

Beiträge aus den Ingenieurwissenschaften

**Alexander Heghmanns**

**Konzeption, Optimierung und Evaluation von  
thermoelektrischen Generatorsystemen für den  
Einsatz in dieselektrischen Lokomotiven**

 VOGT

Dresden 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2017

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation  
„Konzeption, Optimierung und Evaluation von thermoelektrischen  
Generatorsystemen für den Einsatz in dieselektrischen Lokomotiven“ von  
Alexander Heghmanns überein.

© Jörg Vogt Verlag 2017  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-010-0

Jörg Vogt Verlag  
Niederwaldstr. 36  
01277 Dresden  
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921  
Telefax: +49-(0)351-31403918  
e-mail: [info@vogtverlag.de](mailto:info@vogtverlag.de)  
Internet : [www.vogtverlag.de](http://www.vogtverlag.de)

# Konzeption, Optimierung und Evaluation von thermoelektrischen Generatorsystemen für den Einsatz in dieselelektrischen Lokomotiven

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

Technische Universität Dresden  
Fakultät Maschinenwesen

## **Gutachter**

Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt  
Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

## **Vorsitzender der Promotionskommission**

Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann

Dipl.-Ing. Alexander Heghmanns  
geboren am 06. Oktober 1984 in Burgwedel

Tag der Einreichung: 25.04.2016  
Tag der Verteidigung: 10.02.2017



---

# Vorwort

Die erfolgreiche Forschung mit dem Ziel einer tiefgreifenden wissenschaftlichen Ausarbeitung, wie sie eine Promotion darstellt, kann nur in einem Umfeld gelingen, welches neben der notwendigen Unterstützung und Förderung auch den Raum für kreative Entfaltung, stete Motivation und anregende Diskussionen bietet. Ich bin froh, genau diese Rahmenbedingungen an der Professur für Dynamik und Mechanismentechnik der Technischen Universität Dresden, an welcher diese Arbeit entstand, sowie in meinem privaten Umfeld vorgefunden zu haben, und jenen Menschen dankbar, welche diese Bedingungen prägten.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Michael Beitelschmidt für die wunderbare und lehrreiche Zeit, die intensive wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit sowie meiner Förderung bereits als studentische Hilfskraft an seiner Professur. Prof. Dr. Peter Gratzfeld danke ich darüber hinaus für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Die finanzielle Unterstützung stellte das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des HiTEG-Forschungsprojekts (Förderkennzeichen 03X3548H) sicher, wofür ich mich ebenfalls ausdrücklich bedanken möchte. Die beteiligten Projektpartner sorgten mit ihren Diskussionen auf den regelmäßigen Statustreffen für viele interessante und kreative Anregungen. Hervorheben möchte ich die intensive Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch mit Dr. Gerhard Span und Dr. Georg Barthelmes. Darüber hinaus möchte ich Dr. Robert Schimke danken, welcher durch seine maßgebliche Mitarbeit am Projektantrag diese Untersuchung erst ermöglichte und meine wissenschaftliche Arbeit gerade in der Anfangszeit durch fachliche Diskussionen und gemeinsame Veröffentlichungen mit prägte. Ebenfalls danken möchte ich Karlheinz Geradts, welcher das Thema der Thermoelektrik für die Firma BOMBARDIER TRANSPORTATION verfolgte, einen intensiven Kontakt zur Professur sowie meiner Arbeit unterhielt und einer der kreativsten Köpfe ist, die ich in dieser Zeit kennenlernen durfte.

Sowohl unterstützend als auch motivierend war die Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter auch durch den Diskurs mit den vielen anderen Kollegen an der Professur. Insbesondere der Austausch mit Claudius Lein, Johannes Stier und Johannes Woller an unseren Doktorandenabenden war für mich sehr wertvoll. Meiner Büronachbarin Anja Jablonski möchte ich für die vielen interessanten Gespräche sowie für ihre Mithilfe in allen Angelegenheiten der Projektabrechnung danken.

Darüber hinaus sorgten eine Vielzahl von Diplomanden während der Bearbeitung ihrer von mir betreuten Arbeiten für regen fachlichen Austausch. Besonders erwähnen möchte ich dabei die hervorragenden und engagierten Arbeiten von Till Bestmann, Robert Borgmann und Sebastian Wilbrecht, welcher inzwischen selbst das Thema der Thermoelektrik als Doktorand an der Professur fortführt.

Neben diesem wissenschaftlichen Umfeld, wäre diese Arbeit niemals ohne die Motivation und unbedingte Unterstützung meiner Familie entstanden. Insbesondere bei meinen Eltern Kirsten und Michael sowie meiner Schwester Maria möchte ich mich dafür bedanken. Mein abschließender und ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Nora, die während der ganzen Promotionszeit Stütze, Anker und Inspiration für mich war und immer Verständnis für die viele Zeit aufbrachte, die notwendig war, um diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Ingolstadt, den 25.02.2017

Alexander Heghmanns

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Methoden der Abgasenthalpienutzung	3
1.3	Einordnung und Abgrenzung der Arbeit	6
1.4	Globaler Multi-Layer-Ansatz	8
1.5	Referenzfahrzeug	10
1.6	Gliederung der Arbeit	16
2	Thermoelektrik	17
2.1	Grundlagen	17
2.1.1	Wärmeleitung in Festkörpern	18
2.1.2	Ladungsträgertransport in Festkörpern	18
2.1.3	Thermoelektrische Effekte	18
2.1.4	Wirkungsgrad	19
2.2	Thermoelektromechanik	22
2.2.1	Thermisches Feld	22
2.2.2	Elektrisches Feld	23
2.2.3	Mechanisches Feld	24
2.2.4	Zusammenfassung	25
2.3	Modellierung	26
2.3.1	Finite-Elemente-Formulierung	27
2.3.2	Eindimensionaler Iterationsansatz	29
2.3.3	Modell mit konzentrierten Parametern	30
2.3.4	Analytischer Ansatz mittels asymptotischer Entwicklung	32
2.3.5	Vergleich	33
2.4	Leistungssteuerung	40
2.5	Stand der Technik	42
2.5.1	Thermoelektrische Module	43
2.5.2	Thermoelektrische Generatoren	44
2.6	Zusammenfassung	45
3	Mehrkriterielle Parameteroptimierung	47
3.1	Drei-Säulen-Konzept	48
3.2	Strukturoptimierung	49
3.3	Zielfunktion	49

3.4	Nebenbedingungen . . . . .	50
3.5	Pareto-Optimalität . . . . .	50
3.6	Pareto-Robustheit . . . . .	51
3.7	Optimierungsalgorithmus . . . . .	53
3.8	Genetischer Algorithmus mit lokalem Metamodell . . . . .	55
3.9	Zusammenfassung . . . . .	63
4	Parameteroptimierung von thermoelektrischen Modulen . . . . .	65
4.1	Stand der Technik . . . . .	65
4.2	Modellbildung und Ablauf . . . . .	69
4.3	Zielfunktionen . . . . .	70
4.4	Bewertungsfunktionen . . . . .	72
4.5	Optimierung . . . . .	74
4.5.1	Klassisches Modul . . . . .	76
4.5.2	Flexibles Modul . . . . .	90
4.5.3	Vergleich und Wahl einer Vorzugsvariante . . . . .	101
4.6	Zusammenfassung . . . . .	102
5	Simulation und Optimierung von thermoelektrischen Generatoren . . . . .	105
5.1	Stand der Technik . . . . .	105
5.2	Systembeschreibung . . . . .	108
5.3	Grundlagen . . . . .	114
5.3.1	Druckverlust . . . . .	115
5.3.2	Wärmeübergang . . . . .	117
5.4	Modellbildung . . . . .	122
5.4.1	Heißgaswärmetauscher . . . . .	123
5.4.2	Thermoelektrisches Modul . . . . .	126
5.4.3	Kühlkreisläufe . . . . .	127
5.4.4	Dieselmotor und Abgasstrang . . . . .	128
5.4.5	Energiebilanz . . . . .	129
5.5	Validierung . . . . .	130
5.5.1	Aufbau . . . . .	130
5.5.2	Vergleich mit Messdaten . . . . .	132
5.6	Parameteroptimierung . . . . .	134
5.6.1	Optimierungsmodell . . . . .	134
5.6.2	Zielfunktionen . . . . .	134
5.6.3	Optimierung . . . . .	135
5.7	Betriebsstrategie . . . . .	139
5.8	Zusammenfassung . . . . .	142
6	Verbrauchsberechnung von Schienenfahrzeugen mit thermoelektrischen Generatoren . . . . .	145
6.1	Grundlagen . . . . .	145
6.1.1	Fahrdynamik . . . . .	145
6.1.2	Antriebsstrang . . . . .	148
6.2	Modellbildung . . . . .	149
6.3	Optimale Trajektorienplanung . . . . .	152
6.3.1	Mixed Integer Linear Programming . . . . .	154



---

6.3.2	Dynamische Programmierung . . . . .	160
6.3.3	Erprobung der Implementierung . . . . .	166
6.4	Simulation . . . . .	172
6.4.1	Fahrscenarien . . . . .	172
6.4.2	Ergebnisse . . . . .	174
6.5	Zusammenfassung . . . . .	183
7	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	185
	Literaturverzeichnis . . . . .	191
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	203
	Tabellenverzeichnis . . . . .	209
	Anhang . . . . .	218
A	Referenzfahrzeug und Zugkonfigurationen . . . . .	219
A.1	Daten der TRAXX DE ME . . . . .	219
A.2	Daten der Züge . . . . .	220
A.2.1	Personenzug . . . . .	221
A.2.2	Güterzug . . . . .	221
B	Parameteroptimierung von thermoelektrischen Modulen . . . . .	223
B.1	Materialdaten . . . . .	223
B.2	Materialdaten . . . . .	227
C	Verbrauchsevaluation der berechneten Zugläufe . . . . .	237
C.1	Optimierungseinstellungen . . . . .	237
C.2	Fahrzeiten . . . . .	237
C.3	Verbrauch Personenzüge . . . . .	240
C.4	Verbrauch Güterzüge . . . . .	241
C.5	Dynamische Programmierung . . . . .	242
D	Sonstiges . . . . .	243
D.1	Verwendete Rechentechnik . . . . .	243
D.2	Erprobung Genetischer Algorithmus . . . . .	243



# Einleitung

Angesichts eines globalen Trends zu zusammenwachsenden Handelsmärkten und zunehmender Mobilität steigt das weltweite Güter- und Personenverkehrsaufkommen kontinuierlich<sup>1</sup>. Der damit einhergehende erhöhte Energiebedarf des Transport- und Mobilitätssektors bei gleichzeitiger Ressourcenverknappung sowie einer steigenden Umweltbelastung durch Schadstoff- und Lärmemissionen führt zu einem zunehmenden Erfordernis an umweltfreundlichen Verkehrsmitteln. Schienenfahrzeuge sind aufgrund ihrer hohen Förderkapazität und der im Vergleich zu Straßenfahrzeugen geringen Fahrwiderstände<sup>2</sup> ein umweltverträglicher Verkehrsträger. Dabei ist mit elektrischen Bahnen ein lokal schadstoffemissionsfreier Betrieb möglich, wobei für die tatsächliche Umweltbelastung der für die Stromerzeugung verwendete Primärenergieträger und die Übertragungsverluste des Stromnetzes beachtet werden müssen. Trotz einer fortschreitenden Elektrifizierung der Bahnstrecken sind in Deutschland 45,6 % [Sta13, S. 4] und weltweit rund Dreiviertel der Strecken nicht elektrifiziert, wobei der Anteil zwischen den einzelnen Regionen erhebliche Unterschiede aufweist [SCI14, S. 1]. So betrug im Jahr 2014 der Grad der Elektrifizierung innerhalb Nordamerikas lediglich 1 % des Streckennetzes, während er in Westeuropa 53 % aufwies [SCI14, S. 1]. Damit hat sich seit dem Jahr 1990 der Anteil elektrifizierter Strecken um lediglich 9 % erhöht<sup>3</sup>. Ursächlich für diesen langsamen Fortschritt sind die hohen Kosten für den Ausbau der Strecken, welche, trotz des höheren spezifischen Primärenergiebedarfs von dieselbetriebenen Schienenfahrzeugen, eine Elektrifizierung nur auf stark ausgelasteten Strecken wirtschaftlich rentabel werden lässt<sup>4</sup>. Folglich wird im Schienenverkehr auf dieselbetriebene Fahrzeuge weiterhin ein erheblicher Anteil der weltweiten Transportleistung entfallen, was die Betrachtung von innovativen Technologien zur Reduktion des Kraftstoffbedarfs und damit Erhöhung der Umweltverträglichkeit

---

1 Innerhalb der EU stiegen zwischen den Jahren 2000 und 2008 das Güterverkehrsaufkommen um 2,1 % p.a. und das Personenverkehrsaufkommen um 1,2 % p.a.. Für die Jahre bis 2020 wird eine durchschnittliche Steigerungsrate von 0,9 und 0,6 % p.a. prognostiziert. [IS10, S. 7]

2 Der systematische Vorteil im Fahrwiderstand von Schienen- gegenüber Straßenfahrzeugen ergibt sich aus der geringeren Rollreibung des Stahl-Stahl Kraftschlusses im Rad-Schiene-Kontakt im Vergleich zum Gummi-Fahrbahn-Kontakt sowie der Möglichkeit der Zugbildung im Schienenverkehr und der damit einhergehenden Verringerung des aerodynamischen Fahrwiderstands. Der spezifische Fahrwiderstand von Kraftfahrzeugen wird von LEIBBRAND fünf- bis achtmal höher als bei Schienenfahrzeugen angegeben [Lei80, S. 48]. STAIGER geht je nach betrachtetem Fahrzeug von einer ähnlichen Größenordnung aus [Sta08, S. 10].

3 Nach FILIPOVIĆ betrug im Jahr 1990 der weltweite Anteil elektrifizierter Strecken 16 % [Fil92, S. 15].

4 Die Kosten für die Elektrifizierung von Schienenstrecken werden für das Jahr 2008 von BUSCHBACHER mit 20 Millionen CZK/km abgeschätzt [Bus08, S. 59]. Dies entspricht nach heutigem Wechselkurs ca. 750 000 EUR/km.

notwendig macht. Aufgrund ihres hohen Antriebswirkungsgrads, der Möglichkeit des rekuperativen Bremsens zur Versorgung der elektrischen Nebenaggregate und der Zugsammelschiene sowie des Potenzials zur Hybridisierung mit elektrischen Speichern kommt dabei der dieselektrischen Lokomotive für den Personenregional- und Güterverkehr eine besonders große Bedeutung zu.

Während die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – mittels der energiesparenden Fahrweise von FRANKE et al. [FMT02], HOWLETT [How00], SCHIMKE [Sch12] und WANG et al. [WDN11, WDvN13], des Einsatzes von Traktions speichern von KACHE [Kac14], MEINERT et al. [MMK15], SCHIMKE [Sch12] und SPIRYAGIN et al. [SWS15], der intelligenten Nebenaggregatesteuerung von BEUSEN et al. [BDD13], HEGHMANNNS et al. [HSB14] und POWELL et al. [PGGP14] sowie der Nutzung der Abwärme zur Klimatisierung oder innerhalb alternativer Abgasenthalpierekuperationsverfahren von GONZÁLEZ-GIL et al. [GGPP14] und JACKSON [Jac11] in der Literatur bereits untersucht wurden, ist der Einsatz eines thermoelektrischen Generators (TEG) im Abgasstrang eines dieselbetriebenen Schienenfahrzeugs noch nicht betrachtet worden. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, diese Lücke durch die Konzeption, Optimierung und Evaluation eines TEG-Systems für eine dieselektrische Lokomotive mittels numerischer Verfahren zu schließen und Aussagen über die Realisierbarkeit und das Kraftstoffeinsparpotenzial im realen Betrieb zu treffen. Dabei werden Methoden und Verfahren zur optimalen Gestaltung der wesentlichen Systembestandteile sowie deren Betrieb entwickelt und innerhalb der Simulation angewendet. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz von dieselektrischen Schienenfahrzeugen und bietet Lösungsansätze zur Erhöhung der Systemeffizienz von TEG sowie zum Umgang mit Zielkonflikten bei deren Gestaltung. Die Forschungstätigkeiten wurden dabei im Rahmen des HiTEG-Verbundprojekts<sup>5</sup> innerhalb der THERMPOWER-Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durchgeführt<sup>6</sup>.

## 1.1 Motivation

Obwohl die Dieselmotorenteknik nach ihrer über hundertjährigen Entwicklungsgeschichte als ausgereift angesehen werden kann, beträgt der Wirkungsgrad aktueller 4-Takt-Aggregate lediglich 35 bis 45 % [BS15, S. 20; KG07, S. 5-7], womit ein Großteil der im Kraftstoff gespeicherten chemischen Energie dissipiert wird. Der größte Anteil mit  $\geq 90\%$  wird dabei zu näherungsweise gleichen Teilen über das Kühlsystem und das Abgas an die Umgebung abgegeben [BS15, S. 806]. Die Erschließung dieser, in der gleichen Größenordnung wie die verrichtete mechanische Arbeit des Motors liegenden, Energiequellen mittels geeigneter Technologien bietet damit ein erhebliches Potenzial zur Erhöhung des Systemwirkungsgrads.

TEG bieten die Möglichkeit der direkten Umwandlung eines Wärmestroms in elektrische Leistung mittels des in thermoelektrisch aktiven Festkörpermaterialien ausgeprägten SEEBECK-Effekts. Aufgrund der Abwesenheit von beweglichen Teilen haben TEG das Potenzial zu einer hohen Zuverlässigkeit [Bel08, S. 1457f], weswegen sie schon heute in Anwendungen verwendet werden, bei denen eine hohe Robustheit unter extremen Umgebungsbedingungen gefordert ist, jedoch die Effizienz nur eine geringe Bedeutung hat [Bel08, S. 1460].

<sup>5</sup> Abkürzung für *High Temperature Thermoelectric Generators*.

<sup>6</sup> Förderkennzeichen: 03X3548H

BELL stellt in [Bel08] zwei grundsätzliche Wege zur Effizienzsteigerung von TEG-Systemen heraus: Die Verbesserung des thermoelektrischen Materials selbst oder der Art und Weise, wie thermoelektrische Materialien zum Einsatz kommen. Obgleich in den letzten Jahren nennenswerte Erfolge bei der Materialentwicklung erzielt wurden, konnten diese Ergebnisse nicht auf einen industriellen Maßstab skaliert werden. Daher stellt eine Optimierung innerhalb der Anwendungen mit vorhandenen Materialien einen erstrebenswerten zweiten Weg dar. Eine Effizienzsteigerung eines bestehenden thermoelektrischen Materials geht in der Regel mit einer Erhöhung der Temperaturdifferenz und damit der thermomechanischen Spannungen einher, welche das zentrale thermoelektrische Modul schädigen können und somit der potenziellen Zuverlässigkeit des TEG entgegen stehen. Weiterhin ergeben sich Zielkonflikte aus den in Abschnitt 1.5 genannten Randbedingungen innerhalb der Applikation, wie zum Beispiel ein maximales Volumen und ein maximaler Abgasgedruck. Für all diese Herausforderungen müssen geeignete Lösungsverfahren entwickelt und erprobt werden.

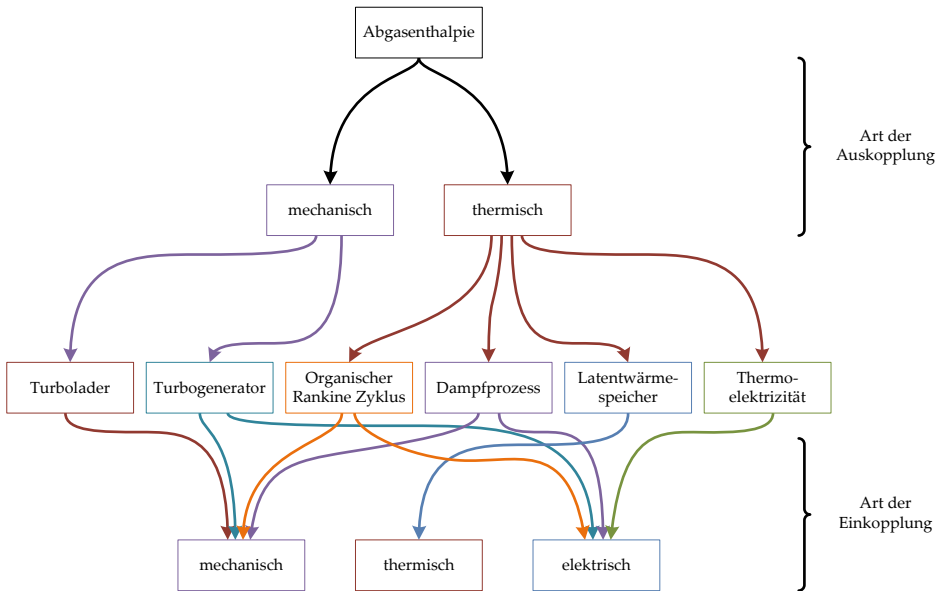
Besonders in der Automobilindustrie und in stationären Anwendungen wurden hier in den letzten Jahren Arbeiten vorgestellt, welche jedoch den vollständigen Weg von der Konzeption über die Optimierung bis hin zur Evaluation im realen Betrieb und in vielen Fällen die inhärenten Zielkonflikte nicht erfassen. Einen Überblick über diese Arbeiten liefern die Abschnitte 4.1 und 5.1. Schienenfahrzeuge wurden darüber hinaus für die Anwendung von TEG in der Literatur noch nicht betrachtet, obwohl die hohe Leistungsklasse der verwendeten Dieselmotoren die Anwendung großer TEG-Systeme möglich macht. Diese weisen geringere parasitäre Verluste auf und sind daher besonders geeignet [Bel08, S. 1459].

Aufgrund der hohen Entwicklungskosten von Prototypen im Schienenfahrzeugverkehr [Sch12, S. 2] ist eine Konzeption, Optimierung und Evaluation mittels rechnergestützter Verfahren sinnvoll. Dazu müssen geeignete Modelle entworfen, Zielfunktionen definiert und Bewertungsverfahren entwickelt werden. Ziel dieser Arbeit ist ein ganzheitlicher Optimierungsansatz von TEG-Systemen für dieselektrische Schienenfahrzeuge zur Auflösung der herrschenden technischen Zielkonflikte, um die im Schienenfahrzeugverkehr notwendige Zuverlässigkeit bei ausreichender Systemleistung zu erschließen. Abschließend sollen Aussagen über die erreichbaren Kraftstoffeinsparungen unter verschiedenen Einsatzbedingungen getroffen werden. Die dazu notwendigen Verfahren sollen für die Bewertung zukünftiger TEG-Systeme dieselektrischer Lokomotiven und, nach entsprechender Adaption, auch für andere Anwendungen geeignet sein.

## 1.2 Methoden der Abgasenthalpienutzung

Neben der Thermoelektrizität existieren weitere Methoden zur Nutzung der im Abgas enthaltenen Enthalpie. In diesem Abschnitt soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – ein kurzer Überblick über existierende und in der Entwicklung befindliche Verfahren gegeben werden.

Eine mögliche Klassifikation der betrachteten Methoden zeigt Abbildung 1.1, wobei die einzelnen Konzepte nach der Art der Enthalpieauskopplung und Rückspeisung in den primären Prozess klassifiziert sind.



**Abbildung 1.1:** Klassifikation der Methoden zur Abgasenthalpienutzung nach Art der Enthalpieaus- und -einkopplung

### Prozesse mit mechanischer Enthalpieauskopplung

Unter den Verfahren mit mechanischer Auskopplung sind Turbolader- und Turbogeneratorkonzepte zu nennen. Turbolader werden zur Verdichtung der Ladeluft von Verbrennungsmotoren verwendet und durch Nutzung des Abgasdrucks oder der Bewegungsenergie des Abgases angetrieben. Durch die Applikation der Turboaufladung ist bei Dieselmotoren eine Effizienzsteigerung um 30 bis 50 % bei gleicher Leistung [SRM12, S. 5656] oder eine Leistungssteigerung möglich. Turboaufgeladene Dieselmotoren, teilweise mit mehreren Turboladerstufen, sind Stand der Technik. Die in dieser Arbeit betrachtete und in Abschnitt 1.5 vorgestellte dieselektische Lokomotive wird durch vier Dieselmotoren mit zweistufiger Turboaufladung angetrieben.

Turbogeneratorkonzepte<sup>7</sup> nutzen ebenfalls den Abgasdruck oder die Bewegungsenergie des Abgases, um entweder über eine entsprechende mechanische Übersetzung der Kurbelwelle des Dieselmotors ein zusätzliches Drehmoment zuzuführen oder einen elektrischen Generator anzutreiben. Aktuelle Systeme erreichen Einsparungen von ca. 3 % bei Nutzfahrzeugdieselmotoren je nach Einsatzprofil [AKK14, S. 415], wobei durch Optimierungsmaßnahmen ein Potential von über 4 % erwartet wird [AKK14, S. 415; HGR14, S. 396]. Besonders im Teillastbereich sind negative Wirkungsgrade möglich, so dass zur Beurteilung des Systemwirkungsgrads das Lastprofil des Motors bekannt sein muss.

<sup>7</sup> Turbogeneratoren werden oftmals mit dem englischen Fachbegriff *Turbo-Compound* bezeichnet.

*Prozesse mit thermischer Enthalpieauskopplung*

Als Verfahren mit thermischer Enthalpieauskopplung lassen sich der Organische Rankine Zyklus (ORC)<sup>8</sup>, Dampfprozesse, Latentwärmespeicher und die in dieser Arbeit behandelte Thermoelektrizität klassifizieren. Der Organische Rankine Zyklus und der Dampfprozess haben dabei gemein, dass jeweils ein flüssiges Medium in einem Wärmetauscher verdampft wird, um einen Expander anzutreiben. Dieser kann analog zum Turbogenerator entweder an die Kurbelwelle oder an einen Generator, zur Erzeugung elektrischer Energie, angeflanscht werden. Beim ORC werden organische Flüssigkeiten mit einer geringen Verdampfungswärme verwendet, was eine höhere Effizienz bei niedrigen Arbeitstemperaturen ermöglicht. Beim Dampfprozess wird Wasser, gegebenenfalls mit einem Frostschutzmittel, eingesetzt. Grundsätzlich hängt besonders die Effizienz des ORC stark von der Wahl des eingesetzten Arbeitsmediums ab, welches auf die Prozesstemperaturen abgestimmt sein sollte [CGS10, S. 3066]. Eine Anpassung an weite Arbeitsbereiche kann sich daher als schwierig erweisen. Für ORC-Prototyp-Systeme von den Firmen HONDA und BMW werden im Personenkraftwagenbereich Einsparpotentiale von 10 % und mehr angegeben [SRM12, S. 5655], während für den Nutzfahrzeugbereich von der Firma CUMMINS die Entwicklung eines Systems mit einem Einsparziel von 10 % angestrebt wird [Nel08, S. 3]. Ein von der Firma VOITH TURBO GMBH unter dem Markennamen STEAMTRAC für die Applikation in Schienenfahrzeuge mit mittlerer Dieselleistung unter 1000 kW entwickeltes Dampfprozesssystem erreicht unter Testbedingungen auf einem Prüfstand 4 bis 7 % Kraftstoffeinsparungen [WF14, S. 780].

Latentwärmespeicher können dazu genutzt werden, thermische Energie im Bereich des Phasenübergangs des Latentwärmespeichermaterials zu speichern. Die Wärme kann anschließend etwa zum Heizen der Wagen über ein geeignetes Transportmedium genutzt werden. Dies kann zum Beispiel Wasser oder Thermoöl sein. Entsprechende Systeme sind im Schienenfahrzeugbereich nicht im Einsatz, da die für den Transport des Heizmediums notwendige Verrohrung ein hohes zusätzliches Volumen und zusätzliche Masse erfordern würde. Zudem sind bei lokbespannten Zügen die notwendigen Schnittstellen zwischen den Wagen nicht vorhanden, so dass die Integration in eine bestehende Fahrzeugflotte schwierig ist.

Mit Hilfe der Thermoelektrizität ist es möglich, einen über eine Temperaturdifferenz aufrecht erhaltenen Wärmestrom direkt in elektrische Leistung umzuwandeln. Dazu kommen sogenannte thermoelektrische Module (TEM) zum Einsatz, die zusammen mit einem Abgaswärmetauscher und einer Kühlung einen TEG bilden. Auf die genaue Funktionsweise und den thermoelektrischen Effekt wird im folgenden Kapitel 2 detaillierter eingegangen. Thermoelektrische Module kommen ohne bewegliche Teile aus und sind daher nahezu wartungsfrei. Allerdings sind die erreichbaren Leistungen durch die Materialeigenschaften des thermoelektrischen Materials begrenzt, wie in Abschnitt 2.1.4 näher betrachtet wird. Aufgrund der hohen Temperaturen beim Einsatz im Abgassystem eines Dieselmotors ergeben sich erhebliche Herausforderungen hinsichtlich der mechanischen Festigkeit, wie in Kapitel 4 diskutiert wird. Für den mobilen Einsatz wurden bisher nur Systeme im Prototypenstadium, vorwiegend im Automobilbereich, vorgestellt, wobei die veröffentlichten Kraftstoffeinsparungen stark variieren. So ermittelten KÜHN et al. ein Einsparpotential von ca. 2,1 bis 2,75 % an bestimmten Arbeitspunkten, wobei ca. 40 % dieser Einsparungen auf die Druckreduktion in Folge der Abgaskühlung zurückgeführt wird [KKK14, S. 1525f]. YU et

<sup>8</sup> Die Herkunft der üblichen Abkürzung ORC liegt im oftmals gebräuchlichen englischen Fachbegriff *Organic Rankine Cycle*.

al. berichten dagegen bei ihrem vorstellten System von 0,78 % Kraftstoffeinsparungen im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)<sup>9</sup> [YDD15, S. 376]. Für die Abgasenthalpienutzung von diesel-elektrischen Schienenfahrzeugen wurde die Thermoelektrizität abseits dieser Arbeit noch nicht betrachtet.

### *Gegenüberstellung*

Vergleicht man die vorgestellten Systemansätze hinsichtlich ihres Einsparpotentials, ihrer Komplexität und Wartungsfreiheit, ergeben sich spezifische Vor- und Nachteile. Angesichts der berichteten Kraftstoffeinsparungen sind Dampfprozesse und Organische Rankine Zyklen (ORC) den übrigen Methoden, abgesehen von der Turboaufladung, derzeit überlegen. Allerdings ist die Komplexität dieser Systeme aufgrund der hohen Anzahl an Komponenten wie Speisepumpe, Verdampfer, Kondensator und Expander hoch. Hinzu kommt bei Dampfprozessen ein relativ hoher Systemdruck von bis zu 60 bar. Aufgrund der hohen Abhängigkeit des ORC vom eingesetzten Medium ist eine Abstimmung auf alle im Betrieb auftretenden Arbeitspunkte eines Schienenfahrzeugs nicht ohne Weiteres möglich. Turbogeneratoren erreichen zwar nur geringere Einsparziele, sind hinsichtlich ihrer Systemarchitektur jedoch weniger komplex, wobei dennoch erwähnt werden muss, dass die Entwicklung solcher Systeme aufgrund der notwendigen Dynamik und der hohen Temperaturen eine Herausforderung darstellt. Der potenziell negative Wirkungsgrad im Teillastbereich stellt einen Nachteil dar, welcher bei der Bewertung und Anpassung des Systems bedacht werden muss. Die Turboaufladung ist bereits Stand der Technik und für die Einhaltung geltender Emissionsziele von hoher Bedeutung. Allerdings ist die Anwendung der übrigen Abgasenthalpienutzungssysteme in Kombination mit dem Turbolader bedenkenlos möglich und sinnvoll.

Die Verwendung von thermoelektrischen Generatoren bietet derzeit im Vergleich zum Dampfprozess und ORC zwar ein geringeres Einsparpotential, ermöglicht jedoch eine sehr viel geringere Systemkomplexität und niedrigeren Wartungsaufwand bei potentiell hoher Lebensdauer. Aufgrund der kleineren Anzahl an Systemkomponenten ist zudem eine höhere Leistungsdichte möglich. Herausforderungen bestehen neben der thermomechanischen Integration in der Erforschung und industriellen Hochskalierung von effizienten thermoelektrischen Materialien, wo noch eine erhebliche Effizienzsteigerung erwartet wird [SRM12, S. 5651].

Weiterhin kann sich eine Kombination der Prozesse mit mechanischer und thermischer Enthalpieauskopplung als günstig erweisen, sofern die thermischen Arbeitsbereiche gut aufeinander abgestimmt werden. Dies wurde von MILLER et al. bei der Kombination eines ORC und eines thermoelektrischen Generators (TEG) in [MHP09] gezeigt. In dem vorgestellten System hat der eingesetzte TEG keinen negativen Einfluss auf den ORC und steigert die Leistung ausreichend, um die parasitären Verluste vom ORC für zum Beispiel die Pumpe auszugleichen [MHP09, S. 1212].

## 1.3 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit

Innerhalb der Konzeptphase eines TEG-Systems für den Schienenverkehr ist die Identifizierung und adäquate Beantwortung einer Vielzahl von technischen Fragestellungen maßgeblich für die

---

<sup>9</sup> Der NEFZ ist ein synthetischer Fahrzyklus zur Bewertung des Kraftstoffverbrauchs von Privatkraftwagen.



Entscheidung über eine sich anschließende Realisierung beziehungsweise Serienentwicklung. Diese Arbeit hat zum Ziel, sukzessive die Teilkomponenten eines TEG-Systems für den Einsatz in einer dieselelektrischen Lokomotive mit Hilfe numerischer Methoden zu bewerten und zu optimieren. Dabei werden, soweit es in der Konzeptphase möglich ist, realitätsnahe Randbedingungen angenommen, um eine hohe und belastbare Ergebnisgüte zu erzielen. Die einzelnen Komponenten werden dabei in einem globalen Optimierungsansatz in Beziehung gesetzt und mit geeigneten, mehrkriteriellen Optimierungsverfahren untersucht. Je nach Komplexität des Modells ist dazu eine Erweiterung der bekannten Optimierungsalgorithmen angezeigt, um die Konvergenzgeschwindigkeit zu erhöhen.

Auf Basis der einzelnen Bestandteile des TEG-Systems knüpft die vorliegende Arbeit an bestehende Untersuchungen an, erweitert die Betrachtung jedoch um neue Aspekte, wie beispielsweise der Einsatz globaler Optimierungsalgorithmen, die Beachtung realistischer Einsatz- und Randbedingungen und die Bewertung aller, in thermoelektrischen Modulen (TEM) befindlichen, Komponenten zur Sicherstellung der mechanischen Festigkeit. Eine detaillierte Analyse des Stands der Technik ist in den jeweiligen Abschnitten 2.5, 4.1 und 5.1 enthalten.

Für die vorliegenden, konzeptionellen Untersuchungen sollen notwendige Einschränkungen getroffen werden. So beschränkt sich die thermomechanische Auslegung des TEM auf den quasistatischen Zustand. Dies wird aufgrund hoher thermischer Kapazitäten im Abgasstrang als zulässig angenommen. Weiterhin wird eine dauerfeste Auslegung angestrebt, wobei Kriechvorgänge aufgrund zyklischer thermischer Belastung, insbesondere der Lotverbindungen innerhalb der TEM, nicht betrachtet werden. Aufgrund der Temperatureinwirkung stattfindende chemische Zersetzungs Vorgänge der im TEM enthaltenen Materialien sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

Die Systembetrachtung findet auf der Basis eines Leistungsflussmodells statt, welches die wesentlichen energetischen und thermischen Zusammenhänge physikalisch korrekt darstellt und eine belastbare, energetische Systembewertung zulässt sowie die Einhaltung vorgegebener Randbedingungen überprüfbar macht. Dies wird über eine Modellvalidierung mit einem Demonstrator sichergestellt. Ziel der Systembetrachtung ist die abschließende Berechnung des Kraftstoff einsparungspotenzials sowie die Bewertung der technischen Realisierbarkeit. Eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit ist nicht Gegenstand der Arbeit, da die dafür notwendigen Kostenmodelle für die eingesetzten Materialien, die Serienentwicklung und die Produktion nicht zur Verfügung stehen. Aufgrund der Beschränkung auf die Konzeptphase werden weiterhin konstruktive und fertigungstechnische Fragestellungen nur peripher behandelt.

Als Referenzfahrzeug für die Untersuchung dient die dieselelektrische Lokomotive TRAXX DE ME der Firma BOMBARDIER TRANSPORTATION GMBH, welche in Abschnitt 1.5 detailliert vorgestellt wird. Die entwickelten und verwendeten Algorithmen und Optimierungsmodelle haben jedoch den Anspruch, auf andere dieselelektrische Fahrzeuge übertragbar zu sein. Der gewählte globale Optimierungsansatz erlaubt weiterhin die Extraktion und Adaption einzelner Optimierungsschritte für abweichende, thermoelektrische Anwendungen.

Prinzipiell kann ein Eingriff in den Abgasstrang eines Verbrennungsmotors ungünstige Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs bewirken. Durch Einhaltung des vom Motorenherstellers spezifizierten Abgasgedrucks, für welchen die gegebenen Verbrauchswerte gelten, wird diese Möglichkeit ausgeschlossen. Die akustischen Systemeigenschaften werden innerhalb dieser Arbeit nicht betrachtet.

## 1.4 Globaler Multi-Layer-Ansatz

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Problemstellungen und Optimierungsaufgaben adressieren unterschiedliche physikalische Effekte sowie Zeitkonstanten verschiedener Größenordnungen, welche zu ihrer Lösung mit geeigneten mathematischen Modellen beschrieben werden müssen. Es ist daher naheliegend, für jedes Teilproblem ein individuelles Modell zu erstellen und in einem globalen Ansatz auf geeignete Weise miteinander zu verknüpfen. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Aufgaben und Suboptimierungsprobleme vorgestellt und innerhalb eines globalen Multi-Layer-Ansatz miteinander in Beziehung gesetzt.

Das zentrale Element eines TEG stellt das TEM dar, innerhalb dessen die Umwandlung eines Wärmestroms in elektrische Leistung erfolgt. Auf die genaue Wirkungsweise von TEM wird in Kapitel 2 dieser Arbeit eingegangen. Um dem Abgas einen möglichst hohen Enthalpiestrom zu entnehmen sowie den innerhalb des TEM nicht umgewandelten Wärmestrom abzuführen, werden des Weiteren Wärmetauscher auf der heißen und kalten Seite des TEM benötigt. Der Verbund aus TEM und Wärmeübertrager wird als TEG bezeichnet.

Da das TEM nicht nur das zentrale Element eines TEG darstellt, sondern, wie in Kapitel 4 näher erläutert wird, gleichzeitig hohe thermomechanische Belastungen erfährt, ist es zweckmäßig, die Konzeption, Auslegung und Optimierung des Gesamtsystems mit ihm zu beginnen und alle weiteren Komponenten darauf abzustimmen. Gleichzeitig ist es aufgrund der geringen thermischen und elektrischen Zeitkonstanten des TEM gegenüber den übrigen Komponenten im Abgasstrang des Referenzfahrzeugs möglich, dieses als statisch anzusehen. Der Entwurf und die Optimierung des TEG ist dagegen an quasistationären Arbeitspunkten möglich, während die letztendliche Bewertung des Systems nur innerhalb von dynamischen Fahrabläufen sinnvoll ist, da nur so abschließend die Einhaltung aller betrieblichen Randbedingungen und das thermische Verhalten der beteiligten Kühlkreisläufe evaluiert werden kann. Damit können das TEM, der TEG und die Systembewertung als die das globale Problem charakterisierenden Ebenen identifiziert werden, welche mit Modellen unterschiedlicher Abstraktionsgrade und Komplexität beschrieben werden können.

Grundsätzlich wäre es denkbar, die Optimierung des TEG-Systems in einem einzigen Modell mit sehr hoher Komplexität und Entwurfsvariablenanzahl durchzuführen. Dem stehen jedoch hohe Rechenzeiten und eine hohe Entwurfsraumdimension entgegen. Ein Ansatz zur Reduktion der Rechenzeit ist die Verschachtelung des Optimierungsproblems in Teilmodelle und Suboptimierungsprobleme mit jeweils hinreichend genauer Abbildung der interessierenden Effekte und Definition der Schnittstellen zwischen den Modellen. Ausgehend von jeder Variante des jeweils übergeordneten Optimierungsproblems wird dabei rekursiv die Optimierung der untergeordneten Probleme durchgeführt, womit die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten aller Entwurfsvariablen erhalten bleibt. Demzufolge sind diesem Ansatz in der Praxis Grenzen gesetzt, sobald mehrere Suboptimierungsprobleme definiert werden müssen oder die Berechnung der Zielfunktionen (siehe Abschnitt 3.2) mindestens eines Teilproblems längere Zeit beansprucht.

Im vorliegenden Fall treten mehrere Suboptimierungsprobleme mit teilweise langen Berechnungszeiten auf, so dass die Zerlegung in Suboptimierungsaufgaben nicht zielführend ist. Eine Lösung für diese Problemklassen bietet die Multilevel- oder Multi-Layer-Optimierung, bei der das Optimierungsproblem in Teilprobleme dekomponiert wird, welche anschließend nacheinander gelöst werden [Kir93, S. 225ff; Sch13, S. 148ff]. Die Herausforderung dabei ist es, die Teilprobleme mit

den zugehörigen Entwurfsvariablen derart zu definieren, dass das globale Optimum des Gesamtproblems gefunden wird.

Hier ergeben sich auf natürliche Weise die drei Teilprobleme des TEM, des TEG und der Systembewertung, welche eine Fahrtrajektorienoptimierung beinhaltet, da diese, wie bereits erläutert, Modellansätze unterschiedlicher Komplexität und Abstraktionsgrade beinhalten und konstruktiv sinnvoll voneinander trennbar sind. Abbildung 1.2 zeigt den vollständigen in dieser Arbeit behandelten Multi-Level-Ansatz, welcher sich jeweils in Konzeptions- und Entwurfs-, Modellbildungs- sowie Optimierungs- und Bewertungsphase gliedert. Zwischen den Ebenen wird jeweils ein gewählter Entwurfsvariablevektor an die nächste Ebene weiter gereicht und in die entsprechende Modellklasse abstrahiert. Aufgrund des hohen Abstraktionsgrades bei der mathematischen Beschreibung des TEG (siehe Abschnitt 5.4) ist hier außerdem eine Validierung des Modells vor der eigentlichen Optimierung zweckmäßig.

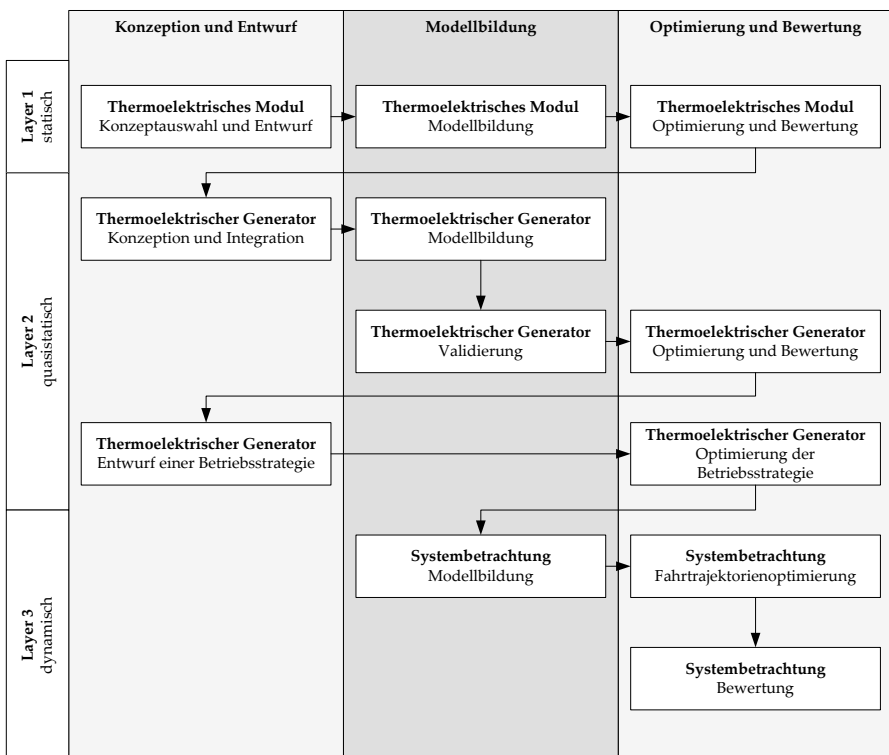


Abbildung 1.2: Globaler Multi-Layer-Optimierungsansatz

Ziel des verfolgten Ansatzes ist die Integration eines optimierten Entwurfsprozesses für ein TEG-System zum Einsatz in dieselektischen Schienenfahrzeugen am Beispiel des im folgenden Abschnitt 1.5 vorgestellten Referenzfahrzeugs. Der Ansatz ist dabei prinzipiell auf andere, insbe-

sondere mobile, Anwendungen übertragbar, da viele der in dieser Arbeit beschriebenen Problemstellungen für TEG-Systeme allgemeingültig sind.

## 1.5 Referenzfahrzeug

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Referenzfahrzeug handelt es sich um die von der Firma BOMBARDIER TRANSPORTATION GMBH entwickelte und in Abbildung 1.3 dargestellte dieselelektrische TRAXX P160 DE ME<sup>10</sup> Lokomotive. Die Besonderheit dieser Lokomotive ist die Leistungsbereit-



**Abbildung 1.3:** TRAXX DE ME (Quelle: BOMBARDIER TRANSPORTATION GMBH)

stellung über vier Dieselmotoren mit je 563 kW maximaler Leistung, welche über permanent erregte Synchronmaschinen (PSM) und ungesteuerte B6-Gleichrichterbrücken gemeinsam einen elektrischen Zwischenkreis versorgen, wie in Abbildung 1.4 im vereinfachten Strukturbild der Lokomotive illustriert ist. Ausgehend vom elektrischen Zwischenkreis werden die Traktionsumrichter für die elektrische Versorgung der Fahrmotoren, der Hilfsbetriebeumrichter für den Betrieb der Nebenaggregate und des Bordnetzes sowie die Zugsstromversorgung gespeist. Im Bremsbetrieb kann ein Teil der in der Fahrzeugmasse gespeicherten potentiellen und kinetischen Energie über die generatorisch betriebenen Fahrmotoren elektrisch in den Zwischenkreis rekuperiert und somit die Zugstrom- und Hilfsbetriebeversorgung unterstützt oder vollständig übernommen werden. Übersteigt die elektrische Bremsleistung die Summe der Zugstrom- und Hilfsbetriebeleistung, kann die überschüssige Leistung verschleißfrei über den Bremswiderstand dissipiert werden. Erst bei einer höheren Bremsleistung oder bei niedrigen Geschwindigkeiten<sup>11</sup> wird die mechanische Bremse hinzugenommen.

Ein Vorteil der Leistungsbereitstellung über vier Dieselmotoren ist die Möglichkeit, die einzelnen Aggregate leistungsbedarfsgerecht zu steuern und somit über möglichst große Arbeitsbereiche der Lokomotive im Verbrauchsoptimum zu halten [SHBG11, S. 45]. Beim vorliegenden Konzept

<sup>10</sup> Diesel Electric Multi Engine.

<sup>11</sup> Bei niedrigen Geschwindigkeiten wird die elektrodynamische Bremswirkung der Fahrmotoren heruntergenommen um ein Blockieren der Räder und damit die Gefahr von Flachstellen zu vermeiden.

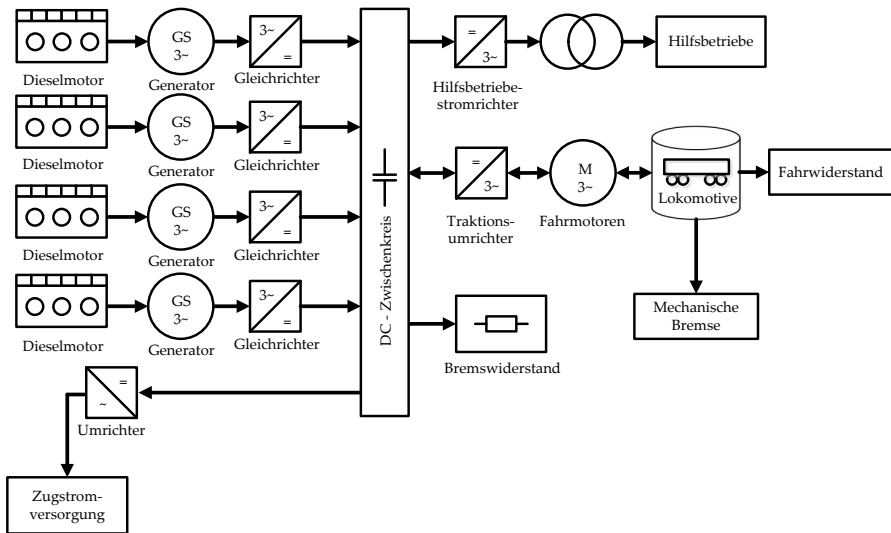


Abbildung 1.4: Vereinfachtes Strukturbild der TRAXX DE ME

wird dies jedoch durch die Verwendung von PSM und ungesteuerten Gleichrichterbrücken eingeschränkt, da nur Dieselmotor-Generatorsätze (Gensets) innerhalb eines Drehzahlbandes in der Nähe des am schnellsten laufenden Gensets zur Leistungsbereitstellung beitragen können [SHB11, S. 56]<sup>12</sup>. Diese Einschränkung hat in numerischen und experimentellen Untersuchungen jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Systemdynamik gezeigt [HSBG12, S. 74f]. Eine verbrauchsoptimale Betriebsstrategie kann, unter der Forderung, dass leistungserzeugende Gensets immer annähernd die gleiche Drehzahl aufweisen müssen, auf Basis der sogenannten Generatorkurve eines Gensets

$$n_{DM} = f(P_{DM}) \quad (1.1)$$

welche einen direkten Zusammenhang zwischen der Dieselmotordrehzahl  $n_{DM}$ , der geforderten Leistung  $P_{DM}$  und damit auch des Momentanverbrauchs  $\dot{m}_K = f(P_{DM})$ , der Abgastemperatur  $T_A = f(P_{DM})$  und des Abgasmassenstroms  $\dot{m}_A = f(P_{DM})$  (siehe Abbildungen 1.6 und A.1 im Anhang dieser Arbeit) herstellt, erfolgen. Eine verbrauchsoptimale Betriebsstrategie kann nun

<sup>12</sup> Die Klemmspannung von PSM ist drehzahl-, temperatur- und lastabhängig. Die Drehzahl ist bei den verwendeten Generatoren jedoch der Haupteinflussfaktor.

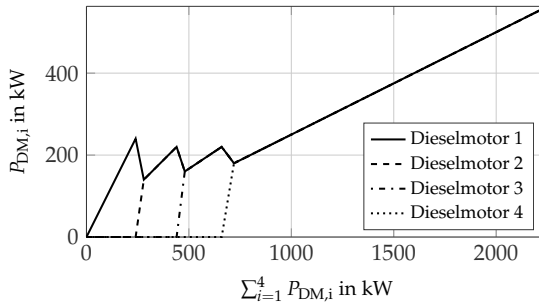
durch Lösung des Optimierungsproblems

$$\dot{m}_{\text{DM,ges}}(P_{\text{ZK}}) = \min_{a, n_{\text{DM}}} \left[ a \cdot \dot{m}_{\text{DM}} \left( \frac{\eta_{\text{B6}} \cdot P_{\text{ZK}}}{a \cdot \eta_{\text{Gen}} \left( \frac{\eta_{\text{B6}} \cdot P_{\text{ZK}}}{a}, n_{\text{DM}} \right)}, n_{\text{DM}} \right) \right] \quad (1.2)$$

mit

$$a \in \mathbb{Z}; a = [1, 4]; n \in [n_{\text{DM,min}}, n_{\text{DM,max}}]$$

bestimmt werden [SHBG11, S. 47], wobei  $P_{\text{ZK}}$  der geforderten elektrischen Last am Zwischenkreis,  $\eta_{\text{B6}}$  und  $\eta_{\text{Gen}}$  dem Gleichrichter- und dem drehzahl und lastabhängigen Generatorwirkungsgrad sowie  $a$  der Anzahl leistungserzeugender Gensets im entsprechenden Arbeitspunkt entsprechen. Neben der verbrauchsoptimalen Steuerung können weitere Forderungen wie zum Beispiel eine monoton steigende Generatorkurve bestehen, welche die letztendlich applizierte Betriebsstrategie beeinflussen. Für das Referenzfahrzeug wurde schließlich seitens des Herstellers die in Abbildung 1.5 dargestellte Betriebsstrategie gewählt.

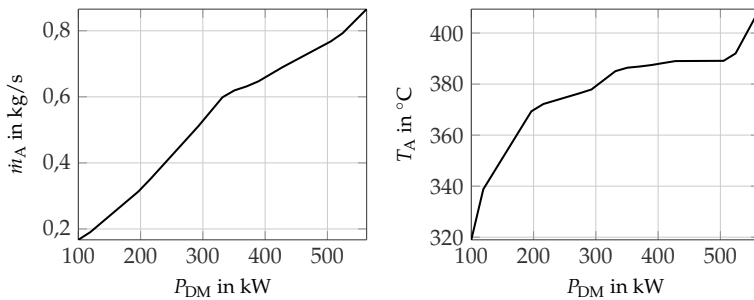


**Abbildung 1.5:** Leistungsverzweigung zwischen den Dieselmotoren der TRAXX DE ME in Abhängigkeit der Gesamtdieselmotorleistung

Um die Belastung der Dieselmotoren über die Betriebsdauer möglichst gleich zu verteilen, wird zusätzlich die erzeugte Energie eines jeden Gensets ermittelt. Wird ein zusätzliches Genset zur Bereitstellung der geforderten Zwischenkreisleistung angefordert, wird dasjenige mit der bisher geringsten erzeugten Energie verwendet. Die Beachtung dieser Betriebsstrategie ist für die Bewertung des in dieser Arbeit untersuchten TEG-Systems essentiell.

Der in dieser Arbeit betrachtete TEG soll in den in Abbildung 1.7 dargestellten Abgasstrang der TRAXX DE ME anstelle des Schalldämpfers integriert werden. Die schalldämpfende Wirkung des TEG ist dabei jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit und bedarf weiterführender Untersuchungen. Es müssen jedoch die für den Schalldämpfer geltenden Randbedingungen und Grenzwerte wie das maximale Einbauvolumen und ein maximal zulässiger Abgasgedruck von 25 mbar eingehalten werden.

Über die am Schalldämpfer in Abhängigkeit der Dieselmotorleistung auftretenden Abgasmassenströme und -temperaturen ist eine erste Prognose der erreichbaren Systemleistung möglich. Ziel des TEG ist die partielle Nutzung der Abgasenthalpie  $H_A$  mit Hilfe von thermoelektrischen Modulen (TEM). Zu diesem Zweck wird dem Abgas mit Hilfe eines Wärmetauschers ein Enthalpiestrom  $\dot{H}_A$



**Abbildung 1.6:** Abgastemperatur und Abgasmassenstrom am Schalldämpfer der TRAXX DE ME (Quelle: BOMBARDIER TRANSPORTATION GMBH)

entzogen, welcher aus der Differenz der Abgaseintrits- und Austrittstemperatur mit

$$\dot{H}_A = (T_{A,\text{ein}} - T_{A,\text{aus}}) \cdot c_{p,A}(T_M) \cdot \dot{m}_A \quad (1.3)$$

abgeschätzt werden kann [BS15, S. 46]. Geht man nun davon aus, dass dem Abgas mit Hilfe des Wärmetauschers genug Enthalpie entzogen werden kann, um eine Temperaturdifferenz zwischen 100 und 200 K zwischen Ein- und Austritt zu erreichen, ergibt sich das in Abbildung 1.8 dargestellte Enthalpiestromkennfeld für einen der eingesetzten Dieselmotoren. Bezogen auf den jeweiligen Arbeitspunkt des Dieselmotors lässt sich dem Abgas ca 40 % der an der Kurbelwelle verfügbaren mechanischen Leistung entziehen. Bei einer realistischen Gesamtsystemeffizienz für mobile Anwendungen zwischen 1 und 3 %<sup>13</sup> ließe sich somit die Dieselmotorleistung bei Einsatz eines TEG um maximal ca. 0,4 bis 1,2 % erhöhen. Da dies eine nur geringe Lastpunktverschiebung zur Folge hat, kann die Änderung des Kraftstoffverbrauchs näherungsweise mit dem gleichen Faktor abgeschätzt werden, wobei weitere Faktoren, wie zum Beispiel die Effizienz der tatsächlichen elektrischen Übertragungsstrecke des TEG, mit in die Betrachtung eingehen müssen (siehe Abschnitt 5.2).

Das Zugkraftdiagramm mit den Fahrwiderständen der im folgenden vorgestellten Zugkonfigurationen ist in Abbildung 1.9 dargestellt.

<sup>13</sup> Nur wenige Quellen nennen den Systemwirkungsgrad des jeweils betrachteten TEG, so dass an dieser Stelle zunächst nur eine Abschätzung auf Grundlage der für TEG-Systeme auf Basis von Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Modulen, wie sie in dieser Arbeit genutzt werden (siehe Abschnitt 2.1.4), verfügbaren Informationen möglich ist. LI et al. berichten für einen TEG zur Nutzung der Sonnenstrahlung eine Systemeffizienz von 0,9 bis 6,2 % bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten auf der kalten Seite [LCZ10, S. 1529]. CRANE et al. erreichen für ein TEG-System zur Nutzung der in einem Kühlkreislauf enthaltenen Enthalpie einen Gesamtsystemwirkungsgrad von ca. 1,6 % [CJ04, S. 1577]. NAGAO et al. nennen für ein TEG-System zur Nutzung der Abgasenthalpie eines Kraftwerks eine Systemeffizienz von 3,88 % [NNS98, S. 472]. THACHER et al. ermitteln in einer Anwendung zur Nutzung der Abgasenthalpie in einem leichten Nutzfahrzeug eine arbeitspunktabhängige Systemeffizienz von 1 bis 1,7 %, wobei der Einfluss auf das Kühlsystem in der Betrachtung nicht enthalten ist [THKR07, S. 103]. KARRI et al. untersuchen in einer Fallstudie die Nutzung der Abgasenthalpie in einer Automobilanwendung. Die erreichte Systemeffizienz liegt je nach Arbeitspunkt zwischen 1,26 und 2,25 % [KTH11, S. 1606].

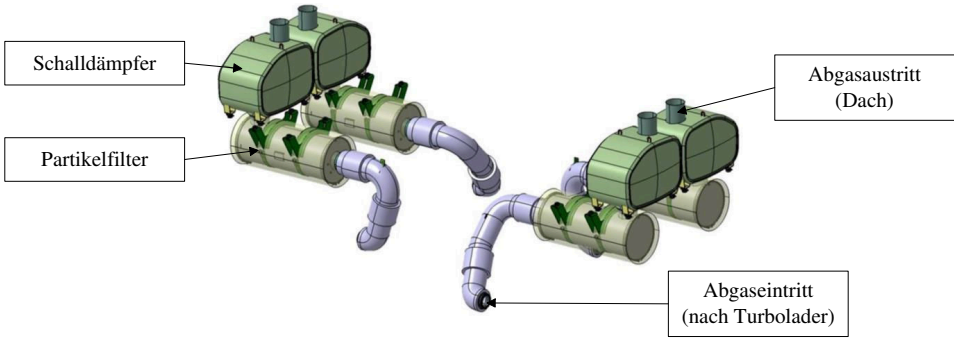


Abbildung 1.7: Abgasanlage der TRAXX DE ME (Quelle: BOMBARDIER TRANSPORTATION GMBH)

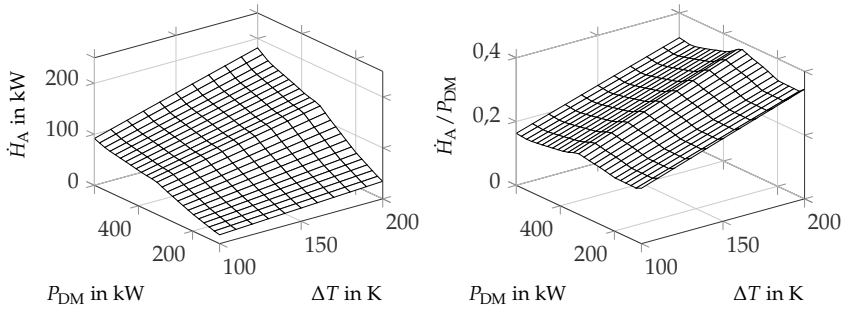


Abbildung 1.8: Absoluter und auf die Dieselmotorleistung bezogener Enthalpiestrom für einen Dieselmotor der TRAXX DE ME in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

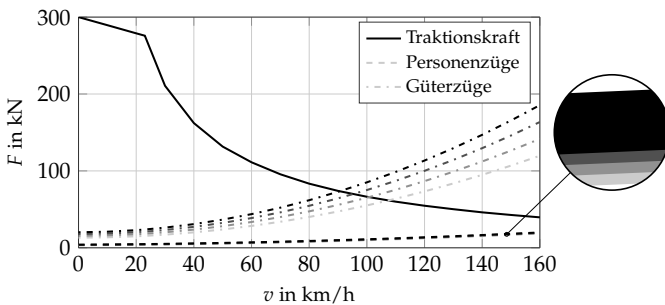


Abbildung 1.9: Zugkraftdiagramm und Fahrwiderstände der Beispielzüge



### Untersuchte Zugkonfigurationen

Zu Vergleichszwecken werden in dieser Arbeit die in Tabelle 1.1 zusammengefassten Personen- und Güterzugkonfigurationen untersucht. Bei den Personenzugkonfigurationen handelt es sich um einen mit einer TRAXX DE ME bespannten Doppelstockwagenzug mit insgesamt fünf Wagen, welche unterschiedliche Besetzungsgrade<sup>14</sup> aufweisen (Abbildung 1.10). Aufgrund der Ähnlichkeit



Abbildung 1.10: Zugkonfiguration des Personenzugs

zur von SCHIMKE untersuchten Zugkonfiguration wurde der Fahrwiderstand in Anlehnung an seine Messungen bestimmt [Sch12, S. 81ff]. Die Leistung der Zugstromversorgung wird mit 42,5 kW<sup>15</sup> angenommen.

Tabelle 1.1: Untersuchte Zugkonfigurationen. P: Personenzug, G: Güterzug

Bezeichnung	Typ	$n_W$	$l_{\text{Zug}}$ in m	$m_{\text{Zug}}$ in t	$v_{\text{max}}$ in km/h
PZ025	P	5	153,37	382,8	160
PZ050	P	5	153,37	426,5	160
PZ075	P	5	153,37	470,3	160
PZ100	P	5	153,37	514,0	160
GZ020	G	20	408,90	1084,0	100
GZ024	G	24	486,90	1284,0	100
GZ028	G	28	564,90	1484,0	100
GZ032	G	32	642,90	1684,0	100

Die untersuchten Güterzüge unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der Wagen, wobei Zugkonfigurationen mit 20, 24, 28 und 32 Wagen untersucht werden<sup>16</sup> (Abbildung 1.11). Die vollständigen Daten zu den verwendeten Zugkonfigurationen sind in Anhang A.2 zusammengefasst. Abbildung 1.9 zeigt die resultierenden geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstände  $F_{FW,v}$  aller untersuchten Zugkonfigurationen. Darin ist zu sehen, dass die zusätzliche Masse der Fahrgäste bei den Personenzügen nur einen geringen Einfluss auf  $F_{FW,v}$  hat. Es ergeben sich im Gefälle und in der Steigung jedoch wesentliche Unterschiede.

14 Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass jeder Fahrgast auf einem Sitzplatz sitzt. Ein Besetzungsgrad von 100 % entspricht somit einem Wagen, bei dem jeder Sitzplatz belegt ist. Die Masse eines Fahrgastes wird nach DIN 33402-2 unter der Annahme, dass sich weibliche und männliche Personen zu gleichen Anteilen im Fahrzeug befinden und diese im Mittel dem 50. Perzentil der Altersklasse von 18 bis 65 Jahren der in Deutschland lebenden Personen entsprechen, berechnet. Damit ergibt sich eine mittlere Masse pro Person von  $m_{\text{Person}} = 1/2 \cdot (m_{\text{weiblich}} + m_{\text{männlich}}) = 1/2 \cdot (66 + 79) \text{ kg} = 72,5 \text{ kg}$ . [DIN05, S. 8]

15 Nach SCHÄTZER beträgt die maximale Scheinleistung eines Doppelstockwagens 67 kVA [Sch11, S. 4]. Unter der Annahme einer Auslastung von 2/3 und einem Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,95$  ergibt sich eine Wirkleistung von  $\approx 42,5 \text{ kW}$  pro Wagen.

16 In Deutschland betragen die Zuglängenfaktoren für Güterzüge 0,85 m/t bis 0,32 m/t je nach Beladungszustand bei einer maximalen Güterzugmasse von 3000 t für die Einzeltraktion [KL13, S. 8]. Da dieselektrische Lokomotiven über eine erheblich geringere Leistung verfügen als elektrische Lokomotiven wird in dieser Arbeit von einer maximalen Güterzugmasse von 1600 t und einer Ausnutzung von 33 % des Zuglängenfaktors ausgegangen. Bei einer Wagenlänge von 19,5 m ergibt sich damit eine maximale Wagenanzahl von 32 zu je 50 t Gesamtmasse.

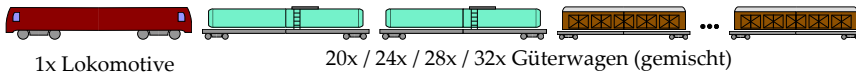


Abbildung 1.11: Zugkonfigurationen der Güterzüge

## 1.6 Gliederung der Arbeit

Die Gliederung des nachfolgenden Inhalts der Arbeit orientiert sich an dem in Abschnitt 1.4 vorgestellten Multi-Layer-Optimierungsansatz. Zunächst werden in Kapitel 2 Einführungen in die Thermoelektrik und Thermoelektromechanik gegeben sowie Berechnungsansätze vor- und gegenübergestellt. Im Hinblick auf die nachfolgenden Problemstellungen werden geeignete Ansätze ausgewählt. Weiterhin werden Möglichkeiten der Leistungssteuerung von thermoelektrischen Modulen und Generatoren diskutiert. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über den Stand der Technik von TEG-Systemen.

Als Vorbereitung für die anstehenden Optimierungsaufgaben in Kapitel 4 und 5 führt Kapitel 3 in Anlehnung an das 3-Säulen-Konzept von ESCHENAUER in die mehrkriterielle Parameteroptimierung mit Fokus auf den in dieser Arbeit verwendeten genetischen Optimierungsalgorithmus ein. Weiterhin wird eine Erweiterung des Algorithmus zur effizienten Lösung von Problemen mit numerisch aufwändig berechenbaren Zielfunktionen vorgeschlagen und anhand von geeigneten Testfunktionen überprüft.

Kapitel 4 behandelt die Parameteroptimierung des thermoelektrischen Moduls für den Einsatz im Referenzfahrzeug. Dazu wird zunächst ein Überblick über den Stand der Technik und Wissenschaft in diesem Themengebiet gegeben und es werden Erkenntnisse für die anstehenden Aufgaben abgeleitet. Anschließend erfolgt die Modellbildung und Optimierung eines klassischen und eines flexiblen Moduls. Nach detaillierter Analyse der Ergebnisse wird ein Modul für die Verwendung in der Referenzapplikation ausgewählt.

Das thermoelektrische Modul stellt das zentrale Element des in Kapitel 5 konzeptionierten thermoelektrischen Generators dar. Zu Beginn wird auch hier ein Überblick über den Stand der Technik und Wissenschaft gegeben. Dies stellt die Basis für die Auswahl eines Systementwurfs, die Einbindung des benötigten Kühlkreislaufes sowie die elektrische Integration dar. Anschließend erfolgt eine Beschreibung der zur Modellierung des Wärmetauschers notwendigen Druck- und Konvektionsgleichungen. Nach erfolgter Modellbildung und Validierung wird eine Parameteroptimierung des thermoelektrischen Generators durchgeführt und eine geeignete Variante ausgewählt. Diese stellt die Grundlage für die Entwicklung einer systemleistungsorientierten Betriebsstrategie dar.

Zur Berechnung der Kraftstoffeinsparungen beim Einsatz eines thermoelektrischen Generators in der betrachteten dieselektrischen Lokomotive wird in Kapitel 6 ein fahrdynamisches Modell der betrachteten Züge mit einem Leistungsflussmodell des Antriebsstrangs entwickelt. Da die Kraftstoffeinsparungen erwartungsgemäß wesentlich von der Dieselmotorleistung abhängen, werden Verfahren zur Bestimmung von energieoptimalen Fahrtrajektorien vorgestellt und ein geeigneter Ansatz zur Implementierung ausgewählt. Die zeit- und energieoptimalen Fahrten auf drei unterschiedlichen Strecken der vorgestellten Güter- und Personenzüge bilden die Basis zur Bestimmung der erreichbaren oberen und unteren Kraftstoffeinsparungsgrenzen. Abschließend erfolgt die detaillierte Auswertung des TEG-Systemverhaltens, bevor Kapitel 7 ein Resümee zieht und Vorschläge für nachfolgende Untersuchungen unterbreitet.

# Thermoelektrik

Die Thermoelektrizität ist für die Funktionsweise von thermoelektrischen Modulen (TEM) und Generatoren (TEG) von fundamentaler Bedeutung und soll daher in diesem Kapitel ausführlich behandelt werden. Dazu werden zunächst die thermoelektrischen Effekte des SEEBECK-, PELTIER- und THOMSON-Effekts eingeführt, mit denen das FOURIER'sche Gesetz erweitert und somit die Wärmeleitung durch thermoelektrische Materialien beschrieben werden kann. Um die in dieser Arbeit in Kapitel 4 ausführlich betrachteten thermomechanischen Belastungen, welche auf die TEM wirken, erfassen zu können, wird anschließend das thermoelektrische Zweifeldproblem um die mechanische Bilanzgleichung zu einem Dreifeldproblem erweitert. Nach Einführung der lokalen Bilanzgleichungen werden unterschiedliche Ansätze zur Modellierung von TEM diskutiert und hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Effizienz gegenübergestellt. Mit Hinblick auf die in dieser Arbeit zu berechnenden TEM und TEG in Kapitel 4, 5 und 6 werden geeignete Modelle ausgewählt.

Da weiterhin zur bestmöglichen Ausnutzung von TEM eine geregelte Lastanpassung erforderlich ist, werden Möglichkeiten der Leistungssteuerung und Verschaltung von TEM in einer Systemanwendung diskutiert und eine für die Zielanwendung geeignete Variante gewählt. Mit einem Überblick über den Stand der Technik von TEM und TEG endet schließlich das Kapitel.

## 2.1 Grundlagen

Bereits 1821 entdeckte THOMAS JOHANN SEEBECK mit Hilfe einer Kompassnadel, dass ein aus verschiedenen Materialien bestehender Stromkreis, dessen Kontaktstellen unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt sind, ein magnetisches Feld erzeugt [See22, S. 11f]. Mit dem ein Jahr zuvor von HANS CHRISTIAN ØRSTED entdeckten Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität [Ørs20, S. 4] war der thermoelektrische SEEBECK-Effekt nachgewiesen. Später, im Jahr 1834 beobachtete JEAN CHARLES ATHANASE PELTIER an einem Übergang von zwei stromdurchflossenen, unterschiedlich leitenden Materialien eine Erwärmung oder Abkühlung der Übergangsregion, je nach Flussrichtung des elektrischen Stroms und damit die Umkehrung des SEEBECK-Effekts, den PELTIER-Effekt [Bel08, S. 1457].

Beiden Effekten ist ursächlich, dass bei Anwesenheit eines Spannungsgradienten über der Kontaktstelle in der Übergangsregion unter Energieaufnahme Ladungsträger in Form von Elektronen und Löchern entstehen, welche anschließend davon wegfließen. Am anderen Ende der verbundenen

Leiter werden die Ladungsträger unter Energieabgabe rekombiniert. Dies führt zu einer Abkühlung der einen und zu einer Erwärmung der anderen Übergangsregion. Bei Anwesenheit eines Temperaturgradienten werden auf der heißen Seite der Leiter Ladungsträger unter Energieaufnahme produziert und auf der kalten Seite unter Energieabgabe rekombiniert. Eine beobachtbare Spannungsdifferenz, die sogenannte *SEEBECK*-Spannung, treibt dabei die Ladungsträger an. [Bel08, S. 1457]

In thermoelektrischen Generatoren wird somit ein durch einen Temperaturgradienten verursachter Wärmestrom in elektrische Leistung umgewandelt. Im Folgenden werden die zur Beschreibung dieses Effekts notwendigen Wärmetransport- und Thermoelektrizitätsgleichungen beschrieben.

### 2.1.1 Wärmeleitung in Festkörpern

Die Wärmeleitung in Festkörpern bezeichnet einen von einem im Material vorhandenen Temperaturgradienten  $\nabla T$  verursachten Energietransport zwischen benachbarten Molekülen und, in leitenden Werkstoffen, zusätzlich durch freie Elektronen [BS13, S. 3]. Beschrieben werden kann sie über den Vektor der Wärmestromdichte mit dem *FOURIER*'schen Gesetz

$$\mathbf{q}_{\text{Fourier}} = -\kappa_T \nabla T \quad (2.1)$$

mit der Matrix der Wärmeleitungskoeffizienten  $\kappa_T$  [BS13, S. 4].

### 2.1.2 Ladungsträgertransport in Festkörpern

Der Ladungsträgertransport in Festkörpern wird durch das *OHM*'sche Gesetz beschrieben. Bei Anwesenheit eines elektrischen Feldes  $\mathbf{E}$  kommt zu einem Ladungsträgertransport in Form einer elektrischen Stromdichte  $\mathbf{j}$  (2.2), oder vice versa (2.3). Der Zusammenhang zwischen elektrischem Feld und Stromdichte wird durch die Leitfähigkeitsmatrix  $\sigma_\varphi$  bzw. der Widerstandsmatrix  $\rho_\varphi = \sigma_\varphi^{-1}$  des Materials hergestellt.

$$\mathbf{j}_{\text{Ohm}} = \sigma_\varphi \mathbf{E}_{\text{Ohm}} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{E}_{\text{Ohm}} = \sigma_\varphi^{-1} \mathbf{j} = \rho_\varphi \mathbf{j} \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Thermoelektrische Effekte

#### *SEEBECK-Effekt*

In einem elektrisch leitenden Körper, der einem Temperaturgradienten ausgesetzt ist, entsteht durch Ladungsträgerdiffusion ein elektrisches Feld  $\mathbf{E}_\alpha$ , dessen Stärke von der im Allgemeinen temperaturabhängigen Matrix der *SEEBECK*-Koeffizienten  $\alpha_\varphi$  und dem Temperaturgradienten selbst abhängt [Sny06, S. 9-3].

$$\mathbf{E}_\alpha = \alpha_\varphi \nabla T \quad (2.4)$$

*PELTIER-Effekt*

Die durch den PELTIER-Effekt verursachte Wärmestromdichte ist das Produkt der elektrischen Stromdichte mit der Matrix der PELTIER-Koeffizienten  $\mathbf{\Pi}_\varphi$  des leitenden Materials. Mit Hilfe der 1. KELVIN-Beziehung  $\mathbf{\Pi}_\varphi = \alpha_\varphi T$  kann die Gleichung mit Hilfe der SEEBECK-Koeffizientenmatrix ausgedrückt werden:

$$\mathbf{q}_{\text{Peltier}} = \mathbf{\Pi}_\varphi \mathbf{j} = \alpha_\varphi T \mathbf{j} \quad (2.5)$$

*THOMSON-Effekt*

Der THOMSON-Effekt beschreibt die Veränderung des Wärmetransports in einem stromdurchflossenen Leiter, der einem Temperaturgradienten ausgesetzt ist, in Abhängigkeit der THOMSON-Koeffizientenmatrix  $\mu_\varphi$ . Mit der Beziehung  $\mu_\varphi = T \frac{\partial \alpha_\varphi}{\partial T}$  kann der THOMSON-Effekt in Abhängigkeit der SEEBECK-Koeffizientenmatrix zu

$$\dot{q}_{\text{Thomson}} = -\mu_\varphi \mathbf{j} \cdot \nabla T = -T \frac{\partial \alpha_\varphi}{\partial T} \mathbf{j} \cdot \nabla T \quad (2.6)$$

umformuliert werden.

Der THOMSON-Effekt wird in vielen Arbeiten als klein gegenüber den anderen thermoelektrischen Effekten angenommen und daher oftmals vernachlässigt<sup>17</sup>. Nach SANDOZ-ROSADO [SR09, S. 32f] und CHEN et al. [CYW96, S. 8827] ist diese Annahme zwar für die Temperaturverteilung im Leiter korrekt, führt jedoch zu einem hohen Fehler im thermischen Fluss, womit der THOMSON-Effekt essentiell für die Berechnung der thermoelektrischen Leistung ist. Er sollte daher bei der Betrachtung von Anwendungen zur thermoelektrischen Leistungserzeugung nicht vernachlässigt werden.

## 2.1.4 Wirkungsgrad

Wird ein thermoelektrisch aktives Material von einem Wärmestrom durchflossen, entsteht, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, infolge des SEEBECK-Effekts eine elektrische Spannung entlang des Temperaturgradienten, deren betragsmäßiges Maximum und Minimum jeweils am heißen und kalten Ende des Materials liegt. Werden diese beiden Enden schließlich mit einem äußeren Stromkreis elektrisch verbunden, fließt ein Laststrom  $I_L$  zwischen den elektrischen Potenzialen (Abbildung 2.1). Im thermoelektrischen Material wird dabei ein Teil der auf der heißen Seite einströmenden Wärme  $\dot{Q}_H$  in eine elektrische Leistung  $P_{\text{el}}$  transformiert, wobei der Grad der Umwandlung als thermoelektrischer Gesamtwirkungsgrad (2.7) definiert ist, welcher sich wiederum aus dem CARNOT-Wirkungsgrad  $\eta_C$  und dem des thermoelektrischen Materials  $\eta_{\text{TE}}$  zusammensetzt. [Row06, S. 1-4f]

$$\eta_{\text{TE,ges}} = \underbrace{\left(1 - \frac{T_K}{T_H}\right)}_{\eta_C} \cdot \eta_{\text{TE}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_H} \quad (2.7)$$

<sup>17</sup> Vgl. JUNIOR [Jun10, S. 13], LINEYKIN et al. [LBY07, S. 506], MENG et al. [MCS10, S. 195] und ROWE [Row06, S. 1-3].

Der thermoelektrische Wirkungsgrad ist im Allgemeinen von der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit sowie dem SEEBECK-Koeffizienten und damit stark von der Temperatur abhängig [Sny06, S. 9-12f]. Zur Vereinfachung ist es daher üblich, eine Gütezahl  $ZT = \alpha_{\varphi}^2 \sigma_{\varphi} T / \kappa_T$  einzuführen und den thermoelektrischen Wirkungsgrad für eine mittlere Temperatur  $T_M = (T_H + T_K) / 2$  anzugeben (2.8) [Row06, S. 1-3ff]. Die Herleitung des Wirkungsgrades ist mit Hilfe des in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Modells möglich und wird anhand dessen noch einmal diskutiert.

$$\eta_{TE,ges} = \eta_C \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + T_K / T_H} \quad (2.8)$$

Anhand von Gleichung (2.8) wird deutlich, dass zum Erreichen eines hohen thermoelektrischen Wirkungsgrades ein hoher Temperaturabfall über das thermoelektrisch aktive Material sowie eine hohe Gütezahl  $ZT$  des Materials selbst benötigt wird. Die Temperaturdifferenz ist dabei in der Regel durch die Applikation bestimmt [Kaj06, S. 50-2ff], so dass die Herausforderung darin besteht, einen hohen Anteil des vorhandenen Temperaturgefälles über das thermoelektrisch aktive Material entfallen zu lassen. Das Verhältnis von Gesamttemperaturgefälle zu über dem thermoelektrisch aktivem Material anliegenden Temperaturgradienten wird dabei als thermometrischer Wirkungsgrad  $\eta_{TE,metrisch}$  bezeichnet. Eine Erhöhung der Gütezahl ist dagegen möglich, wenn es gelingt, Materialien mit einer niedrigen thermischen und gleichzeitig einer hohen elektrischen Leitfähigkeit sowie einem hohen SEEBECK-Koeffizienten zu entwickeln (Abbildung 2.2). Diese Kombination von Materialeigenschaften ist vor allem in hoch dotierten Halbleitern möglich [Bel08, S. 1457], weswegen diese sich im Fokus einer Vielzahl von thermoelektrisch motivierten, wissenschaftlichen Forschungsvorhaben befinden.

Obwohl bereits Gütezahlen von bis zu  $ZT = 4,1$  im Labor nachgewiesen wurden [GBE06, S. 57-8], haben im industriellen Maßstab verfügbare Materialien Gütezahlen von ca.  $ZT \leq 1$ . Hinzu kommt, dass für eine spezielle Applikation eine ausreichend hohe Gütezahl im verfügbaren Temperaturbereich vorhanden sein muss und Anforderungen zur Umweltverträglichkeit und Giftigkeit an das Material gestellt werden. Daher können unter anderem bleihaltige Materialien in

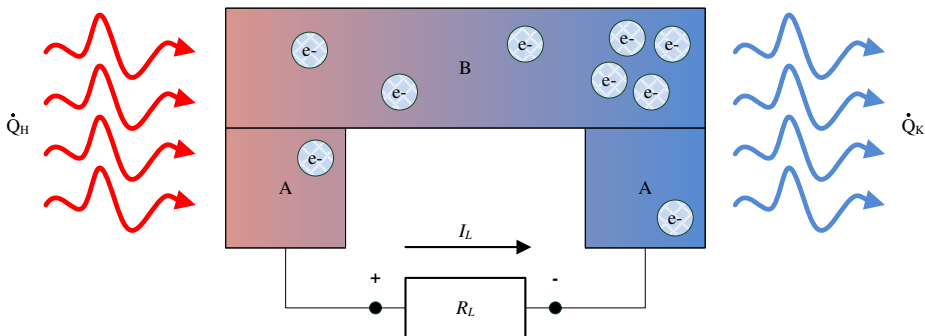


Abbildung 2.1: Thermopaar mit Lastwiderstand