Korrekturwiderstand in der Schaltung	90

Bild 8.43: Schaltung TEG Kühlwasser - Luft	92
Bild 8.44: Schaltung TEG Abgas - Luft.....	93
Bild 8.45: Schaltung TEG Abgas - Kühlwasser	93
Bild 9.46: Kenndaten der Varianten	96
Bild 9.47: Vergleich der elektrischen Leistung	98
Bild 9.48: Benzineinsparung durch TEG	100

II Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1 : Seebeck- Koeffizienten.....	7
Tabelle 4.2: Technische Daten von TEG	20
Tabelle 5.3: Potenzialabschätzung der Systeme	39
Tabelle 6.4: Vergleich der alternativen Energiesysteme	48
Tabelle 7.5: Berechnungsdaten Kühlwasser - Luft	53
Tabelle 7.6: Daten des ausgewählten TEG- Modells Nr. 7	55
Tabelle 7.7: Kennwerte für Wärmetauscher- Materialien	56
Tabelle 7.8: Berechnungsdaten Abgas - Luft	69
Tabelle 7.9: Stoffwerte des Abgases	71
Tabelle 7.10: Daten des ausgewählten TEG- Modells Nr. 12	71
Tabelle 7.11: Berechnungsdaten Kühlwasser - Luft.....	83
Tabelle 8.12: Elektrische Randdaten der Konzeptvarianten	88
Tabelle 8.13: Randbedingungen für den DC- DC- Wandler	88
Tabelle 8.14: Gesetze der Reihen- und Parallelschaltung	89
Tabelle 8.15: Daten DC- DC- Wandler DR350-48-13,5	91
Tabelle 8.16: Daten DC- DC- Wandler DR500-80-12	93
Tabelle 9.17: Datenzusammenfassung der Varianten	94

III Verzeichnis der Anlagen

Anlage	Bezeichnung
1	Datenträger (CD-ROM)
2	Werteverlauf TEG Nr. 12
3	Abgastemperatur und Geschwindigkeit im NEFZ
4	DC- DC- Wandler DR350-48-13,5
5	DC- DC- Wandler DVC500-80-12
6	TEG Nr. 7 (TEG1-40-40-10/100)
7	TEG Nr. 12 (TEG2-50-50-40/200)

IV Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Beschreibung
A_w	m ²	Wandfläche
A_q	m ²	Querschnittsfläche
b	m	Wandstärke
B	m	Breite
b_t	m	Wandstärke des Wärmetauschers
b_k	m	Wandstärke Keramikplatte TEG
b_w	m	Stärke der Wärmeleitkleberschicht
c	m/s	Geschwindigkeit
c_f	m/s	Fahrgeschwindigkeit
c_p	kJ/(kg*K)	spezifische isobare Wärmekapazität
c_{p-w}	kJ/(kg*K)	Wärmekapazität Wasser
c_{p-l}	kJ/(kg*K)	Wärmekapazität Luft
c_{p-a}	kJ/(kg*K)	Wärmekapazität Abgas
H	m	Höhe
I	A	Strom
I_{Last}	A	Laststrom
I_K	A	Kurzschlussstrom
I_{20}	A	Entladestrom der Nennkapazität
k	µm	Rauigkeit
K_{20}	Ah	Nennkapazität Batterie
l	m	Rohrlänge / Plattenlänge
m	kg	Masse
m_a	kg	Abgasmasse
$\dot{m}$	kg/s	Massestrom
P_{el}	W	Leistung
q	kJ/kg	spezifische Wärme
$\dot{Q}_{ab}$	W	Wärmeabgabe
$\dot{Q}_{Joule}$	W	Joulesche Wärme
$\dot{Q}_{kw}$	W	Konvektionswärme
$\dot{Q}_{Peltier}$	W	Peltierwärme

$\dot{Q}_{wl}$	W	Wärmeleitung
$\dot{Q}_{ww}$	W	Wandwärmedurchgang
$\dot{Q}_{zu}$	W	Wärmezugabe
R	Ω	Widerstand
R_a	Ω	Lastwiderstand
RA_h	Stk	Rippenanzahl horizontal
RB	m	Rippenbreite
R_i	Ω	Innenwiderstand
T	m	Wärmetauschertiefe
$T_{heiß}, T_{kalt}$	K	Temperatur
U	V	Spannung
U_{Last}	V	Lastspannung
U_{Leer}	V	Leerlaufspannung
U_k	m	Kreisumfang
U_q	m	Quadratumfang
U_{th}	V	Thermospannung
$\dot{V}$	m ³ /s	Volumenstrom
$\dot{V}_a$	m ³ /s	Abgasvolumenstrom
$\dot{V}_{kw}$	m ³ /s	Kühlwasservolumenstrom
w_{zu}, w_{ab}	MJ/kg	spezifische Energie
X	m	Wärmetauscherbreite
ZR	m	Zwischenraum Kühlrippen
$\alpha, \alpha_1, \alpha_2$	V/K	Seebeck- Koeffizient
α_k	W/(K*m ²)	Wärmeübergangskoeffizient
β_{wl}	W/K	Wärmeleitwert des TEG
η	%	Wirkungsgrad
η_a	Pa*s	Dynamische Viskosität Abgas
η_{carnot}	%	Carnot- Wirkungsgrad
η_l	Pa*s	Dynamische Viskosität Luft
η_w	Pa*s	Dynamische Viskosität Wasser
λ	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit
λ_a	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Abgas
λ_{Al}	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Aluminium

λ_{Cu}	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Kupfer
$\lambda_{keramik}$	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Al ₂ O ₃ - Keramik
λ_{If}	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit des TEG
λ_l	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Luft
λ_r	Pa	Druckverlust Rohrreibung
λ_w	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Wasser
λ_{wlk}	W/(K*m)	Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitkleber
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ξ_{ein}, ξ_{aus}	Pa	Druckverlust Ein- und Ausströmung
ρ	kg/m ³	spezifische Dichte
ρ_a	kg/m ³	Dichte Abgas
ρ_l	kg/m ³	Dichte Luft
ρ_w	kg/m ³	Dichte Wasser
$\sigma, \sigma_1, \sigma_2$	S/m	elektrische Leitfähigkeit
ΔT	K	Temperaturdifferenz

V Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Ag	Silber
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumkeramik
APU	Auxiliary Power Unit
Bi	Wismut
B ₁₃ C ₂	aluminiumdotiertes Borkarbid
Bi ₂ Te ₃	Wismut- Tellurid
CO ₂	Kohlendioxid
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Kfz	Kraftfahrzeug
KW	Kühlwasser
NEFZ	neuer europäischer Fahrzyklus
Ni	Nickel
Pt	Platin
Si	Silizium
TEG	thermoelektrischer Generator
U/min	Umdrehungen pro Minute
W	Wolfram

VI Vorwort

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Einsatzmöglichkeiten von thermoelektrischen Generatoren zur Stromerzeugung im Kraftfahrzeug zu Prüfen. Es wird dazu auf die Grundlagen dieser Bauteile, deren Einsatzbedingungen und vorhandenen Bedingungen im Fahrzeug eingegangen. Die Entwicklung von drei Konzepten, deren komplette, überschlägige Berechnung und Dimensionierung bilden den Hauptteil dieser Arbeit. Die elektrische Schaltung der thermoelektrischen Generatoren und die Wandlung der Gleichspannung beenden den Hauptteil. Ein Gesamtüberblick und Vergleich mit alternativer Möglichkeiten der Stromerzeugung runden das behandelte Thema ab.

Besonderen Dank gilt meinen Betreuern der Westsächsischen Hochschule Zwickau, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr. h. c. Stan, Prof. Dr.-Ing M. Thein sowie M.Sc. Dipl.- Ing. W. Bauer der Bertrandt Ingenieurbüro GmbH in Gaimersheim, die mir mit Rat und Tat beiseite standen. Weiterhin möchte ich mich bei Dipl.-Ing. G. Bau für seinen Einsatz im Kfz- Labor bedanken. Last but not least gilt auch mein Dank an meine Freundin, Familie und Freunde für ihr Verständnis und die moralische Unterstützung.

Kay Schröter

Reichenbach, 29. Oktober 2008

1 Einleitung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Einleitung

Heute und in der Zukunft steigt der Energiebedarf der Menschen weiter an. Die dadurch steigende Nachfrage an fossilen Brennstoffen und deren begrenztes Angebot lässt die Preise für Energie weiter in die Höhe schnellen. Auch die Auswirkungen des CO₂- Ausstoßes auf die Umwelt und die damit verbundene Diskussion zur Klimaerwärmung und Treibhauseffekt sind ein sehr wichtiger Aspekt. Als Ausweg aus dieser Entwicklung liegt langfristig ein Richtungswechsel zu regenerativen und natürlichen Energiequellen nahe. Dieser Weg erfordert eine Weiterentwicklung der aktuellen Technologien und völlig neue Konzepte, um diese Energieformen effektiv nutzen zu können. Kurzfristig ist es wichtig, aktuelle Systeme in Bezug auf ihren Wirkungsgrad zu verbessern und die derzeitigen Energieträger optimal auszunutzen.

Am Beispiel des mobilen Sektors kann zurzeit nicht auf fossile Brennstoffe verzichtet werden, da alternative Brennstoffe und Antriebssysteme nicht den nötigen Energiegehalt bereitstellen oder nur in geringeren Mengen zur Verfügung stehen. Bis neue Systeme marktreif und konkurrenzfähig sind, ist die Wirkungsgradsteigerung eine gute Möglichkeit, Energie zu sparen und die fossilen Brennstoffvorräte zu schonen.

Wenn die im Kraftfahrzeug benötigte Elektroenergie größtenteils durch die Nutzung der thermischen Verlustwärme und nicht durch einen elektrodynamischen Generator oder eine Starter- Generator- Maschine erzeugt wird, sinken die Drehmomentanforderung an den Verbrennungsmotor und damit der Kraftstoffverbrauch. Aktuelle Generatorsysteme könnten nur noch zur Unterstützung dieser Systeme entsprechend viel kleiner ausgelegt werden, was eine Masseverringerung und Kraftstoffeinsparung bedeuten würde. Außerdem wird sich der Gesamtwirkungsgrad des Kraftfahrzeuges erhöhen, wenn Abwärme sinnvoll zur Elektroenergiegewinnung genutzt werden kann.

Zielsetzung und Vorgehensweise

Diese Arbeit soll die Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme im Kraftfahrzeug durch thermoelektrische Generatoren untersuchen. Motivation ist die notwendige Senkung des Kohlendioxidausstoßes und die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades von Kraftfahrzeugen. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Auswertung der verfügbaren Technologie, dem Vergleich der verschiedenen Möglichkeiten der Stromerzeugung, und der Entwicklung einer geeigneten Konfiguration. Außerdem werden die Dimensionierung des Systems und die konstruktive Ausführung betrachtet. Abschließend wird eine Auswertung der Möglichkeiten durchgeführt. Die vorliegende Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

Kapitel 3 behandelt die theoretischen Grundlagen der Thermoelektrizität und der dabei auftretenden Effekte. Es wird dabei auch auf Gesetzmäßigkeiten dieser Effekte eingegangen.

Kapitel 4 erfasst aktuelle Elektroenergiesysteme von der Erzeugung über Speicherung bis zu Bordnetztypen und geht auf deren Besonderheiten und Wirkungsgrade ein.

Kapitel 5 beinhaltet alle Grundlagen zu den thermoelektrischen Generatoren, wie ihrem Aufbau, Funktionsweise, technische Daten sowie Einsatzbedingungen und Entwicklungstrends.

Kapitel 6 erläutert das Prinzip der Energierückgewinnung, geht auf dessen Motivation und die im Kraftfahrzeug vorherrschenden Rahmenbedingungen für thermoelektrische Generatoren ein. Eine durchgeführte Abgastemperaturmessung nach dem neuen europäischen Fahrzyklus wird ebenfalls behandelt.

Kapitel 7 betrachtet andere, alternative Systeme zur Elektroenergiegewinnung im Kraftfahrzeug und bewertet deren Leistung, Einsetzbarkeit sowie Vor- und Nachteile.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit drei möglichen, einsetzbaren Konfigurationen von thermoelektrischen Generatoren an Wärmequellen des Kraftfahrzeugs. Diese werden vom Konzept über Umgebungsbedingungen, überschlägige Wärmetauscherberechnung und Dimensionierung des Systems betrachtet. Eine Zusammenfassung der Varianten schließt dieses Hauptkapitel ab.

Kapitel 9 bearbeitet die elektrischen Grundlagen der Spannungsregelung und Verschaltung von thermoelektrischen Generatoren. Es wird außerdem auf die Konfiguration jeder Variante eingegangen.

Kapitel 10 schließt den Hauptteil dieser Arbeit mit einer Betrachtung des Energiegewinns, der Wirkungsgrade, Masse und Vergleich der Varianten ab.

2 Thermoelektrische Effekte

Der Seebeck- Effekt

Der Seebeck- Effekt beschreibt die Entstehung einer Spannung durch Temperaturunterschiede. Die Versuchsanordnung, die Herr Seebeck im Jahre 1821/22 verwendete, ist im **Bild 2.1** dargestellt. [1]

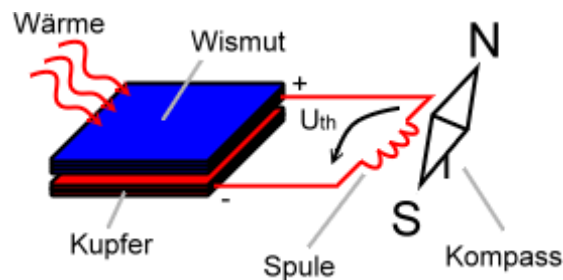


Bild 2.1: Entdeckung des Seebeck- Effektes

Der Effekt tritt schon auf, wenn zum Beispiel ein Kupferstab, wie im **Bild 2.2** zu sehen, an der Stelle 1 erwärmt wird und an der Stelle 2 auf Raumtemperaturniveau bleibt. Die Elektronen (schwarze Punkte) haben auf Grund der unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliche Geschwindigkeiten und damit auch eine unterschiedliche kinetische Energie. Die Elektronen am Punkt 1 benötigen, wegen ihrer höheren Geschwindigkeit, mehr Platz und drängen die Elektronen mit geringerer Geschwindigkeit an den Punkt 2 zurück. Dadurch entsteht ein Ladungsunterschied durch inhomogene Verteilung der Elektronen im Leiter - die Thermospannung. Diese Spannung kann aber nicht gemessen werden, da der Stromkreis nicht geschlossen ist. Wenn man das Thermoelement mit einem Kupferkabel an ein Messgerät anschließt, wird im Kupferkabel derselbe Effekt wie im Kupferstab stattfinden. Es kommt aber nicht zu einem Potenzialunterschied, da die langsamen Elektronen auch im Kabel zur kalten Stelle gedrängt werden. Verwendet man jedoch, wie im **Bild 2.3** dargestellt, zwei verschiedene Materialien für die Stäbe oder Kabel, tritt ein Unterschied der Ladungsverteilung in den Stäben auf. Grund dafür ist, dass die verschiedenen Materialien einen unterschiedlichen Atomgitteraufbau und freie Elektronenanzahl haben. Wenn man nun Stelle 1 und 3 erwärmt, werden die langsamen Elektronen an die Stellen 2 und 4 zurückgedrängt. Auf Grund der schon erwähnten, unterschiedlichen Elektronenanzahl in den beiden Materialien entsteht jetzt in den Punkten 2 und 4 ein Potenzialunterschied zueinander. Die Elektronen fließen von der höheren Konzentration in Punkt 2 zur

niedrigen Konzentration in Punkt 4 durch das Messgerät und stellen die verwendbare Thermospannung dar. [2 S.24ff]

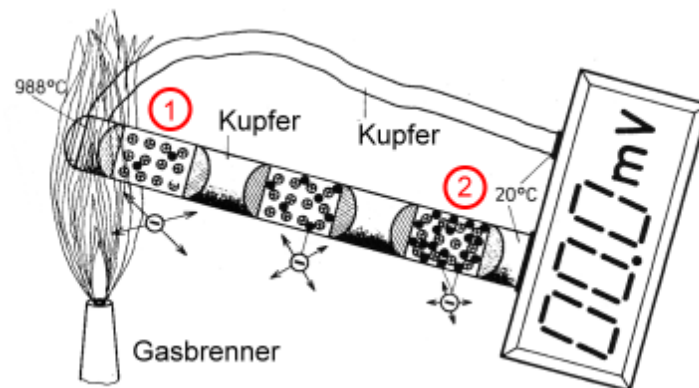


Bild 2.2: Thermospannung [2 S.25]

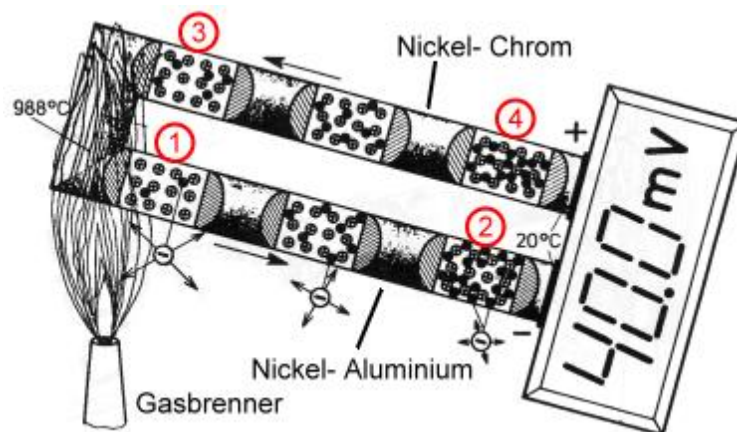


Bild 2.3: Thermoelement [2 S.26]

Voraussetzung dafür ist, dass die verwendeten Materialien elektrischen Strom leiten. Wie aus der **Gl. (2.1)** für die thermoelektrische Spannung U_{th} [V] hervorgeht, müssen die Seebeck- Koeffizienten der Materialien α_1 und α_2 [V/K] sowie die direkt am Schenkelpaar anliegenden Temperaturen $T_{\text{heiß}}$ und T_{kalt} [K] eine möglichst große Differenz aufweisen, um eine hohe elektrische Spannung zu erzeugen.

$$U_{th} = (\alpha_1 - \alpha_2) * (T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}}) \quad \text{Gl. (2.1)}$$

Aus der **Gl. (2.2)** für den Wirkungsgrad von Seebeck- Elementen geht hervor, dass neben den Bedingungen für die thermoelektrische Spannung die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit wichtige Rollen spielen. Die elektrische Leitfähigkeit σ [S/m], der reziproke Wert des elektrischen Widerstandes, sollte hoch

und die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)] gering sein, um in der **Gl. (2.4)** einen möglichst großen Faktor z zu erhalten, der dann Einfluss auf **Gl. (2.3)** hat. Eine gute elektrische Leitfähigkeit des Materials bedeutet aber auch eine gute Wärmeleitfähigkeit. Wie man erkennen kann, verringert diese Wärmeleitfähigkeit den Faktor z und damit den möglichen Wirkungsgrad. Da der Seebeck- Koeffizient in dieser Gleichung quadratisch eingeht, bildet er neben den bereits erwähnten Komponenten das am meisten zu optimierende Formelglied. Diese drei genannten Faktoren sind auch Ziel der aktuellen Optimierung, da nur diese durch die Materialeigenschaften beeinflusst werden können. Da ein Seebeck- Element immer aus zwei verschiedenen Materialien besteht, müssen die Werkstoffkennwerte zu einem Elementkennwert zusammengefasst werden. In der elektrischen Reihenschaltung von Widerständen werden diese addiert und somit die Leitwerte, welche den Kehrwert darstellen, subtrahiert. Da die Thermospannung nur durch den Potenzialunterschied in dem Schenkelpaar zustande kommt, müssen α_1 und α_2 [V/K] durch Subtraktion zu α vereint werden. Diese Analogie kann auch auf die Wärmeleitfähigkeit angewendet werden. Damit werden σ_1 und σ_2 [S/m] zu σ , die Wärmeleitfähigkeit λ_1 und λ_2 [W/(m*K)] zu λ subtrahiert. Die Formel für den Wirkungsgrad ist in **Gl. (2.5)** zusammengefasst. [3]

$$\eta = \frac{T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}}}{T_{\text{heiß}}} * \frac{M - 1}{M + \frac{T_{\text{kalt}}}{T_{\text{heiß}}}} \quad \text{Gl. (2.2)}$$

$$\text{mit } M = \sqrt{1 + \frac{z}{2} * (T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}})} \quad \text{Gl. (2.3)}$$

$$\text{und mit } z = \frac{\alpha^2 * \sigma}{\lambda} \quad \text{Gl. (2.4)}$$

$$\eta = \frac{T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}} * \left(\sqrt{1 + \frac{\alpha^2 * \sigma * 2}{\lambda} * (T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}})} - 1 \right)}{T_{\text{heiß}} + T_{\text{kalt}} * \sqrt{1 + \frac{\alpha^2 * \sigma * 2}{\lambda} * (T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}})}} \quad \text{Gl. (2.5)}$$

Der Seebeck- Koeffizient α variiert bei verschiedenen Temperaturen. Die Abweichung vom linearen Verhalten ist, je nach Material, für bestimmte Temperaturbereiche und für die thermoelektrische Messtechnik von größerer Bedeutung. Einige Beispiele der thermoelektrischen Spannungsreihe mit ihren

Seebeck- Koeffizienten und dazugehörigen Wärmeleitwerten sind in der **Tabelle 2.1** aufgelistet.

Tabelle 2.1 : Seebeck- Koeffizienten [4], [5]

Material	Bezeichnung	Seebeck-Koeffizient α [mV/K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)]
Fe	Eisen	1,7	72
Cu	Kupfer	0,7	398
Ag	Silber	0,65	418
Al	Aluminium	0,4	238
Pt	Platin	0	71
Ni	Nickel	-1,5	61
Bi	Wismut	-7,3	8,1
W	Wolfram	0,7	130
Si	Silizium	45	80
Bi ₂ Te ₃	Wismut- Tellurid		1,2
	(n-dotiert)	-287	
	(p-dotiert)	81	
B ₁₃ C ₂	aluminiumdotiertes Borkarbid	440	0,02

Der Peltier- Effekt

Der Peltier- Effekt beschreibt die Entstehung eines Temperaturgefälles durch einen Stromfluss, stellt aber nicht die Umkehrung des Seebeck- Effekts dar. Er tritt auf, wenn zwei Leiter mit energetisch unterschiedlichen Atomgittern und somit auch unterschiedlich geladenen Elektronen in Kontakt gebracht werden und durch einen elektrischen Strom die Elektronen aus dem einen Leiter in den anderen Leiter übergehen. Das Prinzip ist wie folgt zu erklären: Fließt ein elektrischer Strom aus dem Material mit den höherenergetischen Elektronen in den Leiter mit den niederenergetischen Elektronen, so geben die höherenergetischen Elektronen ihre Energie ab. Diese Energieabgabe im Leiter hat die Erhöhung der Temperatur zur Folge. Fließen niederenergetische Elektronen in den Leiter mit den höherenergetischen Elektronen, so nehmen die niederenergetische Elektronen Energie auf. Dadurch verlieren die höherenergetischen Elektronen an Energie, was eine Verringerung der Temperatur zur Folge hat. Dadurch kann ein

Temperaturgefälle durch das entstehende „Pumpen“ der Wärme zu Kühl- oder Heizzwecken verwendet werden.

Die Joulesche Wärme

Es existiert neben dem Seebeck- und Peltiereffekt noch ein drittes thermoelektrisches Phänomen, die Joulesche Wärme. Fließt ein Strom durch einen Leiter, welcher einen elektrischen Widerstand besitzt, so entsteht Wärme. Diese Wärme entsteht in etwa zu gleichen Teilen auf der kalten wie auf der warmen Seite des thermoelektrischen Elements. Berechnet wird die Joulesche Wärme $\dot{Q}_{Joule}$ [W] nach **Gl. (2.6)**. Wie daraus ersichtlich ist, geht der Strom quadratisch in die Berechnung ein und kann damit bei hohen Werten große Verluste hervorrufen. Deshalb ist in elektrischen Schaltungen auf einen möglichst geringen Stromfluss und elektrischen Widerstand Wert zu legen. Durch die unterschiedlichen Temperaturen haben die elektrisch leitenden Materialien einen unterschiedlichen Widerstand. Damit tritt auch eine unterschiedliche, Joulesche Wärme auf den beiden Seiten des TEG auf. Bei Halbleitern steigt der Widerstand mit sinkender Temperatur, entgegengesetztes Verhalten tritt bei steigender Temperatur auf. Also wird auf der heißen Seite des TEG eine kleinere Joulesche Wärme anfallen, als auf der kalten Seite. In der Praxis sollte die Variation des Widerstandes aber nicht von großer Bedeutung sein. Sie vermindert jedoch bei Kühlanwendungen die erreichbare Tieftemperatur der kalten Seite und erhöht die Temperatur der heißen Seite. Die zusätzlich entstehende Wärme muss deshalb auch abgeführt werden.

$$\dot{Q}_{Joule} = R * I^2 \quad \text{Gl. (2.6)}$$

3 Stromversorgung im Kraftfahrzeug

Die Entwicklung der elektrischen Systeme im Kraftfahrzeug hat eine rasante Entwicklung erlebt. In den Anfängen der Kraftfahrzeuge um 1900 wurde Elektroenergie nur im Zündsystem und der Beleuchtung genutzt. Der Strombedarf im Fahrzeug stieg durch die Entwicklung und den Einsatz von elektrischen Startern, elektrischen Antrieben für Bauteile, zur Steuerung und Versorgung des Antriebsaggregates sowie im Bereich des Komforts rasch an. Generatoren und Batterien mussten die erforderlichen Leistungen bereitstellen und mit ihnen wachsen.

Ein Vergleich zwischen dem VW Käfer aus den 60ern und dem 40 Jahre später auf den Markt gekommenen Nachfolger VW New Beetle liefert ein verblüffendes Ergebnis. Der VW Käfer hatte ein 6 Volt Bordnetz und verbrauchte 136 Watt. Der VW New Beetle ist mit einem 12 Volt Bordnetz ausgestattet und benötigt bis zu 2050 Watt elektrische Leistung. Damit stieg der Stromverbrauch um das 15fache, im Vergleich zum VW Käfer, an. Im Bereich der Oberklassefahrzeuge ist der Verbrauch an Elektroenergie, durch viele installierte Komfortsysteme, um ein vielfaches höher. [6]

Es erfolgt immer mehr der Einsatz von neueren Systemen auf elektrischer Basis, wie der Antrieb aller Motornebenaggregate, elektrischer Lenkung und Bremsen, wie Sicherheitssysteme, Abstandsregelung und Fahrspurassistent, wie im Komfortbereich die Klimatisierung, Sitze und Infotainment. Besonders der Kaltstartvorgang erfordert sehr hohe Leistungen durch Hochleistungsverbraucher wie Katalysatorheizungen, beheizte Scheiben, elektrische Warmluftheizungen und Sitze. Der Anwendung von Elektroenergie stehen noch viele Bereiche im Fahrzeug offen. Man ist dann bei einem Fahrzeug schnell im Bedarfsbereich von 10.000 W und mehr. So verwundert es nicht, dass das größte Ausfallkriterium in aktuellen Fahrzeugen die Batterie ist. Gerade in der kalten Jahreszeit ist diese durch zu hohe Entnahmeströme, schlechten Ladezustand oder beschleunigte Alterung überlastet. Deshalb ist bei der Dimensionierung des gesamten Energienetzes eines Kfz besonderes Augenmerk auf die Abstimmung der einzelnen Komponenten und des Energiemanagements zu legen.

3.1 Der elektrodynamische Generator

Elektrodynamische Generatoren stellen im Kfz die primäre Stromversorgung dar. Im **Bild 3.4** ist ein aktueller, im PKW eingesetzter Kompakt- Generator dargestellt. Diese sind heute als Drehstromgeneratoren ausgelegt und erzeugen eine Dreiphasen-Wechselspannung. Die Spannungsregelung auf 14V erfolgt durch Ein- und Ausschalten des Erregerfeldes (Zweipunktregelung), je nach Last für bestimmte Zeiten, wodurch die resultierende Generatorspannung und damit auch die Bordspannung konstant gehalten werden.



Bild 3.4: Kompakt- Drehstromgenerator [7 S.26]

Die Leistung eines Generators steigt, ohne die Verluste zu berücksichtigen, linear mit der Drehzahl an. Bei der elektrodynamischen Stromerzeugung treten jedoch verschiedene Verluste auf. Im **Bild 3.5** sind die Verluste eines Drehstromgenerators im Kennfeld dargestellt. Wie man aus diesem Diagramm erkennen kann, verläuft die Kurve der Leistungsabgabe nicht linear. Grund dafür sind die mit der Drehzahl steigenden mechanischen, magnetischen und elektrischen Verluste. Diese verhindern durch ihre ansteigenden Kennlinien ab ca. 5000 U/min, dass die abgegebene elektrische Leistung des Generators weiter steigt. Das hat auch Einfluss auf den Wirkungsgrad des Generators, der wie im Diagramm aus dem **Bild 3.6** entnehmbar, mit steigender Drehzahl sowie bei hoher Stromabgabe mit geringen Drehzahlen, abfällt. Der maximale Wirkungsgrad eines luftgekühlten Generators liegt bei etwa 65%, der mittlere im praktischen Fahrbetrieb bei 55 - 60%. Größer dimensionierte Generatoren haben bei vergleichbarem Strom einen besseren Wirkungsgrad als Kleinere. [7a S.41]

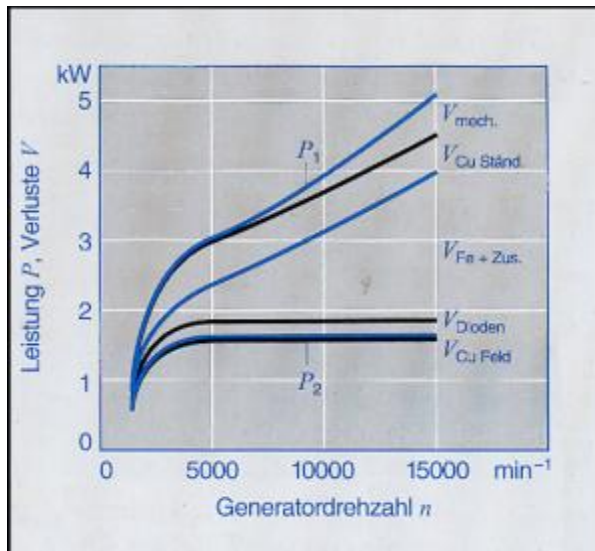


Bild 3.5: Verluste des elektrodynamischen Generator [7 S.41]

P_1 = aufgenommene Leistung

V_{mech} = mech. Verluste

$V_{\text{Cu Ständ}}$ = Kupferverluste

$V_{\text{Fe + Zus.}}$ = Eisenverluste

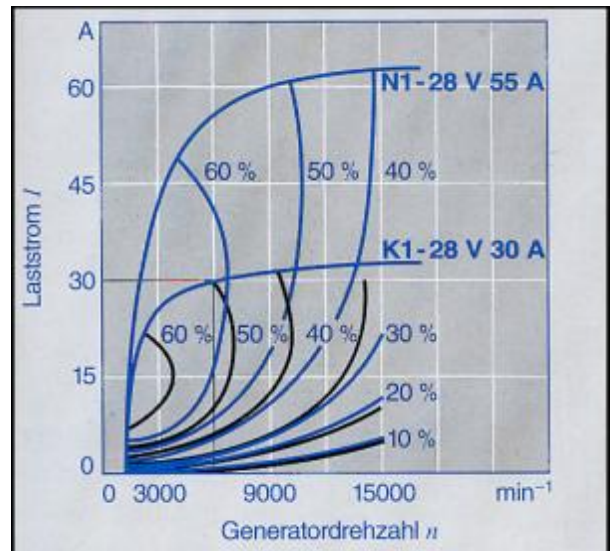


Bild 3.6: Wirkungsgrad des elektrodynamischen Generator [7 S.41]

V_{Dioden} = Gleichrichterverluste

$V_{\text{Cu Feld}}$ = Erregerverluste

P_2 = abgegebene Leistung

Das vom Generator angeforderte Drehmoment, welches der Verbrennungsmotor liefern muss, stellt im Stadtverkehr für 1kW elektrische Leistung etwa einen zusätzlichen Treibstoffverbrauch von ca. 1,7l pro 100 km und bei konstanter Autobahnfahrt ca. 1,0l pro 100 km dar. [9]

Ein Beispiel mit folgenden Annahmen soll den Wirkungsgrad dieser Energieerzeugung bei konstanter Autobahnfahrt mit 100 km/h verdeutlichen:

Mehrverbrauch pro kW elektrische Leistung: 1,0l

Dichte Benzin bei 15°C: 0,736 kg/l

Heizwert Benzin: 43,5 MJ/kg

Umrechnung des Heizwertes: $w_{zu} = 43,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} : 3,6 = 12,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$

Mehrverbrauch durch Generator: $w_{ab} = 1,0 \frac{\text{l}}{\text{kWh}} * 0,736 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 0,736 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

Heizwertnutzung: $\eta = \frac{w_{ab}}{w_{zu}} * 100 = \frac{0,736 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}}{12,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} * 100 = 6,1\%$

In diesem einfachen Beispiel kann man erkennen, dass ca. 6% des Heizwertes vom Benzin effektiv in elektrische Energie umgewandelt werden. Diese Art der Energieerzeugung ist in Bezug auf den Wirkungsgrad und den Treibstoffverbrauch nicht sehr effektiv.

3.2 Die Batterie

Die Batterie ist ein elektrochemischer Speicher und stellt neben dem Generator das wichtigste Bauteil in der Stromversorgung des Kfz dar. Starterbatterien sind meist als Bleiakkumulatoren ausgeführt, die hohe Entladeströme abgeben können. Sie dienen als autarke Stromversorgung, wenn der Generator keinen oder nicht genug Strom liefert und als Puffer für Verbrauchsspitzen, wie zum Beispiel beim Kaltstart eines Kfz. Gerade hierbei treten hohe Strombelastungen auf. Eine 12V Batterie besteht aus 6 Zellen mit je 2V Zellenspannung, die in Reihe geschaltet sind. Die verfügbare Kapazität, oder auch Nennkapazität einer Batterie wird nur bei voller Ladung und einer gleichmäßigen Stromentnahme über 20h erreicht, wobei die Zellenspannung auf 1,75V Entladeschlussspannung sinkt. Der dabei entnehmbare Strom I_{20} [A] berechnet sich nach **Gl. (3.7)** aus der Nennkapazität K_{20} der Batterie und der Entladezeit von 20h.

$$I_{20} = \frac{K_{20}}{20h} \quad \text{Gl. (3.7)}$$

Ein Verlauf der verfügbaren Kapazität einer 44Ah- Batterie über dem Entladestrom ist im **Bild 3.7** zu entnehmen. Wie man daraus erkennt, verringert sich die verfügbare Kapazität der Batterie erheblich, wenn der Entladestrom größer wird.

Der maximal mögliche Stromfluss wird durch den Gesamtwiderstand des Stromkreises bestimmt. Begrenzende Faktoren sind u.a. der Innenwiderstand der Batterie, die Leitungswiderstände und Innenwiderstände der Verbraucher. Der Innenwiderstand der Batterie ist stark von der Temperatur abhängig. Eine Batterie mit 50Ah Nennkapazität bei 20°C Innentemperatur und vollen Ladezustand hat einen Innenwiderstand von 5 - 10mΩ. Bei einem Ladezustand von 50% und einer Innentemperatur von -25°C ist der Innenwiderstand 25mΩ. Die Batterie allein

begrenzt in diesem Beispiel dabei den Stromfluss auf ca. 25% des ursprünglich möglichen Wertes. Generell haben Batterien mit größerer Kapazität einen geringeren Innenwiderstand als Kleinere. Eine typische Kfz- Batterie hat bei einer Stromentnahme in Höhe von I_{20} einen Wirkungsgrad von ca. 85%. [8 S.12]

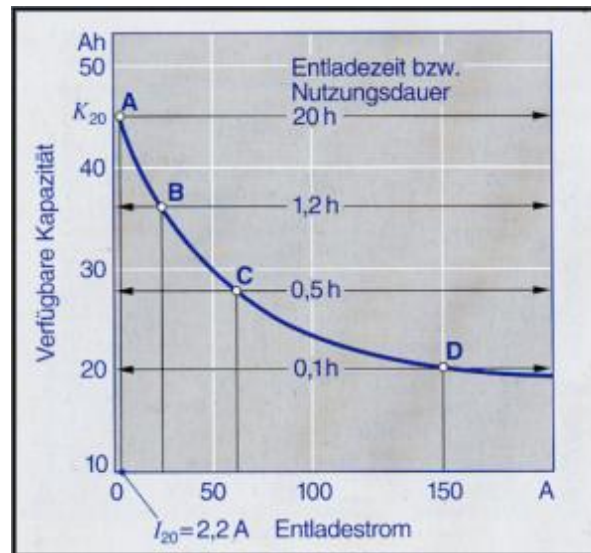


Bild 3.7: Verfügbare Batteriekapazität [8 S.14]

Bei der Auslegung der Batterie für ein Fahrzeug sind viele Faktoren zu berücksichtigen. Eine wichtige Komponente ist die Startanlage, die auch bei niedrigem Ladestand und Temperaturen um -20°C mit genügend Strom versorgt werden muss. Weiterhin sind kurzzeitige und dauerhafte Verbraucher, der Fahrzyklus des Fahrzeuges und der verbaute Generator entscheidende Kriterien.

3.3 Bordnetzsysteme

Elektroenergiebedarf im Kraftfahrzeug

Der große Vorteil, wenn man Bauteile elektrisch und nicht mechanisch antreibt, besteht darin, dass eine stufenlose Regelung ohne komplizierte, mechanische Einrichtungen möglich ist. Zudem ist die Bereitstellung von Elektroenergie in allen räumlichen Bereichen eines Fahrzeuges leicht zu realisieren. Dieser Vorteil und die steigenden Anforderungen an Umwelt, Sicherheit und Komfort in Form von Motorsteuerung, Abgasbehandlung, Airbagsysteme und Insassenkomfort lassen die Bedarfszahlen von Elektroenergie steigen. Ein Überblick der benötigten und möglichen Leistungen, bei elektrischem Betrieb der genannten Systeme,

ist im **Bild 3.8** dargestellt. Er umfasst Systeme aus der Sicherheitstechnik, Komfortbereich und dem Betriebs des Verbrennungsmotors. Für kurzzeitige Anforderungen im Bereich von 10kW sind bei 14V Bordspannung Ströme von 700A und mehr von Generator und Batterie zu liefern.

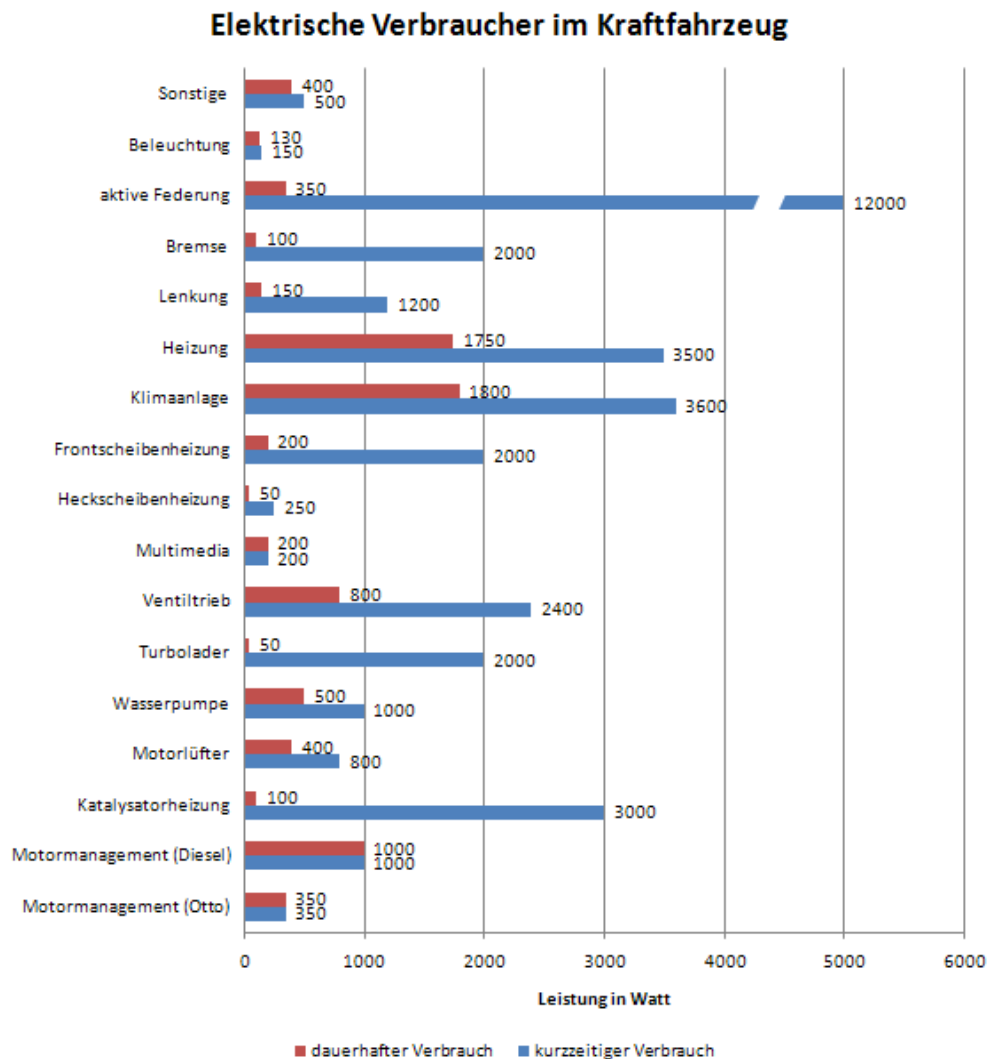


Bild 3.8: elektrische Verbraucher im Kfz [9]

Das 14V- und 42V- Bordnetz

Das 14V - Bordnetz hat sich zu einer Zeit etabliert, als noch vergleichbar geringe Leistungen im Kfz erforderlich waren. Wie schon in **Abschnitt 3** beschrieben, erlebt das Bordnetz eine rasante Entwicklung. Durch die sehr hohen elektrischen Leistungen sind die Grenzen des 14V - Bordnetzes erreicht. Durch die geringe Spannung sind sehr hohe Ströme notwendig, welche wiederum große Leitungs- und Speicherverluste in der Batterie zur Folge haben. Generatoren, Batterien und Leitungen müssen größer und damit schwerer ausgelegt werden, um die benötigten

Ströme liefern und leiten zu können. Um den derzeitigen Leistungsbedarf und auch Zuwachs abzudecken zu können, ist die Anhebung der Bordspannung unerlässlich. Die Einführung eines Hochspannungsnetzes für die Hochleistungsverbraucher wie Heizung, Lenkung und aktives Fahrwerk erweist sich dabei als günstig. Als Vorreiter hat sich hier das 42V - Bordnetz erwiesen. Die Ströme verringern sich auf $\frac{1}{3}$ und die Verlustleistung in den Leitungen auf $\frac{1}{9}$ des 14V - Wertes. BMW plant ein zusätzliches 42V - Bordnetz in Modellen der Baureihe 7 für Hochleistungsverbraucher wie Starter, Elektroheizung und Katalysator einzusetzen. Dieses Netz bietet auch weitere Vorzüge, wie den Betrieb von integrierten Starter- Generator-Maschinen zur Energieerzeugung- und Rückgewinnung, Start- Stopp- Automatik und Boosterbetrieb zum Anfahren. Die Kleinverbraucher, wie Innenbeleuchtung, Radioanlage und diverse elektrische Verstellmöglichkeiten bleiben vorerst am 14V - Netz. Es wird daher wahrscheinlich für eine Übergangszeit zu einem Zweispannungsbordnetz kommen, in dem 14V und 42V parallel eingesetzt werden, bis die eventuelle, komplette Umstellung auf 42V erfolgt.

4 Einführung in Thermoelektrische Generatoren

4.1 Stand der Technik

Thermoelektrische **Generatoren (TEG)** sind Bauteile, die Temperaturdifferenzen in elektrische Energie umwandeln können. Dazu ist ein Temperaturgefälle, also eine heiße und eine kalte Seite, am Element notwendig. Die maximale Leistung wird bei einigen Elementtypen schon ab 60K, bei den Meisten aber erst ab 100K Temperaturdifferenz erreicht. Durch diesen Effekt ist man in der Lage, Abwärme, die in fast allen Anwendungsbereichen anfällt, in elektrische Energie umzuwandeln.

Sicherlich kommt die Frage auf, warum diese Technologie nicht schon früher eingesetzt wurde. In speziellen Anwendungen wird diese Technologie auch schon länger angewendet. Ein Beispiel ist die Energieversorgung von Satelliten, die außerhalb des Sonnensystems oder in großer Entfernung von der Sonne nicht mit Solarenergie realisiert werden kann. Durch radioaktiven Zerfall (keine gefährliche Kernspaltung) wird die benötigte Wärme erzeugt. Diese Wärme wird in den Weltraum mit Temperaturen am absoluten Nullpunkt abgeführt. Man kann mit dieser Konstellation hohe Wirkungsgrade durch die hohen Temperaturdifferenzen erreichen. Dieses System wird Isotopenbatterie genannt. Der Aufbau ist sehr einfach und leicht, was sehr wichtig in der Raumfahrt ist. Außerdem ist das System sehr zuverlässig, ausfallsicher und je nach Halbwertszeit des Zerfallselements entsprechend langlebig. Mit einer solchen Batterie können Satelliten 80 Jahre und länger mit Elektroenergie versorgt werden. [10]

Mit Isotopenbatterien wurden auch vor einiger Zeit Herzschrittmacher betrieben, welche aber wegen der entstehenden, leichten Strahlung durch Lithium- Batterien ersetzt wurden. [11]

Ein anderes Beispiel sind Systeme zur Überwachung von Anlagen in abgelegenen Gebieten, wo kein Stromanschluss zur Verfügung steht. Hier liefert die Sonne, Erdwärme in Form von Warmwasserquellen oder Gasbrenner an Gaspipelines die benötigte Wärme, welche dann an die Umgebungsluft abgeführt wird. In diesem Fall ist der Vorteil von TEG gegenüber anderen Systemen, dass bei geringer thermischer Bauteilbelastung die Lebensdauer praktisch unbegrenzt ist, keine Wartung

durchgeführt werden muss und das System weitestgehend witterungsunabhängig ist. Als weitere Anwendung dient die Stromerzeugung beim Bergsteigen in extremen Regionen. Mit einer einfachen Wärmequelle, zum Beispiel einem einfachen Gasbrenner und einem TEG kann man notwendige elektrische Geräte ohne großen technischen und mechanischen Aufwand betreiben.

Temperaturen unterhalb der normalen Umwelttemperatur sind nur mit Energieaufwand zu erzeugen, die Höchsttemperatur wird von den Werkstoffkenngrößen des TEG begrenzt. Daraus ergibt sich ein schmales Temperaturfeld von -20°C bis 250°C . Der Wirkungsgrad liegt dabei zwischen 5 bis 10%. Das ist Grund, weswegen die Anwendung von TEG bisher auf Spezialgebiete begrenzt blieb. Mit aktuellen Entwicklungen und den damit steigenden Wirkungsgraden wird der Einsatz lukrativer. Ein Beispiel ist die Verwendung von Körperwärme des Menschen mit einem TEG, um zum Beispiel den Akku eines Mobiltelefons aufzuladen. Bei genügend großen Wirkungsgraden ist der Einsatz dieser Elemente auch mit jeder Wärmequelle wie, Geothermik, Solarthermik oder jeglicher anfallender Abwärme großindustriell denkbar.

4.2 Aufbau des TEG

Das Peltierelement kann als TEG verwendet werden, welches nach dem bereits erläuterten Effekt nach Jean Peltier benannt ist. Der Aufbau des Moduls ist denkbar einfach. Wie im **Bild 4.11** zu sehen ist, besteht der mittlere Teil aus kaskadenförmig angeordneten Halbleitermaterialien, welche eine schlechtere elektrische Leitfähigkeit als Metalle haben. Dieser Nachteil ist aber wegen ihrer viel höheren Seebeck-Koeffizienten nach **Tabelle 2.1** nur von geringerer Bedeutung. Das klassische und am meisten verwendete Material für Peltierelemente ist zurzeit Bi_2Te_3 (Wismut-Tellurid). Das Halbleitermaterial eines Schenkels ist jeweils p-, das des Anderen n-dotiert (Halbleiter A und Halbleiter B). Dadurch erreicht man die notwendigen, verschiedenen Seebeck-Koeffizienten (siehe **Tabelle 2.1**) durch Elektronenmangel (p-dotiert) und Elektronenüberschuss (n-dotiert).

Die Dotierung ist wie folgt zu erklären: Verunreinigt man vierwertige Halbleitermaterialien mit dreiwertige Fremdatome wie Bor, Aluminium Germanium

oder Indium, dargestellt im **Bild 4.9**, so findet man eine erhöhte Ladungsträgerdichte im Valenzband. Solche Störstellen werden als Akzeptoren bezeichnet. Man spricht von p- Halbleitern. Verunreinigt man vierwertige Halbleitermaterialien wie Silizium oder Germanium gezielt mit fünfwertigen Atomen wie Phosphor, Arsen oder Antimon, dargestellt im **Bild 4.10**, so beobachtet man eine erhöhte Ladungsträgerdichte im Leitungsband. Diese Störstellen heißen dann Donatoren. Der so dotierte Halbleiter heißt n- Halbleiter. Damit erreicht man verschiedene energetische Zustände p(ositiv) = Elektronenmangel sowie n(egativ) = Elektronenüberschuss im Halbleitermaterial. [12]

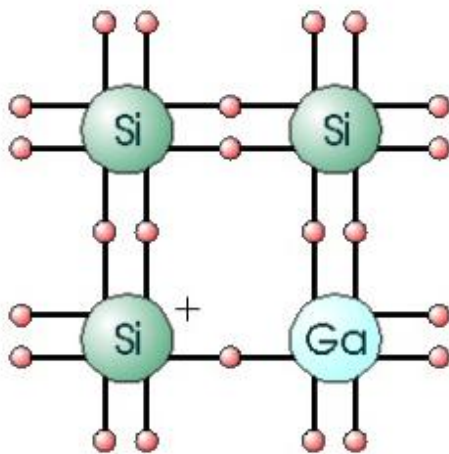


Bild 4.9: p- Dotierung [13]

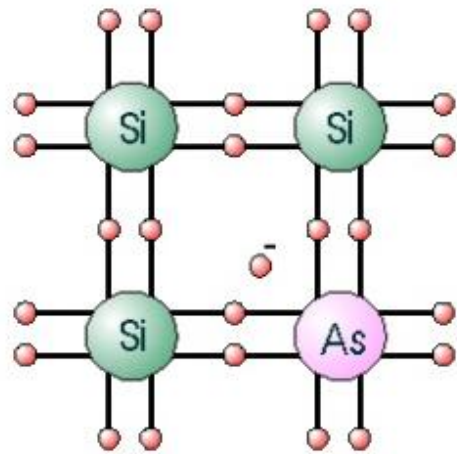


Bild 4.10: n- Dotierung [13]

Die Verbindung der kaskadenförmigen Halbleiterelemente erfolgt mit einem guten, elektrisch- und wärmeleitenden Material. Diese Verbindungen sind meist aus Kupfer und werden aufgelötet. Die Kaskaden durchziehen das Element und sind in Reihe geschaltet. Die beiden Enden der Kaskaden- Zusammenschaltung bilden den elektrischen Anschluss. Über und unter dieser Anordnung liegt eine weitere Platte, wie in der **Bild 4.12** zu sehen ist, die meist aus Al_2O_3 - Keramik (Aluminiumoxid) besteht, um das ganze System mechanisch stabil zu gestalten, elektrisch zu isolieren und ebene Anlageflächen für einen guten Wärmeübergang zu schaffen. Außerdem dient diese Platte der gleichmäßigen Verteilung der Wärme an der Oberfläche.

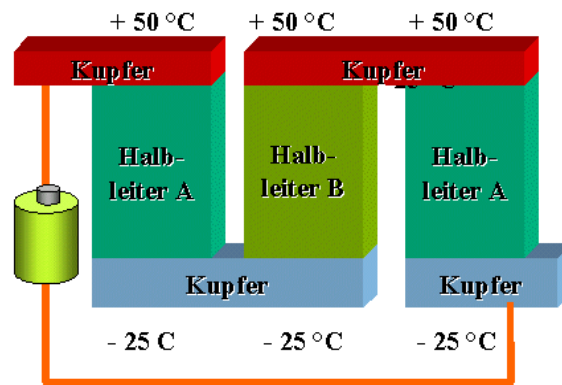


Bild 4.11: Aufbau eines Peltierelements [14]



Bild 4.12: Aussehen des Peltierelements [15]

4.3 Funktionsweise des TEG

Die Funktion beruht, je nach Verwendung als Peltierelement oder als thermoelektrischen Generator (TEG), auf dem Peltier- oder Seebeck- Effekt. Mit einfachen Worten kann man die Funktion eines Peltierelements wie folgt erklären: Bei der Verwendung als Peltierelement fließt ein Strom durch das Element, wobei sich eine Seite erwärmt und die andere Seite abkühlt. Es fließt ein Wärmestrom von kalt nach heiß (siehe Peltier- Effekt im **Abschnitt 2**). Durch Ändern der Polarität der Gleichspannung werden diese Seiten vertauscht. Daraus folgt, dass Peltierelemente nur mit Gleichspannung betrieben werden können. Beim Betrieb mit Wechselspannung tritt keine Temperaturdifferenz auf, sondern nur eine Erwärmung des Elements durch die Joulesche Wärme. Ein Peltierelement kann auch als TEG betrieben werden und erzeugt beim Anlegen einer Temperaturdifferenz an dessen Seiten eine Thermospannung (siehe Seebeck- Effekt im **Abschnitt 2**). Wenn dadurch ein Stromfluss zustande kommt, hat dieser die Joulesche Wärme zur Folge. Außerdem findet im Modul noch die Wärmerückleitung zwischen den beiden Seiten statt. Beide Effekte verringern die mögliche Temperaturdifferenz beim Peltier- Effekt oder die erzeugbare Thermospannung beim Seebeck- Effekt und damit auch den Wirkungsgrad.

4.4 Technische Daten des TEG

TEG sind für verschiedenste Anwendungsgebiete und Spezifikationen erhältlich. Einfache Module für den Hobbygebrauch sind ebenso erhältlich, wie Module für Spezialanwendungen im Hochtemperaturbereich. Einige Hersteller haben sich auf TEG spezialisiert, die verschiedenen Anforderungen gerecht werden. Diese sind zum Beispiel für hohe Einsatztemperaturen, gute Schwingfestigkeit oder besonders hohe Leistungen optimiert. Für den Einsatz im Kfz sollte die Verwendung der Module mit dem Hersteller abgestimmt werden, um die entsprechende Auswahl zu treffen oder eine neue Entwicklung für diesen speziellen Anwendungsfall einzuleiten. In der **Tabelle 4.2** sind die Daten von TEG der Firma Eureka Messtechnik, Eupener Strasse 150 in 50933 Köln (www.eureka.de) aufgeführt, welche zur Dimensionierung der verschiedenen Systeme verwendet werden.

Tabelle 4.2: Technische Daten von TEG [16]

Nr.	Seebeck koeffizient α [V/K]	Innen- wider- stand R_i [Ω]	Wärme- leitwert β_{wl} [W/K]	Leer- laufspan- nung [V]	Kurz- schluss- strom [A]	Maximal- leistung [W]	Maximal- temperatur [°C]	Abmes- sung [mm]
ΔT 100K								
1	0.027	9	0,03	2,7	0,3	0,2	120°C	9x10x2,3
2	0.054	3,4	0,3	5,4	1,6	2,1	120°C	30x30x3,6
3	0.10	6,7	0,6	10,4	1,6	4,0	120°C	40x40x3,6
4	0.052	1,6	0,6	5,2	3,1	4,0	120°C	40x40x3,6
5	0.054	1,5	0,7	5,4	3,5	4,7	120°C	40x40x3,4
6	0.053	1,5	0,8	5,3	3,5	4,7	120°C	40x40x3,4
7	0.082	1,7	1,6	8,2	4,9	10,1	120°C	40x40x3,2
ΔT 200K								
8	0,027	9	0,03	5,4	0,6	0,8	250°C	9x10x2,3
9	0,054	3,4	0,3	10,8	3,2	8,5	250°C	30x30x3,6
10	0,054	1,5	0,7	10,8	7,0	19,0	250°C	40x40x3,4
11	0,053	1,5	0,7	10,6	7,0	19,0	250°C	40x40x3,4
12	0,052	0,7	1,9	10,3	15,3	40,0	250°C	50x50x3,4

Spannungen und Ströme

Die Spannung eines TEG wird u.a. von seinem internen Aufbau und der Verschaltung der Kaskaden bestimmt. Mit dieser Möglichkeit kann man beliebige, benötigte Spannungen erzeugen. Die Leerlaufspannung eines Schenkelpaares im TEG wird durch die **Gl. (2.1)** der Thermospannung $U_{th} = (\alpha_1 - \alpha_2) * (T_{heiß} - T_{kalt})$ direkt von der Temperaturdifferenz und den Seebeck- Koeffizienten beeinflusst. Im Betrieb ist die Leerlaufspannung aber nicht von großer Bedeutung, da im Normalfall eine Last am Modul anliegt.

Die Spannung an Last U_{Last} [V] berechnet sich nach dem Ohmschen Gesetz laut **Gl. (4.8)** aus dem am TEG anliegenden Lastwiderstand R_a [Ω] und dem fließenden Laststrom I_{Last} [A]. Wenn der Außenwiderstand R_a als konstant angenommen wird und sich der Laststrom I_{Last} in Richtung Kurzschlussstrom erhöht, sinkt die Lastspannung U_{Last} gegen null. Wenn der Laststrom I_{Last} null wird, erreicht die Lastspannung U_{Last} ihren Maximalwert, die Leerlaufspannung.

$$U_{Last} = R_a * I_{Last} \quad \text{Gl. (4.8)}$$

Der in **Gl. (4.8)** einzusetzende Laststrom I_{Last} [A] berechnet sich nach der **Gl. (4.9)** mit der Thermospannung U_{th} [V] aus **Gl. (2.1)**, dem Innenwiderstand R_i [Ω] des TEG und des anliegenden Außenwiderstandes R_a [Ω]. Im Betrieb ist der Laststrom I_{Last} deshalb nur von der Thermospannung U_{th} abhängig, da die Widerstände als konstant angenommen werden können. Eine höhere Thermospannung hat laut dem Ohmschen Gesetz einen höheren Stromfluss zur Folge.

$$I_{Last} = \frac{U_{th}}{R_i + R_a} \quad \text{Gl. (4.9)}$$

Die **Gl. (2.1)**, **(4.8)** und **(4.9)** kann man zusammenfassen, was dann folgende Gleichung für die Spannung an Last ergibt. Zur Vereinfachung werden die Seebeck- Koeffizienten α_1 und α_2 [V/K] durch den vom Hersteller angegebenen Seebeck- Koeffizient α laut **Tabelle 4.2** ersetzt. Die Temperaturen $T_{heiß}$ und T_{kalt} [K] werden durch ΔT ersetzt.

$$U_{Last} = R_a * \frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \quad \text{Gl. (4.10)}$$

Aus dieser Gleichung kann man erkennen, dass wenn die Widerstände und Seebeck- Koeffizienten als konstant gelten, die Lastspannung direkt von der Temperaturdifferenz am TEG abhängig ist. Eine hohe Temperaturdifferenz hat also eine höhere Lastspannung zur Folge.

Elektrische Leistung

Die Leistungen der TEG aus der **Tabelle 4.2** liegen im Bereich von 0,1 bis etwa 40 Watt pro Modul. Die Abmessungen liegen zwischen 10 x 10mm und 50 x 50mm. Wenn größere Leistungen benötigt werden, lassen sich die Module zu Gruppen parallel oder in Reihe zusammenschalten.

Die elektrische Leistung P_{el} [W] berechnet sich nach **Gl. (4.11)**.

$$P_{el} = U_{Last} * I_{Last} \quad \text{Gl. (4.11)}$$

Wenn man die **Gl. (4.9)** und **(4.10)** zusammenfügt erhält man daraus für P_{el} [W]:

$$P_{el} = R_a * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 \quad \text{Gl. (4.12)}$$

Die Regelung der Leistung von TEG kann, wie aus der **Gl. (4.12)** hervorgeht, nur durch Variierung des Lastwiderstandes R_a [Ω] oder der Temperaturdifferenz ΔT [K] erfolgen. Dieser Grundsatz ist in der Konzeption einer TEG- Anlage zu beachten.

Wärmezu-, Wärmeabfuhr und Wärmeentwicklung

Am TEG treten drei verschiedene Wärmearten auf: Die Joulesche Wärme $\dot{Q}_{Joule}$ [W] aus **Gl. (2.6)**, die Peltierwärme $\dot{Q}_{Peltier}$ [W] aus **Gl. (4.13)**

$$\dot{Q}_{Peltier} = \alpha * T * I_{Last} \quad \text{Gl. (4.13)}$$

und die Wärmeleitung $\dot{Q}_{wl}$ [W] aus **Gl. (4.14)**.

$$\dot{Q}_{wl} = \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.14)}$$

Die Joulesche Wärme hat einen geringen Einfluss auf den Wirkungsgrad, da sie nicht nur die kalte Seite erwärmt, sondern auch die heiße Seite. An der heißen Seite muss deshalb weniger Wärme aufgenommen werden, wie aus **Gl. (4.15)** ersichtlich ist. Dieser Gewinn wird aber an der kalten Seite wieder zum Verlust und hebt sich damit auf. Die zusätzliche Wärme muss aber an der kalten Seite abgeführt werden, was zu einem größeren technischen Aufwand führt. Die Temperaturdifferenz am TEG selbst bleibt davon unberührt.

Der Peltiereffekt aus **Gl. (4.13)** hat einen nachteiligen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Diese Wärme muss zugeführt und wieder abgeführt werden. Durch diesen Effekt stellt sich ein Wärmestrom von der heißen zur kalten Seite des TEG ein. Er ist direkt von der Temperatur T [K] und dem Laststrom I_{Last} [A] abhängig. Da mit linear steigender Temperatur auch der Laststrom linear ansteigt, verhält sich dieser Wärmestrom quadratisch.

Als dritte Wärme stellt sich der Wärmefluss durch direkte Wärmeleitung im Werkstoff ein. Die Wärmeleitung ist in der **Gl. (4.14)** dargestellt und verhält sich linear, da der Wärmeleitwert β_{wl} [W/K] des TEG als konstant angenommen werden kann und somit nur die Temperaturdifferenz ΔT [K] hier Einwirkung hat.

Alle diese am TEG auftretende Wärmeströme sind unerwünscht. Wenn ein Wärmestrom von der heißen zur kalten Seite fließt, ist die Folge ein Angleich der Temperaturen heiß und kalt. Die Thermospannung wird aber durch das Aufrechterhalten der Temperaturdifferenz laut **Gl. (2.1)** erzeugt. Wenn nicht genug Wärme zugeführt oder die zugeführte Wärme nicht abgeführt werden kann, erfolgt ein zu vermeidender Temperaturangleich. Von Vorteil für den erzielbaren Wirkungsgrad des TEG ist ein hoher Wärmewiderstand im Seebeck- Schenkelpaar, um den Wärmestrom so gering wie möglich zu halten. Geringe Wärmewiderstände außen am TEG gewährleisten, dass die Temperaturdifferenz direkt am Seebeck- Schenkelpaar anliegt und damit die Thermospannung damit hoch wird. Im nachfolgenden **Bild 4.13** sind die Wärmearten mit ihrer Flussrichtung am TEG dargestellt.

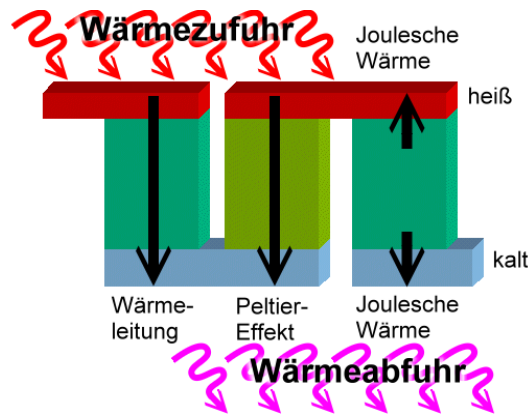


Bild 4.13: Auftretende Wärmearten am TEG

Um die zugeführte Wärme $\dot{Q}_{zu}$ [W] zu ermitteln, werden die **Gl. (2.6)** für die Joulesche Wärme, die **Gl. (4.13)** für den Peltiereffekt mit $T_{heiß}$ [K] und die **Gl. (4.14)** für die Wärmeleitung in der **Gl. (4.15)** zusammengesetzt. Die Joulesche Wärme wird nur zur Hälfte in die Berechnung eingezogen, da sie im Element und somit an beiden Seiten des TEG jeweils nur zur Hälfte auftritt. Die anderen beiden Effekte treten nicht an den Seiten auf, sondern stellen einen Wärmetransport durch den TEG dar. Der gesamte Term ist negativ, da es sich um eine Wärmeaufnahme handelt.

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{\dot{Q}_{Joule}}{2} - \dot{Q}_{Peltier} - \dot{Q}_{wl} \quad \text{Gl. (4.15)}$$

Zusammengefasst und vereinfacht ergibt sich daraus folgende Gleichung für die dem TEG zugeführte Wärme $\dot{Q}_{zu}$ [W]:

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 - \frac{\alpha^2 * T_{heiß} * \Delta T}{R_i + R_a} - \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.16)}$$

Für die Ermittlung der vom TEG abzuführenden Wärme werden alle Terme aus der **Gl. (4.15)** addiert und ergeben die Wärmeabgabe $\dot{Q}_{ab}$ [W]. Zu beachten ist dabei, dass in der **Gl. (4.13)** für die Peltierwärme T_{kalt} [K] verwendet werden muss, da diese auf der wärmeabführenden Seite herrscht. Dieser Term wird positiv, da Wärme abgegeben wird.

$$\dot{Q}_{ab} = \frac{\dot{Q}_{Joule}}{2} + \dot{Q}_{Peltier} + \dot{Q}_{wl} \quad \text{Gl. (4.17)}$$

Zusammengefasst und vereinfacht ergibt sich daraus folgende Gleichung für am TEG abzuführende Wärme $\dot{Q}_{ab}$ [W]:

$$\dot{Q}_{ab} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 + \frac{\alpha^2 * T_{kalt} * \Delta T}{R_i + R_a} + \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.18)}$$

Wirkungsgrad

Die derzeitigen Wirkungsgrade von TEG sind nicht sehr hoch. Er liegt bei Temperaturdifferenzen von 100K, je nach Modul bei etwa 4%. Größere Wirkungsgrade werden bei größeren Temperaturdifferenzen erreicht. Dabei ist auf der heißen Seite einfacher Module die Grenze bei etwa 250°C, da bei höheren Temperaturen die Lotverbindung der Halbleiter- und Kupferteile sich zu lösen beginnt. Temperaturen in Richtung kalt unter der normalen Umgebungstemperatur bedeuten zusätzlichen Energieaufwand für Kühlung. Deshalb sind der mögliche Temperaturbereich und damit der Wirkungsgrad von dieser Seite her begrenzt. Spezielle Entwicklungen für den Hochtemperaturbereich sind davon ausgenommen. Der Wirkungsgrad von TEG wird nach **Gl. (4.19)** mit den **Gl. (4.12)** und **Gl. (4.15)** ermittelt.

$$\eta = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} * 100 \quad \text{Gl. (4.19)}$$

Wie bereits erläutert, sind die beeinflussenden Größen am TEG der Seebeck-Koeffizient α , der Wärmeleitwert β_{wl} [W/K], die Widerstände R_i und R_a [Ω] sowie ΔT [K]. Am TEG selbst lässt sich nur ΔT und R_a zur Regelung beeinflussen, da die anderen Werte feste Werkstoffgrößen darstellen. Der Idealfall im Wirkungsgrad ergibt sich immer bei Anpassung der Widerstände R_i und R_a . Das bedeutet, dass der Lastwiderstand dem Innenwiderstand des TEG entsprechen muss, also $R_i = R_a$.

Aus dem Diagramm in **Bild 4.14** sind die berechneten Daten für den TEG Nr. 12 aus der **Tabelle 4.2** und deren Verlauf entnehmbar. Es wurde die Anpassung der Widerstände R_i und R_a zur Berechnung verwendet. In diesem Falle ist die abgegeben elektrische Leistung gleich der Jouleschen Wärme. Ab einem ΔT von 250K bei 250°C wurde die Höchsttemperatur nicht mehr erhöht, sondern der

Lastwiderstand R_a zuerst um $0,5 \, \Omega$ verringert und danach um $0,5 \, \Omega$ erhöht. Damit wird der Einfluss von R_a auf die anderen Berechnungswerte dargestellt. Die Verläufe der Jouleschen Wärme, des Peltiereffekts und der Wärmeleitung verhalten sich, wie bereits beschrieben. Eine größere Darstellung des Diagramms ist in der **Anlage 2** zu finden.

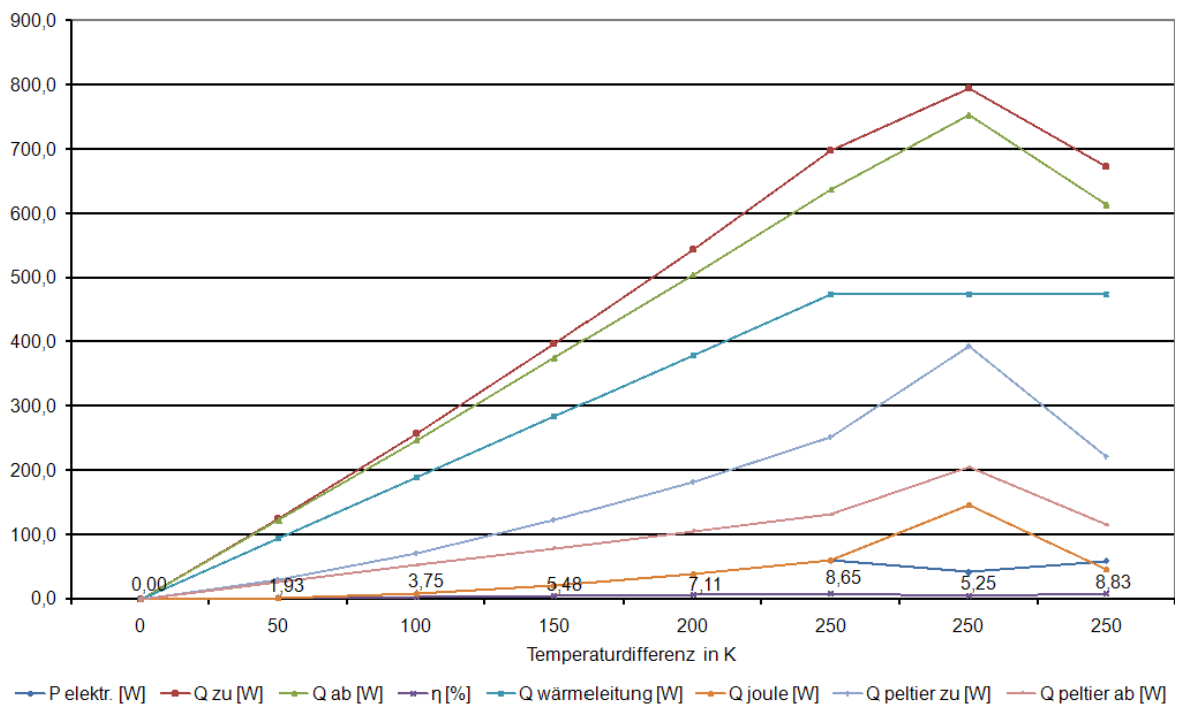


Bild 4.14: Verlauf von Leistung, Wärme und Wirkungsgrad

Bei der Verringerung des Lastwiderstandes steigt der Stromfluss im TEG, bedingt durch das Ohmsche Gesetz, an. Das hat zur Folge, dass der Wärmestrom, verursacht durch den Peltiereffekt und die Joulesche Wärme, sprunghaft ansteigt. Dadurch steigt auch die aufgenommene und wieder abgeführte Wärme. Die elektrische Leistung sinkt leicht, da die Spannung am TEG durch den hohen Stromfluss stark sinkt, was auch für den Wirkungsgrad zutrifft. Einzig die Wärmeleitung durch den TEG bleibt konstant, da diese nur von Materialkonstanten und dem Temperaturgefälle abhängig ist.

Wird der Lastwiderstand vergrößert, sinkt der Stromfluss im TEG, was zur Folge hat, dass der Wärmestrom durch den Peltiereffekt und die Joulesche Wärme sehr stark abfällt. Dadurch sinkt die aufgenommene und wieder abgeführte Wärme. Die elektrische Leistung steigt auf ein höheres Niveau, da die Spannung am TEG durch

den geringeren Stromfluss in Richtung Leerlaufspannung geht. Damit steigt auch der Wirkungsgrad. Alle Zusammenhänge sind in den Gleichungen im **Abschnitt 4.4** dargestellt und ersichtlich.

4.5 Einsatzbedingungen des TEG

Temperaturen

Die wichtigste Einsatzbedingung für ein TEG ist die Temperatur. Zum Einen darf die Temperatur das Modul nicht zerstören, zum Anderen sollte die Temperaturdifferenz so hoch wie möglich sein, um hohe Wirkungsgrade und Spannungen zu erreichen. Aktuell gängige TEG bieten maximale Einsatztemperaturen von 150 - 250°C. Der Grund dafür ist die Temperaturbeständigkeit der meist verwendeten Lotverbindung zwischen dem Halbleiter und der Kupferbrücken. Es stehen auch Hochtemperaturmodelle mit Einsatztemperaturen von bis zu 1000°C zur Auswahl, die jedoch meist für Messzwecke verwendet werden.

Schwingungen

Mechanische Schwingungen, die auf einen TEG aufgebracht werden, können Materialermüdung und somit die Beschädigung oder Zerstörung des Moduls zu Folge haben. Dämpfend kann, wie im **Bild 4.15** dargestellt, ein elastischer Wärmeleitkleber zwischen den Wärmetauschern und dem Modul wirken. Im Idealzustand werden keine Schwingungen auf das Modul aufgebracht. Um eine Aussage zur Schwingfestigkeit und der damit verbundenen Lebensdauer treffen zu können, muss ein Prüfstandtest mit den verschiedenen Konzeptvarianten durchgeführt werden.

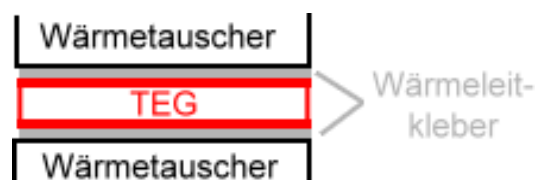


Bild 4.15: Dämpfung durch Kleber

Korrosion

Die Korrosion ist ein weiteres wichtiges Kriterium. Der TEG sollte auf die gesamte Lebensdauer des Fahrzeuges ohne Austausch ausgelegt werden. Im Kfz stehen als Wärmequellen das Kühlwasser und das Abgas zur Verfügung. Beim Einsatz im Abgasstrang treten hohe Temperaturen und harte Umweltbedingungen auf. Hier sind Temperaturen bis 1000°C bei Vollastbetrieb des Benzinmotors möglich. Im Winter treten Außentemperaturen, je nach Klimazone von bis zu -40°C, im Sommer bis zu +50°C auf. Diese Temperaturschwankungen, erhöhte Feuchtigkeit durch Spritzwasser sowie Streusalze verursachen Korrosion direkt im TEG sowie zwischen TEG und Wärmetauscher. Ziel sollte der Einsatz von korrosionsfreien Materialien am TEG und der Anbindung an die Wärmetauscher sein. Das Innere des TEG muss versiegelt werden, um hier die Korrosion zu verhindern. Diese würde sonst die verwendeten Materialien wie Kupfer, Zinn und Blei sowie die Halbleiterelemente in kurzer Zeit so beschädigen, dass ein Ausfall die Folge wäre. Einige Möglichkeiten bietet hier die Versiegelung des Moduls mit Silikon, Epoxidharz oder Schutzlack. Alternativ kann das komplette System gegenüber der Umwelt gekapselt werden.

Einspannung

Die Einspannung des TEG ist neben der Temperatur der wichtigste Fakt für die Leistungsfähigkeit. Eine ungenügende Anbindung hat schlechte Wärmeleitung zur Folge, was wiederum einen starken Leistungsabfall des Elements bewirkt. Kritisch ist dabei dass zwischen beiden Seiten des Elements eine Temperaturdifferenz von 100K oder mehr herrscht. Durch die unterschiedliche Wärmedehnung wirkt am Modul ein Bimetall- Effekt. Das Modul wölbt sich beulenförmig auf und verliert großflächig den notwendigen Kontakt für die Wärmeleitung. Eine Unterdrückung dieser Reaktion durch Festeinspannung kann zur mechanischen Beschädigung des Moduls führen, da sich die kaskadenförmigen Halbleiterschlenkel im Inneren durch die hohen mechanischen Spannungen verformen und durch Materialermüdung beschädigt werden können. Empfohlene Einspannkräfte bewegen sich, je nach Modul zwischen 1,25 - 1,50 N/mm². Es sind für eine sichere Einspannung unbedingt die Hinweise des Herstellers zu beachten. Bei der Zusammenfassung mehrerer Module zu einer Generatorgruppe spielen außerdem die Abweichungen der Anlageflächen der Wärmetauscher und Elemente zueinander eine entscheidende Rolle. Empfohlen sind Höhenunterschiede von max. 0,05mm und Parallelitäts-

abweichungen von max. 0,02mm, um einen guten Wärmeübergang zu erreichen. Bei größeren Abweichungen wird eine starke Verschlechterung der Leistung eintreten. Diese Abweichungen können an Modul und Anschlussflächen auftreten und von Wärmeleitpaste oder -Kleber ausgeglichen werden. Wärmeleitpaste hat bei einer Schichtdicke von 0,03mm einen Wärmeleitwert von etwa 20 - 35 W/K. Bei größeren Schichtdicken sinkt dieser auf den reinen Materialwert der Wärmeleitpaste von bis zu 9 W/K. Dieses Verhalten rührt daher, dass bei geringer Schichtdicke die Unebenheiten der Metallanlageflächen teilweise Kontakt miteinander haben. Deshalb tritt hier eine direkt Wärmeleitung auf, die im Durchschnitt einen größeren Wärmeleitwert als die Wärmeleitpaste allein hat. Daraus folgt, dass die Spalt- und damit die Schichtdicken so gering wie möglich sein müssen, um die Wärmewiderstände zu minimieren. [19 S.6]

Lebensdauer

Die Lebensdauer von Peltierelementen ist sehr stark von den Einsatzbedingungen abhängig. Mechanische Spannungen, Schwingungen sowie Temperaturen über der Einsatzgrenze sind besonders schädlich für die Lebensdauer der Elemente. Als weitere, führende Größe wird die Anzahl der Temperaturzyklen angegeben. Bei dauerhafter Nutzung mit gleichbleibenden oder nur gering schwankenden Temperaturen innerhalb der Einsatzgrenze und geringen Spannungen ist die Lebensdauer der Elemente als sehr lange anzusehen. Diese Bedingungen sind im Kfz von Haus aus nicht gegeben. Es müssen hier entsprechende Vorkehrungen in Form von Schwingungsdämpfung, Temperaturregelung und Schutz vor Umwelteinflüssen getroffen werden.

4.6 Entwicklungstrends

Auf dem Gebiet von TEG sind zurzeit einige Entwicklungen im Gange, durch die ein deutlich gesteigener Wirkungsgrad der Module aufzuweisen ist. Das Fraunhofer Institut für physikalische Messtechnik ist derzeit auf diesem Gebiet führend und spricht von Wirkungsgraden um 30%. Diese höheren Wirkungsgrade können nur, nach **Gl. (2.5)** durch einen höheren Seebeck- Koeffizient, geringerer Wärmeleitung und einer höheren Temperaturdifferenzen durch bessere Temperaturfestigkeit der TEG erreicht werden. Deshalb sind die Wirkungsgradangaben auch in Bezug auf die

Einsatztemperatur zu betrachten, die oft zu dieser Berechnung sehr hoch angesetzt wird. Durch höhere Temperaturen erreichen auch aktuelle TEG durchaus höhere Wirkungsgrade. Wenn diese Wirkungsgradverbesserungen durch Werkstoffentwicklungen dementsprechend groß ausfallen, der einfachen Aufbau, die geringen Produktionskosten und Wartungsfreiheit betrachtet werden, sind die TEG für alle Anwendungen zur Nutzung von Abwärme interessant. Dieser Trend wird die Weiterentwicklung dieser Systeme in der Industrie in Zukunft wahrscheinlich stärker vorantreiben.

5 Thermoelektrische Generatoren im Kfz

5.1 Motivation und Energierückgewinnung

Wärmekraftmaschinen sind, durch den Carnot- Wirkungsgrad, physikalisch in ihrer Effizienz begrenzt. Die **Gl. (5.20)** stellt diesen Wirkungsgrad dar.

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_{kalt}}{T_{heiß}} \quad \text{Gl. (5.20)}$$

Wie man daraus erkennt, kann Dieser niemals 1 sein. Besonders hohe Temperaturdifferenzen, in Kelvin eingesetzt, ergeben einen hohen Wirkungsgrad. Das zugehörige T-s- Diagramm ist im **Bild 5.16** zu sehen. Es sind die zu- und abgeführte spezifische Wärme q_{zu} und q_{ab} sowie die Nutzarbeit w_{nutz} (Fläche des Quadrates) und Verlustarbeit (Fläche unter dem Quadrat) $w_{verlust}$ dargestellt. Die Punkte 1 - 4 stellen die jeweiligen Prozessrandpunkte dar. Die Temperatur T_{max} und T_{min} sind die maximal und minimal auftretenden Prozesstemperaturen.

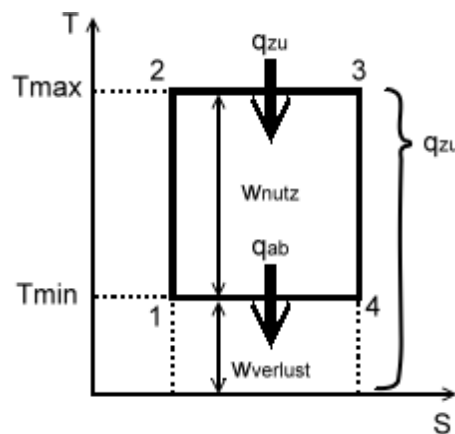


Bild 5.16: Carnotprozess

Auf Grund der immer auftretenden Verlusten und der nicht realisierbaren hohen und niedrigen Temperaturen kann nie die gesamte Wärme in mechanische Energie umgewandelt werden. In aktuellen Kraftfahrzeugen werden Verbrennungsmotoren nach dem Otto- oder Diesel- Kreisprozess mit Wirkungsgraden um 35 - 45% eingesetzt. Im **Bild 5.17** ist ein Sankey- Diagramm der Verluste eines Ottomotors dargestellt. Grundsätzlich ist es aber möglich, die Wärmeverluste an Kühlwasser und Abgas, die zusammen ca. 70% des Treibstoffheizwertes betragen, zur Strom-

erzeugung zu nutzen. Wenn die im Kraftfahrzeug benötigte Elektroenergie aus der Verlustwärme des Verbrennungsmotors und nicht durch einen elektrodynamischen Generator erzeugt wird, sinken die Drehmomentanforderungen an den Verbrennungsmotor und dadurch der Treibstoffverbrauch. Am Beispiel des Kraftfahrzeuges ist der mechanische Nutzanteil des Kraftstoffes ca. 30%, welcher durch weitere Verluste im Motor, Kennungswandler und Antriebsstrang bis auf ca. 16% verringert wird. Der größte Anteil der Kraftstoffenergie geht in direkter Abwärme, ein kleinerer Teil in Form von Reibungen ungenutzt verloren. Die Entwicklung der Treibstoffpreise, die Diskussion um den CO₂- Ausstoß und letztendlich der steigende Energiebedarf im Kraftfahrzeug machen eine Nutzung dieser Wärmeverluste zwingend erforderlich. Um eine Effizienzsteigerung des Systems Kraftfahrzeug zu erreichen, muss diese Abwärme genutzt werden.

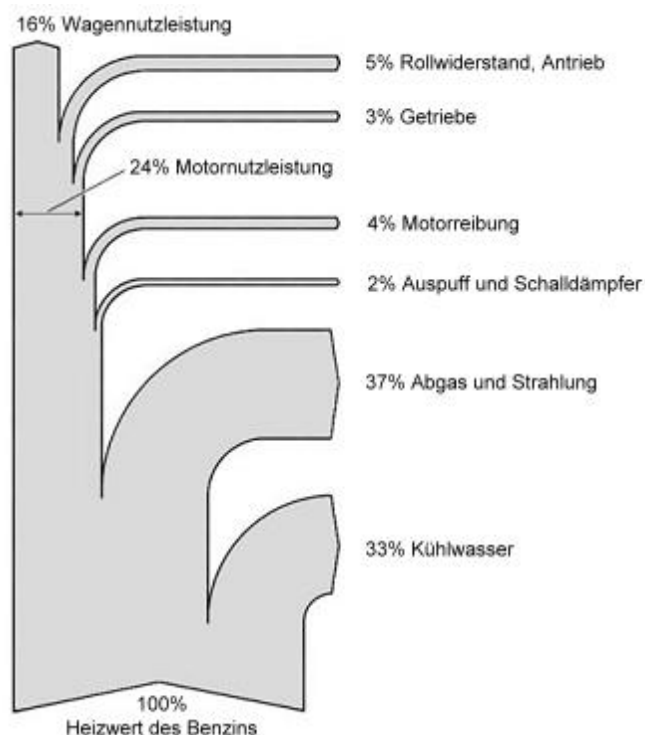


Bild 5.17: Verluste Ottomotor [18]

Prinzip der Energierückgewinnung

Für die Entwicklung eines Konzept für ein thermoelektrisches Generatorsystem im Kfz, müssen verschiedene Anforderungen und Situationen betrachtet werden. Im **Bild 5.18** ist das grundlegende Konzept eines solchen Systems zu sehen.

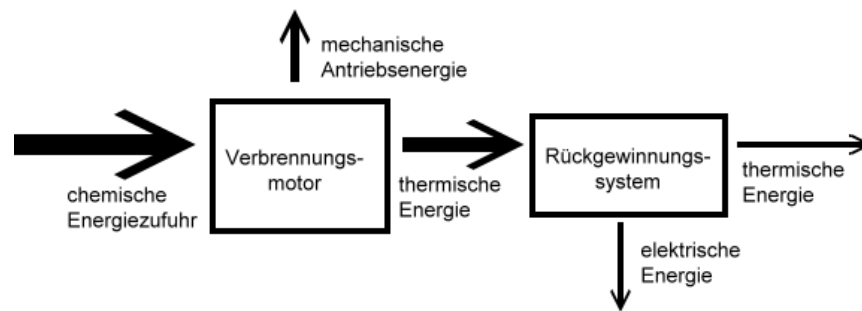


Bild 5.18: Konzept der Energierückgewinnung aus Abwärme

Der Verbrennungsmotor liefert neben der mechanischen Energie, die zum Antrieb des Fahrzeuges genutzt wird, weitere Energieformen, die gewissermaßen ungenutzte Abfallprodukte darstellen. Diese Energien sind die thermische und die kinetische Energie. Thermische Energie fällt Größtenteils im Abgas und im Kühlwasser, ein kleinerer Teil direkt am Motorblock an. Kinetische und potenzielle Energie sind im Abgas durch die Strömungsgeschwindigkeit und den Überdruck gegenüber der Umwelt zu finden. Um diese Energie zu nutzen, werden heute Abgasturbolader eingesetzt. Dabei ist die direkte Umwandlung dieser Energie in mechanische Energie möglich. Um die thermische Energie des Verbrennungsmotors, welche als Abwärme anfällt, zu nutzen, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Systeme, wie Dampfanlagen oder Heißluftmotoren, müssen die thermische Energie zuerst in andere Energieformen umwandeln um elektrische oder mechanische Energie zu erzeugen und sind durch den maßgebenden Carnot-Wirkungsgrad aus **Gl. (5.20)** mit Verlusten behaftet. Nur ein bekanntes Bauteil kann diese Wärme direkt in elektrische Energie umwandeln: Der thermoelektrische Generator. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten erläutert, die im Kfz vorhanden sind.

5.2 Einsatzbedingungen für TEG im Kfz

Umgebungsbedingungen

Die Einsatzgrenzen, die bei der Konzeption eines Kfz gestellt werden, variieren nach dem Einsatzzweck und der Klimazone der Erde. Sie liegen in den gemäßigten Klimazonen bei -30°C bis 60°C . Diese Bedingungen werden durch die Betriebstemperaturen der Elemente und die Temperaturen, die an Motor,

Kühlwasser und Abgasstrang herrschen erweitert und in den folgenden Abschnitten näher erläutern.

Kühlwassertemperaturen

Die vorhandene Kühlwassertemperatur ist von mehreren Faktoren abhängig. Diese sind u.a. die Außentemperatur, die vom Motor an das Kühlwasser abgeführte Verlustwärme sowie die Kühllufttemperatur, die vom vor dem Hauptwärmetauscher sitzenden Klimakondensator schon vorgewärmt werden kann. An heißen Tagen mit Außentemperaturen um 30°C, aktiver Klimaanlage und Betrieb im Stadtverkehr, mit wenig Fahrtwind durch Stop and Go, können hier Kühlwassertemperaturen von bis zu 110°C auftreten.

Wenn das Kühlwasser für die Wärmeabfuhr am TEG verwendet werden soll, ist zu beachten, dass der Hauptwärmetauscher im Kühlkreislauf die zusätzlich ins Kühlwasser übertragene Wärme abführen muss. Dementsprechend ist der Hauptwärmetauscher im Fahrzeug eventuell größer zu dimensionieren. Soll die Kühlwasserwärme für den TEG verwendet werden, kann der Hauptwärmetauscher kleiner dimensioniert werden, da Wärme aus dem Kühlwasserkreislauf abgeführt wird.

Abgastemperaturen

Die Temperaturen im Abgas sind, je nach Art des Brennverfahrens, sehr unterschiedlich. Bei 4- Takt- Dieselmotoren treten im Vollastbereich Abgastemperaturen von ca. 600°C am Zylinderauslass auf. [17 S.94]

Bei 4- Takt-Benzinmotoren können im Vollastbetrieb bis zu 1050°C erreichen werden. [17 S.135]

Diese Temperaturen werden durch den Wärmeverlust, der in der Abgasrohrleitung und dem Katalysator auftritt, verringert. Außerdem sind diese Temperaturen sehr stark von der Motorlast und dem Fahrzustand des Fahrzeuges abhängig. Eine höhere Fahrgeschwindigkeit hat einen größeren Wärmeverlust durch Konvektion an den Abgasrohrleitungen zur Folge. Eine höhere Abgastemperatur hat höhere Wärmeverluste durch Wandwärmeleitung zur Folge. Dieses Verhalten ist aus

Gl. (7.24) und **Gl. (7.27)** aus **Abschnitt 7.1.4** ersichtlich, wo Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit direkten Einfluss haben.

Für die Ermittlung tatsächlicher Werte für die Abgastemperatur wurde an einem Versuchsfahrzeug eine Abgastemperaturmessung nach dem NEFZ durchgeführt. Dabei sind über der Zeit festgelegte Geschwindigkeiten laut dem **Bild 5.19** zu fahren.

Das Versuchsfahrzeug der Westsächsischen Hochschule Zwickau war:

Audi A3 (Modell 8L, Baujahr 1996 - 2003) mit 1.8l Hubraum, Abgas- Turboaufladung mit Ladeluftkühlung, sequenzieller Motronic- Benzin- Saugrohreinspritzung, 110 kW Maximalleistung bei 5700 U/min, 210 Nm Drehmoment bei 1750 – 4600 U/min, CO₂-Ausstoß 212g/km, EU 3 Abgasnorm

Das Fahrzeug wurde nach allen Vorschriften des NEFZ vorbereitet und die Fahrt nach allen Vorschriften des NEFZ durchgeführt. Der Allradantrieb wurde deaktiviert, da auf dem Scheitelrollenprüfstand nur mit Vorderradantrieb gefahren wurde. Der verwendete Messensor war ein Thermoelement Typ K (Ni-Cr) mit Einsatztemperaturen von -250°C bis 1260°C. Er wurde direkt am Ausgang des Katalysators in der Mitte des Abgasrohres platziert, da das die motornaheste Einbaumöglichkeit des TEG wäre, ohne die Abgasnachbehandlungssysteme zu beeinflussen. Die Umgebungstemperatur betrug 21°C. Der Verlauf der ermittelten Abgastemperatur über der Zeit ist im **Bild 5.20** zu sehen. Die mittlere erreichte Abgastemperatur betrug 282°C, die maximale 480°C. Das vollständige Ergebnis der Messung, als Diagramm mit der gefahrenen Geschwindigkeit und der dazugehörigen Abgastemperatur, ist in der **Anlage 3** enthalten.

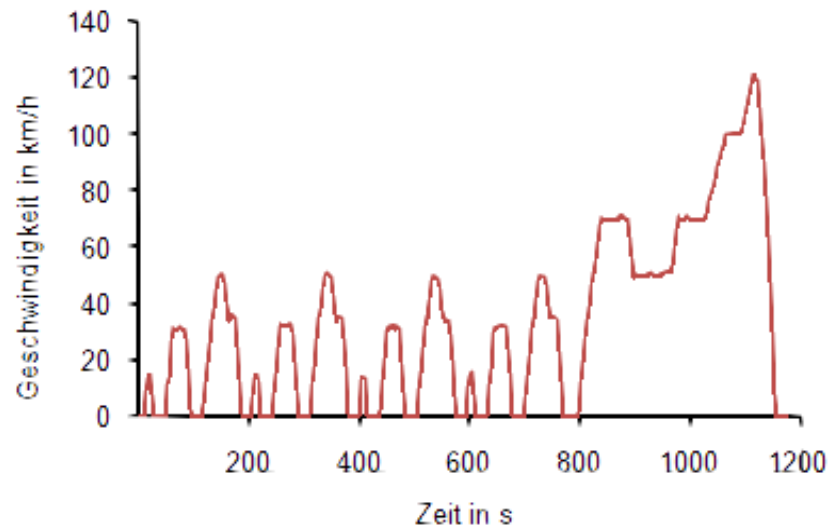


Bild 5.19: Geschwindigkeits- Zeit- Diagramm nach NEFZ

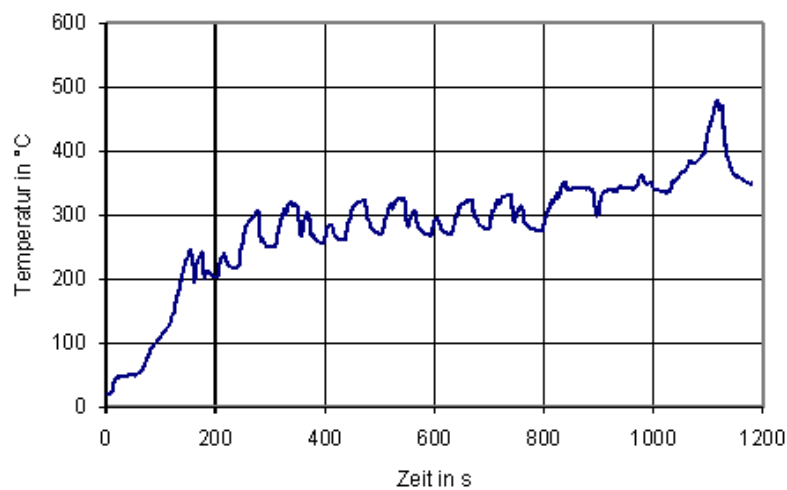


Bild 5.20: Verlauf der Abgastemperatur nach NEFZ

Abgaswärmestrom

Die Wärme Q [J] ist nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik durch die **Gl. (5.21)** definiert.

$$Q = m * q \quad \text{Gl. (5.21)}$$

Damit ist sie direkt von der Masse des Stoffs m [kg] und der spezifischen Wärme q [kJ/kg] abhängig. Die spezifische Wärme q wird wiederum bei konstantem Druck, der im offenen System Abgasrohr angenommen werden kann, durch $q = c_{p-a} * (T_2 - T_1)$ errechnet. Der Wert für die Wärmekapazität des Abgases bei konstantem Druck c_{p-a}

[kJ/kg*K] muss durch die Einzelwerte der Abgasbestandteile, aus Literatur entnommen, und der Massenverteilung im Abgas nach **Gl. (5.22)** errechnet werden.

$$c_{p-a} = \sum_{i=1} \frac{m_i}{m_a} * c_{p_i} \quad \text{Gl. (5.22)}$$

Ebenso sind nach diesem Schema die Dichte ρ , die dynamische Viskosität η und die Wärmeleitfähigkeit λ für das Abgas zu errechnen, was im **Abschnitt 0** durchgeführt wird. Der Abgas- Volumenstrom wurde bei der Abgastemperaturmessung nach dem NEFZ durch die CVS- Anlage erfasst. Aus der Dichte des Abgases und dem Volumenstrom kann man den Massestrom im Abgas ermitteln. Wenn man diesen Massestrom $\dot{m} = \dot{V} * \rho$ [kg/s] und q in die Gleichung der Wärme $\dot{Q} = \dot{m} * q$ einsetzt, erhält man als Endergebnis die **Gl. (5.23)**,

$$\dot{Q} = \dot{V} * \rho * c_p * (T_2 - T_1) \quad \text{Gl. (5.23)}$$

welche der Leistung in [J/s] oder auch [W] entspricht. Damit kann man die aus dem Abgas oder Kühlwasser entnehmbare Leistung P [W] ermitteln und daraus schließen, ob die dem TEG zuzuführende Leistung im Fluid vorhanden ist.

Abgasnachbehandlung

Die effiziente Abgasnachbehandlung bei Ottomotoren und die Einhaltung von Abgasnormen leben vom schnellen Erreichen der Betriebstemperatur des Katalysators von 600°C bis 800°C. Beim Erreichen der sogenannten Light- Off- Temperatur des Katalysators werden bereits 50% der Schadstoffe im Katalysator umgewandelt, unterhalb dieser Temperatur ist er wirkungslos und die entstehenden Emissionen sind sehr hoch. Die typische Light- Off- Temperatur für einen 3- Wege- Katalysator liegt bei 250°C. [17 S.89]

Im Bereich der Dieseltechnologie gelten andere Bedingungen als bei Ottomotoren. Für den Dieselmotor kann kein 3- Wege- Katalysator eingesetzt werden, weil durch Luftüberschuss im Abgas ein Kohlenmonoxidmangel herrscht und dieses somit nicht zur Reduktion der Stickoxide zur Verfügung steht. Es wird ein Oxidationskatalysator eingesetzt, der Kohlenwasserstoffe und den geringen Anteil Kohlenmonoxid oxidiert.

Seine Light- Off- Temperatur liegt, wegen dem hohem Sauerstoffgehalt im Abgas, bei nur 160°C. Stickoxide werden zum Beispiel durch die Reaktion mit Ammoniak (z.B. AdBlue®) reduziert, welches vor einem Katalysator eingespritzt wird. Der Rußpartikelaußstoß wird durch verschiedene Filtersysteme, die in gewissen Zyklen abgebrannt werden oder sich selbst regenerieren, vermindert. Die Hersteller haben dazu verschieden Konzepte zur Marktreife entwickelt. Wichtig für diese Abgasnachbehandlungstechnologien ist immer, dass gewisse Temperaturen so schnell wie möglich erreicht werden müssen, die je nach System in den Dimensionen von 350°C bis 620°C liegen. [17 S.99ff]

Aus diesen Vorgaben ergeben sich gewisse Einschränkungen in Bezug auf die Platzierung des TEG. Da die sogenannte Light- Off- Temperatur des Katalysators so schnell wie möglich erreicht werden muss, ist es bedenklich, den TEG vor dem Katalysator zu platzieren. Der TEG würde dem Abgas Wärmeenergie entziehen und das Abgas kühlen. Die Folge wäre ein verspätetes Aufheizen des Katalysators. Es besteht aber die Möglichkeit, den TEG als Peltierelement zur Heizung des Katalysators einzusetzen. Fraglich ist hier, ob die erreichbare Temperaturdifferenz von max. 60K und die Heizleistung ausreichend sind, um das Erreichen der Light- Off- Temperatur merklich zu beschleunigen. Effektiver ist hier sicherlich eine optimierte elektrische Heizung.

5.3 Potenzial der Wärmequellen im Kfz

Für die Potenzialabschätzung der drei verschiedenen Varianten ist der vorhandene Wärmestrom oder auch Fluidleistung ausschlaggebend. Eine Gegenüberstellung der Daten ist deshalb erforderlich und in der **Tabelle 5.3** erfolgt. Es sind die Stoffwerte, die Randbedingungen und die Fluidleistung zusammengefasst. Die Systeme Abgas - Luft und Abgas - Kühlwasser haben großes Potenzial, da die Temperaturen in bestimmten Fahrzuständen hohe Werte erreichen können und damit hohe Thermospannungen hervorrufen. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, werden jedoch im Abgas nur relativ geringe Fluidleistungen erreicht. Gründe dafür sind die geringen Temperaturen von max. 250°C, die am TEG vorhanden sein dürfen. Außerdem sind die stoffspezifischen Daten des Abgases viel geringer als die des Kühlwassers. Deshalb werden für das Abgas große Volumenströme, Temperaturen und

großflächige Wärmetauscher nötig sein, um genügend Leistung für den TEG aus dem Abgas bereitzustellen. Das Kühlwasser erweist sich dagegen als idealer Wärmeträger mit hohem Energiegehalt. Dafür sind die zu erreichenden Temperaturdifferenzen zu gering, um hohe Thermospannungen am TEG zu erzeugen. Die aufgeführten Werte der Fluidleistung werden nach **Gl. (5.23)** berechnet und beziehen sich auf die komplette Temperaturdifferenz, welche aber im System durch Wärmedurchgangswiderstände und Wärmeübergangswiderstände niemals umgesetzt werden kann.

Tabelle 5.3: Potenzialabschätzung der Systeme

Daten	Kühlwasser/Luft	Abgas/Luft	Abgas/Kühlwasser
Norm. Temperatur [°C]	100/8	282/8	282/100
Max. Temperatur [°C]	120/-30	> 500/-30	> 500/90
Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]	4,2154/1,0066	1,1431/1,0066	1,1431/4,2154
Dichte [kg/m³]	959,07/1,2407	0,627/1,2407	0,627/959,07
Ø Volumenstrom der Wärmequelle [m³/s]	0,00125	0,00956	0,00956
max. Volumenstrom $\dot{V}$ der Wärmequelle [m³/s]		0,04227	0,04227
Fluidleistung norm. T [kW]	464,9	1,9	1,2
Fluidleistung max. T [kW]	758,0	3,6	2,8
Fluidleistung max. T/ $\dot{V}$ [kW]		16,1	12,4

6 Alternative Stromerzeugung im Kfz

Alternative Stromerzeugungsmethoden werden im Kfz, nach Ausreifung der Technologien, Einzug halten. Ein Grund ist, weil diese Systeme höhere Wirkungsgrade bereitstellen können. Das wird sich nicht nur auf die Deckung des Energiebedarfes für das Bordnetz begrenzen, sondern wird wahrscheinlich auch auf den Antrieb des Fahrzeuges mit Elektromotoren übergreifen. Problem dieser Hybridvarianten ist, dass deren Energieträger und Akkumulatoren eine geringere Energiedichte als Diesel oder Benzin aufweisen. Andere Energiespeicher oder –erzeuger für den Serieneinsatz, wie z.B. die Brennstoffzelle, sind noch nicht zur befriedigenden Serienreife entwickelt.

6.1 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist ein galvanisches Element und damit nicht, wie Wärmekraftmaschinen, an den Carnot- Wirkungsgrad gebunden. Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde bereits 1839 von Sir William Robert Grove entdeckt und wird auch als kalte Verbrennung bezeichnet. Bis in die 50er Jahre blieb dieses Prinzip ungenutzt. Mit dem Beginn der Raumfahrt wurde die Brennstoffzelle, durch ihren hohen Wirkungsgrad, das geringe Gewicht und einfachen Aufbau, wieder interessant. Nachteilig waren die hohen Kosten für die Herstellung. In den 90er Jahren wurde die Brennstoffzelle, Dank neuer und belastbarer Materialien, intensiv weiterentwickelt.

Der Aufbau und die Funktion einer Brennstoffzelle sind denkbar einfach und im **Bild 6.21** dargestellt. Im Prinzip ist der stattfindende chemische Prozess die Umkehrung der Elektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. An der Anodenseite findet folgende Reaktion dabei statt: $H_2 \rightarrow 4e^- + 4H^+$

Die Freien Elektronen fließen als Strom durch den Verbraucher, die Protonen gelangen durch, den für sie durchlässigen Elektrolyten zur Kathode. Hier reagieren Sie unter Aufnahme der Elektronen mit Sauerstoff zu Wasser. Die gesamte Reaktion lässt sich wie folgt beschreiben: $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

Brennstoffzellen sind, bei Verwendung verschiedener Elektrolyte in der Lage, mit verschiedenen Arbeitsmedien, wie Wasserstoff, Methan, Methanol und Kohlegas zu

arbeiten. Niedertemperatur- Brennstoffzellen arbeiten bei 60°C bis 90°C , Hochtemperaturmodelle erreichen Temperaturen bis 1000°C . Die Wirkungsgrade liegen zwischen 40% bei Niedertemperaturmodellen und bis zu 70% bei Hochtemperaturmodellen. Die möglichen Leistungen liegen im Bereich von einigen Watt bis Megawatt. [20]

Der Brennstoffzelle wird, mit einer Umstellung des weltweiten Energienetzes auf Wasserstoff als Energieträger, die Zukunft für die Stromversorgung zugeschrieben, speziell auch für den Antrieb von Fahrzeugen mit Elektromotoren. Problematisch beim Einsatz von Brennstoffzellen sind derzeit die geringe Lebensdauer, die hohen Herstellungskosten und die Speicherung ausreichender Mengen Brennstoffes an Bord des Kfz. Wenn diese Probleme gelöst sind, steht dem Einsatz von Brennstoffzellen in der Serie nichts mehr im Wege. Voraussetzung für die Umweltfreundlichkeit ist die Gewinnung von Wasserstoff oder anderen Brennstoffen durch Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

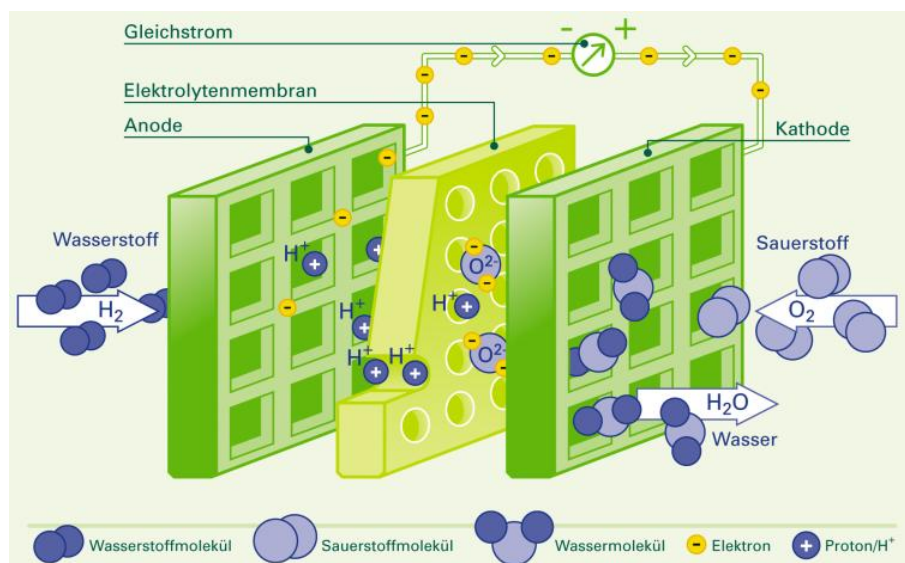


Bild 6.21: Aufbau und Funktion der Brennstoffzelle [21]

6.2 Solarzelle

Die Sonne liefert uns praktisch unbegrenzt Energie in Form von Licht, Wärme und Strahlung auf die Erde. Diese Energie mit Solarzellen zu nutzen, gilt deshalb als die regenerative, saubere Energie. Der Aufbau und die Funktion einer Solarzelle sind im

Bild 6.22 zu sehen. In unseren Breiten ist die durchschnittliche Sonneneinstrahlung ca. 2,5 kWh pro m² und Tag während in äquatorialen Gebieten, wie der Wüste Sahara bis zu 7 kWh/m² erreicht werden können. Eine Übersichtskarte ist in **Bild 6.23** dargestellt.

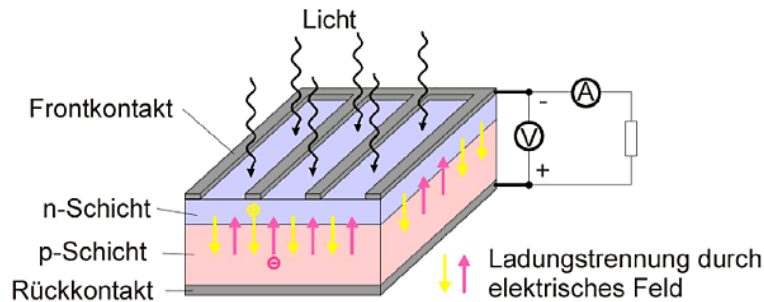


Bild 6.22: Aufbau und Funktion der Solarzelle [22]

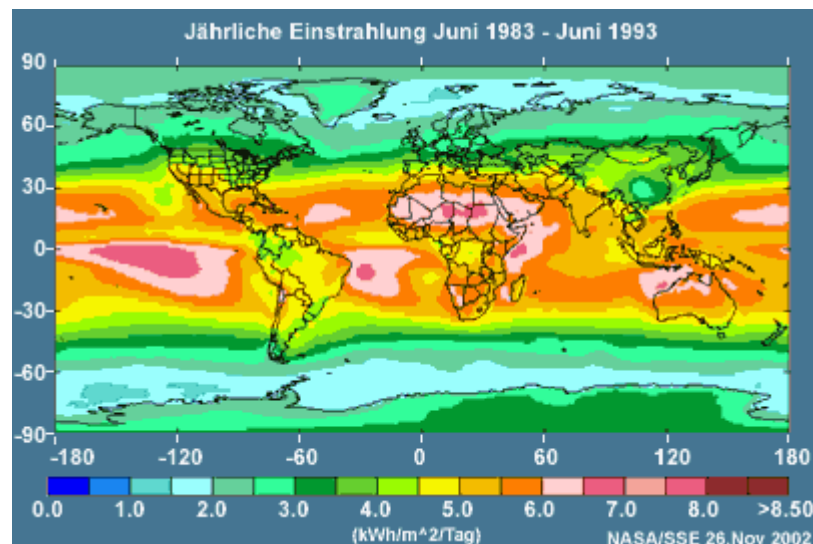


Bild 6.23: Jährliche Sonneneinstrahlung der Sonne [23]

Diese Energie kann auch in der Kraftfahrzeugtechnik verwendet werden. Gängige Solarpanels mit den Abmessungen 1500mm x 1000mm haben eine Maximalleistung von ca. 200W. Diese Fläche steht auf dem Dach einer Limousine, eines Kombis oder eines Vans zur Verfügung. Dünnschicht- Solarzellen wären hier für die Anbringung direkt auf der Außenhaut zu empfehlen, welche auch den ästhetischen Ansprüchen der Kunden nicht im Wege stehen würden. Während der Fahrt oder auch der Standzeit des Fahrzeuges, zum Beispiel zu Hause oder während der Arbeit, könnte so die größer dimensionierte Verbraucherbatterie des Fahrzeuges nachgeladen werden. So könnte man die nötige Stromleistung des Generators gezielt senken oder diesen in gewissen Zyklen mechanisch vom Antrieb trennen, bis die

Verbraucherbatterie einen niedrigen Ladestand erreicht hat und dann vom Generator zusätzlich nachgeladen wird. Hierfür sind ein Zwei- Batterien- Bordnetz (Starter- und Verbraucherbatterie) und ein intelligentes Energiemanagement mit einer Abstimmung auf den jeweiligen Fahrzyklus unabdingbar.

6.3 Abgasturbine

Abgasturbinen, im Kfz als Radialturbinen ausgeführt, verbreiten sich heute immer mehr in der Motorentechnik. Zum größten Teil werden sie für den Antrieb eines Verdichters verwendet. Das System wird dann Turbolader genannt und ist in **Bild 6.24** zu sehen. Abgasturbinen können aber auch für andere Zwecke verwendet werden. Zum Beispiel kann man die Turbine über ein Getriebe mit der Kurbelwelle des Motors verbinden. Diese Konstellation wird Turbo- Compound- Motor genannt, liefert eine hohe Leistung und Drehmoment als herkömmliche Saugmotoren, ist aber für den Einsatz in Motoren, die mit konstanter Drehzahl und Last laufen, besser geeignet. Man kann die Turbine auch zum Antrieb von Motornebenaggregaten verwenden. Eine Anwendung wäre hier die Erzeugung von Strom durch Kopplung mit einem elektrodynamischen Generator. Für diese Zwecke ist immer ein Untersetzungsgetriebe erforderlich, da diese Turbinen Drehzahlen von 200.000 U/min und mehr erreichen können. Die abgegebene Leistung einer Abgasturbine ist vom Druckverhältnis vor und nach der Turbine, von der Temperatur, dem Massenstrom und der Zusammensetzung des Abgases abhängig. Es muss deshalb geprüft werden, ob das Druckverhältnis und der Massestrom für den Betrieb von zwei Abgasturbinen, zum Verdichter- und Generatorantrieb, zur Verfügung steht. Eine gängige Abgasturbine erreicht, je nach Betriebspunkt, einen Wirkungsgrad von bis zu 70%.

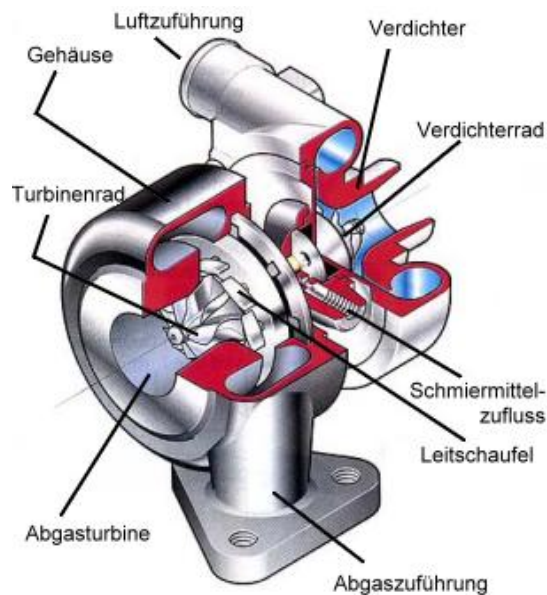


Bild 6.24: Abgasturbolader [24]

6.4 Turbosteamer

Der Turbosteamer ist ein von BMW entwickeltes Konzept zur Nutzung der Abgaswärme im Kfz mittels einer Dampf- Expansionsmaschine. Das Prinzip basiert auf dem eines Dampf- Elektrizitätskraftwerkes. Im Abgasstrang wird durch die heißen Abgase in einem Wärmetauscher 550°C heißer Wasserdampf erzeugt. In diesem Hochtemperaturkreislauf wird durch eine Expansionsmaschine, die mit der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors gekoppelt ist, mechanische Antriebsenergie erzeugt. Ein zweiter Kreislauf, der Niedertemperaturkreislauf, wird mit Ethanol betrieben. Dieses wird vom Kühlwasser des Motors vorgewärmt und mit der Restwärme des Hochtemperaturkreislaufes und des Abgases verdampft. In der zweiten Expansionsmaschine wird daraus ebenfalls mechanische Antriebsenergie erzeugt. Der Aufbau ist im **Bild 6.25** zu sehen. Nach Aussagen von BMW ist eine Wirkungsgradsteigerung des Fahrzeuges von 15% und bei einem Durchschnittsverbrauch von 7l / 100km eine Kraftstoffersparnis von 1,5l möglich. Die Zusatzleistung wird mit 10kW angegeben. Das Prinzip kann auch zur reinen Stromerzeugung verwendet werden. Dazu muss an die Expansionsmaschine ein Generator angeschlossen werden. Mit der Elektroenergie könnte man, je nach Bedarf, den Bordnetzverbrauch decken oder eine Starter- Generatormaschine zum Antrieb nutzen. Denkbar sind auch kombinierte Systeme zur Unterstützung des Verbrennungsmotors und zur Stromerzeugung. Vergleichbare Dampfkraftwerke

erreichen Wirkungsgrade von bis zu 45%, was im Falle des Kfz eine gute Möglichkeit ist, die bisher ungenutzte Abwärme sinnvoll zu verwenden.

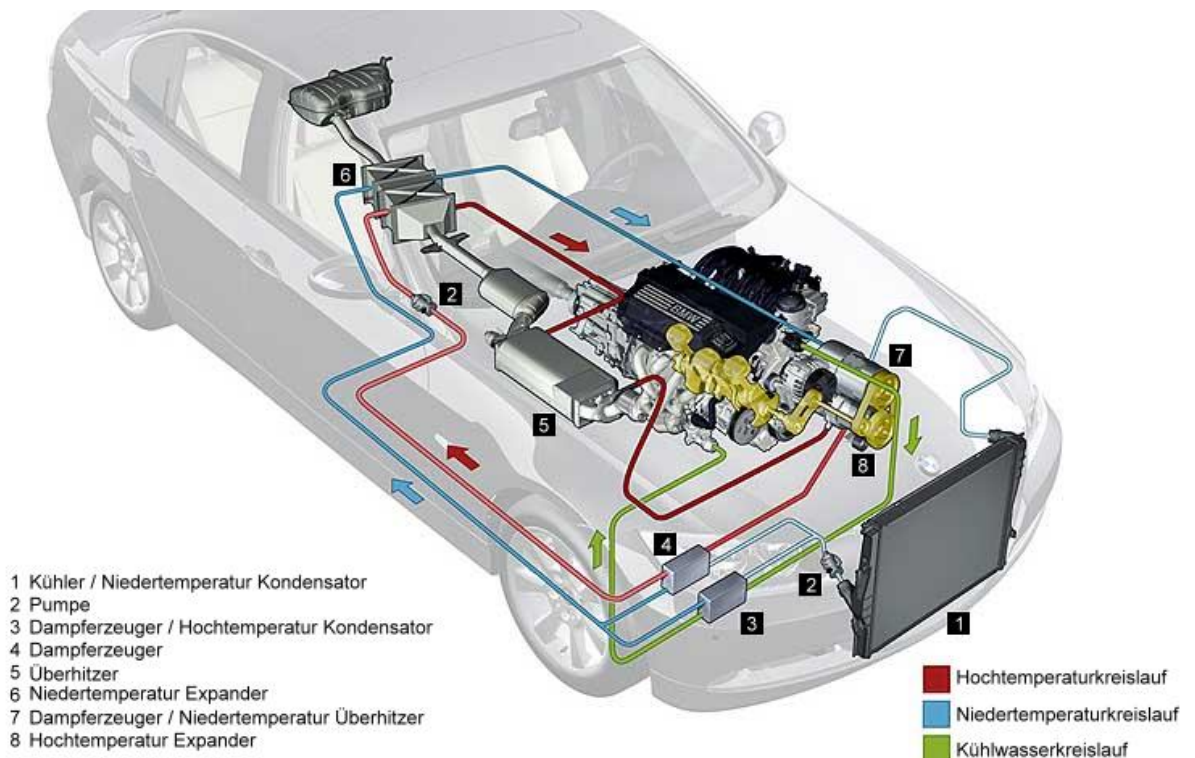


Bild 6.25: Turbosteamer- System von BMW [25]

6.5 Weitere alternative Systeme

Es sind auch viele weitere Konzepte zur Energieerzeugung entwickelt worden. All diese zu erläutern würde den Rahmen dieser kurzen Zusammenfassung sprengen, weshalb sie nur kurz genannt werden sollen.

Eine mögliche, andere Variante zur Stromerzeugung durch Abwärmenutzung ist der Stirlingmotor. Er hat jedoch, wegen der aufwendigen Wärmetauscher, eine hohe Masse. Außerdem kann das interne Arbeitsgas nicht auf die hohen Temperaturen, die im Verbrennungsmotor 2000°C und mehr erreichen, gebracht werden. Meist werden nur maximal 800°C erreicht. Da im Kfz, laut der Abgasmessung aus **Abschnitt 5.2**, im Durchschnitt nur 280°C erreicht werden, ist sein realer Wirkungsgrad bei diesen Temperaturen, bedingt durch den Carnot- Wirkungsgrad, relativ gering. Dazu eine Vergleichsrechnung nach **Gl. (5.20)** mit den genannten Temperaturen in Kelvin und einer Bezugstemperatur kalt von 100°C .

$$\begin{aligned} \text{Stirlingmotor} \\ \eta_{carnot} &= 1 - \frac{373,15K}{553,15K} \\ \eta_{carnot} &= 0,33 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Verbrennungsmotor} \\ \eta_{carnot} &= 1 - \frac{373,15K}{2273,15K} \\ \eta_{carnot} &= 0,84 \end{aligned}$$

Eine weitere Möglichkeit der Stromerzeugung sind sogenannte APUs (Auxiliary Power Units), wie sie zur autarken Stromversorgung eingesetzt werden. Es werden meist Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren verschiedener Arbeitsverfahren, die als Stationärmotoren ausgeführt sind, eingesetzt. Sie sind mit einem elektrodynamischen Generator gekoppelt und weisen durch ihre Auslegung auf einen optimalen Betriebspunkt bessere Wirkungsgrade auf, als das System der derzeitigen Stromerzeugung im Kfz. Diese APUs kann man durch die Kombination von Systemen, die Abwärme von Kühlwasser und Abgas nutzen, auf höhere Wirkungsgrade ausbauen.

6.6 Vergleich der alternativen Systeme

Für die effektive Nutzung der Abgaswärme müssen Systeme mit hohen Wirkungsgraden eingesetzt werden, wobei die auftretenden Verluste bei der Energieumwandlung zu minimieren sind. Ein direkter Vergleich der o.g. Systeme ist in diesem Fall schwierig, da jedes System eine andere Technologie und Energieumwandlung nutzt und mehr oder weniger gravierende Nachteile hat. Der thermoelektrische Effekt ist der einzige, derzeit bekannte Effekt, der ohne Umwege Wärme in elektrischen Strom umwandeln kann.

Die Brennstoffzelle wird wahrscheinlich zur Erzeugung der gesamten, im Fahrzeug benötigten Energie, inklusive Antrieb mit Elektromotoren, verwendet werden. Typen, die für den Fahrzeugeinsatz geeignet sind, haben Wirkungsgrade von ca. 50%. Nachteilig sind die relativ geringe Lebensdauer, die hohen Kosten für Anschaffung und Betrieb, sowie das fehlende Versorgungsnetz für den Brennstoff. Zudem stellt sich die Frage, mit welcher Energiequelle der benötigte Wasserstoff erzeugt wird.

Solarzellen benötigen große Flächen zur Installation, die auf einem Fahrzeug nur sehr begrenzt zur Verfügung stehen. Außerdem stehen für Sichtbereiche am Fahrzeug ästhetische Gründe gegenüber der Energieversorgung im Vordergrund. Der geringe Wirkungsgrad, die Abhängigkeit vom Sonnenschein und damit den vorherrschenden Witterungsbedingungen sowie Jahreszeiten, lässt diese Energiequelle nur für den Einsatz als zusätzliche Stromerzeugung zu. Vorteil ist eindeutig die erneuerbare Energie und das praktisch unbegrenzt vorkommende Hauptbestandteil der Solarzelle, das Silizium.

Schon viel im Fahrzeug eingesetzt, ist die Abgasturbine, durch ihre kompakte Bauweise gut geeignet, Zusatzaggregate anzutreiben und dabei die potenzielle und kinetische Energie des Abgases zu nutzen. Durch den aktuellen Bedarf an Aufladetechnik, die beim Downsizing von Verbrennungsmotoren notwendig ist, wurden die Turbinen weiterentwickelt und dadurch gute Wirkungsgrade erreicht. Die thermische Energie des Abgases bleibt in der Abgasturbine ungenutzt. Als nachteilig erweist sich am Bauteil die hohe thermische Belastung durch das heiße Abgas, was besonders bei Benzinmotoren (bis zu 1000°C) hochwärmefeste und damit teure Materialien verlangt. Da der Massestrom des Verbrennungsmotors begrenzt ist, sind der Anwendung von Abgasturbinen für zusätzlich Zwecke Grenzen gesetzt.

Das entwickelte Turbosteamer- System von BMW zeigt dagegen, wie man auch die Abgaswärme sinnvoll nutzen kann, ob zum Antrieb des Fahrzeuges oder zur Stromerzeugung. Die Folge sind 15% Treibstoffersparnis und 15% Effizienzsteigerungen des Kfz. Dagegen stehen die Nachteile dieses Systems wie der komplexe Aufbau, die erforderliche Regelungstechnik und die damit verbundenen hohen Kosten. Ebenso ist ein nicht zu verachtender Masse- und Bauraumzuwachs die Folge.

Überlegenswert ist auch, ob Strom komplett mit autarken Systemen wie APUs erzeugt werden sollte. Man könnte Speicherbatterien oder Kondensatoren in Zyklen mit einem elektrodynamischen Generator laden, entladen und damit die Effizienz des Systems gegenüber dem dauerhaft arbeitenden Generator verbessern. Es ist außerdem abzuwägen, ob man verschiedene Systeme miteinander kombiniert, um

dadurch eine bessere Energienutzung zu erreichen. In der folgenden **Tabelle 6.4** sind die Vor- und Nachteile der erläuterten Systeme zusammengefasst.

Tabelle 6.4: Vergleich der alternativen Energiesysteme

System	Vorteile	Nachteile	Wirkungsgrad
Brennstoffzelle	- einfacher Aufbau - geringes Gewicht - kein Schadstoffausstoß vor Ort	- hohe Herstellungskosten - geringere Lebensdauer - Speicherung des Brennstoffs - Brennstoffversorgungsnetz - große Leistung = großer Bauraum	bis 40 %
Solarzelle	- einfacher Aufbau - geringes Gewicht - erneuerbare Energiequelle	- hohe Herstellungskosten - geringe Leistungsdichte	bis 17 %
Abgasturbine	- geringer Bauraum - Nutzung des Abgasdruckes	- hohe thermische Belastung - Abgasmassenstromabhängige Leistung	bis 70 %
Turbo-steamer	- gute Nutzung der Abgaswärme	- komplexer Aufbau - dadurch hohe Masse - benötigt viel Bauraum	bis 45%
APU	- Leistung unabhängig vom Verbrennungsmotor - optimale Auslegung möglich	- Wirkungsgrad nur geringfügig besser als bisherige Systeme im Kraftfahrzeug	bis 26%

7 Konfigurationsmöglichkeiten im Kfz

Die Stromerzeugung im Kfz durch TEG erfordert eine Wärmequelle (Wärmezufuhr) und eine Kältequelle (Wärmeabfuhr). Damit ist eine möglichst große Temperaturdifferenz zu erzeugen. Im Kfz stehen dafür zwei Wärmequellen zur Verfügung: Das Kühlwasser und das Abgas. Als Kältequelle kann man die Umgebungsluft und das Kühlwasser verwenden. Die sich daraus ergebenden drei Konfigurationen werden nachfolgend dargestellt, untersucht und überschlägig berechnet.

7.1 Kühlwasser - Luft

7.1.1 Konzeption

Die Konfiguration Kühlwasser - Luft nutzt die Abwärme des Motors aus dem Kühlwasserkreislauf. Dieser Anteil ist laut dem Sankey- Diagramm aus **Bild 5.17** etwa 33 % des Treibstoff- Brennwertes und deshalb nicht zu verachten. Als günstig erweist sich bei dieser Variante die in geringen Grenzen von einigen Grad schwankende Kühlwassertemperatur. Allerdings wird die Effektivität dieser Variante schon von vorn herein durch die relativ geringe Temperaturdifferenz zwischen dem Kühlwasser und der Umgebungsluft stark begrenzt. Gängige TEG erreichen erst bei einer Temperaturdifferenz von etwa 100 K akzeptablen Wirkungsgrad.

Aufbau

Der systematische Aufbau des Konzeptes ist im **Bild 7.26** dargestellt. Der Wärmetauscher 1 wird als ein Wasser- Wärmetauscher ausgeführt und als Wärmequelle des TEG in den äußeren Kühlwasserkreislauf eingebunden. Der Vorlauf des Hauptwärmetauschers, der das heiße Wasser vom Motor kommend führt, dient als Wärmezufuhr. Der Vorteil dabei ist, dass dem Kühlwasser Wärme entzogen wird, woraufhin der Hauptwärmetauscher kleiner als üblich dimensioniert werden kann. Die Einbindung in den inneren Kühlkreislauf des Motors hätte beim Kaltstart ein schnelleres und wünschenswertes Erreichen des nötigen Temperaturgefälles am TEG zur Folge. Der große und entscheidende Nachteil ist, dass der Motor später seine Betriebstemperatur erreicht, wenn in der Kaltstartphase

dem Kühlwasser schon Wärme entzogen wird. Außerdem wäre bei der Verwendung einer Kühlwasser- Standheizung weiterer Aufwand nötig, um den TEG während des Standheizungsbetriebes vom Kühlwasserkreislauf zu trennen. Diese Variante ist daher auszuschließen, um ein schnelles Aufheizen des Kühlwassers zu ermöglichen. Der Wärmetauscher 2 an der kalten Seite wird als ein Luft- Wärmetauscher ausgeführt. Während der Fahrt wird er passiv vom Fahrtwind gekühlt. Wenn die Fahrgeschwindigkeit zu gering wird, um die Wärme durch erzwungene Konvektion abzuführen, kann ein temperaturgesteuertes Zusatzgebläse die Fahrtwindkühlung unterstützen und im Stillstand ganz ersetzen. Die beiden Wärmetauscher sollten in dieser und den anderen beiden Varianten als Plattenwärmetauscher ausgeführt werden, um einen guten Wärmeübergang zu Gewährleisten und ebene Anlageflächen für den TEG zur Verfügung zu stellen. Es wird der TEG Nr. 7 aus der **Tabelle 4.2** auf Grund der Temperaturen und der relativ hohen Leistung für alle weiteren Berechnungen ausgewählt. Das vollständige Datenblatt ist in der **Anlage 6** zu finden.

Zu Prüfen ist, ob die elektrische Leistung der TEG die benötigte Leistung des Gebläses im Fall der aktiven Kühlung übertrifft, da sonst ein Einsatz des Gebläses nicht sinnvoll ist. Die Wärmetauscher sind überschlägig zu dimensionieren, um abschätzen zu können, ob der Einsatz bauraumbedingt und technisch möglich ist.

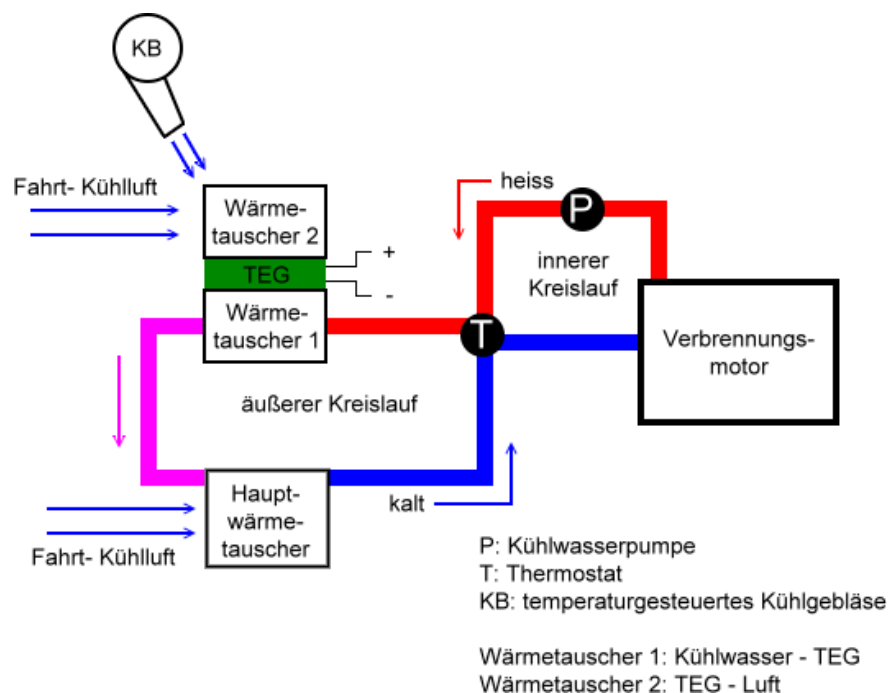


Bild 7.26: Aufbau des Systems Kühlwasser - Luft

Positionierung im Fahrzeug

Die elektrische Leistung für die eventuelle aktive Kühlung des Luft- Wärmetauschers soll so gering wie möglich gehalten werden. Auch aus diesem Grund muss der Luft- Wärmetauscher direkten im Luftstrom des Fahrtwindes liegen. Die Einbauposition sollte so nahe wie möglich am Motor oder Hauptwärmetauscher sein, um zu lange Kühlwasserleitungen und die damit verbundenen Rohrströmungs- und Wärmeverluste zu vermeiden. Der vordere Teil des Kfz zwischen Hauptwärmetauscher und Motor bietet sich hierzu an. Möglich wäre dabei die Integration des Luft- Wärmetauschers in die Motorraum- Unterbodenverkleidung. Es wären eine gute Luftdurchströmung und gleichzeitig eine platzsparende Unterbringung möglich. In Fahrtrichtung vor dem Wärmetauscher 2 muss der Ausströmer des Kühlgebläses so angeordnet werden, dass während der Fahrt die Durchströmung des Wärmetauschers nicht oder nur wenig behindert wird. Während des Gebläsebetriebes muss wiederum eine gute Durchströmung des Wärmetauschers möglich sein. Die Bauraumverhältnisse müssen nach der Dimensionierung des Luft- Wärmetauschers geprüft werden.

7.1.2 Umgebungsbedingungen und Temperaturen

Die Leistungsfähigkeit dieses Systems ist sehr von der Umgebungstemperatur abhängig. Bei steigender Außentemperatur sinken das Temperaturgefälle und damit der Wirkungsgrad. Die Kühlwassertemperatur des Wärmetauschervorlaufes beträgt im Normalbetrieb etwa 100°C. Die Außentemperatur beträgt im Jahresdurchschnitt 8°C, was jedoch Schwankungen von ca. -30°C bis ca. 40°C beinhaltet. Deshalb ist es bei dieser Variante besonders wichtig, geringe Temperaturdifferenzverluste durch geringe Wärmewiderstände zu realisieren. Bei hohen Außentemperaturen beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasser und Umwelt noch etwa 60K. Diese wird durch die Wärmewiderstände der Wärmetauscher, der Wärmeleitkleber oder Paste und den Bauelementen im TEG verringert. Wenn man diese Verluste mit ca. 15K annimmt, ist die mögliche Differenz gerade noch 45K. In diesen Bereichen liegt der Wirkungsgrad des TEG, abhängig vom Typ, bei etwa 2%. Größere Temperaturdifferenzen ergeben sich bei geringeren Außentemperaturen. Im Fall von -30°C Außentemperatur wäre der Wirkungsgrad bei etwa 5,6%. In warmen Klimazonen ist der Einsatz darum weniger von Vorteil. Wichtig für den Betrieb ist auf jeden Fall eine

höhere Fahrgeschwindigkeit, weil durch die höhere Luftgeschwindigkeit die Wärme durch erzwungene Konvektion besser abgeführt werden kann. Falls die Wärme nicht ausreichend abgeführt wird, kommt es zum Hitzestau im System. Die Folge ist eine Verringerung des Temperaturgefälles und der Abnahme der elektrischen Leistung und des Wirkungsgrades des TEG. Die Auswirkung steigender Umgebungstemperatur auf die elektrische Leistung und den Wirkungsgrad ist im **Bild 7.27** dargestellt. Wie daraus zu erkennen ist, fallen der Wirkungsgrad und die elektrische Leistung dabei ab. Für diese Darstellung wurde die Maximaltemperatur bei der Wirkungsgrad- und Leistungsberechnung mit 95°C am TEG durch das Kühlwasser anliegend angenommen. Bei einer durch die Kaltluft am TEG anliegenden Temperatur von 28°C betragen die elektrische Leistung etwa 4,5W und der Wirkungsgrad rund 3%. Diese Werte sind, im Vergleich mit anderen alternativen Systemen, relativ gering. Weitere Einschränkungen ergeben sich, wenn fahrzyklusbedingt eine geringe Abwärme, ins Kühlwasser gegeben wird. Der äußere Kühlkreislauf wird dann in gewissem Maße durch das Thermostat vom inneren Kreislauf abgetrennt, um die Temperatur konstant hoch zu halten. Dabei treten geringere Masseströme und geringere Strömungsgeschwindigkeiten sowie auch eine geringere Wärmeleistungen auf. Das System verliert stark an Effizienz.

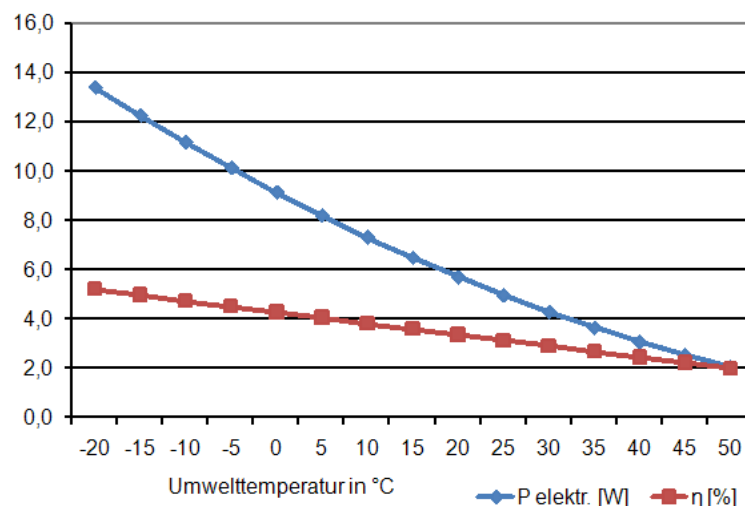


Bild 7.27: Einfluss Umwelttemperatur auf Wirkungsgrad und Leistung

7.1.3 Wärmestrom am Generator

Der erste Schritt der Dimensionierung ist die Überprüfung der im Kühlwasser zur Verfügung stehenden Leistung. Es wird dazu die Berechnung laut **Abschnitt 5.2** mit den Daten aus **Tabelle 7.5** durchgeführt.

Tabelle 7.5: Berechnungsdaten Kühlwasser - Luft [26]

Symbol	Beschreibung	Wert
λ_{Al}	Wärmeleitfähigkeit Aluminium	238 W/(m*K)
λ_{Cu}	Wärmeleitfähigkeit Kupfer	398 W/(m*K)
$\lambda_{keramik}$	Wärmeleitfähigkeit Aluminiumoxid- Keramik	30 W/(m*K)
λ_{wlk}	Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitkleber	7,5 W/(m*K)
b_t	Wandstärke des Wärmetauschers	0,003 m
b_k	Wandstärke der Keramikplatte des TEG	0,001 m
b_w	Stärke der Wärmeleitkleberschicht	0,00005 m
l	Überstrichene Plattenlänge	0,16 m
c_{p-w}	Wärmekapazität Wasser bei 100°C	4,2154 kJ/(Kg*K)
c_{p-l}	Wärmekapazität Luft bei 8°C	1,0066 kJ/(Kg*K)
η_w	Dynamische Viskosität Wasser bei 100°C	0,0002847 Pa*s
η_l	Dynamische Viskosität Luft bei 8°C	0,00001764 Pa*s
ρ_w	Dichte Wasser bei 100°C	959,070 kg/m ³
ρ_l	Dichte Luft bei 8°C	1,24076 kg/m ³
λ_w	Wärmeleitfähigkeit Wasser bei 100°	0,68100 W/(m*K)
λ_l	Wärmeleitfähigkeit Luft bei 8°	0,02478 W/(m*K)
c	Fahrgeschwindigkeit PKW	54 km/h = 15 m/s
$\dot{V}$	Volumenstrom der Kühlwasserpumpe	0,00125 m ³ /s

Die **Gl. (5.23)** $\dot{Q} = \dot{V} * \rho_w * c_{p-w} * (T_{hei\beta} - T_{kalt})$ dient zur Ermittlung der im Kühlwasser enthaltenen Wärmeenergie. Alle Komponenten in der Gleichung gehen linear ein. Die Fluidleistung ist deshalb linear mit der Temperaturdifferenz steigend. Dieser Verlauf ist auch im **Bild 7.28** zu erkennen. Durch die hohen Werte der Dichte und Wärmekapazität des Kühlwassers sind hier große Leistungen, im Vergleich mit Luft, entnehmbar. Diese Leistung muss auch vom Motor in das Kühlwasser

abgegeben werden, weil sonst die Kühlwassertemperatur im Kühlwasserkreislauf abfällt. Für diese Leistungsberechnung muss eine Messung der Aufheizzeit der vorgegebenen Kühlwassermasse durchgeführt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde keine Messung vorgenommen und erfordert eine weitere Untersuchung. Es wird hierfür angenommen, dass die benötigten 5,6kW im Kühlwasser zur Verfügung stehen.

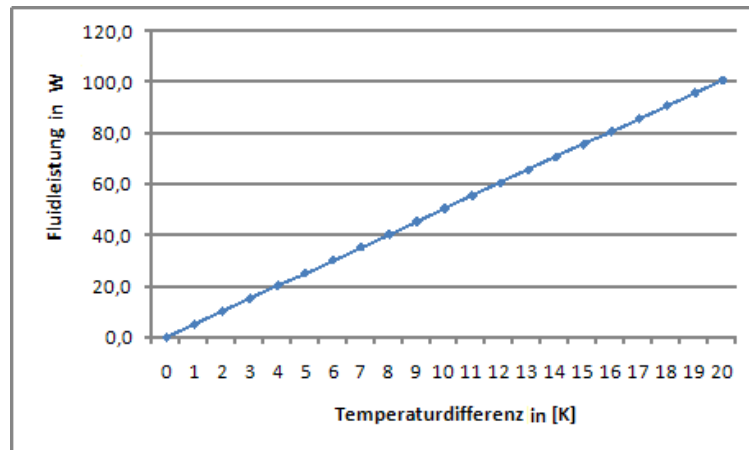


Bild 7.28: Leistung des Kühlwassers

Für die Berechnung des fließenden Wärmestrom durch den TEG wird festgelegt, dass der Temperaturabfall am Wärmetauscher an der Luftseite 20 K und an der Wasserseite 10K betragen darf. Daraus ergibt sich aus der durchschnittlichen Umwelttemperatur in Deutschland von 8°C ein T_{kalt} von 28°C (301,15K) und der maximalen Kühlwassertemperatur von 100°C ein $T_{heiß}$ von 90°C (363,15K). Aus diesen Randbedingungen wird der TEG Nr. 7 aus der **Tabelle 4.2** ausgewählt. Zur Berechnung der ab- und zuzuführenden Wärme wird eine Temperaturdifferenz von 62K, die direkt am TEG anliegt, verwendet. Daraus errechnet sich nach der **Gl. (4.16)**

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 - \frac{\alpha^2 * T_{heiß} * \Delta T}{R_i + R_a} - \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.16)}$$

mit den TEG- Daten des Modells Nr. 7 aus **Tabelle 4.2** mit folgenden Werten

Tabelle 7.6: Daten des ausgewählten TEG- Modells Nr. 7

Symbol	Beschreibung	Wert
α	Seebeck- Koeffizient des TEG	0,0823 V/K
β_{wl}	Wärmeleitwert des TEG	1,56 W/K
$R_i = R_a$	Innenwiderstand des TEG und Lastwiderstand am TEG	1,67 Ω
A_w	Oberfläche des TEG (B x L = 40mm x 40mm)	0,0016 m ²

ein Wärmestrom von 140,4 W, der durch jedes Element fließt. Für die weiteren Berechnungen im folgenden Abschnitt wird der Wärmestrom mit 140 W pro Element angenommen. Danach wird der abzuführende Wärmestrom nach **Gl. (4.17)** berechnet.

$$\dot{Q}_{ab} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 + \frac{\alpha^2 * T_{kalt} * \Delta T}{R_i + R_a} + \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.17)}$$

Die Rechnung ergibt einen abzuführenden Wärmestrom von 136,5 W. In den weiteren Rechnungen wird dieser mit 137 W angenommen. Die elektrische Leistung des Moduls bei diesen Randdaten liegt nach **Gl. (4.12)**

$$P_{el} = R_a * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 \quad \text{Gl. (4.12)}$$

bei 3,9 W. Um eine verwertbare, elektrische Gesamtleistung zu erhalten, werden 40 Module, in 4 Reihen hintereinander und 10 Module nebeneinander vertikal angeordnet, zusammengeschaltet. Die elektrische Gesamtleistung liegt im Bereich von 156 W, die zuzuführende bei 5,62 kW und die abzuführende Wärmeleistung bei 5,46 kW.

7.1.4 Die Wärmetauscher

Der Wärmetauscher muss, wie im **Abschnitt 7.1.2** erläutert, in der Lage sein, mit einem möglichst geringen Temperaturabfall zwischen dem TEG und der Umgebungsluft den kompletten Wärmestrom abzuführen. Für den Wärmetauscher und die Verbindungsstellen bieten sich in **Tabelle 7.7** aufgeführte Materialien an.

Tabelle 7.7: Kennwerte für Wärmetauscher- Materialien

Material	Dichte [g/cm ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	Schmelztemperatur [°C]	Korrosions- beständigkeit
Kupfer	8,96	398	1083	Schlecht
Aluminium	2,70	238	660	Schlecht
Messing	8,50	116	900	Gut
Edelstahl	7,90	14	1450	Sehr gut
Wärmeleitkleber	-	bis 7,5	bis 260	-
Wärmeleitpaste	-	bis 9,0	bis 1200	-
Aluminium- keramik Al_2O_3	-	30	> 2000	Sehr gut

Da im Fahrzeug großer Wert auf Gewichtsreduktion gelegt wird, um Treibstoff zu sparen, sollte für die Wärmetauscher Aluminium verwendet werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ist akzeptabel im Vergleich zur viel höheren Dichte des Kupfers. Die Schmelztemperatur von 660°C ist ausreichend hoch genug für die Temperaturen im Kühlwasser und an der Umgebungsluft. Die Korrosionsbeständigkeit von Aluminium sollte aber durch geeignete Verfahren, wie Eloxieren, gesteigert werden, um eine ausreichende Haltbarkeit gegen die Umwelteinflüsse und im Kfz vorkommenden Chemikalien zu Gewährleisten. Für die Verbindung der TEG und dem Wärmetauscher wird Wärmeleitkleber vorgeschlagen, da dieser den TEG vor Korrosion schützen kann, sicher mit dem Wärmetauscher verbindet und geringe Unebenheiten ausgleicht.

Eine nach unten geschlossene Ausführung des Luft- Wärmetauschers ist für die Unfallsicherheit und Einsatzsicherheit notwendig. Die Einhaltung der notwendigen Bodenfreiheit, Vermeidung von scharfen Ecken und Kanten zählen ebenfalls dazu. Außerdem dürfen die Luftkanäle des Wärmetauschers nicht verunreinigt werden, weil sonst die Wärmeabgabe an die Luft stark abnimmt. Im **Bild 7.29** ist der Entwurf des Wärmetauscher- Systems für Kühlwasser - Luft dargestellt. Es ist die Ansicht von vorn zu sehen, wo die Kaltluft vom Fahrtwind oder dem eventuell vorhandenen Kühlgebläse einströmt. Das Kühlwasser wird von der Kühlwasserpumpe des Motors durch die Kanäle gepumpt und gibt die Wärme durch die Wand an die TEG ab. Die

dann vom TEG abzuführende Wärme fließt in die Gitterstruktur des Luftwärmetauschers und wird dort an die Luft weitergeleitet.

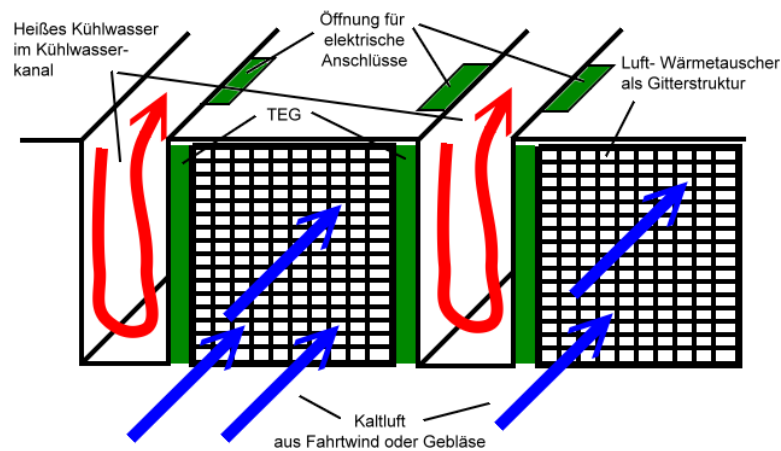


Bild 7.29: Aufbau des Wärmetauschers Kühlwasser - Luft

7.1.5 Berechnung der Wärmetauscher und des Gebläses

Die Übersichtsrechnung zur Dimensionierung des Wärmetauschers soll ein quantitatives Ergebnis in Bezug auf die mögliche Leistungsfähigkeit und konstruktive Auslegung des Systems liefern, um eine Entscheidung für eine der drei Varianten zu treffen. Dabei werden für die Vergleichbarkeit der drei Varianten dieselben Annahmen getroffen. Der Kühlrippenwirkungsgrad und weiterführende, spezielle Berechnungen werden in dieser Übersichtsrechnung nicht betrachtet.

Um diese Entwurfsrechnung durchführen zu können, müssen mehrere Annahmen getroffen werden, um ein verwertbares Ergebnis zu erhalten. Speziell für den Wärmetauscher müssen Temperaturen und Fließgeschwindigkeiten der Fluide variiert und festgelegt werden. Die Daten aus der **Tabelle 7.5** wurden dazu verwendet. Der komplette Berechnungsdurchgang muss eventuell mehrmals durchlaufen werden, für eine optimale Parameterauswahl für die Wärmetauscherfläche, den Aufbau, die Temperaturen und die Strömungsgeschwindigkeit zu erhalten. Hier bietet sich die Verwendung von Excel an, um schnelle Ergebnisse bei der Variation zu erhalten und das Ergebnis Beurteilen zu können. Die Berechnungstabellen sind auf dem Datenträger in der **Anlage 1** zu finden. Zur Berechnung der Wärmetauscherfläche werden deshalb schon vorher abgeschätzte Werte aus diesen Berechnungen verwendet.

Wasser- Wärmetauscher

Die erste Berechnung erfolgt für den Temperaturabfall in der Wärmetauscherwand, dem Wärmeleitkleber, der Keramikplatte und der Kupferverbindung im TEG. Es besteht hier keine Variationsmöglichkeiten der Werte wie bei der Konvektion. Die **Gl. (7.24)** wird dafür verwendet, für die mehrschichtige Wand zu **Gl. (7.25)** erweitert und nach ΔT [K] umgestellt. Für einen geringen Temperaturabfall ΔT sollten die Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmestrom $\dot{Q}_{ww}$ möglichst gering und die Fläche A_w möglichst groß sein. Die in **Tabelle 7.5** aufgeführten Daten wurden zur folgenden Berechnung verwendet.

$$\dot{Q}_{ww} = \frac{\lambda * A_w * \Delta T}{b} \quad \text{Gl. (7.24)}$$

$$\dot{Q}_{ww} = \frac{A_w * \Delta T}{\sum_{n=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i}} \quad \text{Gl. (7.25)}$$

Der Temperaturabfall, verursacht durch die Wandung des Wärmetauschers (3 mm Wandstärke), dem Wärmeleitkleber (0,05 mm Schichtdicke), Keramikplatte (1 mm Wandstärke) und Kupferverbinder (1 mm Wandstärke) im TEG, beträgt laut **Gl. (7.25)** 4,8K. Der Temperaturabfall vom Kühlwasser zur Wandung darf noch 5,2K betragen. Die Gestaltung des Kühlwasser- Wärmetauscher muss dementsprechend erfolgen, um den gesamten Temperaturabfall zum TEG auf 10K zu begrenzen. Zur Berechnung sind weitere Annahmen und Berechnungen notwendig. Großen Einfluss hat die Strömungsgeschwindigkeit im Wärmetauscher. Diese Geschwindigkeit c [m/s] an der überströmten Platte wird nach der **Gl. (7.26)**, vom durchströmten Querschnitt A [m²] des Wärmetauschers, dem einfließenden Massestrom $\dot{m}$ [kg/s] und dessen Dichte ρ [kg/m³] bestimmt.

$$\rho * c * A = \rho * V = \text{const.} \quad \text{Gl. (7.26)}$$

Da bei den geringen Temperaturunterschieden die Dichte des Kühlwassers als konstant angesehen werden kann, ist die Strömungsgeschwindigkeit direkt vom Volumenstrom und der durchströmten Querschnittsfläche abhängig. Der Volumenstrom einer Kühlwasserpumpe beträgt bei hohen Drehzahlen von 6000

U/min des Verbrennungsmotors 300 l/min und mehr. Wenn man von mittleren Motordrehzahlen im Bereich von 1500 - 2000 U/min ausgeht, kann der Volumenstrom mit 75 l/min angenommen werden. Die erforderliche Querschnittsfläche des Wärmetauschers wird aus den Maßen errechnet, die im **Bild 7.30** dargestellt ist.

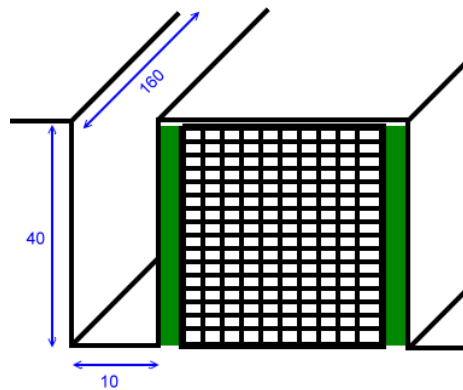


Bild 7.30: Abmessung der Kühlwasserkanäle

Zur Berechnung werden die bereits erwähnten Werte in Si- Einheiten umgerechnet. Die Wasserpumpen- Fördermenge von 75 l/min ergibt pro Sekunde 1,25 l also einen Volumenstrom $\dot{V}$ [m³/s] von 0,00125 m³/s. Die gesamte, durchströmte Querschnittsfläche des Wärmetauschers ergibt sich mit den Werten aus **Bild 7.30** und insgesamt 5 Kanälen.

$$A_q = \text{Kanalanzahl} * H * B = 5 * 40\text{mm} * 10\text{mm} = 2000\text{mm}^2 = 0,0002\text{m}^2$$

Mit dieser durchströmten Querschnittsfläche A_q [m²] und dem Volumenstrom $\dot{V}$ [m³/s] errechnet sich nach der **Gl. (7.26)** die Strömungsgeschwindigkeit im Wärmetauscher. Sie beträgt 6,25 m/s.

$$c = \frac{\dot{V}}{A_q} \quad \text{Gl. (7.26)}$$

Die Berechnung der notwendigen Wärmetauscherfläche im Kühlwasser erfolgt über mehrere Stufen und beinhaltet mehrere Komponenten. Die Gleichung für den konvektiven Wärmeübergang ist in **Gl. (7.27)** dargestellt. Wenn man diese Gleichung nach der Fläche A_w [m²] umstellt, ist diese von der zu erzeugenden

Temperaturdifferenz ΔT [K], dem zu übertragenden Wärmestrom $\dot{Q}_{kw}$ [W] und dem Wärmeübergangskoeffizienten α_k [W/(m²*K)] linear abhängig.

$$\dot{Q}_{kw} = \alpha_k * A_w * \Delta T \quad \text{Gl. (7.27)}$$

Der Wärmestrom ist bekannt und die Temperaturdifferenz wurde festgelegt. In diesem Fall ist der Wärmeübergangskoeffizient α_k variabel. Er errechnet sich aus **Gl. (7.28)** mit der vom Kühlwasser überstrichenen Länge l [m], der Wärmeleitfähigkeit des Fluids λ_w [W/(m*K)] und der dimensionslosen Nusselt- Zahl Nu . Die Wärmeleitfähigkeit ist dabei wieder als konstanter Stoffwert anzusehen. Variabel sind somit die überstrichene Plattenlänge und die Nusselt- Zahl.

$$\alpha_k = Nu * \frac{\lambda_w}{l} \quad \text{Gl. (7.28)}$$

Die Nusselt- Zahl wiederum ist abhängig von der dimensionslosen Reynolds- Zahl Re und der dimensionslosen Prandtl- Zahl Pr . Zu Beachten ist, dass die Berechnung für den laminaren Strömungsbereich für Reynoldszahlen $< 3 * 10^5$ und Prandtl- Zahlen von 0,6 - 50 nach der **Gl. (7.29)** und für den turbulenten Strömungsbereich für Reynoldszahlen $> 3 * 10^5$ und Prandtl- Zahlen von 0,6 - 2000 nach der **Gl. (7.30)** erfolgt.

$$Nu_{lam} = 0,664 * \sqrt{Re} * \sqrt[3]{Pr} \quad \text{Gl. (7.29)}$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 * Re^{0,8} * Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad \text{Gl. (7.30)}$$

Falls durch geometrische Eigenschaften des Wärmetauschers, wie stumpfe Kanten, Turbulenzen zu erwarten sind, überlagern sich beide Gleichungen **Gl. (7.29)** und **Gl. (7.30)** wie folgt zu **Gl. (7.31)**.

$$Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad \text{Gl. (7.31)}$$

Die Prandtl- Zahl ist nur von Stoffwerten bestimmt, welche wiederum von Temperatur und Druck des Fluides abhängig sind. Sie berechnet sich nach **Gl. (7.32)** aus der kinematischen Viskosität ν [m²/s], der Dichte ρ [kg/m³], der isobaren Wärmekapazität c_p [kJ/(kg*K)] und der Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)].

$$Pr = \frac{\nu * \rho * c_p}{\lambda} \quad \text{Gl. (7.32)}$$

Die in **Gl. (7.29)** und **Gl. (7.30)** einzusetzende Reynolds- Zahl errechnet sich nach **Gl. (7.33)** mit der Strömungsgeschwindigkeit c [m/s], der von der Strömung überstrichenen Plattenlänge l [m] und der kinematischen Viskosität ν [m²/s] des Kühlwassers. Variabel sind die vom Kühlwasser überstrichene Länge und die Strömungsgeschwindigkeit.

$$Re = \frac{c * l}{\nu} \quad \text{Gl. (7.33)}$$

Die kinematischen Viskosität ν [m²/s] bestimmt sich aus der **Gl. (7.34)** mit der dynamischen Viskosität η [Pa*s] und der Dichte ρ [kg/m³] des Fluids.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{Gl. (7.34)}$$

Wenn die **Gl. (7.27)** bis **Gl. (7.34)** zur **Gl. (7.35)** zusammensetzt werden, wobei **Gl. (7.31)** verwendet werden, ist zu erkennen, dass folgende Werte variabel sind und durch die konstruktive Auslegung des Wärmetauschers beeinflusst werden können: Die Strömungsgeschwindigkeit c [m/s] des Fluids und die vom Kühlwasser überströmte Länge L [m]. Der Wärmestrom $\dot{Q}_{kw}$ [W] und die zu erzeugende Temperaturdifferenz ΔT [K] werden als vorgegeben angenommen, ebenso die stoffspezifischen Werte.

$$A_w = \frac{\dot{Q}_{kw}}{\sqrt{\left(0,664 * \sqrt{Re} * \sqrt[3]{Pr}\right)^2 + \left(\frac{0,037 * Re^{0,8} * Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}\right)^2} * \frac{\lambda_w}{l} * \Delta T} \quad \text{Gl. (7.35)}$$

Aus den Werten des Kühlwassers der **Tabelle 7.5**, der Strömungsgeschwindigkeit c von 6,25 m/s, der vom Kühlwasser überströmte Länge l von 0,16 m und der zu erreichenden Temperaturdifferenz ΔT von 5,2K errechnet sich eine notwendige Kühlwasser- Wärmetauscherfläche A_w von $0,000717 \text{ m}^2 = 7,17 \text{ cm}^2$. Die Oberfläche eines TEG 16 cm^2 beträgt, wodurch keine Maßnahmen zur Vergrößerung der Wärmetauscherfläche im Kühlwasserkreis notwendig sind. Die ebene Wandung ist für den konvektiven Wärmeübergang ausreichend. Falls die Strömungsgeschwindigkeit und der Temperaturabfall im Wärmetauscher verringert werden sollen, ist ggf. eine Vergrößerung der Kühlfläche nötig.

Luft- Wärmetauscher

Der nächste Schritt ist die Dimensionierung des Luft- Wärmetauschers. Die Vorgehensweise ist dieselbe wie bei der Dimensionierung des Kühlwasser- Wärmetauschers. Aus **Gl. (7.25)** errechnet sich mit gleichen Werten und dem geänderten Wärmestrom der Temperaturabfall in der Wandung, im Wärmeleitkleber und TEG zu 4,7K.

Daraus folgt, dass für den konvektiven Wärmeübergang eine Temperaturdifferenz von 15,3K zur Verfügung steht, um die festgelegten 20K Temperaturdifferenz zu erreichen. Wenn die Wert für Luft aus der **Tabelle 7.5**, die Strömungsgeschwindigkeit c von 15 m/s, der von der Kaltluft überströmte Länge L von 0,16 m und der zu erreichenden Temperaturdifferenz ΔT in die **Gl. (7.35)** eingetragen werden, errechnet sich eine notwendige Luft- Wärmetauscherfläche A_w von $0,107504 \text{ m}^2 = 107504 \text{ mm}^2$.

Grund für diese verhältnismäßig hohen Kühlfläche sind die geringen Werte der Dichte ρ , der spezifischen Wärmekapazität c_p und der Wärmeleitfähigkeit λ der Luft im Vergleich zum Kühlwasser. Da die Grundfläche des TEG nur 1600 mm^2 groß ist, ist eine Vergrößerung der Wärmetauscherfläche durch Verrippung notwendig. Durch die konstruktive Auslegung sind die Höhe von 40 mm und die Tiefe von 40 mm pro TEG vorgegeben, wie im **Bild 7.31** dargestellt.

Der Luft- Wärmetauscher wird als quadratisches Gitter ausgelegt. Für die Berechnung der erforderlichen Wärmetauscherbreite muss der nötige Platz pro

Rippe mit Luft- Zwischenraum ermittelt werden. Diese Rippenbreite RB [mm] wird, aus der Rippenstärke von 1,5 mm und dem Luftspalt von 3 mm, mit 4,5 mm festgelegt. Da die Bauhöhe des TEG 40 mm ist, können 8 Rippen, in der Gleichung durch RA_h dargestellt, in horizontaler Lage angebracht werden. Die Variablen T , H , und X [mm] stellen die Tiefe von 40 mm, die Höhe von 40 mm und die Breite des Wärmetauscher dar. Daraus kann folgende **Gl. (7.36)** für die erforderliche Wärmetauscherfläche A_w [mm²] entwickelt und nach X umgestellt werden:

$$A_w = RA_h * T * X + \frac{X}{RB} * H * T$$

Gl. (7.36)

$$X = \frac{A_w * RB}{(H + RA_h * RB) * T}$$

Mit der errechneten Breite X von 159,1 mm des Wärmetauschers ist danach die Rippenanzahl durch den Quotienten $RB = 4,5$ mm zu errechnen, sinnvoll zu runden und die Endbreite zu bestimmen. In diesem Fall ist die Rippenanzahl 35,36 und wird auf 35 gerundet. Die Gesamtbreite des Wärmetauschers beträgt damit 157,5mm pro TEG. Pro Rippe wurde nur eine Oberflächenseite als Oberfläche zur Berechnung herangezogen. Somit ist der Wärmetauscher für 2 TEG ausreichend, da die tatsächliche Kühlfläche doppelt so groß ist. Für die Abschätzung der Breite des Gesamtsystems wird die Modulbreite aus der Stärke des TEG von 3,2 mm, der Wandung des Kühlwasser- Wärmetauschers von 3 mm, der Kanalbreite von 10 mm und der Breite des Luft- Wärmetauschers mit 490,5 mm ermittelt. Bei Anordnung von 10 Modulen nebeneinander laut **Bild 7.31** erhält man eine Gesamtbreite des Systems von ungefähr 900 mm mit einer Tiefe von 160 mm.

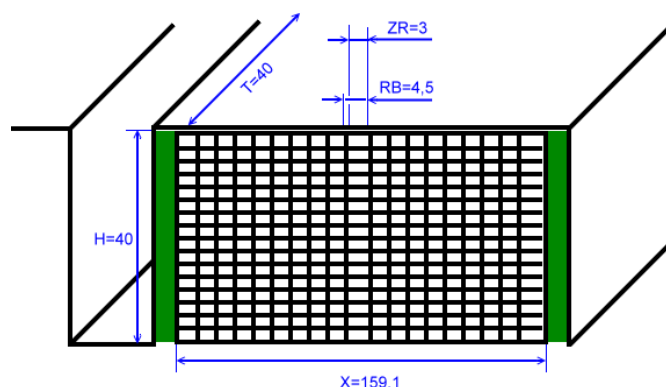


Bild 7.31: Abmessung des Luft- Wärmetauschers

Leistungsberechnung des Gebläses

Für die Ermittlung der notwendigen Gebläseleistung P [W] im Stillstand des Fahrzeuges wird die 2. Bernoulli- Gleichung nach **Gl. (7.37)** verwendet. Der Umgebungs- und statische Druck kann dabei vernachlässigt werden, da hier keine Änderung erwünscht ist. Es muss nur der Zuwachs an kinetischer Energie $\frac{\rho}{2} * c^2$ [Pa] geleistet und die Druckverluste Δp_v [Pa] überwunden werden müssen.

$$\frac{\rho}{2} * c^2 + p + \rho * g * h + / - \frac{P}{\dot{V}} - \Delta p_v = const.$$

ergibt mit den notwendigen Komponenten

$$P = \dot{V} * \left(\frac{\rho}{2} * c^2 + \Delta p_v \right) \quad \text{Gl. (7.37)}$$

Die Druckverluste, zusammengefasst zu Δp_v [Pa] laut **Gl. (7.38)** berechnen sich aus dem Einströmverlust ξ_{ein} mit 0,5, dem Ausströmverlust ξ_{aus} mit 1,0 und der Rohrreibung ξ_{rohr} mit $\xi_{rohr} = \lambda_r * \frac{l}{d}$. [27]

$$\Delta p_v = \frac{\rho}{2} * c^2 * \left(\xi_{ein} + \xi_{aus} + \lambda_r * \frac{l}{d} \right) \quad \text{Gl. (7.38)}$$

Der Wert λ errechnet sich, durch die turbulent, vollkommen raue Strömung

$\left(Re = \frac{c*d}{\nu} > 10^5 \text{ und } \frac{k}{d} = 0,016 \right)$ nach der **Gl. (7.39)**.

$$\lambda_r = \frac{1}{\left(1,74 - 2 * \log \left(\frac{2 * k}{d} \right) \right)^2} \quad \text{Gl. (7.39)}$$

Die Rauigkeit k wird mit $6,3 \mu m = 6,3 * 10^{-6} m$ für stranggepresstes Aluminium angenommen. Um den Ersatzdurchmesser zu errechnen, da der benetzte Quadratumfang dem Kreisumfang entsprechen muss, werden die Kreisfläche $U_k = \pi * d$ und der quadratische Umfangsfläche $U_q = 4 * ZR$ gleichgesetzt. Nach der Umstellung nach dem Durchmesser erhält man $d = \frac{4 * ZR}{\pi}$ und setzt dieses in **Gl. (7.39)** ein. Die **Gl. (7.39)** und **Gl. (7.38)** werden in die **Gl. (7.37)** eingesetzt, $\dot{V}$ durch $\dot{V} = A_q * c$ ersetzt, was die **Gl. (7.40)** ergibt. Die Querschnittsfläche A_q [m²] errechnet

sich aus den Luft- Zwischenräumen der Rippen mit $ZR = 3 \text{ mm}$ zu 9 mm^2 . Die Geschwindigkeit c wird mit der festgelegten Fahrtgeschwindigkeit von 15 m/s angenommen.

$$P_{el} = 2 * A_q * \rho * c^3 * \left(\xi_{ein} + \xi_{aus} + \frac{l * \pi}{\left(1,74 - 2 * \log \left(\frac{2 * k * \pi}{4 * ZR} \right) \right)^2 * 4 * ZR} \right) \quad \text{Gl. (7.40)}$$

Die Gleichung liefert eine notwendige Leistung von $0,434 \text{ W}$ pro Luftkanal. Das System besteht aus insgesamt 5 Wärmetauschern mit jeweils mit 8×33 Kanälen. Es ist somit eine Gesamtleistung des Lüfters von rund 573 W nötig, um die festgelegte Luftgeschwindigkeit zu erreichen. Im **Bild 7.32** ist der Verlauf der vom kompletten TEG- System abgegebene Leistung und der vom Gebläse aufgenommen Leistung über der Luftgeschwindigkeit am Wärmetauscher dargestellt. Mit sinkender Luftgeschwindigkeit am Wärmetauscher sinken die abgeführte Wärme durch Konvektion und damit auch die am TEG herrschende Temperaturdifferenz. Es kommt zum bereits erwähnten Wärmestau. Die Thermospannung ist direkt von der Temperaturdifferenz abhängig. Mit ihr sinkt auch die elektrische Leistung des Systems. Wie man im **Bild 7.32** erkennen kann, übersteigt die vom Gebläse aufgenommene Leistung die abgegebene Leistung des TEG- Systems ab etwa $6,5 \text{ m/s}$ erzeugter Strömungsgeschwindigkeit. Darunter kann ein geringer Überschuss an elektrischer Leistung durch eine aktive Kühlung erreicht werden. Weil diese Ausbeute relativ gering ist, muss hinterfragt werden, ob der Aufwand der elektrischen Steuerung, der Gebläseinstallation und damit dem Massezuwachs diesen Ertrag rechtfertigt. Es wird von diesem Standpunkt aus die Verwendung eines Gebläses nicht empfohlen.

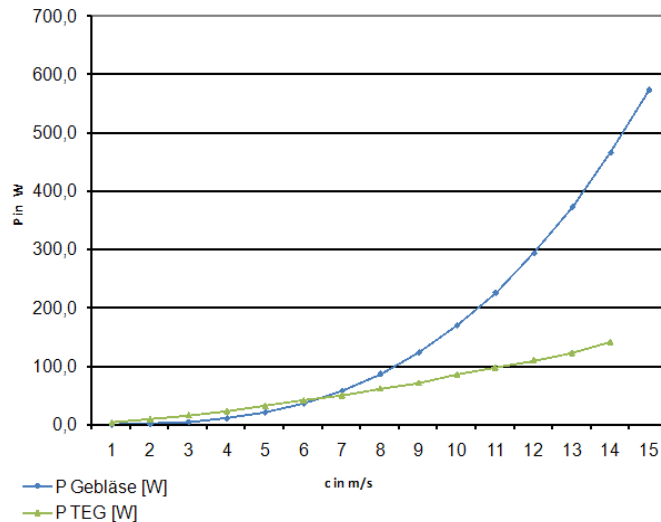


Bild 7.32: Verlauf Leistung TEG und Gebläse

7.2 Abgas - Luft

7.2.1 Konzeption

Diese Konfiguration nutzt die Abwärme des Motors aus dem Abgas. Dieser Anteil ist laut dem Sankey- Diagramm im **Bild 5.17** etwa 37% des Treibstoff- Brennwertes. Die nötige Temperaturdifferenz zwischen dem Abgas und der Umgebungsluft ist ausreichend, um TEG mit einem ΔT von 200 K einzusetzen und damit bessere Wirkungsgrade und höhere Leistungen zu erreichen.

Aufbau

Der systematische Aufbau ist im **Bild 7.33** dargestellt. Die Wärme des Abgases sollte erst nach dem Katalysator genutzt werden, um ein schnelles Erreichen der Light- Off- Temperatur (siehe **Abschnitt 5.2**) zu gewährleisten. Der Wärmetauscher 1 wird mittels eines Bypasses in den Abgasstrang integriert. Durch die Abgasstrom- Regelklappe kann die Abgasdurchflussmenge und somit die Temperatur am Wärmetauscher beeinflusst werden, um ein Überschreiten der maximal zulässigen Temperatur des TEG zu verhindern. Der Wärmetauscher 2 ist ebenso konzeptioniert wie der der Variante Kühlwasser- Luft. Durch den Wärmeentzug kann das gekühlte Abgas nach Bedarf durch die Abgasrückführung- Regelklappe dem Motor erneut zugeführt werden.

Zu Prüfen ist, ob die elektrische Leistung der TEG die benötigte Leistung des Gebläses im Fall der aktiven Kühlung übertrifft, da sonst ein Einsatz des Gebläses nicht sinnvoll ist. Außerdem sind, wie bei der Variante Kühlwasser- Luft die Wärmetauscher zu dimensionieren, um abschätzen zu können, ob der Einsatz bauraumbedingt und technisch möglich ist.

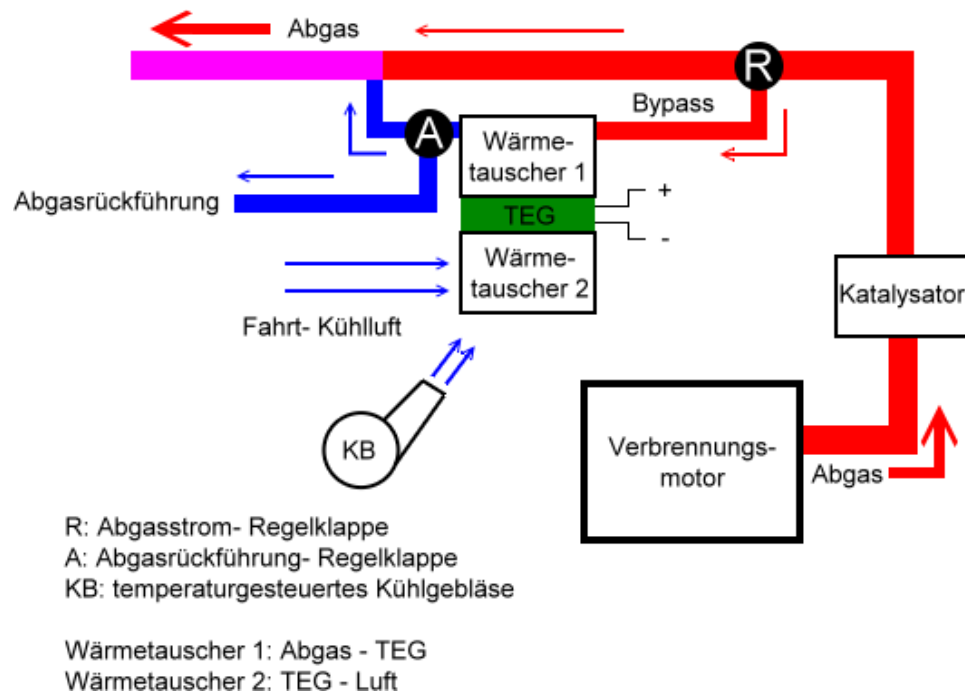


Bild 7.33: Aufbau des Systems Abgas - Luft

Positionierung im Fahrzeug

Die Positionierung dieses Systems ist an den Abgasstrang gebunden, da dieser nicht beliebig im Fahrzeug verbaut werden kann und wird. Der Bauraum ist im Mitteltunnel des Fahrzeuges sehr begrenzt, weil dieser direkt den Innenraum der Fahrgastzelle einschränkt und deshalb so klein wie möglich ausgeführt werden soll. Ausnahmen bilden Fahrzeuge mit Sandwichboden- Bauweise. Speziell die Position und Größe der Luft- Wärmetauscher und des Bypass- Systems kann zu Platzproblemen führen. Für diese Problematik sollte nach der Dimensionierung und Auswahl des Systems eine Bauraumanalyse durchgeführt werden. Grundsätzlich sollten die TEG rund um das Bypass- Abgasrohr angebracht werden, um mit geringem Bauraumraumbedarf möglichst viele Module mit Wärmetauscher platzieren zu können.

7.2.2 Umgebungsbedingungen und Temperaturen

Die Leistungsfähigkeit dieses Systems ist, ebenso wie das System Kühlwasser - Luft, von der Umgebungstemperatur abhängig. Von Vorteil ist, dass die Abgastemperaturen in höheren Bereichen sind. Die mittlere Abgastemperatur im NEFZ, die durch die Messung ermittelt wurde, betrug 282°C. Selbst bei hohen Außentemperaturen von 30°C ist die Temperaturdifferenz noch in Bereichen von über 200K und damit hoch genug für gute Wirkungsgrade und elektrische Leistungen. Für die Berechnung und Dimensionierung wird, wegen der höheren Arbeitstemperatur und Leistung, der TEG Nr. 12 aus **Tabelle 4.2** eingesetzt. Das Datenblatt ist in der **Anlage 7** zu finden. Der Verlauf der Leistung und des Wirkungsgrades bei steigender Umgebungstemperatur ist im **Bild 7.34** dargestellt. Als obere Maximaltemperatur für die Wirkungsgrad- und Leistungsberechnung wurde 250°C durch das Abgas und 28°C am TEG durch die Umgebung anliegend, angenommen. Es werden Wirkungsgrade um 9% und Leistungen um 50W pro TEG erreicht. Diese Werte liegen beträchtlich über denen der Konfiguration Kühlwasser - Luft.

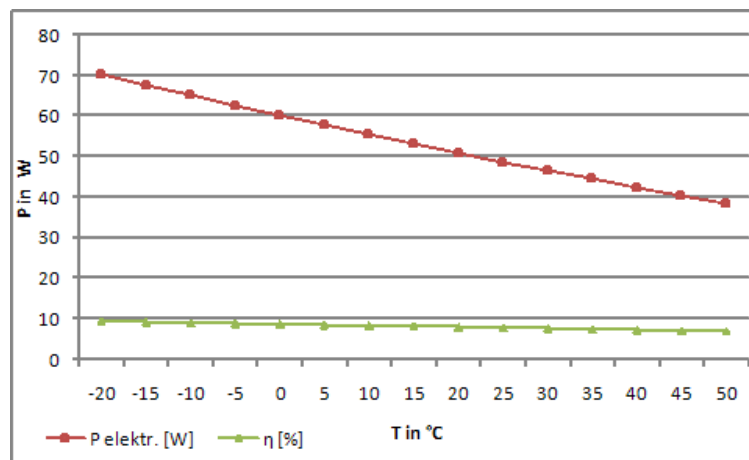


Bild 7.34: Einfluss der Umwelttemperatur auf Wirkungsgrad und Leistung

7.2.3 Wärmestrom am Generator

Dieses System kann durch die erfolgte Abgastemperaturmessung daraufhin überprüft werden, ob die dem TEG zuzuführende Leistung im Abgas zur Verfügung steht. Es wird die Berechnung laut **Gl. (5.23)** mit den Daten aus **Tabelle 7.8** durchgeführt.

Tabelle 7.8: Berechnungsdaten Abgas - Luft [26], [29]

Symbol	Beschreibung	Wert
λ_{Al}	Wärmeleitfähigkeit Aluminium	238 W/(m*K)
$\lambda_{keramik}$	Wärmeleitfähigkeit Aluminiumoxid- Keramik	30 W/(m*K)
λ_{Cu}	Wärmeleitfähigkeit Kupfer	398 W/(m*K)
λ_{wlk}	Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitkleber	7,5 W/(m*K)
b_t	Wandstärke des Wärmetauschers	0,003 m
b_k	Wandstärke der Keramikplatte der TEG	0,001 m
b_{wlk}	Stärke der Wärmeleitkleberschicht	0,00005 m
l	Überstrichene Plattenlänge	0,16 m
c_{p-a}	Wärmekapazität Abgas bei 300°C	1,143 kJ/(Kg*K)
c_{p-l}	Wärmekapazität Luft bei 8°C	1,0066 kJ/(Kg*K)
η_a	Dynamische Viskosität Abgas bei 300°C	0,00002747 Pa*s
η_l	Dynamische Viskosität Luft bei 8°C	0,00001764 Pa*s
ρ_a	Dichte Abgas bei 300°C	0,6270 kg/m ³
ρ_l	Dichte Luft bei 8°C	1,24076 kg/m ³
λ_a	Wärmeleitfähigkeit Abgas bei 300°	0,04171 W/(m*K)
λ_l	Wärmeleitfähigkeit Luft bei 8°	0,02478 W/(m*K)
c	Fahrgeschwindigkeit PKW	54 km/h = 15 m/s
$\dot{V}$	Volumenstrom des Abgases	0,042 m ³ /s

Der durchschnittliche Abgasvolumenstrom im NEFZ beträgt etwa 9,5 l/s, der einen Maximalwert von 42 l/s erreicht. Im Durchschnittsfall stehen laut der **Gl. (5.23)** bei einem Temperaturgefälle von 192K rund 1,3kW und im Maximalfall rund 5,8kW zur Verfügung. Das Potenzial des Abgases kann bei diesem TEG durch die Temperaturbegrenzung nicht voll ausgenutzt werden. Module mit Temperaturbeständigkeit bis zur Maximaltemperatur von ca. 1000°C können die

Effizienz enorm erhöhen. Bei einer Temperaturdifferenz von 700K wären minimal 4,8kW und maximal über 21kW aus dem Abgas entnehmbar.

$$\dot{Q} = \dot{V} * \rho * c_p * (T_2 - T_1) \quad \text{Gl. (5.23)}$$

Die Dimensionierung der Anlage gestaltet sich insofern schwierig, ob die Anlage auf diese Maximalwerte oder Mittelwerte ausgelegt werden soll. Außerdem hat der angenommene Temperaturabfall von 192K am Wärmetauscher zur Folge, dass den in nachfolgender Reihe angeordneten TEG eine geringere Abgastemperatur und Leistung zur Verfügung steht. Somit fällt dessen elektrische Leistung geringer aus. Es sollte durch eine spezielle Abgaszuführung dieser Effekt unterbunden werden und damit für eine gleiche Leistung an allen Wärmetauschern gesorgt werden. In der nachfolgenden Dimensionierung wird der Abgasvolumenstrom für den Maximalfall angenommen, der von der CVS- Anlage mit 0,042 m³/s (42 l/s) ermittelt wurde.

Die Werte für c_p , λ , und η des Abgases werden nach der **Gl. (5.22)** mit den Daten der **Tabelle 7.9** berechnet.

$$c_{p_{abgas}} = \sum_{i=1} \frac{m_i}{m_{abgas}} * c_{p_i} \quad \text{Gl. (5.22)}$$

Für diese Berechnung wird noch die Masseverteilung des Abgases benötigt. Ein Benzinabgas ist wie folgt zusammengesetzt: $N_2 \approx 73\%$, $CO_2 \approx 18\%$, $H_2O \approx 8,5\%$. Es sind außerdem noch Spuren von HC , CO , O_2 und Edelgasen enthalten, können aber hierfür vernachlässigt werden. Die Werte der Abgasbestandteile wurden für 300°C aus dem Wärmeatlas entnommen, da diese der Abgastemperatur am Wärmetauscher am nächsten liegt.

Tabelle 7.9: Stoffwerte des Abgases [28]

Stoff bei 300°C	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleit- fähigkeit λ [W/(m*K)]	Wärmekapazität c_p [kJ/(kg*K)]	dynamische Viskosität η [Pa*s]	Massever- teilung [%]
N_2	0,5876	0,04247	1,070	0,00002862	73
CO_2	0,9238	0,03947	1,061	0,00002696	18
H_2O	0,3790	0,04243	2,012	0,00002029	8,5
Gesamt	0,6274	0,04171	1,143	0,00002747	99,5

Für die Berechnung des durch den TEG fließenden Wärmestroms wird angenommen, dass der Temperaturabfall am Wärmetauscher an der Abgas- und Luftseite 30K betragen darf. Es ergibt sich aus der durchschnittlichen Umwelttemperatur in Deutschland von 8°C ein T_{kalt} von 38°C (311,15K). Die durchschnittlichen Abgastemperatur von 282°C und die Maximalwerte von 480°C sind für den TEG zu hoch, weshalb die Maximaltemperatur bei 250°C am TEG und 260°C am Wärmeleitkleber durch das bereits genannte Bypass- System begrenzt werden muss. Diese Temperatur $T_{heiß}$ beträgt also abzüglich des Temperaturabfalls in der Wandung und Kleber 230°C (503,15K). Die Temperaturdifferenz beträgt noch 192K. Aus diesen Randbedingung errechnet sich nach der **Gl. (4.16)**

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha_s * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 - \frac{\alpha_s^2 * T_{heiß} * \Delta T}{R_i + R_a} - \lambda_{lw-TEG} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.16)}$$

mit den TEG- Daten des Modells Nr. 12 aus **Tabelle 4.2** mit folgenden Werten:

Tabelle 7.10: Daten des ausgewählten TEG- Modells Nr. 12

Symbol	Beschreibung	Wert
α	Seebeck- Koeffizient des TEG	0,052 V/K
β_{wl}	Wärmeleitwert des TEG	1,9 W/K
$R_i = R_a$	Innenwiderstand des TEG und Lastwiderstand am TEG	0,7 Ω
A_w	Oberfläche des TEG (B x L = 50mm x 50mm)	0,0025 m ²

ein Wärmestrom von 533,6W, der durch jedes Element fließt. Für die weiteren Berechnungen im folgenden Abschnitt wird der Wärmestrom mit 534W pro Element angenommen. Es wird der abzuführende Wärmestrom nach **Gl. (4.17)** berechnet.

$$\dot{Q}_{ab} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 + \frac{\alpha^2 * T_{kalt} * \Delta T}{R_i + R_a} + \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.17)}$$

Die Rechnung ergibt einen abzuführenden Wärmestrom von 498W. Die elektrische Leistung des Moduls bei diesen Randdaten liegt nach **Gl. (4.12)**

$$P_{el} = R_a * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 \quad \text{Gl. (4.12)}$$

bei 35,6W. Für eine verwertbare elektrische Gesamtleistung werden 12 Module, in 3 Reihen hintereinander und an 4 Seiten des Bypass- Rohres angeordnet, zusammengeschalten. Die elektrische Gesamtleistung beträgt rund 427,2W, die zuzuführende Wärmeleistung rund 6,4kW und die Abzuführende rund 6kW.

7.2.4 Die Wärmetauscher

Der Abgaswärmetauscher im Inneren des Vierkant- Bypassrohr soll als quadratische Gitterstruktur ausgeführt werden, um durch die große Oberfläche einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten. Das Vierkant- Bypassrohr kann aus Aluminium als Strangpressteil hergestellt werden, was unbedingt gegen Korrosion zu schützen ist. Die äußeren Anlageflächen für die TEG sind für ein ebenes Anliegen durch geeignete Verfahren nach den in **Abschnitt 4.5** genannten Vorgaben zu gestalten. Die prinzipielle Konstruktion des Wärmetauschers ist im **Bild 7.35** zu sehen. Es ist die Ansicht von vorn dargestellt, wo Kaltluft vom Fahrtwind oder dem eventuell vorhandenen Kühlgebläse einströmt. Bei Bedarf können die freien Zwischenräume an den Ecken des Bypass- Rohres für den Wärmetauscher durch abgewinkelte Flächen genutzt werden. Maßgebend dafür ist die benötigte Kühlfläche. Diese wird wie im **Abschnitt 7.1.4** ermittelt. Das Abgas gibt die Wärme durch die Wand an die TEG ab. Die dann vom TEG abzuführende Wärme geht in die Struktur des Luftwärmetauschers über und wird dort an die Umgebungsluft abgegeben. Das

System sollte, wie auch das System Kühlwasser- Luft, nach unten durch ein Schutzblech geschlossen sein, um mechanische Beschädigungen, Verschmutzung oder Verletzungen bei Unfällen zu vermeiden. Die Luftzuführung und Abführung kann durch Öffnungen in der Unterbodenverkleidung vor und nach dem TEG erfolgen.

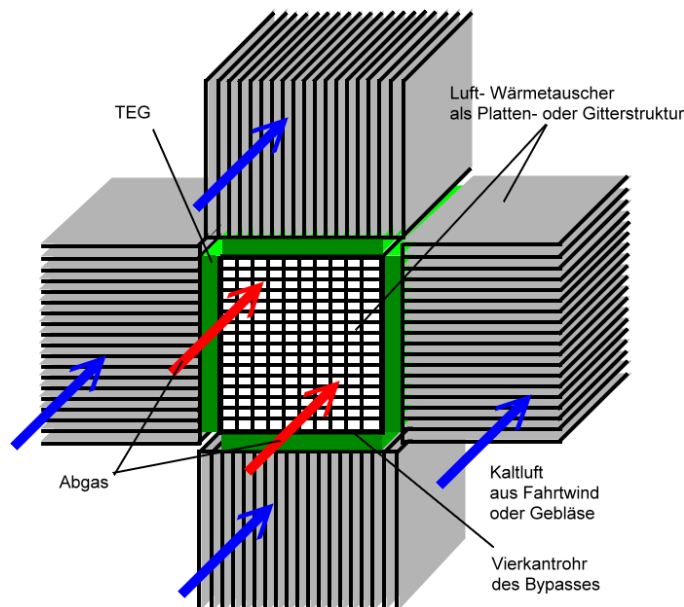


Bild 7.35: Aufbau des Wärmetauscher Abgas - Luft

7.2.5 Berechnung der Wärmetauscher und des Gebläses

Für die Durchführung diese Entwurfsrechnung müssen mehrere Annahmen getroffen werden. Speziell für den Wärmetauscher müssen Randbedingungen und Eigenschaften der Fluide aus der Literatur entnommen, Temperaturen und Fließgeschwindigkeiten der Fluide variiert werden. Es bietet sich wieder die Berechnung mit Excel an. Die in **Tabelle 7.8** aufgeführte Daten wurden dabei verwendet.

Abgas- Wärmetauscher

Zuerst wird der Temperaturabfall in der Wärmetauscherwand, dem Wärmeleitkleber, der Keramikplatte und Kupferverbinder des TEG nach **Gl. (7.25)** berechnet.

$$\dot{Q}_{ww} = \frac{A_w * \Delta T}{\sum_{n=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i}} \quad \text{Gl. (7.25)}$$

Die Gleichung liefert einen Temperaturabfall von 11,7K. Diese relativ hohe Temperaturdifferenz wird durch den hohen Wärmestrom von 534W und der verhältnismäßig kleinen Oberfläche des TEG verursacht. Der Abgaswärmetauscher muss entsprechend gestaltet werden, um den gesamten Temperaturabfall zum TEG auf 30K zu begrenzen. Es darf der Temperaturabfall vom Abgas zum Wärmetauscher noch 18,3K betragen. Die Dichte des Abgases wird sich durch die Abkühlung am Wärmetauscher erhöhen. Als Folge wird sich die Strömungsgeschwindigkeit des Abgases verringern. In diese Berechnung wird die Dichte jedoch als konstant angenommen. Bei Auslegung des Abgaswärmetauschers sind folgende Faktoren als variabel anzusehen und sollten mit Excel miteinander variiert werden, um ein gutes Ergebnis zu erhalten: Die Wärmetauscherfläche und der durchströmte Querschnitt, der durch den festgelegten Volumenstrom die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Im **Bild 7.36** ist die benötigte Wärmetauscherfläche in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Für die Berechnung wurde die **Gl. (7.35)** verwendet. Wie man erkennen kann, steigt die benötigte Fläche quadratisch an, wenn die Strömungsgeschwindigkeit linear sinkt.

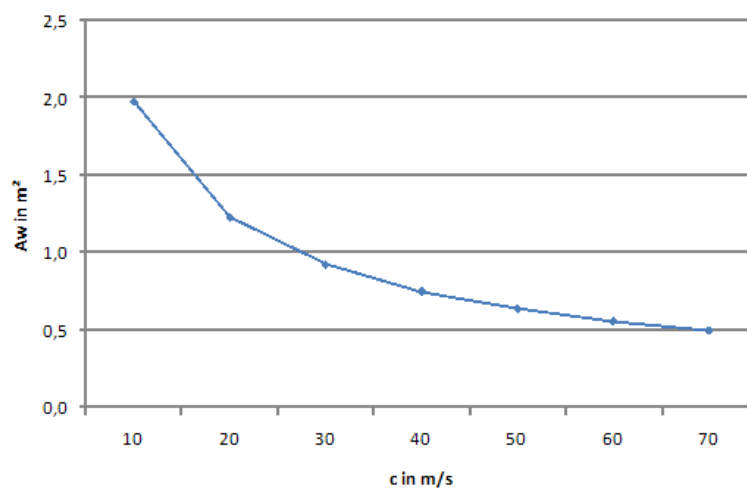


Bild 7.36: Verlauf der übertragbaren Leistung

In diesem Fall wird die Strömungsgeschwindigkeit im Wärmetauscher mit 27 m/s festgelegt. Nach **Gl. (7.35)** errechnet sich aus der zu übertragenden Leistung von $4 \times 534\text{W} = 2136\text{W}$ eine notwendige Wärmetauscherfläche von $1,1909\text{m}^2$.

$$A_w = \frac{\dot{Q}_{kw} * l}{\sqrt{\left(0,664 * \sqrt{\frac{c * L * \rho}{\eta}} * \sqrt[3]{\frac{\nu * \rho * c_p}{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{0,037 * \left(\frac{c * L * \rho}{\eta}\right)^{0,8} * \frac{\nu * \rho * c_p}{\lambda}}{1 + \frac{2,443}{\left(\frac{c * L * \rho}{\eta}\right)^{0,1} * \left(\left(\frac{\nu * \rho * c_p}{\lambda}\right)^{\frac{2}{3}} - 1\right)}}\right)^2} * \lambda_w * \Delta T} \quad \text{Gl. (7.35)}$$

Für das Erreichen der festgelegten Strömungsgeschwindigkeit von 27 m/s ist nach **Gl. (7.26)**, umgestellt nach A, eine durchströmte Querschnittsfläche von 0,001556 m² notwendig.

$$\rho * c * A = \rho * V = const. \quad \text{Gl. (7.26)}$$

$$A_q = \frac{\dot{V}}{c}$$

Der Abgaswärmetauscher wird als quadratisches Gitter ausgelegt. Die Ermittlung der notwendigen Wärmetauscherabmessungen kann nach der Berechnung der benötigten Kanalanzahl erfolgen. Es wird, resultierend aus der Rippenstärke von 1 mm und dem Luftspalt von 1 mm, die Rippenbreite mit RB mit 2 mm festgelegt. Wenn ein solcher Wärmetauscherkanal eine Länge von 50 mm hat, was sich aus der Abmessung des TEG ergibt, dann beinhaltet dieser eine Oberfläche von 4 x 1 mm x 50 mm = 200 mm². Das **Bild 7.37** zeigt den Aufbau eines dieser Kanäle.

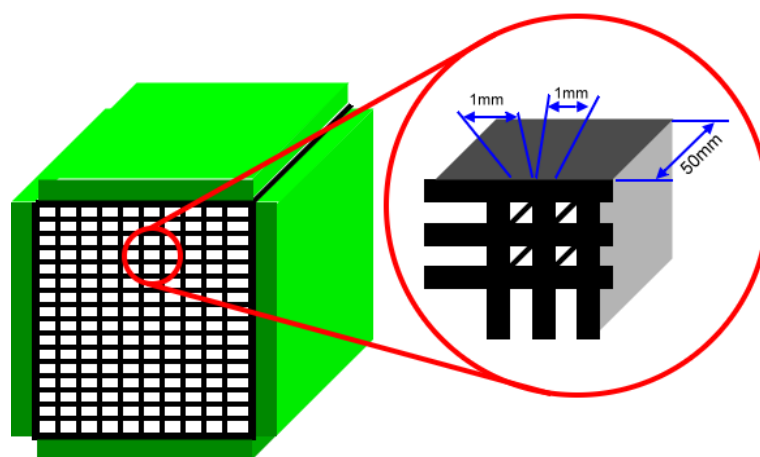


Bild 7.37: Wärmetauscherkanäle

Man erhält durch Diffusion der notwendigen Wärmetauscheroberfläche mit 200 mm² eine notwendige Kanalanzahl von 5956. Nach dem Ziehen der Wurzel und Rundung erhält man einen Wärmetauscher mit 77 x 77 = 5929 Kanälen, was bei einer

Rippenbreite $RB = 2$ mm eine Gesamtabmessung von 154 mm x 154 mm bedeutet. Diese Bauraumbedingungen sollten am Fahrzeugboden im Mitteltunnel erfüllbar sein.

Die durchströmte Fläche von 5929 mm² ist um ein Vielfaches größer, als die geforderten 1556 mm². Deswegen beträgt die Strömungsgeschwindigkeit noch 7,1 m/s, wobei noch 860W durch erzwungene Konvektion übertragen werden können. Wie aus dieser Rechnung hervorgeht, beeinflussen sich die benötigte Wärmetauscheroberfläche und der durchströmte Querschnitt, durch die resultierende Strömungsgeschwindigkeit im Abgas, gegenseitig. Für die Verringerung der durchströmten Fläche, wobei die Wärmetauscherfläche beizubehalten ist, sind Kanäle mit kleineren Abmessungen notwendig. Das führt aber unweigerlich zu produktionstechnischen Problemen und Kostenanstieg. An dieser Stelle soll nur eine überschlägige Berechnung durchgeführt werden und kann deshalb als Richtmaße verwendet werden. Es wird außerdem festgehalten, dass die Dimensionierung und Gestaltung des Abgaswärmetauschers eine tiefergehende Untersuchung und Berechnung sowie Betrachtung der Produktionsmöglichkeiten erfordert.

Luft- Wärmetauscher

Die Vorgehensweise der Dimensionierung ist dieselbe wie beim System Kühlwasser - Luft im **Abschnitt 7.1.4**. Aus der **Gl. (7.25)** errechnet sich der Temperaturabfall in der Wandung und Wärmeleitkleber zu 10,5K.

$$\dot{Q}_{ww} = \frac{A_w * \Delta T}{\sum_{n=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i}} \quad \text{Gl. (7.25)}$$

Daraus folgt, dass für den konvektiven Wärmeübergang eine Temperaturdifferenz von 19,5K zur Verfügung steht, um die festgelegten 30K Temperaturdifferenz zu erreichen. Wenn man die Wert für Luft aus der **Tabelle 7.8**, die Strömungsgeschwindigkeit c von 15 m/s, der von der Kaltluft überströmte Länge L von 0,15 m und der zu erreichenden Temperaturdifferenz ΔT von rund 20 K in die **Gl. (7.35)** einträgt, erhält man eine notwendige Luftwärmetauscherfläche A_w von 0,30081 m² = 300810 mm².

Grund für diese verhältnismäßig hohe Kühlfläche sind wieder die stoffspezifisch geringen Werte der Luft und die sehr große, abzuführende Wärmeleistung. Da die Grundfläche des TEG 25 cm² beträgt, ist hier eine Vergrößerung der Wärmetauscherfläche durch Rippen unbedingt notwendig.

Die Abmessungen des TEG sind mit der maximalen Höhe von 55 mm und die Tiefe von 50 mm pro Kühlkörper vorgegeben, wie im **Bild 7.38** dargestellt. Außerdem ist es möglich, die Kühlflächen am oberen und unteren Ende bis zu 40° abzuwinkeln, um die Zwischenräume für weitere Kühlrippen auszunutzen. Es werden zusätzlich vertikale Kühlflächen eingesetzt, um die Wärmetauscherfläche weiter zu erhöhen.

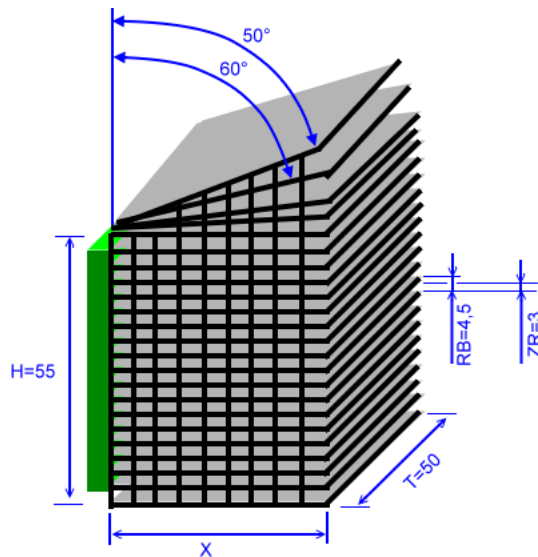


Bild 7.38: Abmessung des Luft- Wärmetauschers

Um die erforderliche Wärmetauscherbreite zu errechnen, wird der benötigte Platz pro Rippe mit Luft- Zwischenraum benötigt. Diese Rippenbreite RB [mm] wird aus der Rippenstärke von 1,5 mm und dem Luftspalt von 3 mm zu 4,5 mm festgelegt. Die abgewinkelten Rippen werden in einem 10° - Winkel voneinander angebracht. Es können an jedem Wärmetauscher 8 zusätzliche Rippen zu den vorhandenen 12 Rippen angebracht werden. Man erhält eine Rippenanzahl RA_h von 20. Die vertikalen Rippen sollen ein quadratisches Gitter erzeugen. Für die Berechnung der Breite kann die **Gl. (7.36)** verwendet werden. Es muss, da nur ein TEG am Wärmetauscher angeschlossen ist, die errechnete Fläche verdoppelt werden (jede Rippe hat durch 2 Oberflächenseiten die doppelte Fläche).

$$X = \frac{A_w * RB}{(H + RA_h * RB) * T * 2} \quad \text{Gl. (7.36)}$$

Mit der errechneten Breite X des Wärmetauschers von 93,4 mm ist die Rippenanzahl zu überprüfen, sinnvoll zu runden und die Endbreite zu bestimmen. In diesem Fall ist die Rippenanzahl 20,7 und wird auf 21 gerundet. Durch die Anordnung der TEG rund um das Abgasrohr ergibt sich ein Bauraum von 350 x 350 mm für den Luftwärmetauscher, TEG und Abgaswärmetauscher. Dieser Bauraum ist in einem Mitteltunnel nicht vorhanden. Um die Luft- und Abgaswärmetauscher hier unterbringen zu können, sind ausgereifte Konzepte erforderlich. Man könnte zum Beispiel die Wärmetauscher in ihrer Länge erweitern, um eine geringere Gesamtbreite bei gleicher oder größerer Fläche zu erhalten. Eventuell kann auch die Karosserie um den Mitteltunnel als Wärmetauscher für diese Zwecke mit genutzt werden, wobei die Anbindung des freischwingenden Abgassystems an die Karosserie ebenfalls neue Herausforderungen bietet.

Leistungsberechnung des Gebläses

Für die notwendige Gebläseleistung P [W] im Stillstand des Fahrzeuges wird analog dem **Abschnitt 7.1.5** mit den gleichen Werten vorgegangen. Es unterscheidet sich nur die Kanalanzahl des Wärmetauschers mit 18 x 21 Kanälen.

$$P_{el} = 2 * A_q * \rho * c^3 * \left(\xi_{ein} + \xi_{aus} + \frac{l * \pi}{\left(1,74 - 2 * \log \left(\frac{2 * k * \pi}{4 * ZR} \right) \right)^2 * 4 * ZR} \right) \quad \text{Gl. (7.40)}$$

Man erhält eine notwendige Leistung von 0,434 W pro Luftkanal. Das System, welches aus insgesamt 12 Wärmetauschern mit jeweils mit 22 x 21 Kanälen besteht, benötigt eine Gesamtleistung des Lüfters von rund 200 W, um die festgelegte Strömungsgeschwindigkeit zu erreichen. Die Leistung des Systems beträgt im Durchschnitt ca. 450 W, weshalb die Verwendung eines Gebläses bei geringerer Fahrgeschwindigkeit sinnvoll sein kann. Bei geringeren Fahrgeschwindigkeiten treten jedoch auch geringere Abgastemperaturen und Abgasvolumenströme auf. Das System sollte in diesem Fahrzustand näher untersucht werden. Von diesem

Standpunkt aus kann aber die Verwendung eines Gebläses vorerst empfohlen werden.

7.3 Abgas - Kühlwasser

7.3.1 Konzeption

Die Konfiguration Abgas - Kühlwasser nutzt ebenfalls die Abwärme des Motors aus dem Abgas. Eine ausreichende Temperaturdifferenz kann auch hier erreicht werden.

Aufbau

Der systematische Aufbau ist im **Bild 7.39** dargestellt und prinzipiell, bis auf den Wärmetauscher 2, gleich der Variante Abgas - Luft. Der Wärmetauscher 1 ist ebenfalls mittels eines Bypasses in den Abgasstrang integriert. Der Abgas-Durchfluss kann dabei, ebenso wie die Abgasentnahme für die Abgasrückführung, über eine Klappe oder Ventil geregelt werden. Damit kann die Temperatur am TEG und die Abgasrückführung beeinflusst werden. Der Wärmetauscher 2 ist in den inneren Kühlwasserkreislauf des Motors integriert. Vorteil dieser Anordnung ist, dass im Kaltstartbetrieb die Wärme des Abgases vom Wärmetauscher 1 über den TEG und Wärmetauscher 2 in den inneren Kühlwasserkreislauf gelangt. Da das Abgas schneller als das Kühlwasser eine hohe Temperatur erreicht, kann so die Aufheizzeit des Kühlwassers erheblich verkürzt werden. Nachteile ergeben sich in der notwendigen Vergrößerung des Hauptwärmetauschers, da eine erhebliche Wärmeenergie in den Kühlwasserkreislauf eingebracht wird. Mit dieser Variante ist der sichere, gleichmäßige Betrieb auch während Stop and Go- Betriebes gesichert. Der Fahrtwind wird nicht direkt zur Wärmeabfuhr am Wärmetauscher 2 benötigt.

Zu Prüfen ist in diesem Fall, ob die notwendige Vergrößerung des Motorkühlers im möglichen Rahmen liegt oder ein separates Kühlsystem nur für den TEG erforderlich ist.

ersichtlich, dass die Abgastemperaturen im Stand sukzessiv ansteigen und nach 660s, auch im Stand des Fahrzeuges, nicht unter 280°C fallen. Die Erklärung für dieses Verhalten ist, dass nach dieser Zeit das Kühlwasser, der Motor und die Abgasanlage ihre Betriebstemperatur vollständig erreicht haben. Im normalen Fahrbetrieb treten aber, durch zum Beispiel Stand an einer Verkehrsampel, geringe Motorlasten auf. Dadurch fällt die Abgastemperatur und -leistung stark ab.

7.3.3 Wärmestrom

Dieses System ist eine Kombination aus den beiden ersten Varianten. Deshalb können hier die bereits ermittelten Werte und Festlegungen verwendet werden. Der Wärmestrom im Abgas entspricht dem System Abgas - Luft. Die aus dem Abgas entnehmbare Leistung wurde ebenfalls schon ermittelt. Für die Berechnung des durch den TEG fließenden Wärmestromes wird der Temperaturabfall am Wärmetauscher im Abgas mit 30K und im Kühlwasser mit 15K angenommen. Es ergeben sich die zulässige Höchsttemperatur $T_{heiß}$ am Seebeck- Schenkelpaar des TEG von 230°C (503,15K) auf der Abgasseite und ein T_{kalt} von 115°C (388,15) an der Kühlwasserseite. Aus dieser Randbedingung errechnet sich nach der **Gl. (4.16)**

$$\dot{Q}_{zu} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 - \frac{\alpha^2 * T_{heiß} * \Delta T}{R_i + R_a} - \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.16)}$$

mit den TEG- Daten des Modells Nr. 12 aus **Tabelle 4.2** ein Wärmestrom von 323,9 W, der durch jedes Element fließt. Danach wird der abzuführende Wärmestrom nach **Gl. (4.17)** berechnet.

$$\dot{Q}_{ab} = \frac{1}{2} * R_i * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 + \frac{\alpha^2 * T_{kalt} * \Delta T}{R_i + R_a} + \beta_{wl} * \Delta T \quad \text{Gl. (4.17)}$$

Diese Rechnung ergibt eine abzuführende Wärmeleistung von 311,1 W. Die elektrische Leistung des Moduls bei diesen Randdaten liegt nach **Gl. (4.12)**

$$P_{el} = R_a * \left(\frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \right)^2 \quad \text{Gl. (4.12)}$$

bei 12,8 W. Für eine verwertbare, elektrische Gesamtleistung werden 16 Module, in 4 Reihen hintereinander und an allen 4 Seiten des Bypass- Rohres angeordnet. Somit beträgt die elektrische Gesamtleistung ca. 205 W, die zuzuführende Wärmeleistung ca. 5,2 kW und die abzuführend ca. 5 kW. Die Leistung dieses Systems steigt im Kaltstart des Fahrzeuges auf die dreifache elektrische Leistung des Normalbetriebes an, wenn das Abgas eine Temperatur von 260°C erreicht und das Kühlwasser die Temperatur der Umgebung hat. Dieser Fakt ist günstig für den hohen Strombedarf im Kaltstartbetrieb des Fahrzeuges. Mit steigender Kühlwassertemperatur sinkt die Leistung auf o.g. Normalbetriebswerte zurück.

7.3.4 Die Wärmetauscher

Die Wärmetauscher werden bei dieser Variante, wie in den vorangegangenen Systemen ausgelegt. Für den Abgas- Wärmetauscher ist eine Gitterstruktur im Bypass- Rohr empfehlenswert. Die Kühlwasser- Wärmetauscher werden um das Bypassrohr angeordnet und als Gegenstrom- Wärmetauscher ausgeführt. Dabei ist auf eine Teilung der vier Wasserwärmetauscher zu achten, damit das System demontierbar ist und immer ein optimales Anliegen an den TEG gewährleistet wird. Im **Bild 7.40** ist der Entwurf des Wärmetauscher- Systems Abgas - Kühlwasser dargestellt. Das Abgas strömt von vorn in den Wärmetauscher ein und gibt die Wärme an die TEG ab. Kühlwasser wird durch die an den TEG anliegenden Wärmetauscher gepumpt und nimmt die abgegebene Wärme auf.

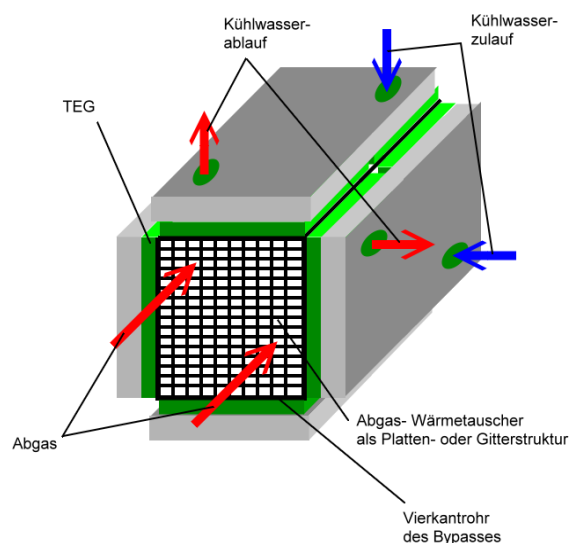


Bild 7.40: Aufbau des Wärmetauschers Abgas - Kühlwasser

7.3.5 Berechnung der Wärmetauscher

Um die Entwurfsrechnung durchführen zu können, müssen wieder Annahmen getroffen werden, um ein Ergebnis zu erhalten. Die Stoffwerte des Abgases werden aus der **Tabelle 7.9** entnommen. Zur Berechnung und Variation der Parameter bietet sich Excel wieder an.

Tabelle 7.11: Berechnungsdaten Kühlwasser - Luft [26]

Symbol	Beschreibung	Wert
λ_{Al}	Wärmeleitfähigkeit Aluminium	238 W/(m*K)
λ_{Cu}	Wärmeleitfähigkeit Kupfer	398 W/(m*K)
$\lambda_{keramik}$	Wärmeleitfähigkeit Aluminiumoxid- Keramik	30 W/(m*K)
λ_{wlk}	Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitkleber	7,5 W/(m*K)
b_t	Wandstärke des Wärmetauschers	0,003 m
b_k	Wandstärke der Keramikplatte des TEG	0,001 m
b_{wlk}	Stärke der Wärmeleitkleberschicht	0,00005 m
L	Überstrichene Plattenlänge	0,2 m
c_{p-w}	Wärmekapazität Wasser bei 100°C	4,2154 kJ/(Kg*K)
c_{p-l}	Wärmekapazität Abgas bei 300°C	1,143 kJ/(Kg*K)
η_w	Dynamische Viskosität Wasser bei 100°C	0,0002847 Pa*s
η_l	Dynamische Viskosität Abgas bei 300°C	0,00002747 Pa*s
ρ_w	Dichte Wasser bei 100°C	959,070 kg/m ³
ρ_l	Dichte Abgas bei 300°C	0,6274 kg/m ³
λ_w	Wärmeleitfähigkeit Wasser bei 100°	0,68100 W/(m*K)
λ_l	Wärmeleitfähigkeit Abgas bei 300°	0,04171 W/(m*K)
c_f	Fahrgeschwindigkeit PKW	54 km/h = 15 m/s
$\dot{V}_{kw}$	Volumenstrom der Kühlwasserpumpe	0,00125 m ³ /s
$\dot{V}_a$	Volumenstrom des Abgases	0,042 m ³ /s

Abgas- Wärmetauscher

Der Abgas- Wärmetauscher ist ähnlich dem des Systems Abgas - Luft zu dimensionieren, wird hier jedoch kleiner ausfallen, da die zuzuführende Wärmeleistung pro TEG geringer ist. Zuerst wird der Temperaturabfall in der Wärmetauscherwand, dem Wärmeleitkleber, der Keramikplatte und Kupferverbinder des TEG nach **Gl. (7.25)** berechnet und ergibt 7,1K.

$$\dot{Q}_{ww} = \frac{A_w * \Delta T}{\sum_{n=1}^n \frac{b_i}{\lambda_i}} \quad \text{Gl. (7.25)}$$

Es muss der Abgas- Wärmetauscher entsprechend gestaltet werden, um den gesamten Temperaturabfall zum TEG auf 30K zu begrenzen. Vom Abgas zum Wärmetauscher dürfen noch 22,9K abfallen. Für die Berechnung werden dieselben Annahmen getroffen, wie beim System Abgas - Luft. Auch hier bietet sich die Verwendung von Excel an, um die Werte miteinander zu variieren und ein gutes Ergebnis zu erhalten. In diesem Fall wird die Strömungsgeschwindigkeit wieder mit 27 m/s festgelegt. Nach **Gl. (7.35)** ergibt sich, aus der zu übertragenden Leistung von $4 \times 324\text{W} = 1296\text{W}$, eine notwendige Wärmetauscherfläche von $0,5764\text{m}^2$.

$$A_w = \frac{\dot{Q}_{kw} * l}{\sqrt{\left(0,664 * \sqrt{\frac{c * L * \rho}{\eta}} * \sqrt[3]{\frac{v * \rho * c_p}{\lambda}}\right)^2 + \left(\frac{0,037 * \left(\frac{c * L * \rho}{\eta}\right)^{0,8} * \frac{v * \rho * c_p}{\lambda}}{1 + \frac{2,443}{\left(\frac{c * L * \rho}{\eta}\right)^{0,1}} * \left(\left(\frac{v * \rho * c_p}{\lambda}\right)^{\frac{2}{3}} - 1\right)}\right)^2} * \lambda_w * \Delta T} \quad \text{Gl. (7.35)}$$

Für die festgelegte Strömungsgeschwindigkeit von 27 m/s ist nach **Gl. (7.26)** eine durchströmte Querschnittsfläche von $0,001556\text{m}^2$ notwendig.

$$A_q = \frac{\dot{V}}{c} \quad \text{Gl. (7.26)}$$

Der Abgaswärmetauscher wird hier ebenfalls als quadratisches Gitter ausgelegt. Für die Berechnung der erforderlichen Wärmetauscherabmessungen muss die benötigte Kanalanzahl berechnet werden. Die Rippenbreite RB wird mit 2 mm festgelegt, resultierend aus der Rippenstärke von 1 mm und dem Luftspalt von 1 mm. Wenn ein solcher Wärmetauscherkanal eine Länge von 50 mm hat, beinhaltet dieser eine Oberfläche von $4 \times 1\text{ mm} \times 50\text{ mm} = 200\text{ mm}^2$. Das **Bild 7.37** zeigt den Aufbau dieser Kanäle vom System Abgas - Luft, welches identisch ist. Durch Diffusion erhält man eine notwendige Kanalanzahl von 2882, wenn ein Kanal 200 mm^2 beinhaltet. Nach Ziehen der Wurzel und Rundung besteht der Wärmetauscher aus $54 \times 54 = 2916$ Kanälen, was bei einer Rippenbreite $RB = 2\text{ mm}$ eine Gesamtabmessung von $108\text{ mm} \times 108\text{ mm}$ bedeutet. Diese Bauraumbedingungen sollten am

Fahrzeugboden im Mitteltunnel erfüllbar sein. Der durchströmte Querschnitt, errechnet durch Division von erforderlicher durchströmter Querschnittsfläche von 1556 mm² und der wahren Fläche von 2916 mm² fast zweimal so groß wie die geforderten 1556 mm². Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt deshalb nur noch 14,4 m/s, wobei nur noch 836W vom Abgas übertragen werden können. Auch für diese Variante ist eine gesonderte, genaue Berechnung unbedingt notwendig.

Wasser- Wärmetauscher

Der Temperaturabfall im Wasserwärmetauscher wird nach **Gl. (7.25)** errechnet, welche nach ΔT [K] umgestellt wird. Die in **Tabelle 7.11** aufgeführten Daten wurden zur folgenden Berechnung verwendet.

Der Temperaturabfall, verursacht durch die Wandung des Wärmetauschers, den Wärmeleitkleber, Keramikplatte und Kupferverbinder im TEG, beträgt 6,5K. Der Kühlwasserwärmetauscher entsprechend gestaltet werden, um den Temperaturabfall zum TEG auf 15K zu begrenzen. Er darf vom Kühlwasser zur Wandung noch 8,5K betragen.

Der Volumenstrom des Kühlwassers wird mit 0,00125 m³/s angenommen. Die Strömungsgeschwindigkeit c [m/s] an der überströmten Platte wird nach der **Gl. (7.26)** vom Querschnitt A_q [m²] des Wärmetauschers und dem einfließenden Volumenstrom bestimmt. Die Dichte des Kühlwassers kann als konstant angenommen werden.

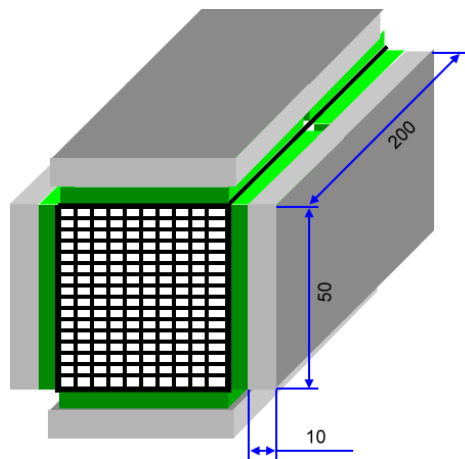


Bild 7.41: Abmessung des Wasserwärmetauschers

Die erforderliche Querschnittsfläche des Wärmetauschers wird aus den Maßen und der Anzahl der Kühlwasserwärmetauscher errechnet, welche im **Bild 7.41** dargestellt sind.

$$A = \text{Wärmetauscheranzahl} * H * B = 4 * 50\text{mm} * 10\text{mm} = 2000\text{mm}^2 = 0,0002\text{m}^2$$

Mit dieser durchströmten Querschnittsfläche A_q [m²] und dem Volumenstrom $\dot{V}$ [m³/s] errechnet sich nach der **Gl. (7.26)** die Strömungsgeschwindigkeit zu 6,25 m/s im Wärmetauscher.

$$c = \frac{\dot{V}}{A_q} \quad \text{Gl. (7.26)}$$

Die Berechnung der notwendigen Wärmetauscherfläche im Kühlwasser erfolgt mit der **Gl. (7.35)**. Durch Eintragen der Werte aus der **Tabelle 7.11**, der Strömungsgeschwindigkeit des Kühlwassers c von 6,25 m/s, der vom Kühlwasser überströmte Länge des Systems L von 0,20 m und der zu erreichenden Temperaturdifferenz ΔT von 8,5K ergibt sich eine notwendige Kühlwasserwärmetauscherfläche A_w von $0,000964 \text{ m}^2 = 9,64 \text{ cm}^2$. Die Oberfläche eines TEG 25 cm^2 beträgt. Es sind keine Maßnahmen zur Vergrößerung der Wärmetauscherfläche im Kühlwasserkreis notwendig. Die ebene Wandung ist, wie bei der Variante Kühlwasser - Luft, für den konvektiven Wärmeübergang ausreichend.

8 Elektrische Konfiguration und Schaltung

Die elektrische Konfiguration der TEG erfordert, im Hinblick auf die von der Temperatur abhängige Ausgangsspannung, einigen Aufwand. Einerseits sollten die Systemspannungen möglichst hoch sein, um durch geringe Ströme geringe Verluste zu produzieren. Andererseits sollten die Spannungen möglichst im Bereich der Bordspannung liegen, um keine Spannungsschwankungen bei direkter Einspeisung im Bordnetz zu erzeugen. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung von DC-DC-Wandlern. Diese Regeln eine variable DC- Eingangsspannung auf eine festgelegte DC- Ausgangsspannung. Diese Bauteile haben einen festgelegten Eingangsbereich, weshalb eine dementsprechende Verschaltung der TEG vorgenommen werden muss. Durch die verschiedene Anzahl und Leistungsfähigkeit der TEG kommen verschiedene Spannungen zustande. Es muss deshalb der Ausgangsspannungsbereich für jede einzelne Variante ermittelt werden. Zwei mögliche Spannungen sind zu beachten. Die Leerlaufspannung, die z.B. nach Abstellen des Motors und der Verbraucher auftritt, sowie die Lastspannung, die im normalen Betrieb und beim Kaltstart des Systems mit minimalen Kalt- Temperaturen vorhanden ist. Deshalb ist der Wandler für größere Leistungen als dem normalen Warm- Betrieb auszulegen. Zur Ermittlung der Leerlaufspannungen wird die **Gl. (2.1)** verwendet, wobei $\alpha_1 - \alpha_2$ durch den Seebeck- Koeffizient α des TEG zu ersetzen ist.

$$U_{th} = (\alpha_1 - \alpha_2) * (T_{heiß} - T_{kalt}) \quad \text{Gl. (2.1)}$$

Aus den vorgegebenen Temperaturen der drei Varianten, abzüglich der Übergangsverluste, errechnen sich für die minimalen und maximalen Temperaturen am TEG die minimalen und maximalen Werte für die Leerlaufspannungen U_{th} [V] sowie laut **Gl. (4.10)** die minimale und maximale Lastspannung U_{Last} [V].

$$U_{Last} = R_a * \frac{\alpha * \Delta T}{R_i + R_a} \quad \text{Gl. (4.10)}$$

Die Lastströme I_{Last} [A] für die minimale und maximale Temperatur errechnen sich laut nachfolgender **Gl. (4.9)**. Alle Werte sind in der **Tabelle 8.12** zusammengefasst.

$$I_{Last} = \frac{U_{th}}{R_i + R_a} \quad \text{Gl. (4.9)}$$

Tabelle 8.12: Elektrische Randdaten der Konzeptvarianten

Variante	min. ΔT [K]	min. U_{th} [V]	min. U_{Last} [V]	min. I_{Last} [A]	max. ΔT [K]	max. U_{th} [V]	max. U_{Last} [V]	max. I_{Last} [A]
Kühlwasser- Luft	60	4,9	2,5	1,5	90	7,4	3,7	2,2
Abgas- Luft	192	10	5,0	7,1	220	11,4	5,7	8,2
Abgas- Kühlwasser	115	6,0	3,0	4,3	235	12,2	6,1	8,7

Für die drei Varianten ergeben sich pro TEG folgende Rahmenbedingungen laut **Tabelle 8.13**. Für die Spannung U [V] wurde die Lastspannung U_{Last} [V] angenommen. Bei dieser Annahme ist darauf zu achten, dass am Generatorsystem immer eine elektrische Last anliegen muss, da nur die Lastspannungen und nicht die Leerlaufspannungen verwendet wurden. Wenn die Spannung in Richtung Leerlaufspannung ansteigt, könnte der DC- DC- Wandler durch eine zu hohe Eingangsspannung beschädigt werden. Es ist deshalb unbedingt ein intelligentes Energiemanagement an Bord des Kraftfahrzeuges notwendig.

Tabelle 8.13: Randbedingungen für den DC- DC- Wandler

Variante	U [V]	I [A]	R [Ω]	Anzahl	P_{max} [W]
Kühlwasser- Luft	2,5 - 3,7	1,5 - 2,2	1,67	40	325,6
Abgas- Luft	5,0 - 5,7	5,7 - 7,1	0,7	12	485,6
Abgas- Kühlwasser	3,0 - 6,1	4,3 - 8,7	0,7	16	849,1

Die TEG müssen entsprechend verschaltet werden, dass der Bereich der Gesamtspannung und -ströme im Eingangs- und Ausgangsbereich des zu verwendenden DC- DC- Wandlers liegt. Die Reihen- und Parallelschaltung stehen zur Verfügung. Es verhalten sich die Spannungen, Ströme und Widerstände wie in **Tabelle 8.14** angegeben.

Tabelle 8.14: Gesetze der Reihen- und Parallelschaltung

Variante	Gesamtspannung U [V]	Gesamtstrom I [A]	Gesamtwiderstand R [Ω]
Reihen-schaltung	$U_{ges} = U_1 + U_2$	$I_{ges} = I_1 = I_2$	$R_{ges} = R_1 + R_2$
Parallel-schaltung	$U_{ges} = U_1 = U_2$	$I_{ges} = I_1 + I_2$	$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

Für die Konzeption der Schaltung werden die DC- DC- Wandler der Firma Deutronic Elektronik GmbH, Deutronic Straße 5 in D-84166 Adlkofen (www.deutronic.de) verwendet. Erhältliche DC- DC- Wandler für den Fahrzeugbereich mit Ausgangsspannungen von 12V und 24V werden in verschiedenen Leistungsbereichen von 25 - 500W mit verschiedenen Wirkungs-graden von 90 - 98% angeboten. Die Modelle unterscheiden sich im Eingangs-spannungsbereich und der festgelegten Ausgangsspannung. Die maximalen Ausgangsströme sind entsprechen der maximalen Ausgangsleistung und Ausgangsspannung nach dem ohmschen Gesetz festgelegt. Sie bewegen sich in Bereichen von 2 - 40A.

Schaltung der Variante Kühlwasser - Luft

Diese Variante beinhaltet 40 Module, die zusammen maximal 328,4W elektrische Leistung abgeben können. Im TEG- System wurde mit der Anpassung der Widerstände $R_i = R_a$ [Ω] gerechnet. Dieser Zustand muss durch geschickte Verschaltung der TEG erreicht werden. Korrekturwiderstände in Reihen- oder Parallelschaltung wären die einfachere Variante, die jedoch hohe Verlustleistung durch die Widerstände bedeuten würde. Zur Prüfung wurde eine einfache Verschaltung nach **Bild 8.42** realisiert.

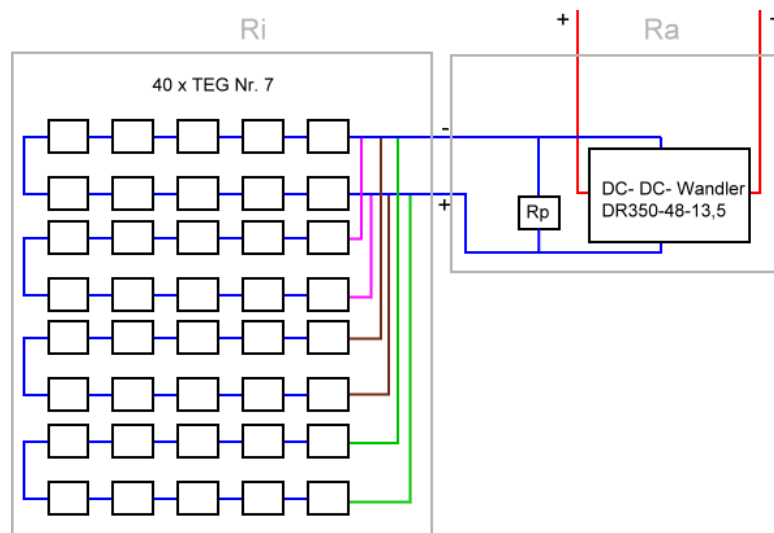


Bild 8.42: Korrekturwiderstand in der Schaltung

Der Widerstand eines TEG beträgt $1,67\Omega$. Die Berechnung der gesamten Schaltung ergibt einen Innenwiderstand R_i von $4,175\Omega$. Der Eingangswiderstand R_a des Wandlers aus **Tabelle 8.15** beträgt $7,5\Omega$ und müsste durch einen Korrekturwiderstand an diesen Wert angepasst werden. Da dieser größer ist, als der Widerstand R_i der Gesamtschaltung, muss der Korrekturwiderstand R_p nach **Gl. (7.41)** berechnet und in Parallelschaltung zum Wandler geschaltet werden.

$$R_p = \frac{R_a * R_i}{R_a - R_i} \quad \text{Gl. (7.41)}$$

Wenn man die Leistung mit **Gl. (7.42)** am Wandler und Widerstand errechnet, erhält man eine Leistung am Wandler von $182,5\text{W}$ und eine Verlustleistung am Widerstand von $145,6\text{W}$. Dieses Ergebnis ist untragbar für die Effizienz des Systems. Deshalb ist die geforderte Anpassung nur durch Verschaltung der TEG und nicht durch Widerstände zu realisieren. Geringe Abweichungen werden sich hierbei weniger negativ auswirken, als die Verwendung von Zusatzwiderständen. Prinzipiell sollte der Wandler- Eingangswiderstand R_a des Wandlers gleich groß oder größer sein als der Innenwiderstand R_i der TEG- Schaltung, da hierbei die fließenden Ströme geringer werden und die Verluste nicht so groß sind, wie bei größeren Strömen durch einen geringeren Wandler- Eingangswiderstand R_a .

$$P = \frac{U^2}{R} \quad \text{Gl. (7.42)}$$

Die Variation der TEG mit ihren Widerständen sollte mit Excel erfolgen, da es viele Möglichkeiten der Verschaltung untereinander gibt. Diese Berechnung ist in der **Anlage 1** auf dem Datenträger beigelegt. Bei der Verschaltung von Spannungsquellen muss unbedingt darauf geachtet werden, dass diese immer in gleichen Unterschaltungen zusammengesetzt werden, damit alle Teilschaltungen die gleiche Ausgangsspannung haben. Wenn das nicht der Fall ist, kommt es durch die unterschiedlichen Spannungen und Widerstände zu Stromflüssen der TEG untereinander. Dadurch würden die TEG- Teilschaltungen mit geringeren Ausgangsspannungen und Widerständen nach dem Peltiereffekt arbeiten, was unerwünscht ist.

Für die Variante Kühlwasser - Luft ergibt sich folgende Möglichkeit. Es werden jeweils 10 Module in Reihen verschaltet, die danach in einer Parallelschaltung miteinander Verbunden werden. Der Gesamtwiderstand R_i beträgt nach der Berechnung laut **Tabelle 8.14** $4,175\Omega$. Die Ausgangsspannung der gesamten Schaltung wird ebenfalls nach diesen Gleichungen errechnet. Es ist darauf zu achten, dass sich mit erhöhen des Widerstandes R_a die Lastspannung der TEG erhöht, da der Stromfluss sinkt. Die korrigierte, maximale Lastspannung nach **Gl. (4.10)** beträgt in diesem Fall $4,7V$ pro TEG. Bei einer Reihenschaltung von 10 Modulen erhält man $47V$, die durch die nachfolgende Parallelschaltung nicht verändert wird.

Aus dem Angebot des o.g. Unternehmens wird für diese ermittelten Randbedingungen der Wandler DR350-48-13,5 ausgewählt, da sein Spannungseingang den geforderten Bereich von $25 - 47V$ abdeckt. Seine Randdaten sind in **Tabelle 8.15** aufgelistet, das komplette Datenblatt ist in **Anlage 4** beigelegt.

Tabelle 8.15: Daten DC- DC- Wandler DR350-48-13,5

Modell	Eingangsspannung $U [V]$	Ausgangsspannung $U [V]$	Ausgangsstrom $I [A]$	Eingangswiderstand $R [\Omega]$	Wirkungsgrad $[\%]$	Masse $[kg]$
DR350-48-13,5	19 - 60	13,5	23	7,5	94	1,05

Durch den Wirkungsgrad von 94% wird die korrigierte Ausgangsleistung von 302W der TEG auf 284W herabgesetzt. Die Ausgangsleistung eines Wandlers von 310W ist ausreichend. Im **Bild 8.42** ist die empfohlene Verschaltung von TEG und Wandler dargestellt.

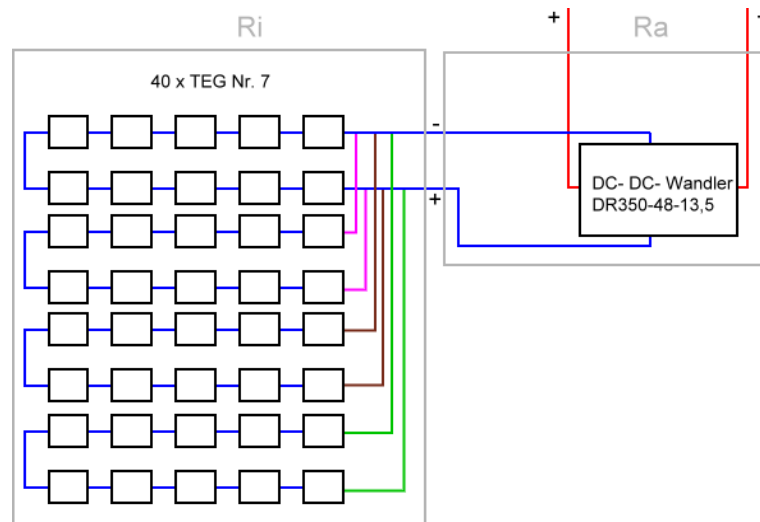


Bild 8.43: Schaltung TEG Kühlwasser - Luft

Schaltung der Variante Abgas - Luft

Bei dieser Variante sind 12 Module zu einem Generator zusammengefasst, welcher maximal 561W elektrische Leistung abgeben kann. Nach Untersuchung der Verschaltung aller TEG erhält man bei Reihenschaltung aller Module einen Innenwiderstand R_i von $8,4\Omega$. Die korrigierte, maximale Lastspannung eines TEG beträgt nach **Gl. (4.10)** 6,6V, womit das System maximal 79,5V erreicht. Nach diesen Randbedingungen wird der Wandler DVC500-80-12 ausgewählt. Der Eingangswiderstand R_a des Wandlers beträgt $11,6\Omega$. Seine Ausgangsleistung ist insofern ausreichend, da mit der korrigierten Lastspannung die Leistung auf 546W und durch die Verluste des Wandlers weiter auf 502W sinkt. Die maximale Leistung wird nur unter besonderen Bedingungen, wie Tiefsttemperaturen der Kaltluft am Wärmetauscher, erreicht und liegt im Toleranzbereich des Wandlers. Die Daten des Wandlers sind in **Tabelle 8.16** aufgelistet und die Verschaltung in **Bild 8.44** dargestellt. Das komplette Datenblatt ist in **Anlage 5** beigelegt.

Tabelle 8.16: Daten DC- DC- Wandler DR500-80-12

Modell	Eingangsspannung U [V]	Ausgangsspannung U [V]	Ausgangsstrom I [A]	Eingangswiderstand R [Ω]	Wirkungsgrad [%]	Masse [kg]
DVC500-80-12	56 - 150	12,5	40	11,6	92	1,2

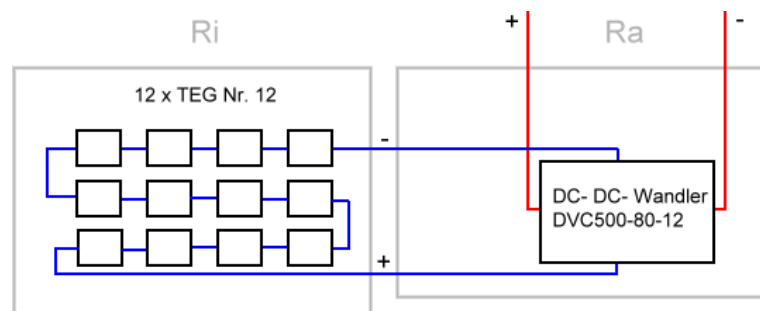


Bild 8.44: Schaltung TEG Abgas - Luft

Schaltung der Variante Abgas - Kühlwasser

In der Variante Abgas - Kühlwasser sind 16 Module zu einem Generator zusammengefasst, der maximal 896W elektrische Leistung erzeugen kann. Hier werden die gleichen TEG wie im System Abgas - Luft verwendet. Die Leistung des Systems ist aber durch die größere Anzahl von TEG auch größer. Es werden deshalb zwei Wandler vom Typ DR500-80-12 in Parallelschaltung verwendet, weil der Leistungsbereich bei kaltem Kühlwasser nicht von einem abgedeckt werden kann. Dadurch halbiert sich nach **Tabelle 8.14** der Eingangswiderstand R_a auf $5,8\Omega$. Wenn man jeweils 8 TEG in Reihe und diese wiederum parallel zueinander schaltet, erhält man einen Innenwiderstand R_i von $2,8\Omega$. Die korrigierte, maximale Lastspannung eines TEG beträgt 8,2V woraus sich die des Systems zu 65,9V errechnet. Durch den Wirkungsgrad des Wandlers sinkt die gesamte, maximale Ausgangsleistung auf 749W. Die komplette Verschaltung ist im **Bild 8.45** dargestellt.

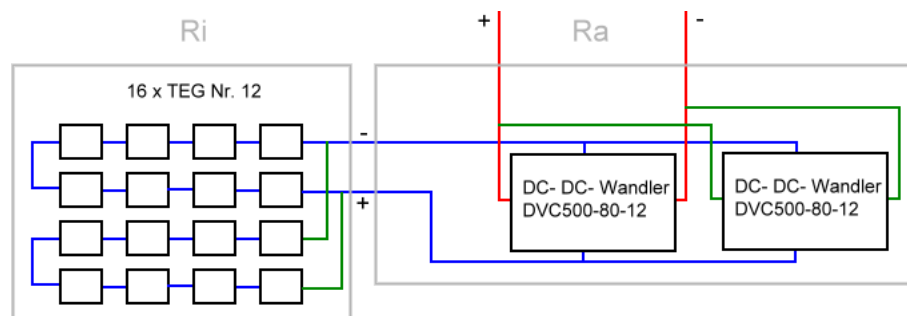


Bild 8.45: Schaltung TEG Abgas - Kühlwasser

9 Auswertung

9.1 Auswertung der Systemvarianten

Der Vergleich der drei Varianten soll zuerst herausstellen, welche den größten Energie- und Wirkungsgradgewinn bei kleinem Aufwand und Masse erreicht. Die Daten der einzelnen Systeme werden dazu in der **Tabelle 9.17** zum Vergleich dargestellt. Die Berechnung der Wärmetauschermasse erfolgt nach der Volumen-ermittlung der einzelnen Kühlrippen und Wandungen. Für die Masseberechnung wurde eine Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ für Aluminium verwendet. Die Masse der TEG und DC- DC- Wandler wurde aus den Datenblättern entnommen. Die Masse eines Gebläses wurde mit 1000 g angesetzt. Für die Ermittlung des Wirkungsgrades ist der Verlust im Abgas mit 37% und im Kühlwasser mit 33% angenommen worden.

Tabelle 9.17: Datenzusammenfassung der Varianten

Daten	Variante Kühlwasser/Luft	Variante Abgas/Luft	Variante Abgas/Kühlwasser
Anzahl TEG	40	12	16
Zuzuführende Wärme TEG	140,4 W	533,6 W	323,9 W
Zuzuführende Wärme System	5616 W	6403 W	5182 W
Abzuführende Wärme TEG	136,5 W	498 W	311,1 W
Abzuführende Wärme System	5460 W	5976 W	4978 W
Durchschn. P_{el} des TEG	3,9 W	35,6 W	12,8 W
Durchschn. P_{el} des Systems	156 W	427 W	205 W
Mittlere Temperaturdifferenz	62K	192K	115K
Wirkungsgrad TEG	2,78 %	7,03 %	3,94 %
Wirkungsgrad DC- DC- Wandler	94 %	92 %	92 %
Wirkungsgrad System	2,61 %	6,47 %	3,62 %
Masse aller TEG	1520 g	288 g	384 g
Masse aller Wärmetauscher	10500 g	18000 g	5500 g
Masse Wandler / Gebläse	1050 g / 0 g	1200 g / 1000 g	2400 g / 1000 g
Gesamtmasse	13,1 kg	20,5 kg	9,3 kg
Wirkungsgradgewinn im Kfz	0,9 %	2,4 %	1,3 %

Die erste Variante, Kühlwasser - Luft, erreicht die geringste Effizienz und elektrische Leistung durch geringere Temperaturdifferenzen von ca. 60K. Hierbei besteht eine große Abhängigkeit von Temperatureinflüssen der Umwelt und weniger vom Fahrzyklus. Grund dafür ist, dass die Kühlwassertemperatur geringeren Schwankungen als Abgas unterliegt, jedoch die schwankende Umwelttemperatur am Wärmetauscher maßgeblich Einfluss nimmt. Nachteilig auf die Gesamtmasse erweist sich die hohe Anzahl an notwendigen TEG- Modulen und der notwendige, großflächig dimensionierte Luftwärmetauscher. Das System könnte in Verbindung mit dem System Abgas - Kühlwasser genutzt werden, um die zusätzlich, durch das Abgas in den Kühlkreislauf eingebrachte Wärme zu nutzen und wieder abzuführen.

Wie man aus der **Tabelle 9.17** erkennen kann, ist die beste Variante in Bezug auf die elektrische Leistung und den Wirkungsgrad die Variante Abgas - Luft. Der TEG hat hier den größten Wirkungsgrad, da große Temperaturdifferenzen von rund 190K erreicht werden. Der Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeuges steigt um 2,4%, was einen recht guten Gewinn bedeutet. Die elektrische Leistung ist mit über 400W ausreichend für die Übernahme einer Grundlast im Bordnetz. Die Leistungsfähigkeit schwankt jedoch stark durch die Abhängigkeit von der Außentemperatur am Luftwärmetauscher und dem zugeführten Wärmestrom durch das Abgas stärker als bei den beiden anderen Varianten. Die Grenze des Systems ist durch die maximal vorhandene Leistung im Abgas und den möglichen Bauraum für die Luftwärmetauscher festgelegt. Diese Wärmetauscher verursachen den größten Massezuwachs im Fahrzeug und außerdem Bauraumprobleme durch die großen benötigten Luftwärmetauscherflächen. Es ist in diesem Bereich viel Optimierungspotenzial in der konstruktiven Ausführung vorhanden, um diese Masse, zum Beispiel durch Verwendung von dünnen Kühlblechen anstatt stranggepressten Wärmetauschern, zu reduzieren.

Die nächst bessere Variante Abgas - Kühlwasser hat eine beträchtlich geringere Effizienz. Das mögliche Potenzial kann in diesem Fall nicht voll ausgeschöpft werden, da die Materialkennwerte des TEG eine Temperaturbegrenzung auf 250°C vorschreiben. Deshalb erweist sich die geringere Temperaturdifferenz von rund 115K, bedingt durch die Verwendung des Kühlwasserkreislaufes mit 100°C zur Wärmeabfuhr, als stark wirkungsgradbeeinträchtigend. Günstig erweist sich dabei

aber die Verwendung von Wasserwärmetauschern zur Wärmeabfuhr auf den Bauraum des Systems, weil diese sehr klein ausgeführt werden können. Wenn TEG mit höheren Einsatztemperaturen von 800°C und mehr eingesetzt werden können, um die Temperaturdifferenz so groß wie möglich zu gestalten, ist dieser Variante der Vorzug zu geben. Für eine Effizienzsteigerung sollte der Einsatz eines gesonderten Kühlwassersystems mit geringeren Kühlmitteltemperaturen überdacht werden, was sich positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirken wird. Die Schwankung der elektrischen Leistung unterliegt nur der Schwankung der Abgasleistung, die durch den Fahrzyklus bedingt ist. Somit ist dieses System weitgehend von Umwelteinflüssen unabhängig. Nachfolgend sind die Kenndaten wie Wärmefluss, Temperaturdifferenz und elektrische Leistung pro verwendeten TEG Module beim Einsatz der drei unterschiedlichen Systemen in **Bild 9.46** aufgeführt.

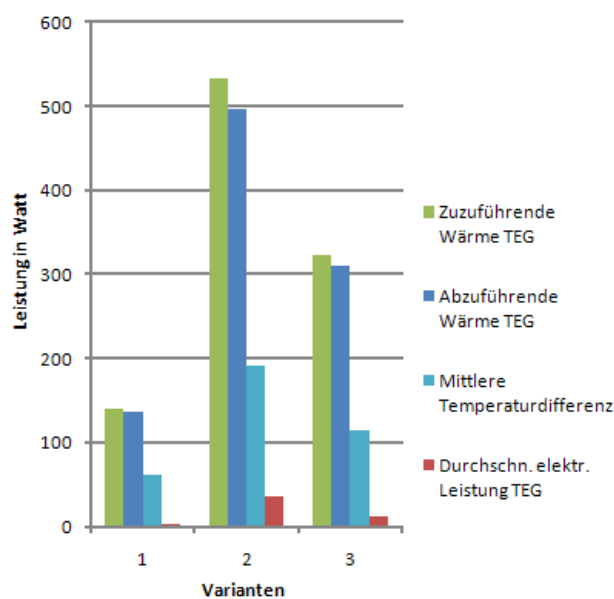


Bild 9.46: Kenndaten der Varianten

9.2 Vergleich mit alternativen Systemen

Im Vergleich mit anderen, alternativen Möglichkeiten der Stromerzeugung hat ein TEG außer im Vergleich mit der Solarzelle, eine geringe Energiedichte und elektrische Ausgangsleistung. Die durchschnittliche Leistung des Systems Abgas – Luft liegt bei 427 W.

Ein Beispiel für eine Brennstoffzelle der Firma Heliocentris Energiesysteme GmbH leistet 1200W bei einer Masse von 13kg mit den Abmessungen (LxBxH) 560x250x330mm und einem Wasserstoffverbrauch von 0,87 l/min. Diese ist leichter als die TEG- Systeme Kühlwasser - Luft, Abgas - Luft und stellt fast die dreifache Leistung mit größerem Wirkungsgrad bereit. Allerdings ist für ihren Einsatz eine zusätzliche Brennstoffversorgung und Speicherung notwendig, welche diese Vorteile wieder einschränkt. Dazu kommen weitere Nachteile, die im **Abschnitt 6.1** aufgeführt sind. [30]

Die Leistung eines Standard- Solarpanels aus monokristallinen Silizium liegt bei einer Fläche von 1500 x 1000mm und senkrechter Sonneneinstrahlung bei etwa 200W, was von den Varianten Kühlwasser - Luft und Abgas - Kühlwasser nicht überboten werden kann. Diese Solarzellen benötigen als Dünnschichtausführung auf dem Dach eines PKW keinen zusätzlichen Bauraum und bedeuten nur einen geringen Massezuwachs. Ein Gleichspannungswandler kann in Verbindung eine gleichbleibende Ausgangsspannung bereitstellen. Näheres zum System wurde bereits im **Abschnitt 6.2** erläutert.

Die Abgasturbine wird im erwähnten Versuchsfahrzeug bereits zur Turboaufladung verwendet. Weil die derzeitige Motorenentwicklung in Richtung Downsizing und Aufladung in mehreren Stufen geht, muss geprüft werden, ob genügend Volumenstrom und Druckverhältnis bereitsteht, um den Antrieb eines Generators mit einer Abgasturbine zu realisieren. Möglich wäre Parallelschaltung von zwei unterschiedlich dimensionierten Abgasturbinen zur Aufladung und Stromerzeugung. Eine Reihenschaltung ist, durch die dann geringere Druckdifferenz, nicht zu empfehlen. Die Abgasturbine im Versuchsfahrzeug leistet nach den Abgasstrom des NEFZ im Durchschnitt weniger als 6,5kW. Nach dem elektrodynamischen Prinzip ließen sich mit dem kompletten Massestrom rund 4kW elektrische Leistung gewinnen. Hier ist eine Aufteilung des Abgasstromes auf jeden Fall notwendig, wenn dieser auch zur Aufladung verwendet werden soll.

Das Konzeptsystem „Turbosteamer“ (**Abschnitt 6.4**) von BMW, welches auf dem Prinzip eines Dampfkraftwerkes beruht, verspricht mit rund 10kW Leistung das erfolgsträchtigste System in Bezug auf die Leistungsfähigkeit zu sein. Damit könnten

elektrodynamisch bis zu 6kW elektrische Leistung erzeugt werden, wobei die Verwendung eines Abgasturboladers, im Gegensatz zum vorherigen System, noch möglich ist. Jedoch ist durch den Einsatz der Abgaswärmetauscher ein Druckverlust hinzunehmen, der die mögliche Leistung der Turboaufladung in gewissem Maß vermindern wird. In System von BMW wurde eine Zweikreisanlage mit zwei Expansionsmaschinen verwendet, wobei die des Niedertemperaturkreises zum Antrieb eines Generators geeignet wäre. Nachteile des Systems sind die hohe Komplexität, Masse, Bauraum und Kosten, welche negative Auswirkungen auf einen möglichen Serieneinsatz haben.

Ein Vergleich der elektrischen Leistung dieser alternativen Systeme und dem TEG ist im **Bild 9.47** dargestellt.

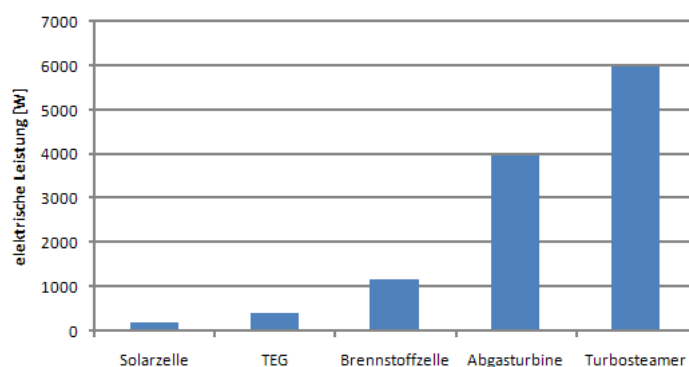


Bild 9.47: Vergleich der elektrischen Leistung

9.3 Probleme und notwendige Entwicklungen

Problematisch für den Einsatz der TEG im Kfz sind die bereits erwähnten Themen der Schwing- und Zyklfestigkeit sowie der Korrosionsbeständigkeit. Prüfstandtests und Weiterentwicklungen sind für einen sicheren Einsatz unerlässlich. Außerdem ist für einen effektiven Einsatz mit hohen Leistungen die derzeitige Temperaturbeständigkeit zu gering. Diese sollte in Bereichen von 800 - 1000°C gewährleistet werden um hohe Temperaturdifferenzen mit kleiner dimensionierten Wärmetauschern zu ermöglichen. Für diese Temperaturen sind Wärmetauscher aus leichtem Aluminium wegen der Schmelztemperatur von 660°C nicht einsetzbar.

In Bezug auf eine vorausgesagt, immense Wirkungsgraderhöhung neuer Module müssen diese für den Kfz- Bereich kritisch betrachtet werden, da für Vorzeigerechnungen sehr hohe Temperaturdifferenzen in Bereichen von 1000 - 1500K verwendet werden. Diese sind in der Praxis im Fahrzeug meist nicht mit der standardmäßig anfallenden Abwärme aus Abgas und Kühlwasser umzusetzen. Generell sind Wirkungsgradverbesserungen eines thermoelektrischen Generators nur durch Erhöhung des Seebeck- Koeffizienten und der Temperaturdifferenz sowie der Senkung der Wärmeleitfähigkeit zu erreichen.

Hinsichtlich dieser Problematiken sollte ein thermoelektrischer Generator für die spezielle Anwendung im Kfz mit Forschungseinrichtungen und spezialisierten Unternehmen entwickelt werden. Führend auf diesem Gebiet ist das Fraunhofer Institut.

9.4 Potenzial der TEG

Höhere Temperaturen

Für eine Potenzialabschätzung der TEG bei höheren Temperaturdifferenzen werden die Daten des TEG Nr. 12 aus der **Tabelle 4.2** verwendet. Diese Kenndaten sind nicht repräsentativ für ein Modul bei höheren Temperaturen, da konstruktive Änderungen für die Temperaturfestigkeit auch andere Modulkennwerte zur Folge haben. Für eine Abschätzung soll diese Annahme jedoch ausreichend sein. Die Abgastemperatur wird mit 800°C am Abgaswärmetauscher angenommen. Der Temperaturabfall am Wärmetauscher wird überschlägig nach Excel mit jeweils 150K angenommen. Nach **Gl. (7.25)** ist die durch Wärmeleitung entstehende Temperaturdifferenz in den Wandungen ca. 40K. Die daraus resultierende, gesamte Temperaturdifferenz von rund 450K hat eine zuzuführende Wärmeleistung von ca. 1800W pro Element zur Folge. Die elektrische Leistung pro Modul liegt dann bei 190W, was der fünffache Wert gegenüber dem System Abgas - Luft ist. Die Wärmeaufnahme steigt auf das dreifache und der Wirkungsgrad verdoppelt sich von 6 auf über 12%.

Verbesserte Werkstoffeigenschaften

Wenn für TEG statt nur höherer Temperaturdifferenzen auch bessere Materialkennwerte eingesetzt werden können, steigt der Wirkungsgrad ebenfalls an. Eine Beispielrechnung kann hierfür nicht durchgeführt werden, da keine praktischen Werte, wie Seebeck- Koeffizient, Wärmeleitwert und Innenwiderstand für ein solches Modul zur Verfügung stehen. Prognosen gehen in Richtung von 30% Wirkungsgrad, die im Fahrzeug mit den vorherrschenden Temperaturen erzielt werden könnten.

9.5 Fazit

Das generelle Treibstoffersparnis durch Verwendung von TEG zur Stromerzeugung kann bei Autobahnfahrt mit 100 km/h einfach abgeschätzt werden. Pro Stunde werden von den Varianten 0,156 kWh, 0,427 kWh und 0,205 kWh elektrische Energie erzeugt. Nach der Beispielrechnung aus **Abschnitt 3.1** kann daraus folgende Treibstoffeinsparung, im **Bild 9.48** dargestellt, auf 100 km durch Verwendung der verschiedenen TEG- Systemvarianten erreichen werden.

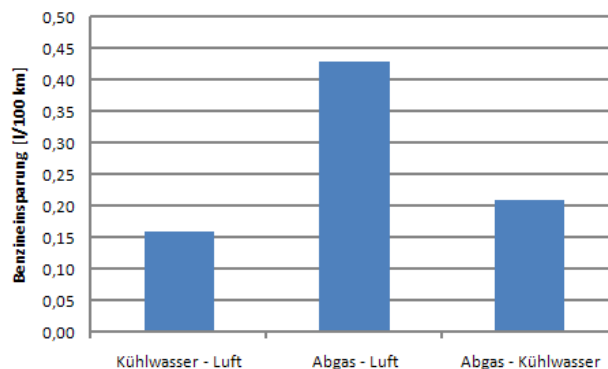


Bild 9.48: Benzineinsparung durch TEG

Wie man daraus erkennen kann, können TEG dazu beitragen, die heutigen, hochgesteckten Ziele bei der Minimierung des Treibstoffverbrauchs von PKWs zu erreichen. Weitaus wirtschaftlicher erscheint der Einsatz solcher Systeme im Nutzfahrzeugbereich, spezielle dem Fernverkehr auf der Straße und Schiene. Die dort anwesenden Großmotoren erzeugen einen größeren Abgas- Volumenstrom, welcher mehr Leistung in Abgas und Kühlwasser zur Verfügung stellt. Außerdem sind die Bauraumverhältnisse für Wärmetauscher im Abgas und der Kaltluft weitaus

großzügiger als im PKW, was dort, neben dem geringen Abgasvolumenstrom, als eines der größten Problem angesehen werden kann. Wenn neue Technologien Serienreif entwickelt worden sind und spezielle, für die Anforderungen im Fahrzeug geeignete Module durch Testzyklen ihre Einsatzsicherheit bewiesen haben, ist ein Einsatz empfehlenswert. Derzeit kann eine Empfehlung für den Einsatz im PKW mit den aktuell verfügbaren Technologien, trotz Treibstoffersparnis, nicht erfolgen.

10 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchung war, das Themengebiet der thermoelektrischen Generatoren zu Erläutern und Möglichkeiten für ihren Einsatz im Kraftfahrzeug zur Stromversorgung zu finden. Dabei sollte auch auf Randthemen, wie die derzeitige und alternative Stromversorgung eingegangen werden. Die Hauptaufgabe beinhaltete die Konzeption und überschlägige Berechnung von drei möglichen Varianten. Nach der Auswertung soll eine Aussage getroffen werden, ob der Einsatz möglich und effizient genug wäre. Für den Einstieg in die Thematik wurden die theoretischen Grundlagen der Thermoelektrizität erläutert und die Einflussfaktoren auf die elektrische Leistung und den Wirkungsgrad der Generatoren dargelegt. Nach der Ermittlung und Festlegung der im Fahrzeug vorherrschenden Randbedingungen und Temperaturen, wurden diese auf die Eigenschaften und technischen Daten des Generators bezogen. Eine durchgeführte Abgastemperaturmessung nach dem neuen europäischen Fahrzyklus an einem Versuchsfahrzeug lieferte die notwendigen Daten zur Betrachtung des Systems Abgas - Luft und Abgas - Kühlwasser. Drei Konzeptvarianten wurden entworfen, um die Wärmequellen und Wärmeabfuhr-Möglichkeiten miteinander zu kombinieren. Die überschlägige Dimensionierung der Wärmetauscher erfolgte nach theoretischen Vorgaben aus dem VDI- Wärmeatlas. Dabei trat ans Licht, dass sich die Wärmetauscherberechnung sehr komplex gestaltet. Detailliertere Berechnungen sind hier erforderlich und sollten durch Prüfstandtests bewiesen werden. Der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren im Kraftfahrzeug zur Stromerzeugung zeigt eine mögliche Variante der Effizienzsteigerung und Kraftstoffeinsparung auf. Ein solches System ist jedoch sehr komplex in Bezug auf die Thermodynamik an den Wärmetauschern und die gesamte elektrische Gestaltung. Es sind verschiedene Betriebszustände im täglichen Gebrauch des Fahrzeuges zu untersuchen und die einzelnen Module aufeinander abzustimmen. Die im freien Handel zugänglichen Modelle sind durch die geringe Temperaturfestigkeit von bis zu 250°C nicht geeignet, die Wärmeleistungen aus dem Abgas bei den entsprechend hohen Temperaturen zu nutzen. Einsatztemperaturen von bis zu 1000°C sind für eine effektive Nutzung der Abgaswärme unbedingt erforderlich. Die Abgaswärmetauscher sind in diesem Fall aus temperaturfesten Werkstoffen herzustellen. Weitere problematische Themen wie die Korrosions-empfindlichkeit, der hohe Masse- und Bauraumzuwachs durch die Wärmetauscher,

die unzureichende Schwingungs- und Zyklenfestigkeit schränken die Verwendung weiter ein. Hinsichtlich dieser Bedingungen und Problematiken sollte der thermoelektrische Generator für die spezielle Anwendung im Kfz weiterentwickelt werden. Mit den verwendeten Modulen können Wirkungsgrade von 2,5 bis 6,5% erreicht werden. Generell sind Wirkungsgradverbesserungen eines thermoelektrischen Generators nur durch Erhöhung des Seebeck-Koeffizienten und der Temperaturdifferenz sowie der Senkung der Wärmeleitfähigkeit zu erreichen. Speziell die Wärmetauscher von Luft und Abgas sollten für eine genaue Aussage über Leistungsfähigkeit und Dimensionierung des Systems explizit berechnet werden. Dichte- und Temperaturänderungen wurden an den Wärmetauschern nicht berücksichtigt. Diese Änderungen, die Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit der Fluide haben, werden die Leistung der Wärmetauscher und damit des gesamten Systems auf jeden Fall verringern. Am Vielversprechendsten sind die beiden Varianten, die Wärme aus dem Abgas entnehmen. Höhere Temperaturdifferenzen, im Vergleich zum Kühlwasser als Wärmequelle, erreichen gute elektrische Leistungen und Wirkungsgrade am TEG. Für elektrische Belange stehen zwei Möglichkeiten der Spannungsausgabe zur Verfügung. Zum Einen kann die durch Temperaturdifferenzen schwankende Ausgangsspannung mit einem Gleichspannungswandler zu einer festgelegten Spannung gewandelt werden. Zum Anderen besteht auch die Möglichkeit, die variable, höhere Ausgangsspannung direkt zur Batterieladung zu verwenden. In jedem Fall ist ein Energiemanagement erforderlich. Auf der Suche nach effizienzsteigernden Maßnahmen sollte der Blick auch auf bereits vorhandene Systeme gerichtet werden. Durch weitere Modifikationen an diesen Systemen und des Energiemanagements im Fahrzeug sind ebenfalls Wirkungsgradsteigerungen möglich. Eine Kombination mehrerer alternativer Systeme und dem thermoelektrischen Generator kann die elektrische Energieversorgung durch den elektrodynamischen Generator erheblich entlasten oder eventuell komplett ersetzen. Günstige und relativ einfach zu realisierende Möglichkeiten sind zum Beispiel die Solarzelle oder die Abgasturbine.

Generell kann der thermoelektrische Generator für Kraftfahrzeuge eingesetzt werden. Für eine optimale Verwendung und Auslegung des Systems im Betrieb müssen weitere Untersuchungen und Entwicklungen angestrebt werden. Deshalb ist der Einsatz mit der zurzeit verfügbaren Technologie nicht empfehlenswert.

Literaturverzeichnis

- [1] ***: Thomas Johann Seebeck, Deutsche Gesellschaft für Post- und Telekommunikationsgeschichte e.V., 13.05.08, http://www.dgpt.org/DE/Biografien/2006_Biografien/Thomas_Johann_Seebeck.php
- [2] Körtvélyessy, L.: Thermoelement- Praxis, 3. Aufl. Essen: Vulkan- Verlag, 1998 - ISBN 3-8027-2181-0
- [3] Werheit, H.: Vorläufige Konzeption eines Projektes zur Entwicklung von thermoelektrischen Generatoren aus Borverbindungen, 10.05.2008, <http://www.werheit.mynetcologne.de/06a%20projekt%20thermoel.html#top2>
- [4] Marti O., Plettl A.: Seebeck- Koeffizienten, 09.05.2008, http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/physikalischeelektronik/phys_elektr/node368.html
- [5] Paland, E.: Technisches Taschenbuch, 7. Aufl. Herzogenaurach: Schaeffler KG, 2002 - Sach-Nr. 002-042-061
- [6] Morawietz, E.: Bordnetz, 16.05.2008, <http://autolook.de/index.php?id=173>
- [7] ***: Generatoren und Starter, 1. Aufl. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2002 - ISBN 3-7782-2028-4
- [8] ***: Batterien und Bordnetze für Kraftfahrzeuge, 4. Aufl. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2002 - ISBN 3-7782-20003-9
- [9] Thein, M.: Bordnetze, Vorlesungsskripte Westsächsische Hochschule Zwickau, 16.05.2008, http://www.fh-zwickau.de/mbk/kfz_ee/praesentationen/Bordnetz.pps
- [10] ***: Thermoelektrische Generatoren, Meyers Lexikon, 08.05.2008, http://lexikon.meyers.de/meyers/Thermoelektrische_Generatoren

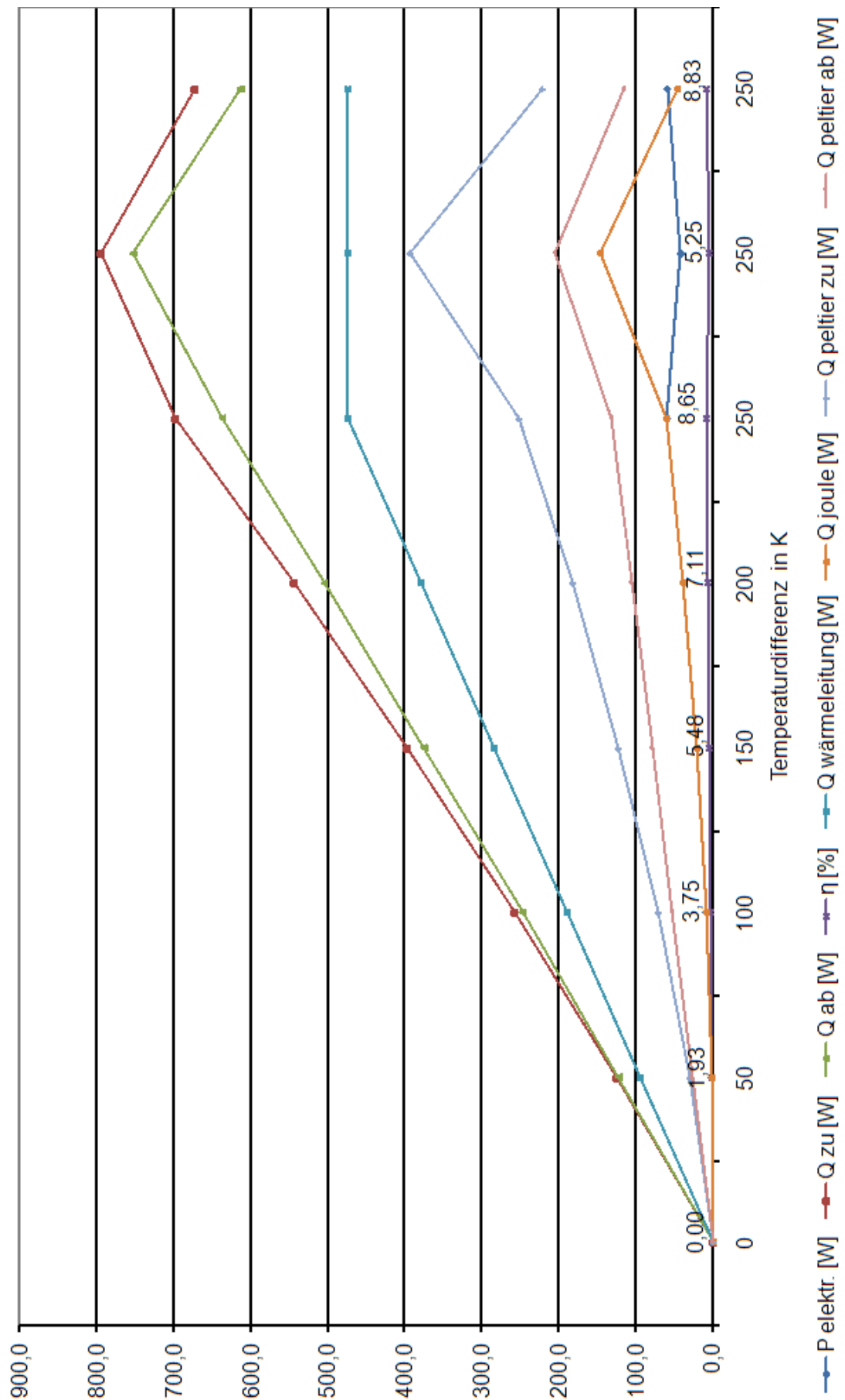
- [11] ***: Isotopenbatterie, Meyers Lexikon, 08.05.2008,
<http://lexikon.meyers.de/meyers/Isotopenbatterie>
- [12] Marti O., Plettl A.: Dotierung von Halbleitern, 15.05.2008,
http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/physikalischeelektronik/phys_elektr/node84.html
- [13] Janssen, K.: Was ist ein Halbleiter und was bedeutet Dotieren, 15.05.2008,
<http://olli.informatik.uni-oldenburg.de/weTEiS/weteis/halbleiter.htm>
- [14] Blaich, R.: Kühlen und Heizen mit Thermoelementen, 08.05.2008,
https://www.uni-hohenheim.de/lehre370/weinbau/bild_html/messen/p6.htm
- [15] ***: Peltierelemente, Conrad Electronic SE, 08.05.2008,
http://www2.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/189181-da-01-de-PELTIER-ELEMENT_QC-127-1_4-3_9M.pdf
- [16] ***: Thermoelektrische Generatoren, Eureka Messtechnik GmbH, 10.07.2008,
<http://www.eureca.de/neu-german/cooling/seebeck/cooling-seebeck-eureca.html>
- [17] Rokosch, U.: On-Board-Diagnose und moderne Abgasnachbehandlung, 1. Aufl. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, 2006 - ISBN 3-8343-3002-7
- [18] Khammas, A.: Buch der Synergie, 21.05.2008, http://www.buch-der-synergie.de/b_html/b_02_unterziele.htm
- [19] ***: Erläuterungen zu Peltierelementen, Quick-OHM Küpper & Co. GmbH, 29.05.2008, <http://www.quick-cool-waermetransfer.de/download/Erlaeuterung-zu-Peltierelementen.pdf>
- [20] Al- Hezmi, A.: Brennstoffzelle, 16.06.2008, <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/~ilse/Brennstoffzelle/Brennstoffzelle.htm>

- [21] ***: Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle, Deutsche BP AG, 17.06.2008, <http://www.deutschebp.de/glossarylinks.do?alphabetId=1055067&categoryId=9006055&contentId=7012358>
- [22] Heindl, G.: Funktionsweise einer Solarzelle, 17.06.2008, <http://www1.tu-darmstadt.de/fb/ms/fq/ofl/forschung/solarzellen/funktion.tud>
- [23] ***: Sonne, Deutsches Museum, 17.06.2008, <http://www.deutsches-museum.de/dmznt/klima/klimawandel/naturundklima/sonne/index.html>
- [24] Eichstädt, K.: Funktion des Turboladers, 17.06.2008, <http://www.e34.de/tuning/turbo.htm>
- [25] ***: BMW Turbosteamer - Funktionsweise, BMW Baureihenarchiv, 19.06.2008, <http://www.bmwarchiv.de/foto/34-6-bmw-turbosteamer-funktionsweise-schema.html>
- [26] ***: VDI Wärmeatlas, 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag, 2002 - ISBN 3-540-41200-X
- [27] Leder, A.: Grundlagen der Strömungsmechanik, 28.07.2008, <http://www.uni-rostock.de/lsm/inhalt/studium/UmdruckGSMTeil1.pdf>
- [28] Felder, H.: Abgaszusammensetzung, 25.07.2007, <http://mitglied.lycos.de/Autoelektrik/Erb.htm>
- [29] ***: Eigenschaften von Aluminiumoxid, Acertec GmbH, 24.08.2008, http://www.acertec.eu/f_ta.htm
- [30] ***: Nexa Power Module, Heliocentris Energiesysteme GmbH, 30.09.2008, http://www.heliocentris.com/fileadmin/user_upload/FuE_Loesungen/Nexa_en.pdf

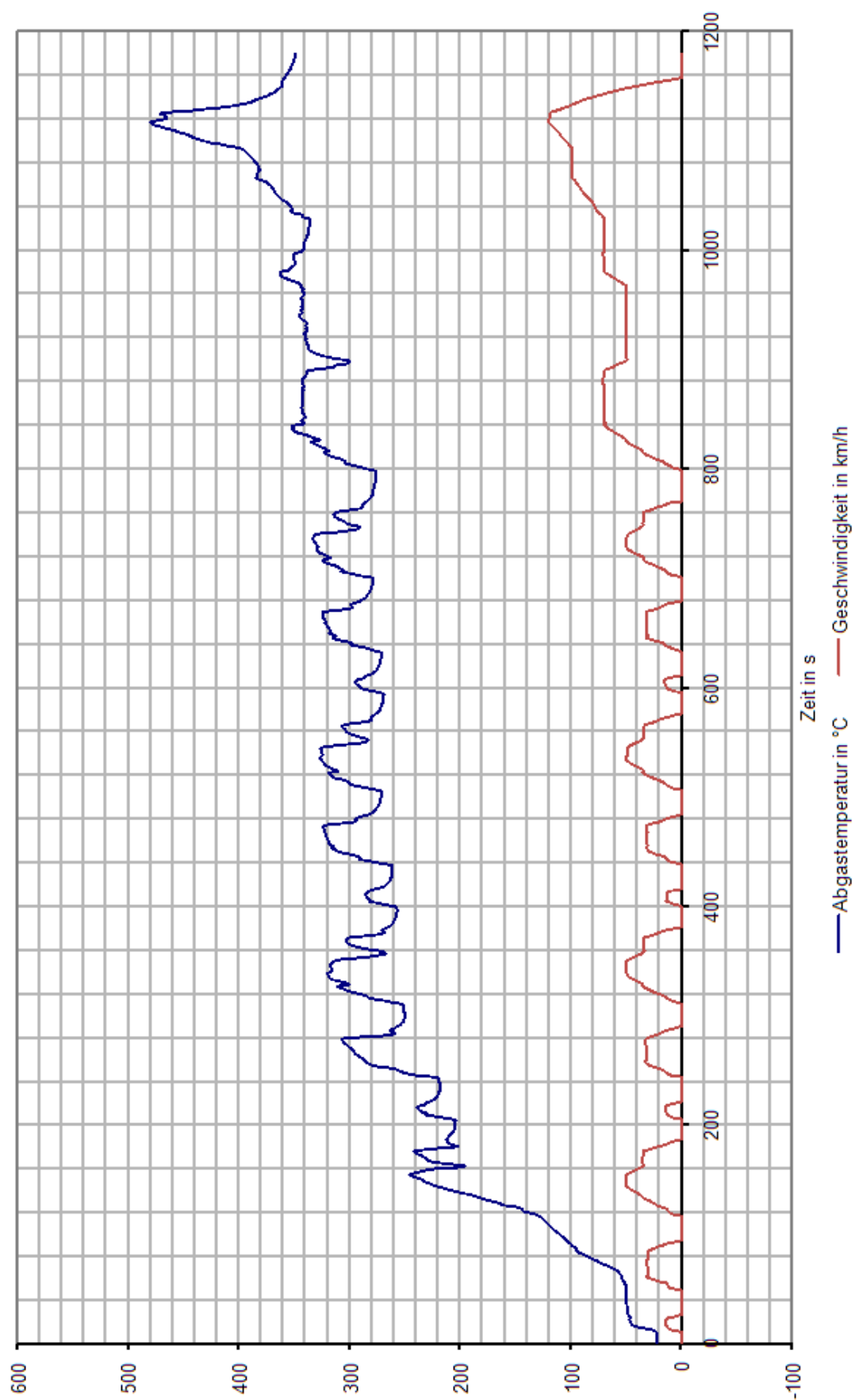
Anlagen

Anlage 1: Datenträger (CD-ROM)

Anlage 2: Werteverlauf TEG Nr. 12



Anlage 3: Abgastemperatur und Geschwindigkeit im NEFZ



Anlage 4: DC- DC- Wandler DR350-48-13,5

Anlage 5: DC- DC- Wandler DVC500-80-12

Anlage 6: TEG Nr. 7 (TEG1-40-40-10/100)

Anlage 7: TEG Nr. 12 (TEG2-50-50-40/200)