

## **Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen durch den Einsatz von Thermoelektrischen Generatoren – Konzeption, Optimierung und Validierung**

Lars Heber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Stuttgart



DLR

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt

# Forschungsbericht 2023-06

## **Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen durch den Einsatz von Thermoelektrischen Generatoren – Konzeption, Optimierung und Validierung**

Lars Heber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
Stuttgart

277 Seiten  
143 Bilder  
50 Tabellen  
292 Literaturstellen



*Herausgeber:*

Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e. V.  
Wissenschaftliche Information  
Linder Höhe  
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454  
ISRN DLR-FB-2023-06  
Erscheinungsjahr 2023

DOI: [10.57676/kgbm-cf58](https://doi.org/10.57676/kgbm-cf58)

**D 93** (Dissertation der Universität Stuttgart)

### **Erklärung des Herausgebers**

Dieses Werk wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 3.0 Deutschland, abrufbar über <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/legalcode> , zur Nutzung überlassen.

### **Lizenz**



Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 3.0 Deutschland

*Effizienzsteigerung, Abgaswärmenutzung, nutzfahrzeuggerechter thermoelektrischer Generator, ganzheitliche Entwicklung, Optimierung der Kosten-Nutzen Relation*

Lars HEBER  
DLR, Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

***Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen durch den Einsatz von Thermoelektrischen Generatoren – Konzeption, Optimierung und Validierung***  
Universität Stuttgart

Moderne Nutzfahrzeuge sollen höchsten Ansprüchen hinsichtlich Ökologie und Ökonomie genügen. Thermoelektrische Generatorsysteme stellen einen innovativen Lösungsansatz dar, um den Anforderungen des Klimaschutzes gerecht zu werden und gleichzeitig die Fahrzeugeffizienz zu steigern sowie Emissionen zu reduzieren. In dieser Forschungsarbeit wird erstmals die Wirtschaftlichkeit des Systems mit einer Amortisationszeit von weniger als drei Jahren nachgewiesen.

Für das Diesel-Nutzfahrzeug liegen die Kraftstoffreduktionen im Bereich von 0,5–1,5 %, die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im Bereich von 4–15 g<sub>CO2</sub>/km und die minimale Amortisationszeit beträgt 1,4 Jahre. Für das Erdgas-Pendant liegt die Kraftstoffreduktion im Bereich von 1,8–2,8 %, die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im Bereich von 13–35 g<sub>CO2</sub>/km sowie die minimale Amortisationszeit bei 0,7 Jahren.

Die erzielten Ergebnisse dieser Arbeit erhöhen die Leistungsmerkmale sowie den Reifegrad der Technologie erheblich und leisten einen wichtigen Beitrag, die Thermoelektrik technologisch und ökonomisch der Einsatzreife näher zu bringen.

Efficiency increase, exhaust gas waste heat utilisation, thermoelectric generator suitable for commercial vehicles, holistic development, optimisation of the cost-benefit ratio

(Published in German)

Lars HEBER  
German Aerospace Center (DLR), Institute of Vehicle Concepts, Stuttgart

***Efficiency increase of heavy-duty commercial vehicles by using thermoelectric generators – conception, optimisation and validation***

University of Stuttgart

Modern commercial vehicles should meet the highest standards in terms of ecology and economy. Thermoelectric generator systems represent an innovative approach to meeting the requirements of climate protection and at the same time increasing vehicle efficiency and reducing emissions. In this research work, the economic viability of the system is demonstrated for the first time with a payback period of less than three years.

For the diesel heavy-duty commercial vehicle, fuel reductions are in the range of 0.5–1.5%, CO<sub>2</sub> emission reductions are in the range of 4–15 g<sub>CO2</sub>/km and the minimum payback period is 1.4 years. For the natural gas counterpart, the fuel reductions are in the range of 1.8–2.8%, the CO<sub>2</sub> emission reductions are in the range of 13–35 g<sub>CO2</sub>/km and the minimum payback period is 0.7 years.

The results obtained in this work significantly increase the performance characteristics as well as the degree of maturity of the technology and constitute an important contribution to bringing thermoelectrics technologically and economically closer to operational maturity.



# **Effizienzsteigerung von Nutzfahrzeugen durch den Einsatz von Thermoelektrischen Generatoren – Konzeption, Optimierung und Validierung**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der  
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Lars Heber**

aus Osnabrück

**Hauptberichter:** Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich

**1. Mitberichter:** Prof. Dr.-Ing. S. Kabelac

**2. Mitberichter:** Prof. Dr.-Ing. T. Siefkes

**Tag der mündlichen Prüfung:** 07.11.2023

Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart der Universität Stuttgart

Angefertigt am Institut für Fahrzeugkonzepte,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. Stuttgart

**2023**









# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) e. V. in Stuttgart.

Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich, Direktor des Instituts für Fahrzeugkonzepte und Professor an der Universität Stuttgart, für die Betreuung dieser Arbeit und die Übernahme des Referats. Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Kabelac und Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Siefkes danke ich vielmals für die Übernahme der Rolle der Mitberichter.

Am Institut für Fahrzeugkonzepte möchte ich mich bei meinem Abteilungsleiter Dr.-Ing. F. Rinderknecht für die fachliche Betreuung dieser Arbeit bedanken. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. M. Kober, J. Schwab, T. Knobelspies, A. Rossello und M. Helmich für ihre Unterstützung bedanken. Die kooperative und konstruktive Zusammenarbeit, der fachliche und persönliche Austausch sowie die zahlreichen Diskussionen haben diese Arbeit ungemein bereichert. Es sei zudem den Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften F. Dirschedl, S. Vale, L. Lamprecht, P. Fischer, A. Böhmer, M. Euen, M. Gierl, F. Prinz, L. Schlacke, N. Block, A. Ben Jazia, J. Müller, D. Quinlan, K. Ziegler, T. Yildirim und L. Willand für ihr tatkräftiges Engagement gedankt.

Am Institut für Werkstoff-Forschung und für Technische Thermodynamik möchte ich mich bei den Kollegen C. Stiewe, R. Sottong, P. Ziolkowski, P. Blaschkewitz, V. Dreißigacker, J. Haunstetter, T. Freitag und P. Szabo für ihre Unterstützung und die Zusammenarbeit im DLR internen Metaprojekt *Next Generation Car* bedanken.

Zudem danke ich dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg und dem DLR Technologiemarketing, die unter anderem das Projekt HD-TEG gefördert und damit einen entscheidenden Teil dieser Arbeit ermöglicht haben.

Letztendlich gilt mein herzlichster Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern. Bei meiner Frau K. Heber möchte ich mich für ihre uneingeschränkte Unterstützung, bedingungslose Liebe, Motivation, Geduld und ihr Vertrauen bedanken in all den Jahren.

Stuttgart, im Dezember 2021

Lars Heber

# Kurzfassung

Moderne Nutzfahrzeuge sollen höchsten Ansprüchen hinsichtlich Ökologie und Ökonomie genügen. Effizienztechnologien sind ein innovativer Lösungsansatz, um den Anforderungen des Klimaschutzes gerecht zu werden und gleichzeitig die Fahrzeugeffizienz zu steigern sowie Emissionen zu reduzieren. Die Herausforderung besteht darin, sowohl technische und ökologische, als auch ökonomische Anforderungen bereits in frühen Entwicklungsphasen ganzheitlich zu berücksichtigen.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist der Nachweis einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen durch den Einsatz von thermoelektrischen Generatorsystemen in schweren Nutzfahrzeugen. Erstmals soll zudem die Wirtschaftlichkeit des Systems mit einer Amortisationszeit von weniger als drei Jahren nachgewiesen werden. Zwei Anwendungsszenarios werden betrachtet: Nutzfahrzeuge mit konventionellem Dieselmotor und mit stöchiometrischem Erdgasmotor. Mittels einer neuartigen methodischen Vorgehensweise für die Entwicklung von thermoelektrischen Generatorsystemen, basierend auf dem V-Modell-Ansatz, wurden wissenschaftliche Erkenntnisse auf allen Systemhierarchieebenen erzielt. Bei der Systemauslegung wurden sämtliche Fahrzeugwechselwirkungen und die Gesamtbetriebskosten berücksichtigt. Der Entwicklungsprozess beinhaltet die Variantenauswahl und -bewertung von unterschiedlichen Systembauweisen und Teilsystemen. Dazu kommen eine ganzheitliche und multikriterielle Systemoptimierung sowie eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Lösungsvarianten zum Einsatz. Beispielsweise wurden verschiedene rippenbasierte und topologieoptimierte Strukturen sowie Metallschäume hinsichtlich einer effizienten Wärmeübertragung untersucht. Darüber hinaus wurden neuartige thermoelektrische Modulbauweisen erforscht.

Die Ergebnisse weisen deutliche Steigerungen im Vergleich zum Stand der Technik auf. Für das Diesel-Nutzfahrzeug liegen die Kraftstoffreduktionen in unterschiedlichen dynamischen Fahrscenarien im Bereich von 0,5–1,5%, die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen im Bereich von 4–15 gCO<sub>2</sub>/km und die minimale Amortisationszeit beträgt 1,4 Jahre. Für das Erdgas-Pendant werden insbesondere aufgrund der höheren Abgastemperaturen noch bessere Ergebnisse erreicht. Diese liegen bei einer Reduktion von 1,8–2,8% und 13–35 gCO<sub>2</sub>/km sowie einer minimalen Amortisationszeit von 0,7 Jahren.

Die erzielten Ergebnisse dieser Arbeit erhöhen die Leistungsmerkmale sowie den Reifegrad der Technologie erheblich und leisten einen wichtigen Beitrag, die Thermoelektrik technologisch und ökonomisch der Einsatzreife näher zu bringen.

# Abstract

Modern commercial vehicles should meet the highest standards in terms of ecology and economy. Efficiency technologies are an innovative approach to meeting climate protection requirements while increasing vehicle efficiency and reducing emissions. The challenge is to take both technical, ecological, and economic requirements into account holistically in the early stages of development.

The objective of this research work is to demonstrate a reduction in fuel consumption and emissions through the use of thermoelectric generator systems in heavy-duty commercial vehicles. In addition, the economic viability of the system is to be demonstrated for the first time, with a payback period of less than three years. Two application scenarios are considered: Commercial vehicles with conventional diesel engine and with stoichiometric natural gas engine. By means of a novel methodical approach for the development of thermoelectric generator systems, based on the V-model approach, scientific findings are developed on all system hierarchy levels. System design takes into account all vehicle interactions as well as total cost of ownership. The development process includes variant selection and evaluation of different system designs and subsystems. For this purpose, a holistic and multi-criteria system optimization and a technical and economic evaluation of the solution variants are used. For example, different fin-based and topology-optimized structures as well as metal foams were investigated with respect to efficient heat transfer. In addition, novel thermoelectric module designs are being researched.

The results indicate significant increases compared to the state-of-the-art. For the heavy-duty commercial vehicle with diesel engine, fuel reductions in different dynamic driving scenarios are in the range of 0.5–1.5%, CO<sub>2</sub> emission reductions are in the range of 4–15 gCO<sub>2</sub>/km, and the minimum payback period is 1.4 years. Even better results are achieved for the natural gas counterpart, in particular due to the higher exhaust gas temperatures. These are a reduction of 1.8–2.8% and 13–35 gCO<sub>2</sub>/km, and a payback period of 0.7 years.

The results achieved in this research work significantly increase performance characteristics and the degree of maturity of the technology and contribute significantly bringing thermoelectrics technologically and economically closer to operational maturity.

# Extended Abstract

In order to contribute to climate change mitigation, a detailed investigation on the use of thermoelectric generator systems in heavy-duty commercial vehicles was carried out in this thesis. This includes conceptual design, simulative optimization, and experimental validation.

In conventional commercial vehicles with diesel combustion engines, around two-thirds of the fuel energy is lost in the form of heat. Direct conversion of exhaust enthalpy to electrical energy using thermoelectric generators was therefore investigated in this thesis. A novel methodological approach was necessary to enable the conceptual design, modeling, and optimization as well as dimensioning of thermoelectric generators suitable for commercial vehicles. The approach was verified for two application scenarios, heavy-duty commercial vehicles with diesel engines and with innovative natural gas engines based on the gasoline engine principle.

Thermoelectric generators can be used to increase the efficiency of heavy-duty commercial vehicles from an overall system perspective. A holistic design method was used to reduce fuel consumption and thus CO<sub>2</sub> emissions. At the same time, the total cost of ownership was minimized. The thermoelectric generator designs presented allowed the system for the first time to be amortized and profitable with a lifetime of significantly less than 3 years. It has been successfully demonstrated that the use of the technology in heavy commercial vehicles is worthwhile from an ecological and economic point of view.

At the beginning of the thesis, Chapter 1 described the environment of the thesis including the motivation and the statement of the problem. The fuel consumption of commercial vehicles has not fallen in recent years to the extent that the European Union's future climate protection targets for road freight transport can be achieved. Based on the objective of increasing the efficiency of heavy-duty commercial vehicles through the use of thermoelectric generator systems, the main methodological aspects were explained.

Chapter 2 presented the relevant fundamentals of vehicle technology and the state-of-the-art of thermoelectrics. It demonstrated that previous thermoelectric generators for commercial vehicle applications had an unsatisfactory cost-benefit ratio and lower efficiencies. In most cases, the systems were not developed specifically for commercial vehicle applications, but were adopted from passenger car applications and merely scaled up. Another problem was the lack of a methodical approach. Statements on the cost-benefit ratio of a thermoelectric generator system based on total cost of ownership in real

operation and amortization were therefore not possible. Until the start of this thesis, no waste heat recovery system for commercial vehicles was known to have a payback period of less than three years. This applied both to thermoelectric generators and to alternative waste heat recovery processes such as the Rankine process or turbo compound.

At the beginning of Chapter 3 the tasks of this thesis were specified, based on the problems identified in the state-of-the-art, and delimitations to the state-of-the-art as well as to the institute's own preliminary work in the area of passenger car applications were explained. To identify solutions, the novel overarching approach for the development of thermoelectric generators of the V-model approach based on the VDI Guideline 2206 was presented. This enabled the technical and economic problems to be solved. The benefits of this approach include the ability to optimize subsystems such as the hot gas heat exchangers and thermoelectric modules with a high level of detail, and to evaluate at the overall system level with trade-offs in the level of detail. The main objectives of this thesis have been formulated in terms of fuel, CO<sub>2</sub> and cost reduction as well as payback time and include comparison to competing waste heat recovery systems.

In Chapter 4, an operating condition analysis of the application scenarios was performed to obtain valid input variables for the subsequent system design, and the system requirements were defined. As there was no uniform procedure for determining system requirements and specifications, the selection of reference vehicles and routes as well as the operating condition analysis was performed according to a separate procedure. Heavy-duty commercial vehicles with diesel or natural gas engines currently represent the most technological-economically advantageous powertrain concepts and have the largest shares of the current vehicle population and new registrations (96% diesel heavy-duty commercial vehicles and 2.9% natural gas heavy-duty commercial vehicles; see Fabian (2021)). Due to the different boundary conditions, in particular the available exhaust gas temperatures, it became clear as a result of the potential analysis that two different system designs and vehicle integration concepts were required.

In Chapter 5, the necessary modeling and analysis for the holistic overall system simulation were explained on different observation levels, from the entire vehicle to the components level. The following methods and tools have been developed in this thesis for this purpose:

- Methodical approach for the development of thermoelectric generator systems for heavy-duty commercial vehicles
- Method for calculating fuel and emission reduction
- Models for the representation of vehicle interactions
- Total cost of ownership model
- General design tool for thermoelectric generator systems
- Generic thermoelectric generator models (including weight, installation space, costs)

- Methods for holistic total system simulation of thermoelectric generator systems
- General simulation models for the numerical fluid mechanics of heat exchangers
- Multiphysical finite element methods for modeling thermoelectric modules

Chapter 6 presented the conceptual design and development process for thermoelectric generator systems. For example, since no beneficial thermoelectric generator design for commercial vehicle applications has emerged in the state-of-the-art, different solution variants for thermoelectric generator conceptual design as well as vehicle integration were investigated. The solution space was, in the sense of an efficient thermoelectric generator development, reduced step by step with the aid of (pre)evaluations. The final technical and economic evaluation of the remaining solution variants was based on VDI Guideline 2225. Among the remaining solution variants, a decision had to be made between the two thermoelectric generator architectures, the stack design, and the polygonal design. The internal structure of the hot gas heat exchangers, the plain and offset strip fins, and the open-cell metal foams also had to be evaluated. The thermoelectric generator stack design with plain fin structures in the hot gas heat exchangers proved to be the most beneficial solution variant overall because of having the best economic value. This solution concept was designed in detail as a highly integrated construction method.

Chapter 7 contains validation steps of the methodological and modeling approaches at different system and component levels. During the development process, it became apparent that the hot gas heat exchangers and the thermoelectric modules are particularly important in the thermoelectric generator design. Accordingly, the focus of development was placed on these components. The preliminary experimental investigation of hot gas heat exchanger structures is based on the simulation-based design (see Chapter 5) of plain and offset strip fins, metal foams, and topology-optimized structures. Based on the result variables (density, back pressure, heat flow and efficiency), the problem of selecting the hot gas heat exchanger structure becomes clear. No variant proved to be clearly advantageous over the alternative solutions. New types of fin structures, such as open-cell metal foams and topology-optimized structures, can offer component-level benefits in terms of weight, efficiency, and flow resistance. Plain fins in particular, which are considered comparatively simple, represent a compromise solution from a technical point of view and are particularly attractive from an economic point of view.

The design and optimization of the thermoelectric modules was performed with a high level of detail using a novel three-dimensional multiphysics simulation environment with finite element method. Thus, depending on the temperature level of the application scenario, a multi-criteria optimization could be performed with respect to high electrical output, high efficiency, and low cost at the same time. The results of the simulative design process and experimental validation were obtained for modules in the low temperature and high temperature ranges. The result variables (specific thermal resistance, specific power, efficiency, and specific cost) were used to illustrate the design trade-off and

the need for a compromise solution. As a result, area-specific power densities of up to  $1.1 \text{ W/cm}^2$  for low-temperature thermoelectric modules and up to  $3 \text{ W/cm}^2$  for high-temperature thermoelectric modules could be determined, representing an increase of 157% (see Risseh et al. (2017)) and 130% (see Furukawa (2016)), respectively, compared to the state-of-the-art. In addition, efficiencies of up to 9% have been measured for high-temperature thermoelectric modules with segmented legs.

Based on the results from the thermoelectric generator subsystem design and overall system design, the increase in performance characteristics during the development process can be seen, such as the 574% increase in volumetric power density. In addition, it became apparent that the previously known module designs of the state-of-the-art were unsuitable for meeting the challenging target formulations of this thesis. Through the results of the thermoelectric generator overall system design, the methodological approach was successfully validated at the system level and the significant increase in the results of the state-of-the-art was already apparent. For example, power density was improved by 237% at  $174 \text{ W/kg}$  and by 547% at  $327 \text{ W/dm}^3$  compared to the work of Bass and Elsner (1994). Measured output power increased by 253%, even though costly thermoelectric material use was reduced by 88%. The maximum thermoelectric generator efficiency was determined to be 3.3%, which is an increase of 157% compared to the previous work by Zhang et al. (2015).

In Chapter 8, the application of the methodological approach was carried out. Increasing efficiency in the sense of reducing fuel consumption while increasing economy is one of the goals of this thesis. The holistic simulation environment including multi-objective optimization served as a solution path for this complex problem. This allowed different thermoelectric generator result designs to be virtually mapped and evaluated in the variant analysis. The objectives of the system optimization were to minimize total cost of ownership and fuel consumption and to maximize electrical output and efficiency. The results of the main objective to minimize the total cost of ownership were determined in terms of the cost-benefit ratio over the heat exchanger area of the thermoelectric generator result designs for different operating points. The diesel heavy-duty commercial vehicle achieved a minimum of  $85 \text{ EUR}/(\text{gCO}_2 \text{ km})$  or  $805 \text{ EUR}/\%$ . For the natural gas heavy-duty commercial vehicle, the results were significantly better at  $32 \text{ EUR}/(\text{gCO}_2 \text{ km})$  and  $344 \text{ EUR}/\%$ , respectively, due to the significantly higher exhaust gas temperatures. A sensitivity analysis was performed to quantify the uncertainty of the complex holistic design method and to illustrate the interaction of individual model parameters. Large positive influences on the thermoelectric generator system behavior are given for parameter variations in the total cost of ownership model, for the electric generator (alternator), by taking into account the changed warm-up behavior of the vehicle, for the thermoelectric materials and for the heat exchanger models. Long-term operation and, in particular, deposit formation such as fouling in the heat exchangers have a significant negative impact on system behavior.



From the discussion of the results, it emerged that the state-of-the-art could generally be improved considerably. This was significantly demonstrated by the example of power density, which is a secondary objective variable in thermoelectric generator optimization. In this thesis, up to 159 W/kg or 248 W/dm<sup>3</sup> was achieved in the diesel heavy-duty commercial vehicle and up to 298 W/kg or 568 W/dm<sup>3</sup> in the natural gas heavy-duty commercial vehicle. In preliminary work, the values were below 90 W/kg and mostly below 100 W/dm<sup>3</sup>.

Using the thermoelectric generator variants identified to minimize total cost of ownership, the economic viability of the systems was demonstrated for the first time, with a payback period of less than two years with both application scenarios. The comparison with the competing waste heat recovery systems of Rankine process and turbo compound has also shown that thermoelectric generator systems have the best cost-benefit ratio and amortize in the shortest time in typical use in commercial vehicles (factor 2.9 better than Rankine process systems and factor 1.8 better than turbo compound systems).

Chapter 9 contains the summary of the research work as well as an outlook on the need for further research. In summary, it can be stated that the objective of this thesis, to advance the use of thermoelectric generator in commercial vehicle applications by a decisive step, has been achieved. As a result, the potential of thermoelectric generator to increase the efficiency of conventional heavy-duty commercial vehicles with diesel engines and innovative natural gas engines was demonstrated. In this research, an approach was presented for the first time and evidence was provided that thermoelectric generator systems can increase the efficiency and economy of heavy-duty commercial vehicles. With the most favorable system design and selected application profiles, the economic break-even point is reached in a payback period of 1.4 years in the diesel heavy-duty commercial vehicle application scenario and 0.7 years in the natural gas heavy-duty commercial vehicle. Thus, it could be shown that thermoelectric generators amortize in a shorter time than competing waste heat recovery systems. The fuel reduction is in the range of 0.5–1.5% in diesel commercial vehicles and in the range of 1.8–2.8% in natural gas commercial vehicles. Compared to previous state-of-the-art work, this represents a 375% improvement (see Bernath (2015)) and a 930% improvement (see Hervas-Blasco et al. (2017)).

The other challenging objectives of this work in terms of CO<sub>2</sub> and cost reduction have also been fully achieved. Therefore, this work indicates a leap forward for the entire technology of thermoelectrics. Beyond thermoelectrics, the presented approach and holistic system optimization can be applied to other efficiency technologies.

The commercial vehicle sector faces major technical, economic, and ecological challenges in order to achieve the targeted climate neutrality of road freight transport in the European Union in 2050 (see UBA (2019)). In particular, the development of future powertrains will undergo a change that will strongly influence the possibilities and quality of waste heat utilization. For this reason, a potential analysis was conducted on potential commercial vehicle powertrains of the future. Accordingly, powertrains with hydrogen combustion

engines and high-temperature fuel cells have a high potential for future waste heat utilization by means of thermoelectrics in commercial vehicles. This applies in particular to the so-called cryocooling by means of liquid fuel, such as hydrogen or natural gas.

Depending on the political and socio-economic framework conditions, the market situation and the region, the diesel combustion engine will lose its dominant position in favor of alternative drives with comparatively higher efficiency and lower emissions. Thermoelectric technology can also make a relevant contribution to increasing efficiency and reducing greenhouse gas emissions in commercial vehicles in the future. Especially the potential of thermoelectric generator systems, which has been clearly indicated in this thesis under technological, ecological, and economical aspects, can make an important contribution.

In addition, automotive mass production of thermoelectrics represents a key to the necessary cost reduction of the technology. For this reason, the use of thermoelectrics in vehicles should continue to be pursued with very high priority in the future. A resulting cost leap would likely enable the economical use of thermoelectrics in a variety of other climate-friendly applications. Based on the aspects described, it is clear how important the results obtained in this thesis can be as a contribution to limiting climate change.



# Inhaltsverzeichnis

Danksagung . . . . .	V
Kurzfassung . . . . .	VI
Abstract . . . . .	VII
Extended Abstract . . . . .	VIII
Inhaltsverzeichnis . . . . .	XVI
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Umfeld der Arbeit und Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und methodische Schwerpunkte . . . . .	5
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik . . . . .</b>	<b>9</b>
2.1 Grundlagen der Fahrzeugtechnik . . . . .	9
2.2 Potentielle Verfahren zur Abwärmenutzung im Nutzfahrzeug . . . . .	14
2.3 Grundlagen der thermoelektrischen Energiewandlung . . . . .	17
2.4 Thermoelektrische Generatorsysteme für den Einsatz in Nutzfahrzeugen .	30
<b>3 Lösungsansatz und methodisches Vorgehen. . . . .</b>	<b>39</b>
3.1 Präzisierung der Aufgabenstellung . . . . .	39
3.2 Methodische Vorgehensweise . . . . .	41
<b>4 Ableitung der Systemanforderungen und Spezifikationen . . . . .</b>	<b>46</b>
4.1 Randbedingungen . . . . .	46
4.2 Potentialanalyse und Energiebilanzierung . . . . .	47
4.3 Potentialbewertung hinsichtlich der Rekuperation thermischer Energie im Gesamtfahrzeugsystem . . . . .	57
4.4 Konkretisierung der Systemanforderungen. . . . .	61
<b>5 Modellbildung und -analyse . . . . .</b>	<b>63</b>
5.1 Modellbildung des Gesamtfahrzeuges . . . . .	63
5.2 Modellbildung des Thermoelektrischen Generatorsystems . . . . .	81
5.3 Modellbildung der Komponenten . . . . .	94
5.4 Überblick über die entwickelten Methoden und Werkzeuge. . . . .	103

---

<b>6</b>	<b>Konzeption und Entwicklung von thermoelektrischen Generator-</b>	
	<b>systemen</b>	<b>104</b>
6.1	Ableitung der Fahrzeugintegrationskonzepte	104
6.2	Variantenbildung und Systemauslegung	110
6.3	Variantenauswahl	112
6.4	Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Lösungsvarianten	129
6.5	Ausgestaltung des ausgewählten Lösungskonzepts	132
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der virtuellen und experimentellen Validierung</b>	<b>137</b>
7.1	Validierung der Komponenten- bzw. Teilsystemmodelle	137
7.2	Validierung der ganzheitlichen Modellerstellung	148
7.3	Untersuchung zur Langzeitstabilität	158
<b>8</b>	<b>Ergebnisse der Gesamtsystemuntersuchung und Diskussion</b>	<b>161</b>
8.1	Effizienzsteigerung durch thermoelektrische Generatorsysteme	161
8.2	Variantenanalyse	163
8.3	Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug	177
8.4	Sensitivitätsanalyse	184
8.5	Ergebnisdiskussion	187
8.6	Bewertung des methodischen Vorgehens	194
<b>9</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>195</b>
9.1	Zusammenfassung und Fazit	195
9.2	Ausblick	198
	<b>Anhang</b>	<b>203</b>
A	Stand der Technik von TEG-Systemen im schweren Nutzfahrzeug	203
B	Referenzfahrzeuge und -strecken	204
C	Relevante Stoffgrößen	211
D	Entwicklungsprozess	213
E	Prüfstands-aufbauten	244
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>247</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>250</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>256</b>

# Kapitel 1.

## Einleitung

In diesem Kapitel werden die Motivation und die Problemstellung für Systeme zur Rekuperation thermischer Energie<sup>1</sup> wie dem thermoelektrischen Generator (TEG) in Nutzfahrzeugen (NFZ) beschrieben. Darauf aufbauend werden die Aufgabenstellung und Zielsetzung der Arbeit abgeleitet sowie die Schwerpunkte erörtert.

### 1.1. Umfeld der Arbeit und Motivation

Die Notwendigkeit eines sorgsamem Umgangs mit der Ressource ‚Energie‘ aufgrund der Erfordernis der Emissionsreduktion, der Endlichkeit fossiler Rohstoffe und steigender Primärenergiekosten erhöhen die Bedeutung einer energieeffizienten Fahrzeugtechnik. Im Jahr 2019 betrug der Anteil des Verkehrs an den CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland rund 20 % (vgl. [1]). Während die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) für den motorisierten Personenindividualverkehr um rund 12 % reduziert werden konnten, gelang dieses im Straßengüterverkehr nicht ansatzweise, mit einem Zuwachs von rund 65 % zwischen den Jahren 1990 und 2019 (vgl. z. B. [2]). Die Klimaschutzziele der Europäischen Union (EU), die THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 um mindestens 40 % und bis 2050 um 80 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren, erfordern weitreichende Maßnahmen, technische Fortschritte zum Beispiel bei alternativen Fahrzeugkonzepten und entsprechende Regulierungen (vgl. [2, 3]).

Die Entwicklung der THG-Emissionen des Verkehrs in Deutschland vom Jahr 1990 bis 2019 sowie das zukünftige Klimaschutzziel des Verkehrssektors im Jahr 2030 sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Demnach sind Personenkraftwagen (PKW) mit rund 60 % für den größten Anteil der Verkehrsemissionen im Jahr 2019 verantwortlich. Den zweitgrößten Emittenten stellen schwere Nutzfahrzeuge<sup>2</sup> (SNFZ) nach [1] mit rund 49 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente und einem Anteil von rund 29 % dar. Bemerkenswert ist der deutlich geringere Fahrzeugbestand von rund 255.000 SNFZ im Vergleich zu rund 47 Millionen PKW (vgl. [4]). Die typischen jährlichen Fahrleistungen von 80 Tkm im regionalen Verteilerverkehr oder 130–150 Tkm im Fernverkehr führen in

---

<sup>1</sup>Nutzung von thermischer Energie und Wandlung von dieser in zum Beispiel elektrische Energie.

<sup>2</sup>Definition in dieser Arbeit für Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung mit einem zulässigem Gesamtgewicht (zGG) > 12 t gemäß Fahrzeugklasse N3 der Europäischen Gemeinschaft (EG) nach Anhang II der Rahmenrichtlinie 2007/46/EG.

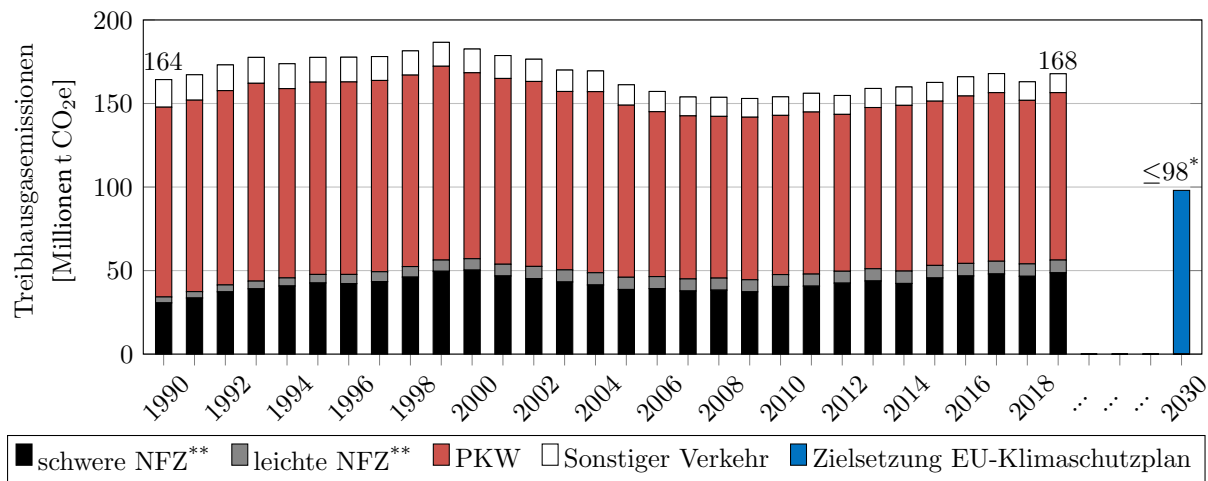


Abbildung 1.1.: Entwicklung der THG-Emissionen des Verkehrssektors in Deutschland im Kontext der Klimaschutzziele; eigene Berechnungen nach [1, 3] (\*: EU-Ziel von 40–42 % Emissionsminderung im Vergleich zum Jahr 1990); \*\*: NFZ für den Güterverkehr)

Kombination mit den großen Tonnagen zu hohen Verbrauchswerten und Emissionen von SNFZ (vgl. [5, 6]). Die Emissionen sind konjunkturabhängig in Deutschland zwischen den Jahren 1990 und 2019 um 59 % angestiegen. SNFZ der Fahrzeugklasse N3<sup>3</sup> verursachen rund 87 % der THG-Emissionen der Nutzfahrzeugflotte. Technologische Fortschritte bei den Verbrennungsmotoren und der Abgasnachbehandlung sowie eine bessere Kraftstoffqualität haben dazu geführt, dass ein PKW und ein Lastkraftwagen (LKW) heutzutage im Durchschnitt deutlich weniger Treibhausgase und Luftschadstoffe ausstoßen als Anfang der 1990er Jahre, vor der Einführung von Emissionsnormen. Im Zeitraum von 1995–2019 sanken die spezifischen THG-Emissionen bei PKW um 15 % und bei LKW um 30 % (vgl. [7]). Trotzdem stiegen die THG-Emissionen des Straßengüterverkehrs im genannten Zeitraum um 20 %, aufgrund des erhöhten Fahrzeugbestands und der gestiegenen Tonnenkilometer. Das Umweltbundesamt (UBA) [1] sowie Verkehrsprognosen (vgl. z. B. [8, 9]) erwarten für den Zeitraum 2015–2030 einen weiteren Anstieg um bis zu 39 %. International prognostiziert die OECD<sup>4</sup> [10] zudem einen Anstieg von bis zu 290 % bis zum Jahr 2050. Demnach wird der Güterverkehr als Hauptverursacher von THG-Emissionen des landgebundenen Verkehrs den Personenverkehr voraussichtlich übertreffen. Der wachsende Handlungsbedarf für dieses Fahrzeugsegment wird deutlich.

Moderne NFZ sollen höchsten Ansprüchen hinsichtlich Ökonomie und Ökologie genügen. Durch den hohen technologischen Entwicklungsstand verbrennungsmotorischer LKW lässt sich dieser Zielkonflikt nicht mehr allein durch innermotorische Maßnahmen auflösen, was eine komplexere ganzheitliche Betrachtungsweise des Gesamtfahrzeuges bedingt. Während der Kraftstoffverbrauch vor allem für die variablen Betriebskosten des Fahrzeugkunden ein

<sup>3</sup>Unterteilung von NFZ für die Güterbeförderung nach dem zulässigen Gesamtgewicht.

<sup>4</sup>Organisation for Economic Cooperation and Development, dt. Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung.

immenser Kostenfaktor darstellt, sind niedrige Schadstoffemissionen für die Einhaltung von gesetzlichen Richtlinien und deren Grenzwerte für den Fahrzeughersteller unerlässlich. Bei der Entwicklung von Antriebssträngen für SNFZ lag der Fokus – aufgrund des Kostendruckes und der fehlenden gesetzlichen Regulierung – bislang nicht auf der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit alleine auf dem Kraftstoffverbrauch. Im Jahr 2019 hat die EU CO<sub>2</sub>-Grenzwerte<sup>5</sup> für NFZ festgelegt, die schrittweise bis 2030 in Kraft treten sollen (vgl. [11]). Bei Verstößen sind demnach erhebliche Strafzahlungen von 4250 EUR/(g tkm) im Jahr 2025 bzw. 6800 EUR/(g tkm) pro Neufahrzeug im Jahr 2030 vorgesehen. Zudem sind EU-Hersteller verpflichtet, fahrzeugspezifische Informationen gemäß dem *Vehicle Energy Consumption Calculation Tool* (VECTO)<sup>6</sup> bei Neufahrzeugen mitzuteilen. Neben der Festlegung von Grenzwerten ist die Einführung neuer Abgasnormen für NFZ in Europa (Euro VI) absehbar. Weltweit existieren bereits CO<sub>2</sub>-Standards für SNFZ in Kanada und den USA (EPA-MY2017), China (China VI) und Japan (JP17), was den Forschungsbedarf an Effizienztechnologien in den kommenden Jahren erhöhen wird.

Effizientere Motorenaggregate, die Optimierung der Aerodynamik sowie die Minimierung der Reibungsverluste sind Beispiele für technologische Fortschritte, die NFZ-Hersteller in den letzten Jahrzehnten erzielt haben. Mit der Selbstverpflichtung der *Association des Constructeurs Européens d'Automobiles* (ACEA) „Vision 2020“ haben sich die Hersteller das Ziel gesetzt, den Kraftstoffverbrauch vom Vergleichsjahr 2005 bis 2020 um 20 % zu reduzieren (vgl. [14, 15]). Die Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs von SNFZ anhand von durchgeführten Realfahrten<sup>7</sup> in den Jahren 1967–2020 ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Es ist ein annähernd regressiver Verlauf hin zu einem Kraftstoffverbrauch von rund 35 l/100 km im Jahr 2020 zu erkennen. Die Einführung der Abgasnormen zur deutlichen Reduktion der Schadstoffe (insbesondere NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen) haben die Fortschritte bei der Verbrauchsreduzierung kompensiert (vgl. [17]). Für SNFZ ist zu erwarten, dass der Verbrennungsmotor die dominierende Antriebstechnologie in den nächsten Jahrzehnten bleibt. Das Ziel der Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen kann durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe (z. B. Biodiesel und Erdgas) und kraftstoffreduzierender Technologien erreicht werden (vgl. [9, 19, 20]). Der Dieselmotor ist hocheffizient, weitere Verbesserungen versprechen nur noch geringe Effizienzsteigerungen, lassen aber hohe Entwicklungs- und Systemkosten erwarten. Dieses spricht nach [9] für größeren Erfolg bei alternativen Ansätzen. Die derzeit wirtschaftlich vielversprechendsten Entwicklungsalternativen

---

<sup>5</sup>Für NFZ > 7,5 t zGG soll ein Reduktionsziel von 15 % bis zum Jahr 2025 bzw. 30 % bis 2030 im Vergleich zu 2019 erreicht werden; vorbehaltlich einer Zielüberprüfung und eventuellen Nachregelung in 2022.

<sup>6</sup>Simulationssoftware, die den Energie- und Kraftstoffverbrauch sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen von NFZ realitätsnah modelliert (vgl. [12, 13]). Offenlegung von rund 70 fahrzeugspezifischen Angaben, wie z. B. deklarierte Verbrauchs- und CO<sub>2</sub>-Emissionswerte bei unterschiedlichen Fahrzuständen.

<sup>7</sup>Realfahrten auf der Lastauto Omnibus-Teststrecke nach [16] stellen die einzige öffentlich zugängliche und repräsentative Quelle dar; Vergleichbarkeit ist eingeschränkt, u. a. haben sich die Transportgeschwindigkeit und das Gesamtgewicht über die Jahre erhöht.



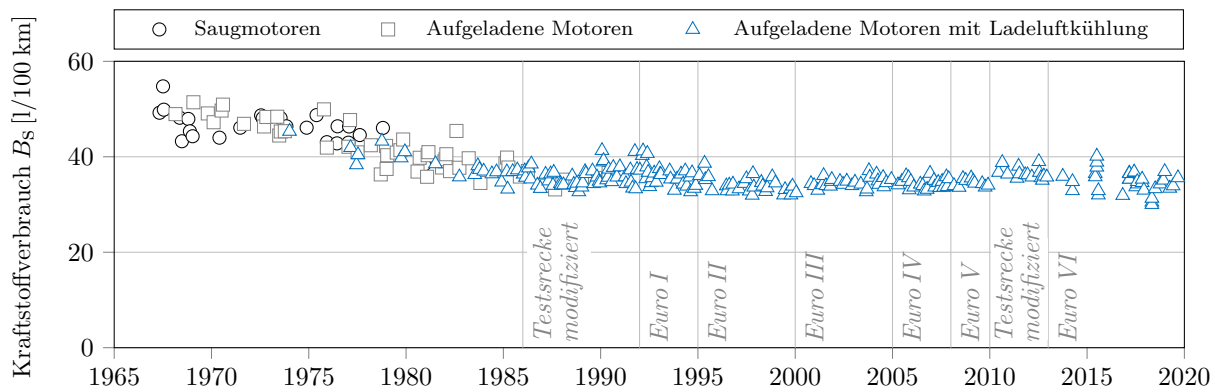


Abbildung 1.2.: Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen der Jahre 1967–2020 (Quelle: [16], Darstellung in Anlehnung an (i. A. a.) [18])

sind Erdgas-NFZ, die mit verflüssigtem Erdgas (LNG, engl. *Liquefied Natural Gas*) betrieben werden, oder Dieselmotoren in Kombination mit regenerativen Kraftstoffen. Erdgas kann als Brückentechnologie und Übergangslösung dienen, um kurz- bis mittelfristig die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren und auf alternative Antriebstechnologien und Kraftstoffe, wie z. B. Wasserstoff, umzusteigen. Kraftstoffsparenden Technologien wird eine vergleichsweise große Wirkung zugeschrieben. Neben Verbesserungen im Getriebebereich, der Aerodynamik und der Entwicklung von alternativen Antrieben gilt dies insbesondere für die Abwärmenutzung (vgl. [21]).

Bei heutigen Nutzfahrzeugmotoren gehen je nach Lastzustand über 50% der chemisch gespeicherten Kraftstoffenergie durch Abwärme, zu je etwa gleichen Teilen in das Kühlsystem und als Abgase, an die Umgebung verloren. Bei den vorherrschenden semistationären bzw. teiltransienten Fahrprofilen stehen im Vergleich zur Charakteristik im PKW kontinuierlichere und zumeist hohe Abgasenthalpien bei langen Betriebszeiten zur Verfügung. Die Rekuperation der thermischen Energie mittels thermoelektrischer Generatoren und Wandlung in höherwertige elektrische Energie kann bei heutigen sowie zukünftigen NFZ mit voraussichtlich höherem Elektrifizierungsgrad signifikante Effizienzvorteile erbringen. TEG arbeiten geräuschlos, vibrationsfrei und äußerst zuverlässig. Diese vergleichsweise einfache Systemtopologie, ohne zusätzliche Arbeitsmedien wie beim Rankine-Prozess (RP) oder einer rotierenden Turbinenstufe wie beim *Turbo-Compound*<sup>8</sup> (TC), lässt sie attraktiv für den NFZ-Einsatz erscheinen.

Bei den heutigen Technologieansätzen haben TEG-Systeme die Vorteile des verschleißfreien Betriebs und der einfachen Systemintegration, insbesondere für mobile Anwendungen. Der Wirkungsgrad (z. B.  $\eta_{e,TEG} \leq 2,1\%$ ; s. Gleichung 5.34; vgl. [22]) die Größe, Masse, Kosten und die resultierende Kraftstoffreduktion der Systeme stellen die größten Herausforderungen für die weitere Entwicklung der Technologie dar (s. Abschnitt 2.4; vgl. bspw. [23]). Die Wirtschaftlichkeit eines Abwärmenutzungssystems hat hohe Bedeutung bei der Systembewertung und stellt für eine mögliche Serienentwicklung

<sup>8</sup>Gebräuchlicher engl. Fachbegriff, dt. Turbogenerator.



Abbildung 1.3.: Gesamtbetriebs- / TCO-Kostenstruktur eines konventionellen Sattelzuges mit Dieselmotor und einer jährlichen Fahrleistung von 150 Tkm

ein entscheidendes Kriterium dar. Bei der Kaufentscheidung von Nutzfahrzeugkunden liegt der Schwerpunkt neben der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Fahrzeuge im besonderen Maße auf den *Total Costs of Ownership* (TCO, dt. Gesamtbetriebskosten) während der Nutzungsdauer (vgl. z. B. [6]). Einen wesentlichen Anteil daran haben die Kraftstoffkosten mit 29 %, wie aus Abbildung 1.3 hervorgeht.

Die Nutzung der verfügbaren Abgasenthalpie bietet die Möglichkeit die Effizienz von NFZ zu steigern, um die Gesamtbetriebskosten bei gleichzeitiger Emissionsreduktion zu senken. Zur qualifizierten Bewertung des TEG-Systems und zum effizienten Umgang mit der Komplexität der Aufgabe ist eine methodische Vorgehensweise erforderlich.

## 1.2. Zielsetzung und methodische Schwerpunkte

Diese Forschungsarbeit hat die Zielsetzung, die Effizienz von SNFZ durch den Einsatz von TEG-Systemen zu steigern. Unter Effizienz wird in diesem Zusammenhang sowohl die Steigerung des Fahrzeugwirkungsgrades und damit die Energieeffizienz als auch die Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Sinne einer Reduzierung der Gesamtbetriebskosten verstanden. Als Gegenstand der Arbeit werden zwei Anwendungsszenarien betrachtet: NFZ mit Diesel- (Dieselmotorprinzip) und mit Erdgasverbrennungsmotor (Ottomotorprinzip).

Thermoelektrische Abwärmenutzungssysteme werden bislang noch nicht im Nutzfahrzeugbereich eingesetzt und befinden sich noch nicht in der Serienfertigung. Im Bereich der SNFZ wird Forschungsbedarf identifiziert (s. Abschnitt 2.4). Eine methodische Vorgehensweise, die ein ganzheitliches Vorgehensmodell beinhaltet und alle relevanten Wechselwirkungen des TEG-Systems mit dem Gesamtfahrzeug berücksichtigt, ist bislang nicht ausreichend untersucht worden. Ein systematisch entwickelter Nachweis der Effizienz dieses Systems, definiert als Kosten-Nutzen-Verhältnis, auf technologischer und betriebswirtschaftlicher Ebene ist nicht bekannt. Die Fragestellung, ob TEG-Systeme für den Einsatz im NFZ hinsichtlich der TCO geeignet sind, ist nach dem Stand der Technik ebenfalls nicht beantwortet. Eine systematisch nachvollziehbare Bewertung der Technologie und damit die Grundlage für einen Vergleich mit konkurrierenden Effizienztechnologien, wie Rankine-Prozess und Turbo-Compound, ist folglich bislang nicht gegeben.

Tabelle 1.1.: Hauptziele dieser Arbeit

Nr.	Zielformulierung
1	Nachweis einer <b>Kraftstoffreduktion</b> und einer <b>CO<sub>2</sub>-Reduktion</b> von <b>mindestens 1 %</b> im <b>Diesel-NFZ</b> bzw. <b>mindestens 2 %</b> im <b>Erdgas-NFZ</b>
2	Nachweis der <b>Systemamortisation</b> durch die erzielte TEG-Kraftstoffeinsparung in der <b>Nutzungszeit</b> von <b>weniger als 3 Jahren</b>
3	Nachweis <b>kostengünstiger TEG-Auslegungen</b> ( $< 0,5 \text{ EUR/W}$ ), welche die Systemamortisation ermöglicht und eine Verbesserung im Vergleich zu Konkurrenztechnologien darstellt

Die Hauptziele<sup>9</sup> der Forschungsarbeit mit quantitativen Zielkriterien sind in Tabelle 1.1 zusammengefasst. In beiden Anwendungsszenarien soll durch den Einsatz von TEG-Systemen im NFZ eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und eine damit verbundene Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nachgewiesen werden. Zudem soll die Wirtschaftlichkeit anhand der Amortisationszeit untersucht werden. Zur Veranschaulichung der Zielformulierung der Amortisationszeit wird für die Effizienztechnologie der Thermoelektrik der mögliche Gewinn im jeweiligen Anwendungsszenario beispielhaft in Abbildung 1.4 dargestellt (s. Abschnitt 5.1.3). Dabei werden Kraftstoffänderungen  $\Delta B$  im Bereich von  $-1\%$  bis  $-5\%$  angenommen. Das für Nutzfahrzeuge spezifische und neuartige methodische Vorgehensmodell soll gesetzliche, technologische und ökonomische Randbedingungen als Schwerpunkte berücksichtigen. Die TEG-Systembewertung soll in typischen Fahrprofilen des Fernverkehrs erfolgen. Die Ergebnisse der Auslegungen sollen eine qualifizierte Bewertung im Vergleich zu konkurrierenden Technologien ermöglichen. Vorhandenes Wissen aus vorangegangenen Arbeiten soll berücksichtigt und in Form von neuen Lösungswegen und Konzepten verknüpft oder weiterentwickelt werden.<sup>10</sup> Als

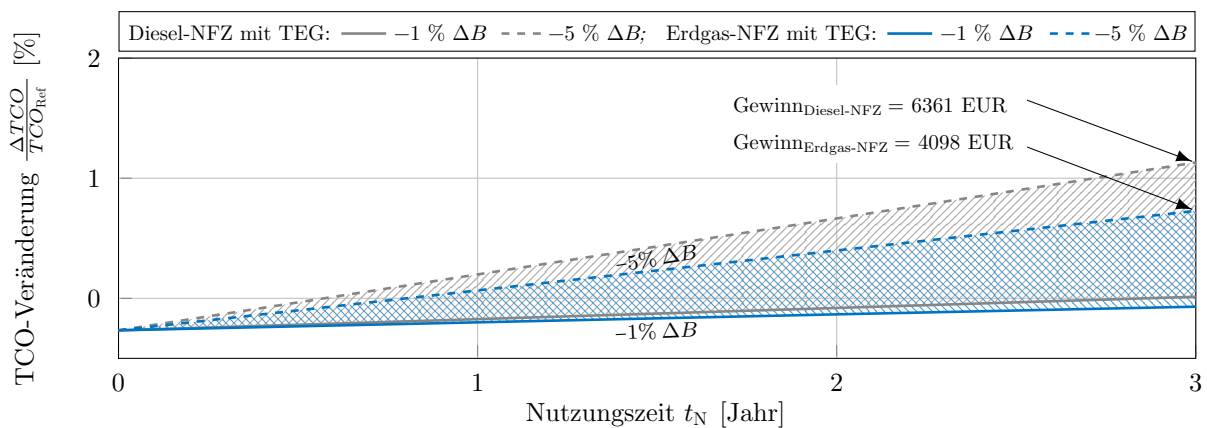


Abbildung 1.4.: Motivation für die Effizienztechnologie der Thermoelektrik im NFZ  
 (Kraftstoffverbrauch Diesel-NFZ nach [24]:  $35,3 \frac{1}{100 \text{ km}}$ , Erdgas-NFZ nach [25]:  $32,2 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$ ;  
 TEG-Kosten: 1500 EUR; weitere Annahmen s. Basisszenario in Abschnitt 5.1.3)

<sup>9</sup>Für Begründungen der definierten Ziele und Zielbereiche siehe Abschnitt 3.2.

<sup>10</sup>Schumpeter definiert die Innovation als die Umsetzung neuer Kombinationen in die Realität:  
 „...the doing of new things or the doing of things that are already done, in a new way.“ [26, S. 14]  
 Die erstmalige Durchführung einer Neuerung der andersartigen Kombinationen von dessen was zur Verfügung steht gilt als neu.

Alleinstellungsmerkmale und Neuheitsgrade dieser Arbeit sollen die folgenden Bereiche untersucht und neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden:

- **Entwicklung eines neuartigen methodischen Vorgehensmodells** für TEG im Diesel- und Erdgas-NFZ; Zielsetzung ist die Amortisation in der Nutzungsdauer; Bewertung erfolgt in Referenzzyklen und Realfahrbedingungen anhand der Gesamtbetriebskosten; Gesamtfahrzeugwechselwirkungen und damit verbundene Restriktionen finden Berücksichtigung (z. B. limitierte Kühlsystemkapazität)
- **Erforschung von hocheffizienten TEG-Systemen** mit Hilfe der Wirkungsgradsteigerung von Komponenten und Teilsystemen, wie zum Beispiel:
  - **Auslegung von alternativen Wärmeübertragerstrukturen**, die mit Hilfe von methodischer Werkstoffauswahl, Struktur- bzw. Topologieoptimierung entwickelt werden; Gegenstand sind gerade (Referenz) und versetzte Rippenstrukturen, hochporöse (z. B. offenzellige Metallschäume) und topologieoptimierte (additive Fertigung) Wärmeübertragerstrukturen
  - **Auslegung von thermoelektrischen Modulen** anhand der anforderungsgerechten Materialauswahl und Gestaltoptimierung von Nieder- und Hochtemperaturmodule sowie segmentierten Modulstrukturen; Modellierung mittels gekoppelter multiphysikalischer Simulationsmethoden (Kopplung von Simulationen mittels Finite-Elemente-Methoden (FEM) mit Strömungssimulation (CFD))
- **Virtuelle Produktentwicklung von TEG-Systemen** zur Anwendung, Visualisierung und Validierung der methodischen Vorgehensweise (Entwicklungsmethode) mit Hilfe von *Computer-Aided-Engineering*-Werkzeugen (CAE-Werkzeugen); die Validierung beinhaltet unter anderem die methodische Werkstoffauswahl, die thermomechanische Berechnung der Teilsysteme mit Hilfe von FEM, die thermodynamische Modellierung des Systems mit Hilfe von numerischen Simulationsverfahren wie CFD sowie kontinuierliche numerische 1D-Simulation, die konstruktive Umsetzung (CAD) und die experimentelle Prüfstanduntersuchung
- Untersuchung von **Optimierungsmöglichkeiten im Gesamtfahrzeug**, Untersuchung von effektiven und effizienten Integration in vorhandenen Bauräumen von SNFZ (Packaging) sowie **Berücksichtigung der Einflüsse des Langzeitbetriebes** des TEG-Systems; modellgestützte Berechnungen der Einflüsse beim Langzeitbetrieb (Alterung und Fouling); Teilvalidierung durch Untersuchungen von thermoelektrischen Modulen
- Diskussion der Ergebnisse und Vergleich von diesen mit dem Stand der Technik sowie mit konkurrierenden Effizienztechnologien im NFZ anhand ausgewählter Kriterien zum **Nachweis der Wettbewerbsfähigkeit von TEG-Systemen**

Der Nutzen der methodischen Vorgehensweise, der erzielten Ergebnisse und wissenschaftlichen Erkenntnisse besteht darin, Fahrzeughersteller, Automobilzulieferer, Modulhersteller und Forschungsinstitute zukünftig bei der effizienten Auslegung, ganzheitlichen Entwicklung und Gestaltung von TEG-Systemen in NFZ zu unterstützen.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird eine neuartige Vorgehensweise zur Konzeption, Dimensionierung, Modellierung und Optimierung von Thermoelektrischen Generatoren im Nutzfahrzeug vorgestellt. Einen Überblick über die Kapitel und Inhalte der Arbeit gibt Abbildung 1.5. Kapitel 2 beinhaltet die relevanten Grundlagen der Fahrzeugtechnik und der Thermoelektrik, insbesondere zur Entwicklung von TEG. In Kapitel 3 wird die resultierende Aufgabenstellung mit Hilfe des Standes der Technik präzisiert und die Abgrenzung verdeutlicht. Anschließend wird der gewählte neuartige Forschungsansatz und die Vorgehensweise vorgestellt. Um valide Eingangsgrößen für die nachfolgende Systemauslegung zu erhalten wird in Kapitel 4 eine Betriebszustandsanalyse der NFZ-Anwendungsszenarien durchgeführt und die Systemanforderungen definiert. Im Rahmen der Modellbildung werden in Kapitel 5 die notwendigen Simulationsumgebungen und -werkzeuge vorgestellt. Der Konzeptions- und Entwicklungsprozess für TEG-Systeme wird in Kapitel 6 vorgestellt. In Kapitel 7 werden Validierungsschritte des Lösungsansatzes auf verschiedenen System- und Komponentenebenen durchgeführt. In Kapitel 8 findet die methodische Vorgehensweise mit Hilfe der ganzheitlichen Simulationsumgebung anhand von zwei Einsatzszenarien Anwendung. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse und eine Bewertung der gewählten Vorgehensweise. Kapitel 9 enthält eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf. Das Potenzial der Technologie für zukünftige Nutzfahrzeugantriebe wird erläutert.

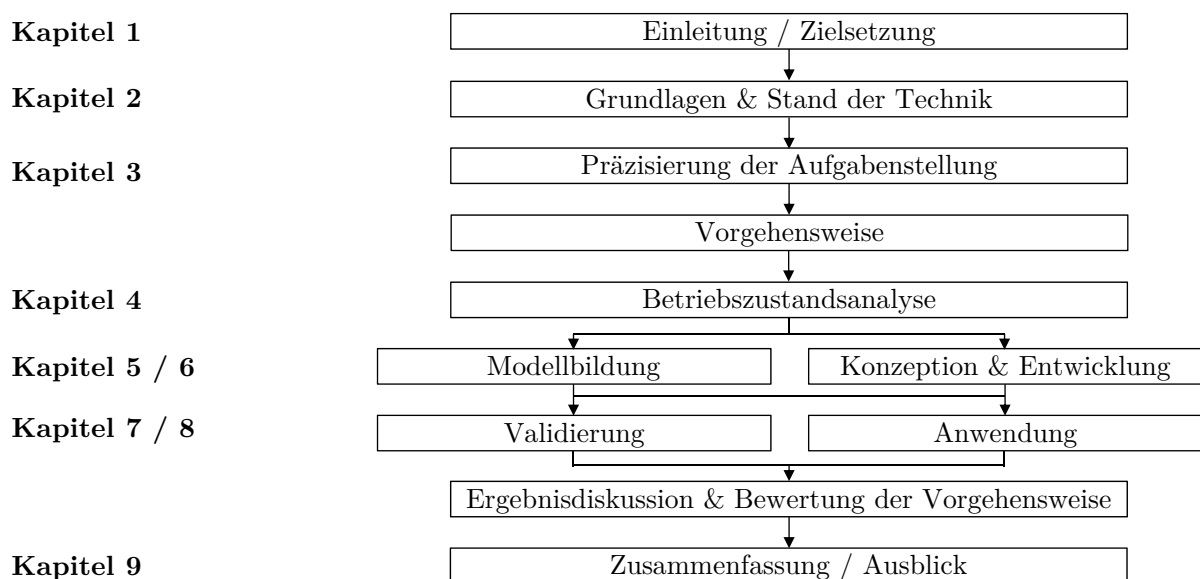


Abbildung 1.5.: Aufbau und inhaltliche Gliederung der Arbeit

# Kapitel 2.

## Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1. Grundlagen der Fahrzeugtechnik

#### 2.1.1. Methoden zur Bewertung von Energieverbrauch und Emissionen

Zur Gesamtfahrzeugbewertung<sup>11</sup> von Effizienztechnologien sind Methoden zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Emissionen entscheidend. Die Energiewandlung im SNFZ wird auf absehbare Zeit von der Verbrennungskraftmaschine (VKM) zur Wandlung von chemischer in mechanische Energie dominiert. Zudem sind elektrische Generatoren zur Energieumwandlung erforderlich, welche auch zur Versorgung von Nebenaggregaten von der VKM angetrieben werden. Die Kenntnis der Verlustleistungen ist eine Voraussetzung für die Spezifikation von innovativen Maßnahmen zur Kraftstoffreduktion und damit zur Senkung der Emissionen. Der absolute Wirkungsgrad  $\eta_{\text{abs}}$  ist definiert als der Quotient aus Nutzen und Aufwand (vgl. z. B. [27]). Bei der VKM stellt der Nutzen die abgegebene mechanische Leistung  $P_{\text{mech}}$  und der Aufwand die dafür zugeführte chemische Leistung  $P_{\text{chem}}$  dar:

$$\eta_{\text{abs}} = \frac{P_{\text{Nutzen}}}{P_{\text{Aufwand}}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{chem}}} \quad (2.1)$$

Das Optimum eines typischen Verbrennungsmotors liegt im absoluten Wirkungsgradkennfeld bei mittleren Drehzahlen und nahezu Vollast (vgl. [28]). Im unteren Lastbereich nehmen die Wirkungsgrade ab. Diese Eigenschaft ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass eine VKM erst ab einer gewissen Mindestdrehzahl selbst lauffähig und in der Lage ist, mechanisch nutzbare Leistung an der Kurbelwelle bereitzustellen. Bei dieser Mindestdrehzahl erzeugt das Aggregat bereits mechanische Verluste in Form von Reibung. Für die Untersuchungen von Effizienztechnologien ist jedoch oft nicht der absolute Wirkungsgrad der Komponenten entscheidend, sondern ihr relativer bzw. differenzieller

---

<sup>11</sup>Bewertung auf Ebene des Gesamtfahrzeugs nach Definition dieser Arbeit (s. Abschnitt 3.2).

Wirkungsgrad  $\eta_{\text{diff}}$  (vgl. [27, 29, 30]), der die Reibungsverluste nicht berücksichtigt. Dieser ist daher höher als der absolute Wirkungsgrad und definiert als:

$$\eta_{\text{diff}} = \frac{\Delta P_{\text{mech}}}{\Delta P_{\text{chem}}} \quad (2.2)$$

Bei einer zusätzlichen Last, wie beispielsweise einem Generator Drehmoment, können die Reibungsverluste nicht erneut negativ in die Wirkungsgradbilanz eingerechnet werden. Die zusätzlich zum Fahrzeugvortrieb von der VKM erzeugte Energie wird nicht mit dem Absoluten, sondern mit dem differentiellen Wirkungsgrad erzeugt. Dieser Zusammenhang basiert auf der Erkenntnis der sogenannten Willans-Linien.

Die Methode der Willans-Linien stellt ein einfaches Verfahren zur Ermittlung der Reibleistung<sup>12</sup> des Gesamtmotors dar und ermöglicht eine näherungsweise Bestimmung der mechanischen Verluste (vgl. bspw. [31]). Bei der sogenannten Nullleistung, d. h. bei 0 kW mechanischer Ausgangsleistung, wird bereits chemische Energie für den Betrieb des Verbrennungsmotors benötigt, wie z. B. im Leerlauf. Mit steigender Ausgangsleistung steigt die aufzuwendende chemische Leistung nahezu linear an, d. h. der differentielle Wirkungsgrad bleibt über weite Betriebsbereiche konstant und sinkt erst im Bereich der Vollastanfettung (vgl. [28]).

Die Eigenschaft eines nahezu konstanten differentiellen Wirkungsgrads ist entscheidend für die Festlegung einer Betriebsstrategie für eine Effizienztechnologie (vgl. bspw. [29]). Mit Hilfe des ermittelten Differenzwirkungsgrades kann diese anhand der Energie- bzw. der Verbrauchsdifferenz beispielsweise durch die Änderung der Masse, des Roll- oder des Luftwiderstands bewertet werden.

Eine weitere Methode zur Ermittlung der Änderung des Kraftstoffverbrauchs stellen Verbrauchskennfelder dar (vgl. bspw. [29, 32, 33]). Die Bilanzierung aller relevanten positiven und negativen Einflüsse erfolgt an der Antriebswelle. Für stationäre Betriebspunkte lässt sich die Lastpunktverschiebung im Verbrauchskennfeld anhand der Änderung der Wellenleistung und des spezifischen Verbrauchs näherungsweise ermitteln.

Die Methode der Längsdynamiksimulation eignet sich zudem für dynamische Fahrscenarien und ermöglicht die Bestimmung der erforderlichen Antriebsleistung auf Grundlage der Fahrwiderstandsgleichungen (vgl. [33, 34]). Abhängig vom erforderlichen Komplexitäts- und Genauigkeitsgrad erfolgt die Ermittlung des Energieverbrauchs entweder anhand von analytischen Berechnungen oder mit numerischen Simulationsmodellen der Stoff- und Wärmeströme. Die Erweiterung der Simulation, um z. B. die Modellierung vom Kraftstoff- und Luftpfad sowie des Abgas- und Kühlsystems, führt zu einer komplexen Gesamtfahrzeugsimulation (vgl. bspw. [12]).

---

<sup>12</sup>Alternativ als Reibmitteldruck bezeichnet. Beinhaltet sowohl die mechanischen Verluste der VKM sowie auch die Antriebsleistung der Nebenaggregate (vgl. [31]).

## 2.1.2. Fahrzeugteilsysteme moderner Nutzfahrzeuge

Im Folgenden werden die relevanten Fahrzeugteilsysteme für die Entwicklung eines Abwärmenutzungssystems zur Rekuperation thermischer Energie beschrieben.

### 2.1.2.1. Verbrennungskraftmaschine

Die weite Verbreitung von VKM ist in erster Linie auf ihre sehr hohe volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte sowie die Energiedichte des Kraftstoffes zurückzuführen, jedoch weniger auf die energetische Effizienz der NFZ-Motorenaggregate. Moderne Dieselmotoren erreichen nach [31] effektive Spitzenwirkungsgrade<sup>13</sup>  $\eta_e$  von rund 45 % und einen spezifischen Kraftstoffverbrauch<sup>14</sup>  $b_e$  von 190 g/kWh. NFZ der EG-Fahrzeugklasse N3 sind beinahe ausschließlich mit abgasturboaufgeladenen, ladeluftgekühlten Reihensechszylinder-Dieselmotoren ausgestattet. Aktuelle stöchiometrische Erdgasmotoren (mit Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda_L$  von 1) mit Einstoffbetrieb erzielen nach [35] Spitzenwerte von rund 41 %. In dynamischen Fahrscenarien wie einer typischen Autobahnfahrt sinken die Wirkungsgrade nach [35] um mindestens vier Prozentpunkte.

Als Motorenkonzepte für Erdgas-NFZ sind nach [9] monovalente bzw. bivalente stöchiometrische Motoren, Zweistoffbetrieb-Konzepte und *High Pressure Direct Injection* (HPDI, dt. Hochdruck-Direkteinspritzung) zu nennen. Die beiden erstgenannten Konzepte haben die Serienreife erlangt. Das HPDI-Konzept befindet sich in der Erprobungsphase und bietet die Vorteile, die bisherigen Wirkungsgradnachteile im Vergleich zum Diesel-Pendant auszugleichen und gleichzeitig die Emissionen deutlich zu senken. Der Technologiereifegrad ist im Allgemeinen geringer als beim Dieselerbrennungsmotor.

### 2.1.2.2. Abgasanlage

Die Abgasanlage bündelt die aus den Zylindern strömenden Abgase im Abgaskrümmer (AGK) und reinigt sie in der Abgasnachbehandlung (AGN) von Schadstoffen. Weitere Funktionen sind die Geräuschminderung und die Ableitung der Abgase in die Umwelt. Der Strömungswiderstand der Abgasanlage ist gering auszulegen, sodass die Motorleistung durch den Abgasgedruck wenig beeinträchtigt wird (vgl. [36]).

Grenzwerte der derzeitigen Abgasnorm Euro VI, der relevanten Testzyklen *World Harmonized Stationary Cycle* (WHSC) und *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC) sind der Richtlinie EG582/2011 Anhang XV zu entnehmen (vgl. [11]). Dieselmotoren erreichen diese Grenzwerte, sofern sie mit einer Kombination aus einem Dieseloxydationskatalysator (engl. *Diesel Oxidation Catalytic Converter*, DOC), einem

---

<sup>13</sup>Ermittlung mit Hilfe der effektiven Leistung  $P_e$  am Kolben der Verbrennungskraftmaschine, des Brennstoffmassenstroms  $\dot{m}_B$  und des Heizwertes  $H_i$  in der Form:  $\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_B \cdot H_i}$  (vgl. [28]).

<sup>14</sup>Bestimmung in der Form als:  $b_e = \frac{\dot{m}_B}{P_e} = \frac{1}{\eta_e \cdot H_i}$  (vgl. [28, 31]).



Dieselußpartikelfilter (DPF) und einem Abgasnachbehandlungssystem mit selektiver katalytischer Reduktion (engl. *Selective Catalytic Reduction*, SCR) ausgestattet sind (vgl. bspw. [33]). Abhängig von der gewählten Betriebsstrategie wird zudem eine gekühlte Abgasrückführung (AGR) eingesetzt. Stöchiometrische Erdgasverbrennungsmotoren mit monovalentem Betrieb bieten die Vorteile einer vergleichsweise zum Diesel-Pendant einfacheren AGN. Ein Drei-Wege-Katalysator ist ausreichend zur Einhaltung der Abgasnorm EURO VI (vgl. bspw. [9]).

### 2.1.2.3. Kühlsystem

Ein erheblicher Teil der über den Kraftstoff zugeführten Energie muss in Form von Wärme über das Kühlsystem abgeführt werden. Zu hohe Temperaturen führen zu Beschädigungen des Motors, wie z. B. Abreißen des Schmierfilms, Kolbenfresser und Verbrennen der Ventile. Ein Motorkühlsystem muss auch unter extremen Betriebsbedingungen eine ausreichende Kühlung sicherstellen.<sup>15</sup> Das folgende Zitat fasst beispielhaft die Anforderungen an moderne Kühlsysteme in NFZ zusammen:

„Forderungen nach mehr Effizienz und Wirtschaftlichkeit, aber auch Faktoren wie höhere Nutzlasten, Turbolader-Technologie, Standheizungen und Klimaanlage ließen die klassische Motorkühlung zum komplexen Motorkühlsystem heranwachsen.“ [38, S. 4]

Ein modernes Kühlsystem eines NFZ verfügt über mehrere Kühlmittelkreisläufe (KMK): Hochtemperatur- (HT-KMK  $\approx 90^\circ\text{C}$ ), Kurzschluss-, Heiz- und Niedertemperatur-Kreislauf (NT-KMK  $\approx 60^\circ\text{C}$ ). Der separate Klimakreislauf wird aufgrund der vergleichsweise sehr geringen Kühlleistungen für die TEG-Entwicklung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Der HT-KMK regelt in erster Linie die Temperatur der VKM und durchströmt sowohl die Motorstruktur als auch den Hauptkühler (HT-Kühler). Der Kurzschlusskreislauf dient in Verbindung mit dem HT-Thermostat sowohl zum schnellen Warmlauf des Motors als auch zur Temperaturregelung der Motorstruktur im Warmbetrieb. Der optional integrierte Heizkreislauf im HT-KMK wird für die Standheizung vorzugsweise im sogenannten Winterbetrieb eingesetzt. Der NT-KMK kühlt die Ladeluft (LL) im Ladeluftkühler (LLK) und durchströmt bei geöffnetem NT-Thermostat den NT-Kühler als Wärmesenke. Eine mechanisch angetriebene Radialpumpe wird typischerweise als Kühlmittelpumpe eingesetzt. Weitere Bestandteile des Kühlsystems sind Verbindungsschläuche, der Ausgleichsbehälter (AGB) und ein über eine Visco-Kupplung angetriebener Lüfter. Ein vollständig zugeschalteter Lüfter benötigt eine mechanische Antriebsleistung im Bereich von 15–30 kW (s. Abbildung B.9 im Anhang), woraus sich ein Anteil am Kraftstoffverbrauch im Bereich von 2–15 % ergibt (vgl. [33, 37, 39, 40]). In Diesel-NFZ werden bevorzugt wassergekühlte AGR-Kühler eingesetzt. Dies führt zu einer größeren Dimensionierung des Kühlsystems und zu einer

<sup>15</sup>Typischer Grenzlastfall stellt die voll beladene Bergfahrt im Sommer mit 30 km/h dar (vgl. [37]).

Erhöhung der Wärmeaufnahme um rund 100 kW (vgl. [40]). Als Kühlflüssigkeit wird typischerweise ein Ethylenglykol-Wasser-Gemisch mit Mischungsverhältnis im Bereich von 30–60 Vol.-% Ethylenglykol verwendet (vgl. [38]).

Moderne Kühlsysteme leisten neben der Hauptaufgabe der Motorkühlung zudem einen wesentlichen Beitrag zur Kraftstoff- und Emissionsreduzierung (vgl. [33, 38]).

#### 2.1.2.4. Bordnetz

Die Bordnetzarchitektur<sup>16</sup> eines NFZ ist gekennzeichnet durch einen elektrischen Generator (Lichtmaschine), einen Speicherakkumulator sowie unterschiedliche (Klein-)Verbraucher, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Die elektrische Verschaltung stellt eine Parallelschaltung dar. Der Generator (G) wird mit einem Riementrieb über die Kurbelwelle vom Motor (M) angetrieben, um die elektrischen Verbraucher mit Strom zu versorgen bzw. die Starterbatterie zu laden. In Europa wird ein Niederspannungsbordnetz mit 24 V Gleichspannung eingesetzt.<sup>17</sup> Die eingesetzten Drehstromgeneratoren sind vorwiegend in der Bauweise als Kompaktgenerator ausgeführt (vgl. [41]). Im Bereich der SNFZ und Sattelzugmaschinen sind große Generatoren üblich mit Nennströmen im Bereich von 90–140 A. Bei mittleren Drehzahlen liegen Spitzenwirkungsgrade von Generatoren des Standes der Technik nach [41] im Bereich von 70–80 %. Betriebswirtschaftlich vorteilhafte Lösungskonzepte werden bei der Optimierung in der Fahrzeugtechnik zumeist zum Nachteil der Effizienz bevorzugt (vgl. [41, 42]). Blei-Säure-Batterien werden als Akkumulatoren und Starterbatterien eingesetzt (vgl. [33]). Zu den Vorteilen gehören unter anderem eine hohe Sicherheit und Robustheit, niedrige Herstellungskosten (typischerweise im Bereich von 50–150 EUR/kWh), geringe Wartungskosten, gute Recyclingfähigkeit und eine hohe Technologiereife. Allerdings erreicht dieser Batterietyp eine geringe gravimetrische Energiedichte im Bereich von 20–50 Wh/kg.<sup>18</sup>

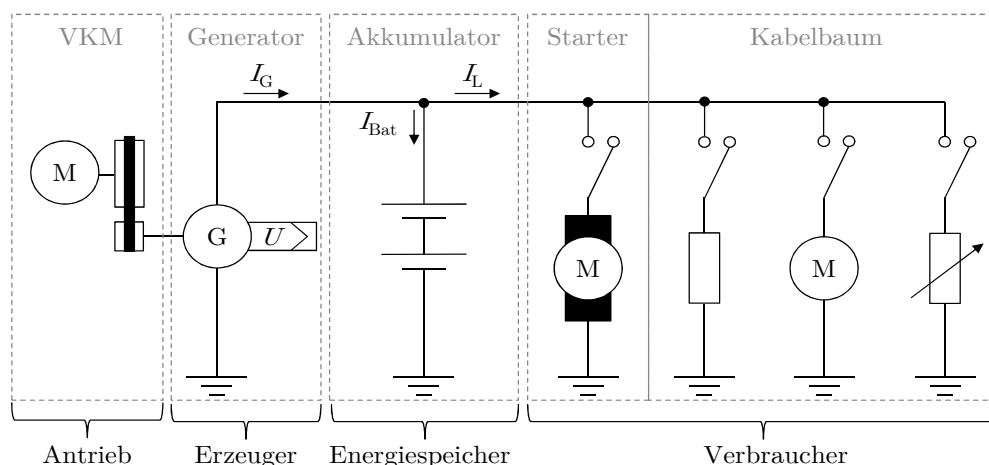


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung der 24 V-Bordnetztopologie eines NFZ des Standes der Technik

<sup>16</sup>Die Gesamtheit aller elektrischen Komponenten im Fahrzeug wird als Bordnetz bezeichnet.

<sup>17</sup>Beispielsweise ist in Nordamerika ein Bordnetz mit einer Nennspannung von 12 V typisch (vgl. [33]).

<sup>18</sup>Aktuelle Lithium-Ionen-Batterien bieten Energiedichten im Bereich von 90–160 Wh/kg.

## 2.2. Potentielle Verfahren zur Abwärmenutzung im Nutzfahrzeug

Technologien zur Abwärmenutzung für SNFZ sind Gegenstand von Forschungsaktivitäten (vgl. bspw. [43–45]). Die technischen Möglichkeiten werden aufgeschlüsselt nach der Verfahrensart in Abbildung 2.2 dargestellt. Direkte Verfahren<sup>19</sup> zur Abwärmenutzung stellen Technologien zum ‚Wärmetransport‘ und zur ‚Wärmespeicherung‘ dar. Der Thermoelektrische Generator, der Turbo-Compound und der Rankine-Prozess<sup>20</sup>, allesamt indirekte Verfahren zur Abwärmenutzung, bieten derzeit die größten Potentiale zur Effizienzsteigerung. Die zunehmenden Forschungsaktivitäten der letzten 15 Jahre spiegeln sich in der gestiegenen Anzahl von Veröffentlichungen insbesondere zum Rankine-Prozess wider (vgl. [44]).

Das Funktionsprinzip und beispielhafte Ausführungen der drei Systeme sind in Abbildung 2.3 illustriert. Der verfügbaren Abgasenthalpie wird systemspezifisch Energie entzogen, wodurch das Druck- und Temperaturniveau vom Systemeingang ( $T_{AG,ein}$ ) zum Ausgang ( $T_{AG,aus}$ ) sinkt. Bis auf das TC-System wird Kühlmittel und deren Temperaturniveau ( $T_{KM,ein}$ ) als Wärmesenke verwendet. Durch den systemabhängigen Wärmeintrag wird die Kühlmitteltemperatur ( $T_{KM,aus}$ ) erhöht. Das RP-System kann anhand des thermodynamischen Clausius-Rankine-Kreisprozesses beschrieben werden. Im geschlossenen rechtsläufigen Arbeitsprozess erfolgt zunächst die adiabate Expansion

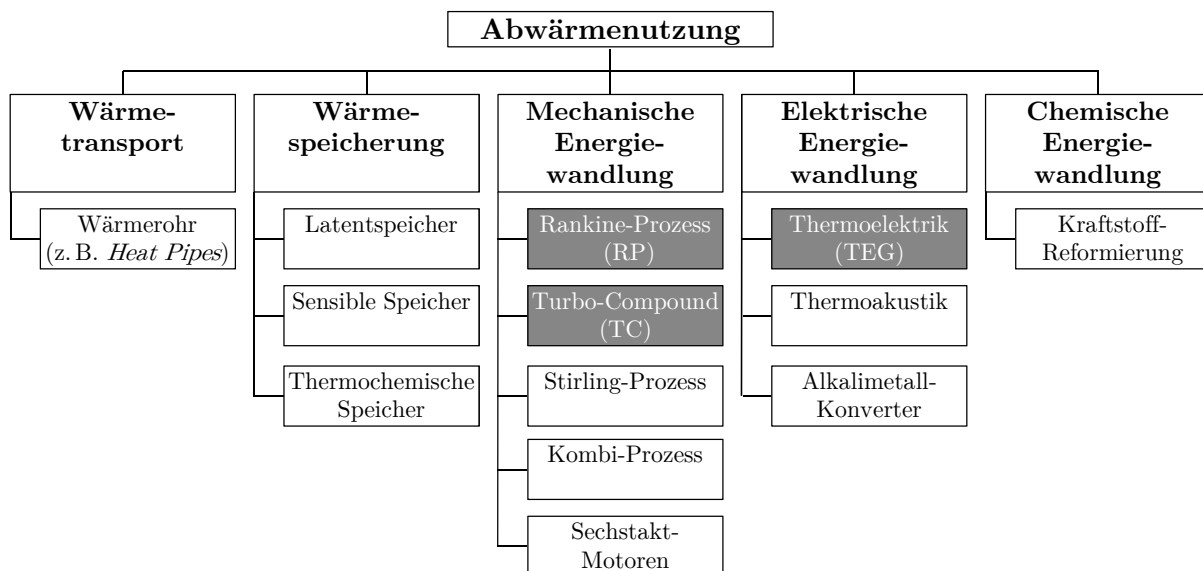


Abbildung 2.2.: Übersicht geeigneter Verfahren und Technologien zur Abwärmenutzung im Nutzfahrzeug (grau hinterlegt: technisch-ökonomisch vielversprechende Technologien)

<sup>19</sup>Die Abwärme wird in anderen Prozessen auf einem niedrigeren Temperaturniveau als Wärme genutzt. Bei indirekten Verfahren wird Abwärme gewandelt in beispielsweise elektrische Energie.

<sup>20</sup>Für NFZ-Anwendungen wird überwiegend das organische RP-System untersucht. Das zur Verfügung stehende Temperaturgefälle ist für den Betrieb einer wasserdampfbetriebenen Turbine oftmals zu gering und das Arbeitsmedium Wasser erfordert als Nachteil eine Heizung als Frostschutz.

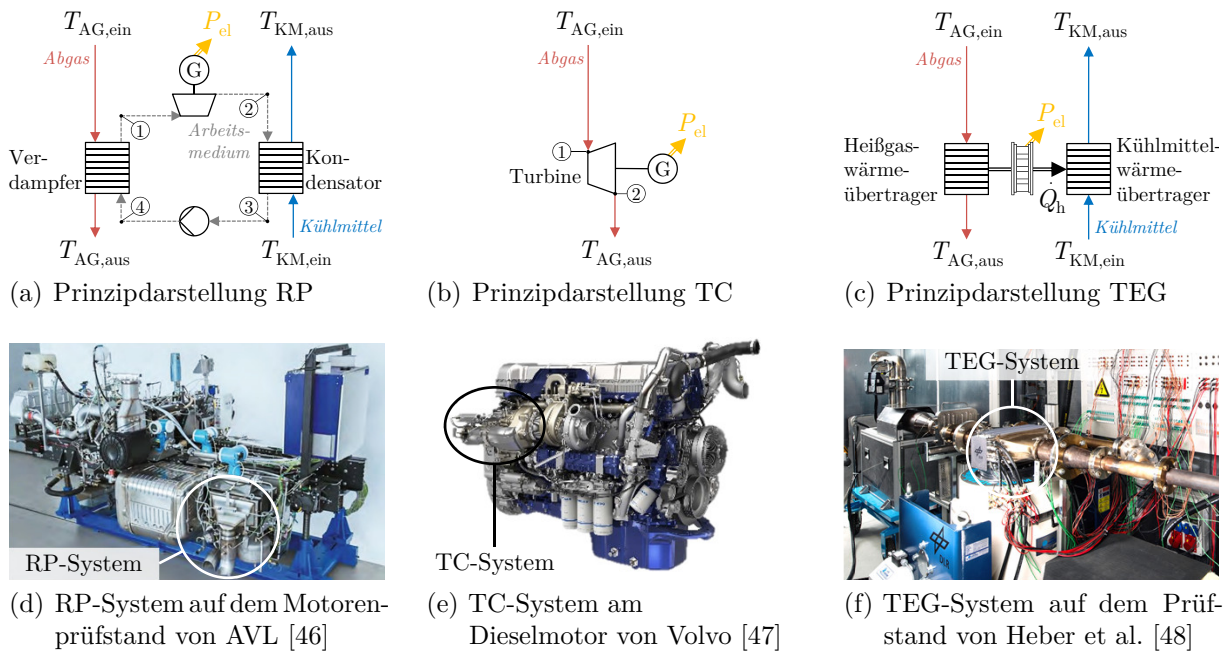


Abbildung 2.3.: Wirkprinzip und beispielhafte Bauweisen vom RP-, TC- und TEG-System

des Dampfgemisches des Arbeitsmediums (z. B. Wasser, Ethanol oder Cyclopentan) in der Turbine (Prozessschritte: ① → ②; s. Teilabbildung 2.3 (a)). Es folgt eine isobare Kondensation des Dampfes im Kondensator durch die Kühlung mittels eines Kühlmittelkreislaufes (② → ③). Anschließend erfolgt die isentrope Kompression des Arbeitsmediums mittels einer Pumpe (③ → ④). Im letzten Schritt erfolgt im Verdampfer eine isobare Wärmezufuhr über die Verdampfung des Arbeitsmediums hinaus (④ → ①). Das TC-System stellt vereinfacht die Turbinenstufe des Joule-Vergleichsprozesses dar. Demnach wird der Turbine das gasförmige Arbeitsmedium (z. B. Abgas) zugeführt und eine technische Arbeit durch die isentrope Expansion verrichtet (① → ②; s. Teilabbildung 2.3 (b)). Die mechanische Energie der Turbine kann sowohl beim RP-System als auch beim TC-System mittels eines Getriebes in den Antriebsstrang eingekoppelt und direkt genutzt werden. Optional ist der Einsatz eines elektrischen Generators (G) möglich, der die mechanische Energie wandelt. Die elektrische Leistung ( $P_{el}$ ) kann im elektrischen Bordnetz des Fahrzeuges genutzt oder gespeichert werden. Die beweglichen Komponenten der beiden Systeme sind im Vergleich zum TEG-System nachteilig in Bezug auf die Komplexität und den Wartungsaufwand. Beim TEG-System ermöglichen dotierte Halbleitermaterialien in thermoelektrischen Modulen, die zwischen abgas- und kühlmittelseitigen Wärmeübertragern positioniert sind, die direkte Umwandlung thermischer in elektrische Energie (s. Teilabbildung 2.3 (c)). Zur groben technologischen Bewertung der Systeme werden im Folgenden die potentiell erreichbaren Kraftstoffreduktionen nach dem Stand der Technik zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit beschrieben.

**Rankine-Prozess:** Laut einer Studie von [45] sind bis zu 3% Kraftstoffreduktion realistisch und nach [49] bis zu 7,5% im Bereich des technisch möglichen für konventionelle Diesel-NFZ. Die Auswahl des Arbeitsmediums und des oberen Temperaturniveaus des Prozesses hat entscheidenden Einfluss auf den Wirkungsgrad aber auch auf die Dauerhaltbarkeit des Systems. Mit Hilfe einer teilvalidierten Gesamtfahrzeugsimulation liegt nach [34] die Reduktion auf einer Rundstrecke im Bereich von 1,3–2,5%. Bei einem mechanisch gekoppeltem RP-System im Fahrzeug der Firma AVL List [46] beträgt die Kraftstoffreduktion bis zu 2,6% auf einer Realfahrt mit großen topografischen Höhendifferenzen. In weiteren Simulationsstudien werden im Teillastbereich und bei niedrigen Umgebungstemperaturen ( $< 10\text{ °C}$ ) eine maximale Reduktion von 3,3% ermittelt. Im konventionellen Diesel-NFZ stellt die Kühlsystemkapazität den limitierenden Faktor dar. Die Firma Mahle [50] ermittelt eine Kraftstoffreduktion von bis zu 3,2% für ein fahrzeugintegriertes RP-System mit elektrischer Energieeinkopplung in einem Diesel-Mildhybrid-NFZ, das ausreichend elektrische Verbraucher und Speicherkapazität für die umgewandelte Energie bereitstellt.

**Turbo-Compound:** Wie der Rankine-Prozess kann dieses System je nach Konfiguration mechanische oder elektrische Ausgangsleistungen liefern. Es bietet nach [49] ein prinzipielles Kraftstoffreduktionspotential von bis zu 4%, bzw. nach [51] simulativ von bis zu 1,2% unter Vollast. Bei SNFZ im Fernverkehr dominieren jedoch die Teillastbereiche (s. Abbildung B.8 im Anhang). In diesen kann laut [51] der Kraftstoffverbrauch aufgrund der motornahen Positionierung des Systems, der daraus resultierenden Verringerung der Abgasenthalpie und des negativen Einflusses auf die Abgasnachbehandlung um bis zu 3% steigen. Daher erscheint dieses System für den Einsatz in SNFZ im (über-)regionalen Einsatz als ineffizient und unwirtschaftlich. Die Bereitstellung eines zusätzlichen Drehmoments ist zum Beispiel für leistungsstarke Schwerlast-LKW<sup>21</sup> besser geeignet.

**TEG-System:** Die Ergebnisse im Bereich von Nutzfahrzeuganwendungen wurden bislang meist von TEG-Auslegungen für PKW-Anwendungen abgeleitet. Spezifische Entwicklungen und Systemauslegungen sind selten erfolgt. Nach der Studie von [49] sind Kraftstoffreduktionen von bis zu 2,5% und nach dem detaillierten Simulationsmodell von [34] im Bereich von 0,3–0,7% im konventionellen NFZ mit Dieselmotor erreichbar. Die Spannweite der Angaben und damit die Unsicherheit im Bereich von Faktor 3–9 lässt den Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit erkennen.

Das Rankine-System gilt ebenso wie der Turbo-Compound als technisch ausgereift. Der erforderliche Bauraum, das zusätzliche Gewicht und die Fahrzeugwechselwirkungen der Systeme gelten als noch nicht optimal (vgl. z. B. [45, 51, 52]). Die Fragestellungen der Wartung, Instandhaltung und Sicherheit sowie die derzeit unwirtschaftlichen Systemkosten (vgl. z. B. [45, 53]) sind noch nicht zufriedenstellend beantwortet.

---

<sup>21</sup>Gemeint sind NFZ mit einem zGG von mehr als 40 t und einer Nennleistung von über 550 kW.

Tabelle 2.1.: Übersicht der erfolgversprechendsten Technologien zur Abwärmenutzung im schweren NFZ: Rankine-Prozess (RP), Turbo-Compound (TC) und Thermoelektrischer Generator (TEG)

Bezeichnung	Fz.	Einheit	RP	TC	TEG
Maximale Kraftstoffreduktion	$ \Delta B_{\max} $	[%]	3,3 (7,5)	4	2,5
Mittlere Kraftstoffreduktion	$ \Delta \bar{B} $	[%]	2,6	1,2	0,7
Systemgewicht	$m$	[kg]	110–400	70–110	35–80
Leistungsdichte (grav. / vol.)	$\psi / \phi$	$[\frac{W}{kg} / \frac{W}{dm^3}]$	87 / 96	200 / 550	74 / 60
Kostenschätzung im Jahr 2020*	$K_{2020}$	[EUR]	6985	2005	1900
Kostenschätzung im Jahr 2030*	$K_{2030}$	[EUR]	3005	1640	600
Technologie-Reifegrad			hoch	serienreif	gering
Quelle			[46, 54–56]	[51, 56, 57]	[34, 58, 59]

\* Eigene Abschätzung für eine jährliche Serienproduktion von 30.000 Stück; s. Abschnitt 5.2.3.

Eine Übersicht der derzeit erfolgversprechendsten Technologien zur Abwärmenutzung im konventionellen SNFZ mit Dieselmotor ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Die Fahrzeugintegration der RP- und TC-Systeme erfolgt, wie in der Forschung überwiegend vorgesehen, durch eine mechanische Einbindung. Das TEG-System wird elektrisch in das Bordnetz des Fahrzeugs integriert. Als Ergebnis des Systemvergleichs zeigt sich, dass TEG-Systeme das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen können. Das Verhältnis von Systemkosten ( $K_{\text{TEG}}$ ) zur Kraftstoffreduktion ( $|\Delta B|$ ) liegt bei rund 860 EUR/% nach der Kostenschätzung für das Jahr 2030. Dies erfordert jedoch erhebliche Kostensenkungen und/oder weitere Effizienzsteigerungen, was im Fortgang dieser Arbeit aufgezeigt wird. Kostenbeiträge für Wartung, Instandhaltung und eventuelle Reparaturen sind bei den Kostenangaben nicht berücksichtigt worden. Für das RP- und TC-System werden diese deutlich höher sein als für das TEG-System. Letzteres gilt als wartungsfrei. Insbesondere für RP-Systeme ist eine große Spannweite der Kostenschätzungen bekannt. Die Systemkosten liegen nach [50] bei weniger als 3000 EUR und nach [45] bei über 11.000 EUR ohne Wartungs- und Reparaturkosten.

## 2.3. Grundlagen der thermoelektrischen Energiewandlung

In diesem Abschnitt wird zum besseren Verständnis dieser Arbeit zunächst die Nomenklatur dieser Arbeit eingeführt und anschließend werden die physikalischen Effekte beschrieben. Im Anschluss daran wird der Stand der Technik der für die Energieumwandlung wesentlichen Komponenten, thermoelektrische Materialien und Module sowie Wärmeübertrager, vorgestellt.

### 2.3.1. Nomenklatur thermoelektrischer Systeme

Im Stand der Technik werden Begrifflichkeiten widersprüchlich verwendet. Daher wird im Folgenden die Nomenklatur für diese Arbeit definiert. Es wird unterschieden zwischen: TEM, TEG, TEG-System und dem Gesamtfahrzeug, wie am Beispiel der TEG-Entwicklung

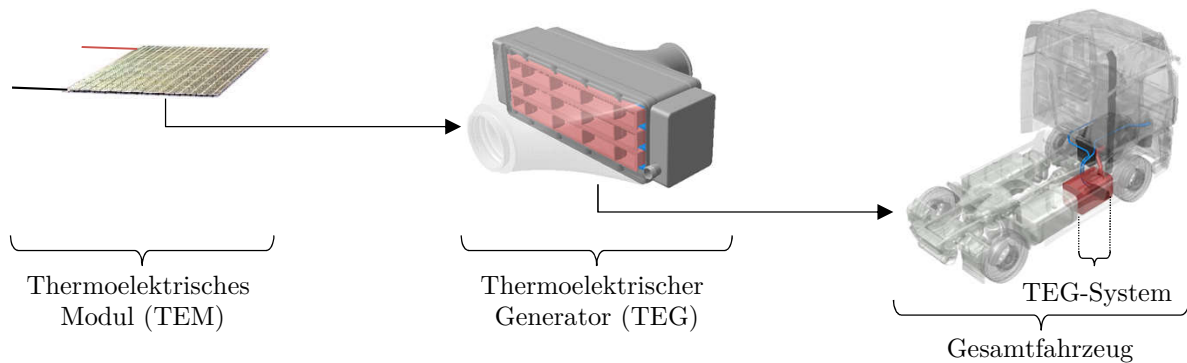
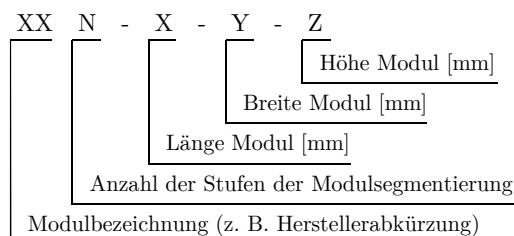


Abbildung 2.4.: Nomenklatur dieser Arbeit von thermoelektrischen Generatorsystemen

für das Diesel-NFZ in Abbildung 2.4 illustriert. Thermoelektrische Module (TEM) bestehen unter anderem aus dotiertem Halbleitermaterial. Der TEG fasst mehrere TEM, die Heißgaswärmeübertrager (HGWÜ), die Kühlmittelwärmeübertrager (KMWÜ), die thermischen Kontaktierungen und die Leistungselektronik in einem Gehäuse zusammen. Unter TEG-System wird der TEG einschließlich der Einbindung in die Fahrzeugteilsysteme (s. z. B. Abschnitt 2.1.2) verstanden. Das Gesamtfahrzeug vereint übergeordnet das Fahrzeug einschließlich integriertem TEG-System.

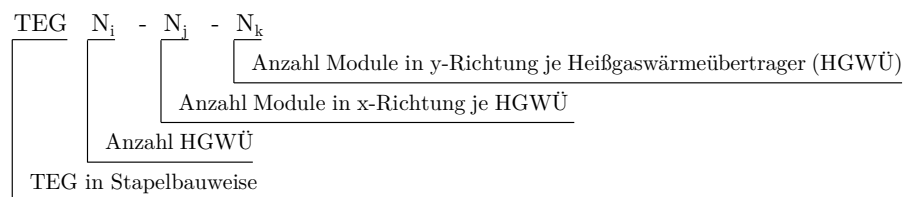
Es existieren unterschiedliche TEM-Bauweisen. Die planare Bauweise<sup>22</sup> mit Halbleiterschchenkeln einer Materialklasse ist die am häufigsten ausgelegte und diejenige mit dem größten technologischen Reifegrad (s. Abbildung 2.7). Folgendes System der Bezeichnung von planaren Modulbauweisen mit und ohne segmentierten Schenkeln (s. Abbildung 2.8) wird in dieser Arbeit verwendet:



Da verschiedene Temperaturniveaus in den Anwendungsszenarien vorliegen, kommen unterschiedliche thermoelektrische Materialien zum Einsatz. Es erfolgt die Unterscheidung von Materialien für Niedertemperatur (NT), bis rund 300 °C Heißseitentemperatur, und Hochtemperatur (HT) im Bereich von 300–600 °C. Der Begriff der Höchsttemperatur wird bei Thermoelektrika mit noch höheren Einsatztemperaturen verwendet.

Unterschiedliche Modulbauweisen und/oder -auslegungen in Längsrichtung des Abgasstroms in einem Gehäuse oder als modulare Einheiten in mehreren separaten Gehäusen werden als Sektionen bezeichnet. Folgendes System der Bezeichnung von TEG in Stapelbauweise wird für die Entwicklungen in dieser Arbeit verwendet:

<sup>22</sup>Die planare Bauweise wird auch als ‚konventionelle‘ oder ‚klassische‘ Bauweise bezeichnet (vgl. [60, 61]).



Anhand der drei Zahlenangaben  $N_i$ ,  $N_j$ ,  $N_k$  wird die Auslegungscharakteristik des TEG-Ergebnisdesigns verdeutlicht und die Gesamtanzahl der Module  $n_{\text{TEM}}$  kann ermittelt werden ( $n_{\text{TEM}} = 2 \cdot N_i \cdot N_j \cdot N_k$ ). Die Begrifflichkeit des TEG-Kerns, d. h. TEG exklusive Diffusor, Konfusor und Leistungselektronik, wird zur Angabe des TEG-Volumens und -gewichts sowie zur Vergleichbarkeit mit dem Stand der Technik verwendet.

Im Rahmen der Entwicklung wird in dieser Arbeit zwischen einer gesamtsystemischen und einer ganzheitlichen Betrachtungsweise unterschieden. Die gesamtsystemische Auslegung stellt die geordnete Kombination heterogener Teilsysteme auf der Ebene des Gesamtfahrzeugs dar und umfasst die technologischen Aspekte, wie z. B. die Berücksichtigung aller positiven und negativen Effekte der Fahrzeugwechselwirkungen mit dem TEG-System. Die ganzheitliche Auslegung ist dieser übergeordnet und umfasst zudem die wirtschaftlichen Aspekte, wie die System- und Gesamtbetriebskosten.

### 2.3.2. Thermoelektrizität

Die gegenseitige Beeinflussung von Temperatur und Elektrizität und ihre Umsetzung ineinander wird als Thermoelektrizität verstanden. Die folgenden drei Effekte beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den beiden physikalischen Größen.

#### 2.3.2.1. Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt<sup>23</sup> beschreibt die entstehende elektrische Spannung<sup>24</sup>  $U_{\text{Seebeck}}$  bzw. vereinfacht formuliert  $U$  nach [62, 63], die aufgrund einer Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_h - T_k$  (mit  $T_h > T_k$ ) an der Kontaktstelle zwischen zwei unterschiedlichen elektrischen (Halb-)Leitern entsteht.

$$U = \int_{T_k}^{T_h} \alpha_p(T) \cdot dT - \int_{T_k}^{T_h} \alpha_n(T) \cdot dT = \int_{T_k}^{T_h} \alpha_{n,p}(T) \cdot dT \tag{2.3}$$

Diese auch als Thermospannung oder -kraft bezeichnete Spannung hängt von der Temperaturdifferenz und dem temperaturabhängigen Materialparameter, dem Seebeck-Koeffizient  $\alpha(T)$  der beiden (Halb-)Leitermaterialien n-Typ ( $\alpha_n(T)$ ) und p-Typ ( $\alpha_p(T)$ )

<sup>23</sup>Ist benannt nach dem deutsch-baltischen Physiker T. J. Seebeck (\* 1770, † 1831).

<sup>24</sup>Für kleine Temperaturdifferenzen ergibt sich annähernd eine lineare Beziehung der Form  $U = \bar{\alpha}_{n,p} \cdot \Delta T$ ;  $\bar{\alpha}$  stellt den über die Temperaturdifferenz gemittelten Seebeck-Koeffizienten dar.



ab.<sup>25</sup> Der relative Seebeck-Koeffizient der beiden Materialien wird als  $\alpha_{n,p}$  definiert.

$$\alpha_{n,p} = \alpha_p - \alpha_n \quad (2.4)$$

Sofern der Stromkreis geschlossen wird, fließt ein Thermostrom genannter elektrischer Strom  $I$ . Der Effekt lässt sich durch die Thermodiffusion erklären (vgl. [64]). Eine Temperaturdifferenz bewirkt Differenzen zwischen den Teilchengeschwindigkeiten auf der heißen und kalten Seite eines Festkörpers. Infolgedessen bewegen sich die Elektronen in Richtung der kalten Seite.

### 2.3.2.2. Peltier-Effekt

Beim Peltier-Effekt<sup>26</sup> liegen gegenüber dem Seebeck-Effekt umgekehrte Verhältnisse vor — ein elektrischer Stromfluss bewirkt eine Änderung des Wärmetransportes (vgl. [65]). Liegt in einem stromdurchflossenen elektrischen Leiter eine Temperaturdifferenz an und fließt gleichzeitig ein elektrischer Strom, wie beispielsweise bei der Umwandlung von thermischer in elektrische Energie, so überlagern sich beide Effekte, wie z. B. bei einem stromdurchflossenen Thermopaar. Der Peltier-Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{Peltier}}$  bzw. vereinfacht formuliert  $\dot{Q}$ , ist linear abhängig vom Stromfluss  $I$  und dem materialspezifischen Peltier-Koeffizient  $\Pi_{n,p}$  der beiden Leitermaterialien ( $\Pi_{n,p} = \Pi_p - \Pi_n$ ):

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t} = \Pi_{n,p} \cdot I = \alpha_{n,p} \cdot T \cdot I \quad (2.5)$$

Die erste Kelvin (Thomson)-Relation [66] beschreibt den Zusammenhang zwischen Peltier- und Seebeck-Koeffizient ( $\Pi_{n,p} = \alpha_{n,p} \cdot T$ ) anhand der absoluten Temperatur  $T$  der heißen bzw. kalten Kontaktstelle. Beim Peltier-Effekt handelt es sich um einen reversiblen Prozess, im Gegensatz zur Erzeugung Joulescher Wärme<sup>27</sup>  $\dot{Q}_{\text{Joule}}$ . Diese lässt sich als Produkt aus innerem Widerstand des Leiters  $R_i$  und Stromfluss im Quadrat formulieren:

$$\dot{Q}_{\text{Joule}} = R_i \cdot I^2 \quad (2.6)$$

### 2.3.2.3. Thomson-Effekt

Aus thermodynamischer Sicht verdeutlicht der Thomson-Effekt<sup>28</sup> die Beziehung zwischen dem Seebeck- und Peltier-Koeffizienten. Dieser beschreibt einen Wärmestrom, der zusätzlich zur Jouleschen Wärme an einem stromdurchflossenen Leiter mit

<sup>25</sup>Nachfolgende temperaturabhängige Materialparameter werden in der Kurzschreibweise ohne Kennzeichnung der Abhängigkeit bzw. der Mittelwertbildung formuliert, soweit nicht explizit erforderlich.

<sup>26</sup>Ist benannt nach dem französischen Naturwissenschaftler J. C. A. Peltier (\* 1785, † 1845).

<sup>27</sup>Die Joule-Wärme beschreibt die thermische Energie, welche bei stromdurchflossenen elektrischen Leitern infolge des elektrischen Widerstands auftritt nach dem ersten Gesetz von J. P. Joule (\* 1818, † 1889).

<sup>28</sup>Ist benannt nach dem britischen Physiker W. Thomson (1. Baron Kelvin; \* 1824, † 1907).

Temperaturgradient auftritt (vgl. [66, 67]). Der Gesamtwärmestrom lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\dot{Q} = \frac{J^2}{\sigma_{n,p}} - \underbrace{\mu_{n,p}}_{=T \cdot \frac{d\alpha_{n,p}}{dT}} \cdot J \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

Hierbei stellt  $J$  die elektrische Stromdichte,  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit der beiden Halbleitermaterialien,  $\frac{dT}{dx}$  den Temperaturgradienten entlang des Leiters (in x-Koordinatenrichtung) und  $\mu_{n,p} = \mu_p - \mu_n$  den Thomson-Koeffizienten der Leitermaterialien dar. Der erste Term der Gleichung kennzeichnet die irreversible Joulesche Wärme (s. Gleichung 2.6) und der zweite Term die reversible Thomson-Wärme, deren Vorzeichen mit der Richtung des Stromflusses wechselt. Durch die zweite Kelvin (Thomson)-Relation lässt sich der Thomson-Koeffizient unter Verwendung des Seebeck-Koeffizienten und der absoluten Temperatur ausdrücken.

In der Realität wird der Thomson-Effekt von der Joule-Wärme überlagert und ist schwer nachzuweisen. Aufgrund der kleinen Thomson-Koeffizienten (typische Größenordnung  $\approx 10^{-6}$  V/K) ist der Effekt für technische Systeme von geringer Bedeutung und wird, wie in dieser Arbeit, zumeist vernachlässigt<sup>29</sup> (vgl. [32, 70–72]).

### 2.3.2.4. Gütezahl und Wirkungsgrade

Thermoelektrische Anwendungen mit hohem Wirkungsgrad erfordern Materialien mit den Eigenschaften einer hohen elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$ , eines hohen Seebeck-Koeffizienten  $\alpha$ <sup>30</sup> und einer niedrigen thermischen Leitfähigkeit  $\lambda$ , wie von Altenkirch<sup>31</sup> [73, 74] beschrieben. Dieses Erkenntnis lässt sich in Form der dimensionslosen Gütezahl  $ZT$ <sup>32</sup> anhand des Produkts aus der Gütezahl  $Z$ , als Mittelwert über der globalen Temperatur, und der absoluten Temperatur ( $T$ ) formulieren. Diese sollte nach [75] differenziert werden zur Gütezahl  $zT$ , bei der die lokale Temperatur des Materials berücksichtigt wird:

$$ZT = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{\lambda} \cdot T \quad \text{bzw.} \quad zT(T) = \frac{\sigma(T) \cdot \alpha^2(T)}{\lambda(T)} \cdot T \quad (2.8)$$

Die dimensionslose Gütezahl wird zur Charakterisierung, zum Vergleich und zur Bewertung von unterschiedlichen Thermoelektrika verwendet. Der Wirkungsgrad eines TE-Bauteils wird durch den thermoelektrischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{TEM}}$  beschrieben:

$$\eta_{\text{TEM}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{h}}} = \eta_{\text{th}} \cdot \eta_{\text{TM}} \quad (2.9)$$

<sup>29</sup>Beispielsweise wird dieser Effekt bei der Entwicklung von TE-Materialien berücksichtigt (vgl. [68, 69]).

<sup>30</sup>Angabe für ein Material:  $\alpha_n$  bzw.  $\alpha_p$  und für zwei (Leiter-)Materialien:  $\alpha_{n,p}$  bzw. vereinfacht als  $\alpha$ .

<sup>31</sup>E. Altenkirch (\* 1880, † 1953).

<sup>32</sup>Aus dem engl. als *Figure of Merit* bekannt.

Dieser ist allgemein definiert als der Quotient von der gewandelten elektrischen Leistung  $P_{\text{el}}$  und dem zugeführten Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{h}}$ . Zudem wird dieser als Produkt aus dem thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{th}}$  und dem thermoelektrischen Material  $\eta_{\text{TM}}$  dargestellt. Erstgenannter beschreibt das Verhältnis zwischen der im System umgesetzten Energie ( $\dot{Q}_{\text{zu}} - \dot{Q}_{\text{ab}}$ ) zur zugeführten Energie ( $\dot{Q}_{\text{zu}}$ ). Unter Annahme einer idealen Festkörperwärmeleitung ist die Formulierung anhand des Verhältnisses der Heißseitentemperatur  $T_{\text{HS}}$  und Kaltseitentemperatur  $T_{\text{KS}}$  z. B. des TEM zulässig als:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{T_{\text{HS}} - T_{\text{KS}}}{T_{\text{HS}}} \quad (2.10)$$

Die theoretische Obergrenze für den thermischen Wirkungsgrad stellt der Carnot-Wirkungsgrad  $\eta_{\text{c}}$  anhand der maximalen  $T_{\text{h}}$  und minimalen Temperatur  $T_{\text{k}}$  des Gesamtsystems bzw. Prozesses dar:

$$\eta_{\text{c}} = \frac{T_{\text{h}} - T_{\text{k}}}{T_{\text{h}}} \quad (2.11)$$

Die Formulierung des thermoelektrischen Materialwirkungsgrades lässt sich auf zwei Arten beschreiben: unter Annahme eines maximalen Wirkungsgrades oder einer maximalen Leistung. Zunächst kann dieser nach [76] in allgemeiner Form beschrieben werden als:

$$\eta_{\text{TM}} = \frac{m}{\frac{1}{Z} \frac{(m+1)^2}{T_{\text{HS}}} + (m+1) - \frac{1}{2} \frac{T_{\text{HS}} - T_{\text{KS}}}{T_{\text{HS}}}} \quad \text{mit } m = \frac{R_{\text{L}}}{R_{\text{i}}} \quad (2.12)$$

Dabei stellt  $m$  den Quotienten von Lastwiderstand  $R_{\text{L}}$  und Innenwiderstand  $R_{\text{i}}$  dar, der den Stromfluss und somit die Größe des Peltier-Wärmestromes bestimmt. Für den maximalen Umwandlungswirkungsgrad gilt mit  $m_{(\eta_{\text{max}})} = (1 + Z\bar{T})^{\frac{1}{2}}$ :

$$\eta_{\text{TM}(\eta_{\text{max}})} = \frac{(1 + Z\bar{T})^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + Z\bar{T})^{\frac{1}{2}} + \frac{T_{\text{KS}}}{T_{\text{HS}}}} \quad \text{mit } \bar{T} = \frac{T_{\text{HS}} + T_{\text{KS}}}{2} \quad (2.13)$$

Gute TE-Materialien sollten einen hohen  $m_{(\eta_{\text{max}})}$ -Wert haben. Ist die maximale Leistung von bevorzugtem Interesse, wie in dieser Arbeit, führt die Bedingung  $R_{\text{L}} = R_{\text{i}}$  zu  $m_{(P_{\text{el,max}})} = 1$  und:

$$\eta_{\text{TM}(P_{\text{el,max}})} = \frac{1}{\frac{4}{Z \cdot T_{\text{HS}}} + 2 - \frac{1}{2} \frac{T_{\text{HS}} - T_{\text{KS}}}{T_{\text{HS}}}} \quad (2.14)$$

Im Vergleich zur Formulierung mit einem maximalen Wirkungsgrad aus Gleichung 2.13 ist der Peltier-Wärmestrom höher und dadurch der Wirkungsgrad niedriger.

### 2.3.2.5. Thermoelektrische Materialien

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Materialparameter besitzt jedes thermoelektrische Material eine optimale Temperatur, bei der die dimensionslose Gütezahl ihr Maximum erreicht. Die Problemstellung bei der Entwicklung neuer Materialien liegt in der Abhängigkeit der drei charakteristischen Eigenschaften, welche die Gütezahl bestimmen (s. Gleichung 2.8). Beispielsweise setzt sich die Wärmeleitfähigkeit eines Festkörpers aus dem Wärmetransport durch die freien Ladungsträger und den Phononen, d. h. die Anregungen von Gitterschwingungen und Ausbreitung von thermischen Wellen, zusammen. Die Wärmeleitfähigkeit der freien Ladungsträger lässt sich durch das Wiedemann-Franzsche Gesetz beschreiben ( $\lambda = \sigma \cdot L \cdot T$  mit der Lorenz-Zahl  $L$ ). Dieses verdeutlicht die Abhängigkeit der thermischen ( $\lambda$ ) und elektrischen Leitfähigkeit ( $\sigma$ ). Bei nanostrukturierten Multischichtstrukturen werden die charakteristischen Materialparameter durch die Größe der verwendeten Nanopartikel und -strukturen beeinflusst. Zielsetzung ist dabei die Reduktion der thermischen Leitfähigkeit, um die Gütezahl zu erhöhen. Mit Hilfe von erhöhter Phononenstreuung an den Grenzflächen wird der Anteil des Wärmetransportes durch das Gitter reduziert. Seit den späten 1990er Jahren bietet die Nanostrukturierung von Materialien eine Lösung, die zu erheblichen Verbesserungen der Gütezahlen geführt hat. Die Steigerungen liegen bei über 50 % im Vergleich zum Ausgangsmaterial (vgl. [77, 78]).

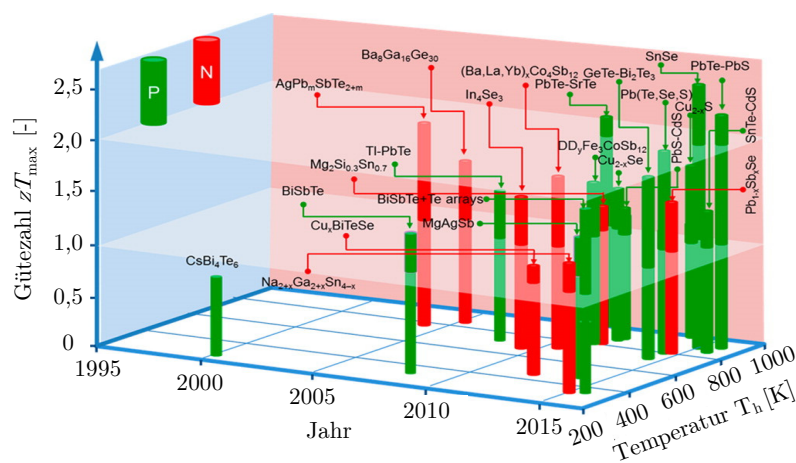


Abbildung 2.5.: Chronologische Entwicklung thermoelektrischer Materialien anhand der temperaturabhängigen thermoelektrischen Gütezahl; Abbildung aus [79]

Bedeutende Meilensteine bei der Materialentwicklung hinsichtlich hoher Gütezahlen sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Der höchste  $zT$ -Wert wird nach [80] für p-dotiertes und einkristallines Zinnselenid (SnSe) mit 2,6 erreicht. Für viele der abgebildeten Materialien im Labormaßstab steht die technische Umsetzung als Modulschenkel noch aus. Für einige gibt es noch keinen gleichwertigen zweiten Materialtyp, um damit ein Schenkelpaar zu realisieren. Die vielversprechendsten Materialklassen im Kleinserienmaßstab sind in den relevanten Temperaturbereichen für NFZ-Anwendungen in Abbildung 2.6 dargestellt und werden im Folgenden charakterisiert.

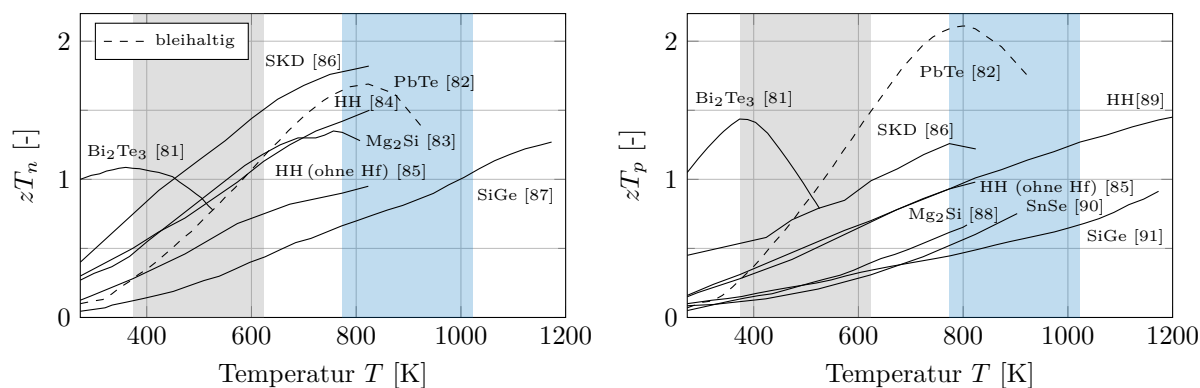


Abbildung 2.6.: Gütezahlen ausgewählter thermoelektrischer Materialien in relevanten Temperaturbereichen (grau hinterlegt für Diesel-NFZ und blau hinterlegt für Erdgas-NFZ)

**Bismuttellurid ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )** gehört zu den Chalkogeniden und wird am häufigsten für Module eingesetzt. Es kommt typischerweise bei NT-Anwendungen von Raumtemperatur bis  $300\text{ }^\circ\text{C}$  ( $573\text{ K}$ ) zum Einsatz. Aufgrund der natürlichen und anisotropen Schichtstruktur weist es eine gute Phononenstreuung auf und besitzt damit eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Ohne Nanostrukturierung sind  $zT$ -Werte von bis zu 0,9 möglich. Mit dieser liegen die Maximalwerte nach [81] für das n-dotierte Material bei 1,1 und für das p-dotierte Material bei 1,4 bei jeweils  $390\text{ K}$ .

**Bleitellurid ( $\text{PbTe}$ )** ist auch ein Vertreter der Chalkogenide für Anwendungen innerhalb des Temperaturbereichs von  $200\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  ( $473\text{--}873\text{ K}$ ). Nach [82] liegen die Maximalwerte für das n-dotierte Material bei 1,7 und  $823\text{ K}$  bzw. für das p-dotierte Material bei 2,1 und  $805\text{ K}$ . Der Einsatz von Blei ist in der Fahrzeugtechnik aufgrund seiner Toxizität durch gesetzliche Vorgaben reglementiert. Daher werden in dieser Arbeit ausschließlich bleifreie Alternativen untersucht, obwohl diese Materialklasse hohe Gütezahlen aufweist. Innerhalb der Chalkogenide sind das zum Beispiel Zinn- oder Selen-Tellurid und außerhalb mit derzeit höherer Effizienz Skutterudit- oder Halb-Heusler-Verbindungen.

**Magnesiumsilicid ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ )** ist den intermetallischen Verbindungen zuzuordnen und gehört zu den Einphasenmaterialien. Es kommt für Anwendungen bis rund  $550\text{ }^\circ\text{C}$  ( $823\text{ K}$ ) zum Einsatz. Nach [83] liegt der Maximalwert für das n-dotierte Material bei 1,4 und  $760\text{ K}$  bzw. nach [88] für das p-dotierte Material bei 0,7 und  $807\text{ K}$ . Aufgrund seiner geringeren Gütezahl ist der p-Typ Gegenstand aktueller Forschung.

**Halb-Heusler (HH)** sind ebenfalls Vertreter der intermetallischen Verbindungen und weisen eine spezielle kristalline Struktur auf. Der optimale Einsatzbereich liegt bei diesem HT-Material zwischen  $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$  ( $673\text{--}873\text{ K}$ ). Die Halb-Heusler-Legierungen, wie z. B.  $\text{ZrHf}$  und  $\text{SbSn}$ , setzen sich nach der Formel  $\text{XYZ}^{33}$  zusammen. Durch die Dotierung mit Hafnium (Hf) wurden höhere Gütezahlen erreicht, jedoch stellt dies ein kostenintensives Rohmaterial dar. Hafniumfreies HH-Material ist deshalb Gegenstand

<sup>33</sup>Jeder Buchstabe steht für ein Legierungselement.

aktueller Forschungsaktivitäten. Mit Hafnium liegt der Maximalwert nach [84] für das n-dotierte Material bei rund 1,5 und 825 K bzw. nach [89] für das p-dotierte Material bei 1,5 und 1200 K. Ohne Hafnium sind es nach [92] 1,2 bei 825 K bzw. nach [93] 1,1 bei 1100 K. Das kommerziell verfügbare hafniumfreie HH-Material des Herstellers Vacuumschmelze mit einem maximalen  $zT$ -Wert von jeweils rund 0,9 bei 773 K ist in Abbildung 2.6 dargestellt (vgl. [85]).

**Skutterudite (SKD)** sind auch intermetallische Verbindungen und werden als (Käfig-)Einschlussverbindungen bezeichnet. Die Kristallstruktur weist eine Einheitszelle mit einer im Zentrum unbesetzten Gitterposition auf, die durch ein Fremdatom gefüllt werden kann. Es gibt eine Vielzahl an SKD-Verbindungen, wie bspw. Kobalt-Antimon ( $\text{CoSb}_3$ ), die vielversprechende TE-Eigenschaften im Temperaturbereich von 300–550 °C (573–823 K) aufweisen. Nach [94] liegen die Maximalwerte für das n-dotierte Material bei 1,8 und 823 K bzw. für das p-dotierte Material nach [86] bei 1,3 und 775 K. SKD-Material wird vom Hersteller Treibacher Industrie AG kommerziell hergestellt (vgl. [95]).

**Siliziumgermanium (SiGe)** ist den Siliciden zuzuordnen und ist ein Höchsttemperaturmaterial für Anwendungen über 600 °C (873 K). Die Maximalwerte der Gütezahlen liegen nach [91] für das n-dotierte Material bei 1,3 bzw. nach [87] für das p-dotierte Material bei 0,9 jeweils bei 1173 K. Die Gütezahlen werden erst ab 800 K konkurrenzfähig, wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist.

### 2.3.2.6. Thermoelektrische Module

Eine große Herausforderung bei der Modulherstellung sind die hohen thermomechanischen Materialbelastungen, welche durch die Temperaturdifferenz und durch die thermischen Wechselbeanspruchungen hervorgerufen werden.

Bei den derzeit kommerziell erhältlichen Modulen handelt es sich zumeist um Module der planaren Bauweise mit Schenkeln einer Materialklasse, wie in Abbildung 2.7 dargestellt.

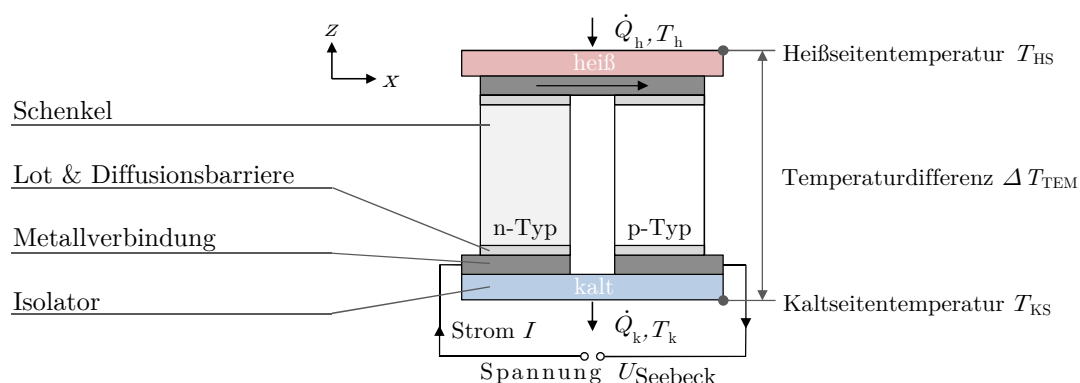


Abbildung 2.7.: Schematische Darstellung eines thermoelektrischen Schenkelpaares bei symmetrischem Schenkelaufbau einer Materialklasse in planarer Modulbauweise

Dabei werden quaderförmige n- und p-dotierte Schenkel aus thermoelektrisch aktivem Material auf einer quadratischen oder auch rechteckigen Grundfläche angeordnet und mit Hilfe von elektrisch leitenden Metallverbindungen, wie z. B. Kupfer, in Reihe geschaltet. Thermisch leiten die Vielzahl an Schenkeln parallel den Wärmestrom von der Wärmequelle, der sogenannten Heißseite, zur Wärmesenke, der sogenannten Kaltseite. Die jeweilige Anbindung erfolgt über einen keramischen Isolator. Eine gute thermische Anbindung setzt eine thermische Kontaktierung und zumeist einen mechanischen Anpressdruck voraus. Als Vorteile dieses Aufbaus gelten die einfache geometrische Gestaltung und flexible Variationsmöglichkeiten, die unkomplizierte Applikation sowie die kosteneffiziente (Serien-)Fertigung, aufgrund der Vielzahl an gleichartigen Komponenten. Ein Nachteil ist, dass die Schenkel den thermomechanischen Belastungen standhalten und gleichzeitig einen optimalen Wärmestrom und Stromfluss ermöglichen sollen. Im Stand der Technik hat dies dazu geführt, dass hohe Füllgrade realisiert wurden und relativ viel TE-Material verwendet wurde (s. Tabelle A.1 im Anhang). Da dieses oftmals aus kostenintensiven und begrenzten Ressourcen gewonnen wird resultierten die Auslegungen in hohen Modulkosten.

Die planare Bauweise wurde von Forschungsarbeiten und Modulherstellern stetig weiterentwickelt, um die genannten Schwächen zu beheben. Neben der Optimierung der eingesetzten Werkstoffe und Materialien, um beispielsweise die Gütezahl zu erhöhen oder die Kontaktwiderstände zu verringern, wurde der geometrischen Auslegung große Bedeutung beigemessen (vgl. bspw. [96–98]). Bei typischen Herstellungsverfahren von rechteckigen Schenkelprismen wird das TE-Material mit Kompaktierungsverfahren, wie z. B. durch Heißpressen, in konfektionierbare Halbzeuge in Form von zylindrischen Presslingen geformt, die abzüglich eines inhomogenen Randbereiches (vgl. bspw. [99]) mittels Wäfersägen in Einzelschenkel veräußert werden.

Weitere alternative Konzepte zur Modulbauweise befinden sich im Forschungs- oder Prototypenstadium und sind beispielhaft in Abbildung 2.8 illustriert. In dieser Arbeit wird der planare Aufbau aus mindestens zwei übereinander gestapelten Schenkeln unterschiedlicher Thermoelektrika als ‚segmentierter‘ Modulaufbau bezeichnet (s. Teilabbildung 2.8 (a) und (c)). Als Vorteil dieses Konzeptes wird das jeweils optimale TE-Material der vorherrschenden lokalen Temperaturdifferenz entlang der Modulhöhe eingesetzt. Die Nachteile sind höhere Kosten und eine komplexere Applikation. Beim ‚kaskadierten‘ Aufbau werden zwei TEM-Stufen, beispielsweise ein NT- und ein HT-Modul, übereinander positioniert (s. Teilabbildung 2.8 (b)). Die Funktionsintegration erfolgt über die gleichzeitige Nutzung einer gemeinsamen mittleren Isolatorschicht. Die unabhängige Optimierung und Auslegung der Materialstufen im Vergleich zur segmentierten Bauweise und die Möglichkeit der separaten und unabhängigen Stromerzeugung sind nennenswerte Vorteile. Nachteilig sind die höheren Herstellungs- und Materialkosten, insbesondere für die relativ kostenintensive keramische Isolierschicht, die einem günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis entgegenstehen.

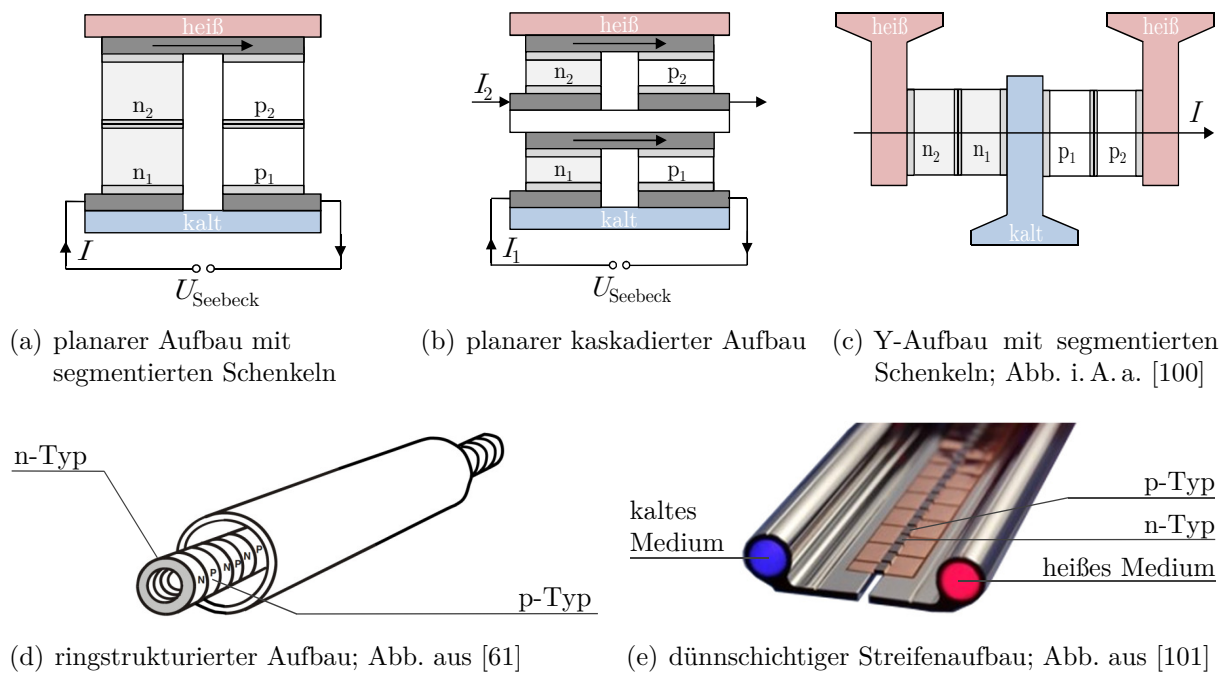
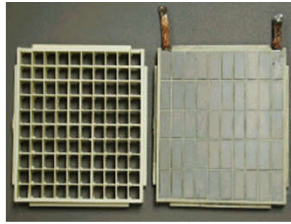


Abbildung 2.8.: Schematische Darstellung alternativer Modulbauweisen

Als eine alternative Lösung für die aufgeführten Nachteile der planaren Bauweisen ist der Y-Aufbau bekannt (s. Teilabbildung 2.8 (c); vgl. [100]). Durch die gewählte Konfiguration werden die mechanischen und thermischen Spannungen räumlich getrennt, was zur Entlastung der Halbleitermaterialien führt. Die p- und n-Schenkel können zudem geometrisch unsymmetrisch ausgestaltet werden. Für Anwendungen bei denen eine radiale Wärmestromrichtung von Vorteil ist, wie beispielsweise bei dünnen Rohren, ist der ringstrukturierte Aufbau bekannt (s. Teilabbildung 2.8 (d), vgl. [61]). Hierbei kommen zwei koaxiale Rohre und ringförmige Halbleiterschlenkel zum Einsatz. Um eine prozesstechnische und kostengünstige Herstellung zu ermöglichen wurde der dünnschichtige Streifenbauaufbau vom Hersteller O-Flexx [101] entwickelt (s. Teilabbildung 2.8 (e); vgl. [101]). Die Streifen können durch das Kunststoffträgermaterial stoffschlüssig mit der Wärmequelle und -senke verbunden werden. Bis zu  $8 \text{ W/m}$  ( $\vartheta_{\text{KS}} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und ein maximaler TE-Wirkungsgrad (s. Gleichung 2.9) von 2,5 % wurden mit der NT-Material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  gemessen. Als Vorteil werden demgegenüber niedrige Modulkosten durch Materialeinsparungen und die Nutzung großtechnischer Produktionsverfahren genannt.

**Ausgewählte Beispiele für NT-TEM:** Im Folgenden werden nur Beispiele für  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -Module aufgeführt, da diese überwiegend im Niedertemperaturbereich eingesetzt werden. Die Betriebstemperatur beträgt bis zu  $380 \text{ }^\circ\text{C}$  und die maximalen TE-Wirkungsgrade liegen im Bereich von 5–6 %. Das Modul HZ-20 vom Hersteller Hi-Z Technologie hat geometrische Abmessungen von  $75 \times 75 \times 5,6 \text{ [mm]}$ , eine Nennleistung von  $20 \text{ W}$  ( $\vartheta_{\text{HS}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\vartheta_{\text{KS}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ), eine kurzzeitige Spitzenleistung von  $30 \text{ W}$  und damit eine flächenspezifische Leistungsdichte von  $0,5 \text{ W/cm}^2$  bei einem Wirkungsgrad von 5,5 % (s. Teilabbildung 2.9 (a);





(a) HiZ HZ-20,  
Abbildung aus [102]



(b) Thermonamic 1-1264-3.4,  
Abbildung aus [103]



(c) GMZ Energy TG16-1.0,  
Abbildung aus [104]

Abbildung 2.9.: Beispielhafte Moduldarstellungen nach dem Stand der Technik für TEG im SNFZ

vgl. [105]). Messungen an der Modulprüfmaschine (*Absolute Thermoelectric Generator Measurement Apparatus*, TEGMA) des DLR – Institut für Werkstofforschung ergaben um bis zu 12 % reduzierte Wirkungsgrade (vgl. [32]). Ein Modul des Herstellers Thermonamic hat die Abmessungen von  $40 \times 40 \times 4,6$  [mm], eine Nennleistung von 5,4 W ( $\vartheta_{\text{HS}} = 300$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 30$  °C), eine Leistungsdichte von  $0,3 \text{ W/cm}^2$  und einen maximalen Wirkungsgrad von 6,1 % (s. Teilabbildung 2.9 (b); vgl. [103]).

**Ausgewählte Beispiele für HT-TEM:** Im Vergleich zu NT- sind HT-TEM beinahe ausschließlich im Prototypenstadium verfügbar.

Module der Materialklasse Half-Heusler sind bislang nur mit Hafnium bekannt. Das HH-Modul TG16-1.0 vom Hersteller GMZ Energy hat eine Einzelmodulkapselung und Abmessungen von  $40 \times 40$  ( $27 \times 27$  auf der Heißeite)  $\times 5$  [mm] (s. Teilabbildung 2.9 (c)). Die Nennleistung liegt bei 7,5 W ( $\vartheta_{\text{HS}} = 600$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 100$  °C; vgl. [104]), die Leistungsdichte bei  $0,5 \text{ W/cm}^2$  und der maximale Wirkungsgrad bei 4,3 %. Ein HH-Modul der Isabellenhütte [106] zeichnete sich durch Abmessungen von  $40 \times 40 \times 3,5$  [mm], eine Nennleistung von 15,8 W ( $\vartheta_{\text{HS}} = 550$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 50$  °C), eine Leistungsdichte von  $1 \text{ W/cm}^2$  und einen maximalen Wirkungsgrad von 4 % aus. Die Leistungsdichte kann nach [107] auf  $1,1 \text{ W/cm}^2$  ( $\vartheta_{\text{HS}} = 507$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 20$  °C) gesteigert werden. Vom Hersteller Yamaha ist ein HH-TEM mit maximalem Wirkungsgrad von 7 % bekannt ( $\vartheta_{\text{HS}} = 500$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 80$  °C; vgl. [72]). Messungen bestätigten bislang 4 % (vgl. [108]).

Vom Fraunhofer IPM sind SKD-TEM bekannt mit Abmessungen von  $16 \times 16 \times 3$  [mm] und einer maximalen Leistung von 1,9 W ( $\vartheta_{\text{HS}} = 500$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 20$  °C; vgl. [109]). Die Leistungsdichte liegt bei  $0,7 \text{ W/cm}^2$  und der maximale Wirkungsgrad bei 7,9 %. Vom Hersteller Marlow Industries sind SKD-TEM mit Abmessungen von  $50 \times 50 \times 8$  [mm] zu nennen. Die maximale Leistung liegt bei 11,5 W ( $\vartheta_{\text{HS}} = 500$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 40$  °C; vgl. [110]), die Leistungsdichte bei  $0,5 \text{ W/cm}^2$  und der maximale Wirkungsgrad bei 7 %. Vom Hersteller Furukawa sind SKD-TEM (Fe-Sb, Co-Sb) mit Abmessungen von  $50 \times 50 \times 7,6$  [mm], einer Nennleistung von 30 W ( $\vartheta_{\text{HS}} = 600$  °C;  $\vartheta_{\text{KS}} = 50$  °C; vgl. [111]), einer maximalen Leistungsdichte von  $1,2 \text{ W/cm}^2$  bei einem Wirkungsgrad von 7 % ( $zT_{\text{n,max}} = 1$ ;  $zT_{\text{p,max}} = 0,7$ ) bekannt.

Im Allgemeinen ist bemerkenswert, dass oftmals Diskrepanzen zwischen den Angaben der Modulhersteller und eigenen Messwerten auftreten. Die Bestimmung des Wärmestroms wird als nicht trivial angesehen (s. Gleichung 2.9), was insbesondere die exakte Bestimmung des Wirkungsgrades erschwert. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit Messwerte eigener Modulvermessungen nach der präzisen Absolutmethode zur Ermittlung des Wärmestroms (vgl. [112]) für die Systementwicklung berücksichtigt.

### 2.3.2.7. Wärmeübertragung und Auslegung von Wärmeübertragern

Entscheidenden Einfluss bei der Auslegung von Wärmeübertragern haben die drei Wärmetransportarten nach [113]: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Um einen guten Wirkungsgrad zu erreichen hat ein Wärmeübertrager (WÜ) mit indirekter Wärmeübertragung, d. h. die Bauteile trennen die Medien voneinander, in der Regel einen niedrigen thermischen Widerstand  $R_{th}$ :

$$R_{th,ges} = R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_h} = \frac{1}{k \cdot A} = \frac{r_{th}}{A} \quad (2.15)$$

Dieser wird im Allgemeinen als das Verhältnis von Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zu Wärmestrom  $\dot{Q}_h$  durch einen Körper (vgl. [113]) und in dieser Arbeit auch als thermischer Gesamtwiderstand  $R_{th,ges}$  definiert. Ein hoher Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  und eine große Oberfläche  $A$  sind für einen niedrigen thermischen Widerstand zielführend, wie aus der Gleichung 2.15 ersichtlich ist. Typische überschlägige  $k$ -Werte liegen nach [113] beispielsweise für Platten-WÜ mit Übertragungsbedingungen von ebenen Kanälen und der Fluid-Paarung Gas an Wasser im Bereich von 20–60 W/(m<sup>2</sup> K). Die Vergrößerung der Einflussfaktoren resultiert jedoch gleichzeitig in höheren Kosten. Insbesondere eine innere WÜ-Struktur wie beispielsweise eine Berippung erzielt hohe  $k$ -Werte (s. Gleichung 5.26). Wärmeübertragerstrukturen des Standes der Technik sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Die blechumformbasierten Rippenstrukturen aus Teilabbildung (a)–(f) stellen Geometrien für die Wärmeübertragung in planaren WÜ mit gasförmigen Fluiden dar (vgl. [113]). Typische Rippenabstände liegen im Bereich von 1,5–10 mm, typische Rippendicken liegen im Bereich von 0,05–0,3 mm und die Rippenhöhen variieren zwischen 2,5–20 mm (vgl. [114]). Hydraulische Durchmesser und Oberfläche/Volumen-Verhältnis liegen nach [115] für planare WÜ mit Berippung im Bereich von 1,2–25 mm und 200–3000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Für einen guten Wärmeübergang ist eine turbulente Strömung günstig (vgl. [113]).<sup>34</sup> Eine niedrige Viskosität des Mediums und hohe Strömungsgeschwindigkeiten sind dafür von Vorteil. Letztere erfordern jedoch in Verbindung mit großen benetzten Oberflächen einen hohen Energieaufwand, um die Medien durch den Wärmeübertrager zu befördern.

<sup>34</sup>Diese tritt vor allem bei hohen Reynolds-Zahlen ( $Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\eta}$  mit Dichte  $\rho$ , Strömungsgeschwindigkeit  $u$ , charakteristische Länge des Körpers  $d$  und dynamische Viskosität  $\eta$ ) auf.

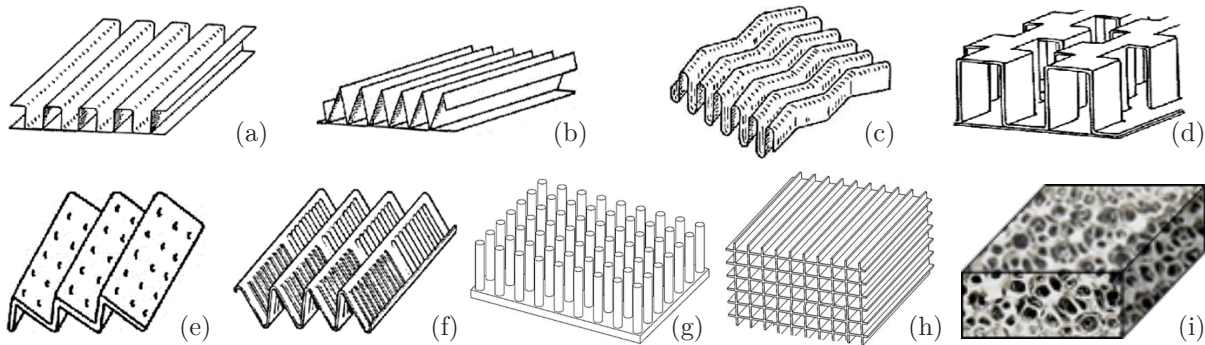


Abbildung 2.10.: Wärmeübertragerstrukturen des Standes der Technik: *Plain* (a) *Rectangular Fins* und (b) *Triangular Fins*, (c) *Wavy Fins*, (d) *Offset Strip Fins*, (e) *Perforated Fins*, (f) *Lowered Fins*, (g) *Pin Fins*, (h) *Honeycombs*, (i) *Open-Cell Structures*; Abb. aus [32, 116, 117]

Bei TEG für SNFZ-Anwendungen kommen überwiegend flache Wärmeübertrager mit geraden Rippen (engl. *plain fins*) für den HGWÜ zum Einsatz (s. Abschnitt 2.4). Diese werden mehrflutig übereinandergestapelt und teilweise zudem nebeneinander positioniert. Überwiegend kommen blechumformbasierte Rippenstrukturen zum Einsatz, die aus Kostengründen und aufgrund der einfachen großserientechnischen Fertigung Vorteile bieten. Ist eine hohe Rippenstruktur ( $> 20$  mm) erforderlich werden zumeist Zwischenebenen integriert (vgl. z. B. [22]). Eine alternative Lösung für gerade Rippen mit geringen Abständen stellen nach [72] Stanzbauteile dar, die wiederkehrend auf Umschlag zu einem Rippenpaket positioniert werden. Als Werkstoffe werden insbesondere Edelstähle und Nickelbasislegierungen und -beschichtungen eingesetzt.

Als Wärmesenke sind flächige KMWÜ bekannt, die Bohrungen zur Kühlmittelleitung und Temperaturhomogenisierung enthalten. Zudem werden Halbschalen mit Rippenstrukturen als Fräsbauteile ausgeführt oder Mikrokanal-Kühler verwendet (vgl. z. B. [103, 118]). Für eine höhere Effizienz wird überwiegend der Werkstoff Aluminium eingesetzt (vgl. z. B. [22, 59, 119]).

## 2.4. Thermoelektrische Generatorsysteme für den Einsatz in Nutzfahrzeugen

An fahrzeuggerechten TEG für den Einsatz in Kraftfahrzeugen wird seit über 100 Jahren geforscht (vgl. z. B. [120]). Im Laufe des letzten Jahrzehnts hat die Quantität der Publikationen zu TEG im Kraftfahrzeug erheblich zugenommen (vgl. bspw. [44, 121]) und es wurden bedeutende systemtechnische Fortschritte erzielt (vgl. bspw. [23, 32, 72, 103, 122, 123]). Einen Überblick über die relevanten Forschungsarbeiten<sup>35</sup> für SNFZ gibt Tabelle 2.2 sowie deren Erweiterung in Tabelle A.1 im Anhang. Der Stand

<sup>35</sup>Weitere Forschungsarbeiten in Anwendungsbereichen wie Diesellokomotiven oder Militärfahrzeugen (vgl. z. B. [60, 104, 124]), mit ähnlichen exogenen Randbedingungen wie im SNFZ, werden aufgrund der fehlenden Neuheitsgrade nicht beschrieben.

Tabelle 2.2.: Stand der Technik für TEG-Systeme im Anwendungsgebiet schwerer Nutzfahrzeuge (grau hinterlegt sind Einträge ohne Angabe, o. A.)

Jahr	System- bezeichnung	Technologie- Reifegrad	maximale Leistung		System- kosten [USD/W]	Kraftstoff- reduktion   $\Delta B$   [%]	Quelle
			$P_{el,max}$ [W <sub>Sim.</sub> ]	$P_{el,max}$ [W <sub>Exp.</sub> ]			
1991–2004	Hi-Z Technology	Fahrzeug- integration	o. A.	1068 <sup>1</sup>	o. A.	o. A.	[59, 102, 125, 126]
2005–2011	Michigan State Univ. et al.	Experiment	100 <sup>2</sup>	75 <sup>2</sup>	o. A.	o. A.	[99, 127]
2008–2012	RENOTER	Simulation	1200 <sup>2</sup>	o. A.	o. A.	o. A.	[119, 128]
2008–2013	Magna	Experiment	2730 <sup>1</sup> , 2723 <sup>2</sup> , 233 <sup>3</sup>	200 / 30	o. A.	0,3–0,56 <sup>1</sup> / 0,18–0,45 <sup>2</sup>	[58, 129]
2014	GMZ Energy et al.	Experiment	1420 <sup>4</sup>	1003 <sup>4</sup>	o. A.	o. A.	[22, 104]
2015	Eberspächer	Experiment	1060 <sup>4</sup>	550 <sup>4</sup>	o. A.	o. A.	[118]
2012–2015	Bernath / MAN	Experiment	1200 <sup>2</sup>	500 <sup>2</sup>	o. A.	0,4 <sup>2</sup>	[34]
2013–2015	Scania et al.	Fahrzeug- integration	785 <sup>2+4</sup>	776 <sup>2+4</sup>	150	o. A.	[103]
2014–2017	GASTone	Simulation	820 <sup>5</sup>	245 <sup>5</sup>	o. A.	0,56 <sup>4</sup> / 0,3 <sup>5</sup>	[130–132]

<sup>1</sup> TEG im Abgaskrümmer (AGK) vom Diesel-NFZ integriert.

<sup>2</sup> TEG in der Abgasrückführung (AGR) vom Diesel-NFZ integriert.

<sup>3</sup> TEG nach dem Turbolader vom Diesel-NFZ integriert.

<sup>4</sup> TEG am Ausgang der Abgasnachbehandlung (AGN) vom Diesel-NFZ bzw. <sup>5</sup> Erdgas-NFZ integriert.

der Technik wurde bis zum Jahr 2018 untersucht, da neuere Forschungsarbeiten parallel zu dieser Arbeit durchgeführt wurden oder auf dieser aufbauen. Für die zahlreichen grau hinterlegten Einträge in der Tabelle 2.2 sind keine Angaben verfügbar, d. h. ohne Angabe (o. A.). Bauweisen und Bruttoleistungen der Arbeiten wurden zumeist publiziert. Es fehlen jedoch spezifischere Angaben, wie z. B. Randbedingungen, Wirkungsgrade, Gewicht, Systemkosten und resultierende Kraftstoffreduktion.

Nachfolgend werden die Forschungsarbeiten im SNFZ mit höchster Relevanz für diese Arbeit vorgestellt. Bis auf die Arbeiten zum Erdgas-NFZ im Projekt GASTone wurden ausschließlich schwere Diesel-NFZ mit Einsatz im Fernverkehr untersucht.

### Hi-Z Technology

Im Zeitraum 1991–2004 hat sich die amerikanische Firma mit der Entwicklung von TEG befasst. Als optimales Ergebnisdesign wurde eine oktagonale Bauweise ermittelt, wie in Tabelle A.1 im Anhang dargestellt. Als NT-Module kamen Eigenentwicklung<sup>36</sup> der Materialklasse Bismuttelurid zum Einsatz (s. z. B. Teilabbildung 2.9 (a)). Positioniert am Ausgang des AGK des Motorenprüfstands wurde eine maximale elektrische Leistung von 1068 W gemessen (Randbedingungen, Rdb. bei  $P_{N(VKM)} = 250 \text{ kW}$ :  $\vartheta_{AG,ein} = 627 \text{ °C}$ ;  $\dot{m}_{AG} = 0,46 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{KM,ein} = 22 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM}$  o. A.). Anschließend erfolgte eine TEG-Integration

<sup>36</sup>Weiterentwicklungen mit Bezeichnung als HZ-20 wurden kommerziell vertrieben und von zahlreichen weiteren Forschungsarbeiten für die TEG-Entwicklung verwendet (vgl. u. a. [32, 133]).

am Ausgang des Turboladers im SNFZ des Herstellers Kenworth (vgl. [125, 126]). Die maximale Leistung betrug 528 W unter Verwendung des Motorkühlmittels ( $\approx 90^\circ\text{C}$ ). Weitere Angaben zum Integrationsumfang, zur erzielten Kraftstoffreduktion und zur Langzeitstabilität sind nicht bekannt. Die Demonstration gilt nach [134] als technologisch erfolgreich. Die prognostizierten Systemkosten rechtfertigten jedoch nicht die Kommerzialisierung. Die Kraftstoffkosten waren im Vergleich zum Stand der Verfassung dieser Arbeit sehr niedrig.

### **Bernath / MAN**

In den Jahren 2012–2015 konzentrierte sich die Forschungsarbeit von Bernath [34] in Zusammenarbeit mit dem deutschen LKW-Hersteller MAN auf die Modellerstellung im Gesamtfahrzeugkontext. Zur Wirkungsgraderhöhung von NFZ wurde ein Rankine- und ein TEG-System untersucht. Der TEG in zylindrischer Bauweise wurde vom Unternehmen Gentherm [135] kommerziell erworben und zur Validierung der Modellumgebung verwendet (s. Tabelle A.1 im Anhang). Das für PKW-Anwendungen konzipierte System wurde für NFZ-Anwendungen um rund 70 % vergrößert. Die simulierte maximale Leistung lag bei 1200 W und die Kraftstoffreduktion betrug bis zu 0,4 % auf einer Rundstrecke (s. Tabelle 2.2). Analog zur Arbeit von Magna [58] erfolgte die Untersuchung von Teilstrecken, die sich anhand der Topografie unterscheiden. Zudem wurde der Einfluss der Umgebungstemperatur und die Möglichkeit der Zwischenspeicherung der TEG-Leistung untersucht. Infolgedessen variierte die Kraftstoffreduktion im Bereich von 0,3–0,7 %. Im RP-System betrug diese 1,6 % und lag damit 300 % höher als die des TEG-Systems. Bernath bescheinigt dem TEG-System ungenutzte Potentiale, sofern:

„...die Verfügbarkeit, Herstellkosten und die Handhabung der thermoelektrischen Materialien weiter verbessert werden.“ [34, S. 125].

Für das Rankine-System war die Wirtschaftlichkeit auf Basis der Kostenschätzung<sup>37</sup> von [53] nicht gegeben. Kostensenkungen sind notwendig.

### **GASTone**

Im Zeitraum 2014–2017 wurde das europäische Projekt zur Untersuchung der Effizienzsteigerung von Diesel- und Erdgas-NFZ durchgeführt. Die Firmen Fiat Research Center und Fiat Powertrain Technologies aus Italien, das Engineering Center Steyr aus Österreich, Gentherm und Continental Automotive aus Deutschland sowie die spanische Universität Valencia waren daran beteiligt. Es wurden unter anderem Abwärmenutzungssysteme, wie z. B. ein TEG- und ein TC-System, untersucht (vgl. [131]). Als Referenzfahrzeug wurde die erste erdgasbetriebene Variante des Iveco Stralis mit einem Hubraum von  $8,7\text{ dm}^3$  und einer Nennleistung von 243 kW ausgewählt. Als TEG-Bauweise wurde das modulare Kartuschen-Design<sup>38</sup> mit der HT-Materialklasse Skutterudid der Firma Gentherm untersucht. Dieses

<sup>37</sup>Bei einem produktiven Serieneinsatz von 10.000 Einheiten pro Jahr werden die wichtigsten Komponenten für ein Rankine-System auf 8500 USD beziffert (vgl. [53]).

<sup>38</sup>Engl.: *Cartridge-Design*; Bezeichnung der Firma Gentherm für einen modular auslegbaren TEG, aus einer Vielzahl zylindrischer Röhren (s. Tabelle 2.3, Abbildung zur modularen Bauweise).

wurde ursprünglich für PKW-Anwendungen konzipiert (vgl. [124]; s. Tabelle A.1 im Anhang). Am Teilsystemaufbau mit zwei Kartuschen wurde eine maximale Leistung von 245 W gemessen (Rdb.:  $\vartheta_{AG,ein} = 500\text{ °C}$ ;  $\dot{m}_{AG} = 0,08\text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{KM,ein} = 15\text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM}$  o. A.; vgl. [130]). Als optimales TEG-Integrationskonzept wurde der Ausgang der AGN sowie der NT-KMK ermittelt. Das optimale TEG-Ergebnisdesign hat 24 Kartuschen. Im Fahrzyklus *ACEA Long Haul Cycle* wurde eine simulierte Bruttoleistung von maximal 820 W und im Mittel von 506 W ermittelt. Da die Grenztemperatur der TEM und der maximale Abgasgegendruck ( $> 300\text{ mbar}$ ) zeitweise überschritten wurden sowie die Abgasenthalpien zu niedrig waren, musste das System 70 % der Fahrzeit im Bypass betrieben werden. Hervas-Blasco et al. kommt daher zu dem Fazit:

*„...the initial potential of this technology derived from the high exhaust gases temperature, the temperature limitations of the materials have constrained significantly the initial potential of this technology.“* [130, S. 493]

Für das TEG-System wurde die Kraftstoffreduktion mit 0,3 % angegeben. Zum Vergleich wurden für das TC-System am Ausgang des Turboladers bis zu 6,7 % bestimmt. Für das Diesel-NFZ wurde eine Kraftstoffreduktion des TEG-Systems mit bis zu 0,56 % ermittelt, obwohl die verfügbaren Abgasenthalpien deutlich geringer waren.

**Stand der Technik im Bereich der PKW:** Aufgrund zeitlich paralleler Forschungsaktivitäten und inhaltlicher Überschneidungen im NFZ- und PKW-Bereich wird der Stand der Technik für PKW-Anwendungen stellvertretend durch die Arbeiten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Institut für Fahrzeugkonzepte (FK) von Häfele [32] und Kober [72] beschrieben. Die beiden Arbeiten repräsentieren aufgrund ihrer jeweils bedeutenden wissenschaftlichen Erkenntnisse und Ergebnisse umfassend den Stand der Technik für PKW-Anwendungen. Dabei wurden Bauweisen für konventionelle und hybride PKW entwickelt. Die kraftschlüssige Stapelbauweise hat sich, im Rahmen der Forschungsarbeit von Häfele [32], als effizienteste Bauweise hinsichtlich des Nutzens im Fahrzeuggesamtsystem erwiesen. Als höchster Technologiereifegrad erfolgte die Integration in einen PKW. Bei einer Autobahnfahrt von 135 km/h wurde eine elektrische Ausgangsleistung von bis zu 200 W gemessen. Anhand einer hochintegrierten Stapelbauweise bestimmte Kober [72] simulativ die bislang höchste Leistungsdichte für PKW-Anwendungen mit 267 W/kg bzw. 478 W/dm<sup>3</sup>. Nach Kober et al. [108] wurden im Experiment 90 W/kg bzw. 164 W/dm<sup>3</sup> gemessen. Der Nutzen der Technologie wurde mit einer Kraftstoffeinsparung im Bereich von 2–3 % im halbstündigen Fahrzyklus<sup>39</sup> bestimmt. Dabei hatte die Reduzierung der Warmlaufphase im niederlastigen Zyklus einen Anteil von rund 60 %. Die TEG-Systeme wurden auf der Grundlage der geltenden Flottengrenzwerte bewertet. Die Zielsetzung bestand in der

<sup>39</sup>Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC); aktuell relevanter EU-Fahrzyklus im Rahmen der Homologation von PKW.

Vermeidung von Strafzahlungen. Im Optimum wurde ein Kosten-Nutzen-Verhältnis<sup>40</sup> von 81 EUR/(g km) für konventionelle und 55 EUR/(g km) für Hybrid-PKW erzielt. Die Steigerung insbesondere der gravimetrischen Leistungsdichte und des Wärmestroms ins Fahrzeugkühlsystem stellten Schwerpunkte der Arbeit dar.

### 2.4.1. Vorgehensweisen und Methoden

**Methodische Vorgehensweisen:** Die meisten Arbeiten aus dem Stand der Technik wurden für PKW-Anwendungen durchgeführt und auf NFZ-Anwendungen übertragen, d. h. in der Größe skaliert, ohne die Vorgehensweise oder die Auslegungsstrategie zu hinterfragen (vgl. bspw. [22, 34, 104, 118, 119, 130]). Es gibt bislang nur wenige Ansätze zur Entwicklung von nutzfahrzeuggerechten TEG.

In den Arbeiten der Firma **Magna** stand die technische Potentialbewertung der Technologie im Vordergrund des Vorgehens (vgl. [58]). Die Auswahl der Fahrprofile umfasste realistische Einsatzbedingungen auf Autobahnstrecken und Prüfzyklen. Bei der Systemauslegung lag der Schwerpunkt auf der Auswahl des geeignetsten TE-Materials bei der jeweiligen Integrationsposition im Fahrzeug. Zwei Simulationswerkzeuge kamen für das Gesamtfahrzeugmodell zum Einsatz. In analytischen und teilweise numerischen 1D-Simulationen wurden die Längsdynamik, die Fluidkreisläufe und die thermischen Eigenschaften der Komponenten abgebildet. Die Bewertung basierte auf der elektrischen Bruttoleistung, dem Modulwirkungsgrad und der Bruttokraftstoffreduktion.

Das methodische Vorgehen der Arbeit von **Bernath / MAN** [34] ist auf die Bestimmung der Systempotentiale ausgerichtet. In ein bestehendes Gesamtfahrzeugmodell wurden Teilmodellumgebungen der Abwärmenutzungssysteme eingebunden. Die 1D-Simulationsumgebung umfasst Modelle der Längsdynamik, der Stoff- und Energieströme des Fahrzeugs sowie der Komponenten. Die Integrationsposition in der AGR-Strecke des Fahrzeugs wurde als vorteilhaft identifiziert. Die Bewertung des TEG-Systems erfolgte anhand der Kraftstoffreduktion in typischen Autobahnabschnitten. Der zusätzliche Abgasgedruck wurde als parasitärer Effekt berücksichtigt.

In der Arbeit von **Eberspächer** [118] erfolgt die Integration des TEG in die sogenannte Abgasbox der Abgasanlage (s. bspw. Abbildung 4.3 (c)). Das detaillierte Vorgehen konzentriert sich auf die TEG-Auslegung. Es beinhaltet sukzessive Simulationen. Zunächst erfolgt die Dimensionierung des Systems mit Hilfe einer 1D-Simulation für stationäre Betriebspunkte. Dabei werden analytische und numerische Teilmodelle, wie z. B. der Module, der WÜ, der thermischen Kontaktierung und der Strömungsführung gekoppelt. Im Anschluss erfolgen 3D-CFD-Simulationen zum geänderten Abgas- und Kühlsystem. Eine weitere 1D-Simulation ermöglicht die Abschätzung des dynamischen TEG-Betriebsverhaltens. Die Systembewertung erfolgt anhand der elektrischen Brutto-

---

<sup>40</sup>Verhältnis zwischen den prognostizierten Serienstückkosten des (TEG-)Systems und den verringerten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Gramm pro Kilometer des Referenzfahrzeugs einschließlich des (TEG-)Systems.

und Nettoleistung. Zur TEM-Auslegung wird eine 2D-Simulationsumgebung vorgeschlagen, die insbesondere die Parameter der Schenkelhöhe und des Füllgrades<sup>41</sup> optimiert.

Die Arbeiten von **Scania et al.** [103] basieren auf der vorausgegangenen Arbeit von Firma Eberspächer. Die relevanten Fahrzeugteilsysteme und parasitären Effekte werden simulativ abgebildet. Zwei Integrationskonzepte in der AGR-Strecke und am Ausgang der AGN werden entwickelt. Für die TEG-Auslegung wird ein iterativer Ansatz verfolgt. Zunächst wird ein Modul ausgewählt, im Anschluss der Wärmeübertrager und dann das Kühlsystem des TEG dimensioniert. Die Systembewertung erfolgt anhand der elektrischen Nettoleistung in stationären Betriebspunkten. Der Gegendruck ist der Parameter mit der höchsten Relevanz für die HGWÜ-Dimensionierung.

**Methoden:** Modellierungsansätze für TEG und für die Module sind im Stand der Technik in unterschiedlichen Abstraktionsebenen, Detailgraden und Genauigkeiten bekannt. Für die Dimensionierung und Auslegung des TEG kamen 1D- (vgl. [34, 58, 99, 118, 130]), 2D- (vgl. bspw. [119, 136]) und 3D-Modellierungsumgebungen (vgl. [22, 118, 129]) sowie verschiedene Softwareprodukte zum Einsatz. Die Auslegungen erfolgten überwiegend für stationäre und selten für dynamische Randbedingungen (vgl. [34, 58, 130]).

Für die Modellierung der TEM sind analytische und numerische 0D–3D-Ansätze bekannt. Es kommen sowohl Modelle mit konstanten Materialparametern (vgl. bspw. [71, 137]) als auch vergleichsweise komplexere Modelle mit temperaturabhängigen Materialparametern zur Anwendung, die mit Hilfe der FEM gelöst werden (vgl. bspw. [71, 138]).

Die experimentelle Validierung erfolgte insbesondere für die Module (vgl. z. B. [103, 118]) und für TEG(-Teilsystemaufbauten) (vgl. z. B. [59, 118, 139]). Unvollständige Fahrzeugintegrationen sind von [103, 125] ohne nennenswerten wissenschaftlichen Mehrwert bekannt. Eine Validierung des TEG-Systems in der Fahrzeugumgebung steht noch aus.

## 2.4.2. Analyse der Bauweisen und Systemauslegungen

Die Erforschung von TEG-Bauweisen hat viele verschiedene Lösungen hervorgebracht. Beispiele und deren Spezifikationen sind in Tabelle 2.3 dargestellt.

### Stapelbauweise

In den Forschungsvorhaben für NFZ wurde diese Bauweise überwiegend untersucht (s. Tabelle A.1 im Anhang). Als großer Vorteil gilt die vergleichsweise einfache Integration der überwiegend zur Verfügung stehenden planaren TEM.

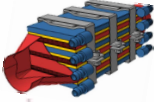
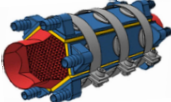
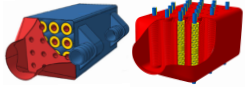
Im **RENOTER**<sup>42</sup>-Projekt wird eine vergleichsweise zu Arbeiten des Standes der Technik kompakte und leichte Stapelbauweise untersucht (s. Teilabbildung 2.11 (a); vgl. [119]). Um den TEG-Kern werden Formbleche zur Einhausung sowie der Konfusor und Diffusor

<sup>41</sup>Typischerweise verwendeter Begriff, der die aktive Modulfläche, d. h. Gesamtfläche der Schenkel, im Verhältnis zur Gesamtfläche des Moduls ausdrückt.

<sup>42</sup>Projektbezeichnung, fr. für: „**R**écupération d'**E**nergie à l'échappement d'un **m**oteur par **T**hermoélectricité“, dt. Energierückgewinnung am Auspuff eines Motors durch Thermoelektrizität.



Tabelle 2.3.: TEG-Bauweisen des Standes der Technik mit typischen Ausprägungen

	Stapelbauweise	Polygonale Bauweise	Rohrbündelbauweise / modulare Bauweise
Beispielabbildungen aus [32] und eigene Darstellung			
Forschungsanwendung	PKW, NFZ	PKW, NFZ	PKW, NFZ
HGWÜ-Bauweise	flächige Rippen-WÜ	Waben- / (spiral förmige) Rippen-WÜ	Rohrbündel- / Rippenrohr-WÜ
Modulbauweise	planar	planar	ringförmig(-er Aufbau)

positioniert. Diese werden mit Schraubenverbindungen befestigt. Die KMWÜ werden an Sammelrohre angeschlossen. Dies stellt eine höhere Integrationsstufe dar, als Lösungen mit einzelnen Kühlmittelschläuchen, z. B. von der Firma Magna (vgl. [129]) oder GMZ Energy (s. Teilabbildung 2.11 (b); vgl. [22, 104]). Der Aluminium-KMWÜ hat zudem eine Doppelfunktion. Dieser dient als Wärmesenke und durch das integrierte kompressible Material werden thermomechanische Spannungen reduziert. Die TEG-Auslegung ist geprägt durch mehrflutige HGWÜ, die länglich und schmal bezüglich der Abgasströmungsrichtung ausgestaltet sind. In Summe kommen über 4 kg  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -Material in den Modulen zum Einsatz (s. Tabelle A.1 im Anhang; TE-Materialgewicht ( $m_{\text{TEM}}$ )). Die Bauweise von **GMZ Energy** ist charakterisiert durch 50 HGWÜ, 12 KMWÜ und 400 HT-Module mit Einzelmodulkapselung (s. Teilabbildung 2.11 (b); vgl. [22]). Es wird ein WÜ-Kreuzstromkonzept realisiert. Im blechumformbasierten HGWÜ sind gerade Rippen aus Nickel. Zur thermomechanischen Stabilität bei der gewählten Höhe ( $\approx 20$  mm) wird eine Zwischenebene eingefügt. Aluminium-KMWÜ kommen als Fräsbauteil und

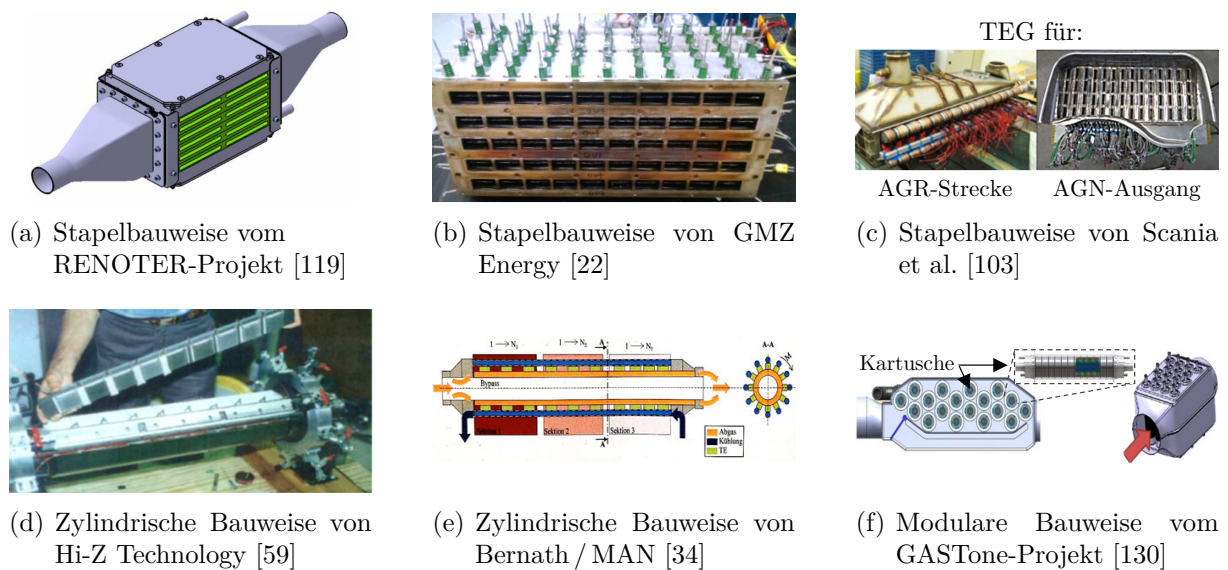


Abbildung 2.11.: Beispiele für TEG-Bauweisen des Standes der Technik im Nutzfahrzeugbereich

Grafitfolien als thermische Kontaktierung zum Einsatz. Die Vorspannkraft von 0,6 MPa wird mit Hilfe von 62 Gewindestiften und Spiralfedern eingebracht. Der TEG-Kern hat ein Volumen von  $5,1 \times 2,3 \times 1,9$  [dm<sup>3</sup>] und ein Gewicht von 30 kg. In Summe kommen rund 1,2 kg der Materialklasse Halb-Heusler in den TEM zum Einsatz.

Bei der Stapelbauweise von **Eberspächer** und **Scania et al.** liegt ein Schwerpunkt bei der Auslegung auf niedrigen Abgasgegendrücken von weniger als 4 mbar (vgl. [103, 118]). Ein Kreuz-Gegenstromprinzip der WÜ wird umgesetzt. Dies hat den Vorteil des einseitigen Ein- und Austritts des Kühlmittels (vgl. [103]). Die sehr unterschiedlichen Randbedingungen der untersuchten AGR-Strecke und der AGN erfordern zwei verschiedene TEG-Auslegungen. Im kleineren Aufbau in der AGN werden 56 HGWÜ, 30 KMWÜ und 224 NT-TEM im Aufbau gestapelt (s. Teilabbildung 2.11 (c)). In die HGWÜ werden versetzte Rippen mit großen Rippenabständen integriert. Um hohe Abgasgegendrücke zu vermeiden werden in den HGWÜ des TEG in der AGR-Strecke rechteckige gerade Rippen vorgesehen. Im KMWÜ sind Mikrokanäle eingebracht. Der TEG in der AGN besteht aus 14 Teilsystemaufbauten, die einzeln mit jeweils 15 Schrauben kraftschlüssig verspannt und anschließend in einer gemeinsamen Blech-Einhausung positioniert werden. Der TEG-Kern für die AGN hat beispielsweise ein Volumen von  $2,5 \times 5 \times 3$  [dm<sup>3</sup>]. Derjenige der AGR-Strecke wird in einem Schritt mit Schraubbolzen und externen Federn vorgespannt. Aufgrund vom großen abgasseitigen Strömungsquerschnitt ist der Diffusor und Konfusor in Querstrombauweise ausgeführt.

### Polygonale und zylindrische Bauweisen

Von der Firma **Hi-Z Technologie** wurde für die oktagonale TEG-Bauweise die bislang höchste Ausgangsleistung mit 1068 W für NFZ gemessen und die bislang höchsten Leistungsdichten<sup>43</sup> mit 74 W/kg und 60 W/dm<sup>3</sup> erreicht (s. Teilabbildung 2.11 (d); vgl. [59, 102]). Um den ringförmigen HGWÜ im Zentrum des Aufbaus werden 72 planare NT-TEM und 8 KMWÜ aus Aluminium kreisförmig angeordnet. Die Module besitzen gekapselte Halbleiterschlenkel zum Schutz vor Oxidation. Um den thermischen Widerstand und die mechanischen Beanspruchungen im Aufbau zu reduzieren, werden die TEM einzeln mit einer Druckkraft beaufschlagt und auf dem HGWÜ befestigt. Bei der TEG-Auslegung wird großer Wert auf die Ausgestaltung des HGWÜ gelegt. Die Ausbildung einer durchgängigen laminaren Grenzschicht wird durch diskontinuierliche und pyramidenförmige Rippen an der inneren Wandung der gießgerechten Rohrstruktur verhindert. Ein Verdrängungskörper mit spiralförmigen Rippen wird im Zentrum des HGWÜ-Rohrs integriert. Dies erhöht die Turbulenz der Strömung, verbessert die Wärmeübertragung und führt zu einem gleichmäßigeren Temperaturprofil auf der HGWÜ-Oberfläche. Der TEG-Kern hat ein Volumen von 18 dm<sup>3</sup>, bei einer Länge von 0,5 m und einem Durchmesser von 0,2 m. Die TEM-Gesamtfläche beträgt 2022 cm<sup>2</sup> und das Gewicht 13,6 kg (vgl. [59, 102]). Das TE-Materialgewicht ist mit 6,8 kg vergleichsweise

<sup>43</sup>Vorgriff auf die Definition der Leistungsdichte dieser Arbeit in Abschnitt 8.2.3.

zu anderen TEG-Systemen sehr hoch und hat einen Anteil von 50 % des Gewichts vom TEG-Kern (s. Tabelle A.1 im Anhang).

In der Arbeit von **Bernath / MAN** [34] wird die zylindrische Bauweise von der Firma Gentharm verwendet (s. Teilabbildung 2.11 (e); vgl. [135]). Ein ringförmiger HGWÜ umschließt das in der Mitte des Aufbaus befindliche Bypassrohr mit steuerbarer Klappe. Im HGWÜ werden gerade Rippen verwendet. Die Bauweise weist nach [34] aufgrund ihrer vergleichsweise großen Länge in Abgasströmungsrichtung und des kleinen HGWÜ-Strömungsquerschnitts hohe Abgasgegendrücke auf. Es wird eine Y-Modulbauweise mit segmentierten Schenkeln verwendet (s. Abbildung 2.8 (c)). Drei Temperatursektionen in Längsrichtung mit unterschiedlichen Schenkelmaterialekombinationen werden realisiert. Die maximal gemessene Ausgangsleistung beträgt 160 W bei einem Laststrom von 250 A. Der TEG hat laut Hersteller [124] eine Nennleistung von 500 W (Nennspannung von 1 V und Kurzschlussstrom von 500 A). Zu den Nachteilen gehören neben den hohen Lastströmen, die schwierige Skalierbarkeit und Komplexität des Systems sowie die große Anzahl von Komponenten (vgl. [124]).

### Modulare Bauweise

Bei dieser Bauweise wird versucht, einzelne modulare Einheiten nach einem Baukastensystem zu einem TEG zusammenzufügen. Die sogenannte modulare Kartuschen-Bauweise der Firma Gentharm (s. Tabelle 2.3; vgl. [124]) ist die bekannteste Bauweise dieser Art. Zu den Vorteilen gehören die einfache Skalierbarkeit und Fertigung sowie die geringeren Kosten. Die Lastströme liegen bei einer Nennspannung von 12 V auf einem deutlich niedrigeren Niveau, als bei der im vorherigen Absatz beschriebenen zylindrischen Bauweise der gleichen Firma (vgl. [124]). Nachteile sind die große Anzahl von Kühlmittel- und elektrischen Anschlüssen (s. Teilabbildung 2.11 (f)). Eine Kartusche ist ringstrukturiert aufgebaut (i. A. a. Teilabbildung 2.8 (d)). Im Zentrum ist die Wärmesenke in Form eines mit Kühlmittel durchflossenen Rohrs. Ringförmig werden darum quaderförmige TE-Schenkel positioniert. Zum Schutz vor Oxidation wird das TE-Material durch ein äußeres Rohr in einem Schutzgasgehäuse gekapselt. Am Außenrohr befinden sich Ringrippen, die dem Abgas Wärme entziehen. Im TEG des **GASTone**-Projekts sind die Kartuschen in zwei Sektionen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus in der AGN integriert (s. Abschnitt 2.4; vgl. [130]). Der Gegendruck der Abgasanlage war ein limitierender Faktor bei der TEG-Auslegung.

# Kapitel 3.

## Lösungsansatz und methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird die übergeordnete Vorgehensweise zur Lösungsfindung dieser Arbeit beschrieben. Zu Beginn wird der gewählte Modellansatz des V-Modells in allgemeiner Form vorgestellt und Vorteile gegenüber Vorgehensweisen des Standes der Technik (s. Abschnitt 2.4.1) erläutert. Anschließend wird, ausgehend von der Modellbildung auf verschiedenen Betrachtungsebenen, das methodische Vorgehen detaillierter beschrieben. Das Kapitel endet mit einem Überblick über die entwickelten Methoden und Werkzeuge.

### 3.1. Präzisierung der Aufgabenstellung

Der Stand der Technik lässt das Potential für TEG-Systeme im Nutzfahrzeug erkennen (s. Abschnitt 2.4). Aus Simulationsstudien sind elektrische Bruttoleistungen von bis zu 2730 W (vgl. [58]) und Kraftstoffreduktionen von bis zu 0,56 % bei Diesel-NFZ bekannt (vgl. [130]). Im Erdgas-NFZ sind es bis zu 840 W und 0,3 % (vgl. [130]), was auf die gewählte modulare TEG-Bauweise und einen hohen Bypassanteil im Betrieb zurückzuführen ist. Insbesondere die höheren Abgastemperaturen des Erdgas-NFZ lassen ein größeres Potential erwarten. Im Allgemeinen konnten die Angaben der Simulationsstudien experimentell nicht bestätigt werden. Maximal wurden 1068 W unter den Randbedingungen des Diesel-NFZ (vgl. [59]) und 245 W unter denen des Erdgas-NFZ (vgl. [130]) gemessen. Bislang ergibt sich ein heterogenes Gesamtbild und der allgemeine Reifegrad der Technologie ist als gering einzuschätzen (s. Tabelle 2.2). Eglseer et al. fassen den Forschungsbedarf beispielsweise folgendermaßen zusammen:

„Bevor an einen Einsatz in Serienfahrzeugen gedacht werden kann ist aber noch eine Reihe von Fragen zu klären wie z. B. Packaging, Dauerhaltbarkeit, Vibrationsbeständigkeit und nicht zuletzt die Herstellungskosten.“ [58, S. 7].

Im Stand der Technik sind wenige Arbeiten zu den Themengebieten Kraftstoffreduktion (vgl. [34, 58, 130]) und Systemkostenschätzungen (vgl. [103]) bekannt. Detaillierte Kostenberechnungen für entwickelte TEG-Designs wurden bislang nicht veröffentlicht. Dies erschwert die Bewertung der durchgeführten Arbeiten und ein ganzheitlicher Vergleich mit konkurrierenden Abwärmenutzungstechnologien im NFZ ist nicht möglich. Die technologischen Nachteile des Standes der Technik sind die

---

geringe Ausgangsleistung (experimentell im Bereich von: 75–1068 W) und die niedrige Kraftstoffreduktion (0,18–0,56 %). Bei bisherigen Forschungsarbeiten hat sich keine TEG-Bauweise durchgesetzt (s. Tabelle 2.2 und A.1 im Anhang). Die gewählten Bauweisen und Auslegungen wurden häufig für PKW-Anwendungen konzipiert und erscheinen für NFZ-Anwendungen nicht optimal zu sein, wie folgendes Zitat von Hilgers repräsentativ verdeutlicht:

„Der Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren ist aber gering, so dass ein Einsatz im Fahrzeug nicht lohnend ist.“ [43, S. 46]

Die Entwicklungstiefe ist zumeist nicht detailliert erfolgt und eine Bewertung auf Gesamtfahrzeugebene wurde nicht vorgenommen. Positive Bruttoleistungen konnten nachgewiesen werden, jedoch fehlt bislang der Nachweis eines positiven gesamtsystemischen Nettoeffektes. Die bisherigen Systemauslegungen gelten allesamt als kostenintensiv und damit nicht wirtschaftlich (vgl. bspw. [103]). Obwohl mehrfach auf die Erfordernis einer Kostenoptimierung hingewiesen wurde (vgl. bspw. [34, 103]), ist dieses Forschungsfeld bislang noch nicht methodisch aufbereitet. Darüber hinaus sind Prognosen zum Langzeitbetrieb bislang unbekannt.

Zur Abgrenzung vom Stand der Technik und als Zielsetzung dieser Arbeit sollen sich TEG-Systeme in kurzer Einsatzdauer wirtschaftlich im NFZ amortisieren. Die Optimierung soll unter Realfahrbedingungen durchgeführt werden. Die Kühlsystemkapazität ist in diesem Fahrzeugsegment limitiert, was eine besondere Berücksichtigung bei der Auslegung und Optimierung erfordert. Um die Effizienz von NFZ zu steigern sind jedoch hohe elektrische TEG-Spitzenleistungen und vor allem hohe Durchschnittsleistungen in dynamischen Fahrprofilen erforderlich. Deshalb sollten die TEG-Systeme dieser Arbeit wesentlich höhere Wirkungsgrade erreichen als bei Arbeiten des Standes der Technik, d. h. anders als beispielsweise für den PKW-Zulassungszyklus (vgl. [72]), um die Wärmeströme in das Kühlsystem zu begrenzen. Die Bewertung auf Basis der TCO lässt neuartige TEG-Ergebnisdesigns erwarten. Zudem ist der Stand der Technik in folgenden Bereichen zu erweitern: Auslegungs- und Optimierungsmethoden sowie Werkzeuge, Berücksichtigung der Amortisationszeit und der Langzeitstabilität. Methodisch ist zudem zu erforschen, welche Bauweisen, Komponenten und Bauteildimensionierungen in der Nutzfahrzeugarchitektur effizient und damit erfolgversprechend sind.

Die Entwicklung eines Abwärmenutzungssystems sollte ein interdisziplinäres Forschungsvorhaben darstellen, das sowohl mechanische, elektrische, thermische und thermodynamische Teilsysteme als auch eine wirtschaftliche Analyse umfasst. In Arbeiten des Standes der Technik ist dies zumeist unbefriedigend gelöst worden. Die Berücksichtigung gegenseitiger Wechselwirkungen einzelner Komponenten und Teilsysteme im Gesamtfahrzeugsystem sind für eine hohe Effizienz<sup>44</sup> des TEG-Systems entscheidend. Der Systemeinsatz sollte daher in Form einer Gesamtfahrzeugbewertung erfolgen, d. h.

---

<sup>44</sup>Im Sinne von Wirksamkeit und Wirkungsgrad sowie Wirtschaftlichkeit.

Bewertung zumindest anhand der potenziellen Kraftstoffreduktion. Zusammenfassend ist festzustellen, dass nutzfahrzeugspezifische methodische Vorgehensweisen bislang nicht bekannt sind, um Aussagen zur Kosten-Nutzen-Relation eines TEG-Systems auf Basis der Gesamtbetriebskosten und zur Amortisation zu treffen. Dazu ist eine ganzheitliche Simulationsumgebung erforderlich, die es erstmals ermöglichen soll in einem Optimierungsprozess die technischen und wirtschaftlichen Aspekte gleichzeitig abzubilden und zu optimieren. Des Weiteren fehlt eine wissenschaftlich fundierte Gesamtsystemauslegung, um anhand der elektrischen Bruttoleistung mit Hilfe der Kosten auf die Kraftstoffreduktion und die Amortisationszeit zu schließen. Die Quantifizierung der Ergebnisgrößen des Gesamtfahrzeugs einschließlich des TEG-Systems sowie der parasitären Effekte ist dabei obligatorisch.

## 3.2. Methodische Vorgehensweise

Die gewählte übergeordnete Vorgehensweise dieser Arbeit, einschließlich des darin enthaltenen Entwicklungsprozesses des thermoelektrischen Generatorsystems, basiert auf dem Vorgehensmodell: V-Modell in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2206 (vgl. [140]). Diese eignet sich für die ganzheitliche Entwicklung komplexer Systeme mit interdisziplinären Fragestellungen, wie es z. B. für TEG-Systeme der Fall ist (vgl. [141]). Der Vorgehensweise liegt der *Top-down*-Ansatz mit dem Gesamtfahrzeug als höchste Betrachtungsebene und den Werkstoffen als niedrigste Systemhierarchieebene zugrunde. Da die Zielanwendungen und damit die Anwendung der Methodik zu Beginn der Systemanalyse bekannt sind, ist diese Vorgehensweise aus Effizienzgründen im Gegensatz zum *Bottom-up*-Ansatz zu bevorzugen.

Das Vorgehensmodell zur Entwicklung von nutzfahrzeuggerechten TEG-Systemen und zur Erreichung der anspruchsvollen Zielsetzung dieser Arbeit (s. Tabelle 1.1) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Ausgangspunkt für die Untersuchung eines Anwendungsszenarios ist die Forschungsfrage, nach der die Emissionsreduktion unter Berücksichtigung wettbewerbsfähiger TCO erfolgen kann. Der zu durchlaufende Entwicklungsprozess ist in verschiedene Arbeitsschritte gegliedert. Als erster Schritt erfolgt die anwendungsspezifische ‚Analyse der Spezifikationen‘ und als letzter die ‚Systemoptimierung & -verifikation‘. Jedem Arbeitsschritt sind wiederum entsprechende Aktivitäten, Methoden und Werkzeuge zugeordnet.

Auf der linken Seite des V-Modells in Abbildung 3.1 erfolgt die Modellbildung und -analyse zunächst im Rahmen der Entwurfsphase. Im Entwicklungsprozess werden zunächst die Spezifikationen in Form von Anforderungen auf der höchsten Betrachtungsebene definiert. Es folgt die Analyse der Fahrzeugwechselwirkungen, bevor das TEG-System und seine Teilsysteme entwickelt werden. Auf der untersten Betrachtungsebene, den Komponenten einschließlich ihrer Werkstoffe, werden konkrete technische Lösungen für die relevanten Komponenten: Wärmeübertrager, thermoelektrisches Modul und thermische

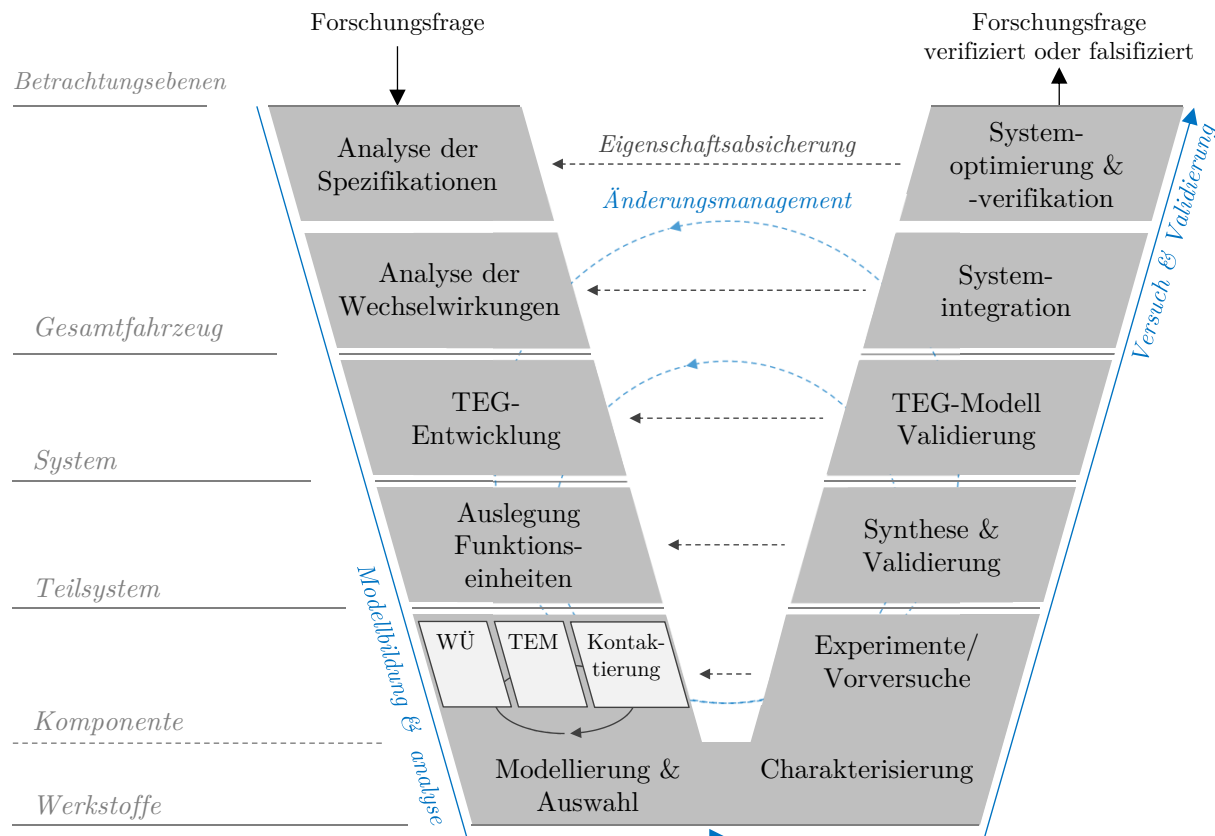


Abbildung 3.1.: Übergeordnete methodische Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von nutzfahrzeuggerechten thermoelektrischen Generatorsystemen

Kontaktierung entwickelt. Ausgehend vom Gesamtfahrzeug wird das Gesamtsystem in Teilsysteme und Komponenten sowie Teilfunktionen zerlegt und die Entwicklung in einem zunehmenden Detaillierungsgrad vorangetrieben. Die Variantenbildung, z. B. durch Konzeptionierung und Untersuchungen von Bauweisen, die Auslegung und Dimensionierung sind Bestandteile des Entwicklungsprozesses. Bei der Modellbildung und -analyse sind beim V-Modell Iterationen zu den vorangegangenen Arbeitsschritten obligatorisch, weil diese zur Optimierung der Ergebnisse beitragen. Dementsprechend wird in dieser Arbeit vielfach auf die folgenden oder vorausgegangenen Kapitel oder Abschnitte verwiesen.

Auf der rechten Seite des V-Modells werden die identifizierten Lösungsvarianten im Zuge der Systemintegration zunächst zu Teilsystemen und schließlich zum Gesamtsystem zu erfolversprechenden Lösungen kombiniert. Im Laufe des Prozesses sind mehrere Bewertungsschritte der Lösungsvarianten enthalten, wobei sowohl technische als auch wirtschaftliche Kriterien berücksichtigt werden (s. Kapitel 6). Zur Validierung der Modellumgebungen werden experimentelle Untersuchungen von der Komponenten- bis zur Systemebene durchgeführt. Im Schritt ‚Systemintegration‘ erfolgt die virtuelle Fahrzeugintegration des TEG-Systems, die modellbasierte Abbildung und Ermittlung der Fahrzeugwechselwirkungen. Die Auswahl der TEG-Lösungsvarianten erfolgt unter gesamtsystemischen Bewertungskriterien, d. h. die Auswahl der Varianten mit dem Ziel

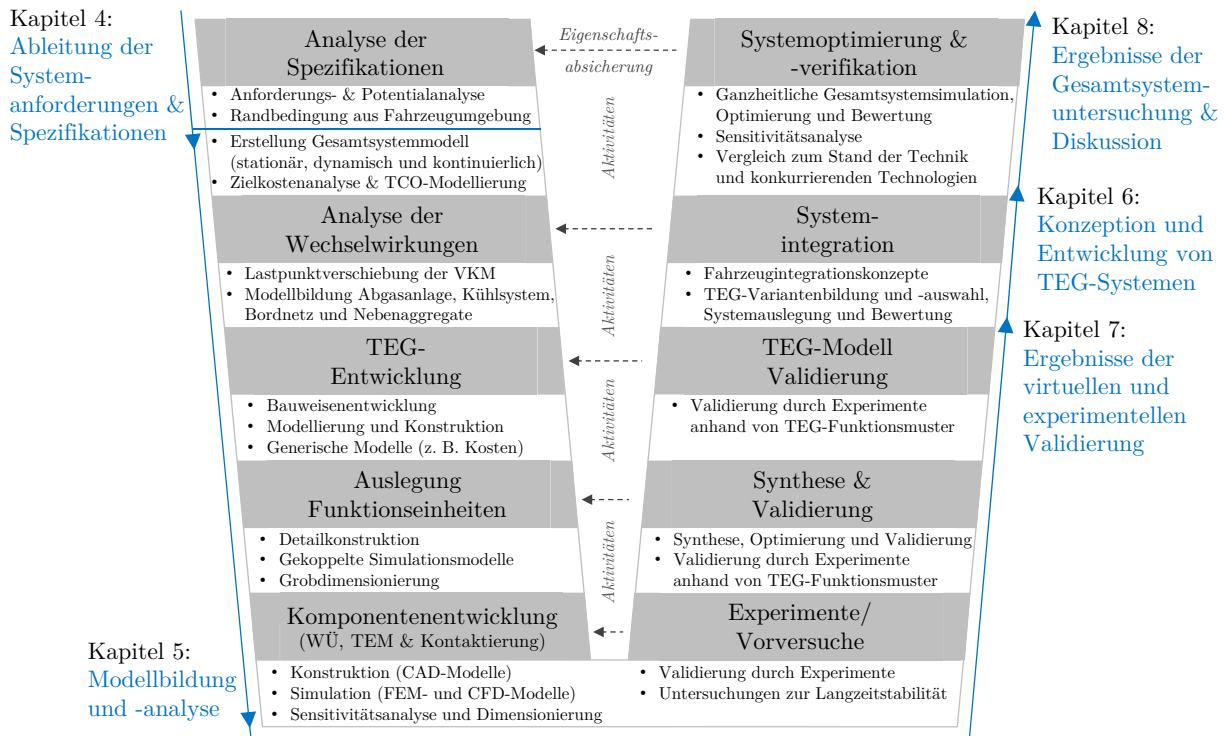


Abbildung 3.2.: Einordnung der Arbeitsschritte und Aktivitäten der übergeordneten methodischen Vorgehensweise in den weiteren Aufbau dieser Arbeit

der Maximierung der Ergebnisgröße elektrische Nettoleistung. Im letzten Schritt der ‚Systemoptimierung & -verifikation‘ werden die zielführenden TEG-Ergebnisdesigns unter ganzheitlichen Bewertungskriterien ausgewählt, d. h. unter Einbeziehung der System- und Gesamtbetriebskosten. Liegt ein TEG-Ergebnisdesign vor, wird die zuvor formulierte Forschungsfrage unter der Annahme:  $TCO_{TEG} < TCO_{Ref}$  verifiziert oder andernfalls falsifiziert. Dafür werden die TCO des Referenzfahrzeugs ohne TEG-Integration ( $TCO_{Ref}$ ) und einschließlich des TEG-Systems ( $TCO_{TEG}$ ) berücksichtigt.

Eine Übersicht über die Aktivitäten der beschriebenen Arbeitsschritte ist Abbildung 3.2 zu entnehmen. Darüber hinaus wird der weitere Aufbau der Arbeit im Kontext der gewählten Vorgehensweise dargestellt. Zum besseren Verständnis der Arbeit werden abweichend von der dargestellten Reihenfolge des methodischen Vorgehens die Konzeption und Entwicklung in Kapitel 6 und die Ergebnisse der Validierung in Kapitel 7 beschrieben.

### Zielsetzung

Entsprechend der zuvor beschriebenen Forschungsfrage werden in dieser Arbeit TEG-Systeme für den Einsatz im Nutzfahrzeugbereich untersucht. Die Fahrzeugeffizienz soll unter techno-ökonomischen Gesichtspunkten gesteigert werden, um die Technologie der Einsatzreife näher zu bringen. Die Technologiereife der Thermoelektrik soll bis zum Schritt des Testaufbaus in einer anwendungsnahen Prüfstands Umgebung erfolgen (vgl. Arbeiten des Standes der Technik in Abschnitt 2.4). Um die Forschungsfrage positiv zu beantworten sind geringe Systemkosten und gleichzeitig hohe Kraftstoffreduktionen erforderlich.



**Hauptziele**, wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, sind die aus Vorüberlegungen abgeleiteten Zielsetzungen und -bereiche. Sie werden in Form von Kraftstoffreduzierungen, äquivalenten Emissionsreduzierungen und einer Obergrenze für die spezifischen Kosten definiert:

- Nachweis einer Kraftstoff- und CO<sub>2</sub>-Reduktion<sup>45</sup>:
  - Diesel-NFZ:  $\geq 1\%$
  - Erdgas-NFZ:  $\geq 2\%$
- Nachweis der Systemamortisation von weniger als 3 Jahre (optimal:  $< 2$  Jahre)
- Nachweis von kostengünstigen Auslegungen des TEG-Systems ( $< 0,5$  EUR/W; s. Abschnitt 5.1.3), welche die Systemamortisation ermöglichen und eine Verbesserung gegenüber konkurrierenden Technologien zur Abwärmenutzung (z. B. Rankine-Prozess und Turbo-Compound) darstellen

TEG-Systeme sollen als Effizienztechnologie einen wesentlichen ökologischen Beitrag leisten und zudem soll der Stand der Technik (s. Abschnitt 2.4) durch dieser Arbeit verbessert werden. Dementsprechend wurde eine Kraftstoff- bzw. Emissionsreduktion von mindestens 1% für das Diesel-NFZ und mindestens 2% für das Erdgas-NFZ als Zielwerte festgelegt. Damit einhergehend wird der Wirkungsgrad des Gesamtfahrzeugs ( $\Delta\eta_{\text{abs,FZ}}$ ; i. A. a. Gleichung 2.1) gesteigert. Darüber hinaus soll die Wirtschaftlichkeit anhand der Amortisationszeit untersucht werden. Der angestrebte Zeitraum von weniger als 3 Jahren ermöglicht die Amortisation in einer typischen Nutzungsdauer beim Erstkunden (s. Abschnitt 5.1.3) und impliziert kostengünstigere TEG-Systeme als nach dem Stand der Technik bekannt. Für die Entwicklung von Effizienztechnologien im NFZ wird branchenspezifisch ein Zeitraum von weniger als 2 Jahren als optimale Amortisationszeit angesehen (vgl. z. B. [50]). Die dritte Zielformulierung enthält zudem explizit den angestrebten Vergleich zu Konkurrenztechnologien (s. Abschnitt 2.2).

**Nebenziele** werden zudem für die angestrebte Systementwicklung definiert, die zur Erreichung der Hauptziele beitragen:

- Methodische Entwicklung von nutzfahrzeugspezifischen TEG-Systemen und -Bauweisen inklusive neuartiger Wärmeübertrager und Modulauslegungen
- Auslegung und Optimierung von TEG in stationären Betriebspunkten, kurzzeitigen Fahrzyklen (1800 s) und kontinuierlichen Realfahrten ( $> 10.000$  s)
- Entwicklung von effizienten Fahrzeugintegrationskonzepten (inklusive Packaging) und Berechnungsmethoden für die fahrzeugspezifischen Wechselwirkungen mit dem Gesamtfahrzeug für dynamische Fahrsituationen im gesamten Fahrzeugbetriebskennfeld
- Berücksichtigung von Fahrzeugwechselwirkungen, insbesondere die Begrenzung der Wärmekapazität des Kühlsystems durch die zugeführten Wärmeströme des TEG-Systems von durchschnittlich weniger als 100 kW (vgl. [40])

<sup>45</sup>Höherer Zielbereich im Erdgas-NFZ aufgrund der höheren Abgasenthalpien (s. Abschnitt 4.2), die größeres Einsparungspotential erwarten lassen. Die CO<sub>2</sub>- wird anhand der Kraftstoffreduktion berechnet.

- Keine Änderung der Fahrzeugarchitektur und möglichst geringe negative Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug (wie z. B. Fahrzeuggewicht, Nutzung vorhandener Kühlkreisläufe, minimaler Aufwand für die Integration eines Bypasses)
- Methodenentwicklung zur multikriteriellen TEG-Optimierung bei differenzierter Zielsetzung, z. B. Minimierung der TCO oder Maximierung der Kraftstoffreduktion
- Erfolgreiche Validierung der Komponenten-, Teilsystem- und Systemmodelle der Bauweisenentwicklung sowie der thermomechanischen Auslegung auf der Grundlage von mindestens zwei Funktionsmustern in anwendungsnahen Prüfstandsumgebungen
- Signifikante Steigerung des Wirkungsgrads von TEG-Systemen nach dem Stand der Technik (Anmerkung: bisheriger Bestwert des effektiven Wirkungsgrads  $\eta_{e,TEG}$  liegt nach Zhang et al. [22] bei 2,1 %;  $\eta_{e,TEG} = \frac{P_{TEG}}{Q_{AG,ein}}$ ; s. Gleichung 5.34)
- TEG-Systemauslegung unter Berücksichtigung des langzeitstabilen und zuverlässigen Betriebs, zumindest im Zeitraum der angestrebten Systemamortisation
- Erfolgreiche Anwendung der Entwicklungsmethodik, d. h. der entwickelten (Optimierungs-)Methoden und Werkzeuge, an einem konventionellen NFZ mit Dieselmotor und alternativ mit Erdgasmotor

### Gegenstandsdiskussion

Bei bisherigen Vorgehensweisen des Standes der Technik wurde zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess eine Vorauswahl für bestimmte Teilsysteme oder Komponenten getroffen, wie beispielsweise die TEG-Bauweise von Bernath [34] oder die WÜ-Bauweise von Kober [72]. Dies prägt die Vorgehensweise, schränkt den Lösungsraum ein und schließt potentiell vielversprechendere Lösungen aus.

Die neuartige Vorgehensweise dieser Arbeit eignet sich für die Untersuchung verschiedener Lösungswege durch die Kombination von unterschiedlichen Komponenten und Teilsystemen bis zum Gesamtsystem. Die strikte Systemorientierung erlaubt eine Optimierung von Teilsystemen, z. B. auf Effizienz, mit hohem Detaillierungsgrad und zudem eine Bewertung auf Gesamtsystemebene mit Kompromissen im Detaillierungsgrad. Der Entwicklungsprozess ist durchgängig modellbasiert und experimentell gestützt. Die Ermittlung der Randbedingungen der Fahrzeugumgebungen erfolgt detailliert, z. B. durch die Berücksichtigung von Messdaten aus Realfahrten, Bauraumuntersuchungen und unterschiedlichen Einsatzprofilen. Die Eingangsgrößen der Simulationsumgebung erreichen dadurch einen hohen Genauigkeitsgrad. Die Erstellung von Teilmodellen der Fahrzeugwechselwirkungen stellt einen effizienten Problemlösungsansatz dar (s. Abschnitt 5.1.2). Darüber hinaus sind anwendungsspezifische Methoden zu entwickeln, die z. B. die Systemoptimierung für dynamische und kontinuierliche Realfahrten oder die Modellierung der Gesamtbetriebskosten ermöglichen. Diese Aspekte stellen wissenschaftliche Neuheitsgrade dar. Modelle des Standes der Technik für PKW-Anwendungen (vgl. z. B. [32, 72]), wie z. B. Modelle der Fahrzeugwechselwirkungen, sind nicht anwendbar. Diese sind für NFZ-Anwendungen und die abweichenden Randbedingungen nicht gültig und verifiziert.

# Kapitel 4.

## Ableitung der Systemanforderungen und Spezifikationen

In diesem Kapitel erfolgt die Analyse der Spezifikationen, d. h. die Anforderungs- und Potentialanalyse sowie die Ermittlung der Randbedingungen und (Bauraum-)Restriktionen aus Fahrzeugumgebungen, im Rahmen der übergeordneten Vorgehensweise aus Abschnitt 3.2.

### 4.1. Randbedingungen

Für eine gezielte, effiziente und ganzheitliche Systementwicklung ist es unerlässlich die Randbedingungen detailliert zu ermitteln, um die Systemanforderungen abzuleiten. Für die Entwicklung des TEG-Systems wird zwischen den Umgebungs- und Fahrzeugrandbedingungen sowie den systemspezifischen Randbedingungen unterschieden.

Das Fahrzeugsegment ‚LKW im Fernverkehr‘ steht im Mittelpunkt der Forschungsarbeit. Zur Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit wird ein Basisszenario des Fahrzeugeinsatzes im Fortgang der Arbeit definiert (s. Abschnitt 5.1.3), für das die Randbedingungen ermittelt werden. Seit dem Jahr 2009 stellen die Vorgaben aus der EU-Richtlinie 2007/46/EG die Leitlinie zur Zulassung von Fahrzeugen in Deutschland dar. Der Prozess, der die Zulassungsfähigkeit zum Ziel hat, wird Homologation<sup>46</sup> genannt. Um die Typengenehmigung der Fahrzeugklasse N in Deutschland zu erhalten gelten beispielsweise die Vorschriften der EG-Betriebserlaubnis 70/156/EWG Anhang IV (vgl. [6]).

Als Umgebungsrandbedingungen werden eine Umgebungstemperatur<sup>47</sup> von 20 °C, ein Luftdruck von 1013 hPa und eine relative Luftfeuchtigkeit von 50 % als Referenzzustände definiert. Im Folgenden werden die Fahrzeugrandbedingungen mit Hilfe der Fahrzeuguntersuchungen analysiert und zielgerichtet hinsichtlich der Rekuperation thermischer Energie im Gesamtfahrzeugsystem bewertet. Von den Ergebnissen und der gewählten Integrationsposition im Fahrzeug hängen die systemspezifischen Randbedingungen des TEG-Systems ab.

---

<sup>46</sup>Homolog vom Griechischen bedeutet übereinstimmen.

<sup>47</sup>In der gemäßigten Klimazone Europas liegen die typischerweise betrachteten Temperaturrandbedingungen für NFZ-Entwicklungen im Bereich von -20 °C bis +40 °C. (vgl. bspw. [34, 37]).

## 4.2. Potentialanalyse und Energiebilanzierung

Ein typisches Energieflussdiagramm für ein Diesel-NFZ ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Erkennbar sind die großen Energieflüsse ins Abgas- und Kühlsystem in Form von Wärme. Deren Exergieanteile können zur Rekuperation thermischer Energie genutzt werden. Nachfolgend werden die Referenzfahrzeuge ausgewählt und die Referenzstrecken definiert. Im Anschluss folgt die Potentialanalyse und die Ermittlung der Fahrzeugrandbedingungen.

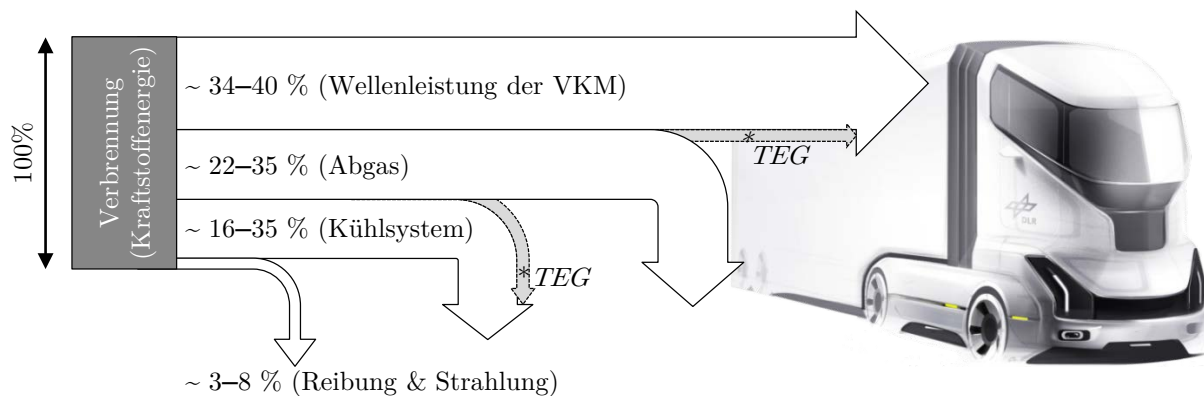


Abbildung 4.1.: Typisches Energieflussdiagramm eines Diesel-NFZ und Einfluss einer TEG-Integration (LKW-Darstellung aus dem DLR Metaprojekt *Next Generation Car*)

### 4.2.1. Referenzfahrzeuge

Zwei Anwendungsszenarien und damit Referenzfahrzeuge werden als Gegenstand der Arbeit betrachtet: ein konventionelles NFZ mit Diesel-VKM und alternativ ein monovalentes Erdgas-NFZ mit stöchiometrischem Brennverfahren nach dem Ottoprinzip. Der Dieselmotor nimmt aufgrund seiner prinzipbedingten Vorteile hinsichtlich Wirkungsgrad (s. Abschnitt 2.1.2.1), Kraftstoffverbrauch und Robustheit eine vorherrschende Stellung im Segment der Nutzfahrzeuge ein. In Deutschland und der EU werden rund 97% der EG-Fahrzeugklasse N3 mit einem Dieselmotor angetrieben (vgl. bspw. [142]). Die Vorteile von Erdgasantrieben mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen sind bereits erwähnt worden (s. Abschnitt 1.1). Ein Vergleich zwischen einem vollbeladenen Diesel- und Erdgas-NFZ anhand des Kraftstoffverbrauchs und der daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Äquivalente Emissionen ist in Tabelle 4.1 dargestellt.<sup>48</sup> Aufgrund des höheren und damit günstigeren Wasserstoff/Kohlenstoff-Verhältnisses (vgl. [9]) ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Erdgas-NFZ im Vergleich zum Diesel-Pendant um rund 14% geringer. Darüber hinaus sind die Feinstaubpartikel-, Stickoxid- und Geräuschemissionen erheblich reduziert. Die Einhaltung der Euro VI-Grenzwerte wird ohne die Notwendigkeit einer komplexen AGN mit Harnstoffeinspritzung wie bei Diesel-NFZ erreicht. Die Annahme eines niedrigeren

<sup>48</sup>In dieser Arbeit erfolgt die *Tank-to-Wheel*-Betrachtungsweise, d. h. die CO<sub>2</sub>- bzw. CO<sub>2e</sub>-Angabe erfolgt nach [143] ohne Vorproduktion.

Tabelle 4.1.: Typischer Kraft- und Harnstoffverbrauch sowie resultierende CO<sub>2</sub>-Äquivalente Emissionen von modernen Diesel-NFZ nach [24] bzw. Erdgas-NFZ nach [25] mit 40 t GG

Bezeichnung Einheit	Ø Kraftstoffverbrauch [l/100 km]/ [kg/100 km]	Ø Harnstoffverbrauch <sup>1</sup> [l/100 km]	CO <sub>2</sub> -Äquivalente Emissionen <sup>2</sup> [g/km]	[kg/Jahr]
Diesel-NFZ	35,3 / 29,5	1,9	946,2	141.930
Erdgas-NFZ	38,8 / 32,2	–	817,9	122.685

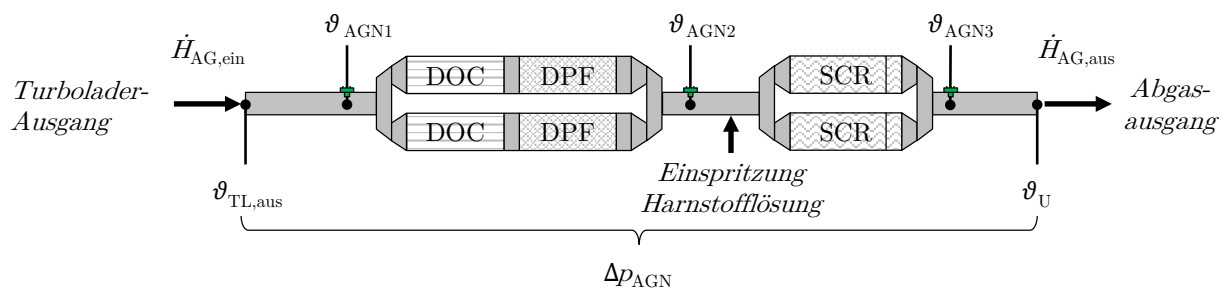
<sup>1</sup> Wässrige Harnstofflösung nach ISO 22241 als AUS 32 genormt, bestehend aus demineralisiertem Wasser und rund 32 % Harnstoff.

<sup>2</sup> Angabe ohne Vorproduktion (Tank-to-Wheel-Betrachtungsweise) mit spezifischen Faktoren aus [143]; Annahme einer Jahresfahrleistung von 150 Tkm.

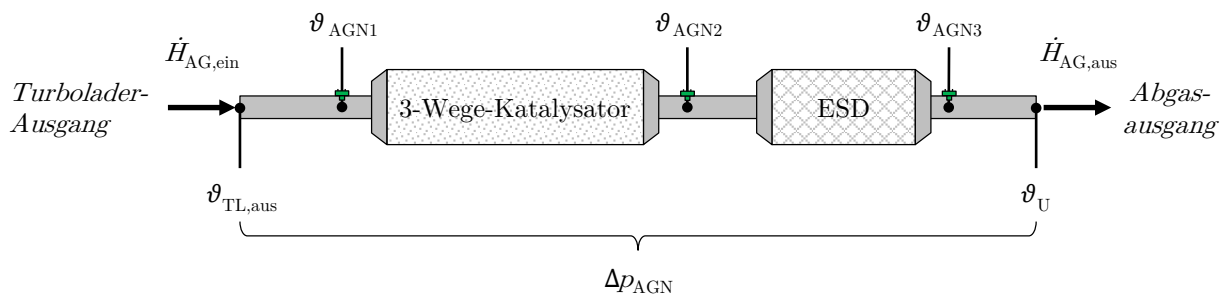
Preis für Erdgas im Vergleich zum Preis von Dieselmotorkraftstoff ermöglicht niedrigere Betriebskosten (s. Abschnitt 5.1.3). Nachteile sind zum Beispiel der vergleichsweise geringere Wirkungsgrad (s. Abschnitt 2.1.2.1), der mögliche Methanschlupf und die mangelhafte Infrastruktur, insbesondere durch fehlende LNG-Tankstellen.

Schwere NFZ zeichnen sich durch eine hohe Jahresfahrleistung und eine kontinuierlich hohe Abgasenthalpie aus. Folglich sind für diese Fahrzeugkategorie höhere Energieeinsparungspotentiale und größere Reduktionspotentiale durch Effizienztechnologien erreichbar als bei kleineren NFZ, wie in eigenen Vorarbeiten [136, 144] analysiert wurde.

Als Diesel-Referenzfahrzeug wurde der Mercedes-Benz Actros mit 330 kW Nennleistung und 2200 Nm Drehmoment ausgewählt. Diese Sattelzugmaschine ist derzeit im deutschen NFZ-Bestand das am häufigsten vertretene Modell (vgl. [145]). Als Erdgas-NFZ stand,



(a) Abgasnachbehandlung des Diesel-NFZ (bspw. Mercedes Benz Actros MP1845)



(b) Abgasnachbehandlung des Erdgas-NFZ (bspw. IVECO Stralis NP460)

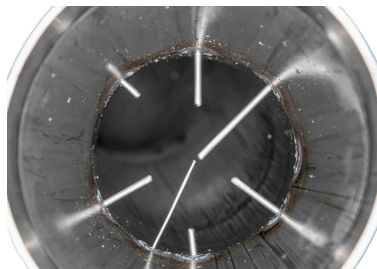
Abbildung 4.2.: Übersicht der Abgasnachbehandlung sowie der Integration von Messtechnik in den NFZ-Referenzfahrzeugen der Abgasnorm EURO VI

zum Beginn dieser Arbeit, als einzige Alternative mit ausreichender Antriebsleistung für den Fernverkehrseinsatz der Iveco Stralis NP460 mit 338 kW Nennleistung und 2000 Nm Drehmoment zur Auswahl. Eine Übersicht über die weiteren technischen Spezifikationen der Referenzfahrzeuge ist in Tabelle B.1 des Anhangs enthalten.

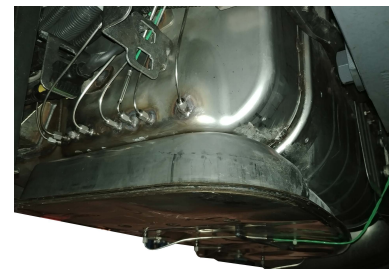
Für die Ermittlung der Fahrzeugrandbedingungen und Spezifikationen für ein TEG-System ist insbesondere die Abgasanlage näher zu untersuchen (s. Teilabbildung B.4 (b) im Anhang). Beide AGN sind vom Ausgang des Turboladers bis zum Abgasaustritt an die Umgebung in Abbildung 4.2 dargestellt. Die zur Erfüllung der Abgasnorm deutlich komplexere AGN eines Diesel-NFZ zeigt Teilabbildung (a). Essentielle Bauteile sind ein Dieseloxydationskatalysator (DOC), ein Dieselpartikelfilter (DPF) und ein SCR-Katalysator inklusive der Harnstoffeinspritzung. Schalldämpferelemente sind in dem gemeinsamen Gehäuse der Abgasbox integriert und daher nicht explizit in der Abbildung gekennzeichnet. Die hohe Komplexität und das Zusatzgewicht der Abgasbox von rund 180 kg sind für die Kosten und die maximale Nutzlast des Fahrzeugs nicht unerheblich. Dabei ist die zusätzlich installierte AGR-Strecke nicht berücksichtigt, die als Hauptfunktion die Stickoxid-Rohemissionen senkt. Im Erdgas-NFZ ist ein geregelter Drei-Wege-Katalysator, gefolgt von einem Endschalldämpfer (ESD) ausreichend, wie in Teilabbildung (b) ersichtlich ist. Zur Potentialbestimmung werden Temperatur- ( $\vartheta_{AGN1} - \vartheta_{AGN3}$ ) und Differenzdruckmessstellen ( $\Delta p_{AGN}$ ) definiert. Die zusätzlich integrierten Messeinrichtungen in die Abgasanlage im Diesel-NFZ sind in Abbildung 4.3 dargestellt.



(a) Messtechnik am Abgasrohr des Turbolader-Ausgangs



(b) Messstellenanordnung im Abgasrohr



(c) Messtechnik an der Abgasnachbehandlung (Abgasbox)

Abbildung 4.3.: Integration von Messtechnik im Diesel-Referenzfahrzeug der Abgasnorm Euro VI; Teilabbildungen aus [146]

#### 4.2.2. Referenzstrecken

Zur zielgerichteten Auslegung, Optimierung und Bewertung der TEG-Technologie werden neben stationären Betriebspunkten typische Konstantfahr- und dynamische Fahrscenarien untersucht. Da für SNFZ kein genormter Fahrzyklus existiert (vgl. [147]), wird als Referenzfahrzyklus der *World Harmonized Vehicle Cycle* (WHVC) und als Referenzstrecke die Realfahrt Stuttgart–Hamburg–Stuttgart (SHHS) als Untersuchungsgegenstand definiert.

Der **World Harmonized Vehicle Cycle** stellt einen nicht reglementierten Fahrzyklus dar, ursprünglich entwickelt für den Fahrgestell-Rollenprüfstand für SNFZ. Charakterisiert wird der Fahrzyklus durch eine Zeitdauer von 1800 s, die unterteilt ist in einen typischen Stadt-, Landstraßen- sowie Autobahnabschnitt. Die Wegstrecke von rund 20 km wird bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von rund 40 km/h ohne Steigungen zurückgelegt. Der WHVC ist dem Homologationszyklus WHTC<sup>49</sup> ähnlich, da beide auf Grundlage desselben Datenbestandes entwickelt wurden (vgl. [36]). Der WHVC wird für Forschungszwecke und zum Vergleich der jeweiligen Fahrzeug- und Motoremissionsmesswerte verwendet. Eine Übersicht des Fahrzyklus sowie Eigenschaften können Abschnitt B.2.1 des Anhangs entnommen werden.

Die zulassungsrelevanten Prüfzyklen zur Fahrzeughomologation sind für die Bewertung der TEG-Auslegung und damit für diese Arbeit ungeeignet, da diese rein zeitbasiert sind und somit keiner Fahrstrecke zugeordnet werden können (vgl. [58]). Der erforderliche Streckenkraftstoffverbrauch kann nicht ermittelt werden.

Die **Realfahrstrecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart** stellt eine optimale Referenzstrecke für NFZ-Untersuchungen im Fernverkehr dar und lässt sie für die Bewertung von Effizienztechnologien als interessant erscheinen (vgl. bspw. [147, 148]). Charakteristisch für die Strecke ist eine Zeitdauer von rund 20 Stunden, eine Gesamtlänge von 1560 km und der dominierende Autobahnanteil mit durchschnittlicher Topografie (vgl. [147]). Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt abhängig von der Verkehrslage über 75 km/h. Eine Fahrtrichtung liegt in Tagesfahrreichweite, was annähernd standardisierte und vergleichbare Umgebungsrandbedingungen ermöglicht. Für die Untersuchung, insbesondere des Einflusses der Topografie, werden neben der Gesamtstrecke in Anlehnung an die Arbeiten von [34, 58] drei repräsentative Teilstrecken definiert als: ‚leicht‘, ‚mittelschwer‘ und ‚schwer‘. Die Bestimmung des jeweiligen Schwierigkeitsgrades erfolgt mit Hilfe der Einteilung nach [149] anhand des Höhenprofils. Eine Übersicht der Referenzfahrstrecke SHHS sowie Eigenschaften können Abschnitt B.2.2 des Anhangs entnommen werden.

### 4.2.3. Energetische Betrachtung

Eine Ergebnisübersicht der durchgeführten Fahrzeuguntersuchungen stellt Tabelle 4.2 als Einführung dieses Abschnitts dar. Die Ergebnisse des Diesel-NFZ basieren auf experimentell ermittelten Messdaten (vgl. [146]) und die des Erdgas-NFZ auf validierten Simulationsdaten (vgl. [150]).<sup>50</sup> In der Tabelle sind fahrzeugspezifische Angaben zum Fahrzyklus als Leerfahrt (WHVC<sub>15t</sub>) und mit Zuladung (WHVC<sub>40t</sub>), zur Realfahrstrecke mit Zuladung (SHHS<sub>40t</sub>), zur Konstantfahrt mit 80 km/h sowie zu typischen Kaltstarts

<sup>49</sup>Zur Homologation von SNFZ mit Abgasnorm EURO VI sind der WHSC neben dem WHTC als Prüfzyklen als Verbrennungsmotorentest in der EU seit Ende 2012 zulassungsrelevant. Dabei wird die Einhaltung der Abgasnorm und der geltenden Grenzwerte geprüft, jedoch nicht diejenigen der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des äquivalenten Kraftstoffverbrauchs.

<sup>50</sup>Für diese Arbeit wurden eigene NFZ-Messfahrten auf rund 6200 km und in 135 Stunden durchgeführt.

Tabelle 4.2.: Ergebnisübersicht der Fahrzeuguntersuchungen dieser Arbeit

Fahrzeug	Referenzstrecke / -zyklus	Gesamtfahrzeug		VKM			AGN
		$B_s/e^2$ [l/100 km] / [kg/100 km]	$c^3$ [g/km]	$\bar{P}_{VKM}$ [kW]	$\bar{M}_{VKM}$ [Nm]	$\bar{n}_{VKM}$ [1/min]	$\bar{Q}_{AGN,aus}$ [kW]
	WHVC <sub>15t</sub>	25,3	669,8	42	381	973	21,7
	WHVC <sub>40t</sub>	43,7	1153	77	637	1036	40,9
	„ Stadt	45,6	1205	50	439	996	29,8
	„ Landstraße	46,1	1219	89	712	1023	43,3
	„ Autobahn	39,2	1034,8	122	974	1134	61,7
Diesel-	SHHS <sub>40t</sub>	34,9	923	105	787	1246	60
NFZ	„ leicht	21,6	571,1	69	570	1116	39,9
	„ mittelschwer	37,9	1000,4	132	931	1311	68,1
	„ schwer	50,6	1338	149	988	1338	81
	Konstantfahrt <sub>40t</sub> <sup>1</sup>	26,5	700,2	120	1014	1128	68,5
	Kaltstart <sub>40t</sub>	39,7	1049,1	105	795	1158	74,6
	WHVC <sub>15t</sub>	25	634,2	42	329	1106	33,1
	WHVC <sub>40t</sub>	42,7	1084,6	77	587	1119	63,6
	„ Stadt	58,3	1481,3	48	379	1040	46,4
	„ Landstraße	45,4	1152,1	92	702	1153	71,1
Erdgas-	„ Autobahn	32	813,8	121	900	1250	91,9
NFZ	SHHS <sub>40t</sub>	35,5	889,9	114	759	1392	94,5
	„ leicht	24,7	627,4	77	559	1262	71,5
	„ mittelschwer	38,2	970,7	141	898	1456	117,2
	„ schwer	50,2	1274,4	158	951	1484	135,2
	Konstantfahrt <sub>40t</sub> <sup>1</sup>	27,6	702,3	124	973	1203	90,4
	Kaltstart <sub>40t</sub>	40,4	1026,2	118	898	1255	108,3

<sup>1</sup> Reale Konstantfahrt in der Ebene bei  $80 \pm 1$  km/h.

<sup>2</sup> Typischerweise volumetrische Angabe für das Diesel- und gravimetrische Angabe für das Erdgas-NFZ.

<sup>3</sup> Angabe in dieser Arbeit als spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen in [gCO<sub>2</sub>/km].

aufgeführt. Leerfahrten sind Untersuchungsgegenstand, weil sie beispielsweise nach Angaben des BMVI [151] mit einem Anteil von 28 % am Güterverkehrsaufkommen im Jahr 2018 einen erheblichen Teil des Einsatzprofils von NFZ darstellen. Nach [152] zeichnet sich im Straßengüterverkehr ein Trend zur höheren Transporteffizienz und Verringerung der THG-Emissionen ab. Dementsprechend soll der Anteil von Leerfahrten bis zum Jahr 2026 auf weniger als 5 % reduziert werden.

Das jeweilige Fahrprofil, d. h. Strecken-, Geschwindigkeits- und Topografieprofil, führt zu unterschiedlichen Lastprofilen und damit zu unterschiedlichem Kraftstoffverbrauch<sup>51</sup>. Dies wird durch die Werte in der Tabelle verdeutlicht. Die Angabe des Kraftstoffverbrauchs erfolgt typischerweise volumetrisch ( $B_s$ ) für das Diesel-NFZ und gravimetrisch ( $B_e$ ) für das Erdgas-NFZ. Zudem werden die äquivalenten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen  $c$  sowie die Motorleistung  $\bar{P}_{VKM}$ , das Drehmoment  $\bar{M}_{VKM}$ , die Drehzahl  $\bar{n}_{VKM}$  und der berechnete Wärmestrom (s. Gleichungen 5.22) am Ausgang der AGN  $\bar{Q}_{AGN,aus}$  mit Referenz zur Umgebungstemperatur als Mittelwerte aufgeführt. NFZ-Motoren werden

<sup>51</sup>Weitere Einflüsse sind u. a. Umweltrandbedingungen, Betriebstemperaturen des Fahrzeugs (z. B. Warm- oder Kaltstart), Fahrzeugkonfiguration, Zuladung, Verkehrsaufkommen, Dynamikanteile und Geschwindigkeit, Wartungszustand sowie das Fahrerverhalten.



in dynamischen Fahrprofilen überwiegend im Teillastbereich und selten im Volllastbereich betrieben (s. Abbildung B.8 im Anhang; vgl. [153]). Die Nennleistung der Referenzfahrzeuge stellt eine sogenannte Überschussleistung zur Überwindung von Beschleunigungs- und Steigungswiderständen dar.

Für die Bestimmung des Potentials eines Abwärmenutzungssystems gilt es, die relevanten Fahrzeugteilsysteme anhand des verfügbaren Temperaturniveaus, der Massen- bzw. Volumenströme sowie der Stoffstromenthalpien zu analysieren.

#### 4.2.3.1. Referenzfahrzyklus WHVC

Die Fahrzeuguntersuchungen im Fahrzyklus wurden sowohl als Leerfahrten als auch mit verschiedenen Zuladungen (s. Teilabbildung B.4 (a) im Anhang) auf einer ebenen Teststrecke durchgeführt. Dies erlaubt den Vergleich der jeweiligen Ergebnisse unter Berücksichtigung realistischer Umgebungseinflüsse und -randbedingungen. Die Ist-Geschwindigkeiten  $v$  sowie ausgewählte Abgastemperaturen vor ( $\vartheta_{AGN1}$ ), zwischen ( $\vartheta_{AGN2}$ )

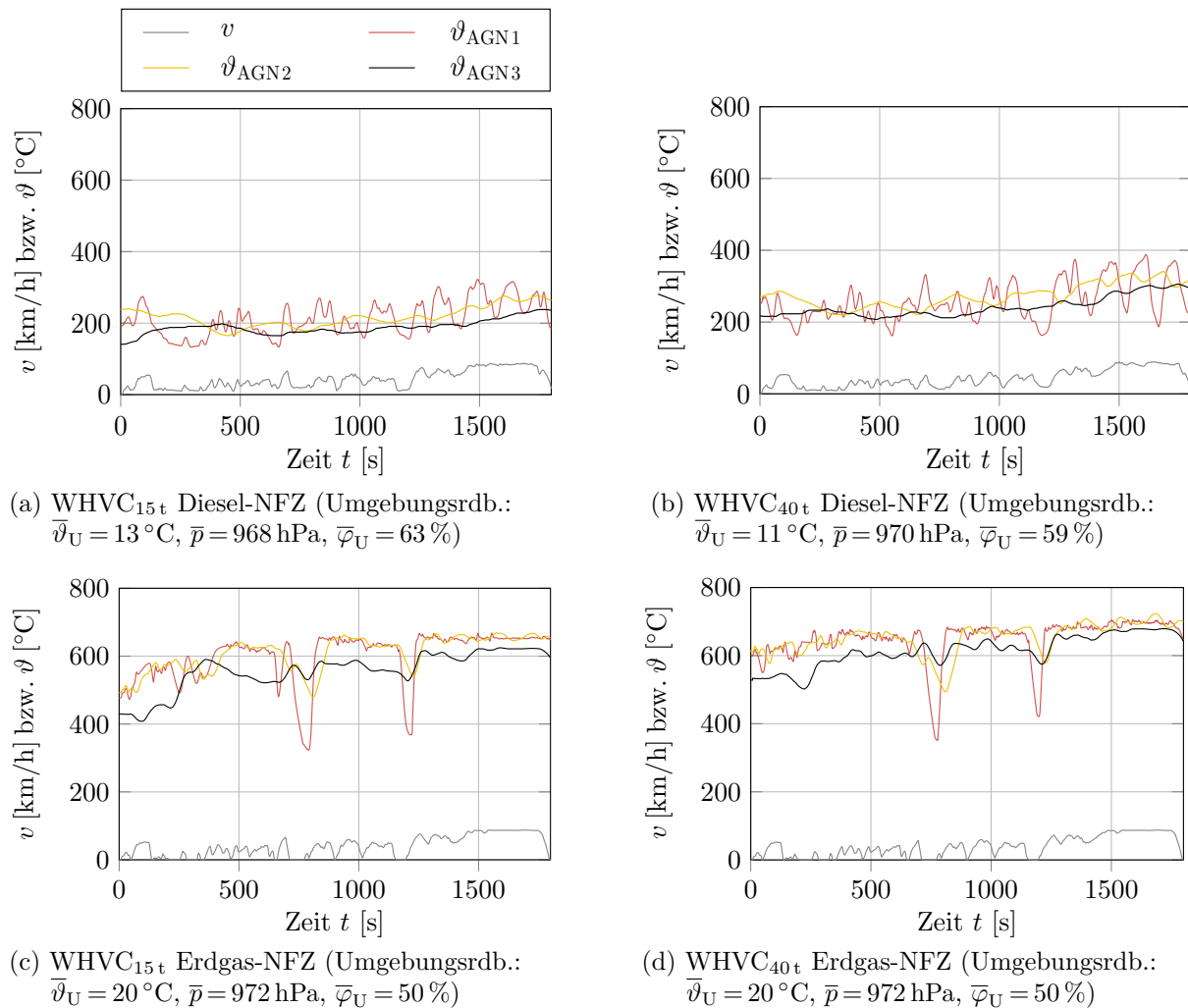


Abbildung 4.4.: Geschwindigkeitsprofile und ausgewählte Temperaturen am Ein- und Austritt sowie im AGN-System im Referenzfahrzyklus WHVC; Teilabbildungen (a) und (b) aus [146]

und hinter dem jeweiligen AGN-System ( $\vartheta_{\text{AGN3}}$ ) stellt Abbildung 4.4 dar. Die Soll-Geschwindigkeiten des WHVC konnten für beide Referenzfahrzeuge nicht exakt nachgestellt werden und weisen geringfügige aber vernachlässigbare Abweichungen auf. Die Massenträgheit der Fahrzeuge erlaubte die teilweise erforderliche hohe Dynamik nicht. Darüber hinaus konnten die vorgegebenen Standzeiten im Diesel-NFZ aufgrund der Fahrzeugmessungen nicht eingehalten werden. Bei diesem betragen die Abweichungen von der angestrebten Durchschnittsgeschwindigkeit von 40,1 km/h bei Leerfahrt 7,3 % und 7,8 % mit Zuladung (s. Teilabbildung 4.4 (a) und (b)). Für das Erdgas-NFZ beträgt die Abweichung 0,1 % bzw. -2,1 % (s. Teilabbildung 4.4 (c) und (d)). Die Abgastemperaturen steigen im Zeitverlauf mit den Lastanforderungen und in noch stärkerem Maße mit der Zuladung. Zu erkennen ist die zunehmende Dämpfung der jeweiligen Abgastemperaturkurve in der Abgasanlage mit zunehmendem Abstand zum Verbrennungsmotor aufgrund der thermischen Trägheit. Außerdem sind die vorübergehenden Temperaturerhöhungen aufgrund der chemischen Prozesse im Katalysator (s.  $\vartheta_{\text{AGN2}}$ ) sowie die sukzessive Temperaturabnahme entlang des Abgasstroms (s.  $\vartheta_{\text{AGN3}}$ ) ersichtlich. Weitere Ergebnisse zu den Abgasmassenströmen und den entsprechenden kühlmittelseitigen Enthalpieströmen sind den Abbildungen B.5 und B.6 dem Anhang zu entnehmen.

Die verfügbaren Wärmeströme des Abgases am jeweiligen Ausgang der AGN ( $\dot{Q}_{\text{AGN3}}$ ) der Referenzfahrzeuge sind in den Teilabbildungen B.7 (a–d) im Anhang dargestellt. Die dynamischen Werte wurden im Drehmoment-Drehzahl-Diagramm im Sekundenzeitschritt linear interpoliert. Vor allem bei Fahrten ohne Zuladung treten nur wenige Betriebspunkte in der Nähe der Volllastkurve auf. Im Erdgas-NFZ werden im Vergleich zum Diesel-NFZ signifikant höhere Abgastemperaturen und Abgasenthalpien von bis zu 275 kW ermittelt. Die Massenströme in der AGN sind jedoch aufgrund des stöchiometrischen Motorbetriebs geringer als beim Diesel-Pendant.

#### 4.2.3.2. Referenzstrecke SHHS

Ein Fahrzyklus stellt die Fahrzustände unter vorbestimmten und teilweise idealisierten Randbedingungen dar. Die Anforderungen an ein SNFZ im Realbetrieb sind dagegen gekennzeichnet durch: lange Fahrstrecken und hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten unter den entsprechenden klimatischen Randbedingungen, der Topografie sowie der Verkehrsdichte und -führung der Strecke. Insbesondere der Einfluss der Topografie ist entscheidend.

Der zeitliche Verlauf der Motorleistung besitzt unter anderem aufgrund der vorhandenen Topografie eine höhere Dynamik als im Fahrzyklus. Allgemein treten nahezu alle Lastpunkte vom Leerlauf bis zur Nennleistung auf. Die typischen Drehmoment- und Lastpunktverteilungen über der Motordrehzahl sind in Abbildung B.8 im Anhang als

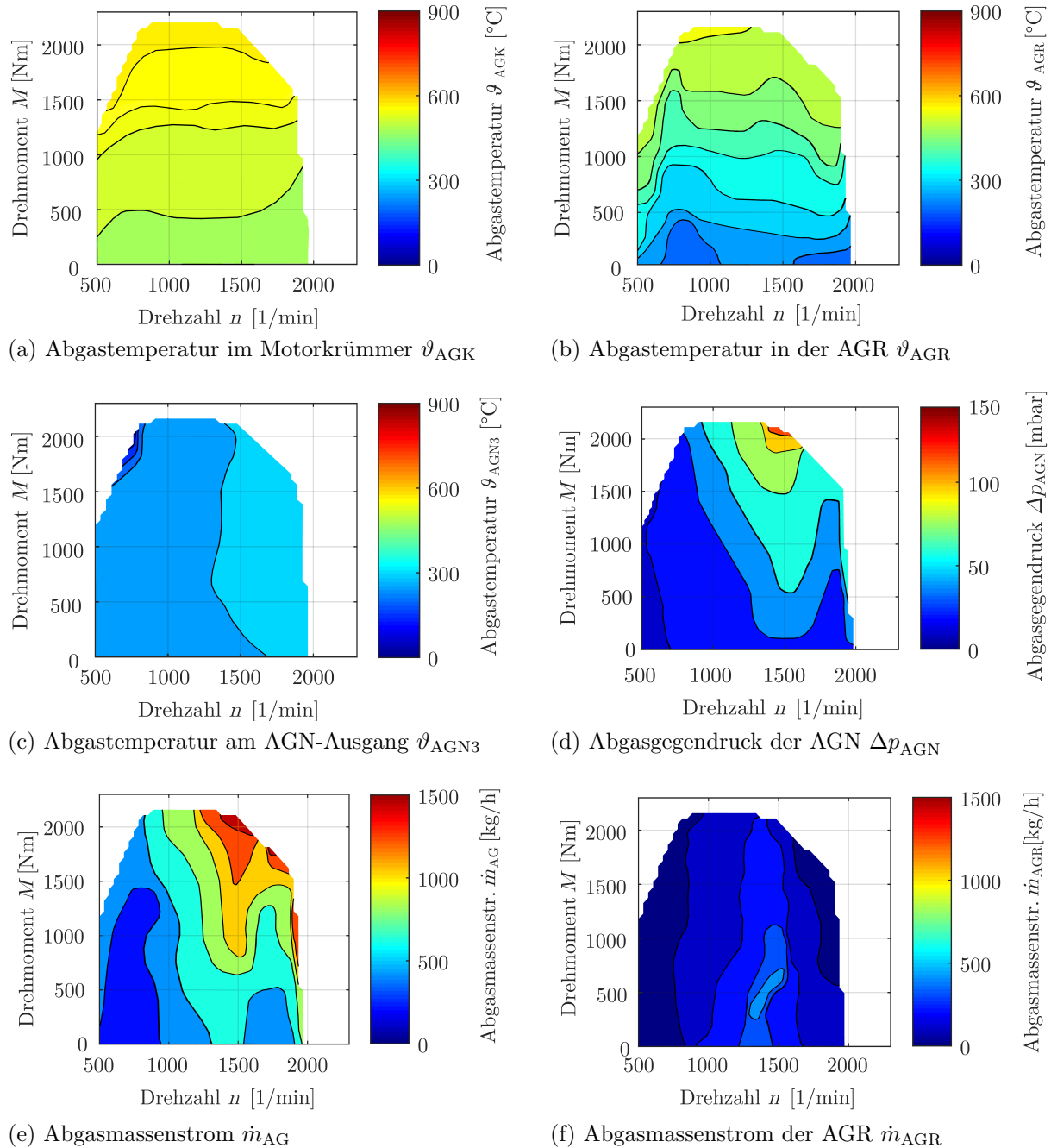


Abbildung 4.5.: Potentialanalyse der Realstrecke SHHS anhand der Verteilung der Abgastemperaturen, des -massenstroms und des Gegendrucks der Abgasanlage des Diesel-NFZ (Interpolationen basieren auf dynamischen Werten)

Streudiagramme<sup>52</sup> dargestellt. Die dominierenden und charakteristischen Drehzahlbereiche bei rund 1220 1/min im Diesel-NFZ und rund 1370 1/min im Erdgas-NFZ sind erkennbar. Ausgewählte abgasseitige Randbedingungen sind für das Diesel-NFZ in Form von linearen Interpolationen im Kennfeld von Motordrehmoment über -drehzahl in Abbildung 4.5

<sup>52</sup>Zur Übersichtlichkeit der Darstellung werden in dieser Arbeit große Datenmengen (Streckenzeit SHHS > 70.000s) auf eine repräsentative Anzahl reduziert und zur Vollständigkeit als stetige Dichtefunktion, basierend auf der Parzen-Fenster-Methode nach [154], der Gesamtmenge angegeben.

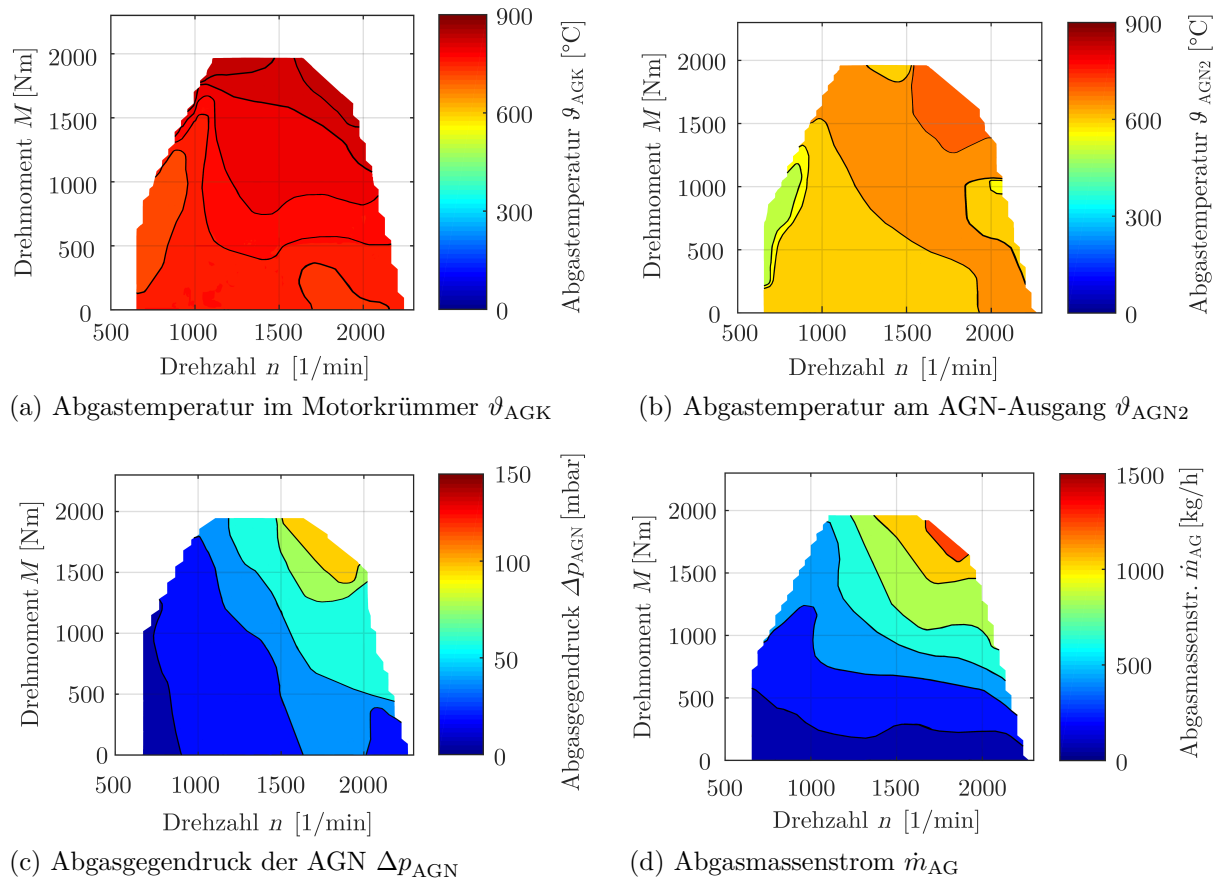


Abbildung 4.6.: Potentialanalyse der Realstrecke SHHS anhand der Verteilung der Abgastemperaturen, des -massenstroms und des Gegendrucks der Abgasanlage des Erdgas-NFZ (Interpolationen basieren auf dynamischen Werten)

dargestellt.<sup>53</sup> Neben den Angaben im Motorkrümmen (Teilabbildung (a)) werden Angaben für die AGR-Strecke (Teilabbildung (b) und (f)) sowie für diejenigen am Ausgang der Abgasanlage (Teilabbildung (c–e)) abgebildet. Qualitativ nimmt die mittlere Abgastemperatur vom Motorausgang dem Abgaspfad folgend bis zum Ausgang der Abgasanlage kontinuierlich ab. Die AGR-Strecke weist prinzipiell höhere Abgastemperaturen, aber deutlich geringere Massenströme auf.

Entsprechende Ergebnisse sind für das Erdgas-NFZ ohne AGR-Strecke in Abbildung 4.6 dargestellt. Bedingt durch das Brennverfahren sind die Abgastemperaturen qualitativ höher, jedoch die -massenströme geringer. Die ermittelten Abgaswärmeströme des jeweiligen Fahrzeuges auf der Realfahrstrecke sind den Teilabbildungen B.7 (e) und (f) dem Anhang zu entnehmen.

Die typischen Energieverluste eines SNFZ auf der Strecke SHHS sind am Beispiel des vollbeladenen Diesel-Referenzfahrzeuges in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 75,4 km/h, der Gesamtverbrauch liegt bei 543,5 l Diesel und der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch damit bei 34,9 l/100 km. In Bezug auf die

<sup>53</sup>Die Darstellungen der Interpolationen basieren auf dynamischen Fahrzeugrandbedingungen aus Realfahrten und somit resultieren inhomogene Kennfeldbereiche.

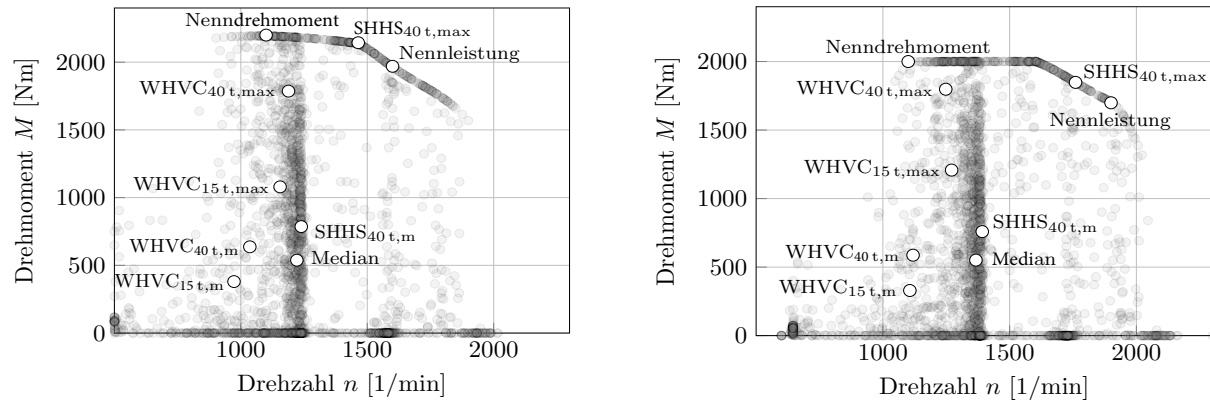
Gesamtenergie des verbrauchten Diesel-Kraftstoffes 100 %																											
Verluste im Verbrennungsmotor 59,5 %						Mechanische Energie an der Kurbelwelle 40,5 %																					
Thermodynamische und mechanische Verluste						Verbraucher		Triebstrang		Fahrwiderstand		Bremsenergie															
59,5 %						3,1 %		2,4 %		25,2 %		9,8 %															
Abgasenergie	34,5 %	Energieeintrag ins Kühlsystem	21,8 %	Wärmeabstrahlung	2,5 %	Wasser-, Öl- & Einspritzpumpe	0,7 %	Generator, Lenkhilfpumpe	2,0 %	Lüfter	0,3 %	Luftpresse	0,8 %	Getriebeverluste	1,1 %	Verluste der Achse	1,3 %	Luftwiderstand	12,4 %	Rollwiderstand	12,8 %	Betriebsbremse	5,1 %	Motorschleppwiderstand	1,8 %	Motorbremse	2,9 %

Abbildung 4.7.: Analyse der Energieverluste des Diesel-NFZ auf der Realstrecke SHHS<sub>40t</sub>  
Darstellung i. A. a. [155]; Angaben nach eigenen Messwerten, Berechnungen und [155])

Gesamtenergie des eingesetzten Kraftstoffs können 40,5 % als mechanische Energie an der Kurbelwelle des Fahrzeuges genutzt werden. Darüber hinaus stellt ein erheblicher Anteil von 34,5 % die enthaltene Abgasenergie dar.

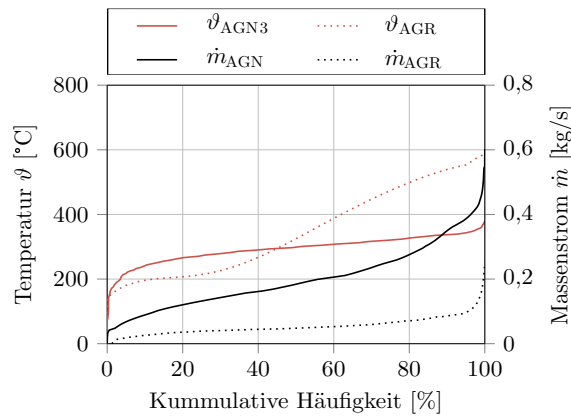
#### 4.2.3.3. Zusammenfassung

Die Potentialanalyse der Referenzanwendungen wurde mit dem Schwerpunkt auf die abgasseitigen Fahrzeugrandbedingungen durchgeführt. Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf die TEG-Entwicklung und die erzielbaren Ergebnisse (s. Abschnitt 6.3.2). Einen Ergebnisüberblick der Potentialanalyse vermittelt Abbildung 4.8. Für das jeweilige Referenzfahrzeug sind die charakteristischen Betriebspunkte (BP), wie z. B. Nennleistung und -drehmoment, im Kennfeld von Motordrehmoment über -drehzahl in den Teilabbildungen (a) und (b) dargestellt und gekennzeichnet. Aufgrund der gewählten Transparenz der repräsentativen Betriebspunktauswahl werden die VKM-Betriebspunktbereiche mit großer zeitlicher Häufigkeit deutlich erkennbar. Neben den Bereichen der Leerlaufdrehzahl sind dies die charakteristischen Drehzahlbereiche und Bereiche der Volllastkurve. Negative Bremsmomente wurden negiert und dem Drehmoment von Null zugerechnet. Zudem sind die Abgastemperaturen jeweils am Ausgang der AGN und die Abgasmassenströme als kumulative Häufigkeitsverteilung in den Teilabbildungen (c–d) dargestellt. Für das Diesel-NFZ werden zudem Ergebnisse der AGR-Strecke angegeben. Die mittleren Temperaturen am Ausgang der AGN sind beim Diesel-NFZ mit rund 300 °C deutlich niedriger als beim Erdgas-NFZ mit rund 700 °C. Die Abgasmassenströme sind jedoch mit rund 0,18 kg/s beinahe doppelt so hoch wie die im Erdgas-Pendant mit rund 0,1 kg/s. Die mittlere Temperatur in der AGR-Strecke des Diesel-NFZ liegt mit rund 350 °C höher als in der AGN. Die entsprechenden Massenströme sind jedoch mit

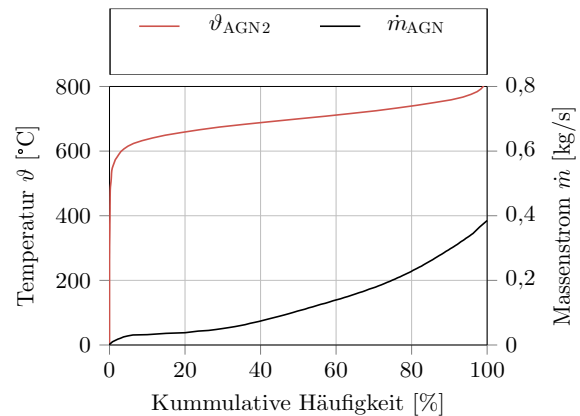


(a) VKM-Betriebspunkte des Diesel-NFZ

(b) VKM-Betriebspunkte des Erdgas-NFZ



(c) Häufigkeitsverteilung des Diesel-NFZ



(d) Häufigkeitsverteilung des Erdgas-NFZ

Abbildung 4.8.: Ergebnisübersicht der fahrzeugspezifischen Potentialanalyse der Referenzfahrzeuge; Teilabbildungen (b) und (d) aus [48]

durchschnittlich rund 0,05 kg/s deutlich geringer. Der Temperaturabfall im Abgasrohr entlang der Abgasanlage lässt sich im Diesel-NFZ mit 25 K/m (vgl. [156]) und im Erdgas-NFZ mit 45 K/m im Teillastbetrieb der VKM beziffern. Bei Nennleistung ist dieser aufgrund der höheren Abgasmassenströme mit 10 K/m und 35 K/m geringer. Die absoluten Fahrzeugwirkungsgrade gemäß Gleichung 2.1 betragen für das Diesel-NFZ 39 % im Referenzfahrzyklus WHVC<sub>15t</sub>, 42 % im WHVC<sub>40t</sub> und 41 % in der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> (s. Tabelle 4.2). Für das Erdgas-Pendant sind die Wirkungsgrade erwartungsgemäß niedriger und liegen bei 32 %, 35 % und 33 %.

### 4.3. Potentialbewertung hinsichtlich der Rekuperation thermischer Energie im Gesamtfahrzeugsystem

Zur Bewertung des Potentials der Rekuperation thermischer Energie im NFZ werden die vorhandenen und bislang ungenutzten Exergieströme qualitativ und quantitativ analysiert. Die Exergie<sup>54</sup> stellt eine geeignete Bewertungsgröße dar, da diese den nutzbaren Anteil

<sup>54</sup>Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik lassen sich thermische Energieformen nur zum Teil in nutzbare Energie wandeln; dieser Anteil lässt sich mit Hilfe der Exergie quantifizieren (vgl. [157]).

der thermischen Energie repräsentiert (vgl. z. B. [34]). Bei der Quantifizierung ist auf die geeignete Wahl des Referenzniveaus zu achten, z. B. Umgebungstemperatur und -druck als Zustandsgrößen. Die Bewertung ist somit unabhängig von der Auslegung und Konfiguration des Rekuperationssystems und dessen Teilsystemen und Komponenten. Damit hängt die rekuperierte Energie hauptsächlich von den ermittelten Fahrzeugrandbedingungen ab. Aus energetischen Gründen stellen die Abgasenthalpie der VKM und das Kühlmittel des Kühlsystems als Wärmequelle bzw. -senke die vielversprechendste und effizienteste Integrationsvariante für fahrzeuggerechte TEG-Systeme dar.

### Bewertung anhand der Temperaturqualität

Die theoretisch maximalen Wirkungsgrade im Sinne des Carnot-Wirkungsgrads (s. Gleichung 2.11), die auf den Temperaturniveaus der im Fahrzeug verfügbaren Wärmequellen und -senken basieren, sind in der Tabelle 4.3 angegeben. Je höher die Temperatur- und die Enthalpiedifferenzen sind, desto höhere Wirkungsgrade sind erreichbar. Die Abwärmenutzung am jeweiligen Motorausgang, d. h. im AGK, bietet mit Wirkungsgraden von bis zu 64 % für das Diesel-NFZ und bis zu 73 % für das Erdgas-NFZ das höchste Potential, gefolgt von der Nutzung in der AGR und in der AGN. Beim Vergleich der verschiedenen Wärmequellen und Temperaturdifferenzen wird deutlich, dass das Abgas des Erdgasmotors die höheren Potentiale zur Abwärmenutzung bietet.

Tabelle 4.3.: Potentialbestimmung anhand des Carnot-Wirkungsgrades  $\eta_c$  [%] im Diesel- und Erdgas-NFZ

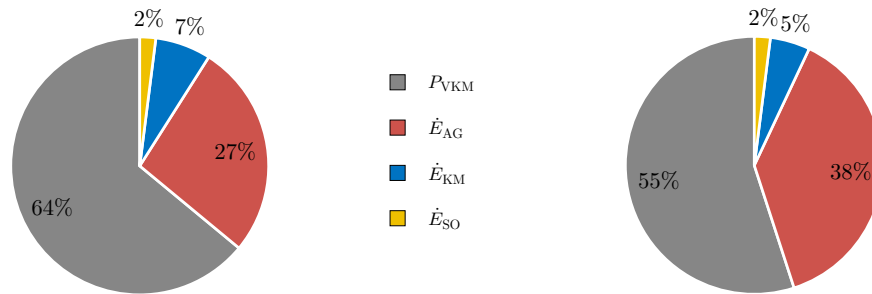
Fahrzeug	Wärmequelle	$\vartheta_h$	Umgebung	NT-KMK	HT-KMK
			20 °C	$\vartheta_k$ 60 °C	90 °C
NFZ allgemein	NT-KMK	60 °C	12 %	o. A.	9 %
	HT-KMK	90 °C	19 %	8 %	o. A.
	Ladeluft	100 °C	21 %	11 %	3 %
Diesel-NFZ	Abgas AGN-Ausgang	300 °C	49 %	42 %	37 %
	Abgas AGR	400 °C	56 %	51 %	46 %
	Abgas Motorausgang	550 °C	64 %	60 %	56 %
Erdgas-NFZ	Abgas AGN-Ausgang	670 °C	69 %	65 %	62 %
	Abgas Motorausgang	800 °C	73 %	69 %	66 %

### Bewertung anhand der Qualität und Quantität der Exergieströme

Die Bewertung anhand des Carnot-Wirkungsgrades und der Qualität der verfügbaren Temperaturdifferenzen erscheint im Rahmen der ganzheitlichen Untersuchung dieser Arbeit als unzureichend. Daher erfolgt nachfolgend die Bewertung anhand der Qualität und Quantität der verfügbaren Exergieströme (s. Gleichungen 5.24 und 5.25). Beispielhaft werden für eine Konstantfahrt mit 80 km/h in der Ebene und maximaler Zuladung die relativen Verteilungen der Energie- und Exergieströme der beiden Referenzfahrzeuge in Abbildung 4.9 angegeben. Die Diagramme zeigen arithmetische Mittelwerte. Die Verhältnisse können bei unterschiedlichen Fahrzuständen und Motorenaggregaten



(a) Relative Verteilung der Energieströme im Diesel-NFZ (links) und Erdgas-NFZ (rechts)



(b) Relative Verteilung der Exergieströme im Diesel-NFZ (links) und Erdgas-NFZ (rechts)

Abbildung 4.9.: Relative Verteilung der Energie- und Exergieströme der Referenzfahrzeuge (Rdb.:  $\bar{v} = 80$  km/h;  $m_{FZ} = 40$  t GG;  $\vartheta_U = 20$  °C); Darstellung i. A. a. [158]

abweichen. Bei Betrachtung der Motorleistung  $P_{VKM}$  in Teilabbildung (a) wird der höhere Wirkungsgrad des Dieselmotors mit 43 % erkennbar. Zudem ist der entsprechende Wärmestrom des Abgases  $\dot{Q}_{AG}$  mit 31 % geringer als beim Erdgasmotor mit 37 %. Die Wärmeströme ins Kühlmittel  $\dot{Q}_{KM}$  sowie die sonstigen Wärmeströme  $\dot{Q}_{SO}$ , die sich insbesondere aus den Konvektions- und Strahlungsanteilen der (Motor-)Oberflächen ergeben, variieren um 5 Prozentpunkte bzw. 3 Prozentpunkte.

Zur Bewertung der Abwärmepotentialen wird in Teilabbildung (b) eine exergetische Betrachtung der Energieströme durchgeführt. Als Referenztemperatur wird die Umgebungstemperatur angesetzt. Die jeweilige Temperatur im Motorkrümmen wird für das Diesel-NFZ mit 550 °C und für das Erdgas-NFZ mit 800 °C als maximales Abgastemperaturniveau angenommen. Die maximale Kühlmitteltemperatur wird bei beiden Fahrzeugen auf 120 °C festgelegt. Da die VKM-Leistung bereits einem Exergiestrom entspricht, steigt ihr relativer Anteil gegenüber der energetischen Betrachtung jeweils deutlich an auf 64 % im Diesel-NFZ und bis zu 55 % im Erdgas-NFZ. Im Vergleich zu dieser sinken die relativen Anteile der Exergieströme ins Kühlmittel  $\dot{E}_{KM}$ , was auf dessen geringes Temperaturniveau zurückzuführen ist. Der relative Exergieanteil des Abgases  $\dot{E}_{AG}$  ist im Erdgas-NFZ mit 38 % größer als im Diesel-NFZ mit 27 %, aufgrund des höheren Temperaturniveaus.

Die verfügbaren Exergieströme ( $\dot{E}_{AGK}$ ,  $\dot{E}_{AGN, \text{ein}}$ ,  $\dot{E}_{AGN, \text{aus}}$  und  $\dot{E}_{AGR}$ ) sind für die potentiellen Integrationspositionen des TEG-Systems entlang des Abgaspfades als Mittelwerte im jeweiligen Fahrzenario in Abbildung 4.10 angegeben. Mit zunehmenden



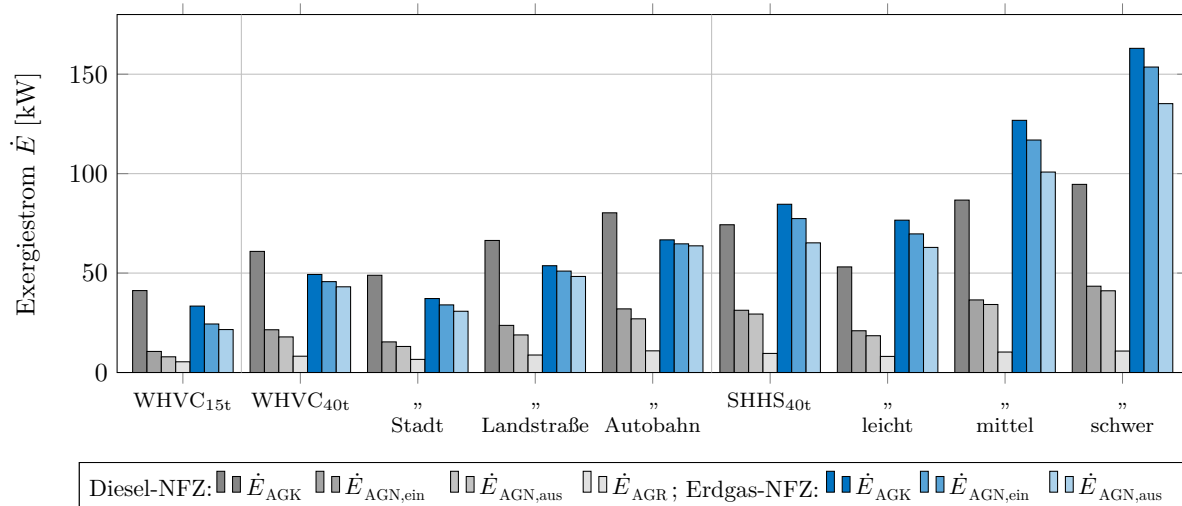


Abbildung 4.10.: Abgasseitige Exergieanalyse bei verschiedenen Fahrscenarien

Lastanforderungen des Fahrprofils steigern die verfügbaren Exergieströme auf bis zu 95 kW im Diesel-NFZ und bis zu 163 kW im Erdgas-NFZ in der schweren Teilstrecke SHHS<sub>40t</sub> an. Mit zunehmendem Abstand zur VKM sinken diese im Allgemeinen. Die Ausnahme bildet der Exergiestrom der AGR ( $\dot{E}_{AGR}$ ) im Diesel-NFZ (vgl. [34, 103]). Die Temperaturen in der AGR-Strecke sind wie beschrieben höher, jedoch die entsprechenden Massenströme deutlich geringer und damit die Exergieströme (vgl. [103]). In der Abbildung werden als Referenzniveaus die Umgebungsrandbedingungen gewählt. Für das TEG-System im Fahrzeug sollte aus Effizienzgründen das Kühlmittel des NT-KMK ( $\approx 60^\circ\text{C}$ ) bzw. des HT-KMK ( $\approx 90^\circ\text{C}$ ) berücksichtigt werden. Damit würden die dargestellten Exergieströme im Durchschnitt um 15 % bzw. 30 % sinken. Der Einsatz des TEG-Systems am Ausgang der AGN ist aus energetischer Sicht von Vorteil.

### Bewertung anhand des Einflusses auf das Gesamtfahrzeug

Ein Ziel der Arbeit ist es, das Gesamtfahrzeugsystem durch die TEG-Integration nach Möglichkeit nur geringfügig zu verändern. Somit werden die Integrationspositionen direkt in bzw. an der VKM-Wandung, dem nachfolgenden AGK bzw. vor und in der AGN nicht detaillierter untersucht. Im Stand der Technik sind hierfür keine erfolgversprechenden Ansätze bekannt (s. Abschnitt 2.4). Die Positionierung am Ausgang der AGN wird als vorteilhafteste TEG-Integrationsposition in dieser Arbeit erachtet und weiterverfolgt (vgl. [22, 103, 104, 118, 130]), da insbesondere der Einfluss auf die Abgasanlage am geringsten ist. Nachteilig sind jedoch die beschriebenen niedrigeren Abgastemperaturen und der relativ große Abstand zum vorhandenen Kühlsystem. Die in aktuellen Diesel-NFZ verfügbare AGR-Strecke stellt zudem eine interessante Integrationsposition dar (vgl. [34, 99, 103, 127]). Der vorhandene Kühler und die existierenden Medienanschlüsse könnten als Vorteil dieser Integrationsvariante als Neuentwicklung einschließlich TEG-System genutzt werden. Dies ermöglicht Kostenreduktionen gegenüber anderen Lösungen. Nachteile sind die geringe Exergiequantität und die erhöhte Rußbelastung der Abgase (vgl. [159–161]), die

höhere Leistungsverluste des TEG-Systems im Langzeitbetrieb erwarten lassen. Zudem sind die aufwendige Integration eines Bypasssystems bzw. die höhere Komplexität der AGR-Steuerung einschließlich TEG-Systems zu nennen. Die Einflüsse auf die Funktionalität der AGR durch eine zusätzliche TEG-Integration und dessen Auslegung unter Restriktion des bestehenden Bauraums des AGR-Kühlers sind dem Stand der Technik bislang unbekannt. Allgemein ist die AGR-Auslegung und dessen Betriebsstrategie vom Fahrzeughersteller abhängig und deren zukünftige Entwicklung und Bedeutung ungewiss. Eine abschließende Bewertung kann an dieser Stelle nicht erfolgen, sondern erst im Fortgang der Arbeit (s. Abschnitt 8.2.1).

## 4.4. Konkretisierung der Systemanforderungen

Für eine erfolgreiche Produktentwicklung ist es notwendig die Anforderungen der Kunden und Benutzer zu kennen (vgl. [162, 163]). Die Festlegung aller relevanten Anforderungen kann in einem Lastenheft in Form einer dynamischen<sup>55</sup> Anforderungsliste. Zur Erstellung sollte nach [140] unter anderem der Ist-Zustand, die Zielsetzungen, die Beschreibung, die (System-)Funktionen, der Einsatz, die Anforderungen, die technischen Leistungen und die Spezifikationen des zukünftigen Produktes berücksichtigt werden.

Für die TEG-Entwicklung stellt beispielsweise der Ist-Zustand die wirtschaftlichen und technischen Spezifikationen des jeweiligen Referenzfahrzeugs ohne TEG-Integration dar. Die Haupt- und Nebenzielsetzungen der Systementwicklung wurden in Abschnitt 3.2 vorgestellt. Die Beschreibung des Gesamtsystems einschließlich des Funktionsprinzips, der Teilsysteme und Komponenten wird im Zuge der jeweiligen Modellbildungen in Kapitel 5 erörtert. Die fahrzeugspezifischen Randbedingungen wurden im Rahmen der Potentialanalyse und -bewertung in diesem Kapitel vorgestellt. Dadurch lassen sich die technischen Anforderungen ableiten, im Entwicklungsprozess berücksichtigen und die TEG-Spezifikationen bestimmen. Im Folgenden werden beispielhaft die Produktleistungen konkretisiert. Das TEG-System soll den Nettoverbrauch unter Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten des Fahrzeugs reduzieren. Dies bedingt eine geringe Kosten-Nutzen-Relation. Darüber hinaus ist eine hohe TEG-Leistung bei (in-)stationären Randbedingungen erforderlich. Um eine hohe (Netto-)Kraftstoffreduktion zu erreichen sind die parasitären Effekte der Fahrzeugwechselwirkungen gering zu halten, d. h. niedriger Abgas- und Kühlmittelgedrückt, geringe zusätzliche Kühllast und geringes Gewicht. Dies erfordert Systeme mit hohen Wirkungsgraden im Vergleich zum Stand der Technik. Die vollständige Anforderungsliste für die TEG-Systementwicklung für SNFZ ist in Abbildung D.3 des Anhangs dargestellt. Die folgenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungskategorien werden in Anlehnung an [162] berücksichtigt, um die Vollständigkeit zu gewährleisten:

---

<sup>55</sup>Anforderungsliste unterliegt kontinuierlichen Veränderungen und Ergänzungen im Entwicklungsprozess.

- Gesetzliche und regulatorische Anforderungen
- Ökonomische und marktspezifische Anforderungen
- Organisatorische Anforderungen
- Technische Anforderungen
- Nutzungs- und Qualitätsanforderungen

Die Liste enthält sowohl qualitative als auch quantitative Anforderungen und unterscheidet zwischen Festforderungen (F) und Wünschen (W). Die Angaben werden fahrzeugspezifisch aufgeführt. Der Schwerpunkt der TEG-Auslegung dieser Arbeit wird auf die techno-ökonomische Produktentwicklung nach [162] von der Konzeptphase bis zur Fertigung gelegt. Die Nutzungsphase des Systems wird zudem zum Beispiel durch die Anforderung an zuverlässige und langzeitstabile TEG-Systeme mit geringerer Priorität berücksichtigt (s. Abschnitt 7.3). Weitere Anforderungen, welche die fortgeschrittenen Produktlebensphasen betreffen, wie z. B. Wartung, Instandhaltung oder Nachhaltigkeit bzw. Recycling, werden in dieser Arbeit vernachlässigt.

Zur Auslegung und Bewertung von TEG-Systemen sind eindeutige Betriebspunkte zu definieren, wie in Tabelle 4.4 dargestellt. Es werden die relevanten Fahrscenarien anhand des jeweiligen Mittelwertes (m) und Maximalwertes (max) angegeben. Die Exergieströme ( $\dot{E}$ ) wurden mit Bezug zur Umgebungstemperatur berechnet (s. Gleichung 5.24).

Die Ermittlung der Randbedingungen und Anforderungen ist mit hohem Detaillierungsgrad erfolgt, da diese die Qualität der TEG-Ergebnisgrößen in hohem Maße beeinflussen.

Tabelle 4.4.: Übersicht der definierten Betriebspunkte (BP) für die TEG-Auslegung dieser Arbeit

Fahrzeug	Betriebspunkt	$\vartheta_{AG,ein}^*$ [°C]	$\dot{m}_{AG}^*$ [kg/s]	$\dot{Q}_{AG,ein}^*$ [kW]	$\dot{E}_{AG,ein}^*$ [kW]	$\vartheta_{KM,ein}^{**}$ [°C]	$\dot{V}_{KM}^{**}$ [dm <sup>3</sup> /s]	$\dot{Q}_{KM,ein}^{**}$ [kW]	$\dot{E}_{KM,ein}^{**}$ [kW]
Diesel- NFZ	WHVC <sub>15 t, m</sub>	189	0,12	21,7	7,9	48	0,3	43,6	3,8
	WHVC <sub>15 t, max</sub>	238	0,29	67,9	29,1	41	0,4	44,4	3
	WHVC <sub>40 t, m</sub>	243	0,17	40,9	17,9	51	0,3	51,5	4,9
	WHVC <sub>40 t, max</sub>	286	0,38	108,5	52,2	46	0,4	58,7	4,8
	SHHS <sub>40 t, m</sub>	297	0,20	60	29,4	51	0,4	64,8	6,2
	SHHS <sub>40 t, max</sub>	341	0,58	187,4	97,2	57	0,6	114,2	12,8
Erdgas- NFZ	WHVC <sub>15 t, m</sub>	609	0,06	33,1	21,6	50	0,3	46,6	4,3
	WHVC <sub>15 t, max</sub>	659	0,16	96,2	64,8	43	0,4	46,2	3,4
	WHVC <sub>40 t, m</sub>	652	0,10	63,6	43,1	52	0,3	52	5,1
	WHVC <sub>40 t, max</sub>	710	0,22	169,4	118,0	46	0,4	56	4,6
	SHHS <sub>40 t, m</sub>	676	0,14	94,4	65,2	54	0,4	67,3	7
	SHHS <sub>40 t, max</sub>	743	0,36	275,3	195,8	58	0,6	109,4	12,6

\* Angaben für die Position am Ausgang der Abgasnachbehandlung (AGN).

\*\* Angaben für den Niedertemperatur-Kühlmittelkreislauf (NT-KMK).

# Kapitel 5.

## Modellbildung und -analyse

Um Aussagen über die realistischen Einsatzbedingungen eines Abwärmenutzungssystems treffen zu können sind umfangreiche Simulationsmodelle erforderlich, die u. a. die Längsdynamik des Fahrzeugs, die Fahrzeugwechselwirkungen, die thermodynamische und strömungsmechanische Modellierung des TEG-Systems sowie die thermoelektrische Energieumwandlung umfassen. Die Modellbildung wird im Folgenden, gegliedert nach den Betrachtungsebenen des methodischen Vorgehens aus Abschnitt 3.2, erläutert.

### 5.1. Modellbildung des Gesamtfahrzeuges

Um eine gesamtsystemische Bewertung des TEG-Systems zu ermöglichen werden Teilmodellierungen der relevanten Fahrzeugwechselwirkungen durchgeführt. Dazu sind verifizierte Modellumgebungen der Wechselwirkungen im gesamten Betriebskennfeld des Fahrzeugbetriebs erforderlich.<sup>56</sup> Die folgenden Inhalte sind der Betrachtungsebene des ‚Gesamtfahrzeuges‘ der übergeordneten Vorgehensweise zuzuordnen (s. Abbildung 3.1).

#### 5.1.1. Methode zur Berechnung der Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsreduktion

Die Integration eines TEG-Systems stellt eine zur Nennleistung des Motors vergleichsweise geringe Änderung der Wellenleistung des Fahrzeuges in Aussicht. Der Ansatz der experimentellen Verbrauchsmessung auf dem Rollenprüfstand mit kleinen Differenzfahrwiderständen ist daher nicht geeignet. Unter anderem ist die Reproduzierbarkeit der Experimente aufgrund der Komplexität gering und die Ungenauigkeit der Ergebnisse hoch (vgl. [29]). Gesamtfahrzeugsimulationen sind vergleichsweise komplex, wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben. Daher wird in dieser Arbeit der analytische **Willans-Ansatz** in Anlehnung an [29, 164, 165] verwendet, um den Differenzverbrauch und die äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln. Kennfeldverschiebungen der VKM werden dabei durch eine Änderung der Leistung an der Kurbelwelle abgebildet (vgl. bspw. [29, 72]). Als Teil des

---

<sup>56</sup>Erfolgt die Systembewertung ausschließlich in stationären Betriebspunkten oder in Teillastbereichen, können vereinfachte Ansätze, wie z. B. gültige Mittelwertmodelle, verwendet werden (vgl. [29, 72]).

Ansatzes erfolgt die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs  $V_{FZ}$  mithilfe eines vereinfachten Kraftstoffverbrauchmodells:

$$V_{FZ}(t) \text{ [l/h]} = \bar{v}_{VKM} \cdot P_{VKM}(t) + V_{Null}(t) \quad (5.1)$$

Dabei stellt  $\bar{v}_{VKM}$  [l/kWh] den Mittelwert der motorspezifischen Proportionalitätskonstante,  $P_{VKM}$  die Motorleistung und  $V_{Null}$  den Nulleistungsverbrauch dar. Die motorspezifische Proportionalitätskonstante wird empirisch auf dem Motorenprüfstand ermittelt und stellt die Steigung einer angenommenen linearen Funktion von Motorleistung [kW] und Kraftstoffverbrauch [l/h] dar. Sie ermöglicht die Umrechnung einer zusätzlichen Arbeit der VKM in einen zusätzlichen Kraftstoffverbrauch mit relativ hoher Genauigkeit (vgl. [29]). Damit der Ansatz auch für hohe Leistungsbereiche der VKM geeignet ist, wird in dieser Arbeit die motorspezifische Proportionalitätskonstante nicht als konstanter Mittelwert über den gesamten Leistungsbereich angenommen. Stattdessen werden zwei leistungsspezifische Werte ( $v_{VKM1}$  und  $v_{VKM2}$ ) ermittelt. Dies führt zu einer intervallweise linearen Verbrauchsfunktion, die in einem kleinen ( $P_{VKM} \leq 40\%$ ) und großen Leistungsbereich der VKM ( $P_{VKM} > 40\%$ ) definiert ist (s.  $v_{VKM,i}$  in Teilabbildung 5.1 (a)). Die Annahmen dieser Arbeit für die Anwendungsszenarien des Diesel- und Erdgas-NFZ mit Abgasnorm Euro VI sind der Tabelle B.2 im Anhang zu entnehmen. Der sogenannte Nulleistungsverbrauch aus Gleichung 5.1 wird von der VKM benötigt, um die inneren Reibungsverluste zu überwinden und den Leerlaufbetrieb zu realisieren:

$$V_{Null}(t) \text{ [l/h]} = V_{Null,11}(n(t)) \cdot V_H \quad (5.2)$$

Der auf einen Liter Hubraum normierte Nulleistungsverbrauch  $V_{Null,11}$  stellt eine quadratische Gleichung in Abhängigkeit von der Motordrehzahl  $n$  dar, die anhand von empirischen Messdaten bestimmt werden kann (vgl. [29]).<sup>57</sup> Der Hubraum  $V_H$  stellt den dominierenden Parameter der Gleichung dar.

Für die Modellierung sind zunächst die zeitlich variierenden Fahrwiderstände, d. h. Luft- ( $F_L$ ), Roll- ( $F_R$ ), Steigungs- ( $F_S$ ) und Beschleunigungswiderstand ( $F_B$ ), durch die **Längsdynamiksimulation** zu ermitteln. Die erforderliche Antriebsarbeit  $W_{ges}$  kann aus der Summe der jeweiligen Fahrwiderstandsarbeiten  $W_i$  durch Integration der Kraft  $F_i$  über den Weg  $s$  ermittelt werden:

$$W_{ges}(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) = \sum_{i=1}^n \int F_i(t) \cdot ds \quad \text{mit } i = (L, R, S, B) \quad (5.3)$$

Mit Hilfe des gewählten Willans-Ansatzes lässt sich der volumetrische Verbrauch  $B_s$  des

<sup>57</sup>Für die Referenzfahrzeuge dieser Arbeit werden Werte der Fahrzeuguntersuchung verwendet. Für das Diesel-NFZ gilt:  $V_{Null,11} \text{ [l/h]} = 8 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot n + 0,1$  und für das Erdgas-NFZ gilt:  $V_{Null,11} \text{ [l/h]} = 5,9 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot n + 0,13$ .

jeweiligen Fahrprofils im Zeitintervall  $T=[t_1, t_2]$  ermitteln:

$$B_s \text{ [l/(100 km)]} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_2} W_{\text{ges}} \cdot dt \cdot F_{\text{GV}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{nR}}) \cdot \bar{v}_{\text{VKM}} \quad (5.4)$$

Dabei stellt  $F_{\text{GV}}$  den fahrzeugspezifischen Getriebeverlustfaktor und  $\epsilon_{\text{nR}}$  den Anteil der ‚natürlichen‘<sup>58</sup> Rekuperation im Fahrprofil dar. Zudem lässt sich mit dem Ansatz der Differenzverbrauch  $\Delta B_s$  bei Veränderung der mechanischen Wellenleistung  $\Delta P_{\text{mech,Welle}}$  des Fahrzeuges unter anderem mit Hilfe der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  ermitteln:

$$\Delta B_s \text{ [l/(100 km)]} = \underbrace{\frac{P_{\text{TEG}}}{\eta_{\text{G}}}}_{=\Delta P_{\text{mech,Welle}}(\text{TEG})} \cdot \frac{100}{v} \cdot (1 - \epsilon_{\text{nR}}) \cdot \bar{v}_{\text{VKM}} \quad (5.5)$$

Die im Folgenden beschriebenen Fahrzeugwechselwirkungen eines TEG-Systems können an der Antriebswelle bilanziert werden. Die eingespeiste Leistung eines TEG-Systems unterhalb des Leistungsbedarfs der elektrischen Verbraucher führt zur Entlastung des Generators und damit der Motorleistung. Dies wird über das Verhältnis aus TEG-Leistung  $P_{\text{TEG}}$  und dem Generatorwirkungsgrad  $\eta_{\text{G}}$  berücksichtigt, wie in Gleichung 5.5 verdeutlicht wird. Liegt die eingespeiste Leistung oberhalb des Leistungsbedarfs der Verbraucher werden zudem die Wirkungsgrade für die Be- und Entladung der Batterie berücksichtigt. Der prozentuale Differenzverbrauch ( $\Delta B$  [%]), der im Fortgang dieser Arbeit angegeben wird, ist definiert als das Verhältnis vom absoluten Differenzverbrauch aus Gleichung 5.5 und dem absoluten Gesamtverbrauch des Fahrzeugs aus Gleichung 5.4. Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen sind direkt proportional zum Kraftstoffverbrauch und lassen sich mit überschlägigen Umrechnungsfaktoren<sup>59</sup> berechnen.

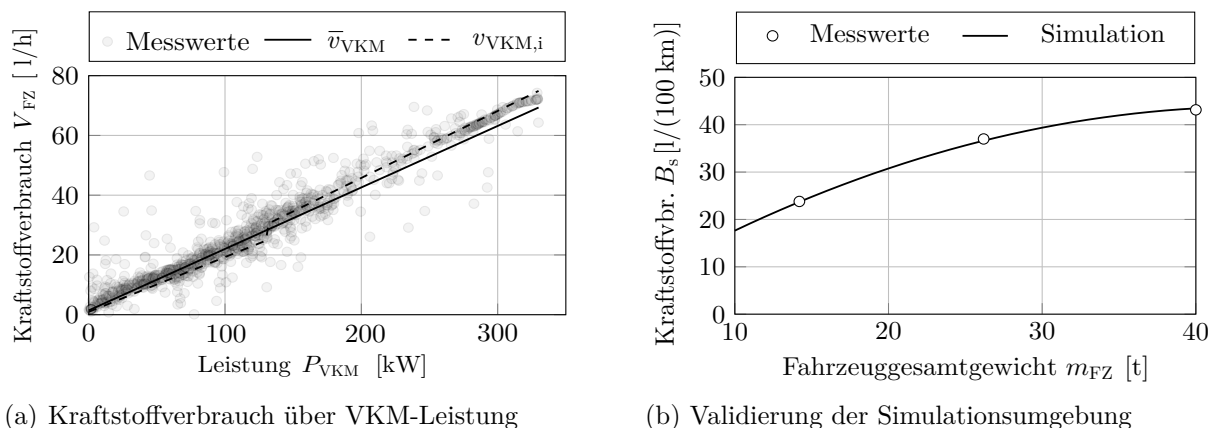


Abbildung 5.1.: Kraftstoffverbrauch im Fahrzyklus WHVC am Beispiel des Diesel-NFZ (eigene Messungen mit dem Referenzfahrzeug Daimler Actros 1845; s. Abschnitt 4.2)

<sup>58</sup>Derjenige Anteil der kinetischen Energie, der für die Überwindung des Luft- und Rollwiderstandes bei der Verzögerung aufgewendet wird; vgl. [29].

<sup>59</sup>Nach [143] entsprechen 11 Dieselkraftstoff  $2360 \text{ gCO}_2$ , 11 Harnstoff  $238 \text{ gCO}_2$  und 1 kg Erdgas-kraftstoff  $2540 \text{ gCO}_2$ .

Die erfolgreiche Validierung der Simulationsumgebung anhand von Messwerten des Kraftstoffverbrauchs vom ausgewählten Diesel-NFZ dieser Arbeit (s. Abschnitt 4.2 und Tabelle B.1 im Anhang) ist beispielhaft in Abbildung 5.1 dargestellt. Die höhere Genauigkeit des gewählten eigenen Vorgehens mit zwei Proportionalitätskonstanten  $v_{\text{VKM},i}$  im Vergleich zum Mittelwert  $\bar{v}_{\text{VKM}}$  wird in Teilabbildung (a) deutlich. Die geringen Abweichungen zwischen den Mess- und Simulationen sind im Fahrzyklus WHVC bei unterschiedlichen Gesamtgewichten  $m_{\text{FZ}}$  des Diesel-NFZ in Teilabbildung (b) erkennbar. Im Durchschnitt führt ein zusätzliches Gewicht von 100 kg zu einem Mehrverbrauch von 0,2 %. Dies stellt eine konservativere Annahme dar, als typischerweise in der Literatur angenommen wird (vgl. z. B. [166] mit 0,15 % pro 100 kg).

### 5.1.2. Fahrzeugwechselwirkungen

Die relevanten Fahrzeugteilsysteme bei der Integration eines thermoelektrischen Abwärmernutzungssystems und deren bidirektionale Wechselwirkungen werden in Abbildung 5.2 dargestellt. Im Folgenden wird der jeweilige Prozess der Modellbildung für die Fahrzeugteilsysteme als Teil des methodischen Vorgehens dieser Arbeit erläutert.

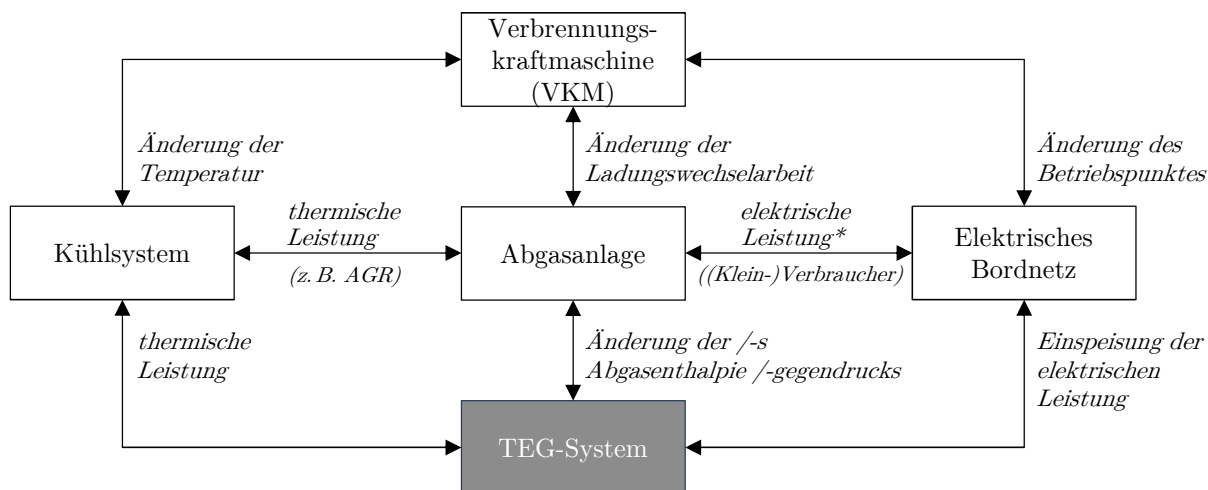


Abbildung 5.2.: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen dem TEG-System und den Fahrzeugteilsystemen; Abbildung aus [48] i. A. a. [167] (\* z. B.: Lambdasonde, Harnstoff- und Kraftstoffdosierung, Katalysatorheizung, Klappensteuerung (für TEG))

#### 5.1.2.1. Verbrennungskraftmaschine

Der für den Antrieb eines Fahrzeugs erforderliche Primärenergiestrom  $\dot{E}_{\text{FZ}}$  lässt sich durch das Produkt aus den Wirkungsgraden des Energiewandlungsprozesses in der Verbrennungskraftmaschine  $\eta_{\text{VKM}}$  und des Antriebsstrangs  $\eta_{\text{An}}$  sowie der Antriebsleistung  $P_{\text{An}}$  ausdrücken:

$$\dot{E}_{\text{FZ}} = \frac{dE_{\text{FZ}}}{dt} = \eta_{\text{VKM}} \cdot \eta_{\text{An}} \cdot P_{\text{An}} \quad (5.6)$$

Die Energiebilanz der VKM kann mit Hilfe der zugeführten und abgeführten Energie- und Massenströme nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik als offenes stationäres System hergeleitet werden (vgl. bspw. [28, 32, 168]):

$$\frac{dE}{dt} = 0 = \dot{m}_B \cdot h_B + \dot{m}_L \cdot h_L - P_{\text{mech}} - \dot{Q}_{\text{KM}} - \dot{Q}_{\text{SO}} - \dot{m}_{\text{AG}} \cdot h_{\text{AG}} \quad (5.7)$$

In der Gleichung stellen  $\dot{m}_B$  und  $\dot{m}_L$  den Brennstoff- und Luftmassenstrom sowie  $h_B$  und  $h_L$  die entsprechenden spezifischen Enthalpien dar. Die mechanische Leistung wird durch  $P_{\text{mech}}$ , die in das Kühlsystem übertragene Wärme als  $\dot{Q}_{\text{KM}}$  und die sonstigen Wärmeströme als  $\dot{Q}_{\text{SO}}$  beschrieben. Letztgenannte fassen die Wärmeströme durch Konvektion und Strahlung von der Motoroberfläche und an das Motoröl zusammen. Zudem wird über das Abgas ein Enthalpiestrom ( $\dot{H}_{\text{AG}} = \dot{m}_{\text{AG}} \cdot h_{\text{AG}}$ ) abgegeben.

Für die Modellierung der Veränderung des Warmlaufverhaltens durch den Einfluss des TEG-Systems (s. Abschnitt D.7.6.3) sollte die analytische Energiebilanzierung der VKM aus Gleichung 5.7 genauer betrachtet werden. Ein detaillierteres Energieflussdiagramm mit typischen Werten für einen aufgeladenen LKW-Dieselmotor ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Bilanzierung der physikalischen Größen erfolgt an der Antriebswelle des Fahrzeuges (vgl. [28, 31]). Die an der Welle verfügbare und damit effektive Leistung  $P_e$  ist geringer als die indizierte Leistung  $P_i$  am Kolben (vgl. [31]). Die Reibleistung  $P_r$ , zu der sämtliche Reibungsverluste der VKM und die erforderliche Antriebsleistung der Nebenaggregate gerechnet werden, reduziert die indizierte Leistung. Aus der Abbildung geht hervor, dass neben den bereits eingeführten Größen die Ermittlung der Wandwärmeströme  $\dot{Q}_W$  für die Bilanzierung entscheidend ist:

$$\dot{Q}_W = \alpha \cdot A_W \cdot (T_{\text{Gas}} - T_{\text{KM}}) \quad (5.8)$$

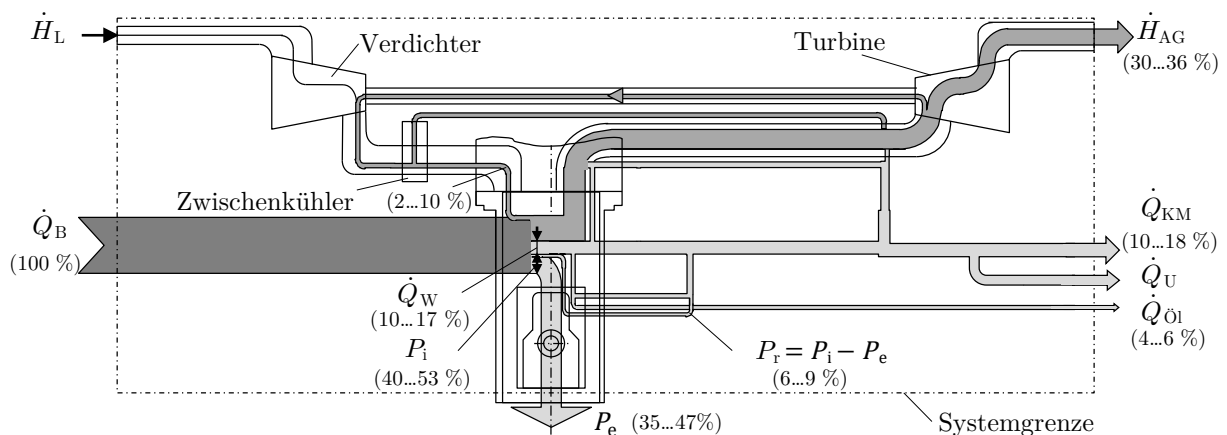


Abbildung 5.3.: Energieflussdiagramm für einen aufgeladenen LKW-Dieselmotor, Abbildung i. A. a. [28]



Hierbei stellt  $\alpha$  den Wärmeübergangskoeffizient und  $A_W$  die Fläche der Motorwand dar. Die Temperatur des Gasgemisches im Brennraum ist  $T_{\text{Gas}}$  und des Kühlmittels an der Motorwand ist  $T_{\text{KM}}$ . Aus der Literatur sind insbesondere drei halbempirische Ansätze zur Bestimmung vom Wärmeübergangskoeffizient nach Woschni [169], Hohenberg [170] und Bargende [171] bekannt. Der gebräuchlichste Ansatz nach Woschni basiert auf der Ähnlichkeit des Wärmeübergangs im Brennraum mit dem in durchströmten Rohren und kann vereinfacht formuliert werden als:

$$\alpha = 130 \cdot D_Z^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot T^{-0,53} \cdot u^{0,8} \quad (5.9)$$

Berücksichtigt werden der Bohrungsdurchmesser des Zylinders  $D_Z$ , der Druck  $p$ , die Temperatur  $T$  und die mittlere Gasgeschwindigkeit  $u$  im Zylinder, die aus der Kolbengeschwindigkeit berechnet wird. Mit diesem Ansatz lassen sich die Wandwärmeströme mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

Nach [28] werden typischerweise 10–17 % der Brennstoffenergie als Wandwärmeströme und damit als Wärmeverluste an das Kühlmittel abgeführt, wie in Abbildung 5.3 erkennbar. Als Durchschnittswert werden beispielsweise 16 % im Referenzfahrzyklus WHVC<sub>40t</sub> des Diesel-NFZ bestimmt (s. Tabelle 4.4). Der ermittelte Enthalpiestrom des Abgases ( $\dot{H}_{\text{AG}}$ ) liegt je nach Lastpunkt im Bereich von 33–45 % und damit ebenfalls innerhalb der genannten Bereiche von [28]. Der entwickelte Modellierungsansatz gilt damit als verifiziert und wird im Rahmen der Gesamtsystemsimulation im Fortgang der Arbeit verwendet.

### 5.1.2.2. Abgasanlage

Für die Modellierung ist die Kenntnis der Temperatur- und Druckverteilung entlang der Abgasanlage und die Bewertung des Einflusses bei deren Änderung von großer Bedeutung.

#### Abgasgegendruckkorrelation und Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch

Die Änderung des Abgasgegendrucks bei einer TEG-Systemintegration wirkt sich auf die VKM aus und führt zu einer Änderung des Kraftstoffverbrauchs. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Auslegung des TEG und insbesondere den Heißgaswärmeübertrager. Für die Ermittlung des Einflusses eines geänderten Abgasgegendrucks sind im Stand der Technik verschiedene Berechnungsansätze bekannt. Der gebräuchlichste Ansatz basiert auf der thermodynamischen Dissipationsenergie<sup>60</sup> (vgl. z. B. [32, 136, 172]), bei der die zusätzliche Ausschleubarbeit der Kolben durch den höheren Abgasgegendruck bestimmt wird. Zusätzlich kann anhand von Messdaten des Kraftstoffverbrauchs bei verändertem Abgasgegendruck, beispielsweise durch Versuche auf dem Rollenprüfstand (vgl. bspw. [32, 34]), ein analytischer Zusammenhang ermittelt werden. Die Berücksichtigung der Messungenauigkeiten ist dabei jedoch schwierig. Darüber hinaus sind analytische Berechnungsansätze auf Basis von empirischen Daten bekannt (vgl. z. B. [72, 103, 173]).

<sup>60</sup>Die zusätzliche Wellenleistung wird als sogenannte ‚Pumpleistung‘:  $P = \dot{V}_{\text{AG}} \cdot \Delta p_{\text{AG}}$  ermittelt.

In dieser Arbeit wird letztgenannter Ansatz ausgewählt. Die ersten beiden Herangehensweisen sind nicht für geringe Abgasgedrücke im Teillastbereich geeignet und neigen allgemein dazu, den Abgasgedruck zu überschätzen (vgl. [72]). Für die Referenzfahrzeuge dieser Arbeit sind im Stand der Technik keine geeigneten Berechnungsansätze bekannt. Es sind Korrelationen zu ermitteln, die für die spezifischen Motorarchitekturen und über das gesamte Motorenkennfeld Gültigkeit besitzen. Zur Ermittlung und Kalibrierung der fahrzeugspezifischen Berechnungsansätze wurde im Rahmen dieser Arbeit das Stuttgarter Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS) für simulative Untersuchungen beauftragt. Dabei wurde ein validiertes GT Power-Modell verwendet. Mit Hilfe der Modellierung einer Blende an der TEG-Integrationsposition wurde der Abgasgedruck in einem validierten Ladungswechselmodell variiert (vgl. z.B. [150]). Anhand der Simulationsergebnisse werden fahrzeugspezifische Abgasgedruckkorrelationen mit Hilfe einer analytischen Gleichung abgeleitet. Dabei wird die Änderung des Kraftstoffverbrauchs aus dem veränderten Abgasgedruck im jeweiligen Motorbetriebspunkt ermittelt (vgl. [103]). Die mehrdimensionale Funktion ist abhängig vom effektiven Mitteldruck<sup>61</sup>  $p_{me}$  und vom geänderten Abgasgedruck  $\Delta p_{AG}$ . Mit Hilfe von fahrzeugspezifischen Parametern<sup>62</sup>  $a$  bis  $e$  lässt sich die Funktion näherungsweise beschreiben:

$$\Delta B [\%] = f(p_{me}, \Delta p_{AG}) \approx a + b \cdot p_{me} + c \cdot \Delta p_{AG} + d \cdot p_{me}^2 + e \cdot p_{me} \cdot \Delta p_{AG} \quad (5.10)$$

Am Beispiel des Diesel-NFZ werden die Ergebnisse der Korrelation für die Änderung des Kraftstoffverbrauchs  $\Delta B$  im Kennfeld in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Werte des entsprechenden Kennfeldes für das Erdgas-NFZ sind aufgrund des Motorenprinzips und der Abgasanlagenarchitektur ohne AGR-Strecke im Durchschnitt 25 % niedriger.

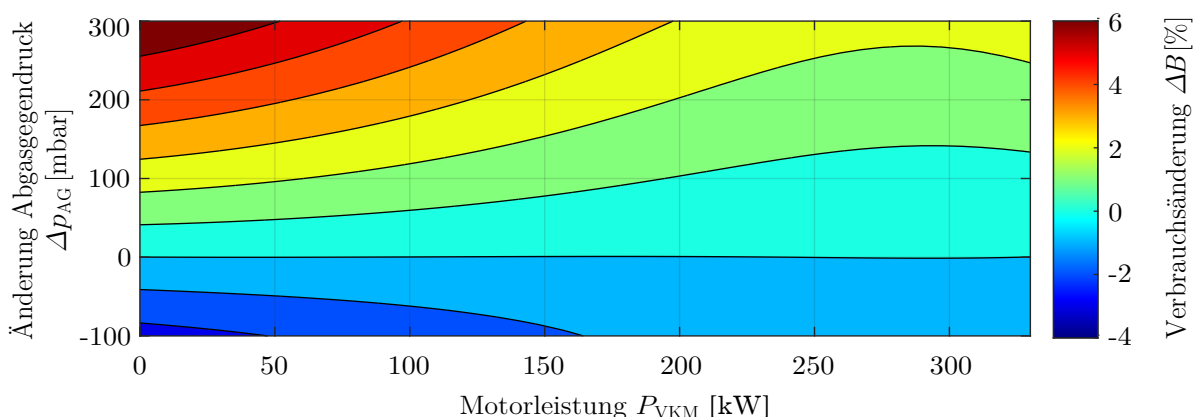


Abbildung 5.4.: Modellierungsergebnis der Abgasgedruckkorrelation für das Diesel-NFZ

<sup>61</sup>Der effektive Mitteldruck ist nach [28] als  $p_{me} = \frac{P_e}{V_H \cdot i \cdot n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{V_H \cdot i}$  definiert und lässt sich beispielsweise anhand des abgegebenen Drehmomentes  $M$  an der Kurbelwelle des Fahrzeuges berechnen.

<sup>62</sup>Für das Diesel-NFZ dieser Arbeit gilt:  $a = 3,2 \cdot 10^{-1}$ ;  $b = -7,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $c = 2,4 \cdot 10^1$ ;  $d = 3,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $e = -9,5 \cdot 10^{-1}$  und für das Erdgas-NFZ:  $a = 1,3 \cdot 10^{-1}$ ;  $b = 3,6 \cdot 10^{-2}$ ;  $c = 2 \cdot 10^1$ ;  $d = 1,9 \cdot 10^{-3}$ ;  $e = -7,5 \cdot 10^{-1}$ .

**Einordnung der Ergebnisse in den Stand der Technik:** Der Kennfeldbereich der entwickelten Korrelation und Ergebnisse des Betriebspunkts des zulassungsrelevanten Testzyklus WHSC (WHSC<sub>BP8</sub>) sind für das Diesel-NFZ in Abbildung 5.5 dargestellt. Zum Vergleich werden die Ergebnisse der Arbeiten von Yang et al. [173] und von Bernath [34] illustriert. Die ermittelte Abgasgegendruckkorrelation dieser Arbeit kann demnach als konservativ bewertet werden, da der zusätzliche Abgasgegendruck zu vergleichsweise größerem Mehrverbrauch als bei den Arbeiten des Standes der Technik führt.

Ein zusätzlicher zeitlich konstanter Abgasgegendruck von 100 mbar führt beispielsweise im Referenzfahrzyklus WHVC<sub>40t</sub> des Diesel-NFZ (s. Abschnitt 4.4) nach dem Ansatz dieser Arbeit zu einer erhöhten mittleren mechanischen Wellenleistung von 899 W und einem Mehrverbrauch von 1,9%. Bei 300 mbar entspricht dies 2755 W und 5,6%. Der beschriebene Ansatz der thermodynamischen Dissipationsenergie führt im Allgemeinen zu Wellenleistungen, die im Bereich von 200–400% höher liegen als nach dem Ansatz dieser Arbeit und entsprechendem Mehrverbrauch.

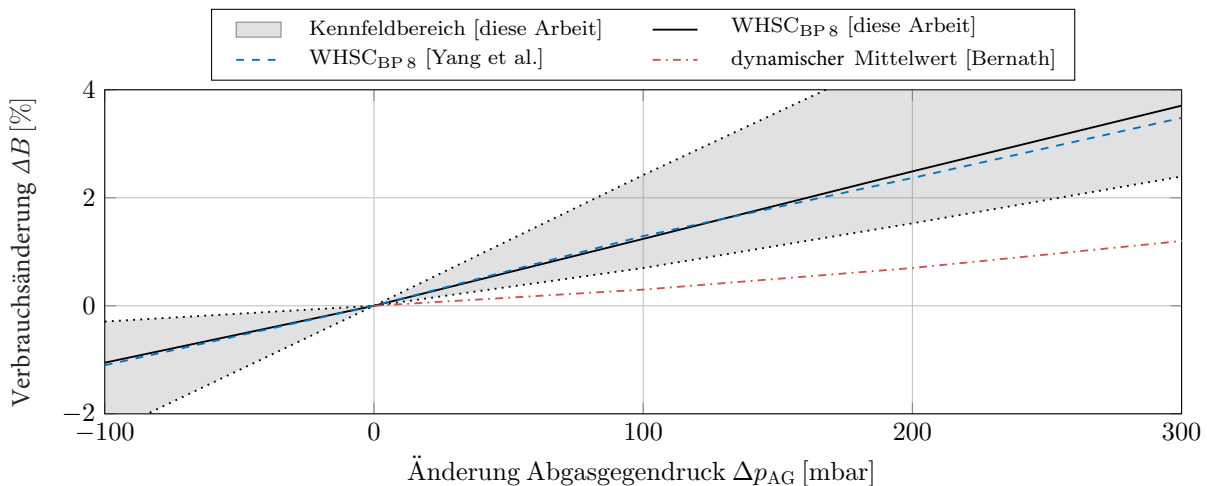


Abbildung 5.5.: Abgasgegendruckkorrelationen für NFZ mit Dieselmotor und Vergleich des Standes der Technik (Yang et al. [173] und Bernath [34]) mit dieser Arbeit

### Wechselwirkungen des TEG-Systems mit der Abgasanlage

Die Abkühlung des Abgases im TEG bewirkt eine Erhöhung der Dichte des Abgasgemisches. Dadurch verringern sich die Strömungsgeschwindigkeiten und der Gegendruck der nachgeschalteten Komponenten der Abgasanlage sinkt. Die sich daraus ergebende effektive Änderung des Abgasgegendrucks ( $\Delta p_e$ ) gegenüber der Abgasanlage ohne TEG wird zur Berechnung des Einflusses des Abgasgegendrucks verwendet (vgl. [32, 72]).

Zur Modellierung der Abgasanlage hinter dem TEG wurden Werte der Fahrzeuguntersuchungen verwendet, wie z. B. Temperatur- und Druckverläufe der Abgasanlage. Zur Bestimmung der Stoffeigenschaften des Abgases wird analog zur Vorgehensweise nach [32] für jede Komponente der Temperaturabfall entlang der Abgasanlage lastpunktabhängig berechnet. Damit lassen sich fahrzeugspezifische und lastpunktabhängige Korrelationen ermitteln, die eine Bestimmung des modifizierten Abgasgegendrucks über das gesamte Betriebskennfeld ermöglichen.

Ein veränderter Abgasgegendruck führt zu Wechselwirkungen zwischen dem TEG-System und dem Abgasturbolader (bzw. den Abgasturboladerstufen). Grundsätzlich gilt, dass eine Erhöhung des Abgasgegendrucks den Wirkungsgrad des Turboladers verringert. Die Gegendruckerhöhung durch das TEG-System wird in dieser Arbeit im Durchschnitt als gering angenommen. Dies ist unter anderem auf die gewählte Auslegungsmethode mittels detaillierter CFD-Simulation zurückzuführen (vgl. [72]). Der Einfluss auf den Abgasturbolader wird somit ebenfalls gering sein und daher in dieser Arbeit vernachlässigt. In der gesamtsystemischen Simulationsumgebung wird ein maximaler Gegendruck der Abgasanlage einschließlich des TEG von 200 mbar implementiert (vgl. [174]).<sup>63</sup> Bei Überschreitung dieses Grenzwertes wird die Bypassklappe geöffnet, damit die Spitzenleistung der VKM nicht durch den Abgasgegendruck des TEG reduziert wird.

### 5.1.2.3. Kühlsystem

Ziel dieser Modellierung ist es, das grundlegende strömungsmechanische und thermodynamische Verhalten des Kühlsystems abzubilden und die Einflüsse eines TEG-Systems in unterschiedlichen Integrationspositionen zu bewerten. Dem Stand der Technik sind verschiedene Modellansätze bekannt, die sich durch unterschiedliche Zielsetzungen, Schwerpunkte und Detaillierungsgrade auszeichnen und die Ausgestaltung variiert von null- bis zu dreidimensionalen Simulationen (vgl. bspw. [34, 168, 173, 175–178]). Es werden eigene Modelle der Kühlsysteme erstellt, da die bekannten Modellansätze nicht den Spezifikationen der Referenzfahrzeuge und den Anforderungen der Gesamtsystemsimulation entsprechen.

#### Modellbildung vom Kühlsystem

Die Modellierung wird mit dem Simulationsprogramm Matlab/Simulink durchgeführt. Basierend auf dem Grundmodell eines Motorkühlsystems nach [179] stellt es eine in der Komplexität weitgehend auf 0D-Simulationselemente reduzierte numerische 1D-Simulation dar. Das Modell umfasst je nach Konfiguration einen strömungsgeteilten HT-/NT-Kühlmittelkreislauf (vgl. bspw. [173]) und einen Ölkühlkreislauf. Der Modellaufbau ist angelegt an die Prinzipdarstellung aus Abbildung 5.6. Die Stoffeigenschaften des verwendeten Kühlmittels<sup>64</sup> sind in Tabelle C.2 im Anhang aufgeführt. Eine mechanische Kühlmittelpumpe fördert das Kühlmittel, bestimmt durch das feste Übersetzungsverhältnis zwischen Pumpen- und Motordrehzahl, durch das Kühlsystem. Die Thermostate steuern die Volumenströme durch den HT-/NT-Kühler, um die optimale Kühlmitteltemperatur aufrechtzuerhalten. Bei einem Kaltstart befindet sich

<sup>63</sup>Die Annahme nach [174] gilt für Motoren im Leistungsbereich von 50–500 kW. Der Grenzwert beträgt beispielsweise 100 mbar nach [37] oder 300 mbar nach [130]. Der Gegendruck eines mit Ruß beladenen Dieselpartikelfilters beträgt bei Volllast nach [174] bereits über 120 mbar.

<sup>64</sup>In dieser Arbeit wird als Kühlmittel ein Ethylenglykol-Wasser-Gemisch im Mischungsverhältnis der Anteile von 50:50 (vgl. [38]) und ein Leichtlauföl mit Bezeichnung SAE 5W30 verwendet.

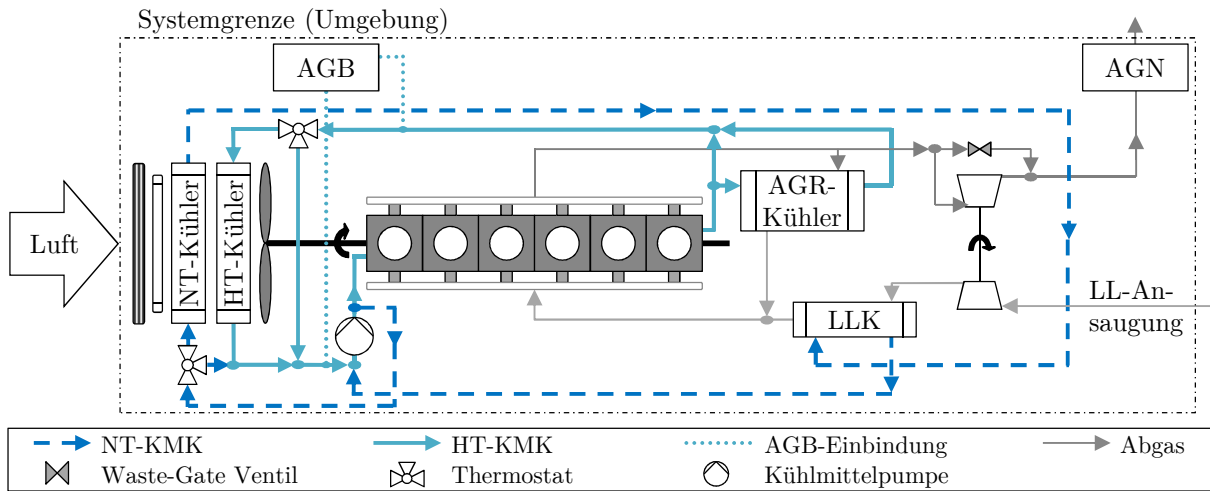


Abbildung 5.6.: Schematische Darstellung des Kühlsystems eines modernen NFZ mit Dieselmotor

das HT-Thermostat in der Kurzschlussstellung und das Kühlmittel zirkuliert während der Warmlaufphase ausschließlich im Kurzschlusskreislauf, um den Verbrennungsmotor möglichst schnell auf Betriebstemperatur zu bringen (z. B.  $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; vgl. [180]). In der Modellierung öffnet das HT-Thermostat schrittweise ab einer Temperatur von  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  und ist ab  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  vollständig geöffnet. Der Ölkühlkreislauf nimmt einen Teil der Wärme des Motors auf, die anschließend über den Öl-Kühlmittel-Wärmeübertrager wiederum an das Kühlmittel übertragen wird. Zudem ist eine Lüftereinheit als Teilmodell implementiert. Bei Bedarf wird diese über eine Viscokupplung zugeschaltet, um den Wärmeübergang zu erhöhen. Der dadurch entstehende Mehrverbrauch ist ebenfalls modelliert.

Für die gesamtsystemische Bewertung des TEG ist es notwendig, die vorhandenen Volumenströme<sup>65</sup> ( $\dot{V}_{\text{KM}}$ ) der Kühlkreisläufe, deren Veränderung bei TEG-Integration und das thermische Kühlungspotential ( $\dot{Q}_{\text{KM,Pot}}$ ), d. h. die maximale Wärmemenge die dem Kühlsystem ohne zusätzlichen Lüfterbetrieb zugeführt werden kann, zu ermitteln. Der zusätzliche Kraftstoffverbrauch des Lüfters würde die TEG-Kraftstoffreduktion zumindest ausgleichen (s. Abschnitt 2.1.2.3). Es wird daher die Annahme getroffen, dass der maximal zulässige Wärmeeintrag des TEG-Systems ( $\dot{Q}_{\text{KM,zu,max}}$ ) dem thermischen Kühlungspotenzial des Kühlsystems entspricht (s. zudem Gleichung 5.22):

$$\dot{Q}_{\text{KM,Pot}} = \dot{Q}_{\text{KM,zu,max}} = \underbrace{\dot{m}_{\text{KM}}}_{=\rho_{\text{KM}} \cdot \dot{V}_{\text{KM}}} \cdot c_{\text{p,KM}} \cdot \underbrace{\left. T_{\text{KM,aus}} \right|_{T_{\text{KM,ein}}}}_{=(T_{\text{KM,aus}} - T_{\text{KM,ein}})} \cdot \Delta T_{\text{KM}} \quad (5.11)$$

Dabei ist  $\dot{m}_{\text{KM}}$  der Massenstrom,  $\dot{V}_{\text{KM}}$  der Volumenstrom,  $\rho_{\text{KM}}$  die Dichte und  $c_{\text{p,KM}}$  die spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels. Die zugehörige Temperatur wird als  $T_{\text{KM}}$  berücksichtigt. Die TEG-Integration darf die Funktion des Kühlsystems nicht einschränken und alle Anforderungen müssen weiterhin erfüllt werden (vgl. [37]).

Ausgangspunkt für die jeweilige Modellierung des Kühlsystems vom Anwendungsszenarios

<sup>65</sup>Definiert den Volumen eines Mediums pro Zeiteinheit ( $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ ) durch einen festgelegten Querschnitt.

des Diesel- und Erdgasreferenzfahrzeuges (s. Tabelle B.1 im Anhang) ist die jeweilige allgemeine Kreislaufauslegung. Dazu werden Ersatzkreisläufe als hydraulische Netzwerke entworfen, wie in Abbildung D.10 des Anhangs illustriert. Die Volumenstromverteilungen und Druckverluste im Ausgangskreislauf ohne TEG lassen sich nach der Dimensionierung der einzelnen Kreislaufwiderstände der Komponenten berechnen. Thermische Massen der Komponenten werden aus Herstellerangaben (s. Abschnitt 4.2.1; vgl. [145, 181]), dem Stand der Technik (vgl. [37, 103, 173]) und Bauteiluntersuchungen (s. Abbildung D.11 im Anhang) berücksichtigt, um die Modelle zu verifizieren. Bei der Modellierung wird die Dauerbremseinheit, die typischerweise als Retarder<sup>66</sup> ausgeführt wird, und das entsprechende Teilkühlsystem nicht berücksichtigt. Die zusätzlich integrierte AGR-Strecke einschließlich Kühler im Diesel-NFZ führt unter anderem zu höheren Kühlmittelvolumina, Volumenströmen und thermodynamischen Kreislaufwiderständen im Vergleich zum Erdgas-NFZ. Die Sollvolumenströme des Kühlsystems liegen im sogenannten Sommerbetrieb<sup>67</sup> bei der jeweiligen Nenndrehzahl im Diesel-NFZ bei  $465 \text{ dm}^3/\text{min}$  und im Erdgas-NFZ bei  $400 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Der HT-Kühler im Erdgas-NFZ kann dabei beispielsweise einen Wärmestrom von bis zu  $240 \text{ kW}$  und der NT-Kühler bis zu  $65 \text{ kW}$  bei einem Volumenstrom von  $30 \text{ dm}^3/\text{min}$  abführen.

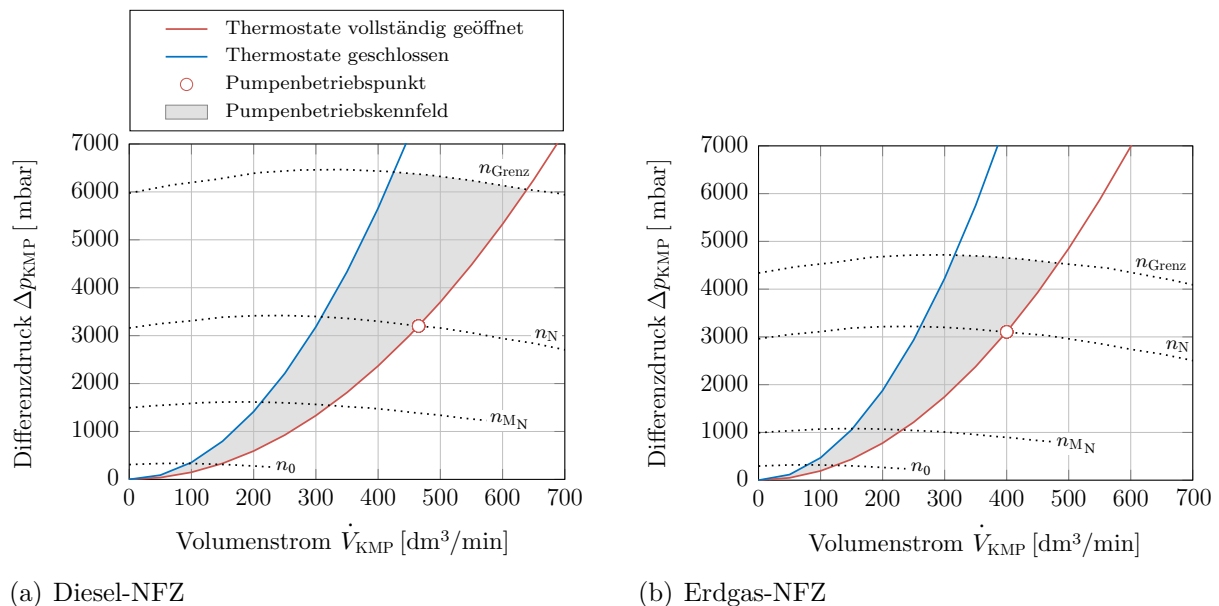


Abbildung 5.7.: Pumpenkennfelder der Referenz-NFZ (gültig für eine Dichte  $\rho_{KM}$  von  $1020 \text{ kg/m}^3$ )

<sup>66</sup>Ein Retarder vom lateinischen *retardare* für ‚verlangsamen‘ ist eine verschleißfreie hydrodynamisch arbeitende oder elektrodynamische Dauerbremse bzw. Kupplung, die vorwiegend in NFZ wie LKW oder Omnibussen eingesetzt und bei LKW > 9 t GG gesetzlich vorgeschrieben wird.

<sup>67</sup>Sommerbetrieb: Durchflusswiderstand des Kühlkreislaufs bei vollständig geöffneten Thermostaten und geschlossenem Heizkreislauf; Winterbetrieb: Durchflusswiderstand des Kühlkreislaufs bei geschlossenen Thermostaten und geöffnetem Heizkreislauf.

Tabelle 5.1.: Ergebnisübersicht der Kühlsystemberechnung (im Sommerbetrieb) ohne TEG-Integration

Fahrzeug	Betriebszustands- bezeichnung	$n_{VKM}$ [1/min]	$n_{KMP}$ [1/min]	$\dot{V}_{KMP}$ [dm <sup>3</sup> /min]	$\Delta p_{KMP}$ [mbar]	$\eta_{KMP}$ [%]	$P_{KMP}$ [W]
Diesel-NFZ	Leerlauf ( $n_0$ )	500	1100	142,1	314	41,6	175
	Nenndrehmoment ( $n_{MN}$ )	1100	2420	319,7	1512	61,9	1275
	Nenndrehzahl ( $n_N$ )	1600	3520	465	3200	64,0	3797
	Abregelung ( $n_{Grenz}$ )	2200	4840	639,6	6050	61,5	10.270
Erdgas-NFZ	Leerlauf ( $n_0$ )	600	1020	126,3	287	38,4	157
	Nenndrehmoment ( $n_{MN}$ )	1100	1870	231,5	1011	54,9	711
	Nenndrehzahl ( $n_N$ )	1900	3230	400	3055	60,0	3395
	Abregelung ( $n_{Grenz}$ )	2300	3910	484,1	4486	58,5	6187

Die Leistungsaufnahme der Kühlmittelpumpe stellt neben der Lüfterleistung den direkt dem Kühlsystem zurechenbaren energetischen Beitrag zum Kraftstoffverbrauch dar. Die Pumpenleistung  $P_{KMP}$  kann mithilfe folgender Gleichung nach [182] ermittelt werden:

$$P_{KMP} = \frac{\Delta p_{KMP} \cdot \dot{V}_{KM}}{\eta_{KMP}} = \frac{\Delta p_{KMP} \cdot \eta_{KMP} \cdot n_{KMP} \cdot V_{H,KMP}}{\eta_{KMP}} \quad (5.12)$$

Hierbei ist  $\Delta p_{KMP}$  die Druckdifferenz der Pumpe zwischen Saug- und Druckseite,  $\dot{V}_{KM}$  der geförderte Kühlmittelvolumenstrom,  $\eta_{KMP}$  der Pumpenwirkungsgrad,  $n_{KMP}$  die Pumpendrehzahl und  $V_{H,KMP}$  das Hubvolumen der Pumpe. Die resultierenden Pumpenkennfelder und Kühlsystemkennlinien der beiden Referenzfahrzeuge sind bei vollständig geöffneten und geschlossenen Thermostaten in Abbildung 5.7 dargestellt. Der grau hinterlegte Bereich in den Teilabbildungen stellt das jeweilige Betriebskennfeld dar. Dies ist von der Architektur und dem Strömungswiderstand des Kühlkreislaufsystems abhängig. Die Modellierungsergebnisse der erstellten Kühlsysteme fasst Tabelle 5.1 zusammen.

#### 5.1.2.4. Bordnetz – TEG-Leistungseinspeisung

Für die Modellierung des elektrischen Bordnetzes mit Wechselwirkungen zum TEG-Systemmodell sind die Leistungseinspeisung und die optionale Energiespeicherung zu berücksichtigen. Als Modellannahme wird ein typisches Bordnetz aktueller SNFZ verwendet (s. Abbildung 2.1). Der durchschnittliche Leistungsbedarf wird nach [45] mit 1025 W angenommen.<sup>68</sup> Zu Beginn eines Fahr Szenarios, d. h. zum Zeitpunkt  $t_0$ , wird ein minimaler Ladezustand (engl. *State of Charge*, SOC) des Akkumulators von 20 % der Nennspannung unterstellt.<sup>69</sup>

Für die Auslegung und gesamtsystemische Bewertung des TEG-Systems ist eine 1D-Simulationsmethode zur Abbildung der zeitabhängigen Leistungs- und

<sup>68</sup>Basiert auf dem VECTO-Standarddatensatz für NFZ der EURO VI-Abgasnorm und wurde bei Fahrzeuguntersuchungen experimentell bestätigt. Der mittlere Leistungsbedarf kann je nach Anwendungs- und Einsatzszenario stark variieren und liegt z. B. nach [34, 183] bei rund 630 W.

<sup>69</sup>Annahme eines typischen Betriebsszenarios, bei dem die Entladung durch den Fahrzeugnutzer erfolgt, bevor der Betrieb am Folgetag wieder aufgenommen wird.

Energiebilanzierung ausreichend. Eine Integrationsvariante in die Bordnetzarchitektur der Referenzfahrzeuge ist in Teilabbildung 5.8 (a) dargestellt. Der TEG wird in Form der elektrisch verschalteten Module, einschließlich der erforderlichen *Maximum-Power-Point-Tracker* (MPPT, dt. Maximale-Leistungspunkt-Sucher) und der Gleichspannungswandler (engl. *Direct Current*, DC und Bezeichnung als DC/DC-Wandler) als weiterer elektrischer Erzeuger in die bestehende Parallelschaltung integriert. Als eine Hauptfunktion soll die gewandelte Leistung des TEG-Systems den elektrischen Generator des Fahrzeuges entlasten.

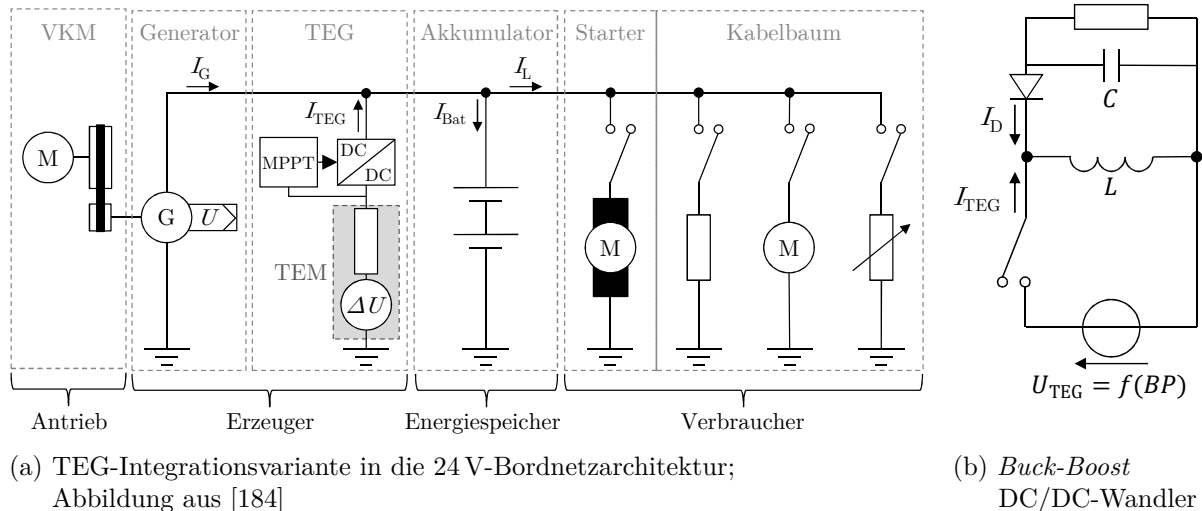


Abbildung 5.8.: Schematische Darstellung der TEG-Integration in die NFZ-Bordnetzarchitektur

### Elektrischer Generator (Lichtmaschine)

Die Leistungsbilanz eines elektrischen Generators lässt sich anhand der erforderlichen VKM-Antriebsleistung  $P_{An}$  einerseits sowie der gewandelte Abgabeleistung in Form des Generatorstroms  $I_G$  und der Ladespannung  $U_G$  andererseits formulieren:

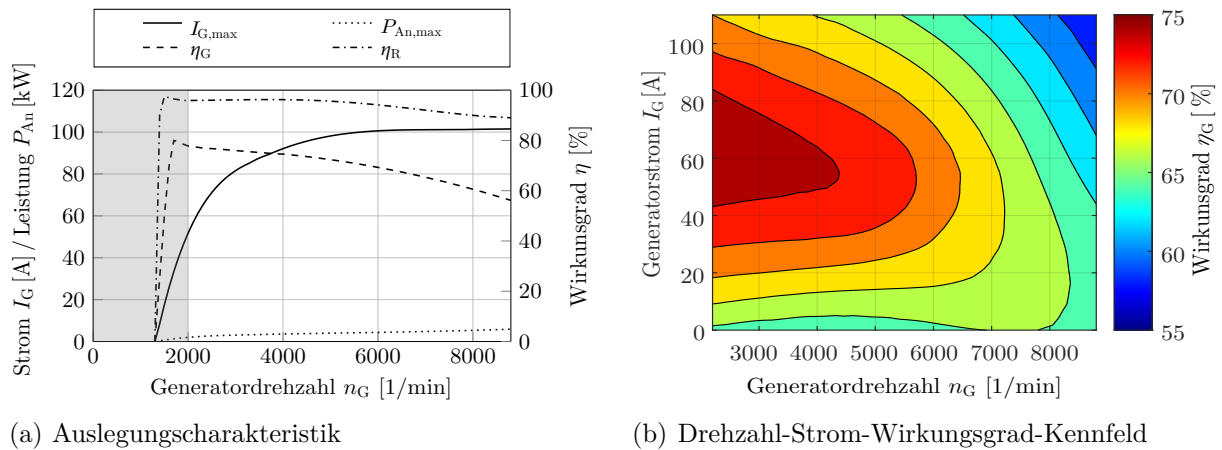
$$P_{An} = \frac{I_G \cdot U_G}{\eta_G \cdot \eta_R} \quad (5.13)$$

Die Wirkungsgrade des Generators  $\eta_G$  und des Rientriebs  $\eta_R$  stellen die Umwandlungsverluste dar. Das Ergebnis der Generatormodellierung in Anlehnung an [41, 183] wird beispielhaft für das Diesel-NFZ in Abbildung 5.9 dargestellt. Die charakteristischen Kenngrößen der Generatorauslegung sind in Form des maximalen Generatorstroms ( $I_{G,max}$ ), der maximal erforderlichen Antriebsleistung ( $P_{An,max}$ ) und der Wirkungsgrade ( $\eta_G$ ;  $\eta_R$ ; vgl. [41, 185]) über der Generatordrehzahl  $n_G$  in Teilabbildung (a) dargestellt. Grau hinterlegt ist der irrelevante Betriebsbereich unterhalb der Leerlaufdrehzahl der VKM. Unter anderem wird der Nennstrom des Generators nach [145] mit 100 A bei einer Drehzahl von 6000 1/min und der maximale Wirkungsgrad mit 77 % bei 2000 1/min angenommen. Das resultierende Wirkungsgradkennfeld des Generators wird in Teilabbildung (b) illustriert. Die ermittelten Korrelationen werden in der Gesamtsystem-



simulation berücksichtigt (s. Abschnitt 5.2.4). Bei der Modellierung des Erdgas-NFZ wird nach [181] unter anderem ein Nennstrom von 90 A angenommen.

Der Wirkungsgrad des Generators hat einen großen Einfluss auf die Bilanzierung an der Antriebswelle und auf die Änderung des Kraftstoffverbrauchs (s. Gleichung 5.5). Im Allgemeinen gilt: Je höher der angenommene Wirkungsgrad des Generators ist, desto geringer ist die Kraftstoffreduktion aufgrund der Entlastung des Generators durch den TEG. Die getroffenen Annahmen sind als konservativ zu bewerten. Beispielsweise wird in der Arbeit von [129] ein maximaler Generatorwirkungsgrad von 60 % oder nach [183] von 70 % für Diesel-NFZ angenommen. Inwieweit der Generator durch einen TEG ersetzt werden kann, wird im weiteren Verlauf der Arbeit erläutert (s. Abschnitt 8.3.5).



(a) Auslegungsscharakteristik

(b) Drehzahl-Strom-Wirkungsgrad-Kennfeld

Abbildung 5.9.: Modellierung des elektrischen Generators am Beispiel des Diesel-NFZ

### Akkumulator (Batterie)

Die Modellierung des Akkumulators basiert auf der Berechnung des zeitabhängigen Ladezustands  $SOC$  im jeweiligen Fahrprofil nach folgender Gleichung:

$$SOC(t) = \frac{Q|_{t_0} + \int_{t_0}^t I_{\text{Bat}} \cdot dt}{C_N} = SOC_{t_0} + \frac{1}{C_N} \cdot \int_{t_0}^t I_{\text{Bat}} \cdot dt \quad (5.14)$$

Hierbei stellt  $Q$  die Ladungsmenge,  $I_{\text{Bat}}$  den Lade- bzw. Entladestrom und  $C_N$  die Nennkapazität dar. Die jeweilige Nennkapazität der beiden Referenzfahrzeuge ist Tabelle B.1 des Anhangs zu entnehmen. Als Randbedingungen wird bei der Modellierung ein minimaler und maximaler  $SOC$  definiert ( $SOC(t) \in [0,2; 0,9]$ ). Der temperaturabhängige Wirkungsgrad beim Laden und Entladen ( $\eta_{\text{Bat,ein}} = \eta_{\text{Bat,aus}}$ ) des Akkumulators wird nach [29] mit 81 % bei Umgebungstemperatur angenommen.<sup>70</sup> Zudem sind typische Restriktionen zum Beispiel bezüglich des maximalen Entladestroms berücksichtigt worden. Dieser lässt sich anhand der Leerlaufspannung  $V_0$ , der Leistung  $P_{\text{Bat}}$

<sup>70</sup>Reduktionen des Wirkungsgrads und der Leistungsfähigkeit z.B. aufgrund der Historie der Batterienutzung und Alterung werden vernachlässigt.

und des Innenwiderstands  $R_i$  der Batterie wie folgt berechnen:

$$I_{\text{Bat}}(t) = \frac{V_0^2(SOC(t)) - 4 \cdot P_{\text{Bat}}(t) \cdot R_i(SOC(t))}{2 \cdot R_i(SOC(t))} \quad (5.15)$$

### 5.1.3. Gesamtbetriebskosten

Die Wirtschaftlichkeit eines NFZ hat bei seiner Entwicklung höchste Priorität (vgl. [6]). Alle anfallenden Kostenarten, von den Anschaffungskosten, über die Betriebskosten (z. B. Energiekosten, Reparatur und Wartung) bis zu den Kosten der Wiederbeschaffung werden je nach definiertem Nutzungsszenario des Fahrzeugs in einer Gesamtbilanz der Gesamtbetriebskosten einbezogen. Die Kraftstoffkosten haben eine viel größere Bedeutung dabei als beispielsweise bei PKW (vgl. [34]). Aus diesem Grund enthält die erste Hauptzielformulierung dieser Arbeit die Kraftstoffreduktion im Realbetrieb (s. Abschnitt 3.2).

#### Zielkostenanalyse

Für die zulässigen Systemkosten, d. h. die Zielkosten, um einen wirtschaftlichen Einsatz im NFZ zu ermöglichen, konnten dem Stand der Technik keine eindeutigen Angaben entnommen werden (s. Tabelle 2.2). Als Zielwert sollten die Serienstückkosten nach [99] im Bereich von 0,45–0,93 USD/W und nach [186] bei 0,5–1,5 EUR/W liegen. Detaillierter gibt [119] den Bereich mit 0,3–1,3 USD/W für ein TEG-System in SNFZ mit einer durchschnittlichen elektrischen Ausgangsleistung von einem Kilowatt bei typischen Lastpunkten als zielführend an. Die Ergebnisse der Arbeiten des Standes der Technik prognostizieren jedoch TEG-Stückkosten von über 3 EUR/W (vgl. z. B. [103, 119, 187]). Dies liegt um den Faktor 6 über den Kosten der Zielsetzung dieser Arbeit (s. Abschnitt 3.2) und verdeutlicht die Notwendigkeit dieser Arbeit.

Für eine Grobabschätzung der Zielkosten der TEG-Systeme dieser Arbeit werden anwendungsspezifische Kennfelder in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung, dem Kraftstoffverbrauch und optional dem Harnstoffverbrauch (s. Tabelle 4.1) sowie deren Nettokosten hergeleitet. Die Ergebnisse der Zielkostenanalyse sind unter den getroffenen Annahmen (s. Tabelle 5.2 und 4.1) für Kraftstoffreduktionen im Bereich von 1–5 % in Abbildung 5.10 angegeben. Bereiche mit einer Amortisationszeit größer als 2 Jahre sind grau und größer als 3 Jahre sind dunkelgrau hinterlegt. In dieser Arbeit soll sich das TEG-System bereits in der typischen NFZ-Einsatzdauer von fünf Jahren beim Erstkunden in weniger als drei Jahren amortisieren (vgl. z. B. [34, 187]). Für das Diesel-NFZ sind Stückkosten von bis zu 1030 EUR für eine Kraftstoffreduzierung von 1 % oder bis zu 5150 EUR für 5 % beispielsweise bei einer Amortisationszeit von 2 Jahren zielführend. Für das Erdgas-NFZ liegt die entsprechende Kostenspanne mit 750–3740 EUR etwas niedriger, da von geringeren Kraftstoffkosten ausgegangen wird. Ökonomische Gewinnspannen der Lieferanten und Hersteller werden nicht

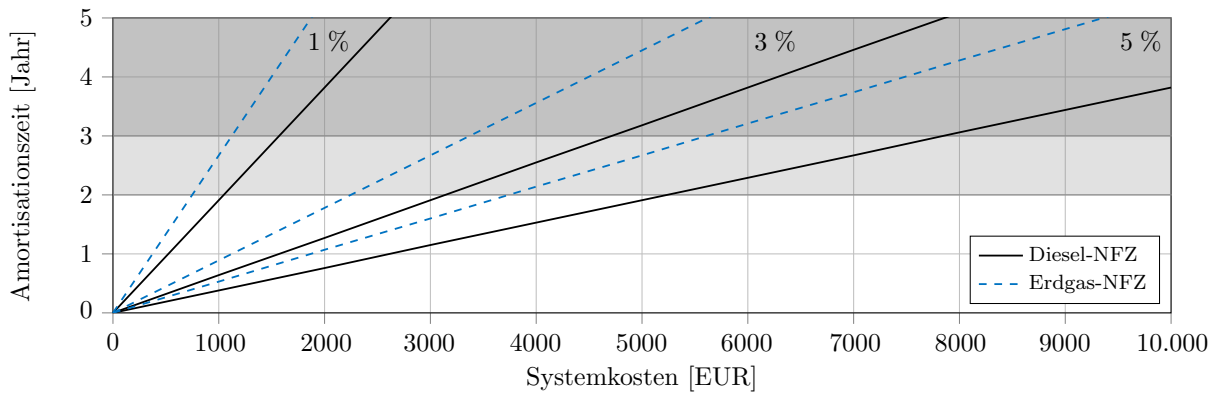


Abbildung 5.10.: Zielkostenanalyse für TEG-Systeme im Diesel- und Erdgas-NFZ (LNG), Abbildung i. A. a. [34] (Kraftstoff- und Harnstoffkosten s. Basisszenario)

berücksichtigt. Mit Hilfe der gewählten Methode zur Berechnung der Kraftstoffreduktion aus Abschnitt 5.1.1 (s. Gleichung 5.5) kann unter der Annahme von Mittelwerten für den Generatorwirkungsgrad, Fahrzeuggeschwindigkeit und Proportionalitätskonstante die erforderliche mittlere TEG-Leistung geschätzt werden. Daraus lassen sich spezifische Angaben zu den zulässigen Systemkosten dieser Arbeit von weniger als 0,5 EUR/W ableiten, was bei der Formulierung der Hauptziele berücksichtigt wurde (s. Abschnitt 3.2). Darüber hinaus werden die ermittelten Zielkostenbereiche für die wirtschaftliche Bewertung der Lösungsvarianten im TEG-Entwicklungsprozess zur Unterstützung des Auswahlprozesses verwendet (s. Abschnitt 6.4).

### Basisszenario

Als Grundlage für die Bewertung und um einen Vergleich mit dem Stand der Technik zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit ein sogenanntes Basisszenario definiert. Die betrachtete Fahrzeugkategorie sind SNFZ der EG-Fahrzeugklasse N3. Der Fahrzeugeinsatz der untersuchten Sattelzugmaschinen wird im Fernverkehr angenommen (vgl. [45]). Weitere wesentliche Annahmen der Transportanforderungen, die in der folgenden Modellierung als Kalkulationsdaten verwendet werden, sind in Anlehnung an [5, 6, 188, 189] in Tabelle 5.2 aufgeführt. Der Kraftstoff- und optional der Harnstoffverbrauch sowie die gravimetrische Auslastung sind den Angaben der Betriebspunkte bzw. der dynamischen

Tabelle 5.2.: Kalkulationsdaten des definierten Basisszenario der betrachteten NFZ-Anwendungen

Bezeichnung	Einheit	Zugmaschine	Auflieger
Betriebsstunden pro Jahr	[Stunden/Jahr]	2160	2160
Einsatztage pro Jahr	[Tage/Jahr]	240	240
Nutzungsdauer	[Jahr]	5	10
Jahreslaufleistung	[Tkm/Jahr]	150	150
Kalkulatorische Gesamtlauflistung	[Tkm]	750	1500
Autobahnanteil (allgemein)	[%]	85	85
Mautstreckenanteil (allgemein)	[%]	90	90
Wartungsintervalle	[Tkm]	100	100
Reifenlaufleistung Achse 1 / 2 / 3	[Tkm]	150 / 180 / -	250 / 250 / 250

Fahrprofile zu entnehmen. Die Nettokosten für Dieselkraftstoff werden mit 0,98 EUR/l, für Harnstoff mit 0,35 EUR/l und für flüssiges Erdgas in Form von LNG mit 0,77 EUR/kg angenommen (vgl. [5]).

### Modellierung der Gesamtbetriebskosten

Vereinfacht lassen sich die TCO nach [190] formulieren anhand der Anschaffungskosten  $K_{AK}$ , den Betriebskosten  $K_{BK}$  und dem erwarteten Wiederverkaufswert  $W$ :

$$TCO = K_{AK} - \underbrace{\frac{\delta_W(T_N)}{1}}_{= \frac{1}{(1+i)^{T_N}}} \cdot W + \underbrace{\frac{\delta_{BK}(T_N)}{1}}_{= \sum_{t=0}^{T_N} \frac{1}{(1+i)^t}} \cdot K_{BK} \quad (5.16)$$

Da die tatsächlichen Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, erfolgt die Diskontierung<sup>71</sup> zum Zeitpunkt der Fahrzeuganschaffung. Nach dem *Net Present Value-Ansatz* lassen sich die Diskontierungsfaktoren für den Wiederverkaufswert  $\delta_W$  und die Betriebskosten  $\delta_{BK}$  ermitteln. Dazu ist der Verrechnungszinssatz  $i$  und die Nutzungsdauer  $T_N$  erforderlich.

Für die TCO-Kalkulation ist keine verbindliche Vorschrift oder Norm bekannt (vgl. [191]), sodass ein eigenes generisches Modell basierend auf Arbeiten des Standes der Technik von [6, 188, 189, 192] entwickelt wird.<sup>72</sup> Eine Übersicht der grundsätzlichen Struktur des TCO-Modells ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Gesamtbetriebskosten setzen sich aus den variablen und fixen Kostenarten sowie jeweils enthaltenen allgemeinen Kostenanteilen zusammen. Die berücksichtigten Kostenstellen des Modells sind Abbildung D.4 im Anhang zu entnehmen.

Das Modell besitzt eine hohe Flexibilität, um sich an geänderte Transportanforderungen anzupassen, wie z. B. Anpassung der Nutzungsdauer oder der Jahreslaufleistung. Als Besonderheit werden antriebspezifische Kostenstellen, wie z. B. Kraftstoffverbrauch,

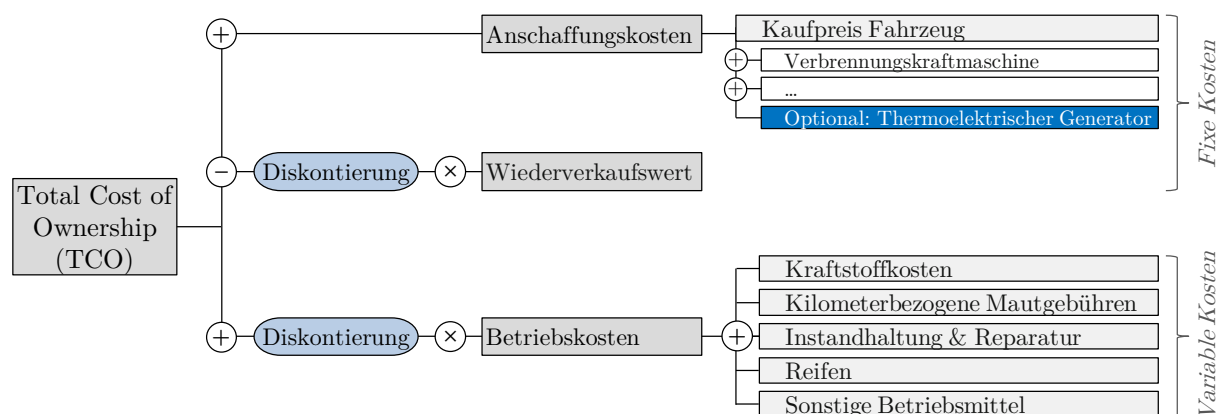


Abbildung 5.11.: Kostenstruktur der TCO-Berechnung; Darstellung i. A. a. [190, 192]

<sup>71</sup>Abzinsung, d. h. gegenwärtige Wertermittlung von (zukünftigen) Zahlungen.

<sup>72</sup>Das **TCO-Modell** ist als eigenständiges Microsoft Excel-Tool zur Analyse und Kalkulation von unterschiedlichen NFZ-Einsatzszenarien und -Antriebssträngen verwendbar.

Kaufpreis, Wiederverkaufswert<sup>73</sup> und -beschaffungswert, Steuern sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt (vgl. bspw. [190]). Das Modell wurde unter anderem mit TCO-Berechnungen von [24, 25] der deutschen Prüfgesellschaft Dekra und öffentlich verfügbaren Modellen von NFZ-Herstellern validiert.

Die ermittelten Gesamtbetriebskostenstrukturen für das Diesel-NFZ und das Erdgas-NFZ sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Die zugrundeliegenden Werte sind Tabelle D.1 im Anhang zu entnehmen. Bei der TCO-Modellierung werden 50 % der kalkulatorischen Abschreibungen als variable Kosten angesetzt. Zudem wird ein Zinssatz von 7 %, der Anteil von sonstigen Betriebsmitteln mit 1,5 %, die Verwaltungskosten mit 10 % und der Wagniszuschlag mit 2 % angenommen. Unter Berücksichtigung des Basisszenario (s. Tabelle 5.2) liegen die TCO pro Jahr bei beiden Referenzanwendungen bei rund 187 TEUR. Die Kostenanteile für Fahrpersonal und Kraftstoff einschließlich Betriebsmittel dominieren die Kostenstruktur bei der angenommenen Jahresfahrleistung. Für das Erdgas-NFZ ist der Anteil für die Abschreibungen mit 18 % höher als für das Diesel-NFZ mit 12 %. Dies ist auf die Annahmen höherer Anschaffungskosten und gleichzeitig eines geringeren relativen Wiederverkaufswerts sowie höherer Wartungs- und Reparaturkosten zurückzuführen. Der Kostenanteil für Kraftstoff ist mit 20 % jedoch 9 Prozentpunkte geringer. Die seit dem Jahr 2019 in Deutschland geltende befristete Mautbefreiung für erdgas- und elektrisch betriebene NFZ ist nicht berücksichtigt. Der Mautanteil beträgt 8 Prozent der Kostenstruktur.

Bei Erdgas-NFZ ist in Zukunft mit einer deutlichen Senkung der Anschaffungskosten zu rechnen, da die Technologie noch nicht ausgereift ist und die Stückzahlen im Vergleich zu Diesel-NFZ noch gering sind aber jährlich ansteigen (vgl. [35]). Die beiden ausgewählten Anwendungsszenarien stellen die aktuell wirtschaftlichsten Alternativen dar (vgl. [146]).

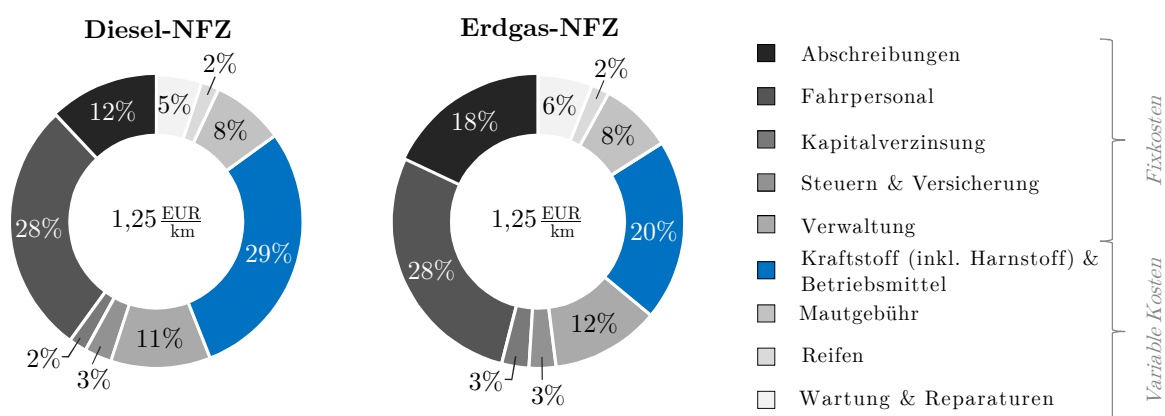


Abbildung 5.12.: TCO-Kostenstruktur von Sattelzügen mit Diesel- und Erdgasmotor (Kraftstoff LNG) sowie einer jährlichen Fahrleistung von 150 Tkm

<sup>73</sup>Schätzungen wurden auf der Grundlage von Recherchen zu den aktuellen Wiederverkaufswerten vorgenommen. Die Datenlage für innovative Erdgas-NFZ ist noch sehr begrenzt.

### Amortisation

Sind die TCO bei TEG-Systemintegration ( $TCO_{\text{TEG}}$ ) niedriger als die des Referenzfahrzeuges ohne Integration ( $TCO_{\text{Ref}}$ ) kann eine Amortisationszeit ermittelt werden.

$$\Delta TCO_i = TCO_{\text{TEG}(i)} - TCO_{\text{Ref}(i)} \text{ mit } i = (\text{Diesel-NFZ, Erdgas-NFZ, ...}) \quad (5.17)$$

Die Amortisation wird zum Zeitpunkt erreicht, an dem die Gewinne (bzw. Einsparungen in Form der Kraftstoffreduktion) und die Absetzungen für Abnutzung (AFA, bzw. Abschreibungen) des Systems deren Kosten deckt. In dieser Arbeit wird die statische Amortisationsrechnung anhand von Durchschnittswerten als Berechnungsverfahren verwendet. Die Amortisationszeit  $t_A$  wird für das TEG-System wie folgt formuliert:

$$t_{A(\text{TEG})} = \frac{K_{\text{TEG}} - W_{\text{TEG}}}{g + afa_{\text{TEG}}} \quad (5.18)$$

Berücksichtigt werden die TEG-Systemkosten  $K_{\text{TEG}}$ , der Rest- bzw. Wiederverkaufswert des Systems nach der Nutzungsdauer  $W_{\text{TEG}}$ , der jährliche Gewinn  $g$  und die systemanteiligen jährlichen Abschreibungen  $afa_{\text{TEG}}$ .

Mit Hilfe der Kennzahl der Amortisationszeit kann im weiteren Verlauf der Arbeit eine Bewertung der entwickelten TEG-Systeme und ein Vergleich mit konkurrierenden Abwärmenutzungssystemen vorgenommen werden (s. Abschnitt 8.5.2).

## 5.2. Modellbildung des Thermoelektrischen Generatorsystems

Die folgenden Inhalte sind der Betrachtungsebene des ‚Systems‘ der übergeordneten Vorgehensweise dieser Arbeit zuzuordnen (s. Abbildung 3.1).

### 5.2.1. Funktionsstruktur und Betriebsstrategie

Ein Thermoelektrischer Generator umfasst sämtliche Komponenten, wie z. B. Wärmeübertrager, die für die Wärmezuführung und -abführung erforderlich sind. Für die Nutzung der elektrischen Leistung der thermoelektrischen Module sind temperaturfeste Kabel und Steckverbindungen sowie eine Einhausung der Module notwendig, um diese vor Oxidation zu schützen. Die Stromstärke der TEM ist abhängig von der Energie der Wärmequelle und den vorherrschenden Temperaturniveaus auf der heißen und kalten Seite. Für die Fahrzeuganwendung ist ein Gleichspannungswandler und eine Leistungselektronik zur Einspeisung in das Bordnetz erforderlich.

Um einen Überblick über den Funktionsumfang des TEG-Systems zu erhalten, ist eine Funktionsstruktur in Blockdarstellung in Abbildung D.1 im Anhang illustriert. Die Funktion des Schutzes der Module vor thermischer Überhitzung und die Bypassfunktion sind nicht Bestandteil der Darstellung, da diese nicht den Regelbetrieb charakterisieren.

Die Nutzung des Bypasses wird für kritische Betriebspunkte vorgesehen, um die Module vor Überhitzung zu schützen, und sofern dies zur Effizienzsteigerung des Gesamtfahrzeugs beiträgt. Die Einspeisung der Leistung des TEG erfolgt im Niederspannungsbordnetz. Soweit die Ausgangsleistung geringer ist als der aktuelle Bedarf der elektrischen Verbraucher wird der Fahrzeuggenerator entsprechend entlastet oder durch den TEG ersetzt. Andernfalls wird die Überschussleistung im Akkumulator bis zum Erreichen des maximalen SOC gespeichert.

### 5.2.2. Thermoelektrische Modellbeschreibung und -annahmen

Die Energiebilanz eines TEG kann vereinfacht in Anlehnung an Gleichung 5.7 zur VKM beschrieben werden als:

$$\frac{dE}{dt} = 0 = \dot{m}_{AG} \cdot (h_{AG,ein} - h_{AG,aus}) + \dot{m}_{KM} \cdot (h_{KM,ein} - h_{KM,aus}) - P_{el} - \dot{Q}_U \quad (5.19)$$

In der Gleichung stellen  $\dot{m}_{AG}$  und  $\dot{m}_{KM}$  die Abgas- und Kühlmittelmassenströme dar,  $h_{AG}$  und  $h_{KM}$  sind die entsprechenden spezifischen Enthalpien. Die elektrische Leistung wird durch  $P_{el}$  und die an die Umgebung abgegebene Wärme als  $\dot{Q}_U$  beschrieben.

Die (infinitesimale) Änderung der spezifischen Enthalpie  $h(T, p)$  lässt sich aus den messbaren sensiblen Größen Temperatur  $T$  und Druck  $p$ , unter der Annahme eines geschlossenen thermodynamischen Systems im Gleichgewicht ohne chemische Reaktionen, wie folgt bestimmen (vgl. [157]):

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \cdot dp \quad (5.20)$$

Die erste partielle Ableitung entspricht der isobaren Wärmekapazität<sup>74</sup>  $c_p$  multipliziert mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ . Bei kleinen Druckänderungen bzw. unter Annahme von isobaren Prozessen kann die zweite partielle Ableitung gleich Null gesetzt werden ( $dp = 0$ ). Die Änderung der spezifischen Enthalpie  $\Delta h$  ergibt sich damit vereinfacht zu:

$$\Delta h = c_p|_{T_1}^{T_2} \cdot \Delta T \quad (5.21)$$

Der verfügbare Wärmestrom  $\dot{Q}$  für ein TEG-System lässt sich durch Multiplikation des Massenstroms  $\dot{m}$  und der Änderung der spezifischen Enthalpie  $\Delta h$  ermitteln:

$$\dot{Q} = \Delta \dot{H} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (5.22)$$

<sup>74</sup>In dieser Arbeit wird vereinfacht die mittlere isobare Wärmekapazität ( $\bar{c}_p$ ) mit der Trapezmethode als Näherungslösung bestimmt.

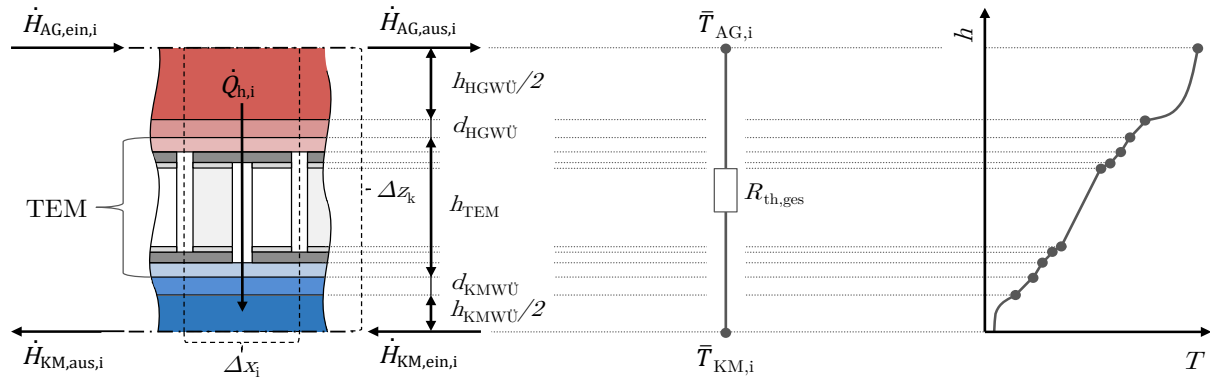


Abbildung 5.13.: Thermodynamische Betrachtungsweise der TEG-Auslegung anhand der auftretenden Temperaturniveaus, Abb. i. A. a. [71]

Der Carnot-Wirkungsgrad (s. Gleichung 2.11) begrenzt die Umwandlung von thermischer Energie in die höhere elektrische Energieform. Den wandelbaren Energieanteil der thermischen Energie wird als Exergie und der nicht umwandelbare Anteil als Anergie bezeichnet. Im Allgemeinen setzt sich der Exergiestrom aus der Enthalpie- und Entropiedifferenz des Stoffstroms bezogen auf einen Referenzzustand zusammen. In dieser Arbeit sind das die Umgebungszustände  $(h_U, T_U, s_U)$ . Unter Vernachlässigung der kinetischen und potenziellen Energie erfolgt die Berechnung des mit einem Fluidstrom transportierten Exergiestroms  $\dot{E}_{(F)}$  nach [28, 157]:

$$\underbrace{\dot{E}_{(F)}}_{\text{Exergiestrom}} = \underbrace{\dot{H} - \dot{H}_U}_{\text{verfügbare Wärmeleistung}} - \underbrace{T_U \cdot (\dot{S} - \dot{S}_U)}_{\text{Anergiestrom}} \quad (5.23)$$

$$= \dot{m} \cdot [h - h_U - T_U \cdot (s - s_U)] \quad (5.24)$$

Wird der Exergiestrom hingegen über einen Wärmestrom nach Gleichung 5.22 zugeführt, lässt er sich mit Hilfe des Carnot-Wirkungsgrades  $\eta_c$  bestimmen:

$$\dot{E}_{(\dot{Q})} = \eta_c \cdot \dot{Q} \quad \text{mit} \quad \eta_c = 1 - \frac{T_U}{T_{m, \log}} \quad (5.25)$$

Die Entwicklung eines TEG ohne Berücksichtigung des Gesamtfahrzeuges stellt in erster Linie eine thermodynamische Problemstellung dar. Im Schwerpunkt gilt es, die Komponenten Wärmeübertrager und Modul in Form des thermischen Gesamtwiderstands ( $R_{\text{th, ges}}$ , s. Gleichung 2.15) auszulegen. Dies ist vereinfacht in Abbildung 5.13 illustriert. Der Gesamtwiderstand stellt die Wärmewiderstände der einzelnen Komponenten des TEG-Systems dar. Für die Ermittlung der auftretenden Wärmeströme ist eine qualitative Vorstellung der vorliegenden Temperaturniveaus im Aufbau erforderlich. In dieser Arbeit wird die Betriebsweise der TEM ausschließlich als Generator untersucht<sup>75</sup>, d. h. Nutzung des Seebeck-Effekts. Dabei wird eine elektrische

<sup>75</sup>Alternativ kann ein TEM auch als Wärmepumpe betrieben werden (vgl. bspw. [71]), z. B. um die Module vor Überhitzung zu schützen. Dies ist jedoch aufgrund des geringen Wirkungsgrades für diese



Spannung erzeugt, sofern am Modul eine äußere Temperaturdifferenz anliegt. Bei geschlossenem externem Stromkreis und Lastwiderstand erfolgt ein Stromfluss. Die höchste bzw. niedrigste Temperatur wird hierbei an der jeweiligen Oberfläche der Isolatorschicht des TEM verzeichnet, wie in der Abbildung ersichtlich, abhängig von der Wärmequelle bzw. -senke.

### Analytische Modellbeschreibung zur Grobauslegung von TEG

Da eine singuläre Betrachtung des Wärmeübertragers und des thermoelektrischen Moduls nicht zielführend ist (vgl. [72, 118]) werden beide Komponenten als Teilsystem anhand ihrer Wechselwirkungen beschrieben. Im Allgemeinen wird für die WÜ-Berechnung der Wärmeübergangskoeffizient  $k$  berücksichtigt (s. Abschnitt 2.3.2.7). Für die Modulauslegungen dieser Arbeit wird darüber hinaus der flächenspezifische thermische Widerstand  $r_{th}$  verwendet (s. Gleichung 2.15; vgl. z. B. [72]). Der global gemittelte Wärmeübergangskoeffizient kann zum Beispiel für einen Plattenwärmeübertrager unter der Annahme gleicher WÜ-Flächen auf der Heiß- und Kaltseite ( $A_h = A_k$ ) wie folgt bestimmt werden:

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_{F11}} + R_{f1} + R_W + \frac{1}{\alpha_{F12}} + R_{f2} \right)^{-1} \quad (5.26)$$

Hierbei stellen  $\alpha_{F11}$  und  $\alpha_{F12}$  die Wärmeübergangskoeffizienten des jeweiligen Fluides dar. Die Foulingwiderstände<sup>76</sup>  $R_{f1}$  und  $R_{f2}$  treten an der gekühlten und beheizten Fläche auf und  $R_W$  stellt den Wärmeleitwiderstand der Wandung dar. Dieser ist definiert als Quotient von Schicht- bzw. Wanddicke zur spezifischen Wärmeleitfähigkeit der Wandung. Beispielsweise besteht bei der TEG-Stapelbauweise die Schicht aus HGWÜ-Rohr, TEM, KMWÜ-Rohr und dazwischenliegenden thermischen Kontaktierungen (s. Tabelle 2.3). Eine überschlägige Auslegung kann anhand der sogenannten Wärmeübertrager-Hauptgleichung erfolgen (vgl. [113, 193]):

$$\dot{Q}_h = k \cdot A \cdot \underbrace{\vartheta_m}_{\approx \frac{1}{A} \cdot \int_A (\vartheta_h - \vartheta_k)^* \cdot dA} \approx k \cdot A \cdot \underbrace{T_{m,\log}}_{= \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}} \quad (5.27)$$

Der zwischen den Medien übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}_h$  kann nach [113] anhand der mittleren Temperaturdifferenz  $\vartheta_m$  ermittelt werden. Hierbei stellt  $(\vartheta_h - \vartheta_k)^*$  eine hypothetische lokale Temperaturdifferenz zwischen dem heißen (h) und kalten (k) Stoffstrom dar. Als Näherungslösung kann die thermodynamische Mitteltemperatur  $T_{m,\log}$  verwendet werden.

---

Arbeit nicht relevant.

<sup>76</sup>Der Prozess der Ablagerungsbildung wird als Fouling und der durch die Ablagerung verursachte zusätzliche oder additive Wärmewiderstand wird als Foulingwiderstand bezeichnet (vgl. z. B. [113]).

Für die thermodynamische Grobauslegung von WÜ für TEG sind somit neben den verfügbaren Temperaturen der Stoffströme als Randbedingungen, die geometrischen Abmessungen der WÜ und der Module sowie die Werkstoffeigenschaften von Bedeutung. Neben der thermischen Auslegung ist der elektrischen Auslegung der Module besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Bei geöffnetem Stromkreis lässt sich die sogenannte Leerlaufspannung  $U_0$  nach Gleichung 2.3 näherungsweise als Produkt aus dem mittleren Seebeck-Koeffizienten  $\bar{\alpha}_{n,p}$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ermitteln. Im Falle eines geschlossenen Stromkreises kann diese zudem anhand des Stromflusses  $I$ , des äußeren Lastwiderstandes  $R_L$  und dem Innenwiderstand  $R_i$  des oder der Module berechnet werden:

$$U_0 = \bar{\alpha}_{n,p} \cdot \Delta T = I \cdot (R_L + R_i) \quad (5.28)$$

Der Stromfluss kann bestimmt werden durch die Umformung von Gleichung 5.28 als:

$$I = \frac{\bar{\alpha}_{p,n} \cdot \Delta T}{(R_L + R_i)} \quad (5.29)$$

Der Kurzschlussstrom  $I_K$  lässt sich aus der Gleichung unter der Annahme  $R_L = 0$  ermitteln. Die am Lastwiderstand generierte Leistung  $P_{el}$  kann mithilfe des Stromflusses aus Gleichung 5.29 und durch die Umstellung von Gleichung 2.9 bestimmt werden:

$$P_{el} = I^2 \cdot R_L = \eta_{TEM} \cdot \dot{Q}_h \quad (5.30)$$

Der abzuführende Wärmestrom  $\dot{Q}_k$ , d. h. die abzuführende Wärme an die Wärmesenke, ergibt sich anhand des zugeführten heißseitigen Wärmestroms  $\dot{Q}_h$ , der parasitären Verlustwärmeströme  $\dot{Q}_{TEG,para}$  und der erzeugten elektrischen Leistung als:

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_h - \dot{Q}_{TEG,para} - P_{el} \quad (5.31)$$

Parasitäre Wärmeströme sind jene Wärmeströme im TEG, die nicht durch die Schenkel der Module von der Wärmequelle des Abgases zur Wärmesenke im Kühlmittel fließen, sondern z. B. über das Gehäuse geleitet werden. Die Berücksichtigung des thermischen Widerstands der parasitären Wärmeströme ( $R_{th,TEM,para}$ ) wird anhand des thermischen Ersatzschaltbildes für ein Schenkelpaar eines Moduls veranschaulicht in Abbildung D.2 im Anhang. Zudem sind die thermischen Widerstände aufgeführt die im Rahmen der Modulauslegung und bei der Modellierung des TEG berücksichtigt werden.

### Analytische Leistungs- und Wirkungsgradberechnung

Die elektrische Generatorleistung  $P_{TEG}$  ist das Produkt aus dem Wirkungsgrad der Leistungselektronik  $\eta_{LE}$  und der elektrischen Leistung der Module nach Gleichung 5.30:

$$P_{TEG} = \underbrace{\eta_{LE}}_{=\eta_{DC/DC} \cdot \eta_{MPPT}} \cdot P_{el} \quad (5.32)$$

Der Wirkungsgrad der Leistungselektronik hängt von der gewählten Verschaltung der Module und der Auslegung der elektrischen Komponenten ab. Die Wirkungsgrade vom DC/DC-Wandler  $\eta_{\text{DC/DC}}$  und vom MPPT  $\eta_{\text{MPPT}}$  sind daher entscheidend. Der TEG-Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{\text{TEG}}$  ist das Produkt aus dem thermoelektrischem Wirkungsgrad  $\eta_{\text{TEM}}$  nach Gleichung 2.9 und dem Wirkungsgrad der Leistungselektronik:

$$\eta_{\text{TEG}} = \eta_{\text{TEM}} \cdot \eta_{\text{LE}} \quad (5.33)$$

Um die Effizienz von TEG-Systemen zu bewerten und mit anderen Prozessen zur Abwärmennutzung vergleichen zu können wird der effektive TEG-Wirkungsgrad  $\eta_{e,\text{TEG}}$  im Sinne des Verhältnisses von Nutzen und Aufwand definiert:

$$\eta_{e,\text{TEG}} = \frac{P_{\text{TEG}}}{\dot{Q}_{\text{AG,ein}}} \quad (5.34)$$

Dabei wird der Quotient aus der gewandelten elektrischen TEG-Leistung nach Gleichung 5.32 und dem verfügbaren Abgaswärmestrom  $\dot{Q}_{\text{AG,ein}}$  ermittelt. Bei der Berücksichtigung von dynamischen Fahrprofilen wird die mittlere Leistung  $\bar{P}_{\text{TEG}}$  im Zeitintervall  $T=[t_1, t_2]$  bestimmt als:

$$\bar{P}_{\text{TEG}} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{TEG}}(t) \cdot dt \quad (5.35)$$

Die vom TEG-System geleistete Arbeit  $W_{\text{TEG}}$  kann als Integral der Leistung nach Gleichung 5.32 über das Zeitintervall ermittelt werden:

$$W_{\text{TEG}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{TEG}}(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} (\eta_{\text{LE}}(t) \cdot U(t) \cdot I(t)) \cdot dt \quad (5.36)$$

Der Anteil der parasitären Verluste des TEG-Systems  $\epsilon_{\text{TEG,para}}$  beschreibt das Verhältnis der parasitären Wärmeströme  $\dot{Q}_{\text{para}}$  nach Umstellung von Gleichung 5.31 zum zugeführten abgasseitigen Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{AG,ein}}$ :

$$\epsilon_{\text{TEG,para}} = \frac{\dot{Q}_{\text{para}}}{\dot{Q}_{\text{AG,ein}}} = \frac{\Delta\dot{H}_{\text{AG}} - \Delta\dot{H}_{\text{KM}} - P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{AG,ein}}} \quad (5.37)$$

Die Differenzen werden unter Verwendung der jeweiligen Eingangs- und Ausgangsenthalpieströme als  $\Delta\dot{H}_{\text{AG}} = \dot{H}_{\text{AG,ein}} - \dot{H}_{\text{AG,aus}}$  und  $\Delta\dot{H}_{\text{KM}} = \dot{H}_{\text{KM,ein}} - \dot{H}_{\text{KM,aus}}$  gebildet.

### 5.2.3. Generische Modelle

Zur ganzheitlichen Auslegung und Bewertung unterschiedlicher TEG-Systeme ist die generische Modellierung des Systemgewichts, -bauraums und der -kosten erforderlich. Dem Stand der Technik sind spezifische (Teil-)Modellierungen bekannt (vgl. z. B. [72, 99, 194–199]). Es sind jedoch eigene Modelle erforderlich, da bei den bekannten Modellen einschränkende Annahmen hinsichtlich der Modelltiefe und -breite getroffen wurden, welche die Variantenvielfalt der Bauweisen und Komponenten sowie die Skaleneffekte dieser Arbeit nicht abbilden. Es werden analytische Modelle auf der Grundlage von Microsoft Excel einschließlich der Verwendung der skriptorientierten Programmiersprache *Visual Basic for Applications* (VBA) entwickelt.

Weitere generische Modelle wurden beispielsweise für die Fahrzeugwechselwirkungen beschrieben (s. Abschnitt 5.1.2) und werden bei der Modellbildung der Komponenten, wie z. B. für die Wärmeübertrager (s. Abschnitt 5.3.1), im Rahmen des TEG-Entwicklungsprozesses erarbeitet.

#### Modellierung des TEG-Gewichts und -Bauraums

Die generische Gewichtsrechnung ist erforderlich, um diese bei der Längsdynamiksimulation zu berücksichtigen (vgl. z. B. [32, 72]), z. B. zur Bestimmung der Fahrwiderstände als Teil der gesamtsystemischen Bewertung, oder als Nutzlastreduktion der NFZ anzugeben. Die generische Bauraumberechnung ist notwendig, um den Lösungsraum aufgrund der unterschiedlichen Restriktionen der Einbaupositionen im Fahrzeug einzugrenzen. Darüber hinaus lassen sich anhand der Ergebnisse die monetären Integrationskosten zum Beispiel in der AGN abschätzen.

Das Modell basiert auf werkstoffspezifischen und geometrischen Parametern als Eingangsgrößen. Es berechnet auf der Grundlage einer Vielzahl von Abhängigkeiten die Materialmengen, Bauteilgewichte, Abmessungen und die elektrische Nennleistung, um das Gewicht und damit die Kosten zu ermitteln. Zudem werden zahlreiche Varianten der Komponenten berücksichtigt, wie z. B. unterschiedliche innere Strukturen und Werkstoffe für die Wärmeübertrager, verschiedene Modulbauweisen und TE-Materialien. Um die Vielzahl von Parameterkombinationen zu reduzieren, werden konstruktive Restriktionen und Fertigungsnormen berücksichtigt. Beispielsweise sollte nach [200] der Öffnungswinkel eines Diffusors und Konfusors einer Abgasanlage  $30^\circ$  nicht überschreiten. Die implementierte Auslegungslogik ermittelt auf Basis der Eingangsgrößen die Modulfläche und die erforderliche Anzahl der Wärmeübertrager. Zusätzlich erfolgt eine Grobauslegung auf der Grundlage der zulässigen Biegeverformung der Deckelstrukturen und der Gewindebolzen des Verspannkongzeptes (vgl. [72]). Zudem stellt das Modell bei Vorgabe von diskreten äußeren Modulabmessungen die Umsetzbarkeit sicher. Die Validierung des Modells erfolgt durch das Wiegen von Komponenten der Funktionsmuster in Kapitel 7.

### Modellierung der TEG-Kosten

Die generische Kostenmodellierung ist notwendig, um die wirtschaftliche Bewertung bei Annahme einer Serienproduktion unterschiedlicher TEG-Designs zu ermöglichen. Es stellt ein unabhängiges Modell dar, das auf denselben Eingangsgrößen wie das zuvor beschriebene Gewichts- und Bauraummodell basiert. Im Rahmen der ganzheitlichen Gesamtsystemsimulation wird es jedoch diesem nachgelagert. Im Modell werden Rohstoff-, Material-, Fertigungs- und Herstellungskosten sowie Skaleneffekte berücksichtigt. Als Kostenbeiträge werden die thermoelektrischen Module (vgl. z. B. [194, 196, 197]) und die TEG-Komponenten: Wärmeübertrager, thermische Kontaktierung, Gehäuse, Bypass, Leistungselektronik und Kosten für die Fahrzeugintegration, wie z. B. zusätzliche Kühlmittelschläuche detailliert ermittelt (vgl. [72, 99, 198, 199]). Die berücksichtigten (Haupt-)Kostenbeiträge sind den dargestellten Kostenaufteilungen der TEG-Ergebnisdesigns in Abbildung D.5 im Anhang zu entnehmen. Bei den Angaben handelt es sich um Abschätzungen der Nettokosten ohne Gewinnspannen, die auf öffentlich zugänglichen Quellen und Expertenbefragungen basieren und trotz der detaillierten Vorgehensweise mit Unsicherheiten behaftet sind (vgl. [34]).

Die Kostenschätzungen erfolgen für folgende diskrete Stückzahlenszenarios: Kleinserienfertigung mit 1000 Stück, Großserienfertigung mit 30.000 Stück und Massenfertigung mit 150.000 Stück pro Jahr (vgl. [99]). Für das Basisszenario dieser Arbeit (s. Abschnitt 5.1.3) wird eine Großserienfertigung angenommen.<sup>77</sup> Für Erdgas-NFZ sind solch hohe Stückzahlen noch nicht Realität (vgl. [142]), jedoch dient die Annahme als Basis für den Vergleich der Anwendungsszenarien.

Der Einfluss von unterschiedlichen Stückzahlen wird nach der Produktionstheorie mithilfe von Skaleneffekten und der betriebswissenschaftlichen Lernkurventheorie berücksichtigt. Spezifische Lernkurvenfunktionen stellen den Zusammenhang zwischen den Herstellungskosten eines Produkts und der kumulierten Produktionsmenge nach [201, 202] über folgende Beziehung her:

$$K_2 = K_1 \cdot \left( \frac{Q_{\text{kum}2}}{Q_{\text{kum}1}} \right)^{-\lambda} \quad (5.38)$$

Dabei stellen  $Q_{\text{kum}}$  die kumulierte Produktionsmenge (1 bzw. 2),  $K$  die jeweiligen Stückkosten und  $\lambda$  den Degressionsfaktor der Lernkurve dar. Letztgenannter berechnet sich mithilfe der technologiespezifischen Lernrate  $l$ :

$$\lambda = -\frac{\log(l)}{\log(2)} \quad (5.39)$$

<sup>77</sup>Dies entspricht in etwa der aktuellen Fertigungsstückzahl von schweren Diesel-NFZ eines kleinen NFZ-Herstellers oder der Stückzahl einer Fertigungslinie eines großen Herstellerwerks in Europa.

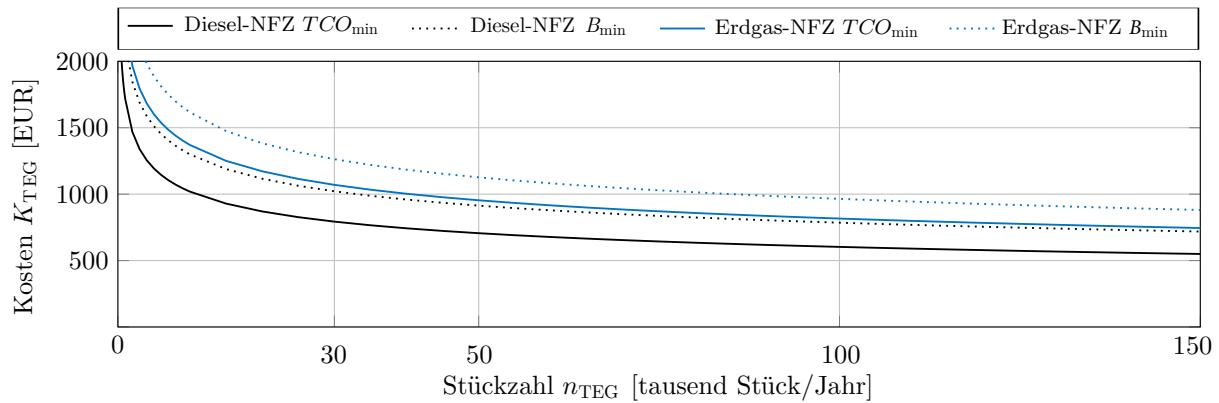


Abbildung 5.14.: Kostenentwicklung bei unterschiedlichen Stückzahlenszenarios der TEG-Ergebnisdesigns unter der Annahme einer Serienproduktion von 30.000 Stück pro Jahr

Für das TE-Material sowie die weiteren Komponenten der Module wird eine Lernrate von 87 %, für Komponenten der Wärmeübertrager von 84 %, für die Leistungselektronik nach [202] von 81 % und für Edelstahl von 75 % angenommen. Sofern nicht anders angegeben, stammen die Daten aus Experteninterviews mit Komponentenherstellern. Die Kosten ( $K_1$ ) der entsprechenden Ausgangsstückzahlen ( $Q_{kum1}$ ) sind nach Herstellerangaben ermittelt worden, z. B. für die Module beim Lieferanten Thermalforce [203]. Die Kostenentwicklung bei unterschiedlichen Stückzahlen werden in Abbildung 5.14 für beispielhafte TEG-Ergebnisdesigns mit Bezeichnung  $TCO_{min}$ , d. h. unter der Zielsetzung minimaler Gesamtbetriebskosten, und  $B_{min}$ , d. h. unter der Zielsetzung eines minimalen Kraftstoffverbrauchs, für das Diesel- und Erdgas-NFZ (s. Abschnitt 8.2) unter der Annahme einer Ausgangsstückzahl von zehn dargestellt.

Das Modell wurde anhand der Arbeiten des Standes der Technik von [72, 99] validiert. Die Kosten sind rund 10 % höher als von [72] und 50 % höher als von [99] angegeben. Das vorgestellte Modell kann somit als konservativ bezeichnet werden.

#### 5.2.4. Ganzheitliche Gesamtsystemsimulation

In dieser Arbeit werden insbesondere thermodynamische, thermoelektrische, thermomechanische und betriebswirtschaftliche Aspekte im Gesamtfahrzeug einschließlich sämtlicher Fahrzeugwechselwirkungen untersucht und bewertet. Darüber hinaus werden strömungsmechanische, elektrische, thermische und mechanische Aspekte bei der Systementwicklung berücksichtigt.

In Arbeiten des Standes der Technik hat es sich als vorteilhaft und effizient erwiesen, die Komplexität der Problemstellung in Teilaspekte und -funktionen zu unterteilen (vgl. z. B. [32, 34, 72]). Die thermodynamischen und thermoelektrischen Aspekte werden beispielsweise gemeinsam in einer Modellierungsumgebung abgebildet, da die relevanten physikalischen Größen Wärme bzw. Temperatur und Elektrizität stark miteinander wechselwirken (s. Abschnitt 2.3.2). Die betriebswirtschaftlichen Aspekte stellen zumeist Restriktionen für die physikalischen und ingenieurwissenschaftlichen Auslegungsaspekte

dar und besitzen gegenläufige Optima, was eine Mehrzieloptimierung erforderlich erscheinen lässt. Die thermomechanischen Aspekte werden unabhängig zu den weiteren Aspekten in einer thermomechanischen 2D- und 3D-Modellumgebung mithilfe der FEM abgebildet. Dies reduziert die Komplexität der Gesamtsystems simulation.

Eine spezifisch ausgerichtete Simulationsumgebung soll die effiziente Lösungsfindung des optimalen TEG-Ergebnisdesigns ermöglichen. Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, Teilsimulationen in einer übergeordneten Gesamtsystems simulation zu koppeln (vgl. bspw. [34, 72]). Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Simulation der Fahrzeugwechselwirkungen, zur Wirtschaftlichkeit und des TEG, u. a. anhand von Simulationsumgebungen zur Wärmeübertrager- und Modulauslegung, in einer Umgebung erfolgt und alle Parameter in der Optimierung berücksichtigt werden können. Für die Entwicklung, die zielgerichtete Auslegung und Dimensionierung hat es sich zudem als sinnvoll erwiesen, Simulationsumgebungen mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden einzusetzen (vgl. bspw. [71, 167]). Diese Vorgehensweise ermöglicht zum einen die zeiteffiziente Simulation des Gesamtsystems und zum anderen detaillierte Analysen von Komponenten und Sensitivitätsuntersuchungen einzelner Variablen auf Teilsystemebene. Aus diesem Grund kommen zwei virtuelle Modellumgebungen zur Auslegung von TEG-Systemen in dieser Arbeit aufgrund ihrer Spezifikationen, des Detaillierungsgrades und der Rechenzeit bedarfsgerecht zum Einsatz:

- **Modellumgebung für stationäre Randbedingungen und Detailauslegungen**
  - Quasi-3D-CFD Simulation des TEG (WÜ, TEM und thermische Kontaktierung)
  - CFD-Simulationsumgebung mit Kopplung von analytischen und multiphysikalischen FEM-Modellen sowie multikriterieller Parameteroptimierung
  - Einsatz: (lokale) Auslegung auf Teilsystem- oder Komponentenebene
  - Simulationszeit: länger als Echtzeit
  - Softwareprodukte: *Ansys Fluent*<sup>78</sup> Kopplung mit *Ansys FEM*<sup>78</sup>, *UDF* und *optiSLang*<sup>79</sup>
- **Modellumgebung für kontinuierliche dynamische Fahrprofile**
  - 0D-/ 1D-Simulation der Fahrzeugteilsysteme, insbesondere des Kühlsystems; Kopplung weiterer Teilmodelle wie z. B. des TEG-Modells
  - Quasi-2D-Simulation vom TEG (WÜ, TEM und thermische Kontaktierung)
  - Hierarchische und physikalische Mehrdomänen-Modellumgebung; Systemabbildung durch Kopplung einzelner Teilmodellumgebungen und multikriterielle Parameteroptimierung
  - Einsatz: (globale) ganzheitliche TEG-Auslegung auf Ebene des Gesamtfahrzeugs
  - Simulationszeit: kürzer als Echtzeit
  - Softwareprodukte: *Matlab*<sup>80</sup>, *Simulink*<sup>80</sup> und *Simscape*<sup>80</sup>

<sup>78</sup>Softwareprodukte des Unternehmens Ansys; verwendete Version V19R3.

<sup>79</sup>CAE-Software des Unternehmens Ansys für fachübergreifende Aufgaben wie bspw. der Optimierungen.

<sup>80</sup>Softwareprodukte des Unternehmens MathWorks; verwendete Version V19b.

### Modellumgebung für stationäre Randbedingungen und Detailauslegungen

Die Vorteile des hohen Detaillierungs- und Genauigkeitsgrades der CFD-Simulation werden für die Analyse und Auslegung der Teilsysteme und Komponenten genutzt, z. B. für die Wärmeübertrager (s. Abschnitt 5.3.1). Darüber hinaus werden Betriebskennfelder für die weitere Gesamtsystemsimulation mit geringerem Detaillierungsgrad abgeleitet.

Bei der Untersuchung von langzeitigen Fahrprofilen ( $\geq 1800$  s) sowie von verschiedenen TEG-Bauweisen und der Variantenbewertung einzelner Teilsysteme und Komponenten wird in dieser Arbeit die weitere Gesamtsystemsimulation verwendet. Der Rechenaufwand der dynamischen CFD-Simulation ist unter Berücksichtigung von Fahrzeugwechselwirkungen hierfür ineffizient (vgl. [72]). CFD-Simulationsansätze für die Untersuchung verschiedener TEG-Bauweisen und Wärmeübertrager sind dem Stand der Technik bekannt (vgl. [204–207]), jedoch erfolgt die Bewertung nur auf Teilsystem- oder Komponentenebene.

### Modellumgebung für kontinuierliche dynamische Fahrprofile

Für die Erfüllung der Zielsetzung dieser Arbeit ist eine Modellumgebung erforderlich, welche die eingangs erwähnten interdisziplinären Forschungsaspekte des TEG-Systems einschließlich der Fahrzeugwechselwirkungen abbilden kann. Der Ablauf der entwickelten ganzheitlichen Gesamtsystemsimulation wird in Abbildung 5.15 dargestellt.

Als Ausgangspunkt wird ein Einsatzszenario, u. a. Fahrprofil, festgelegt. Im Anschluss erfolgt die simultane Optimierung des TEM und des TEG, d. h. im Schwerpunkt die Optimierung der thermoelektrischen Module bei gleichzeitiger thermodynamischer und strömungsmechanischer Optimierung der Wärmeübertrager. Diese Vorgehensweise hat sich z. B. nach [72, 118] als vorteilhaft und essentiell für hocheffiziente TEG-Systeme erwiesen.

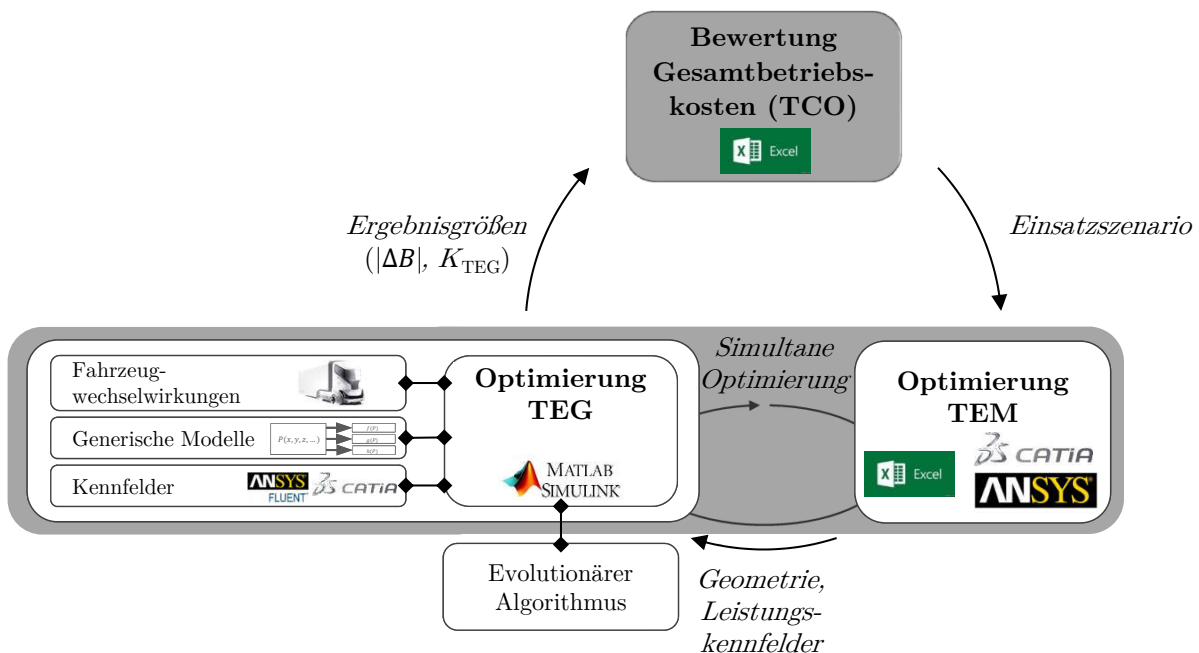


Abbildung 5.15.: Allgemeine Vorgehensweise der ganzheitlichen TEG-Gesamtsystemsimulation



**Optimierung des TEM:** Diese erfolgt in detaillierten multiphysikalischen FEM-Simulationen der thermoelektrischen Module. Anhand der Ergebnisse werden analytische Korrelationen in Form von Kennfeldern für die elektrische Ausgangsleistung, den Wirkungsgrad und den thermischen Widerstand abgeleitet und bei der TEG-Optimierung verwendet. Nach der Festlegung von diskreten geometrischen Modulabmessungen erfolgt zudem im weiteren Verlauf des simulativen Vorgehens die Optimierung von Modulverschaltungen.

**Optimierung des TEG:** Diese stellt den Schwerpunkt der Gesamtsystems simulation dar. Das TEG-System wird mithilfe mehrerer physikalischer Teilmodelle in einer hierarchisch strukturierten Mehrdomänen-Modellumgebung mit der Simulationssoftware Matlab Simulink abgebildet (vgl. [136]). Als Eingangsgrößen dienen Randbedingungen aus durchgeführten Fahrzeuguntersuchungen (s. Kapitel 4). Ein Gesamtfahrzeugmodell einschließlich der Modellierung des Luft- und Kraftstoffpfads der VKM sowie der weiteren Fahrzeugteilsysteme (vgl. z.B. [34, 173, 208]) erschien zu komplex für die Aufgabenstellung. Lediglich das Kühlsystem wird im Detail als numerisches 1D-Simulationsmodell dargestellt (s. Abschnitt 5.1.2.3). Die verfügbare Wärmekapazität des Kühlsystems und der zusätzliche Lüfterbetrieb konnten insbesondere bei dynamischen Fahrprofilen nicht einfacher abgebildet werden. Weitere Teilmodelle der Fahrzeugwechselwirkungen (s. Abschnitt 5.1.2), generische Modelle des Gewichts, des Bauraums und der Kosten des TEG (s. Abschnitt 5.2.3) sowie Kennfelder, z. B. von den Wärmeübertragern (s. Abschnitt 5.3.1), werden zu einer Simulationsumgebung gekoppelt. Für die Lösung des Mehrzieloptimierungsproblems existieren verschiedene Algorithmen (vgl. [209]). Der evolutionäre Algorithmus<sup>81</sup> wurde als der am effizientesten für die vorliegende komplexe Problemstellung ausgewählt. Das Vorgehen des Algorithmus wird in Abbildung D.16 im Anhang illustriert.

**Bewertung der Gesamtbetriebskosten:** Anhand der ermittelten Ergebnisgrößen des TEG-Systems erfolgt im letzten Schritt der Gesamtsystems simulation die Bewertung mithilfe des TCO-Modells (s. Abschnitt 5.1.3). Mit Hilfe der Kraftstoffreduktion ( $|\Delta B|$ ) und der TEG-Systemkosten ( $K_{\text{TEG}}$ ) eines TEG-Ergebnisdesigns wird die Amortisationszeit bestimmt und die Erfüllung der Zielsetzungen dieser Arbeit überprüft.

### 5.2.5. Mehrzieloptimierung

Wie im vorangegangenen Abschnitt 5.2.4 zur Gesamtsystems simulation beschrieben, ist eine Mehrzieloptimierung erforderlich, um die Kosten-Nutzen-Relation zu optimieren (vgl. [60, 72]). Die beiden Hauptzielgrößen, Kraftstoffreduktion und Systemkosten, gilt es unter Berücksichtigung mehrerer Nebenzielgrößen zu optimieren (s. Tabelle D.3 im Anhang). Mit Hilfe einer Gewichtung der Zielgrößen sollen

<sup>81</sup>Natural analoges Optimierungsverfahren; Lösungskandidaten werden für ein bestimmtes Problem künstlich evolviert.

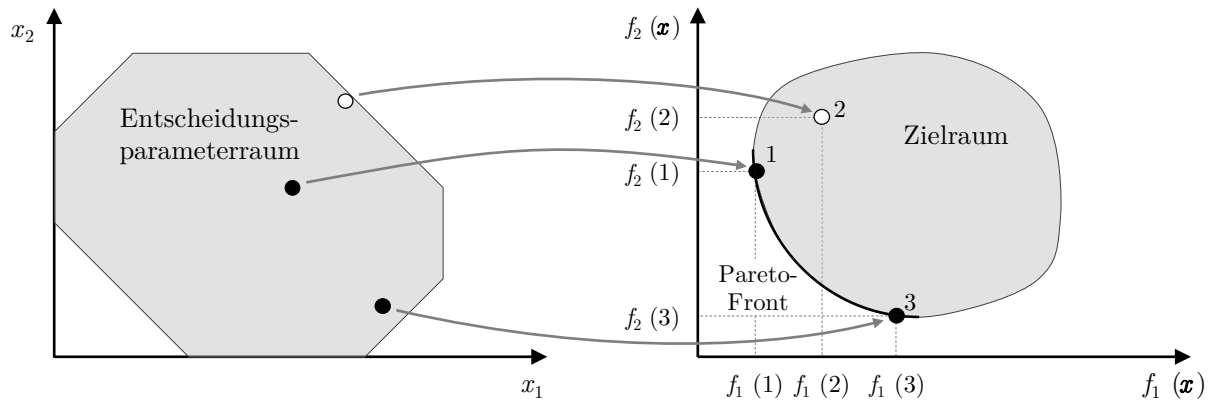


Abbildung 5.16.: Entscheidungsparameterraum ( $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ ) (links) und Zielraum ( $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1, f_2)$ ) für Pareto-optimale Lösungen (rechts), Abbildung i. A. a. [60, 210]

Auslegungen der TEG-Systeme erreicht werden, die gute Ergebnisse für unterschiedliche NFZ-Einsatzszenarien ermöglichen.

In Arbeiten des Standes der Technik wurde die Optimierung von TEG-Systemen hauptsächlich durch eine sukzessive Vorgehensweise durchgeführt (vgl. z. B. [32, 167]). Bei komplexen Problemstellungen mit vielen Eingangsparametern ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass nur das lokale Optimum und nicht das globale Optimum des gesamten Lösungsraumes gefunden wurde (vgl. [72]). Die Aufgabe der multikriteriellen Optimierung dieser Arbeit ist es daher, die Zielfunktionen unter Berücksichtigung mehrerer Ergebnisgrößen zu lösen. Die Ziele der Funktionen sind zumindest teilweise widersprüchlich, wie das Beispiel der Maximierung der Kraftstoffreduktion bei gleichzeitiger Minimierung der Systemkosten zeigt.

Im Optimierungsmodell werden nach [210] die Zielfunktionen und Nebenbedingungen mathematisch formuliert sowie die Entwurfparameter festgelegt. Die Problemstellung der Mehrzieloptimierung wird im Allgemeinen formuliert anhand von  $n$  Entscheidungsvariablen  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  und  $k$  Zielfunktionen  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))$ , die unter Berücksichtigung von  $m$  Nebenbedingungen  $g(\mathbf{x})$  minimiert (oder maximiert) werden:

$$\begin{cases} \min f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ mit } i = 1, 2, \dots, k \\ \text{unter der Annahme: } g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \text{ mit } j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (5.40)$$

Ein Optimierungsalgorithmus löst das definierte Minimierungsproblem. Bei der Mehrzieloptimierung sind häufig Kompromisse zwischen einzelnen Zielen erforderlich. Die gleichzeitige Optimierung der Zielfunktionen und die Ermittlung einer einzigen optimalen Lösung ist zumeist nicht möglich. Im Sinne der **Optimierung von Pareto** gibt es eine Reihe von Pareto-optimalen Lösungen, bei denen jede Zielfunktion nur dann verbessert werden kann, wenn keine andere Zielfunktion dafür verschlechtert wird. Ein Beispiel für Pareto-optimale Lösungen mit zwei Entwurfsvariablen im Entscheidungsparameterraum und zwei Zielfunktionen ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

Durch den Zielfunktionsvektor  $f(\boldsymbol{x})$  werden die Parameter im beschränkten Entwurfsraum, dem sogenannten Entscheidungsparameterraum, in den Raum der Zielfunktionen, dem sogenannten Zielraum, abgebildet. Alle Pareto-dominanten Parametervektoren formen die Pareto-Menge und die zugehörigen Zielfunktionen bilden die sogenannte Pareto-Front. Unterstützt durch weitere Untersuchungen bzw. anhand der Nebenzielgrößen muss sich der Anwender für eine der gleichwertigen potentiellen Lösungskandidaten entscheiden.

## 5.3. Modellbildung der Komponenten

Als Zielsetzung sollen generische Modelle und Korrelationen für die Ermittlung von Kennfeldern der Komponenten mit Gültigkeit im gesamten Lösungsraum der betrachteten Anwendungsszenarien abgeleitet werden. Diese werden für die TEG-Auslegung in der Gesamtsystemsimulation berücksichtigt (s. Abschnitt 5.2.4). Die folgenden Inhalte sind der Betrachtungsebene der ‚Komponenten und Werkstoffe‘ der übergeordneten Vorgehensweise dieser Arbeit zuzuordnen (s. Abbildung 3.1).

### 5.3.1. Wärmeübertrager

Zur Berechnung von Wärmeübertragern sind unterschiedliche Methoden bekannt (vgl. z. B. [113]), die sich unter anderem in der Komplexität, im Rechenaufwand und in der Genauigkeit unterscheiden. Vergleichsweise einfache analytische Betrachtungsweisen wie in Abschnitt 5.2.2 beschreiben (vgl. z. B. [117]) sind zu unpräzise, um die komplexe Problemstellung bei der TEG-Entwicklung zu lösen. Modelle, die auf empirisch belegten thermodynamischen Korrelationen beruhen sind genauer und werden für die untersuchten geraden (vgl. [117, 211]) und versetzten blechbasierten Rippenstrukturen (vgl. [212]) berücksichtigt. Da deren Vorhersagefähigkeit maßgeblich von der Anzahl der experimentell untersuchten Rippengeometrien abhängt (vgl. [213]) und nur für stationäre Betriebspunkte Gültigkeit besitzen, sind diese nicht ausreichend (vgl. [214]). Für die Bewertung und den Vergleich verschiedener WÜ-Strukturen ist der Einsatz einer numerischen strömungsmechanischen CFD-Simulation mit hoher Genauigkeit notwendig.

Das Modell der multiphysikalischen CFD-Simulationsumgebung wird in Abbildung 5.17 vorgestellt. Gleichungen zur Berechnung der Wärmeübertragung, der Fluidströmungen sowie makroskopische Gleichungen werden zur Ermittlung der thermoelektrischen Effekte berücksichtigt (s. Abschnitt 2.3.2 und 5.2.4). Im Simulationsmodell wird ein KMWÜ und ein HGWÜ jeweils mit äußerer Wandung einschließlich zweier getrennter Strömungsräume abgebildet, wie in Teilabbildung 5.17 (a) zu erkennen ist. Als Eingangsgrößen des jeweiligen Fluids werden fahrzeugspezifische Randbedingungen der untersuchten TEG-Integrationspositionen für die Simulation und Auslegung der WÜ berücksichtigt. Die implementierten Eigenschaften der Stoffströme sind Abschnitt C des Anhangs zu entnehmen.

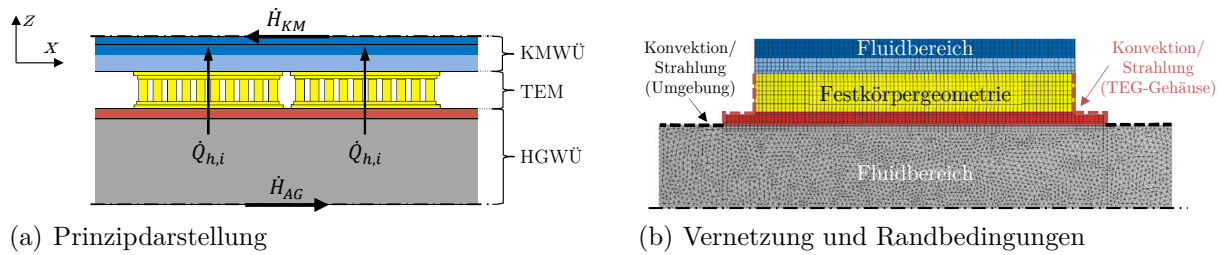


Abbildung 5.17.: Vorstellung der numerischen CFD-Simulationsumgebung; Abbildung aus [48]

Entscheidend für die Betriebscharakteristik eines Wärmeübertragers ist die innere WÜ-Struktur (vgl. [193]). Am Beispiel der Komponente HGWÜ werden die Simulationsmodelle für blechumformbasierte Rippenstrukturen, für hochporöse und topologieoptimierte Werkstoffstrukturen im Folgenden vorgestellt. Bei den Modellumgebungen werden soweit möglich geometrische Vereinfachungen vorgenommen und Symmetrien ausgenutzt, um die Rechenzeit zu reduzieren. Dies ist beispielsweise beim längenreduzierten KMWÜ in Teilabbildung 5.17 (b) zu erkennen.

### Wärmeübertrager mit blechumformbasierten Rippenstrukturen

Bei den geraden Rippenstrukturen (engl. *Plain fins*; s. Teilabbildung 5.18 (a)) handelt es sich um einfache Rippengeometrien, die nach [114] aufgrund ihres kleinen hydraulischen Radius eine erhöhte Wärmeübertragung bieten. Das Hinzufügen von Perforationen oder Löchern in der Rippenoberfläche (s. Teilabbildung 2.10 (e)) erhöht die Wärmeübertragung aufgrund der in den Lochregionen auftretenden Nachlaufmischungen. Gewellte Rippen (s. Teilabbildung 2.10 (c)) führen zu einer erhöhten Wärmeübertragung aufgrund der durch den gewellten Kanal erzeugten Sekundärströmungen. Sogenannte versetzte Rippen (engl. *Offset-strip fins*; s. Teilabbildung 5.18 (b)), *Lowered fins* und *Pin fins* (s. Teilabbildungen 2.10 (f) und (g)) bieten eine erhebliche Steigerung des Wärmeübergangs durch die Störung und das wiederholte Wachstum der laminaren Grenzschichten, gefolgt von der Dissipation in den Nachstromgebieten. Versetzte Rippen bieten nach [114] zwei- bis dreimal höhere Wärmeübergangskoeffizienten als eine gerade Rippengeometrie mit der gleichen Rippenteilung. Sobald von den geraden Rippenstrukturen abweichende geometrische Modifikationen in der CFD-Simulation berücksichtigt werden, steigen die Komplexität und der Rechenaufwand der Simulation erheblich.

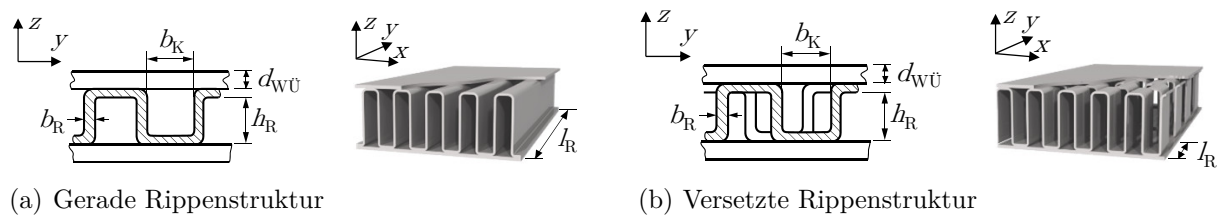


Abbildung 5.18.: Parametrisierung kompakter Wärmeübertrager mit blechumformbasierten Rippen

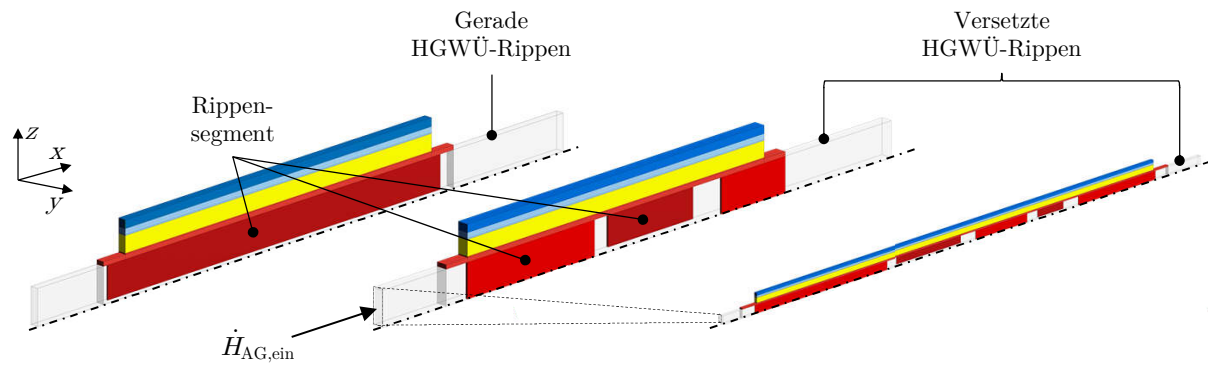


Abbildung 5.19.: Implementierung von HGWÜ-Rippenstrukturen in der CFD-Simulationsumgebung

Die Vernetzung des 3D-Modells zur Abbildung der geraden Rippenstrukturen besteht zum Beispiel aus rund 80.000 Elementen mit rund 85.000 Knoten. Das Netz ist rechen- und updatestabil konzipiert. Eine Netzstudie stellt eine netzunabhängige Lösungsfindung sicher. Am Beispiel des übertragenen Wärmestroms vom Abgas ins Kühlmittel beträgt die Abweichung des Wärmestroms weniger als 0,1 % für die doppelte Zellenanzahl und 2,4 % für die halbe Zellenanzahl im Vergleich zur Ausgangsvernetzung. Am jeweiligen Strömungseinlass der Simulation wird eine Dirichlet-Randbedingung und am jeweiligen Auslass eine Neumann-Randbedingung gewählt. Ein  $\kappa$ - $\omega$ -Modell wird verwendet, um turbulente Strömungsbereiche zu modellieren, und die Energiegleichung berücksichtigt. Zur Lösung der Problemformulierungen werden Methoden zweiter Ordnung verwendet. Konvergenz wird festgestellt, wenn das Residuum für das gesamte Modell kleiner ist als das Konvergenzkriterium (Residuen der Kontinuität  $\leq 1 \cdot 10^{-4}$  und Energie  $\leq 1 \cdot 10^{-8}$ ). Die geometrische Parametrisierung der WÜ-Strukturen mit geraden und versetzten Rippen ist beispielhaft in Abbildung 5.18 dargestellt. Deren Implementierung im HGWÜ des CFD-Simulationsmodells ist in Abbildung 5.19 illustriert. Durch die Abbildung von Rippe und Fluidbereich in y-Richtung und durch die Modellierung des Wärmestroms in der xz-Ebene ist eine 3D-Simulationsumgebung unumgänglich. Die geometrischen Freiheitsgrade bei der Rippengestaltung sind zudem am Beispiel der beiden Formvariationen der versetzten HGWÜ-Rippen Teil der Abbildung. Als versetzte Rippen sind klassische *Offset-strip fins*, d. h. stetiger Versatz und einheitliche Rippensegmentlängen sowie -abstände in x-Koordinatenrichtung, und geometrische Varianten davon durch das generische Modell abbildbar. Letztgenannte können nicht mit den bekannten Korrelationen berechnet werden.

### Wärmeübertrager mit hochporösen Werkstoffstrukturen

Hochporöse Materialien in Form von offenzelligen Metallschäumen oder Drahtgeflechten stellen Alternativen zu Rippenstrukturen dar (vgl. [32]). Nach [215] werden offenzellige Metallschäume aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche und Durchströmbarkeit, guten Wärmeübertragung und geringen Dichte in Wärmeübertragern, Katalysatoren oder Filtern verwendet. Für HGWÜ in TEG sind vielversprechende Arbeiten bekannt,

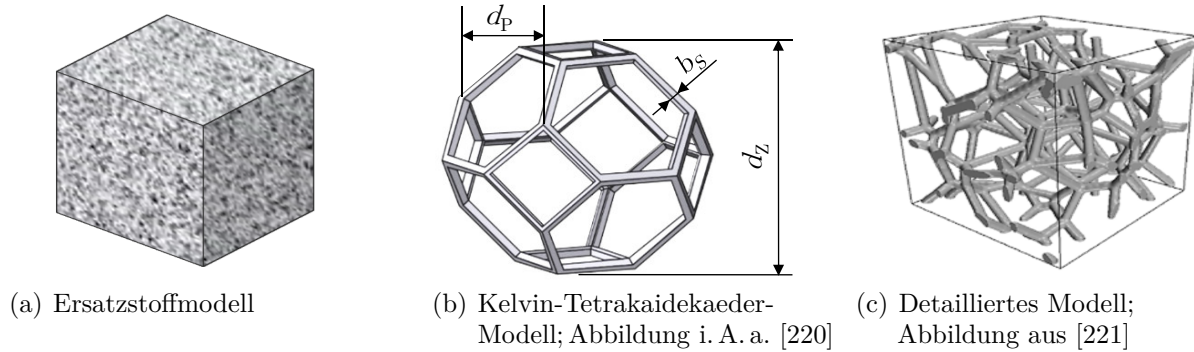


Abbildung 5.20.: Verschiedene Modellierungsansätze für offenzellige Metallschäume

die insbesondere auf höhere elektrische Bruttoleistungen im Vergleich zu geraden Rippenstrukturen hindeuten (vgl. [216–218]). Der Stand der Technik ist jedoch für die angestrebte ganzheitliche Bewertung unzureichend.

Um poröse Materialien wie eine Schaumstruktur in einer Strömungssimulation zu modellieren gibt es verschiedene Ansätze, welche in Abbildung 5.20 dargestellt sind (vgl. z. B. [219–221]). In den Teilabbildungen (a)–(c) nimmt der geometrische Detaillierungsgrad des Modellierungsansatzes und die Genauigkeit der Ergebnisse stetig zu, allerdings auf Kosten eines erheblich ansteigenden Rechenaufwandes.

Zur vorläufigen Grobauslegung lassen sich die veränderten Strömungseigenschaften, die sich durch das Schaummaterial ergeben, durch empirische Gleichungen anhand der Schaumparameter abschätzen.<sup>82</sup> Eine grundlegende Eigenschaft zur Beschreibung von Schaumstrukturen ist die Porosität  $\Phi$ , die auf dem Verhältnis von Porenvolumen  $V_P$  und Gesamtvolumen des Schaums  $V_{ges}$  basiert:

$$\Phi = \frac{V_P}{V_{ges}} \quad (5.41)$$

Um die komplexe Struktur eines offenzelligen Metallschaums zu beschreiben wird zumeist auf das Modell der Kelvin-Tetrakaidekaeder zurückgegriffen (vgl. [219, 220]). Eine Zelle des Modells ist in Teilabbildung 5.20 (b) dargestellt, hat einen mittleren Zellendurchmesser  $d_z$  und besteht aus vierzehn Flächen mit dem mittleren Porendurchmesser  $d_p$ , die durch Stege mit der mittleren Stegbreite  $b_s$  verbunden sind. Typischerweise erfolgt die Beschreibung der Zellgröße eines Schaums in *Pores per Inch* (dt. Poren pro Zoll, PPI). Nach [222] kann die Umrechnung mit folgender Gleichung erfolgen:

$$PPI = \frac{0,0254}{d_p} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \Phi}{\pi}} \quad (5.42)$$

<sup>82</sup>Ein **WÜ-Auslegungsmodell für Schaumstrukturen** ist als eigenständiges Microsoft Excel-Tool zur Auslegung und Dimensionierung von offenzelligen Schaumstrukturen entwickelt worden. Es ermöglicht die Grobauslegung und die Eigenschaftenabsicherung der multiphysikalischen Aspekte für verschiedene Anwendungen und Randbedingungen.

Die höhere Genauigkeit der mikroskopischen Ansätze aus Teilabbildung 5.20 (b) und (c) ist für ingenieurtechnische Entwicklungen zumeist nicht praktikabel (vgl. [221]). Daher wird im Folgenden der makroskopischere Ansatz des Ersatzstoffmodells aus Teilabbildung (a) für die Modellierung in dieser Arbeit verwendet. Die Modellierung beinhaltet zudem das strömungsmechanische (vgl. [223–225]), thermische (vgl. [223, 226]) und mechanische Verhalten einer Schaumstruktur (vgl. [227, 228]) einschließlich der Berechnung des Gegendruckes (vgl. [225]). Der poröse Schaum wird als Vollmaterial in Form eines Ersatzstoffmodells abgebildet und Ersatzstoffgrößen, wie z. B. das effektive E-Modul ( $E_e$ ), die effektive Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_e$ ) oder der effektive Wärmeübergangskoeffizient ( $\alpha_e$ ), hergeleitet.

Besondere Herausforderungen bei der CFD-Simulation offenzelliger Metallschäume sind die Abbildung des dem Abgas entzogenen Wärmestroms und der Wärmeleitung zum WÜ-Rohr. Nach [229] liefert die Betrachtungsmethode, bei der sich der Schaum und das Fluid im thermischen Ungleichgewicht befinden (engl. *thermal non-equilibrium*) genauere Ergebnisse. Es wird davon ausgegangen, dass der Schaum und das Fluid unterschiedliche Temperaturen haben können und z. B. Erwärmungsprozesse des Schaums berücksichtigt werden. Vereinfachte Modellannahmen der Kontakte zwischen dem Fluid, dem Schaum und dem WÜ-Rohr ermöglichen die Berechnung des Wärmestroms. Der thermische Widerstand und die Porosität des Ersatzstoffmodells sowie die Viskosität des Fluids sind Parameter mit entscheidendem Einfluss bei der WÜ-Auslegung.

### **Wärmeübertrager mit topologieoptimierten Werkstoffstrukturen**

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von additiven Fertigungsverfahren (engl. *Additive Manufacturing*, AM) mit metallischen Werkstoffen ermöglicht neuartige geometrische Freiheitsgrade bei der Ausgestaltung von Komponenten, wie z. B. Wärmeübertragern.

Bislang sind keine nennenswerten Arbeiten für WÜ in TEG bekannt. Es gibt jedoch vielversprechende Arbeiten zur allgemeinen Auslegung von Wärmesenken (vgl. [230, 231]) und Wärmeübertragern (vgl. [232, 233]) bei additiver Fertigung der Komponenten. Eine ganzheitliche Simulationsmethode, die die mechanischen, thermischen, thermodynamischen und strömungsmechanischen Randbedingungen optimiert, ist im Stand der Technik nicht bekannt. Daher ist die folgende Untersuchung erforderlich.

Die entwickelte neuartige Simulationsmethode zur Auslegung von Wärmeübertragern mit additiven Fertigungsverfahren für TEG dieser Arbeit wird in Abbildung 5.21 vorgestellt. In sukzessiven Simulationsschritten erfolgt die multikriterielle Strukturoptimierung als Erweiterung<sup>83</sup> der Arbeit von [230]. Zu Beginn erfolgt eine thermische Analyse einer repräsentativen Teilfläche bzw. eines -volumens unter den gegebenen Randbedingungen mithilfe der Simulationssoftware Ansys *Multiphysics*. Es folgt eine thermische und eine mechanische Topologieoptimierung basierend auf der Kopplung der Simulationsumgebung

---

<sup>83</sup>Der Ansatz dieser Arbeit ermöglicht die Minimierung des Bauteilgewichts und damit der Kosten als Zielfunktionen durch eine zusätzliche mechanische Topologieoptimierung.

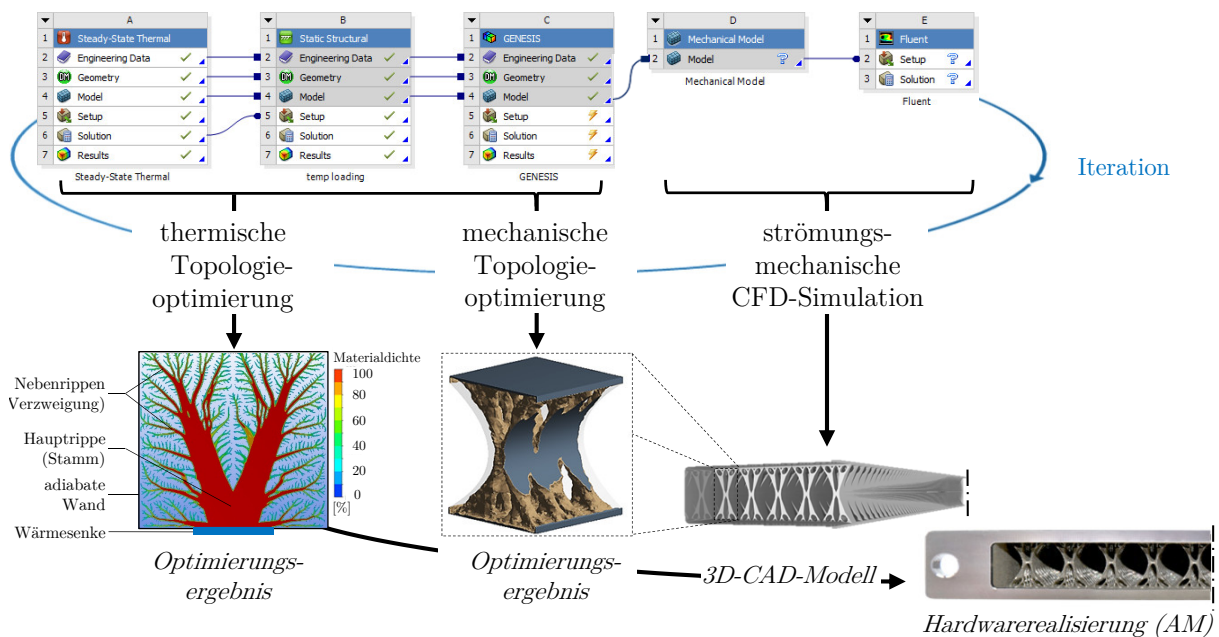


Abbildung 5.21.: Vorgehensweise zur Entwicklung von topologieoptimierten WÜ-Strukturen einschließlich der Modellierungsumgebung in der Simulationssoftware *Ansys FEM*, *Genesis* und *CFD*

mit *Ansys Genesis*. Die Ergebnisse der Optimierungen werden in ein FE-Geometriemodell überführt. Es erfolgen Geometrievereinfachungen und Glättungen der Oberflächennetze, um das Modell in einer strömungsmechanischen CFD-Simulation zu implementieren. Mit der numerischen CFD-Software *Ansys Fluent* erfolgt die Mehrzieloptimierung, wie sie für alle Wärmeübertragermodelle dieser Arbeit durchgeführt wird. Als Hauptzielsetzung wird der Wirkungsgrad maximiert bei gleichzeitiger Minimierung des Gegendrucks. Nebenziele sind zum Beispiel die Minimierung des Temperaturgradienten in der WÜ-Oberfläche und die Minimierung der Kosten.

Bei der thermischen Topologieoptimierung wird der Wärmestrom zur Wärmesenke als Zielfunktion maximiert. Das Optimierungsergebnis nach dem Prinzip der Materialverteilung, unter der Annahme einer Materialreduktion von 40%, und unter Berücksichtigung von typischen Randbedingungen ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Eine typische bionische Baumstruktur mit Verzweigungen ist erkennbar (vgl. z. B. [231]), die den Wärmestrom optimal zur Wärmesenke leitet. Dabei werden Fertigungsrestriktionen nach [234] wie Mindestwandstärken und Verzicht von freitragenden Überhängen noch nicht berücksichtigt. Um den Lösungsraum für die mechanische Topologieoptimierung zu reduzieren wird der ursprüngliche quaderförmige Bauraum auf eine konkave parabolische Rippenstruktur eingeschränkt, die sich im Zentrum des Wärmeübertragers spiegelt. Diese Rippenkontur stellt nach [193] eine bezüglich des Materialbedarfs optimale Struktur dar und ist in Teilabbildung 5.22 (a) dargestellt. Als Ergebnis der thermomechanischen FEM wird die maximale Vergleichsspannung im Verbindungssteg zwischen den Rippenkonturen unter den angenommenen Randbedingungen ( $p_{\max} = 3 \text{ MPa}$ ;  $\vartheta_{\max} = 850 \text{ °C}$ ) ersichtlich. Bei den anschließenden Topologieoptimierungen wird das Bauteilgewicht unter der



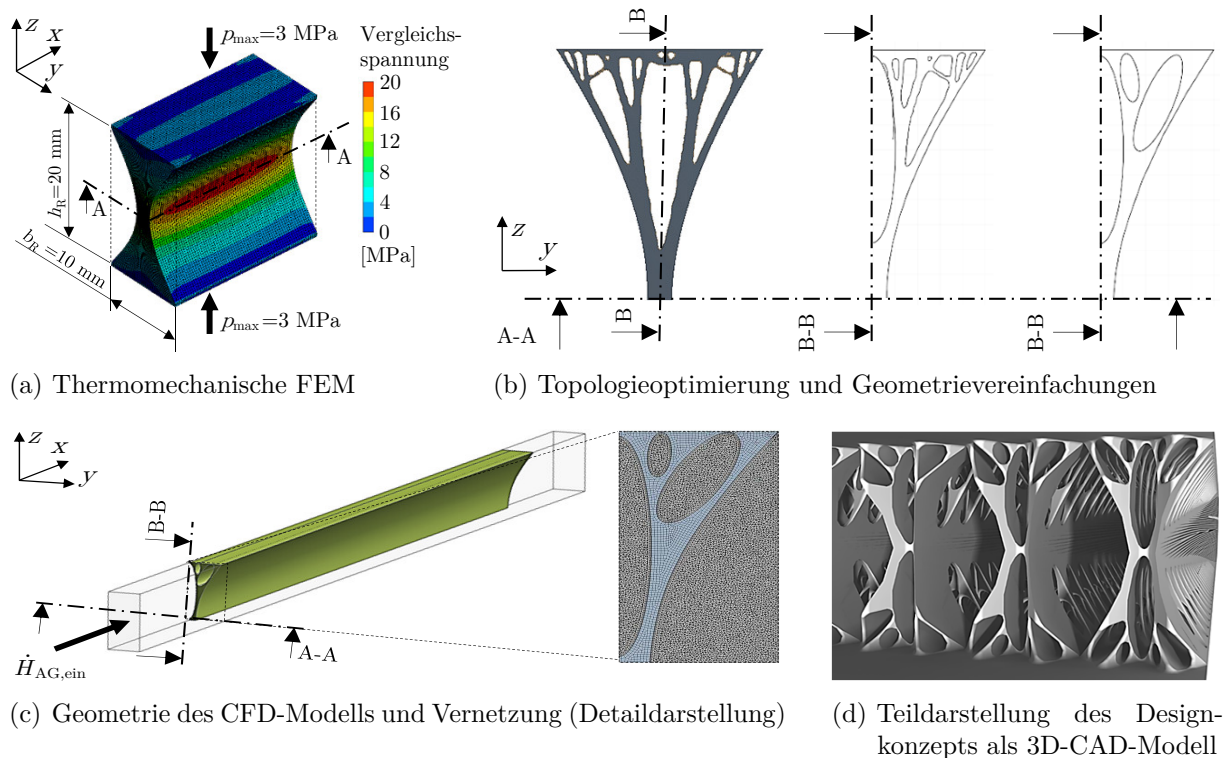


Abbildung 5.22.: Modellierungsschritte für die Entwicklung von topologieoptimierten WÜ-Strukturen

genannten Annahme und den Randbedingungen minimiert. Beispielhafte Ergebnisse der Topologieoptimierung und der schrittweisen Geometrievereinfachung sind in Teilabbildung (b) dargestellt. Das aufbereitete Geometriemodell einschließlich der Vernetzung für die CFD-Simulation ist in Teilabbildung (c) illustriert. Die topologieoptimierte WÜ-Struktur wird in ein Designkonzept als 3D-CAD-Modell überführt, wie in Teilabbildung (d) dargestellt.

### 5.3.2. Thermoelektrische Module

Für die Modellierung der thermoelektrischen Module sind unterschiedliche Modellierungsansätze bekannt. Analytische und eindimensionale numerische Ansätze haben eine geringe Komplexität (vgl. [70, 115, 235]). Diese sind jedoch unpräzise und liefern keine Aussagen zu einzelnen Teilaspekten und -komponenten. Ein sogenanntes *Constant Property Modell* (dt. Konstant-Parameter-Modell; vgl. z. B. [236]), d. h. Annahme von temperaturunabhängigen Mittelwerten für die relevanten TE-Materialeigenschaften, stellt relativ einfache analytische Formeln zur präziseren Berechnung der elektrischen Leistung und des Wirkungsgrads dar. Nach [236] wird die Modulperformance aufgrund der vereinfachten Annahmen, z. B. zur Joule-Wärme, überschätzt. Daher erfolgt die detaillierte dreidimensionale Abbildung der Module zur Auslegung und Optimierung mithilfe der multiphysikalischen FEM (vgl. z. B. [138]). Diese Methode liefert im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Ansätzen die präzisesten Ergebnisse unter dem Nachteil eines hohen Rechenaufwands. Als Eingangsgrößen werden beispielsweise

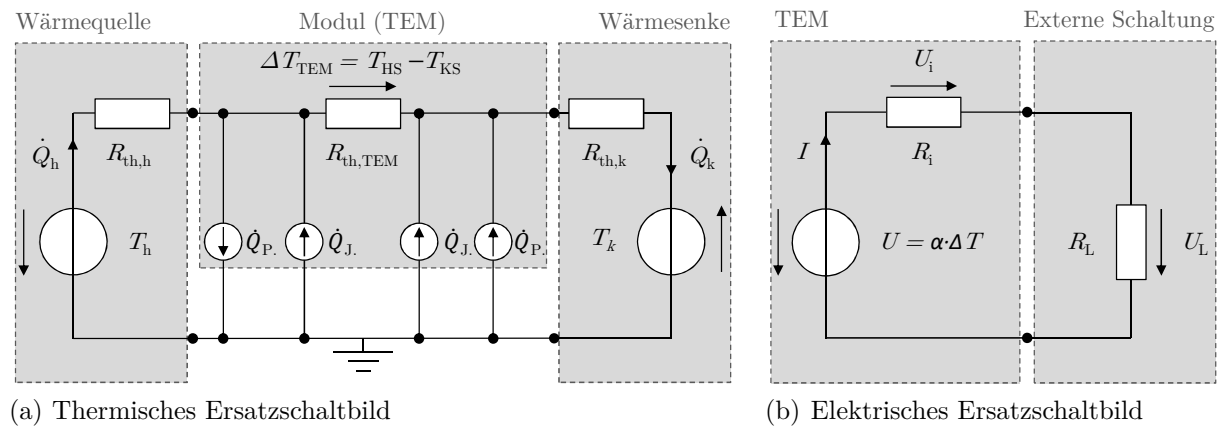


Abbildung 5.23.: Ersatzschaltbilder eines thermoelektrischen Moduls, Abbildung i. A. a. [70, 237, 238]

temperaturabhängige Materialdaten von Modulherstellern und aus Veröffentlichungen verwendet (s. Abbildung 6.6). Für die Gesamtsystemsimulation werden Betriebskennfelder, wie z. B. der Leistung über der Heißeitentemperatur und über der Temperaturdifferenz, als Ergebnisse der FEM-Modelle abgeleitet. Die Genauigkeit der ermittelten empirischen Kennfelder ist für die technische Auslegung von TEG-Systemen ausreichend (vgl. [71]). Zur Funktionsbeschreibung des Modells ist ein thermisches und elektrisches Ersatzschaltbild eines Moduls in Abbildung 5.23 illustriert. Das Modul wird thermisch vereinfacht anhand der Peltier-Wärme  $\dot{Q}_{\text{Peltier}}$ , der Joule-Wärme  $\dot{Q}_{\text{Joule}}$  und dem inneren Wärmestrom  $\dot{Q}_{\Delta T}$  unter Vernachlässigung des Thomson-Effekts (s. Abschnitt 2.3.2.3) beschrieben, wie in Teilabbildung (a) erkennbar. Nach [71] ergibt sich im stationären Zustand an einem Schenkelpaar ein zugeführter Wärmestrom auf der Heißeite  $\dot{Q}_h$  und ein abgegebener Wärmestrom auf der Kaltseite  $\dot{Q}_k$  von:

$$\dot{Q}_h = \underbrace{\alpha_{n,p} \cdot I \cdot T_h}_{=\dot{Q}_{\text{Peltier}}} + \underbrace{\lambda \cdot (T_h - T_k)}_{=\dot{Q}_{\Delta T}} - \underbrace{\frac{1}{2} \cdot R_i \cdot I^2}_{=\dot{Q}_{\text{Joule}}} \quad (5.43)$$

$$\dot{Q}_k = \underbrace{\alpha_{n,p} \cdot I \cdot T_k}_{=\dot{Q}_{\text{Peltier}}} + \underbrace{\lambda \cdot (T_h - T_k)}_{=\dot{Q}_{\Delta T}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot R_i \cdot I^2}_{=\dot{Q}_{\text{Joule}}} \quad (5.44)$$

Der Wirkungsgrad und die gewandelte Leistung kann nach Gleichung 2.9 und 5.30 bestimmt werden. Das Modul wird elektrisch vereinfacht abgebildet als Spannungsquelle  $U$  mit Innenwiderstand  $R_i$ , wie in Teilabbildung 5.23 (b) erkennbar.

Am Beispiel des planaren Modulaufbaus wird der Aufbau eines konventionellen, d. h. symmetrische Schenkelstruktur einer Materialklasse (n- und p-Typ), und eines segmentierten TEM-Schenkelpaares in Abbildung 5.24 dargestellt. Unter den getroffenen Annahmen, z. B. zur Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , werden typische Temperaturprofile von der Heißeite  $T_{\text{HS}}$  zur Kaltseite  $T_{\text{KS1}}$  bzw.  $T_{\text{KS2}}$  über die Modulhöhe  $h$  abgebildet. Module mit segmentierten Schenkeln weisen Vorteile auf, da sie größere Temperaturdifferenzen  $\Delta T_{\text{TEM}}$

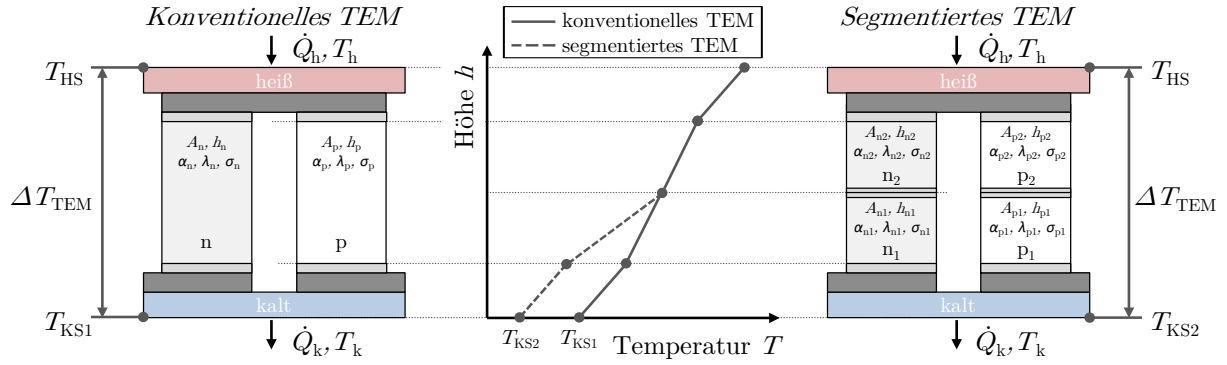


Abbildung 5.24.: Qualitative Darstellung von Modulaufbauten (ohne und mit segmentierten Schenkeln) und den auftretenden Temperaturniveaus (Annahmen:  $n = n_2$ ;  $p = p_2$ ;  $\lambda_2 < \lambda_1$ )

bei gleichen äußeren Schenkelabmessungen ermöglichen. Dies führt zu höheren Wirkungsgraden und/oder elektrischen Leistungen (vgl. [138, 235, 239]).

Die Modellierung segmentierter TEM ist komplexer. Zum Beispiel sind für die Ermittlung der charakteristischen Größen: Seebeck-Koeffizient  $\alpha_{n,p(\text{TEM})}$ , elektrischer Widerstand  $\sigma_{n,p(\text{TEM})}$  und thermische Leitfähigkeit  $\lambda_{n,p(\text{TEM})}$  eines Moduls mit einer Anzahl von Halbleiterpaaren  $n_{(n,p)}$ , die folgenden Gleichungen in Anlehnung an [70] zu definieren:

$$\alpha_{n,p(\text{TEM})} = n_{(n,p)} \cdot \left( \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^n \int_{T_{VP,i}}^{T_{VP,i+1}} \alpha_{p,i} \cdot dT}{T_h - T_k}}_{=\alpha_p} + \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^n \int_{T_{VP,i}}^{T_{VP,i+1}} \alpha_{n,i} \cdot dT}{T_h - T_k}}_{=\alpha_n} \right) \quad (5.45)$$

$$\sigma_{n,p(\text{TEM})} = n_{(n,p)} \cdot \left( \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_{i+1}} \sigma_i \cdot dh}{A_p}}_{=\sigma_p} + \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_{i+1}} \sigma_i \cdot dh}{A_n}}_{=\sigma_n} \right) \quad (5.46)$$

$$\lambda_{n,p(\text{TEM})} = n_{(n,p)} \cdot \left( \underbrace{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i \cdot A_p}}}_{=\lambda_p} + \underbrace{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i \cdot A_n}}}_{=\lambda_n} \right) \quad (5.47)$$

Berücksichtigt werden die relevanten Materialparameter und geometrischen Abmessungen (Fläche:  $A$ ; Höhe:  $h$ ) des jeweiligen Schenkels sowie eine beliebige Anzahl von Schenkelsegmenten  $n$  und Temperaturen an den jeweiligen Verbindungspunkten  $T_{VP}$ .

## 5.4. Überblick über die entwickelten Methoden und Werkzeuge

Als Zusammenfassung dieses Kapitels werden die Methoden und Werkzeuge dieser Arbeit aufgeführt, die zur Erforschung des wissenschaftlichen Mehrwerts entwickelt wurden:

- Übergeordnete **methodische Vorgehensweise zur Entwicklung von TEG-Systemen** nach dem V-Modell-Ansatz (s. Abschnitt 3.2)
- **Methode zur Berechnung der Kraftstoff- und Emissionsreduktion nach dem Willans-Ansatz** unter Berücksichtigung von Längsdynamiksimulationen; validierter eigener Ansatz mit Gültigkeit im gesamten Motorenbetriebskennfeld (s. Abschnitt 5.1.1)
- **Modelle zur Abbildung der Fahrzeugwechselwirkungen:**
  - **Berechnungs- und Modellierungsansatz für die VKM** in Form von Energiebilanzierung und Abbildung des thermischen Warmlaufverhaltens (s. Abschnitt 5.1.2.1)
  - **Modellierungsansätze zur Abgasanlage:** motor- und lastpunktspezifische Abgasgedruckkorrelationen; Bestimmung von Kraftstoffverbrauchs- und Abgastemperaturänderungen (s. Abschnitt 5.1.2.2)
  - **Simulationsmodell für fahrzeugspezifische Kühlsysteme für NFZ** zur Bestimmung der Kühlsystemkapazität (Vermeidung des Lüfterbetriebs) und der Antriebsleistung der Kühlmittelpumpe (s. Abschnitt 5.1.2.3)
  - **Modellierungsansatz des elektrischen Bordnetzes** zur Leistungs- und Energiebilanzierung (s. Abschnitt 5.1.2.4)
- **Gesamtbetriebskostenmodell** zur Ermittlung der Amortisationszeit (s. Abschnitt 5.1.3)
- Analytisches **Grobauslegungswerkzeug für TEG-Systeme** zur Abschätzung von TEG-Leistung und -Wirkungsgrad (s. Abschnitt 5.2.2)
- **Generische TEG-Modelle für das Gewicht, den Bauraum und die Kosten** (s. Abschnitt 5.2.3)
- **Methoden zur ganzheitlichen Gesamtsystemsimulation von TEG-Systemen** auf Basis einer CFD-Simulation und einer physikalischen Mehrdomänen-Modellierung jeweils einschließlich Mehrzieloptimierung (s. Abschnitt 5.2.4)
- **Generische CFD-Simulationsmodelle von Wärmeübertragern** mit unterschiedlichen inneren Rippenstrukturen (s. Abschnitt 5.3.1)
- **Multiphysikalische Modellierungsansätze für thermoelektrische Module** zur Auslegung und Berechnung, z. B. durch FEM-Modelle (s. Abschnitt 5.3.2)

## Kapitel 6.

# Konzeption und Entwicklung von thermoelektrischen Generatorsystemen

Dieses Kapitel beschreibt den ganzheitliche Entwicklungsprozess von der Konzeptphase bis zur Ausgestaltung der Systembauweise, deren Teilsysteme und Komponenten. Im Rahmen der übergeordneten Vorgehensweise aus Abschnitt 3.2 wird im Schwerpunkt der Arbeitsschritt der Systemintegration erläutert. Im Sinne einer effizienten Entwicklung soll der Lösungsraum potentieller Lösungsvarianten schrittweise reduziert werden. Dazu werden die vorteilhaftesten Fahrzeugintegrationskonzepte abgeleitet und die verschiedenen Teillösungen einer Vorbewertung unterzogen. Für die verbleibenden Lösungsvarianten wird eine detailliertere technische und wirtschaftliche Bewertung durchgeführt. Im letzten Abschnitt erfolgt die konstruktive und fertigungsgerechte Ausgestaltung des ausgewählten Lösungskonzepts.

### 6.1. Ableitung der Fahrzeugintegrationskonzepte

Allgemein gibt es eine Vielzahl von möglichen Integrationspositionen eines TEG-Systems in ein Fahrzeug, wie im Stand der Technik in Abschnitt 2.4 beschrieben. Unterteilt nach der abgas-, kühlmittelseitigen und elektrischen Integration sind diese einschließlich der Vor- (+) und Nachteile (–) in Tabelle 6.1 aufgelistet. Aus Effizienzgründen werden ausschließlich als Wärmequelle das Abgas der VKM und als Wärmesenke die Fluidkreisläufe des Fahrzeugs betrachtet. Bei den aufgeführten Varianten sinken die Temperaturniveaus des Abgases im Verlauf der Abgasführung, ausgehend von der Wandung der Verbrennungskraftmaschine (VKM-Wandung) bis zum Ausgang der Abgasnachbehandlung (nach AGN), kontinuierlich ab. Die Temperaturniveaus der kühlmittelseitigen Einbindungsvarianten nehmen von rund 115 °C im Öl-KMK bis zu rund –253 °C bei der Kryokühlung<sup>84</sup> ab. Für die Integration in das konventionelle elektrische Bordnetz sind keine Alternativen bekannt.

---

<sup>84</sup>Alternativ als kryogene Kühlung bezeichnet; Temperaturbereich unterhalb von rund –160 °C durch Flüssiggas-Kühlung, z. B. flüssiges Erdgas oder Wasserstoff.

Tabelle 6.1.: Analyse verschiedener Fahrzeugintegrationskonzepte des TEG-Systems

TEG-Integration	Vorteile	Nachteile	
Abgasseitig	VKM-Wandung	+ höchste Abgastemperaturen + Nähe zum Kühlsystem	– komplexeste TEG-Integration – erhöhte Ablagerungen (z. B. Ruß) – negative Effekte auf nachfolgende Komponenten
	AGK	+ hohe Abgastemperaturen + Nähe zum Kühlsystem	– komplexe TEG-Integration – erhöhte Ablagerungen (z. B. Ruß) – negative Effekte auf nachfolgende Komponenten – Bauraumprobleme (vgl. [58])
	AGR	+ hohe Abgastemperaturen + einfache TEG-Integration (soweit AGR-Kühler vorhanden) + Nähe zum Kühlsystem	– erhöhte Ablagerungen (z. B. Ruß) – geringer Abgasmassenstrom ( $\approx \frac{1}{3}$ des Gesamtmassenstroms) – Zukünftige Entwicklungspfade der AGR unbekannt (vgl. [58])
	vor AGN	+ Einfluss auf VKM und Turbolader geringer	– komplexe Kühlsystemintegration – negative Effekte auf nachfolgende Komponenten
	AGN	+ Nutzung der exothermen Temperaturerhöhung + AGN-Bauteilschutz möglich	– komplexe TEG-Integration – negative Effekte auf (nachfolgende) Komponenten der AGN
	nach AGN	+ geringster Einfluss auf VKM und Abgasanlage + Bauraum (begrenzt) verfügbar	– Abgastemperaturen am geringsten – komplexe Kühlsystemintegration
	Kühlmittelseitig	Öl-KMK	+ höhere Temperatur- und Druckniveaus möglich (als beim Kühlmittel)
HT-KMK		+ hoher Volumenstrom + hohes Kühlungspotential	– hohes Temperaturniveau – Beeinflussung insbesondere der VKM, AGR und des Öl-Kühlers
NT-KMK		+ geringes Temperaturniveau	– geringer Volumenstrom – negativer Einfluss des LL-Kühlers
Zusätzlicher NT-KMK ( $\approx 40^\circ\text{C}$ )		+ thermodynamisch effizient + keine Beeinflussung anderer KMK-Komponenten	– am kostenintensivsten
Kryokühlung		+ höhere TEG-Wirkungsgrade + Kraftstoffvorwärmung durch TEG	– komplexer & kostenintensiver (als mit konv. Kühlflüssigkeiten)
Elektrisch	Bordnetztopologie (24 V Nennspannung)	+ einfache TEG-Integration + flexible Leistungseinspeisung	– Spannungsniveau der Leistungseinspeisung festgelegt – DC/DC-Wandlerverluste

Bei der jeweiligen Auswahl der TEG-Integration ist ein Kompromiss zu finden und abzuwägen, welche Nachteile akzeptabel sind. Im Folgenden werden die TEG-Integrationskonzepte nach den drei direkt beeinflussten Fahrzeugteilsystemen analysiert und ausgewählt. Dabei ist ein Ziel dieser Arbeit, den Einfluss auf das Gesamtfahrzeug zu minimieren (s. Abschnitt 3.2).

### 6.1.1. TEG-Integrationskonzepte in die Abgasanlage

Um den Einfluss auf das Gesamtfahrzeug gering zu halten, werden die Integrationspositionen an der VKM-Wand, im AGK, vor und in der AGN nicht weiter untersucht (s. Abschnitt 4.3). Die Vorteile eines hohen Temperaturgradienten zum Kühlmittel werden somit vernachlässigt (s. Kapitel 4; vgl. [58]). Allerdings wird der negative Einfluss auf die Verbrennungskraftmaschine und die nachfolgende AGN<sup>85</sup> reduziert beziehungsweise eine Neuentwicklung bezüglich Brennverfahren, Turbolader, Kraftstoffverbrauch und Emissionen vermieden.

Die Vorteile und Nachteile der beiden verbleibenden Integrationspositionen in der AGR-Strecke und nach der AGN wurden in Tabelle 6.1 dargestellt und in Abschnitt 4.3 diskutiert. Die Vorteile der TEG-Integration in die AGR-Strecke liegen darin, dass der AGR-Kühler kleiner dimensioniert werden kann und bei optimaler Integration keine zusätzliche thermische Belastung des Kühlsystems entsteht (vgl. [34, 58]). Durch die Nähe zum Kühlsystem sowie die vorhandenen Kühlmittelanschlüsse am bestehenden AGR-Kühler reduziert sich die Komplexität und der Aufwand bei der Integration.

Die Position am Ausgang der AGN bietet höhere Abgasenthalpien. Aufgrund der niedrigeren Abgastemperaturen sind jedoch geringere maximale Wirkungsgrade zu erwarten als in der AGR-Strecke (vgl. [58]). Ein Vorteil ist, dass keine nachgeschalteten Komponenten negativ beeinflusst werden. Der Bauraum bietet zudem eine vergleichsweise größere geometrische Freiheit für eine TEG-Integration. Die eingesetzten thermoelektrischen Module lassen aufgrund der niedrigeren Abgastemperaturen eine bessere Langzeitstabilität erwarten. Die Reinigung der Abgase in der AGN, u. a. von Rußpartikeln, begünstigt ebenfalls die Langzeitstabilität des TEG. Insbesondere ungefilterte Dieselabgase führen zu verstärkten Ablagerungen in den Wärmeübertragern des TEG und gegebenenfalls zu höheren Foulingwiderständen (s. Tabelle D.6 im Anhang). Dies resultiert in reduzierten elektrischen Ausgangsleistungen (s. Abschnitt D.7.6.1 im Anhang).

Die Ergebnisse der energetischen Potentialbewertung aus Abschnitt 4.3 und die beschriebenen Argumente sprechen für die TEG-Integration am Ausgang der AGN.

Im Allgemeinen ist eine Bypass-Regelung aufgrund der begrenzten Einsatztemperaturen der verwendeten TE-Materialien erforderlich.<sup>86</sup> Eine Ausnahme stellt die TEG-Integration in die AGR-Strecke dar, sofern die AGR-Regelung auch die Begrenzung der Einsatztemperatur der Module im TEG berücksichtigt.

<sup>85</sup>Für die einwandfreie AGN-Funktion ist eine Grenztemperatur ( $\approx 200\text{ °C}$ ) zu überschreiten (vgl. [36]).

<sup>86</sup>Der Einsatz von Höchsttemperaturmaterialien, wie z. B. SiGe, stellt aus Effizienz- und Kostengründen keine Alternative dar (s. Abschnitt 2.3.2.5).

### 6.1.2. TEG-Integrationskonzepte in das Kühlsystem

Der zusätzliche Wärmeeintrag durch das TEG-System in das Kühlmittel ist im allgemeinen Fahrzeugbetrieb zunächst negativ zu bewerten. Bei der Auswahl des Integrationskonzeptes sollte dieser gering gehalten werden. Die identifizierten abgasseitigen Integrationspositionen in der AGR-Strecke des Diesel-NFZ und am Ausgang der AGN der beiden Referenzfahrzeuge unterscheiden sich erheblich voneinander. Der unterschiedliche Abstand zum bestehenden Kühlsystem beeinflusst die im Folgenden untersuchten kühlmittelseitigen Einbindungsvarianten.

Eine Integration in den Öl-KMK ist grundsätzlich möglich, aber sehr komplex und kostenintensiv. Die zusätzliche Kühlung des TEG bedingt bei einer Integration in die motornahe AGR-Strecke eine deutliche Vergrößerung des in den Motorblock integrierten Öl-KMK. Eine leistungsfähigere Ölpumpe ist erforderlich. Aus Effizienzgründen ist ein kühlmittelbasierter KMK bevorteilt, da der Öl-KMK die Wärme verlustbehaftet an den HT-KMK überträgt und die spezifische Wärmekapazität des Kühlmittels zudem höher ist als diejenige vom Öl. Aufgrund der genannten technischen und wirtschaftlichen Nachteile wird diese Variante nicht weiter betrachtet.

Die Integration in den HT-KMK ist an verschiedenen Positionen möglich und bietet die beschriebenen Vor- und Nachteile aus Tabelle 6.1. Ein weiterer Vorteil ist die Verkürzung der Warmlaufphase der VKM (vgl. z. B. [72]), sofern der TEG bei geschlossenem HT-Thermostat vom Kühlmittel durchströmt wird. Die Positionierung vor dem Einlass und nach dem Auslass des Motors bieten diese Möglichkeit. Der Kurzschlusskreis ist in den Motorblock integriert und eignet sich daher nicht für die Integration. Der Heizkreislauf steht optional bei kalten Umgebungstemperaturen zur Verfügung. Aufgrund der niedrigen Volumenströme und der geringen Kühlleistung ist dieser ebenfalls nicht geeignet. Eine Einbindung in den Hauptkühlmittelstrom mit bis zu  $600 \text{ dm}^3/\text{min}$  (s. Abschnitt 5.1.2.3) erscheint für die TEG-Entwicklung dieser Arbeit aus thermodynamischen Gründen nicht erforderlich und aus strömungsmechanischen Gründen von Nachteil. Daher erfolgt die TEG-Einbindung in einen Nebenzweig mit reduziertem Volumenstrom.

Eine TEG-Integration in den NT-KMK bietet aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus einen entscheidenden Vorteil gegenüber der Integration in den HT-KMK (vgl. [58, 103, 129, 130]). Die Integrationsposition zwischen NT-Kühler und LLK wird nicht betrachtet, da dadurch die verdichtete Frischluft nicht ausreichend gekühlt werden könnte und die Motorleistung negativ beeinflusst würde.<sup>87</sup> Die abschließende thermodynamische Bewertung, ob die geringere Kühlleistung des NT-KMK im Vergleich zum HT-KMK ausreichend ist, kann erst anhand der ganzheitlichen Optimierungsergebnisse und des TEG-Ergebnisdesigns im Fortgang dieser Arbeit in Abschnitt 8.3.4 erfolgen.

---

<sup>87</sup>Nach Untersuchungen von [103] resultiert die Temperaturerhöhung der Ladeluft um 10 K in einer Erhöhung des relativen Kraftstoffverbrauchs im Bereich von 0,5–0,8 %.



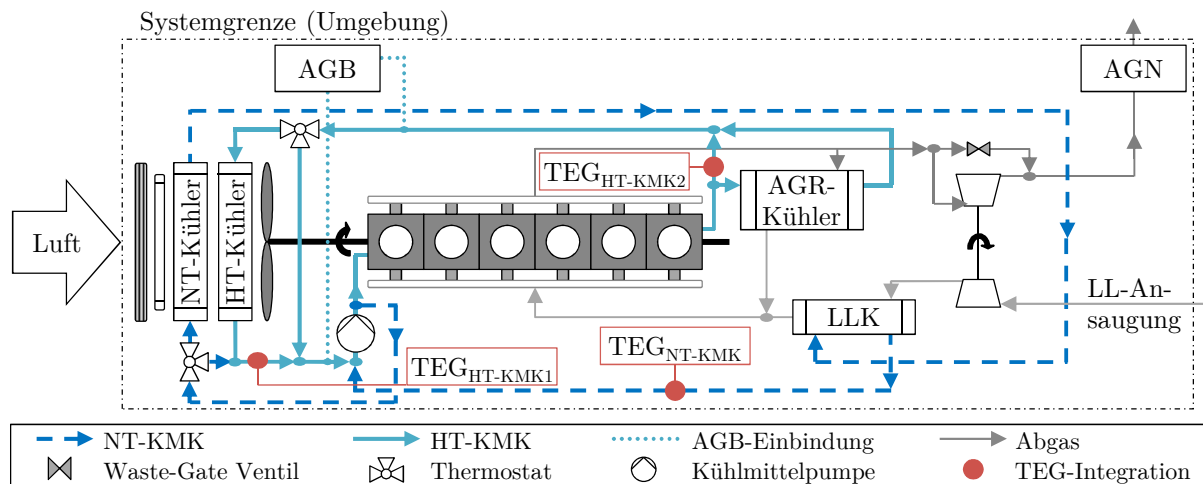


Abbildung 6.1.: Schematische Darstellung der Kühlkreisläufe eines modernen NFZ mit Verbrennungsmotor und TEG-Einbindungsvarianten

Thermodynamisch am effizientesten, aber im Vergleich zu den konventionellen Varianten am kostenintensivsten, ist die TEG-Integration in einen zusätzlichen NT-KMK mit einem einstellbaren Temperaturniveau von rund  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (vgl. [58, 103]). Diese Lösung bietet zudem den Vorteil der Systemkopplung, sodass weitere KMK-Komponenten nicht negativ beeinflusst werden. Aufgrund der großen betriebswirtschaftlichen Nachteile und der fehlenden technologischen Notwendigkeit wird diese Variante jedoch im Fortgang dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Eine weitere Möglichkeit die Kaltseite des TEG zu gestalten ist die Kryokühlung, d. h. die kryogene Kühlung mit Flüssiggasen anstelle des Kühlmittels als Wärmesenke. Die Vorteile liegen vor allem in den vergleichsweise sehr niedrigen Temperaturniveaus von rund  $-164\text{ }^{\circ}\text{C}$  für LNG oder rund  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  für Wasserstoff in den Spezialtanks. Nachteilig sind die größere Komplexität und die höheren Kosten dieser Variante. Als Vorgriff auf die weitere Arbeit hat sich die kryogene Kühlung mit LNG im Erdgas-NFZ als nachteilige Lösung im Hinblick auf die Kosten-Nutzen-Relation im Vergleich zu einem NT-KMK mit herkömmlichem Kühlmittel erwiesen. Daher wird diese nicht weiter betrachtet. Da die Anwendungsszenarien dieser Arbeit nicht über einen Wasserstofftank verfügen, stellt diese Variante eine theoretische Möglichkeit dar, die für zukünftige NFZ-Antriebsstränge vorteilhaft erscheint.

Die verbleibenden TEG-Einbindungsvarianten in den HT-KMK und NT-KMK sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Wie beschrieben werden zwei Integrationsvarianten vor und nach der Motorstruktur des HT-KMK mit der Bezeichnung als ‚TEG<sub>HT-KMK1</sub>‘ und als ‚TEG<sub>HT-KMK2</sub>‘ sowie eine Variante im NT-KMK mit der Bezeichnung als ‚TEG<sub>NT-KMK</sub>‘ ausgewählt. Die Einbindung des TEG in den KMK vor dem Motoreintritt des Kühlmittels ist aufgrund des geringeren Temperaturniveaus zu bevorzugen.

Tabelle 6.2.: Vergleich der Kühlungspotentiale der Referenzfahrzeuge

(Rdb.:  $\vartheta_U = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $p = 1013\text{ hPa}$ ;  $\varphi_U = 0\%$ ;  $m_{FZ} = 40\text{ t}$ ;  $\vartheta_{VKM,aus(max)} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ )

VKM-Betriebszustand	Diesel-NFZ			Erdgas-NFZ		
	$n_{VKM}$ [1/min]	$M_{VKM}$ [Nm]	$\dot{Q}_{KM,Pot}^*$ [kW]	$n_{VKM}$ [1/min]	$M_{VKM}$ [Nm]	$\dot{Q}_{KM,Pot}^*$ [kW]
Nenndrehmoment (80 km/h)	1100	2200	34,8 / 31,3	1100	2000	40,3 / 38,4
Nennleistung (80 km/h)	1600	1970	38,4 / 35,1	1900	1700	48,1 / 47,9
WHVC <sub>40 t,m</sub>	1036	637	74,8 / 38,4	1119	587	109,8 / 59,4
SHHS <sub>40 t,m</sub>	1246	787	80,5 / 44,8	1392	759	115,4 / 67,2

\* Angabe für das Integrationskonzept  $TEG_{HT-KMK1} / TEG_{NT-KMK}$ .

Im Folgenden wird das Kühlungspotential des Kühlsystems, d. h. der maximal mögliche Wärmeeintrag, bis eine zusätzliche Einkopplung des Lüfters notwendig ist, für die ausgewählten Integrationskonzepte vorgestellt. Das verfügbare Kühlungspotential ( $\dot{Q}_{KM,Pot}$ ; s. Gleichung 5.11) wird für beide Referenzanwendungen und die vorteilhaften Integrationskonzepte ‚ $TEG_{HT-KMK1}$ ‘ und ‚ $TEG_{NT-KMK}$ ‘ in Tabelle 6.2 dargestellt. Die Ergebnisse des Diesel-NFZ sind mit bis zu 80,5 kW für den HT-KMK1 und bis zu 44,8 kW für den NT-KMK im Durchschnitt rund 20 % niedriger als beim Erdgas-NFZ. Dies ist zum Teil auf die Berücksichtigung einer gekühlten AGR im Diesel-NFZ zurückzuführen. Im Simulationsmodell des Kühlsystems wurde der zugeführte Wärmestrom solange erhöht, bis eine Kühlmitteltemperatur von 100 °C am Motorausgang ( $\vartheta_{VKM,aus(max)}$ ) erreicht wurde. Die Berechnungen basieren auf ermittelten betriebspunktabhängigen Kennfeldern. In Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit werden diese am Beispiel des Erdgas-NFZ in Abbildung D.13 im Anhang dargestellt.

### 6.1.3. TEG-Integrationskonzepte in das Bordnetz

In heutigen modernen NFZ dominiert das 24 V-Bordnetz mit elektrischen (Klein-)Verbrauchern. Für die TEG-Integration bietet sich eine Einbindungsvariante als weiterer Erzeuger in der Parallelschaltung des Bordnetzes (s. Abschnitt 5.1.2.4). Die Leistungselektronik einschließlich DC/DC-Wandler wird zentral im Fahrzeug am Verteileranschlusspunkt positioniert (vgl. [103]). Die Gründe dafür sind eine geringe Komplexität, eine einfache Wartung und Reparatur sowie niedrige Kosten.

Zukünftige Elektrifizierungsansätze, wie z. B. die Elektrifizierung der Nebenaggregate, ermöglichen weitere vorteilhafte TEG-Integrationsvarianten. Der maximale Leistungsbedarf der Nebenaggregate eines aktuellen Diesel-NFZ bei Nennleistung beträgt bis zu 26 kW, wie in Abbildung B.9 im Anhang dargestellt (ohne elektrische Transportkältelösung „Frigoblock“). Der durchschnittliche mechanische Leistungsbedarf liegt nach [45] bei 4,6 kW. Die teilweise Elektrifizierung von Fahrzeugen kann den Nutzen eines TEG-Systems steigern (s. Abschnitt D.7.6.7 im Anhang; vgl. z. b. [72]).

## 6.2. Variantenbildung und Systemauslegung

Die Konzeption hat zum Ziel, die Lösungsprinzipien und deren Strukturen zu erfassen und für die nachfolgenden Auswahl- und Bewertungsschritte im Lösungsfindungsprozess aufzubereiten. Im vorausgegangenen Abschnitt 6.1 wurden Integrationskonzepte für das Fahrzeugesamtsystem abgeleitet, die den Lösungsraum reduzieren. Die Konzeption umfasst zum Beispiel die Bauweisenentwicklung, das Stromführungskonzept der Wärmeübertrager, die Modulbauweise und die jeweilige Auslegung. Die als relevant



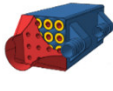
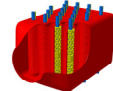
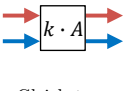
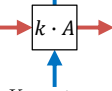
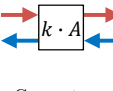


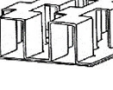




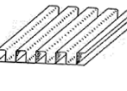
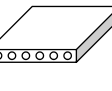

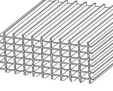
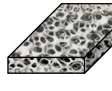

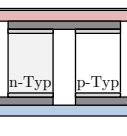
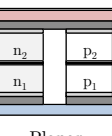
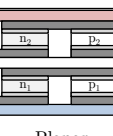
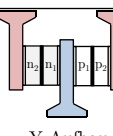
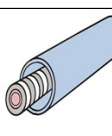
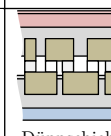


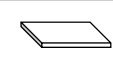

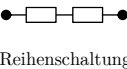
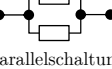
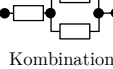
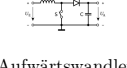
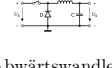
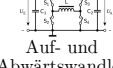
Merkmal	Teillösungen						
	1	2	3	4	5	6	7
TEG-Bauweise	 Stapelbauweise	 Polygonale Bauweise	 Rohrbündelbauweise	 Modulare Bauweise			
WÜ-Stromführung	 Gleichstrom	 Kreuzstrom	 Gegenstrom				
HGWÜ-Struktur	 Gerade/dreieckige Rippen	 Wellenförmige Rippen	 Versetzte Rippen	 Perforierte Rippen	 Eingeschlitzte Rippen	 Hochporöses Material	 AM-Struktur
KMWÜ-Struktur	 Gerade Rippen	 (Mikro-)Kanäle	 Stift-Rippen	 Wabenstruktur	 Hochporöses Material	 AM-Struktur	
Modulbauweise	 Planar einstufig	 Planar segmentiert	 Planar kaskadiert	 Y-Aufbau (segmentiert)	 Ringstrukturiert	 Dünnschichtig (Streifen)	
Thermische Kontaktierung	 Wärmeleitpaste	 Wärmeleitkleber	 Wärmeleitpads	 Wärmeleitfolien	Ohne		
Kapselung	Kapselung der Schenkel	Einzelmodulkapselung	Teilsystemkapselung	Systemkapselung	Ohne		
Verspannkonzep	hochintegriert	teilintegriert	nicht integriert (Einzelmodulverspannung)	Ohne			
Modulverschaltung	 Reihenschaltung	 Parallelschaltung	 Kombination				
DC/DC-Wandler (LE)	 Aufwärtswandler	 Abwärtswandler	 Auf- und Abwärtswandler	Ohne			

Abbildung 6.2.: Ergebnis der morphologischen Analyse anhand der relevanten Merkmale und Teillösungen bei der TEG-Entwicklung; Abbildungen eigene Darstellungen und aus [116, 117]

bewerteten Teilfunktionen bzw. Komponenten wurden als Teillösungen bei der morphologischen Analyse berücksichtigt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.2 aufgeführt. Die Anzahl der möglichen Kombinationen von Teillösungen zu Lösungsprinzipien beträgt mehr als drei Millionen. Alle Lösungsprinzipien zu entwerfen und ganzheitlich zu bewerten stellt einen ineffizienten Lösungsweg dar. Daher wird der Lösungsraum durch ein geeignetes Auswahlverfahren im Folgenden weiter reduziert.

Um ein zielgerichtetes Vorgehen im Entwicklungsprozess zu ermöglichen und die nachfolgenden Entscheidungsprozesse nachvollziehbar zu beschreiben, werden zunächst übergeordnete Aspekte der Systemauslegung erläutert. Zur Erreichung der Zielsetzungen dieser Arbeit sind TEG-Auslegungen erforderlich, die sich durch hohe Kraftstoffreduktionen bei gleichzeitig niedrigen Systemkosten auszeichnen. Um hohe Nettoerduktionen zu erzielen, sind die parasitären Effekte, d.h. die negativen Fahrzeugwechselwirkungen mit dem TEG-System zu minimieren. Der Schwerpunkt liegt auf der Minimierung des Abgasgedrucks. Die Minimierung des TEG-Gewichts und des Kühlmittelgedrucks sind von vergleichsweise geringer Bedeutung. Die Begrenzung der Wärmeströme in das Kühlmittel ist von großer Bedeutung. Hohe Wirkungsgrade der TEG-Systeme begünstigen dies. Typische Wirkungsgrade sind in Tabelle 6.3 aufgeführt. Für die Wirkungsgrade des TE-Materials ( $\eta_{\text{TEM}}$ ; s. Gleichung 2.9) werden aktuelle Gütezahlen der Materialien aus Abschnitt 2.3.2.5 berücksichtigt. Daraus ergeben sich temperaturabhängige Wirkungsgrade im Bereich von 4,5–8,8 % ( $\eta_{\text{TEG}}$ ; s. Gleichung 5.33). Diese haben großen Einfluss auf den erzielbaren Gesamtwirkungsgrad ( $\eta_{\text{ges,TEG}}$ ). Dieser wird anhand der Multiplikation der Einzelwirkungsgrade ermittelt und liegt im Bereich von 1,1–5,6 %. Bei allen Komponenten ist es entscheidend hohe Wirkungsgrade zu erreichen, ohne die Kosten zu vernachlässigen. Dies gilt insbesondere für die Module und Wärmeübertrager. Typische Wirkungsgrade der Wärmeübertrager ( $\eta_{\text{WÜ}}$ ) liegen abhängig von der WÜ-Fläche und der Berippung beispielsweise im Bereich von 25–65 %. Darüber hinaus können Wirkungsgrade von bis zu 90 % erreicht werden, was jedoch die Kosten aufgrund des hohen Materialeinsatzes für den großen Wärmeübertrager und die komplexe Berippung überproportional erhöht. Beispielsweise steigen die Stückkosten eines TEG um 210 % unter den Randbedingungen des WHVC<sub>40t</sub> vom Diesel-NFZ bei einer Erhöhung des Wirkungsgrads der Wärmeübertrager von 65 % auf 90 %.

Tabelle 6.3.: Typische Wirkungsgrade eines Thermoelektrischen Generators

Komponente	Formelzeichen	Wirkungsgrad [%]	
		min.	max.
Thermoelektrisches Modul	$\eta_{\text{TEG}}^*$	4,5	8,8
Wärmeübertrager	$\eta_{\text{WÜ}}$	25	65
thermische Kontaktierung	$\eta_{\text{Kont}}$	95	98
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{\text{ges,TEG}}$	1,1	5,6

\*  $\eta_{\text{TEG}} = \eta_{\text{TEM}} \cdot \eta_{\text{LE}}$ , s. Gleichung 5.33;  $\eta_{\text{TEM}} = 5 \dots 9 \%$ ;  $\eta_{\text{LE}} = 90 \dots 98 \%$

Im Allgemeinen lassen sich geringe Systemkosten erzielen, sofern bei der Auslegung auf kostenintensive Werkstoffe und Materialien verzichtet wird. Ist dies nicht vermeidbar, ist der Materialeinsatz auf ein Minimum zu reduzieren. Darüber hinaus sollte die Anzahl der Bauteile minimiert und Skaleneffekte ausgenutzt werden, z. B. durch die Verwendung von Gleichteilen. Auf Werkstoffe und Materialstrukturen die unverhältnismäßig aufwendige Fertigungsprozesse bedingen, wird daher verzichtet. Hohe gravimetrische und volumetrische Leistungsdichten begünstigen die Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit. Die Langzeitstabilität ist ein weiterer Auslegungsaspekt, der verfolgt wird, wie z. B. durch die Vermeidung von Ablagerungsbildung in den WÜ oder der Reduzierung der maximalen Einsatztemperaturen bei der System- und Modulauslegung.

### 6.3. Variantenauswahl

Im Folgenden wird die Variantenauswahl von Systembauweise, Teilsystemen und Komponenten erläutert, um den Lösungsraum für die ganzheitliche Bewertung auf Gesamtfahrzeugebene zu reduzieren.

#### 6.3.1. Bauweisenentwicklung

Aufgrund der Analyse des Standes der Technik aus Abschnitt 2.4.2 lässt sich keine optimale TEG-Bauweise ermitteln. Für TEG-Bauweisen mit ringförmigen Modulen und Modulen in der Kartuschen-Bauweise sind bislang keine konkurrenzfähigen Wirkungsgrade und Leistungsmerkmale bekannt. Darüber hinaus sind thermomechanische Problemstellungen der Modulbauweisen noch nicht gelöst und die Verfügbarkeit dieser Module ist unbekannt. Die Stapelbauweise und die polygonale Bauweise werden mit planaren Modulen weiter untersucht. Erstgenannte wurde am häufigsten für NFZ-Anwendungen eingesetzt und hat gute Leistungsmerkmale im PKW-Anwendungsbereich gezeigt (vgl. [72]). Die polygonale Bauweise hat die bislang besten Leistungsmerkmale im NFZ-Bereich erzielt (vgl. [59, 102]).

##### Stapelbauweise

Die Stapelung von vorzugsweise Gleichteilen, von abwechselnd KMWÜ, Modulebenen und HGWÜ in einer räumlichen Richtung charakterisiert den Aufbau. In den Arbeiten des Standes der Technik lag der Schwerpunkt auf der Erzielung hoher Bruttoleistungen. Um eine größere Kompaktheit zu erreichen sind Funktionsintegrationen von Vorteil, wie sie beispielsweise in der Arbeit von [119] vorgestellt wurden. Darüber hinaus wurde von [72] eine hochintegrierte Stapelbauweise für PKW-Anwendungen vorgestellt, bei der die Modulkapselung auf Systemebene erfolgt und die Leistungsdichte erhöht wird. Die Ansätze der Funktionsintegration werden in dieser Arbeit insoweit adaptiert und berücksichtigt, als dass sie für die Kosten-Nutzen-Relation vorteilhaft sind.

Als weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit soll die Bauweise hohe Wirkungsgrade erzielen, da die Limitierung der Kühlsystemkapazität eine ungelöste Problemstellung

insbesondere für den Realbetrieb darstellt. Beim Stand der Technik wurde dieses Problem zumeist mit geringer Priorität behandelt bzw. vernachlässigt. Bei der Konzipierung des TEG ist eine simultane thermische Anpassung sowie Optimierung des HGWÜ und der Module erforderlich, um hohe Wirkungsgrade zu erzielen. Beispielsweise soll der TEG-Kern durch die Formgebung und der Einbringung von thermischen Isolierungen weitestgehend vom Gehäuse thermisch entkoppelt werden, sodass die parasitären Wärmeströme minimiert werden. Auf die Auslegung von effizienten und gleichzeitig kostenoptimierten Wärmeübertragern wird ein Schwerpunkt gelegt (vgl. z. B. [118]). Bei der Stapelbauweise haben die typischerweise rechteckigen WÜ-Formen strömungsmechanische Nachteile [117, 159], wie z. B. einen höheren Gegendruck als runde Formen. Um trotzdem geringe Gegendrücke zu erzielen sollen bislang ungewöhnliche Aspektverhältnisse, d. h. relativ große HGWÜ-Höhen von über 20 mm bei einer Breite im Bereich von 250–500 mm, realisiert werden. Komplexe und kostenintensive Stützstrukturen, wie z. B. Zwischenebenen, sollen vermieden werden. Die KMWÜ sind sehr flach zu gestalten ( $\leq 5$  mm), um die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Wärmeübergangskoeffizienten zu erhöhen (vgl. [118]). Vergleichsweise zum HGWÜ sind höhere Gegendruckniveaus für den KMWÜ akzeptabel.

Ein weiterer Schwerpunkt wird auf die Kostenreduzierung gelegt. Bekannte Auslegungen mit Wärmeübertrager- und Modulflächen von über 3500 cm<sup>2</sup> und mehreren hundert Einzelbauteilen stellen keine Kosten-Nutzen-optimierte Lösung für nutzfahrzeuggerechte TEG dar (s. Tabelle A.1 im Anhang; vgl. [22, 103, 104, 118]). Eigene Untersuchungen zur Bildung von Sektionen in Abgaslängsrichtung des TEG, z. B. in Form von unterschiedlichen TE-Materialien und Modulen pro Sektion, haben keine Vorteile im Hinblick auf die Kosten-Nutzen-Relation gezeigt. Neben der Verwendung von Gleichteilen und der Materialreduzierung sollen serientaugliche Fertigungsverfahren berücksichtigt werden. Die Stoffströme und die Leistungsausführung(-en) lassen sich bei dieser Bauweise einfach räumlich an einem Punkt bündeln, was kostenoptimale Lösungsvarianten begünstigt.

### **Polygonale Bauweise**

Die genannten Schwerpunkte bei der Stapelbauweise bezüglich der Steigerung der Leistungsmerkmale und Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Senkung der Kosten gelten auch für diese Bauweisenentwicklung.

Die polygonale Bauweise ist durch den ringförmigen Aufbau der KMWÜ um den zentralen zylindrischen bzw. polygonalen HGWÜ charakterisiert (s. bspw. Tabelle 2.3). Die Ausgestaltung eines kreisförmigen HGWÜ bietet wie zuvor beschrieben strömungsmechanische Vorteile. Die Arbeit des Standes der Technik von Hi-Z Technology [59] hat gute Leistungsmerkmale gezeigt. Es wurden jedoch keine gesamtsystemischen Aspekte, wie z. B. zum abgasseitigen Gegendruck der oktogonalen Bauweise publiziert. Eigene Voruntersuchungen dieser Bauweise ergaben, dass die Wahl eines ringförmigen HGWÜ mit sogenannten *Swirl-fins* nach [59] bzw. mit

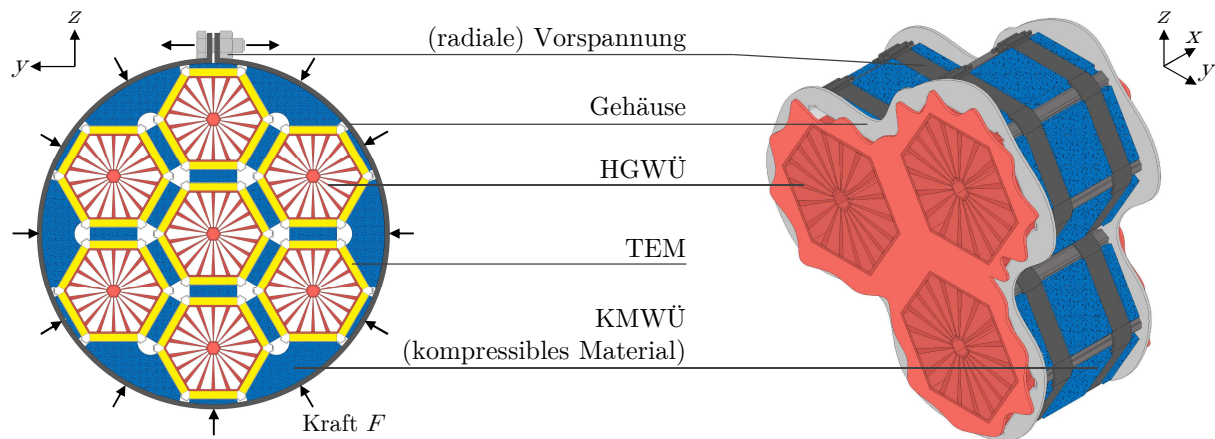


Abbildung 6.3.: Eigenentwicklung der polygonalen TEG-Bauweise als Prinzipdarstellung (links) und Darstellung eines hochintegrierten Teilaufbaus (rechts)

geraden Rippen nach [124] ungünstige Lösungsvarianten darstellen. Erstgenannte WÜ-Strukturen führen zu vergleichsweise niedrigen Wirkungsgraden der HGWÜ und damit des TEG. Das Gegendruckniveau ist hoch, weil die ringförmige HGWÜ-Form keinen ausreichend großen Strömungsquerschnitt bietet. Bei den beiden Arbeiten des Standes der Technik [59, 124] sind die TEG in Abgaslängsrichtung über einen halben Meter lang. Für geringe Gegendruckniveaus müssten diese jedoch deutlich kürzer dimensioniert werden. Der Außendurchmesser des HGWÜ liegt typischerweise im Bereich von 100–280 mm (vgl. [32, 59, 124, 240, 241]). Die polygonale Form hat relativ große Kantenlängen und ermöglicht somit große Modulflächen. Das Verhältnis der nutzbaren TE-Modulfläche zur Querschnittsfläche des HGWÜ ist jedoch ungünstig. Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient ist im Vergleich zu den rechteckigen HGWÜ der Stapelbauweise niedrig, weil der Wärmeleitpfad vom heißen Abgas bis zu den Modulen länger ist. Im Stand der Technik wird im Zentrum des HGWÜ ein Bypassrohr oder Hohlkörper integriert, um eine effizientere Wärmeleitung durch kurze Wärmeleitungswege zu ermöglichen (vgl. z. B. [59]).

Zur alternativen Lösung der Problemstellung wurde eine hochintegrierte polygonale Bauweise in dieser Arbeit entwickelt. Dabei wird die Funktionen der Modulkapselung und der Vorspannung auf Systemebene erstmalig integriert. Das Funktionsprinzip der polygonalen Bauweise wird mit dem Prinzip von Rohrbündelwärmeübertragern kombiniert, wie in Abbildung 6.3 dargestellt. Der Lösungsentwurf bedingt eine Vielzahl an hexagonalen HGWÜ (vgl. [240]), die einen kleineren Außendurchmesser ( $\leq 60$  mm) als die Bauweisen des Standes der Technik aufweisen. Durch die HGWÜ-Anzahl  $n$  lässt sich in Summe eine größere Modulfläche im TEG-Querschnitt als bei den Bauweisen des Standes der Technik realisieren. Die Modulfläche pro Querschnittsfläche lässt sich allgemein um den Faktor  $\sqrt{n}$  erhöhen. Bei einer Modulkantenlänge von 30 mm ist die Modulfläche beispielsweise bis zu 15 % größer, als bei der Stapelbauweise mit demselben TEG-Querschnitt. Dieser geometrische Vorteil ermöglicht größere Ausgangsleistungen und

Leistungsdichten. Darüber hinaus begünstigt die große Anzahl an hexagonalen HGWÜ die strömungstechnischen Eigenschaften, insbesondere den hydraulischen Durchmesser und den Gegendruck. Diese Bauweise ist konstruktiv aufwendiger als die Stapelbauweise. Dies zeigt sich unter anderem bei der Bündelung der Kühlmittelanschlüsse und der Leistungsausführung(-en) in einem Punkt. Zudem ist die Aufbringung einer homogenen Vorspannkraft auf die Module durch den runden Aufbau wesentlich komplexer. Dies kann zu kostenintensiven Lösungsvarianten führen, wie von [240] beschrieben. Um eine Kostenreduktion zu erreichen werden daher erstmals Modularisierungsansätze verwendet und Funktionsintegrationen berücksichtigt. Die hexagonalen HGWÜ werden einschließlich der Module, der elektrischen Verkabelung, beidseitiger thermischer Kontaktierung und KMWÜ-Rohr modular gefertigt. Das KMWÜ-Rohr ermöglicht eine teilintegrierte Modulkapselung. Diese Teilaufbauten werden kreisförmig in einem zylindrischen Gehäuse positioniert. In die Zwischenräume wird ein poröses und kompressibles Material integriert, wie z. B. ein offenzelliger Metallschaum. Dies stellt die KMWÜ-Struktur dar und ermöglicht gleichzeitig die Reduzierung von inneren Spannungen.

Durch die beschriebenen Ansätze und die Nutzung von Gleichteilen können die Fertigungskosten gering gehalten werden. Inwieweit die polygonale Bauweise Vorteile im Hinblick auf die Kosten-Nutzen-Relation aufweist, werden im Folgenden die Ergebnisse der ganzheitlichen Gesamtsystemsimulation und Bewertung zeigen (s. Abschnitt 6.4).

**Bypassintegration:** Dieselmotoren der Emissionsnorm Euro VI erreichen nach [33] Abgastemperaturen von über 800 °C bzw. zumindest die erforderlichen 650 °C während des Regenerationsprozesses der AGN. Bei stöchiometrischen Erdgasmotoren sind die Abgastemperaturen im Normalbetrieb bereits deutlich höher (s. Kapitel 4). Da die maximale Betriebstemperatur von NT- und HT-Modulen jeweils überschritten wird (vgl. Abschnitt 2.3.2.6), ist ein Bypass bei der Fahrzeugintegration erforderlich. Dieser reduziert bzw. unterbindet den zugeführten Abgasenthalpiestrom, sobald die Betriebstemperatur der Module droht, überschritten zu werden.

Es sind mehrere Variationen der Ausführung eines Bypasses einschließlich Klappe aus Arbeiten des Standes der Technik bekannt (vgl. z. B. [103, 118]). Die Kosten-Nutzen-optimierte Lösung dieser Arbeit sieht zwei Y-Rohrstücke zur Integration eines Bypassrohrstücks mit einer regelbaren runden Stellklappe vor (s. bspw. Teilabbildung E.1 (c)).

### 6.3.2. Stromführungskonzept und Auslegung der Wärmeübertrager

Zur Erzielung einer hohen Kraftstoffreduktion sind kompakte Wärmeübertrager mit hoher Leistungsdichte, d. h. große Wärmeströme pro Flächeneinheit, erforderlich (vgl. z. B. [72]). Diese sind hinsichtlich der dynamischen Fahrzeugrandbedingungen und der eingesetzten Module zu optimieren. Ziel ist es, durch die Auswahl einer geeigneten Stromführung sowie der Auslegung der Wärmeübertrager und ihrer inneren Strukturen



eine Effizienzsteigerung gegenüber dem Stand der Technik zu erreichen. Ansatzpunkte hierfür sind die Verringerung der Temperaturdifferenzen der WÜ-Oberflächen und das Erreichen eines hohen Wirkungsgrades (vgl. [113]) bei gleichzeitiger Reduzierung des Strömungswiderstandes.

Zur Bewertung der Effizienzsteigerung sind Wirkungsgrade zu definieren. Der thermische Wirkungsgrad eines Wärmeübertragers  $\eta_{\text{WÜ}}$  ist nach [113] definiert als das Verhältnis des übertragenen Wärmestroms  $\dot{Q}_h$  zum maximal möglichen  $\dot{Q}_{h,\text{max}}$  im stationären Zustand:

$$\eta_{\text{WÜ}} = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{Q}_{h,\text{max}}} = \frac{\dot{W}_i \cdot P_i}{\dot{W}_{\text{min}}} \text{ mit } i=(h, k) \text{ und } \dot{W}_{\text{min}} = [\dot{W}_h, \dot{W}_k] \quad (6.1)$$

Der Wärmekapazitätsstrom  $\dot{W}_i$  des heißen Stoffstroms  $h$  und des kälteren Stoffstroms  $k$  wird vereinfacht mit Hilfe der gemittelten spezifischen Wärmekapazität  $\bar{c}_{p,i}$ <sup>88</sup> ermittelt:

$$\dot{W}_i = \dot{m}_i \cdot \bar{c}_{p,i} \text{ mit } i=(h, k) \quad (6.2)$$

Die Betriebscharakteristiken  $P_i$ , d. h. die dimensionslose Temperaturänderung des jeweiligen Fluids  $i = (h, k)$ , ergeben sich zu:

$$P_h = \frac{\vartheta_{h,\text{ein}} - \vartheta_{h,\text{aus}}}{\vartheta_{h,\text{ein}} - \vartheta_{k,\text{ein}}} \text{ und } P_k = \frac{\vartheta_{h,\text{aus}} - \vartheta_{k,\text{ein}}}{\vartheta_{h,\text{ein}} - \vartheta_{k,\text{ein}}} \text{ mit } (0 \leq P_i \leq 1) \quad (6.3)$$

In Abhängigkeit von der Stromführung der beiden Medien, wie beispielsweise Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom, erfolgt die Bestimmung der Temperaturdifferenzen mit Hilfe der Ein- (ein) und Ausgangstemperaturen (aus) der Stoffströme. Der Wirkungsgrad wird in dieser Arbeit zudem in Form des Ausnutzungsgrades  $\epsilon_{\text{WÜ}}$  angegeben. Dieser ist für TEG-Systeme messtechnisch einfacher zu bestimmen und stellt das Verhältnis der abgasseitigen Wärmestromdifferenz vom WÜ-Eingang  $\dot{Q}_{\text{AG},\text{ein}}$  und WÜ-Ausgang  $\dot{Q}_{\text{AG},\text{aus}}$  zum verfügbaren Wärmestrom am WÜ-Eingang dar:

$$\epsilon_{\text{WÜ}} = \frac{\dot{Q}_{\text{AG},\text{ein}} - \dot{Q}_{\text{AG},\text{aus}}}{\dot{Q}_{\text{AG},\text{ein}}} = 1 - \frac{c_p|_{T_U}^{T_{\text{AG},\text{aus}}} \cdot T_{\text{AG},\text{aus}}}{c_p|_{T_U}^{T_{\text{AG},\text{ein}}} \cdot T_{\text{AG},\text{ein}}} \quad (6.4)$$

Für die Auslegung und die grundlegende Konzeptionierung der WÜ-Stromführung sind die Wirkungsgrade und die potentiellen Wirkungsgradunterschiede in Abbildung 6.4 dargestellt. Dabei ist die dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz  $\Theta$  nach [113] definiert als das Verhältnis der logarithmischen gemittelten Temperaturdifferenz (s. Gleichung 5.27) und der Differenz der Eintrittstemperaturen:

$$\Theta = \frac{\Delta T_{m,\text{log}}}{T_{h,\text{ein}} - T_{k,\text{ein}}} \text{ mit } (0 \leq \Theta \leq 1) \quad (6.5)$$

<sup>88</sup>Die gemittelte spezifische isobare Wärmekapazität lässt sich berechnen als:  $\bar{c}_{p,i} = \frac{h_{i,\text{ein}} - h_{i,\text{aus}}}{\vartheta_{i,\text{ein}} - \vartheta_{i,\text{aus}}}$ .

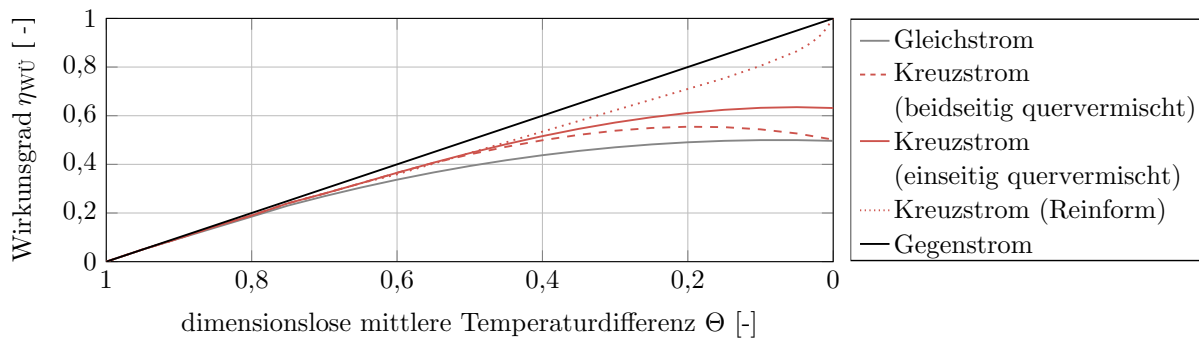


Abbildung 6.4.: Vergleich des Wirkungsgrades unterschiedlicher Stromführung von Wärmeübertragern, Abbildung i. A. a. [193]

Im Allgemeinen erreichen Gegenstrom-WÜ die höchsten Wirkungsgrade. Bei mittleren Temperaturdifferenzen von über 0,8 sind die Wirkungsgradunterschiede der verschiedenen Stromführungen vernachlässigbar. Als Vorgriff auf die weitere Arbeit liegen die Temperaturdifferenzen bei den entwickelten TEG im Bereich von 0,25–0,65. Daher wird in dieser Arbeit das Gegenstromkonzept berücksichtigt.

### Auswahl von Wärmeübertragerstrukturen

Bei Wärmeübertragern, bei denen ein Medium gasförmig und das andere flüssig ist, unterscheiden sich die Wärmekapazitäten der Medien pro Volumen erheblich. Um hohe TEG-Wirkungsgrade zu erzielen sollte der Volumenstrom des Kühlmittels geringer sein als der des Abgases. Darüber hinaus sollte insbesondere die Wärmeübertragerfläche der HGWÜ maximiert werden, z. B. durch eine Rippenstruktur.

Für eine zielführende WÜ-Konzeptionierung der TEG sollten diese nach Gleichung 6.1 hohe Wärmeströme ermöglichen. Dazu sind unter anderem große Wärmedurchgangskoeffizienten von Vorteil (s. Gleichung 5.27). Die Summanden in der Klammer der Gleichung 5.26 des Wärmedurchgangskoeffizienten repräsentieren die entscheidenden einzelnen Wärmewiderstände. Aus dieser Betrachtung von seriellen Widerständen wird deutlich, dass der Term mit dem höchsten Widerstand hemmende Auswirkungen auf den Wärmedurchgangskoeffizienten hat. Dementsprechend kann dieser nicht größer werden als der niedrigste Wärmeleitwert, d. h. der Kehrwert eines Wärmewiderstands. Folglich wird auf die Auslegung der HGWÜ bzw. präziser dessen innere Struktur zur Erhöhung des abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten ein Schwerpunkt gelegt. Neben den geometrischen Parametern wird die Werkstoffauswahl für den HGWÜ (z. B. Edelstahl, Nickel, Keramik) und den KMWÜ (z. B. Aluminium, Kupfer, Kunststoffe) für die zielführende Optimierung untersucht. Die korrosiven Anforderungen<sup>89</sup> des jeweiligen Fluids, die Wärmeleitfähigkeit und die Kostenschätzungen unter Annahme einer Serienfertigung haben dabei eine hohe Relevanz.

<sup>89</sup>Die hohen Betriebsstunden eines NFZ erhöhen die Anforderungen an die Langzeitstabilität eines TEG-Systems, wie z. B. Korrosionsbeständigkeit und thermomechanische Dauerbelastung, im Vergleich zum Beispiel zum Anwendungsbereich PKW.

Um den Lösungsraum zu reduzieren wurde als Ergebnis von Voruntersuchungen eine Vorauswahl von WÜ-Strukturen getroffen. Diese zeichnen sich durch eine effiziente Wärmeübertragung aus, d. h. hohe Wärmedurchgangskoeffizienten bei möglichst geringen Strömungswiderständen und gleichzeitig geringer Dichte:

- **gerade Rippenstrukturen** (als Referenz)
- **versetzte Rippenstrukturen**
- **(Mikro-)Kanalstrukturen** (ausschließlich KMWÜ)
- **offenzellige Metallschäume und Drahtstrukturen**
- **topologieoptimierte Werkstoffstrukturen**

Gerade Rippenstrukturen dienen als Referenz der weiteren Untersuchung, da sie eine gute Kosten-Nutzen-Relation aufweisen (s. Abschnitt 2.3.2.7). Versetzte Rippenstrukturen bieten thermodynamische Vorteile bei höheren Fertigungskosten. Eigene Voruntersuchungen von klassischen *Offset Strip Fins* haben keine vorteilhaften Lösungen im Sinne der Kosten-Nutzen-Relation ergeben, da sich insbesondere der Strömungswiderstand als zu hoch erwiesen hat. Unstetig versetzte Rippenstrukturen haben jedoch ein höheres Entwicklungspotenzial (s. z. B. Abbildung 5.19). Weitere blechumformbasierte Strukturen (s. Abbildung 2.10) werden nicht berücksichtigt, da nach eigenen Voruntersuchungen keine Kosten-Nutzen-Vorteile erzielt wurden und auch keine im Stand der Technik bekannt sind. Zumeist werden thermodynamische oder strömungsmechanische Vorteile aufgrund der höheren Fertigungskosten negiert.

Für die KMWÜ werden Mikrokanalstrukturen untersucht (vgl. [103, 118]), da sie thermodynamische Vorteile insbesondere für flüssige Kühlmittel bieten. Sie zeichnen sich durch ihre geringe Dichte und hohe Korrosionsbeständigkeit aus.

Offenzellige Metallschäume lassen sich aus unterschiedlichen Werkstoffen wie z. B. Aluminium, Kupfer und Edelstähle sowie in verschiedenen Fertigungsverfahren herstellen. Die Porosität liegt typischerweise im Bereich von 65–98 % bei einem Zelldurchmesser im Bereich von 0,3–5 mm bzw. einer Porenweite im Bereich von 10–88 PPI. Nach [217] liefern TEG mit Metallschäumen die besten Ergebnisse bei Wahl einer großen Porenweite. Insbesondere bei geringen Abgastemperaturen können nach [216] die Wärmeströme des HGWÜ durch den Einsatz von Metallschäumen im Vergleich zu einer Berippung deutlich erhöht werden. Drahtstrukturen sind für den KMWÜ als poröse Struktur vorteilhaft in Kombination mit dem hochintegrierten Verspannkonzentrat der TEG-Bauweise nach [72].

Topologieoptimierte Werkstoffstrukturen, die mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt werden, bieten eine höhere Kompaktheit (Übertragerfläche-Volumen-Verhältnis) als die bekannten rippenbasierten Strukturen (s. Abschnitt 2.3.2.7). Strömungsoptimierte Formen zur gezielten Erzeugung turbulenter Strömungen und damit zur Erreichung hoher Wirkungsgrade sind möglich. Bei additiven Fertigungsverfahren erhöht die Komplexität bei der Formgebung nicht automatisch die Bauteilkosten (vgl. [242, 243]).

**HGWÜ-Struktur:** Für die Auswahl der optimalen HGWÜ-Struktur werden die Ergebnisse der CFD-Simulationsumgebungen verwendet (s. Abschnitt 5.3.1). Um experimentelle Validierungen und Vergleiche zu ermöglichen wird ein TEG-Referenzaufbau definiert. Dieser ist charakterisiert durch einen einflutigen TEG in Stapelbauweise, d. h. einen HGWÜ, zwei Modulebenen, zwei KMWÜ und dazwischenliegenden thermischen Kontaktierungen (s. Abbildung 7.1). Die Modulfläche je HGWÜ-Seite beträgt  $100 \times 100 \text{ [mm}^2\text{]}$ . Für die KMWÜ werden eine Aluminiumlegierung und für den HGWÜ zunächst nur hitzebeständige Edelmehle verwendet.

Die CFD-Simulationsergebnisse der untersuchten HGWÜ-Strukturen sind anhand der ausgewählten Zielgrößen des Gegendrucks  $\Delta p_{\text{HGWÜ}}$  über dem Wärmestrom in Abbildung 6.5 dargestellt. Der Wärmestrom ( $\dot{Q}_h = \dot{H}_{\text{AG,ein}} - \dot{H}_{\text{AG,aus}}$ ) ist nach Gleichung 5.22 als Enthalpiestromdifferenz des Abgases vor und nach dem TEG definiert. Die Punkte stellen Pareto-optimale Lösungen dar und die Hilfslinien veranschaulichen die sich daraus ergebenden Pareto-Fronten. Topologieoptimierte Strukturen erweisen sich besonders vorteilhaft durch die geringen Gegendrücke. Die ermittelten Wärmeströme sind jedoch begrenzt. Kompromisslösungen bieten gerade und versetzte Rippenvarianten. Metallschäume sind die ungünstigste Variante in Bezug auf die beiden Zielgrößen. Weitere Betriebscharakteristiken der HGWÜ-Strukturauswahl sind den Abbildungen D.14 und D.15 im Anhang zu entnehmen. Eine Auswahl der vielversprechendsten HGWÜ-Strukturen wird im Fortgang der Arbeit experimentell realisiert, um die Simulationsergebnisse zu validieren (s. Abschnitt 7.1.1). Eine optimale Lösungsvariante ist auf Basis der bisherigen Ergebnisgrößen nicht zu erkennen. Um den Lösungsfindungsprozess zu erleichtern wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Dabei werden die genannten und weitere Zielgrößen mit Relevanz für die ganzheitliche Gesamtsystemsimulation berücksichtigt.

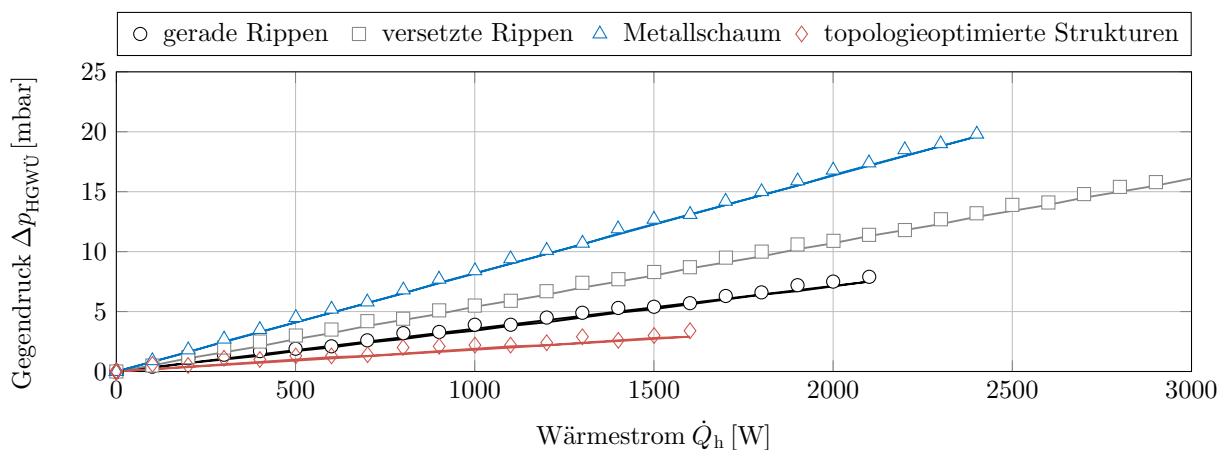


Abbildung 6.5.: Simulationsergebnisse der untersuchten HGWÜ-Strukturen  
(Rdb.:  $\vartheta_{\text{AG,ein}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\dot{m}_{\text{AG}} = 0,01 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{\text{KM,ein}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\dot{V}_{\text{KM}} = 0,25 \text{ dm}^3/\text{s}$ )

Grundlage der Analyse bildet die additive multiattributive Wertefunktion  $v(A)$ :

$$v(A) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot v_i(A_i) \quad (6.6)$$

Jeder Alternative wird ein Wert zwischen 0 bis 4 Punkten nach [244] in Abhängigkeit von den Ausprägungen der Bewertungskriterien zugewiesen. Der Gesamt- bzw. Nutzwert jeder Alternative  $A$  wird anhand der Summe der jeweiligen Gewichtung  $\omega_i$  multipliziert mit dem jeweiligen Einzelwert  $v_i$  ermittelt. Die Ergebnisse der Bewertung werden in Tabelle 6.4 dargestellt. Die Gewichtung der HGWÜ-Strukturen basiert auf den Hauptzielen dieser Arbeit (s. Abschnitt 3.2). Daher liegt der Schwerpunkt auf der Kraftstoffreduktion, dem Wirkungsgrad und den Kosten. Eine geringe Masse aufgrund einer niedrigen Dichte der HGWÜ-Komponenten und ein niedriger abgasseitiger Druckverlust verringern die negativen Effekte des TEG und begünstigen somit die Kraftstoffreduktion. Da die Ergebnisse der Modellierung der Fahrzeugwechselwirkungen darauf hindeuten, dass der Druckverlust einen vergleichsweise größeren negativen Effekt darstellt als die zusätzliche TEG-Masse (s. Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2.2), wird eine entsprechende Gewichtung vorgenommen. Aufgrund des Hauptziels einer niedrigen Amortisationszeit wird eine hohe Priorität auf hohe Wirkungsgrade und niedrige Kosten gelegt. Als übergeordnetes Ergebnis der Bewertung auf Komponentenebene weisen gerade Rippen den höchsten Nutzwert auf, gefolgt von den versetzten Rippen. Die weiteren beiden Varianten folgen mit bemerkenswertem Abstand.

Tabelle 6.4.: Bewertung von HGWÜ-Strukturen mit Hilfe der Nutzwertanalyse, Punktebewertung i. A. a. [244] (Höchstbewertungen bzw. sehr gut: 4 Punkte und grau hinterlegt)

Merkmale	Fz.	Gw. $\sum \omega_i=1$	Lösungsvariante							
			gerade Rippen		versetzte Rippen		Metall-schaum		topologieopt. Strukturen	
			$v_1$	$\omega_i \cdot v_1$	$v_2$	$\omega_i \cdot v_2$	$v_3$	$\omega_i \cdot v_3$	$v_4$	$\omega_i \cdot v_4$
Dichte	$\rho$	0,1	2	0,2	1	0,1	4	0,4	3	0,3
Druckverlust	$\Delta p_{\text{HGWÜ}}$	0,3	3	0,9	2	0,6	1	0,3	4	1,2
Wirkungsgrad	$\eta_{\text{HGWÜ}}$	0,25	2	0,5	4	1	3	0,75	1	0,25
Temperaturdifferenz	$\Delta T_m$	0,05	4	0,2	4	0,2	3	0,15	3	0,15
Temperaturvergl.	$\frac{\Delta T}{l_{\text{HGWÜ}}}$	0,05	1	0,05	2	0,1	4	0,2	2	0,1
Foulingneigung	$R_f$	0,05	4	0,2	2	0,1	1	0,05	3	0,15
Kosten	$K_{\text{HGWÜ}}$	0,2	4	0,8	3	0,6	2	0,4	0	0
Nutzwert (Summe)			<b>2,85</b>		2,7		2,25		2,15	
Rangfolge			<b>1</b>		2		3		4	

**KMWÜ-Struktur:** Wie bereits beschrieben, ist die Auswahl der optimalen KMWÜ im Vergleich zum HGWÜ von untergeordneter Bedeutung. Für den KMWÜ werden ausschließlich gerade Rippen als Rippenstruktur weiter untersucht (s. Abbildung 6.2). Eigene Simulationsstudien haben gezeigt, dass eine Mikrokanalstruktur im Vergleich zu geraden Rippenstrukturen bei gleichen äußeren geometrischen Abmessungen und

fahrzeugtypischen Randbedingungen Vorteile bei der Wärmeübertragung von bis zu 10 % sowie einem geringeren Gegendruck von bis zu 5 % aufweist. Gegenüber Drahtstrukturen sind die Vorteile mit bis zu 15 % und bis zu 40 % noch ausgeprägter. Die letztgenannte Variante hat jedoch trotz dieser Nachteile Vorteile bei der Kosten-Nutzen-Relation auf Systemebene, sofern die beschriebene Funktionsintegration erfolgt. Der KMWÜ kann die Funktionen der Wärmeabfuhr und die Reduzierung der inneren mechanischen Spannungen im TEG-Aufbau übernehmen. Als Werkstoff wird die Aluminiumlegierung AlMg<sub>1</sub> nach (fertigungs-)technischen und wirtschaftlichen Kriterien als vorteilhaft ausgewählt (vgl. [22, 32, 59, 119]).

### Zusammenfassung

HGWÜ mit geraden Rippenstrukturen haben sich auf Komponentenebene als vorteilhaft erwiesen. Versetzte Rippenstrukturen sind eine geringfügig benachteiligte Alternative. Offenzellige Metallschäume haben eine geringe Dichte und bieten eine gute Temperaturvergleichmäßigung an der Oberfläche des WÜ-Rohrs, wodurch laut [218] hohe elektrische TEG-Bruttoleistungen erzielt werden können. Insbesondere bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten werden jedoch geringe Nettoleistungen erzielt, da die Schäume vergleichsweise hohe Strömungswiderstände besitzen. Topologieoptimierte WÜ-Strukturen haben den Vorteil geringer Strömungswiderstände. Dies ist durch die Optimierungsstrategie und Gewichtung der Zielkriterien begründet. Die Minimierung des Strömungswiderstandes bietet ein höheres Potential zur Kraftstoffreduktion als beispielsweise die Minimierung des Bauteilgewichtes. Im Allgemeinen haben sich die Restriktionen der additiven Fertigung des Standes der Technik als unerwarteter Nachteil herausgestellt (vgl. [233]). Vorteilhafte geometrische Freiheitsgrade konnten nicht genutzt werden. Neben hitzebeständigen Edelstählen wird auch Nickel als Werkstoffalternative mit hoher Wärmeleitfähigkeit weiter untersucht. Damit kann die TEG-Leistung je nach Auslegung und Betriebspunkt im Bereich von 5–25 % gesteigert werden. Nachteilig sind die höheren Materialkosten und die geringe Langzeitstabilität. Für Oberflächenbeschichtungen konnten keine Kosten-Nutzen-Vorteile nachgewiesen werden (bei Schichtdicken  $\leq 200 \mu\text{m}$ ). Die höhere Korrosionsbeständigkeit ist jedoch vorteilhaft. Der Aspekt der Langzeitstabilität, wie z. B. die Neigung der Bildung von Ablagerungen (z. B. Alterung, Fouling), wurde bei der Bewertung der WÜ-Strukturen mit geringer Priorität berücksichtigt (s. Tabelle 6.4).

Mikrokanalstrukturen haben sich bei den KMWÜ aus thermodynamischer und strömungsmechanischer Betrachtungsweise als die vorteilhafteste Variante herausgestellt. Trotz der Nachteile auf Komponentenebene bieten komprimierbare poröse Strukturen, wie z. B. Drahtstrukturen, aufgrund der beschriebenen Funktionsintegration Vorteile in der Kosten-Nutzen-Relation auf Gesamtsystemebene.

Eine abschließende Bewertung der WÜ-Strukturen kann erst durch die ganzheitliche Bewertung der TEG-Systeme auf Gesamtfahrzeugebene im Fortgang der Arbeit erfolgen.

### 6.3.3. Thermoelektrische Modulbauweisen

Aufgrund des Mangels an konkurrenzfähigen Alternativen (s. z. B. Abschnitt 6.3.1), wird in dieser Arbeit die planare Modulbauweise untersucht. Bei der Konzeptionierung des optimalen TEM liegt der Schwerpunkt auf der Auswahl des geeigneten TE-Materials für die jeweilige Zielanwendung. Auswahlkriterien sind neben der Gütezahl unter anderem die thermische, mechanische und chemische Stabilität, die Langzeitstabilität, die Rohstoffverfügbarkeit, die Materialparameter wie beispielsweise die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit, die Kosten, die Verfügbarkeit, die (großtechnische) Herstellung, mögliche Lieferanten oder Hersteller, die Toxizität sowie die Umweltverträglichkeit (vgl. bspw. [32, 72, 245, 246]). Eine Übersicht der vielversprechendsten NT- und HT-Materialien (s. Abschnitt 2.3.2.5) ist in Tabelle 6.5 aufgeführt. Bei den derzeit zur Verfügung stehenden TE-Materialien stellen Bismuttellurid für NT-Anwendungen sowie Halb-Heusler-Legierungen und Skutterudite für HT-Anwendungen die geeignetsten

Tabelle 6.5.: Auswahlkriterien für thermoelektrische Materialien, Angaben nach eigener Recherche und aus [196, 197, 245, 246] (grau hinterlegt sind kritische Kriterien)

Materialklasse	Bismut-tellurid	Bleitellurid / LAST	Magnesium-Silicide	höhere Magnesium-Silicide	Halb-Heusler	Skutterudite	Silizium / Silizium-Germanium
Reifegrad	Serienentwicklung	Serienentwicklung	Grundlagenforschung	Grundlagenforschung	Prototypenstadium	Prototypenstadium	Serienentwicklung
Basismaterial	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	PbTe / AgPb <sub>m</sub> SbTe <sub>m+2</sub>	Mg <sub>2</sub> Si	Mg <sub>2</sub> Sn <sub>x</sub> Si <sub>1-x</sub>	verschiedene	CoSb <sub>3</sub>	Si / SiGe
T <sub>HS</sub> [K]	<500	300 – 900	300 – 900	300 – 900	300 – 1000	300 – 900	600 – 1300
zT <sub>max</sub> n-/ p-Typ bei Temperatur [K]	1 / 1,4 430	1,3 / 1,8 750	0,5 – 1,1 800	0,6 – 0,8 800	0,8 700 – 1000	1,7 / 1 750	0,1 – 0,7 800 – 1300
Thermische Stabilität	<520 (650) K	Kapselung notwendig	unklar	instabil	akzeptabel	Kapselung notwendig	akzeptabel
Mechanische / chemische Stabilität	gut / akzeptabel	akzeptabel / „	akzeptabel/ „	akzeptabel / „	gut / akzeptabel	akzeptabel / „	akzeptabel / „
Langzeitstabilität	akzeptabel	akzeptabel	unbekannt	unbekannt	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel
Kontaktierung	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	unbekannt	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel
Rohstoffpreis [ $\frac{USD}{kg}$ ]	110 – 190	60 – 200	4 – 20	>4	25 – 250	10 – 37	3 / 150 – 420
Verfügbarkeit Rohmaterial *	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	kritisch
Kritisches Element	Te	Ag, Te	Ge	Ge	Hf	Yb, Ce, In	Ge
Produktionstechnologie *	akzeptabel	akzeptabel / unklar	unbekannt	akzeptabel	akzeptabel	akzeptabel	unbekannt
Möglicher Lieferant (Material & Modul)	zahlreiche	zahlreiche	Romny, Komatsu	unbekannt	Yamaha, Vacuum-schmelze, Isabellenhütte, Toshiba, GMZ Energy	LG, Treibacher, Corning, Evident, Marlow, TEGma, Tellurex	unbekannt
Umweltverträglichkeit	unklar	giftig (Bleianteil)	akzeptabel	akzeptabel	unklar	akzeptabel	akzeptabel

\* Serienproduktion

Materialklassen dar. Diese haben keine kritischen Kriterien wie die weiteren Materialklassen, die in der Tabelle ausgegraut sind. Der erzielbare Wirkungsgrad und die Leitungsdichte steigen proportional zu den möglichen Heiseitentemperaturen ( $T_{HS}$ ), angelehnt an den Carnot-Wirkungsgrad. Die vergleichsweise hohen Gütegrade ( $zT_{max}$ ) von Bismuttellurid sind bemerkenswert (s. Teilabbildung 6.6 (d)), jedoch sind die Rohstoffpreise<sup>90</sup> mit mindestens 110 USD/kg im Vergleich zu hafniumfreiem Halb-Heusler und Skutterudit mit jeweils 10 USD/kg hoch (vgl. [72, 197, 245]). Bei Letztgenannten wird auf kostenintensive Elemente wie z. B. Tellur ( $\approx 50$  USD/kg), Selen ( $\approx 150$  USD/kg), Germanium ( $\approx 1500$  USD/kg) und Hafnium ( $\approx 1800$  USD/kg) verzichtet. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Menge des eingesetzten TE-Materials im Vergleich zum Stand der Technik deutlich reduziert wird, tritt die Thematik der Kosten und der Verfügbarkeit der Rohstoffe in den Hintergrund (vgl. [72]).

Anhand der drei ausgewählten Materialklassen wird der Einfluss des TE-Materials auf die Modulauslegung erläutert. Typische Gütezahlen von thermoelektrischen Materialien nach Gleichung 2.8 sind Abbildung 2.6 zu entnehmen. Für die ausgewählten Thermoelektrika im Kleinserienmastab dieser Arbeit hat Bismuttellurid bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma_{n,p}$  vorteilhafte Materialeigenschaften, wie in Teilabbildung 6.6 (a) dargestellt. Der Einfluss von dieser ist für die Modulauslegung jedoch gering. Der Seebeck-

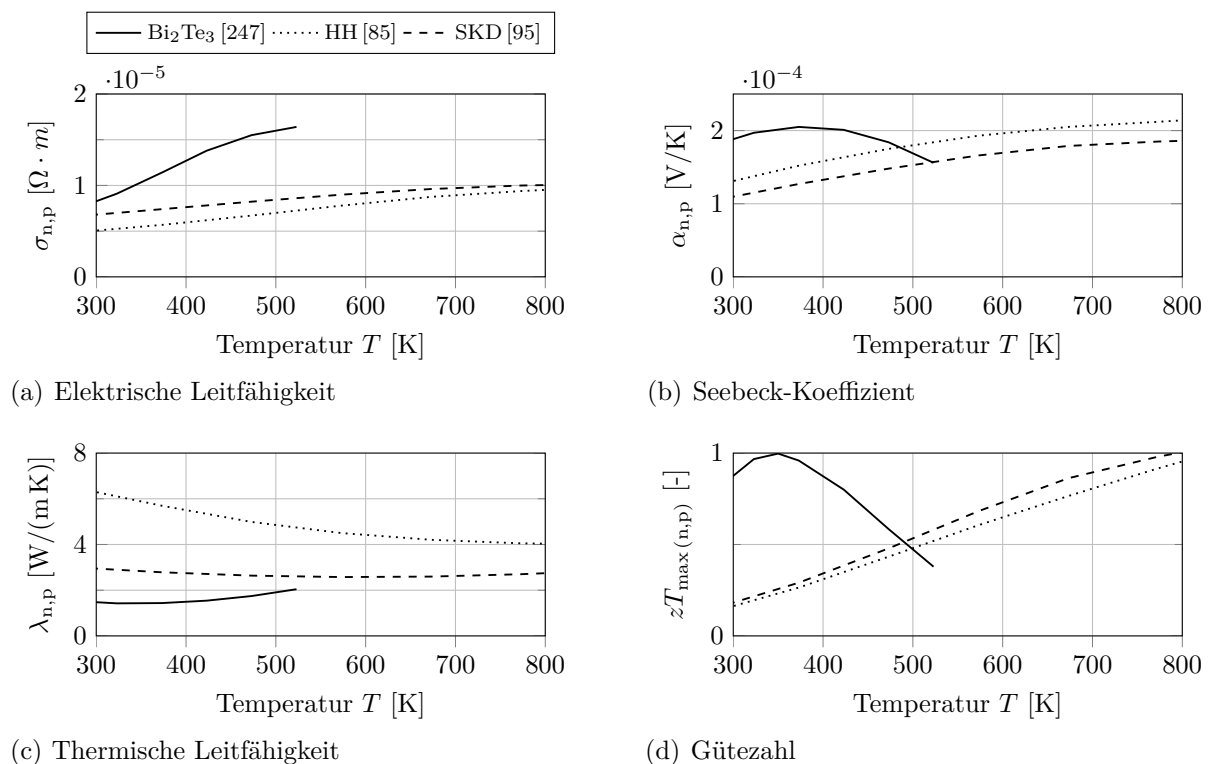


Abbildung 6.6.: Materialeigenschaften ausgewählter Thermoelektrika für Kleinserien

<sup>90</sup>Die Kosten wurden zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit ermittelt und entsprechen Preisen aus der Literatur sowie von Rohstoffbörsen. Die Werte unterliegen Kursschwankungen.



Koeffizient  $\alpha_{n,p}$  hat großen Einfluss auf die Gütezahl und damit den Wirkungsgrad des Moduls (s. Gleichungen 2.8 und 2.12). Die thermische Leitfähigkeit  $\lambda_{n,p}$  von Bismuttellurid beträgt bis zu  $2 \text{ W}/(\text{m K})$  und die von Halb-Heusler-Legierungen bis zu  $6,2 \text{ W}/(\text{m K})$ , wie in Teilabbildung 6.6 (c) zu erkennen ist. Die Wärmeleitfähigkeit hat einen erheblichen Einfluss auf die thermische Auslegung sowie Anpassung des TEM und damit des TEG. Für die Modulauslegung sind in erster Linie die Betriebstemperaturen als Randbedingungen entscheidend. Je höher die Temperatur und die Temperaturdifferenz sind, desto kleiner müssen im Allgemeinen die geometrischen Abmessungen (Länge  $\times$  Breite) gewählt werden. Typische HT-Module haben beispielsweise Abmessungen von  $30 \times 30 \text{ [mm]}$ , weil ansonsten die Langzeitstabilität aufgrund zu hoher thermomechanischer Spannungen nicht gegeben ist. Allgemein gilt, dass je größer die Abmessungen gewählt werden, die flächenspezifischen Kosten sinken und die Leistungsdichte steigt. Letztgenanntes wird zum Beispiel durch die Erhöhung des Füllgrades erreicht. Bei der Dimensionierung der quaderförmigen Schenkel der planaren Modulbauweise hat insbesondere die Schenkelhöhe neben dem Füllgrad entscheidenden Einfluss auf den thermischen Widerstand des Moduls. Um TE-Material und Kosten zu reduzieren sollte zum Beispiel ein NT-Modul der kostenintensiven Materialklasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  Schenkel mit kleinen geometrischen Abmessungen und einem niedrigen Füllgrad aufweisen. Die vergleichsweise geringe thermische Leitfähigkeit von  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  begünstigt hohe Temperaturdifferenzen. Weitere Modulkostentreiber sind neben dem TE-Material und der Fertigungsprozesse die eingesetzten Isolatoren aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\approx 10 \text{ USD/kg}$ ) oder  $\text{AlN}$  ( $\approx 60 \text{ USD/kg}$ ).

Mittelfristig scheinen Gütezahlen der nutzfahrzeugtauglichen TE-Materialklassen im Bereich von maximal 1,5–2 limitiert zu sein. Damit lassen sich in der Theorie maximale thermoelektrische Wirkungsgrade im Bereich von 8–9% erreichen (Rdb.:  $\vartheta_{\text{KS}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\vartheta_{\text{HS}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ; s. Gleichung 2.9). Um bereits mit den aktuell verfügbaren Gütezahlen von maximal eins (s. Teilabbildung 6.6 (d)) höhere Wirkungsgrade zu erzielen, sind segmentierte Modulschenkel von Vorteil. Unter den gleichen Randbedingungen können diese Wirkungsgrade von bis zu 10,5% erzielen (s. Abbildung 7.3; vgl. [139]). Die Schenkelsegmentierung in zwei Stufen, jeweils aus der effizientesten NT- und HT-Materialklasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und SKD, weisen die beste Kosten-Nutzen-Relation auf. Die Auslegung von Modulen mit segmentierten Schenkeln ist komplex, da neben den Temperaturen an den Schenkelenenden zudem die Temperaturen zwischen den Segmenten zu berücksichtigen sind (s. Abschnitt 5.3.2).

Für die NT-Anwendung im Diesel-NFZ werden aufgrund der beschriebenen Vorteile im weiteren Verlauf der Arbeit  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -Module und für die HT-Anwendung im Erdgas-NFZ segmentierte Module der Materialklassen  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und SKD berücksichtigt.

### 6.3.4. Thermische Kontaktierung

Die Auswahl und Auslegung der thermischen Kontaktierung ist von untergeordneter Bedeutung (s. Tabelle 6.3). Dennoch gilt es, auch für diese Komponente die Kosten-Nutzen-optimale Lösung zu finden. Bei den vorgestellten Bauweisen in Abschnitt 6.3.1 werden kraftschlüssige Verbindungen berücksichtigt. Für die Auswahl und Auslegung des thermischen Kontakts zwischen den beiden Festkörpern gibt es eine Vielzahl an potentiellen Lösungsvarianten (vgl. bspw. [32]). Der Wärmeübergang und der daraus resultierende thermische Kontaktwiderstand werden durch die Art und Beschaffenheit der beiden Oberflächen, durch die Anzahl und Größe der Kontaktstellen sowie durch die Geometrie der Spalte und des Füllmediums beeinflusst. Für einen optimalen Wärmeübergang ist eine Oberflächenbehandlung, wie z. B. Polieren und/oder Schleifen von Vorteil. Für die kostenoptimale Fertigung von Serienbauteilen, die Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen und unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten im Betrieb ist diese Variante jedoch nicht realisierbar. Daher ist ein geeignetes Wärmeleitmittel erforderlich. Zur Auswahl stehen folgende Wärmeleitmittel:

- Wärmeleitpasten
- Wärmeleitkleber
- Wärmeleitpads bzw. -folien

Die Wärmeleitmittel weisen anisotrope Materialeigenschaften auf, die beim Auswahlprozess berücksichtigt werden. Konventionelle Wärmeleitpasten besitzen eine typische Wärmeleitfähigkeit im Bereich von rund 1–10 W/(m K) in der Schichtebene (xy-Ebene) anisotrop zur Wärmespreizung. Wärmeleitpasten aus Flüssigmetall haben höhere Werte im Bereich von rund 30–80 W/(m K). Diese bestehen in der Regel aus Gallium in Kombination mit zusätzlichen Metallen wie Indium, Rhodium, Silber, Zink und Zinn. Wärmeleitkleber haben üblicherweise eine Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 1–2 W/(m K) und spezielle Ausführungen bis zu 5 W/(m K). Die Einsatztemperatur ist in der Regel bei maximal 300 °C begrenzt und kann daher ausschließlich auf der Kaltseite im TEG zum Einsatz kommen. Wärmeleitpads bzw. -folien haben die höchste Wärmeleitfähigkeit im Bereich von typischerweise 200–400 W/(m K). Die PGS-Graphitfolie des Herstellers Panasonic weist Werte von bis zu 1950 W/(m K) senkrecht zur Folienebene (z-Richtung) auf, wie in Tabelle 6.6 beispielhaft ersichtlich ist. In der Folienebene liegt dieser Wert in Abhängigkeit vom Temperaturniveau und Anpressdruck im Bereich von 5–16 W/(m K).

Tabelle 6.6.: Thermische und physikalische Eigenschaften ausgewählter Wärmeleitfolien

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Kerafol 90/10	Panasonic PGS
Thermischer Widerstand	$r_{th}$	[cm <sup>2</sup> K/W]	0,36	0,07
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_z$ (xy-Ebene)	[W/(m K)]	5,5 (200)	16 (1950)
Einsatztemperatur (kurzzeitig)	$\vartheta_{h,max}$	[°C]	–40 – 500	–40 – 400 (500)
Dicke	$d$	[mm]	0,15 – 0,2	0,1

Die Herstellerangaben konnten experimentell validiert werden. Der thermische Widerstand nimmt bei allen Wärmeleitmitteln ab einem Anpressdruck von 0,7 MPa nicht mehr wesentlich ab. Im TEG werden höhere Drücke von über 1 MPa erreicht, weil die Module dies erfordern (s. Abbildung D.3 im Anhang). Wärmeleitfolien bieten zudem Kostenvorteile ( $\approx 50\text{--}100$  USD/kg, je nach Ausführung) gegenüber Wärmeleitpasten oder -klebern ( $\approx 150\text{--}2000$  USD/kg, je nach Zusammensetzung).

Für die TEG dieser Arbeit werden aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit, Langlebigkeit und Zuverlässigkeit ausschließlich graphithaltige Wärmeleitfolien (vgl. [22, 72]) des Herstellers Panasonic verwendet. Die Fertigungskomplexität ist aufgrund des einfacheren und damit kostengünstigeren Applikationsprozesses geringer. Außerdem sind Pasten und Klebstoffe anfälliger für Defekte bei der flächigen Auftragung (z. B. Luftpinschlüsse).

### 6.3.5. Kapselungsarten

Thermoelektrische Materialien neigen bei hohen Temperaturen unterschiedlich stark zur Korrosion. Materialklassen mit einer vergleichsweise hohen Oxidationsbeständigkeit sind  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und HH. Dennoch ist eine Kapselung der thermoelektrisch aktiven Elemente in der TEG-Struktur zwingend erforderlich, um einen zuverlässigen und langzeitstabilen Betrieb zu ermöglichen. Aus dem Stand der Technik sind folgende Arten der Kapselung bekannt, um eine Schutzgasatmosphäre oder ein Vakuum zu erzeugen:

- Kapselung der Schenkel (vgl. bspw. [105, 203])
- Einzelmodulkapselung (vgl. bspw. [104])
- Teilsystemkapselung (vgl. bspw. [32, 248])
- Systemkapselung (vgl. bspw. [72])

Für die Kapselung der Schenkel eines Moduls mit einer silikonhaltigen oder keramischen Paste (s. Abbildung 7.11), der Einbringung einer temperaturbeständigen Matrixstruktur oder der Aufbringung einer Beschichtung, z. B. aus Glaskeramik, sind keine dauerhaften Versiegelungsvarianten bekannt.

Unter der Lösungsvariante der Einzelmodul- und Teilsystemkapselung wird verstanden, dass eine vorzugsweise dünn-schichtige Folie aus Aluminium oder Edelstahl das Modul oder mehrere Module einer Modulebene mindestens zur Hälfte umschließt. Diese Lösungen bieten den Vorteil einer einfacheren modularen Herstellung des Systems. Insbesondere unter thermodynamischen und auch Kostengesichtspunkten sind diese Lösungen jedoch nachteilig. Eine eigene experimentelle Untersuchung der Einzelmodulkapselung wurde durchgeführt. Bei Nennleistung ist der Wärmestrom im Falle des gekapselten Moduls um 20 % geringer als bei dem identischen Modul ohne Kapselung. Der Grund dafür sind die erhöhten parasitären Wärmeströme durch die Verkapselung. Der Wirkungsgrad und die umgesetzte elektrische Leistung sind entsprechend geringer. Im maximalen Betriebspunkt reduziert sich das Potential um bis zu 30 %. Daraus lässt sich ableiten, dass die Einzelmodul- und Teilsystemkapselung für hocheffiziente TEG ungeeignet sind. Zumal Zusatzkosten für

die einzelnen Kapselungen erforderlich werden.

Die einzige Lösung ohne wesentliche Nachteile ist daher die Systemkapselung, d. h. die Integration eines separaten Volumens in die TEG-Bauweise, welche die Modulebenen umschließt. Eine Schutzgasatmosphäre ist ausreichend und nicht derart komplex sowie kostenintensiv wie ein Vakuum.

### 6.3.6. Verspannungskonzepte

Als eine Anforderung für einen optimalen Einsatz von planaren thermoelektrischen Modulen wird ein Mindestanpressdruck von 1 MPa gefordert (vgl. z. B. [203]). Dieser verbessert die Kontaktierung zwischen Heiß- und Kaltseite. Darüber hinaus muss für kostenoptimierte TEG mit Fertigungstoleranzen bei der Ebenheit, Parallelität der WÜ und Module gerechnet werden. Bei Serienmodulen ist mit Toleranzen von bis zu  $\pm 0,2$  mm zu rechnen, was durch die TEG-Bauweise kompensiert werden muss. Die Problemstellung besteht darin, eine möglichst homogene Vorspannung auf die Module im TEG mittels einer externen Kontaktkraft aufzubringen (vgl. z. B. [103]) und dabei die Systemkosten zu minimieren. Im Stand der Technik sind die folgenden Verspannungskonzepte bekannt:

- nicht integriert (Einzelmodulverspannung; vgl. bspw. [59, 99])
- teilintegriert (vgl. bspw. [22, 32, 103, 118])
- hochintegriert (vgl. bspw. [72, 119])

Mit steigendem Integrationsgrad verbessert sich die Kosten-Nutzen-Relation des Systems. In dieser Arbeit wird das hochintegrierte Verspannungskonzept in Anlehnung an die Arbeit von [72] umgesetzt, da keine nennenswerten Nachteile bekannt sind. Bei dieser Lösungsvariante wird ein komprimierbares Material, wie z. B. eine Drahtstruktur oder eine offenzellige Schaumstruktur in die KMWÜ eingelegt. Diese reduziert die inneren Spannungen beim Verspannen und im Betrieb des TEG. Die Bezeichnung als hochintegriert ergibt sich aus den integrierten Funktionen der Wärmeleitung und der Aufnahme von externen Kräften. Zudem entfallen sämtliche zusätzliche Feder- und Befestigungselemente, die bei der teilintegrierten Variante notwendig sind (vgl. [22, 32, 59, 103, 118, 129]). Zu den Nachteilen gehören geringere Wirkungsgrade der KMWÜ und ein erhöhter Gegendruck im Vergleich zu alternativen KMWÜ-Strukturen, wie zum Beispiel Mikrokanäle (s. Abschnitt 6.3.2). Aufgrund der geringen negativen Einflüsse auf das Gesamtsystem sind diese Nachteile vernachlässigbar (s. Abschnitt D.7.6.5 im Anhang).

### 6.3.7. Elektrische Modulverschaltung

Aufgrund der dynamischen Temperaturen im Abgasstrang von NFZ ist mindestens eine Leistungselektronik einschließlich maximale Leistungspunkt-Suche MPPT und DC/DC-Wandler erforderlich, um eine zuverlässige elektrische Einspeisung in das Bordnetz zu gewährleisten. Die separate Leistungsregelung und Spannungswandlung jedes einzelnen

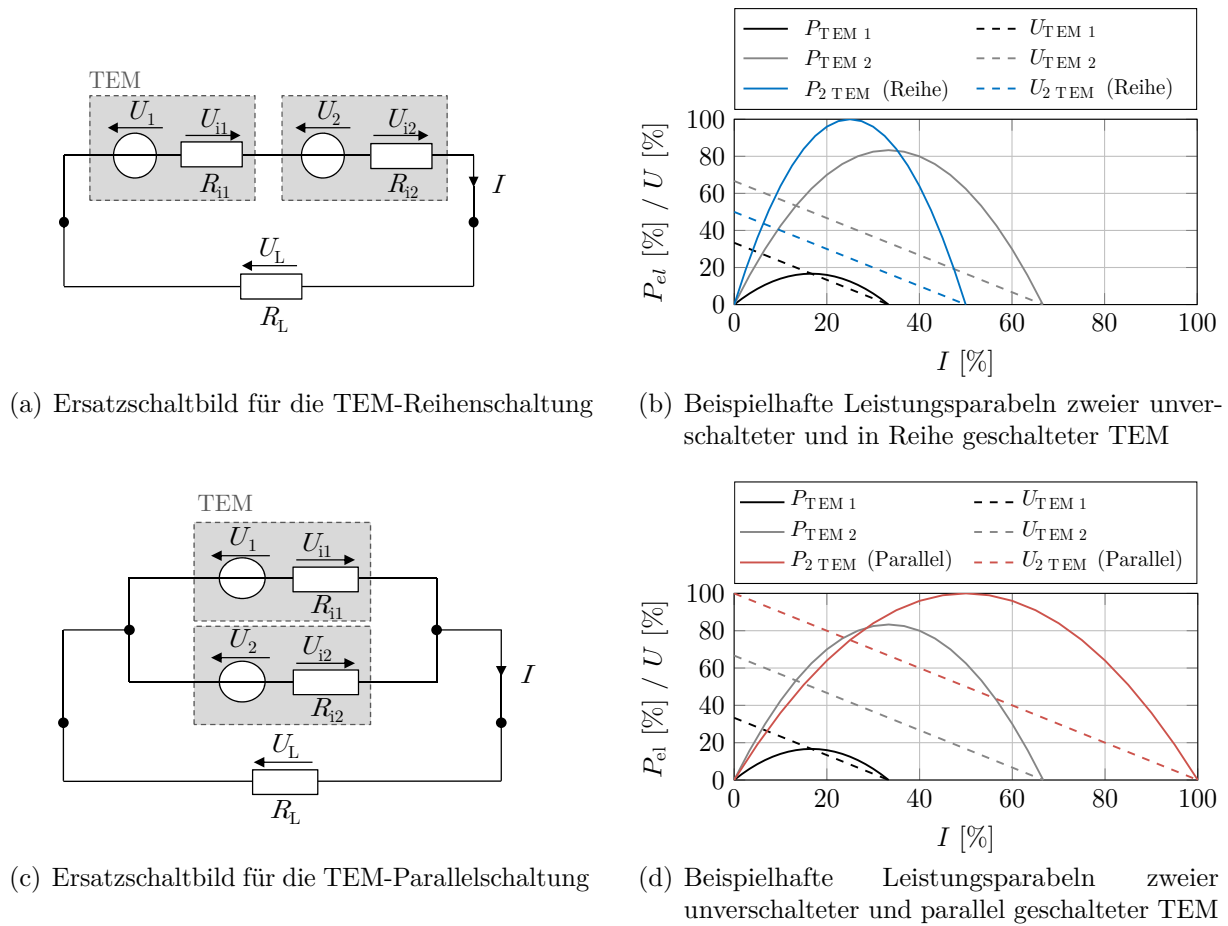


Abbildung 6.7.: Elektrisch in Reihe bzw. parallel geschaltete Module mit unterschiedlichen Spannungsniveaus und zugeschalteten Lastwiderständen, Abbildung i. A. a. [32]

installierten thermoelektrischen Moduls ist aufgrund der Erzielung eines höheren Wirkungsgrades sinnvoll. Die Zuverlässigkeit wird zudem erhöht, da der Ausfall eines Schenkelpaares oder eines TEM nicht direkt den Ausfall des gesamten TEG bedeutet. Die höhere Ausfallwahrscheinlichkeit der separaten Regelungen ist vergleichsweise vernachlässigbar. Allerdings ist diese Variante komplex und kostenintensiv. Darüber hinaus werden ein größerer Bauraum und ein höheres Systemgewicht benötigt, als bei der Verschaltung der Module. Für die ganzheitliche Systementwicklung ist die optimale elektrische Verschaltung und die Anzahl von Leitungselektronikkomponenten zu bestimmen, welche die Verluste bei akzeptablen Systemkosten, Bauraum und Gewicht gering halten (vgl. [32, 60, 103, 128]). Die Berücksichtigung der Abkühlung des Abgases hat sich bei der Konzeptionierung der Leistungselektronik aus Effizienzgründen als vorteilhaft erwiesen (vgl. [249]) und wird in dieser Arbeit berücksichtigt. Dazu werden Module mit annähernd gleicher Heißeitentemperatur elektrisch in Reihe zu TEM-Streifen geschaltet und jeweils mit einer MPPT-DC/DC-Wandlereinheit geregelt. Je nach Auslegung wird anhand des Kosten-Nutzen-Verhältnisses entschieden, welche Variante der Verschaltung von Vorteil ist. Im Allgemeinen sind die folgenden Verschaltungsarten möglich: reine Reihenschaltung wie in Teilabbildung 6.7 (a) und (b) dargestellt, reine Parallelschaltung wie in Teil-

abbildung 6.7 (c) und (d) dargestellt sowie eine Kombination aus beiden. In den Beispielschaltungen der Teilabbildungen ist zu erkennen, dass die Gesamtleistung der jeweiligen Verschaltungsart gleich der Summe der Leistungen der beiden unterschiedlichen Module (TEM1 und TEM2) ist. Es werden ideale Bedingungen angenommen und mögliche thermoelektrische Verluste vernachlässigt. Die günstigere Anordnung ist die Reihenschaltung von zwei Modulen, da sich dadurch höhere Spannungen sowie deutlich geringere Lastströme ergeben und somit der negative Einfluss des Peltier-Effekts reduziert wird (s. Abschnitt 2.3.2.2). Zudem können elektronische Bauteile unter diesen Randbedingungen in der Regel kostengünstiger dimensioniert werden, indem beispielsweise geringere Kabelquerschnitte berücksichtigt werden.

### 6.3.8. Leistungselektronik

Bei der Leistungselektronik hat insbesondere die Auswahl des Gleichspannungswandlers Relevanz. In dieser Arbeit werden ausschließlich sogenannte *Buck-Boost*-Wandler bei der TEG-Entwicklung berücksichtigt (s. Teilabbildung 5.8 (b)). Die Vorteile liegen insbesondere in der höheren Flexibilität, durch die Möglichkeit der Auf- und Abwärtswandlung bei nahezu vergleichbaren Kosten wie bei reinen Auf- oder Abwärtswandlern (vgl. [250, 251]), und den hohen Wirkungsgraden (vgl. [252]).

## 6.4. Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Lösungsvarianten

Zur Unterstützung bei der Lösungsfindung wird als methodisches Vorgehen eine technisch-wirtschaftliche Bewertung in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2225 [253] durchgeführt. Im vorherigen Abschnitt 6.3 der Variantenauswahl wurde der Lösungsraum durch die Auswahl von Teillösungen reduziert. Für die Bauweisenentwicklung in Unterabschnitt 6.3.1 und die Auswahl der HGWÜ-Struktur in Unterabschnitt 6.3.2 konnten jedoch noch keine optimalen Teillösungen ausgewählt werden. Hierfür sind die Ergebnisse der ganzheitlichen Simulationsumgebung erforderlich. Die Stapelbauweise und die polygonale Bauweise werden mit variierender HGWÜ-Struktur, d. h. gerade und versetzte Rippen sowie offenzellige Metallschäume, untersucht. Weitere TEG-Komponenten stellen die optimalen Teillösungen dar, die im jeweiligen Unterabschnitt der Variantenauswahl beschrieben wurden.

Für die Bewertung wird die technische Wertigkeit  $x_i$  nach [244] definiert. Ausgehend von der Punktsomme der Punktzahlen  $p$  der Bewertungsmerkmale  $j$  eines Lösungsentwurfs  $i$  erfolgt die Bewertung im Verhältnis zu der maximal möglichen Punktzahl  $p_{\max}$  der Ideallösung:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot p_{\max}} \quad \text{mit } i = 1 \dots n \quad (6.7)$$

Als technische Merkmale werden die TEG-Bruttolleistung, die parasitären Effekte der Fahrzeugwechselwirkungen, d. h. der Abgas- und Kühlmittelgedruckt, die Kühlmittelpumpenleistung, der Wärmeeintrag ins Kühlmittel und das TEG-Gewicht, sowie das TEG-Volumen berücksichtigt (s. Tabelle D.4 im Anhang). Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt anhand der geschätzten Stückkosten für die Herstellung der Lösungsvarianten. Hierfür dienen die Ergebnisse des generischen Kostenmodells (s. Abschnitt 5.2.3). Die wirtschaftliche Wertigkeit  $y_i$  wird nach [244] definiert als:

$$y_i = \frac{K_{\text{ideal}}}{K_i} = \frac{f \cdot K_{\text{zul}}}{K_i} \text{ mit } i = 1 \dots n \quad (6.8)$$

Die idealen Herstellungskosten  $K_{\text{ideal}}$  werden anhand der zulässigen Systemkosten  $K_{\text{zul}}$  des Standes der Technik aus Abschnitt 5.1.3 multipliziert mit einem Faktor  $f$  von 0,7 (vgl. [253]) ermittelt. Zukünftige Kostensenkungen und eine lange Produktlebensdauer werden somit gewährleistet.

Das Ergebnis der technisch-wirtschaftlichen Bewertung der verbleibenden Lösungsvarianten ist in Abbildung 6.8 dargestellt und detailliertere Ergebnisse sind in Tabelle D.4 im Anhang aufgeführt. Die gestrichelte Linie in der Abbildung wird als Entwicklungslinie bezeichnet und entspricht Punkten gleicher Wertigkeit. Die Ideallösung liegt bei den Koordinaten  $x=1$  und  $y=1$ . Allgemein sind nach [253] möglichst hohe technische Wertigkeiten anzustreben, ohne jedoch die Kosten der wirtschaftlichen Wertigkeit zu vernachlässigen. TEG-Lösungen werden beispielhaft für fünf verschiedene Einsatzszenarien gezeigt (TEG-Teilsystemaufbau; Diesel- und Erdgas-NFZ  $TCO_{\text{min}}$  und  $B_{\text{min}}$ ). Für jedes Einsatzszenario werden sechs unterschiedliche Lösungsvarianten mit unterschiedlichen TEG-Bauweise und HGWÜ-Struktur bei ansonsten identischen Abmessungen dargestellt. Die Stapelbauweise mit geraden Rippen erweist sich insgesamt als vorteilhaft und wird für die weitere Entwicklung dieser Arbeit ausgewählt. Die Stapelbauweise mit versetzten Rippen und offenzelligen Metallschäumen können höhere technische aufweisen, jedoch mit geringerer wirtschaftlicher Wertigkeit. Polygonale Bauweisen können im

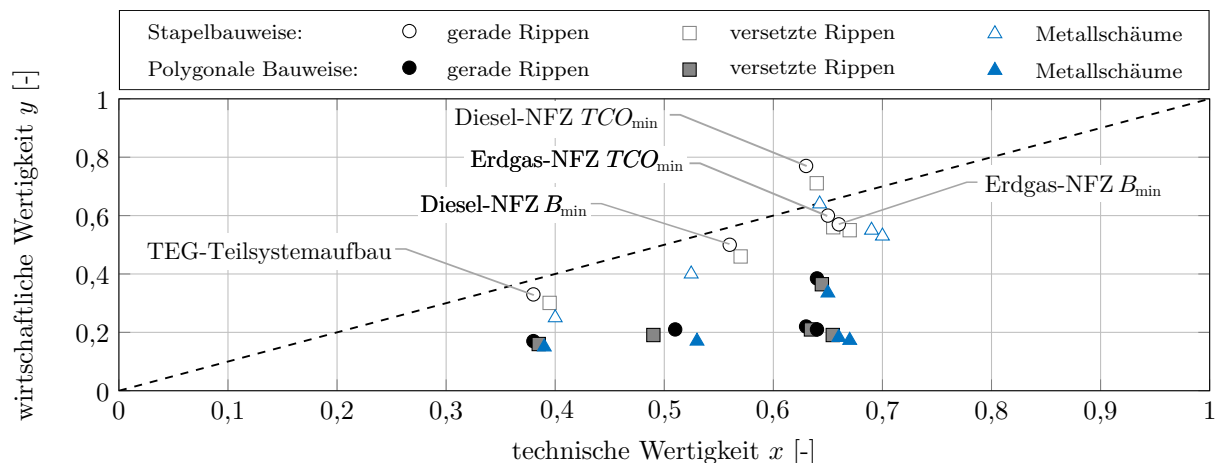


Abbildung 6.8.: Technische und wirtschaftliche Wertigkeit der Lösungsvarianten

Vergleich zur Stapelbauweise höhere elektrische Bruttoleistungen von bis zu 20 % erzielen, insbesondere bei hohen Abgastemperaturen wie im Erdgas-NFZ. Die Nettoleistungen sind jedoch niedriger und die Kosten um mindestens 25 % höher. Anhand der Stapelbauweisen mit geraden Rippen wird zudem die Steigerung der Technologiereife im Entwicklungsprozess dieser Arbeit deutlich. Die als ‚TEG-Teilsystemaufbau‘ bezeichnete Lösungsvariante ist ein Ergebnis von Voruntersuchungen (s. Abschnitt 7.2.1). Die als ‚ $TCO_{\min}$ ‘ und ‚ $B_{\min}$ ‘ bezeichneten Lösungsvarianten stellen die optimalen TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO und des Kraftstoffverbrauchs im Diesel- und Erdgas-NFZ dar (s. Abschnitt 8.2).

Bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung der TEG-Lösungsvarianten wurden unter anderem die maximale elektrische Bruttoleistung und die Kosten als Bewertungsmerkmale gewählt. Die Auswahl eines TEG-Designs ist bereits bei Berücksichtigung von zwei Kriterien komplex. Dies wird beispielhaft anhand der vorteilhaftesten Lösungsvariante der Stapelbauweise mit geraden Rippen aufgezeigt. Die Optimierungsergebnisse der Gesamtsystemsimulation werden anhand der TEG-Kosten  $K_{\text{TEG}}$  über der maximalen TEG-Leistung  $P_{\text{TEG}}$  für unterschiedliche Betriebspunkte (WHVC<sub>40 t,m</sub>, WHVC<sub>40 t,max</sub> und SHHS<sub>40 t,m</sub>; s. Tabelle 4.4) in Abbildung 6.9 dargestellt. In Abhängigkeit von der Höhe der verfügbaren Abgasenthalpien und insbesondere Abgastemperaturen des Betriebspunktes lassen sich unterschiedlich hohe elektrische TEG-Leistungen erzielen. Im Erdgas-NFZ sind diese deutlich höher als im Diesel-NFZ. Jeder Punkt der jeweiligen Teilabbildung steht für ein geometrisch unterschiedliches TEG-Design. Pareto-Fronten sind erkennbar und eine der Pareto-optimalen Lösungen gilt es auszuwählen. Für kleine Leistungen ist ein annähernd linearer Zusammenhang festzustellen. Beispielsweise können für den Betriebspunkt mit der höchsten Abgasenthalpie WHVC<sub>40 t,max</sub> im Diesel-NFZ Lösungsdesigns ausgewählt werden, bei denen die leistungsspezifischen Kosten mit 1 EUR/W im Leistungsbereich von 0–1300 W ansteigen. Beim Erdgas-NFZ sind es 0,4 EUR/W im Bereich von 0–4000 W.

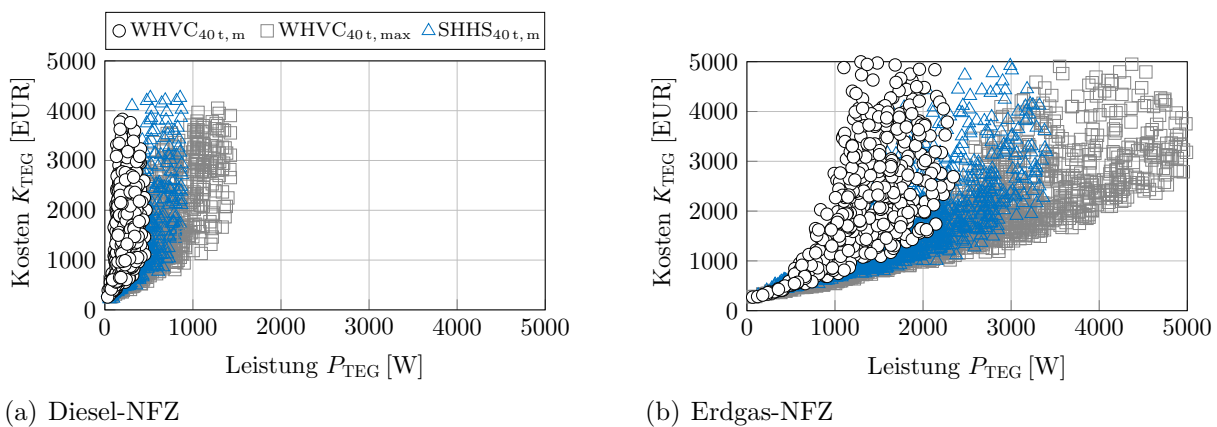


Abbildung 6.9.: Ergebnisübersicht der multikriteriellen Optimierung anhand der Kosten in Abhängigkeit von der maximalen TEG-Leistung (Stapelbauweise und gerade Rippen im HGWÜ)



## 6.5. Ausgestaltung des ausgewählten Lösungskonzepts

Im Folgenden wird die TEG-Stapelbauweise mit geraden Rippen in den HGWÜ und den jeweils vorteilhaftesten Teillösungen der Komponenten aus Abschnitt 6.3 detailliert ausgestaltet. Beispielhaft erfolgt dies am Ergebnisdesign zur TCO-Minimierung des Erdgas-NFZ. Das Ergebnis des Konstruktionsprozesses ist als 3D-CAD-Modell in der Prüfstandskonfiguration in Abbildung 6.10 dargestellt. Die gewählte hochintegrierte TEG-Bauweise ist gekennzeichnet durch drei getrennte Volumina für Abgas, Kühlmittel und Schutzgas sowie den im Gehäuse integrierten TEG-Kern, bestehend aus HGWÜ, KMWÜ, thermoelektrischen Modulen und der thermischen Kontaktierung.

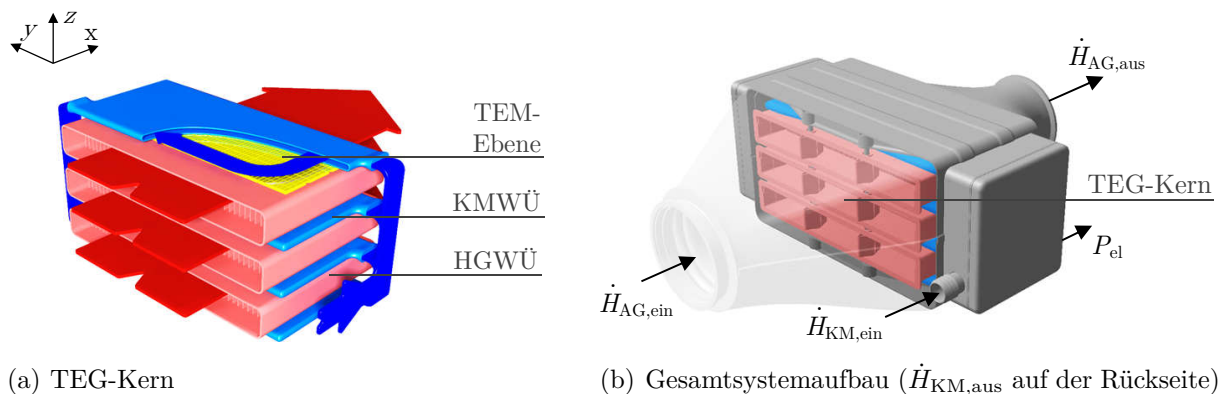


Abbildung 6.10.: Prinzipdarstellung der TEG-Stapelbauweise am Beispiel des Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO des Erdgas-NFZ; Abbildung aus [48]

Auf der Grundlage von Voruntersuchungen erfolgte zu Beginn der Ausgestaltung des Lösungskonzepts eine Vorauswahl der relevantesten geometrischen Parameter für die generischen CAD-Modelle und als Eingangsgrößen der Gesamtsystemsimulation. Als Resultat ergibt sich eine Kombinationsmatrix der geometrischen Parametervariationen des Heißgaswärmeübertragers, als  $10 \times 8$ -Matrix. Die Auswahl der getroffenen Parameter (8 Matrixspalten) wird im Folgenden vorgestellt und anhand eines 3D-CAD-Modells eines Heißgaswärmeübertragers in Abbildung D.7 im Anhang veranschaulicht:

- Länge HGWÜ ( $l_{\text{HGWÜ}}$  [m])
- Breite aller HGWÜ als Summe ( $\sum l_{\text{HGWÜ}}$  [m])
- Breite eines HGWÜ ( $b_{\text{HGWÜ}}$  [m])
- Rippenhöhe HGWÜ ( $h_{\text{R}}$  [m])
- Rippendicke HGWÜ ( $b_{\text{R}}$  [m])
- Kanalbreite HGWÜ ( $b_{\text{K}}$  [m])
- Rippenversatz Einlauf in Abgasströmungsrichtung ( $l_{\text{R,ein}}$  [m])
- Rippenversatz Auslauf in Abgasströmungsrichtung ( $l_{\text{R,aus}}$  [m])

Die jeweiligen Einträge der Zeilenwerte der Matrix werden durch Festlegung entsprechender geometrischer Bereiche und variabler geometrischer Schrittweite auf der Basis von Erfahrungswerten der Voruntersuchungen vorgenommen. Die Parametrisierung der weiteren Komponenten eines TEG-Designs erfolgt in Abhängigkeit von der Dimensionierung der HGWÜ. Bei dem gewählten Vorgehen beträgt die Anzahl der zu untersuchenden geometrischen TEG-Lösungsvarianten rund 10.000. Die Optimierung kann mit effizientem Rechenaufwand durchgeführt werden. Fertigungsrestriktionen wie minimale Rippen- und Kanalbreite werden dabei berücksichtigt (s. bspw. Abbildung 7.3). Das gewählte Vorgehen schränkt weder den Lösungsraum ein noch vernachlässigt es potenzielle Optima. Beispielhafte geometrische TEG-Designvarianten werden als Ergebnisse der generischen Gewichts- und Kostenmodelle aus Abschnitt 5.2.3 für das Erdgas-NFZ in Abbildung 6.11 illustriert. Das Gewicht bzw. die Kosten der TEG-Designs sind für drei verschiedene segmentierte HT-Modulauslegungen mit den Bezeichnungen LG2-31-31-5.2, LG2-31-31-4.4 und LG2-31-31-3.2 über der Wärmeübertragerfläche<sup>91</sup> in der jeweiligen Teilabbildung dargestellt. Die weiteren geometrischen Parametern bleiben jeweils gleich. Die Module haben unterschiedliche flächenspezifische Leistungsdichten von bis zu  $1,7 \text{ W/cm}^2$ ,  $2,2 \text{ W/cm}^2$  und  $3 \text{ W/cm}^2$  (s. Tabelle 7.3). Mit abnehmender Schenkelhöhe des Moduls von 5,2 mm auf 4,4 mm bzw. auf 3,2 mm wird das TE-Material und damit das Gewicht um 29 % bzw. 45 % sowie die Kosten um 13 % bzw. 27 % reduziert. Die geringeren Gewichte und Kosten der TEG-Varianten sind mit zunehmender Wärmeübertragerfläche erkennbar. Als Vorgriff auf die weitere Arbeit ist das Optimum des Erdgas-NFZ unter der Zielsetzung Minimierung der Gesamtbetriebskosten (s. Abschnitt 8.2.1) mit dem HT-Modul LG2-31-31-3.2 und der Bezeichnung  $TCO_{\min}$  in der jeweiligen

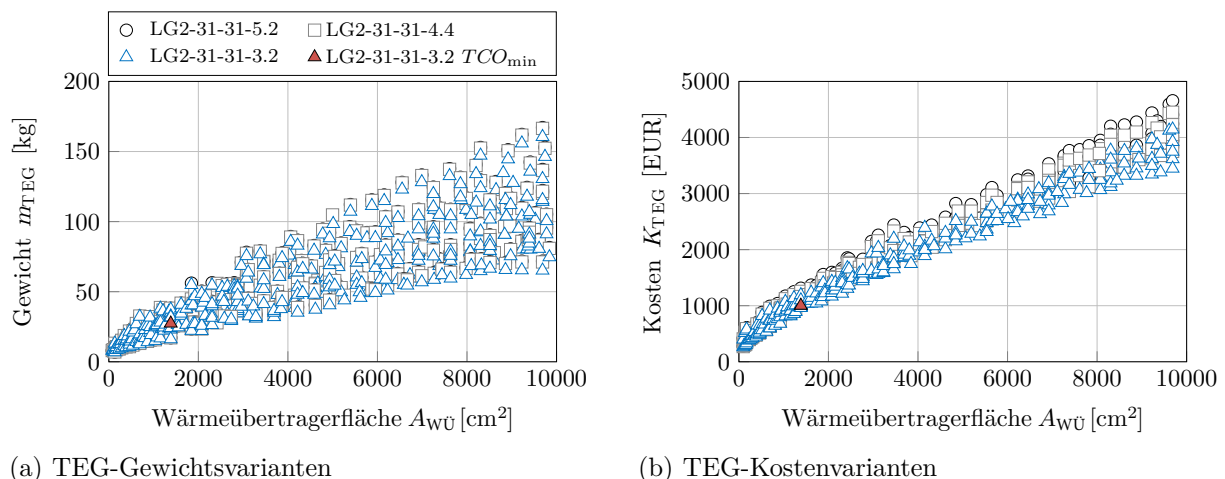


Abbildung 6.11.: Ergebnisse der generischen Gewichts- und Kostenmodelle am Beispiel ausgewählter Module unter Angabe des erreichten minimalen TCO für das Erdgas-NFZ

<sup>91</sup>Basierend auf dem Stand der Technik werden in dieser Arbeit TEG-Designs mit einer Wärmeübertragerfläche von bis zu  $10.000 \text{ cm}^2$  untersucht (s. Tabelle A.1 im Anhang). Als Vorgriff auf die Erkenntnisse dieser Arbeit liegen die Kosten-Nutzen-optimierten TEG-Designs für SNFZ unter  $2000 \text{ cm}^2$ .

Teilabbildung 6.11 (a) und (b) eingetragen. Es liegt bei einer Wärmeübertragerfläche von  $1420 \text{ cm}^2$  (s. Abbildung 6.10), bei welcher der Einfluss der unterschiedlichen Modulauslegungen gering ist. Module mit höherer Leistungsdichte führen zu TEG mit höherer Nennleistung. Dies erfordert eine schwerere und kostenintensivere Leistungselektronik. Die genannten Reduktionen bei den Modulen werden durch die Leistungselektronik kompensiert. In Abbildung 6.11 ist zu erkennen, dass das Optimum nicht im Gewichts- und Kostenminimum der gewählten Wärmeübertragerfläche liegt, was trivialerweise anzunehmen wäre.

Die Auswahl der WÜ-Fläche sowie die Auslegung der WÜ und der TEM sind von entscheidender Bedeutung für die Leistungsmerkmale des TEG. Die sogenannte **thermische Anpassung** der Komponenten ist im Gesamtsystem essentiell (vgl. [72, 118, 254]). Eine simultane Optimierung der thermischen Widerstände der Wärmeübertrager und der Module (s. Abbildung D.2 im Anhang) ermöglicht dies. Allgemein führen geringe Widerstände zu höheren Leistungen. Die WÜ haben nach [72] dabei eine dominierende Bedeutung. Die Ausgangsleistung kann durch die Reduzierung des Widerstands der WÜ bei ansonsten konstanten Widerständen um über 400 % gesteigert werden. Durch die alleinige Reduzierung des thermischen Widerstandes der thermoelektrischen Module steigt die Leistung nach [254] um bis zu 20 %. Die Verringerung der Widerstände führt jedoch gleichzeitig zumeist zur Reduktion des thermoelektrischen Wirkungsgrades (s. Gleichung 2.9 und bspw. Abbildung 7.7), aufgrund der reduzierten Temperaturdifferenz der Moduloberflächen. Im Gegensatz zu den genannten Arbeiten des Standes der Technik soll die thermische Anpassung in dieser Arbeit unter Berücksichtigung der elektrischen Ausgangsleistung, der flächenspezifischen Leistungsdichte, dem Wirkungsgrad und der Kosten erfolgen.

Zur Vorstellung der Ergebnisse wird das Verhältnis der Widerstände der TEM  $R_{\text{th,TEM}}$  zum Gesamtwiderstand des TEG  $R_{\text{th,TEG}}$  definiert als:

$$\epsilon_{\text{th,TEM}} = \frac{\overline{R}_{\text{th,TEM}}}{\overline{R}_{\text{th,TEG}}} \quad (6.9)$$

Im Diesel-NFZ wird das optimale Verhältnis mit 0,54 bei einem Gesamtwiderstand von 0,013 K/W ermittelt. Für das Erdgas-NFZ sind es 0,67 bei 0,016 K/W. Die Verhältnisse sind um 11 Prozentpunkte und 32 Prozentpunkte höher als beispielsweise von [254] angegeben. Dies ist durch den Zielkonflikt zwischen einer hohen Ausgangsleistung bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad des TEG-Systems begründet. Die niedrigen Abgas-temperaturen im Diesel-NFZ begünstigen Modulauslegungen mit geringen thermischen Widerständen und damit hohen flächenspezifischen Leistungen zu Lasten geringerer Wirkungsgrade. Aufgrund der Berücksichtigung von Modulen mit segmentierten Schenkeln, die bauartbedingt höhere Widerstände haben, ist der Gesamtwiderstand des TEG und der Anteil der Module am Gesamtwiderstand beim Erdgas-NFZ höher als beim Diesel-NFZ. Die thermischen Widerstände können nicht frei variiert werden. Es bestehen

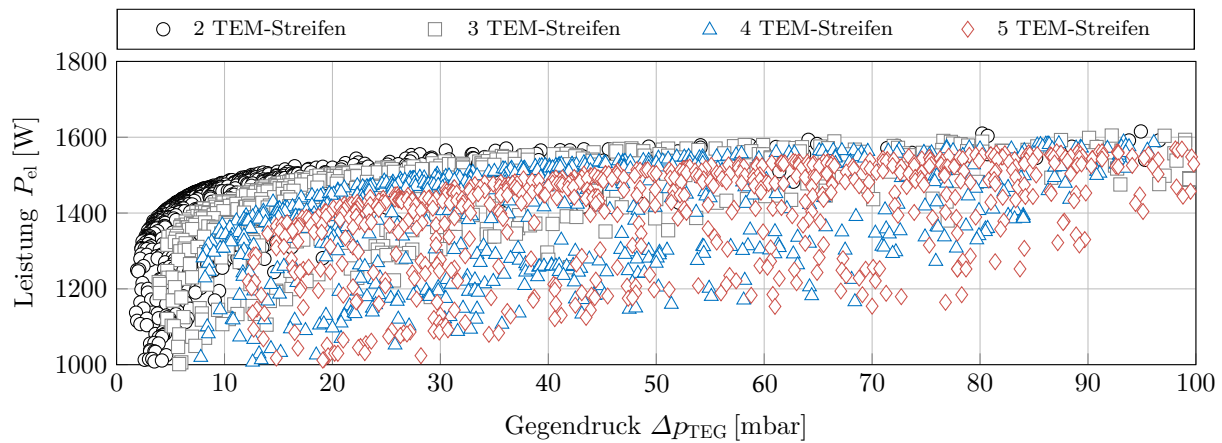


Abbildung 6.12.: Voruntersuchung zum Einfluss der TEG-Länge für  $A_{WÜ} = 1420 \text{ cm}^2$  mit TEM der Bezeichnung LG2-31-31-3.2 (Rdb.: Erdgas-NFZ WHVC<sub>40t,m</sub>; s. Tabelle 4.4)

Abhängigkeiten zwischen den WÜ, den TEM und den Kosten. Um eine hohe Ausgangsleistung bei gleichzeitig hohen Wirkungsgraden zu erreichen ist eine Reduzierung des thermischen Widerstands der HGWÜ erforderlich. Dies setzt hohe Wirkungsgrade und hohe Wärmestromdichten voraus. Mit Hilfe detaillierter CFD-Simulationen werden die optimalen Parameter für die HGWÜ und die inneren Strukturen bestimmt. Beispielhaft wird der Einfluss der Länge des TEG und damit der HGWÜ auf den abgasseitigen Gegendruck und die elektrische Leistung in Abbildung 6.12 illustriert. Bei allen TEG-Varianten dieser Abbildung wird die gleiche WÜ-Fläche ( $A_{WÜ} = 1420 \text{ cm}^2$ ) berücksichtigt, bei variierender Länge und Breite. Mit zunehmender Länge in Abgasströmungsrichtung (x-Koordinatenrichtung) in diskretisierten Schritten der Modulanzahl, den sogenannten TEM-Streifen, sinkt die erzielbare Leistung  $P_{el}$ . Bei einem abgasseitigen Gegendruck  $\Delta p_{TEG}$  von 100 mbar konnten TEG-Designs mit 2–5 TEM-Streifenvarianten mit einer Leistung von 1600 W ermittelt werden. Für Erdgas-NFZ haben sich, aufgrund der hohen Abgastemperaturen und des damit verbundenen großen Temperaturabfalls in Längsrichtung, TEG im Bereich von rund 30–90 mm für die Auslegung als vorteilhaft erwiesen. Bei sinkenden Abgastemperaturen und steigenden Massenströmen, wie z. B. in der AGN des Diesel-NFZ, können TEG-Längen von bis zu 300 mm zudem vorteilhafte Lösungsalternativen bieten.

Nach der Entscheidung für ein Optimum des HGWÜ erfolgen anschließend weitere Detailsimulationen mit niedriger Priorität, wie z. B. die Optimierung der Höhe des KMWÜ und die thermomechanischen Simulationen des TEG-Aufbaus. Darüber hinaus wird die Erfüllung der Anforderungen geprüft und Fertigungsrestriktionen im Konstruktionsprozess berücksichtigt. Der Kern der hochintegrierten TEG-Bauweise wird kompakt gestaltet und das erforderliche Verspannungskonzept integriert, wie in Teilabbildung 6.13 (a) zu erkennen ist. Bolzen durchstoßen beispielsweise die HGWÜ. Um eine möglichst homogene Spannung auf die Modulflächen zu gewährleisten, ist eine detaillierte Auslegung der Deckelstruktur, der Gewindebolzen und der Ausgleichsstruktur im KMWÜ erforderlich.

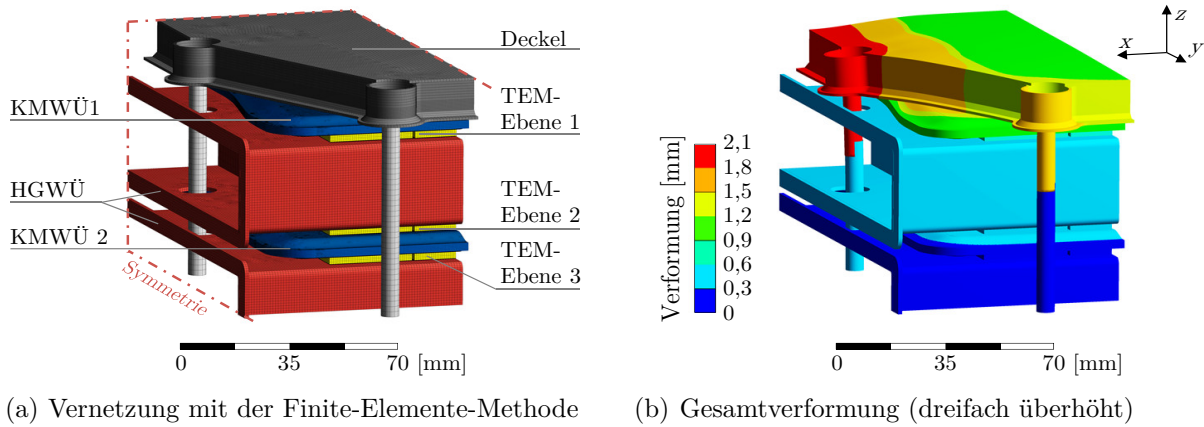


Abbildung 6.13.: Ergebnisse der FEM für die TEG-Stapelbauweise des Erdgas-NFZ

Die erfolgreiche Vergleichmäßigung des Anpressdrucks ist im Nennleistungspunkt des Erdgas-NFZ bei einer mittleren Nominalspannung von rund  $-3$  MPa in Abbildung 6.14 ersichtlich. Die Ränder einer TEM-Ebene, wie z. B. ‚TEM-Ebene 1‘, weisen typischerweise inhomogene Spannungsbereiche auf. Die Anzahl und Positionierung der Bolzen sowie die Wahl verschiedener Vorspannkraften haben die guten Ergebnisse begünstigt. Bei der vorgestellten TEG-Lösungsvariante kommen beispielsweise acht Gewindebolzen zum Einsatz (s. Abbildung 6.10). Da die WÜ-Rohre zur Versteifung des TEG-Kern beitragen, treten höhere Spannungen in den seitlichen Bereichen bei einer Verformung auf. Um dem entgegenzuwirken werden die äußeren Bolzen mit einer geringeren Vorspannkraft beaufschlagt als die inneren, was die größere Verformung in Teilabbildung 6.13 (b) erklärt. Weitere Vorteile der entwickelten hochintegrierten Stapelbauweise sind die geringen parasitären Verlustwärmeströme. In Abhängigkeit vom Betriebspunkt beträgt der Anteil des aus dem Abgas entzogenen Wärmestroms weniger als 3% (s. Gleichung 5.37).

Die beschriebene detaillierte Ausgestaltung und Auslegung des TEG-Lösungskonzeptes am Beispiel des Erdgas-NFZ dient dazu, die Validierung der verwendeten Methoden und die Beantwortung der Forschungsfrage im Fortgang der Arbeit zu ermöglichen.

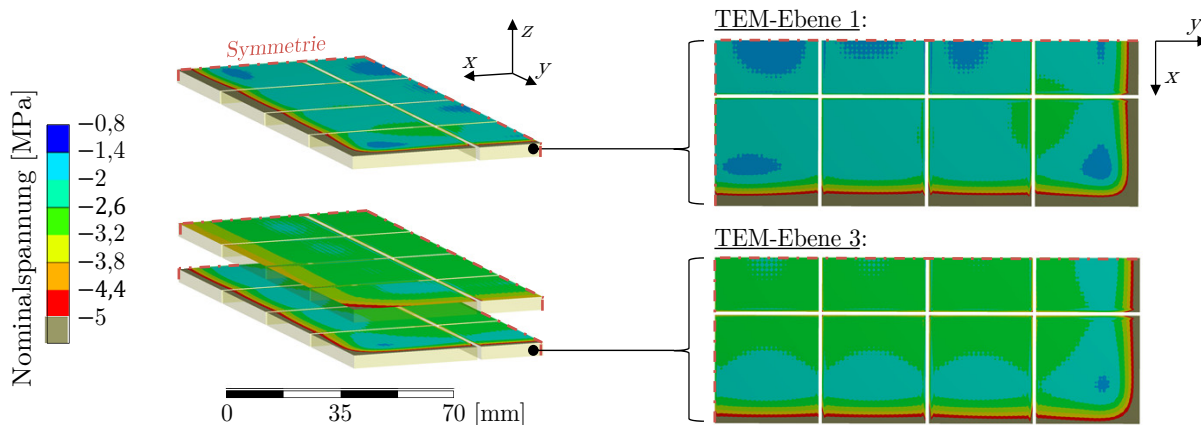


Abbildung 6.14.: Nominalspannung der FEM für die TEG-Stapelbauweise des Erdgas-NFZ

# Kapitel 7.

## Ergebnisse der virtuellen und experimentellen Validierung zur thermoelektrischen Generatorauslegung

Die Untersuchungen zu den Komponenten und Teilsystemen im Abschnitt 7.1 sowie die zum TEG-System im Abschnitt 7.2 haben als Hauptzielsetzung die erstellten Modellumgebungen aus Kapitel 5 zu validieren und deren Güte zu erhöhen. Im Rahmen der gewählten methodischen Vorgehensweise (s. Abschnitt 3.2) werden die Forschungsaktivitäten teilweise parallel in unterschiedlichen Iterationen durchgeführt. Die Untersuchungen zur Langzeitstabilität in Abschnitt 7.3 sollen Erkenntnisse für den Langzeitbetrieb von neuartigen TE-Modulauslegungen liefern.

### 7.1. Validierung der Komponenten- bzw. Teilsystemmodelle

#### 7.1.1. Untersuchungen zur Komponente Wärmeübertrager

**Heißgaswärmeübertrager:** Die Untersuchungen dieser Komponente dienen insbesondere der Validierung der simulationsgestützten Auslegung von alternativen HGWÜ-Strukturen. Ergänzend dazu wird für offenzellige Metallschäume und additiv gefertigte Strukturen der Stand der Fertigungstechnik für Hochtemperatur-Wärmeübertrager ermittelt.

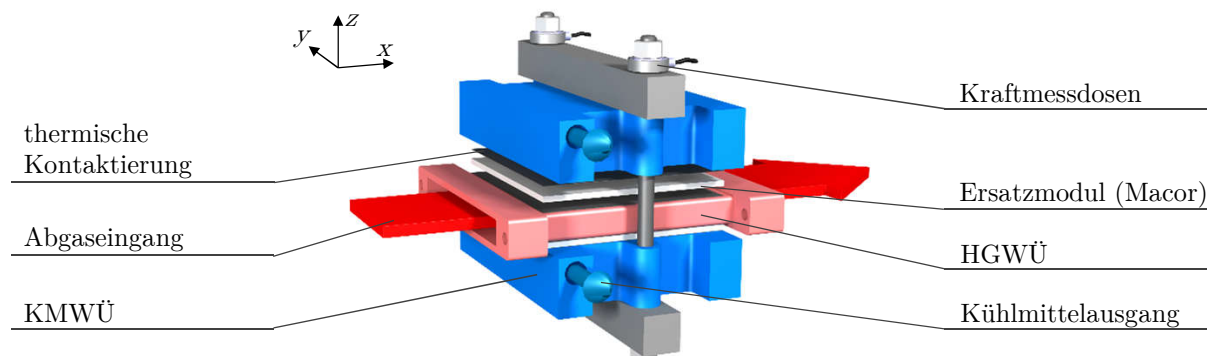











Abbildung 7.1.: Experimenteller Aufbau der Voruntersuchungen zum Heißgaswärmeübertrager

Die Experimente an den Funktionsmustern werden auf dem institutseigenen Heißgasprüfstand HG 200HD der Firma FAKT mit einer Kühlmittelversorgung durch Temperiergeräte der Firma Regloplas durchgeführt. Der Versuchsaufbau erfolgt in Stapelbauweise und besteht aus einem abgasseitigen HGWÜ umschlossen von jeweils zwei Ersatzmodulebenen<sup>92</sup> und kühlmitteleitigen KMWÜ, wie in Abbildung 7.1 dargestellt. Zwischen den einzelnen Komponenten liegen Graphitfolien. Zur Aufbringung des erforderlichen Anpressdruckes ( $> 1 \text{ MPa}$ ; s. Abbildung D.3 im Anhang) wird eine Verspannstruktur aus zwei Gewindebolzen und drehmomentgesteuert angezogener Muttern verwendet. Druckkraftmessdosen ermöglichen die Messung der Schraubenvorspannkraft. Der variabel ausgelegte Aluminium-KMWÜ ermöglicht den Betrieb nach dem Gleich-, Kreuz- sowie Gegenstromprinzip. In den WÜ-Oberflächen befinden sich in der xy-Ebene verteilte Schlitzte. Darin eingelegte Mantelthermoelemente ermöglichen die Messung der Oberflächentemperatur. Als Werkstoff für die HGWÜ wird austenitischer Edelstahl (X2CrNiMo17-12-2) oder eine korrosionsbeständige

Tabelle 7.1.: Experimentelle Voruntersuchungen zur Komponente Heißgaswärmeübertrager-Struktur (einflutige TEG-Architektur mit einem Volumen von  $105 \times 105 \times 15 \text{ [mm}^3\text{]}$ ;  
Rdb.:  $\vartheta_{\text{AG,ein}} = 580 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\dot{m}_{\text{AG}} = 0,01 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{\text{KM,ein}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\dot{V}_{\text{KM}} = 0,25 \text{ dm}^3/\text{s}$ )

Bezeichnung	Werkstoff	$\rho_{\text{HGWÜ}}$ [kg / dm <sup>3</sup> ]	$\Delta p_{\text{HGWÜ}}$ [mbar]	$\dot{Q}_h^*$ [W]	$\eta_{\text{HGWÜ}}$ [%]	Abbildung
gerade Rippen V. 1	X2CrNiMo17-12-2	2,67	7,4	2215	43	
gerade Rippen V. 2	X2CrNiMo17-12-2	3,04	10,2	2400	49	
gerade Rippen V. 3 (AM)	NiCr19NbMo	3,88	45,8	2479	51	
gerade Rippen V. 4 (AM)	X2CrNiMo17-12-2	4	41,8	2300	46	
versetzte Rippen V. 1 (AM)	X2CrNiMo17-12-2	4,7	11,8	2611	56	
Metallschaum V. 1	X2CrNiMo17-12-2	1,96	81,5	1838	36	
Metallschaum V. 2	X8CrAl20-5	1,36	28,4	1562	27	
Metallschaum V. 3	X8CrAl20-5 Ni-Beschichtung	1,43	21,8	1993	42	
topologieopt. Strukturen V. 1 (AM)	X2CrNiMo17-12-2	2,2	3,4	1417	26	

\* Nach Gleichung 5.22 ist der Wärmestrom definiert als:  $\dot{Q}_h = \Delta \dot{H}_{\text{AG}} = \dot{H}_{\text{AG,ein}} - \dot{H}_{\text{AG,aus}}$ .

<sup>92</sup>Soweit kein thermoelektrischer Effekt erforderlich ist, werden Ersatzmodule aus keramischen Werkstoffen verwendet, die die gleichen geometrischen Abmessungen und vergleichbare thermomechanische Eigenschaften wie die TEM aufweisen. Dies reduziert die Komplexität des Experimentaufbaus und Inhomogenitäten in der Struktur aufgrund geringerer Fertigungstoleranzen.

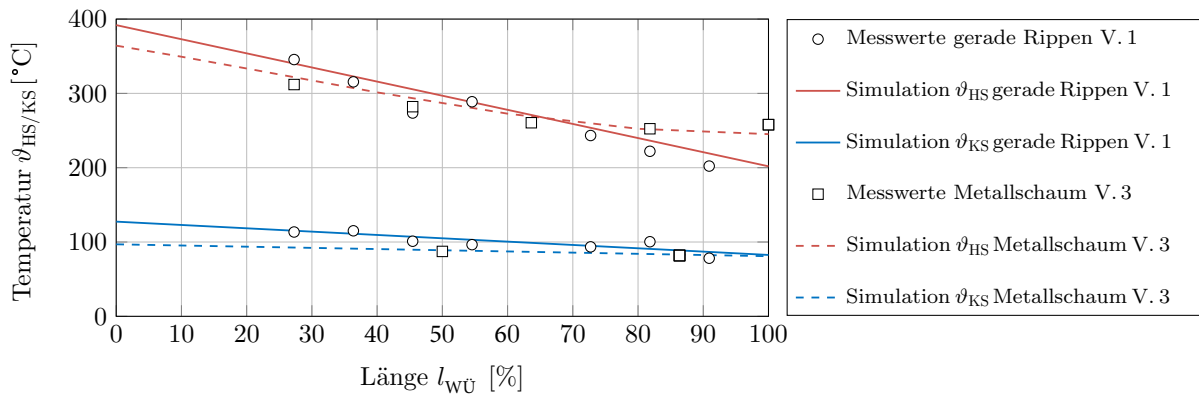


Abbildung 7.2.: Mess- und Simulationswerte von Heiß- und Kaltseitentemperatur am Beispiel der WÜ-Funktionsmuster gerade Rippen V. 1 und Metallschaum V. 3 im Gegenstromprinzip (Rdb.:  $\vartheta_{AG,ein} = 580 \text{ °C}$ ;  $\dot{m}_{AG} = 0,01 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{KM,ein} = 50 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM} = 0,25 \text{ dm}^3/\text{s}$ )

Nickelbasislegierung (NiCr19NbMo) verwendet. Die physikalischen Eigenschaften der beiden Werkstoffe unterscheiden sich nur geringfügig. Die Wärmeleitfähigkeit variiert beispielsweise bei Raumtemperatur im Bereich von 13–15 W/(mK). Werkstoffe mit höherer Wärmeleitfähigkeit, wie z. B. reines Nickel (Ni99,6 oder LC-Ni99), werden für diese Funktionsmuster nicht verwendet. Für die Herstellung von offenzelligen Metallschäumen und von AM-Strukturen sind diese Werkstoffe derzeit noch nicht für die Fertigung in den notwendigen Bauteilabmessungen verfügbar.

Die Ergebnisse der experimentellen Voruntersuchung auf der Grundlage der simulationsgestützten Auslegung sind anhand ausgewählter Leistungsmerkmale in Tabelle 7.1 dargestellt. Die untersuchten neuartigen Rippenstrukturen weisen im Vergleich zur Referenz mit geraden Rippen Vorteile auf Komponentenebene hinsichtlich der Dichte des Heißgaswärmeübertragers  $\rho_{HG\dot{W}\ddot{U}}$ , des Strömungswiderstandes  $\Delta p_{HG\dot{W}\ddot{U}}$  und des dem Abgas entzogenen Wärmestroms  $\dot{Q}_h$  auf. Der Wirkungsgrad  $\eta_{HG\dot{W}\ddot{U}}$  stellt den Wärmestrom im Verhältnis zum idealen und damit maximal möglichen Wärmestrom dar (s. Gleichung 6.1). Weitere in der Tabelle nicht enthaltene Kenngrößen, wie bspw. die Temperaturvergleichmäßigkeit der Kontaktflächen zum Modul und die Temperaturdifferenz zwischen dem kaltseitigen und heißseitigen WÜ, lassen neuartige WÜ-Auslegungen als erfolgsversprechend erscheinen. Beispielhaft sind die Heiß- und Kaltseitenverläufe des günstigsten und ungünstigsten WÜ-Funktionsmusters, was den Temperaturabfall in Längsrichtung zur Abgasströmung (x-Koordinatenrichtung) betrifft, in Abbildung 7.2 dargestellt. Der Temperaturabfall pro Längeneinheit beträgt 4 K/cm auf der Heißseite und 2 K/cm auf der Kaltseite für das Funktionsmuster Metallschaum V. 3. Für die gerade Rippen V. 1 sind die Werte mit 21 K/cm sowie mit 5 K/cm deutlich höher und damit ungünstiger.

Der Stand der Technik für offenzellige Metallschäume und AM-gefertigte Strukturen für WÜ war zu Beginn dieser Arbeit weitgehend unbekannt. Im Rahmen von eigenen Voruntersuchungen wurde unter anderem der Einfluss von Oberflächenbeschaffenheit und



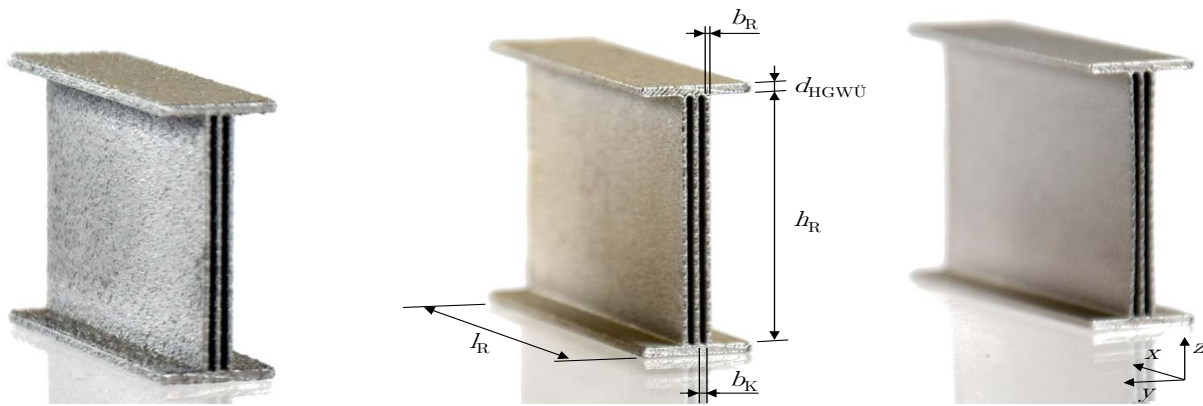


Abbildung 7.3.: Voruntersuchungen zur additiven Fertigung von Wärmeübertragern – Rippenstrukturen nach dem Stand der Fertigungstechnik ( $b_R=b_K=0,3$  mm,  $h_R=20$  mm); Ergebnis X2CrNiMo17-12-2 (links); X2CrNiMo17-12-2 (Mitte) und AlSi10Mg (rechts)

Rauheit untersucht sowie das niedrigste geometrische Aspektverhältnis von Rippen- zu Kanalbreite ermittelt. Repräsentative Teilergebnisse sind in Abbildung 7.3 dargestellt. Die Untersuchungen der offenzelligen Metallschaumstrukturen haben beispielsweise drei Varianten mit Bezeichnung als ‚Metallschaum V.1–V.3‘ hervorgebracht, um die physikalischen Simulationsmodelle mit ausreichender Genauigkeit validieren zu können. Potentielle Schaumstrukturen für den HGWÜ sind in Teilabbildung 7.4 (a) und (b) sowie für den KMWÜ in (c) dargestellt.

Für das Funktionsmuster Metallschaum V. 1 wird ein offenzelliger Metallschaum aus dem Werkstoff X2CrNiMo17-12-2, mit einer Porosität von 0,91 und einem Zellendurchmesser von 2,5 mm verwendet (s. Gleichungen 5.41 und 5.42). Der Anteil der Stirnfläche der inneren WÜ-Struktur, d.h. die senkrecht zur Strömungsrichtung projizierte Fläche sämtlicher Strukturflächen im WÜ, am gesamten Strömungsquerschnitt des WÜ liegt bei 94 %. Zum Vergleich beträgt der niedrigste Wert aller Funktionsmuster 22 % für das Funktionsmuster gerade Rippen V. 2. Für die Variante Metallschaum V. 2 und V. 3 kommt ein offenzelliger Metallschaum aus dem Werkstoff X8CrAl20-5, mit einer Porosität von 0,94 und einem Zellendurchmesser von 4 mm zum Einsatz. Der Anteil der Stirnfläche

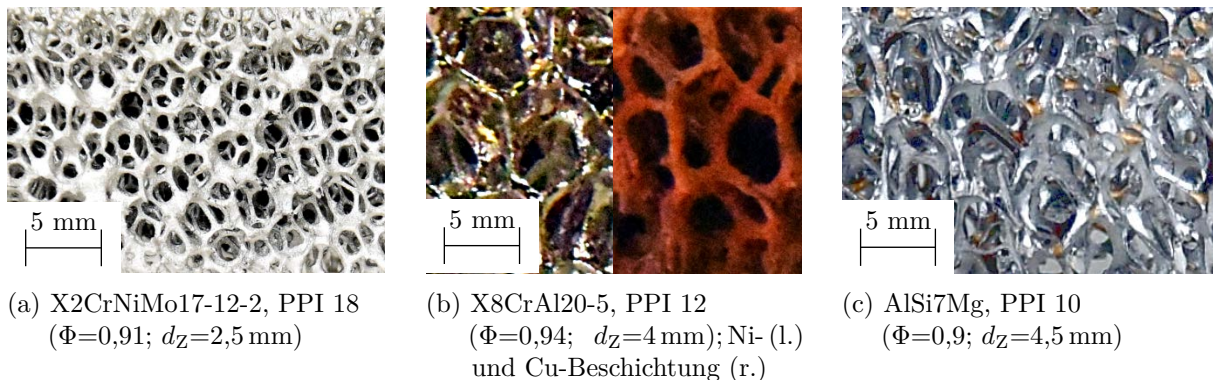


Abbildung 7.4.: Voruntersuchungen von offenzelligen Metallschäumen als Wärmeübertragerstruktur

der inneren WÜ-Struktur beträgt 91%. Bei der Variante V.3 wurde zusätzlich eine Nickelbeschichtung mit einer Schichtdicke von 25  $\mu\text{m}$  aufgetragen. Diese verhindert in erster Linie die Oxidationsneigung des Metallschaums, optimiert damit den Lötprozess und gewährleistet die Langzeitstabilität im Betrieb. Als Alternative wurde auch eine Kupferbeschichtung experimentell untersucht, die jedoch im Vergleich zur Vernickelung Nachteile in Bezug auf den Herstellungsprozess und die Korrosionsbeständigkeit aufweist. Jedes Funktionsmuster wurde neben der thermodynamischen Validierung zudem an der institutseigenen Universalprüfmaschine Z250 der Firma Zwick gegen ein mechanisches Versagen unter einer Druckkraft getestet. Dies diente zur Validierung der thermomechanischen Simulationen und beugte im Belastungsfall ein Versagen durch Biegeknicken bzw. Beulen und/oder Schubversagen vor. Beispielhaft sind die mechanischen und thermodynamischen Untersuchungsergebnisse unterschiedlicher Metallschaumstrukturen in Abbildung 7.5 dargestellt. Charakteristische Verläufe von offenzelligen Metallschäumen sind im Spannungs-Dehnungsdiagramm in Teilabbildung (a) illustriert. Der Metallschaum verformt sich zunächst linear-elastisch mit dem E-Modul des jeweiligen Schaums ( $E_S$ ). Dieses lässt sich nach [227] mithilfe des E-Moduls des Vollmaterials ( $E$ ) und der Porosität des Schaums ( $\Phi$ ) nach Gleichung 5.41 berechnen ( $E_S = E \cdot (1 - \Phi)^2$ ). Nach dem steilen Anstieg der Spannung sind einzelne absteigende Stufen bei den Experimenten erkennbar. Dabei versagen Stege bzw. Zellen der Schaumstruktur bis ein nahezu ideal plastisch-elastisches Niveau vorliegt. Sobald alle Zellen maximal komprimiert sind und die einzelnen Zellebenen sich berühren, ist der sogenannte Verdichtungspunkt erreicht. Danach steigt die Spannung nach [227] analog zum Vollmaterial steil an, in der Theorie bis zum sogenannten Kompressionspunkt. Die Versuche wurden vor Erreichen dieses Stadiums abgebrochen, da eine derartige

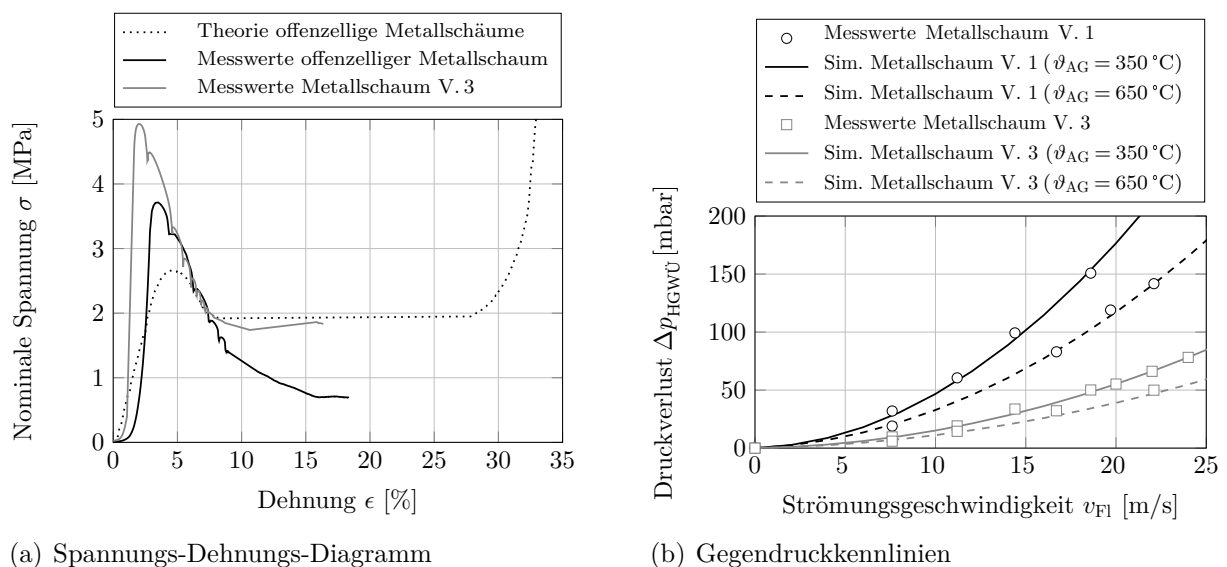


Abbildung 7.5.: Mechanische und thermodynamische Untersuchung der HGWÜ-Funktionsmuster am Beispiel der offenzelligen Metallschäume

Zellkompression ein Bauteilversagen des HGWÜ in der Anwendung bedeutet und ungeeignet ist. Die Metallschaumstrukturen werden durch Hartlötten mit der Oberfläche der HGÜ-Rohre verbunden. Der Unterschied im mechanischen Verhalten zwischen dem reinen Metallschaummaterial, bezeichnet als ‚Messwerte offenzelliger Metallschaum‘, und dem Teilsystem aus WÜ-Rohr und Metallschaum, bezeichnet als ‚Messwerte Metallschaum V. 3‘, wird im Diagramm in Teilabbildung 7.5 (a) erkennbar. Die Verfestigung aufgrund des Verbundaufbaus aus äußerem Rohr und der Lötverbindung zur inneren Struktur wird ersichtlich. Die Untersuchung einzelner innerer WÜ-Strukturen ist daher nicht ausreichend und kann zu unzutreffenden Schlussfolgerungen verleiten. Die gewählte komplexere Vorgehensweise dieser Arbeit mit Berücksichtigung der Fertigungs- und Komponentenarchitektur empfiehlt sich, um das tatsächliche Bauteilverhalten analysieren und bewerten zu können.

Die Optimierungsergebnisse für Metallschaumstrukturen bedingen die Auslegung von offenzelligen Strukturen mit möglichst großer Porosität und großen Zelldurchmessern. Dies begünstigt die thermodynamischen Eigenschaften, verschlechtert aber die thermomechanischen Eigenschaften. Für alle realisierten Funktionsmuster konnte bei einem Anpressdruck von über 1 MPa und einer Heißeitentemperatur von 800 °C die thermomechanische Stabilität sowohl simulativ als auch experimentell nachgewiesen werden. Der ermittelte abgasseitige Druckverlust der Funktionsmuster ‚Metallschaum V. 1‘ und ‚V. 3‘ ist für zwei unterschiedliche Betriebspunkte in Teilabbildung 7.5 (b) dargestellt. Die geringen Abweichungen zwischen den Mess- und Simulationswerten sind bemerkenswert, da die eingesetzten Metallschäume auf Basis von Edelstählen nach dem Stand der Technik viele Fertigungsfehlstellen aufweisen.

**Kühlmittelwärmeübertrager:** Diese Untersuchungen erfolgen analog zur Vorherigen. Dies gilt insbesondere für die Validierung der thermomechanischen und thermodynamischen KMWÜ-Auslegungen, wie Abbildung 7.6 zeigt. Die Funktionen von Wärmeabfuhr sowie Reduzierung der inneren mechanischen Spannungen werden in der gewählten TEG-Stapelbauweise in der Komponente KMWÜ integriert, wie in Abschnitt 6.3.6 beschrieben. Als komprimierbares und sich ideal-plastisch verhaltendes Material wird das 3D-Drahtmaterial des Herstellers Kieselstein [255] als innere Struktur des KMWÜ verwendet (vgl. [72]). Für die effiziente Wärmeübertragung besteht dieses aus dem Werkstoff Aluminium. Aufgrund der sehr geringen Dichte der Drahtstruktur von 0,65 kg/dm<sup>3</sup> lassen sich geringe Bauteilgewichte der KMWÜ realisieren. Der innere Spannungsabbau bei Aufprägung von äußeren (Druck-)Kräften erfolgt durch die Komprimierung der Drahtstruktur. Dies muss gleichzeitig durch die Randbereiche bzw. seitlichen Übergangsstrukturen des KMWÜ ermöglicht werden. Deren geometrische Gestaltung hat in diesem Zusammenhang eine große Bedeutung. Die entwickelten KMWÜ-Varianten als Klebe- und Schweißkonstruktion für den Teilsystemaufbau (s. Abschnitt 7.2.1) sind in Teilabbildung 7.6 (a) dargestellt.

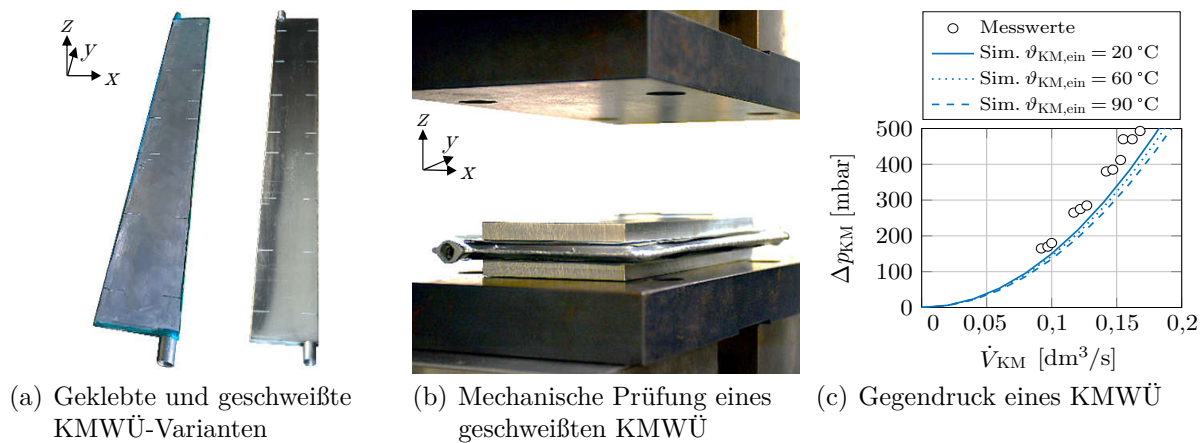


Abbildung 7.6.: Experimentelle Voruntersuchungen zur Komponente KMWÜ aus Aluminium

Die Klebeverbindungen bieten insbesondere Kostenvorteile im Vergleich zur Schweißvariante, aufgrund des Entfalls der komplexeren Fertigungsschritte. Ein geeigneter Zweikomponenten-Strukturklebstoff mit maximaler Dauereinsatztemperatur von 180 °C wird verwendet. Die äußeren Strukturen bestehen aus der Aluminium-Mangan-Legierung AlMg1, die sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit einer guten Bearbeitbarkeit und Schweißbarkeit auszeichnet (vgl. [32]). Zu den komponentenspezifischen Anforderungen zählen absolute Kühlmitteldrücke von bis zu 2 bar, Temperaturen von bis zu 120 °C und äußere mechanische Druckkräfte von über 1 MPa (s. Abbildung D.3 im Anhang). Die geklebte Version hält Teilbelastungen stand, aber nicht den maximalen und dauerhaften Belastungen. Ungünstige Schälbeanspruchungen konnten nicht vollständig vermieden werden. Das aus thermodynamischer Sichtweise günstige Aspektverhältnis des KMWÜ, mit einer im Vergleich zu den anderen geometrischen Abmessungen geringen Höhe (z-Koordinatenrichtung) von weniger als 10 mm, bietet kein ausreichendes Überlappungsverhältnis für die Klebeverbindung.

Im Fortgang der Arbeit werden aufgrund des Bauteilversagens der Klebevariante geschweißte Aluminium-KMWÜ aus Blech- und Frässtrukturbauteilen verwendet. Für die Schweißkonstruktion aus Teilabbildung 7.6 (a) wurden die seitlichen Übergangsstrukturen aufgrund der kompakten Bauweise zunächst als U-Form realisiert. Thermomechanische FEM-Simulationen und die experimentelle Validierung am Teilsystemaufbau in Abschnitt 7.2.1 zeigten jedoch kritische Spitzenspannungen im Bereich der Schweißnähte. Ein Anpressdruck unterhalb des Sollwertes führt im TEG-Aufbau bereits zu plastischen Verformungen, Bauteilversagen und Leckagen im Bereich der Schweißnähte des KMWÜ. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in der folgenden Konstruktion des Gesamtsystemaufbaus berücksichtigt (s. Abschnitt 7.2.2). Als Ergebnis der Bauteiloptimierung werden die Eckstöße der Schweißkonstruktion in Bördelstöße abgewandelt, wie in Teilabbildung 7.6 (b) erkennbar. Diese Komponentenvariante besitzt ausreichende Festigkeit und Elastizität im Bereich der seitlichen Übergangsstrukturen

der KMWÜ-Halbschalen, um die Anforderungen zu erfüllen. Als Nachteil dieser Lösung ist der zusätzliche Flächenbedarf in der xy-Ebene zu nennen. Neben den mechanischen erfolgen thermodynamische und strömungsmechanische Untersuchungen. Die Simulationsumgebung konnte erfolgreich validiert werden, wie am Beispiel des Gegendrucks in Teilabbildung 7.6 (c) zu erkennen ist.

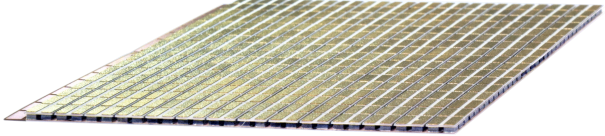
Als Ergebnis der Komponentenentwicklung weist der entwickelte KMWÜ eine geringe Dichte von  $1,2 \text{ kg/dm}^3$  und ein Leergewicht von  $0,4 \text{ kg}$  (3D-Drahtstruktur aus Aluminium:  $< 0,04 \text{ kg}$ ) auf. Der Gewichtsanteil der KMWÜ am TEG-Gesamtgewicht liegt beispielsweise bei  $7\%$  (s. Tabelle E.1 im Anhang).

### 7.1.2. Untersuchung zur Komponente Thermoelektrisches Modul

Die Module des Standes der Technik haben sich zur Erfüllung der Zielsetzungen dieser Arbeit als ungeeignet erwiesen (s. Abschnitt 2.4 und 7.2.1). Daher wurden in Zusammenarbeit mit Modulherstellern optimierte NT- und HT-Modulauslegungen entwickelt. Dazu sind die Modulparameter auf Teilsystemebene variiert und optimiert worden (s. z.B. Abschnitt 5.3.2). Die Ergebnisse wurden an die Modulhersteller weitergegeben. Nach erfolgreichen Iterationsschleifen und eigener Verifizierung der Anforderungen entstanden die optimierten Modulauslegungen dieser Arbeit.

**Niedertemperaturmodule:** Das Ergebnisdiesign der Materialklasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  des Herstellers Yamaha Corporation ist in Tabelle 7.2 dargestellt. Bemerkenswert ist bei dem NT-TEM mit Bezeichnung als Y1-125-84-1.6 insbesondere die vergleichsweise große Modulfläche, die rund elf Standardmodulen mit Abmessungen von  $30 \times 30 \text{ [mm]}$  entspricht. Für maximale Heiseitentemperaturen von bis zu  $380 \text{ }^\circ\text{C}$  gelten die auftretenden thermomechanischen Spannungen als beherrschbar. Dazu trägt unter anderem die Verwendung eines isolierten Metallsubstrates des Basiswerkstoffs Aluminium, Dielektrikum und beidseitig aufgeprägten Kupferleitbahnen auf der Kaltseite bei. Dies bietet eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit, geringere Kosten und höhere mechanische Elastizität im Vergleich zum typischerweise verwendeten Keramiksubstrat. Auf der Heißseite

Tabelle 7.2.: Übersicht des untersuchten Moduls des Herstellers Yamaha Corporation [247]

Bezeichnung	Einheit	Y1-125-84-1.6	Beispielabbildung
Schenkelwerkstoff		$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	
Max. Temperatur (kzz.)	$[\text{ }^\circ\text{C}]$	300 (380)	
Modulmae	$[\text{mm}^3]$	$125 \times 84 \times 1,6$	
Schenkelhöhe	$[\text{mm}]$	0,8	
Anzahl Schenkelpaare		476	
Gewicht	$[\text{g}]$	66	
El. Widerstand <sup>1</sup>	$[\Omega]$	2,4	
Max. Leistung <sup>2</sup>	$[\text{W}]$	112	
Max. Wirkungsgrad <sup>2</sup>	$[\%]$	4,2	

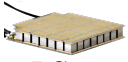
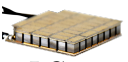
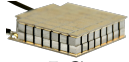

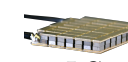
<sup>1</sup> Bei Umgebungstemperatur  $\vartheta_U = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

<sup>2</sup> Bei  $\vartheta_{\text{HS}} = 340 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{\text{KS}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

wird keine durchgängige keramische Deckschicht zur elektrischen Isolierung verwendet. Eine Vielzahl von *Direct Bonded Copper*-Strukturen (DBC, dt. direkt gebundenes Kupfer) kommen stattdessen zum Einsatz, was die Thermomechanik des Moduls deutlich verbessert. Zur Verringerung der Modulkosten wird eine Aluminiumoxidkeramik verwendet (s. Abschnitt 6.3.3). Als Nachteil ist die geringere Wärmeleitfähigkeit in Höhe von  $30 \text{ W}/(\text{m K})$  im Vergleich zur deutlich kostenintensiveren Variante Aluminiumnitrid mit  $180 \text{ W}/(\text{m K})$  bei Umgebungstemperatur zu nennen. Für die NT-Zielanwendung im Diesel-NFZ stellen Module mit möglichst geringem thermischem Widerstand bei gleichzeitig hoher elektrischer Abgabeleistung die optimale Auslegung dar. Das Ergebnisdesign Y1-125-84-1.6 weist eine geringe Gesamtmodulhöhe von  $1,6 \text{ mm}$ , eine Schenkelhöhe von weniger als  $0,8 \text{ mm}$  und einen Füllgrad von  $40\%$  auf. Bei der TEM-Auslegung mit über  $950$  Schenkeln hat sich gezeigt, dass die flächenspezifische Schenkelanzahl einen geringen Einfluss auf den elektrischen Widerstand, aber einen negativen Einfluss auf den thermischen Widerstand des Moduls hat.

**Hochtemperaturmodule:** Die Ergebnisdesigns der HT-TEM mit segmentierten Schenkeln der Materialklassen  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  & SKD des Herstellers LG Chem Ltd. sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Die unterschiedlichen Leistungscharakteristiken der Voruntersuchungen an Modulen einer Materialklasse und mit segmentierten Schenkeln sind erkennbar. Das optimierte Ergebnis trägt die Bezeichnung LG2-31-31-3.2 und hat einen Füllgrad von  $59\%$ . Einige Vorteile im Vergleich zum Stand der Technik sind analog zum NT-TEM berücksichtigt worden. Hervorzuheben ist die höhere Komplexität bei der Modulauslegung. Die Anforderungen an die Thermomechanik sind aufgrund der Heißseitentemperatur von bis zu  $550^\circ\text{C}$  höher als bei NT-TEM. Darüber hinaus muss das maximale Temperaturniveau des NT-Materials im segmentierten Schenkelaufbau berücksichtigt werden. Die höheren Wirkungsgrade und die höheren Ausgangsleistungen sind nennenswerte Vorteile der segmentierten Modulbauweise.

Tabelle 7.3.: Übersicht der untersuchten Module des Herstellers LG Chem Ltd.

Bezeichnung	Einheit					
		LG 1-31-31-3.3	LG 1-31-31-3.5	LG 2-31-31-5.2	LG 2-31-31-4.4	LG 2-31-31-3.2
Schenkelwerkstoff		$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	SKD	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ & SKD	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ & SKD	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ & SKD
Max. Temperatur (kzz.)	$[\text{C}^\circ]$	300 (380)	500 (550)	500 (550)	500 (550)	500 (550)
Modulmaße	$[\text{mm}^3]$	$31 \times 31 \times 3,3$	$31 \times 31 \times 3,5$	$31 \times 31 \times 5,2$	$31 \times 31 \times 4,4$	$31 \times 31 \times 3,2$
Schenkelhöhe <sup>1</sup>	$[\text{mm}]$	3	3	1,9 / 2	1 / 2	1 / 1
Anzahl Schenkelpaare		31	31	31	31	31
Gewicht	$[\text{g}]$	14,6	13,2	25,4	19,7	14
El. Widerstand <sup>2</sup>	$[\Omega]$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
Max. Leistung <sup>3</sup>	$[\text{W}]$	8	14,9	14,7	18,6	26
Max. Wirkungsgrad <sup>3</sup>	$[\%]$	5,5	4,8	9	8,2	7,5

<sup>1</sup> Bei segmentierten Modulen Angaben für Segment 1 & 2.

<sup>2</sup> Bei Umgebungstemperatur  $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$ .

<sup>3</sup> Bei  $\vartheta_{\text{HS}} = 300^\circ\text{C}$  für LG1-31-31-3.3 bzw.  $\vartheta_{\text{HS}} = 500^\circ\text{C}$  für die weiteren Module und  $\vartheta_{\text{KS}} = 50^\circ\text{C}$ .

Den Hardwarerealisierungen der Modulauslegungen sind umfassende Simulationsstudien vorausgegangen. Beispielhafte Ergebnisgrößen der detaillierten multiphysikalischen 3D-Simulationsumgebung für NT-TEM sind in Teilabbildung 7.7 (a) und entsprechend für HT-TEM mit segmentierten Schenkeln in (b) dargestellt. Die maximal erzielbare spezifische Leistung unter Berücksichtigung der Gesamtmodulfläche, d. h. die flächenspezifische elektrische Leistungsdichte  $p_{el}$ , und der maximale Modulwirkungsgrad  $\eta_{TEM,max}$  nach Gleichung 2.9 sind auf der linken Ordinate über dem Mittelwert des spezifischen thermischen Widerstands  $\bar{r}_{th,TEM}$  aufgetragen. Letzterer ist temperaturabhängig und nimmt mit ansteigenden Temperaturdifferenzen ab. Die Temperaturrandbedingungen sind den Angaben aus den Tabellen 7.2 und 7.3 zu entnehmen. Zur Validierung der jeweiligen Simulationsergebnisse sind in Teilabbildung 7.7 (a) Messwerte des Moduls Y1-125-84-1.6 und zweier weiterer Varianten sowie von den Modulen LG2-31-31-5.2, LG2-31-31-4.4 und LG2-31-31-3.2 in Teilabbildung 7.7 (b) verwendet worden. Die Validierung gilt aufgrund der geringen Abweichungen zwischen den simulativen und experimentellen Ergebnissen als erfolgreich. Zur Vollständigkeit der Darstellung des Optimierungsproblems sind jeweils auf der rechten Ordinate die spezifischen Modulkosten des generischen Kostenmodells angegeben (s. Abschnitt 5.2.3). Wie in der Konzeptphase in Abschnitt 6.3.3 angedeutet, gibt es material- und modulspezifische Optima, die es je nach Anwendung und Anforderungen auszuwählen gilt. Mit abnehmendem thermischem Widerstand steigt der Wärmestrom durch das Modul an, wodurch zeitgleich (zumeist) die umgewandelte elektrische Leistung zunimmt. Ab einem gewissen Wert des thermischen Widerstands sinkt der Wirkungsgrad stärker ab. Die flächenspezifischen Modulkosten  $k_{TEM}$  nehmen mit abnehmendem thermischem Widerstand aufgrund der Materialreduzierung ab, obwohl die Fertigungskosten aufgrund der Komplexitätssteigerung gleichzeitig ansteigen. Mit abnehmenden thermischen Modulwiderständen werden die Widerstände der Schenkelkontakte zunehmend relevant. Ihr Anteil am thermischen Gesamtwiderstand des Moduls kann über 40% betragen, was jedoch vermieden werden sollte.

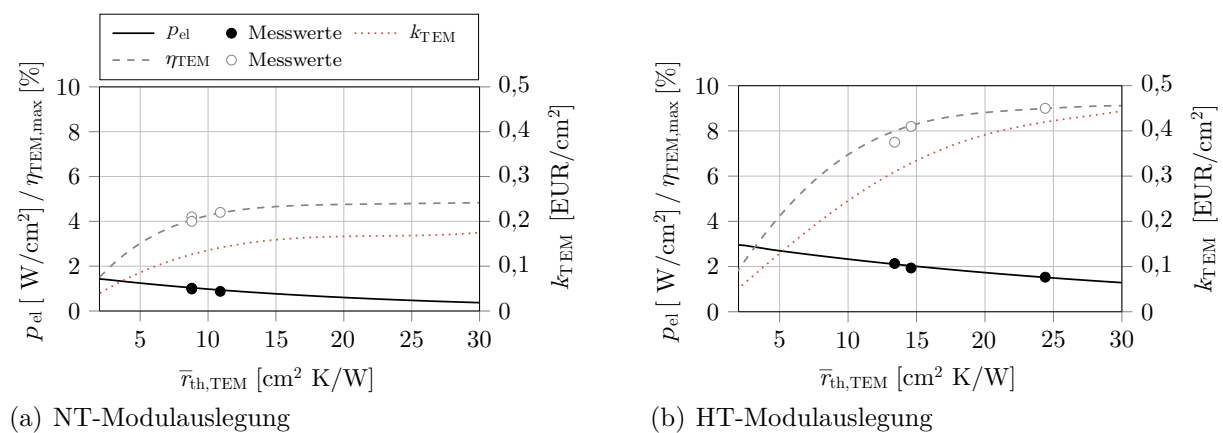


Abbildung 7.7.: Ergebnisse der Modulauslegung anhand ausgewählter Kennzahlen für NT-TEM (Materialklasse:  $Bi_2Te_3$ ) und segmentierten HT-TEM (Materialklassen:  $Bi_2Te_3$  & SKD)

Bei der ganzheitlichen TEG-Auslegung dieser Arbeit sind die realisierten Moduldesigns jeweils mit der höchsten flächenspezifischen elektrischen Leistung berücksichtigt worden. Dies bewirkt Kostenvorteile bei gleichzeitigen Verlusten im Wirkungsgrad als Nachteil. Für das NT-TEM der Materialkasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und Bezeichnung Y1-125-84-1.6 wird eine spezifische elektrische Leistungsdichte von bis zu  $1,1 \text{ W/cm}^2$  erreicht. Für das HT-Modul mit Bezeichnung LG2-31-31-3.2 sind es bis zu  $3 \text{ W/cm}^2$ . Darüber hinaus wurde experimentell ein maximaler Wirkungsgrad von bis zu 9% für das LG2-31-31-5.2 nachgewiesen (s. Tabelle 7.3).

Die multiphysikalische Simulationsumgebung ermöglicht neben der Modulauslegung die elektrische Schaltungsanalyse der TEM mit hohem Detailgrad sowie unter Berücksichtigung sämtlicher TE-Effekte und Verluste. Beispielhafte Ergebnisse der Modulverschaltung für das HT-TEM LG2-31-31-3.2 mit Einsatz im Erdgas-NFZ sind in Abbildung 7.8 dargestellt. Die Temperaturrandbedingungen sind Tabelle 7.3 zu entnehmen. Um den Temperaturabfall über die Schenkelpaare der Module darzustellen, ist die berücksichtigte Atmosphäre in den Teilabbildungen 7.8 (a) und (b) ausgeblendet. Die Ergebnisse der elektrischen Leistung  $P_{el}$  und der Spannung  $U$  des bzw. der TEM über den Laststrom  $I$  sind in Teilabbildung (c) dargestellt. Die charakteristischen Leistungskurven für die idealisierten Reihen- und Parallelschaltungen sind erkennbar. Zur

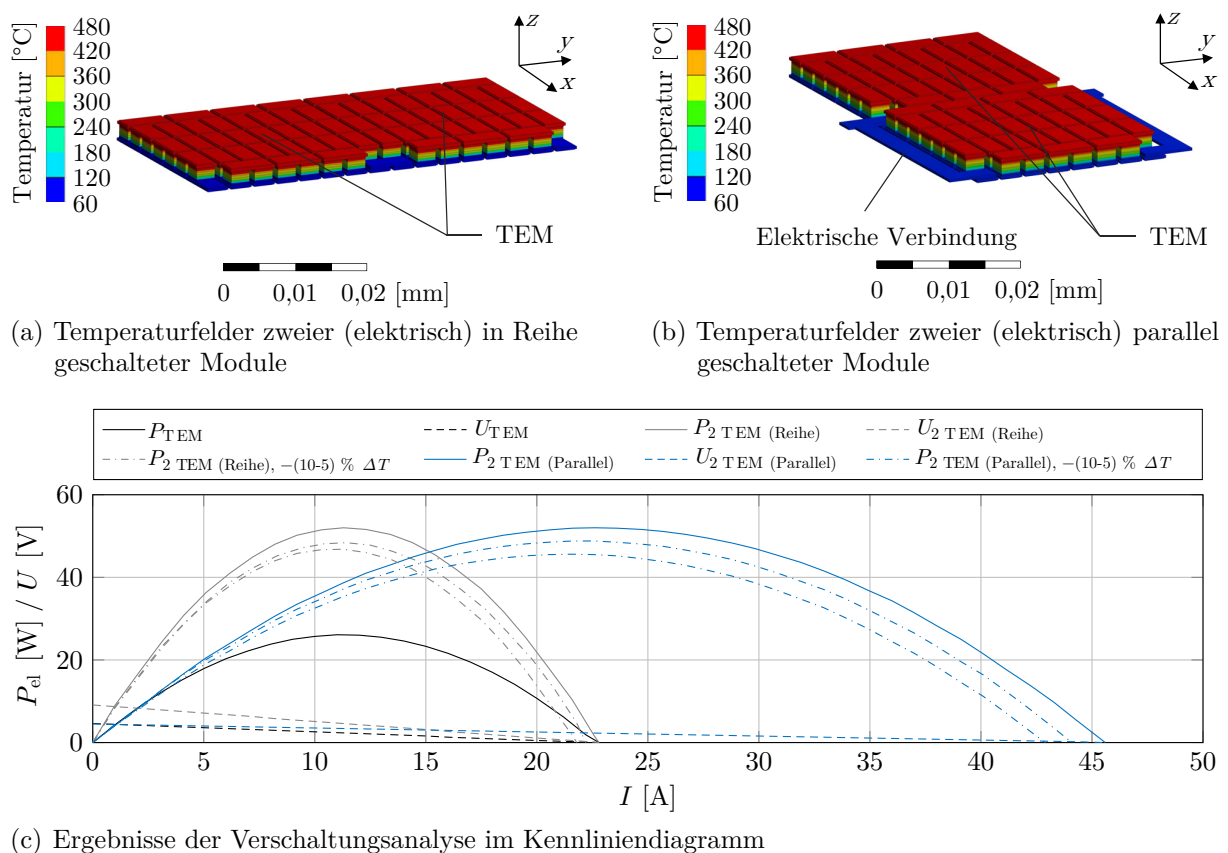


Abbildung 7.8.: FEM von zwei in Reihe bzw. parallel geschalteter Module bei variierender Temperaturdifferenz  $\Delta T$  am Beispiel des segmentierten HT-Moduls LG2-31-31-3.2



realistischeren Abbildung wird in einer Sensitivitätsanalyse die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  eines Moduls im Vergleich zum zweiten Modul in Schritten um bis zu 10% reduziert. Damit werden unvermeidliche Inhomogenitäten der Oberflächentemperaturen im TEG-Aufbau nachgebildet. Für die Reihenschaltung reduziert sich die elektrische Leistung um bis zu 10% im Vergleich zum idealisierten Ausgangszustand. Bei der Parallelschaltung ist die Reduzierung mit bis zu 12% etwas höher. Reihenschaltungen sind in TEG-Aufbauten mit mehreren Einzelmodulen aufgrund des geringeren Stromflusses, des geringeren Peltier-Effekts und der geringeren Verluste vorzuziehen (s. Abschnitt 6.3.7). Nach [256] kann der Unterschied bis zu 3,7 Prozentpunkte betragen.

## 7.2. Validierung der ganzheitlichen Modellerstellung

### 7.2.1. TEG-Teilsystemaufbau

Eine Zielsetzung dieses Teilsystemaufbaus ist es, die entwickelten Komponenten mit Ausnahme der Module und Teilsysteme der TEG-Architektur experimentell zu untersuchen. Die optimierten Modulauslegungen aus Abschnitt 7.1.2 waren aufgrund von parallelen Forschungsaktivitäten und Iterationen noch nicht verfügbar. Darüber hinaus hatte die TEM-Leistungscharakteristik in diesem Stadium der Arbeit eine untergeordnete Rolle. Die Verfügbarkeit von HT-TEM in der erforderlichen Stückzahl, bei gleichbleibender hoher Qualität und mit geringeren Fertigungstoleranzen war ausschlaggebend für die Modulauswahl. Verwendet wurden kommerziell verfügbare HT-TEM der Materialklasse SnSe mit Bezeichnung TEC1-40-40-4 des Herstellers Thermanamic Electronics Corporation (vgl. [203]). Vorversuche der SnSe-Module zeigten geringe Abweichungen von unter 5% zwischen den Herstellerangaben und den eigenen Messwerten. Die Module sind charakterisiert durch geometrische Abmessungen von  $40 \times 40 \times 4$  [mm], 70 Schenkelpaare und einer Einzelschenkelkapselung auf Basis einer Silikonversiegelung. Die gemessene Ausgangsleistung liegt bei bis zu 16,8 W, die flächenspezifische Leistungsdichte bei  $1,1 \text{ W/cm}^2$  und der maximale Wirkungsgrad bei 7,1% (Rdb.:  $\Delta T = 600 \text{ °C}$ ;  $\vartheta_{\text{HS}} = 630 \text{ °C}$ ).

Die Hardwarerealisierung und Untersuchungen des TEG-Teilsystemaufbaus erfolgen als einflutige TEG-Architektur in Stapelbauweise, d. h. ein HGWÜ, zwei KMWÜ, eine Vielzahl an Modulen und thermische Kontaktierung im TEG-Kern, beispielhaft für die Zielanwendung im Erdgas-NFZ. Das entwickelte Ergebnisdesign mit Bezeichnung als TEG-1-2-14 ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Der Aufbau ist charakterisiert durch ein Kerndesign mit 56 Modulen und geometrischen Abmessungen von  $100 \times 600 \times 80$  [mm]. Bemerkenswert ist der additiv gefertigte HGWÜ aus dem Werkstoff X2CrNiMo17-12-2. Als KMWÜ kommen die Aluminium-Schweißkonstruktionen aus Teilabbildung 7.6 (a) zum Einsatz. Die beidseitigen Deckelstrukturen bieten Leichtbaupotentiale, wie in Abbildung 7.9 zu erkennen ist. Dies wird im nachfolgenden Gesamtsystemaufbau

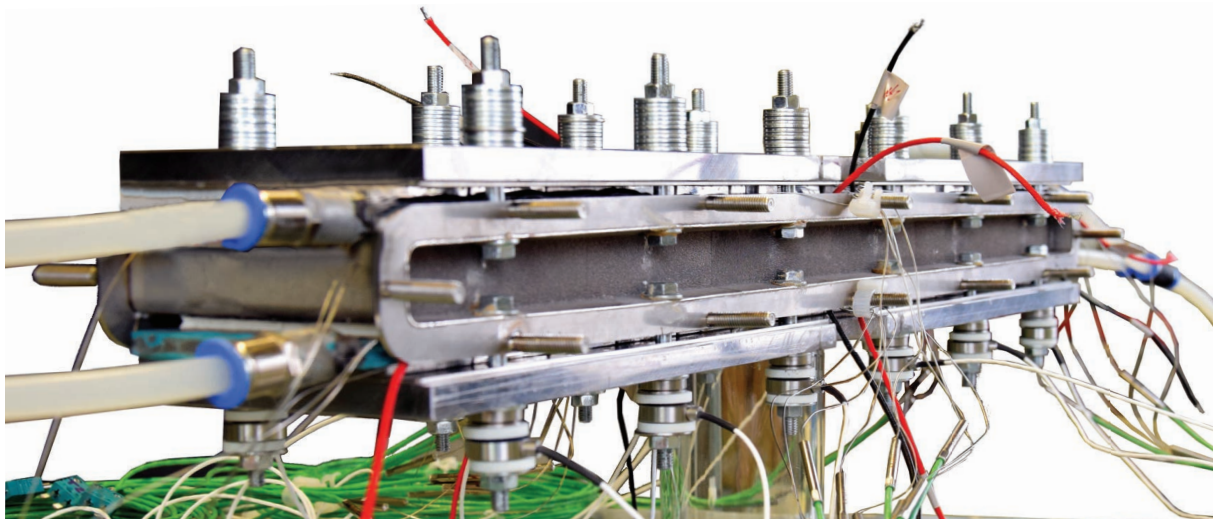


Abbildung 7.9.: Experimenteller TEG-Teilsystemaufbau mit HT-Modulen der Materialklasse SnSe; Abbildung aus [184]

umgesetzt (s. Abschnitt 7.2.2). Aufgrund des rechteckigen und ungünstigen Aspektverhältnisses des Strömungsquerschnitts vom HGWÜ sind Konfusor und Diffusor für eine relative Kompaktheit des TEG-Systems in Querstrombauweise konzipiert (s. Teilabbildung E.1 (b) im Anhang; vgl. z.B. [186]). Bei diesem Teilsystemaufbau wird eine Bypassstrecke einschließlich Klappe verwendet, um die entsprechende Simulationsumgebung zu validieren.

**Mechanische Voruntersuchungen:** Die Festigkeit und Elastizität der WÜ-Komponenten im Teilaufbau sowie die Homogenität des Anpressdrucks auf die TEM sind Untersuchungsgegenstand. Keramische Ersatzmodule aus dem Werkstoff Macor und die Druckmessfolie *Prescale* des Herstellers Fujifilm kommen dafür zum Einsatz. Es werden zwei vergleichbare Experimente durchgeführt. Zum einen wird anhand eines KMWÜ, Ersatzmodulen und Graphitfolien eine idealisierte Aufbaukonfiguration auf der Universalprüfmaschine umgesetzt, wie in Teilabbildung 7.10 (a) erkennbar. Zum anderen wird der reale einflutige Aufbau einschließlich Kraftmessringe zur Messung der Schraubenkräfte verwendet, wie in Teilabbildung (b) dargestellt. Wie vom Modulhersteller empfohlen wird ein Anpressdruck von 1,5 MPa aufgeprägt. Die Auswertung der verwendeten Druckmessfolien anhand der jeweiligen Flächenpressung ist in Teilabbildung (c) dargestellt. Auf der Universalprüfmaschine konnten aufgrund geometrischer Limitierungen nur rund 70 % der Modulfläche abgebildet werden. Dies gilt jedoch für die Auswertung als ausreichend. Qualitativ ist zu bemerken, dass das idealisierte Experiment eine deutlich homogenere Flächenpressung aufweist. Seitliche Randbereiche (y-Koordinatenrichtung) zeigen jedoch erhöhte Spannungen auf. Im realen Aufbau liegen rund 30 % der Fläche unter der messbaren Spannung von 0,5 MPa der verwendeten Druckmessfolie. Insbesondere die Flächen zwischen zwei Gewindebolzen (x-Koordinatenrichtung) weisen hohe und homogene Spannungsbereiche

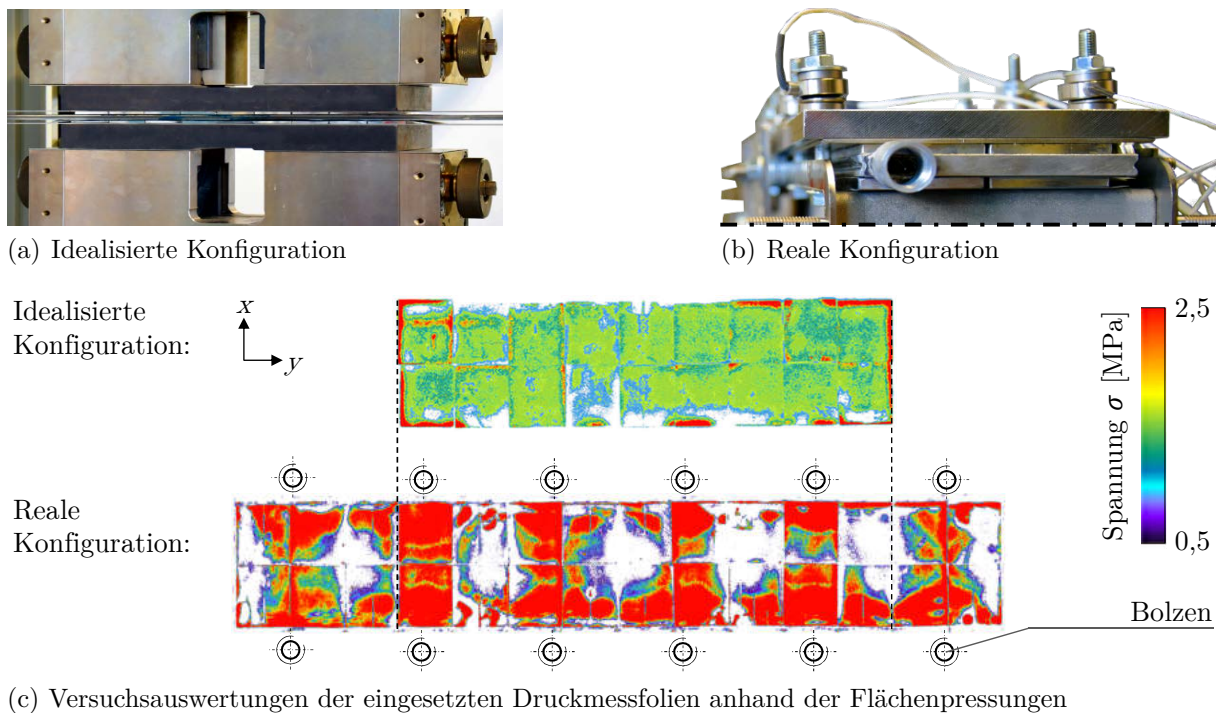


Abbildung 7.10.: Mechanische Voruntersuchung des TEG-Teilsystemaufbaus

auf. Die Auswertung der mittleren Flächenspannungen ergeben geringe Abweichungen zwischen den beiden Experimenten. Diese liegen bei 1,45 MPa für das idealisierte und bei 1,4 MPa für das reale Experiment. Bei TEG mit mehreren TEM sind Inhomogenitäten beim Anpressdruck zu erwarten. Bei der Systemauslegung ist unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses abzuwägen, welche Fertigungstoleranzen der Komponenten erforderlich sind sowie welcher Komplexitätsgrad für die Kräfteinleitung und die Sicherstellung eines homogenen Anpressdrucks notwendig ist.

**Thermoelektrische Untersuchung:** Die Ergebnisse der TEG-Auslegung und der experimentellen Validierung sind Tabelle 7.4 zu entnehmen. Im angegebenen stationären Betriebspunkt wird für den Teilsystemaufbau des einflutigen TEG eine elektrische Leistung von 283 W gemessen. Dies stellt rund 70 % des Simulationswertes dar. Weitere Angaben zum Wirkungsgrad weisen ebenfalls entsprechende Abweichungen auf. Im Wesentlichen ist dies auf den unzureichenden Anpressdruck in der TEG-Struktur zurückzuführen, der im Durchschnitt bei rund 0,4 MPa liegt. Ursache hierfür sind die verwendeten KMWÜ-Varianten, wie im Abschnitt 7.1.1 beschrieben, in Kombination mit den hohen Fertigungstoleranzen der Komponenten. Die Abweichungen sind zudem auf die verwendeten Module zurückzuführen. Nach dem Betrieb sind auf der heißseitigen Deckschicht der Module aufgrund von zu hohen thermomechanischen Spannungen Bruchstellen aufgetreten, wie in Teilabbildung 7.11 (a) zu erkennen ist. Die Ablösung der Deckschicht von der Silikonversiegelung ist zudem in Teilabbildung (b) ersichtlich, was den Oxidationsschutz der Modulschenkel obsolet erscheinen lässt.

Tabelle 7.4.: Ergebnisse der Untersuchung am TEG-Teilsystemaufbau und der Skalierung auf das Gesamtsystem mit HT-Modulen der Materialklasse SnSe, Darstellung i. A. a. [184]

Bezeichnung	Formelzeichen	Teilsystemaufbau		Abweichung	Gesamtsystem Simulation <sup>2</sup>
		Simulation <sup>1</sup>	Experiment <sup>1</sup>		
Thermoele. Material		SnTe <sub>1-x</sub> Se <sub>x</sub>	SnTe <sub>1-x</sub> Se <sub>x</sub>		SnTe <sub>1-x</sub> Se <sub>x</sub>
TEM-Anzahl	$n_{\text{TEM}}$	56	56		168
Elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	405 W	283* W	-30,1 %	717 W
Gegendruck	$\Delta p_{\text{TEG}}$	22 mbar	25,9 mbar	17,7 %	38,5 mbar
Wirkungsgrad	$\eta_{\text{TEM,max}}$	3,9 %	3,7* %	-5,1 %	4,3 %
	$\bar{\eta}_{\text{TEM}}$	3,4 %	3,0* %	-11,8 %	3,7 %
	$\eta_{\text{e,TEG}}$	1,9 %	1,3* %	-31,6 %	0,4 %
	$\eta_{\text{HGWÜ}}$	52,1 %	35,4* %	-32,1 %	21,3 %
Ausnutzungsgrad (Leer-)Gewicht**	$\epsilon_{\text{HGWÜ}}$ $m_{\text{TEG}}$	38,7 % 6 kg	26,3* % 6,8 kg	-32,0 % 13,3 %	15,8 % 30,2 kg

<sup>1</sup> Rdb.:  $\vartheta_{\text{AG,ein}} = 550 \text{ °C}$ ;  $\dot{m}_{\text{AG}} = 0,1 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{\text{KM,ein}} = 85 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{\text{KM}} = 0,1 \text{ dm}^3/\text{s}$ .

<sup>2</sup> Rdb.: SHHS<sub>40 t,max</sub>, s. Tabelle 4.4; Abweichungen:  $\dot{m}_{\text{AG}} = 0,25 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{\text{KM,ein}} = 20 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{\text{KM}} = 0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ .

\* Abweichung durch geringeren Anpressdruck und aufgrund von Fertigungstoleranzen.

\*\* Angabe für den TEG-Kern ohne Messtechnik.

Zusätzlich zur Validierungsstudie wird ein optimiertes TEG-Ergebnisdesign für die Randbedingungen des Erdgas-NFZ im WHVC<sub>40t</sub> ermittelt. Dabei werden die Komponenten des einflutigen Teilsystemaufbaus berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse sind unter dem ‚Gesamtsystem‘ in Tabelle 7.4 aufgeführt. Die WÜ-Fläche des dreiflutigen TEG mit der Bezeichnung TEG-3-2-14 beträgt 2825 cm<sup>2</sup> und die Stückkosten betragen 1811 EUR, wobei eine Großserienfertigung angenommen wird (s. Abschnitt 5.2.3). Die mittlere Leistung von 717 W resultiert in einer Reduktion des Nettokraftstoffverbrauchs von 0,5 % (brutto: 1 %). Unter Berücksichtigung der Annahmen des TCO-Basisszenarios (s. Abschnitt 5.1.3) beträgt die Amortisationszeit über 10 Jahre. Dieses Ergebnis am Beispiel von SnSe-Modulen verdeutlicht, dass Modulauslegungen nach dem Stand der Technik nicht geeignet sind, die anspruchsvollen Ziele dieser Arbeit zu erfüllen. Stattdessen sollten Module auf dem Prüfstand untersucht werden, die höhere Wirkungsgrade und geringere Kosten ermöglichen. Mit den Materialklassen Bismuttellurid und Skutterudid können beispielsweise höhere Wirkungsgrade als mit Zinnselenid erreicht werden (s. Abbildung 2.6). Eine optimierte Modulauslegung kann zudem das TE-Material reduzieren und damit die Kosten deutlich senken.



(a) Bruch der heißseitigen (Keramik-)Deckschicht



(b) Ablösung der heißseitigen Deckschicht

Abbildung 7.11.: Erkenntnisgewinn der Voruntersuchung des TEG-Teilsystemaufbaus am Beispiel von thermoelektrischen Modulen der Materialklasse SnSe für den Hochtemperatureinsatz

**Bypassregelung:** Diese ist Teil des experimentellen Versuchsaufbaus, um die Heiseiten-temperatur der Module im TEG auf ihr Maximum begrenzen zu können. Die Bypassstrecke hat einen Innendurchmesser von 60 mm und eine elektrische Klappe der Firma Pierburg. Für regelbare Sperrklappen ist bemerkenswert, dass diese bereits bei offener Klappenposition einen relativ hohen thermodynamischen Gegendruck erzeugen. Bei Voruntersuchungen der Bypassstrecke lag dieser beispielsweise im Bereich von 2–24 mbar (Rdb.:  $\vartheta_{AG,ein} = 300\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\dot{m}_{AG} = 0,014\text{--}0,056\text{ kg/s}$ ). In Abhängigkeit vom Betriebspunkt liegt die gemessene Leckage der Bypassklappe im Bereich von 0,3–2 % des Gesamtmassenstroms<sup>93</sup>, wie in Abbildung 7.12 dargestellt. Bei vollständig geöffneter Klappe liegt der gemessene Anteil des Fluidstroms der Bypassstrecke am Gesamtmassenstrom  $\dot{m}_{AG}$  im Bereich von 94–97 %. Dies ist insbesondere vom Betriebspunkt, vom Strömungswiderstand der eingesetzten HGW und der Klappe abhängig. In der Abbildung wird die Spannungsvorgabe der Klappenregelung  $U_{Bypass}$  prozentual angegeben — bei 0 % befindet sich die Klappe im offenen und bei 100 % im geschlossenen Zustand. Der TEG-Abgasmassenstrom  $\dot{m}_{TEG}$  fällt bzw. steigt im Zeitbereich von wenigen Sekunden. Die Temperaturänderung der maximalen Heißseitentemperatur  $\vartheta_{HS,max}$  im TEG verändert sich aufgrund der thermischen Trägheit deutlich langsamer. Für die Simulationsumgebung werden insbesondere die Gegendruckkennfelder der parallel geschalteten Abgasstrnge des TEG und des Bypass ermittelt sowie die thermischen Massen berücksichtigt.

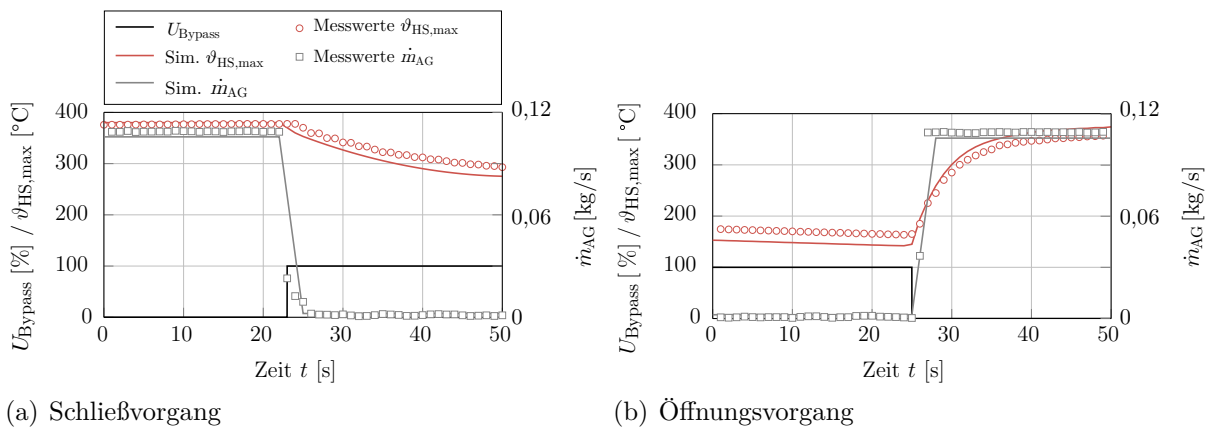


Abbildung 7.12.: Ergebnis der Bypassklappenregelung (Rdb.:  $\vartheta_{AG}=550\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{AG}=0,12\text{ kg/s}$ )

**Vergleich zum Stand der Technik:** Die Einordnung der erzielten Ergebnisse für TEG-Systeme im SNFZ (s. Tabelle A.1 im Anhang) ergibt beispielsweise die zweithöchste gemessene Leistungsdichte mit 42 W/kg (simulativ: 68 W/kg) bzw. mit 57 W/dm<sup>3</sup> (simulativ: 82 W/dm<sup>3</sup>).

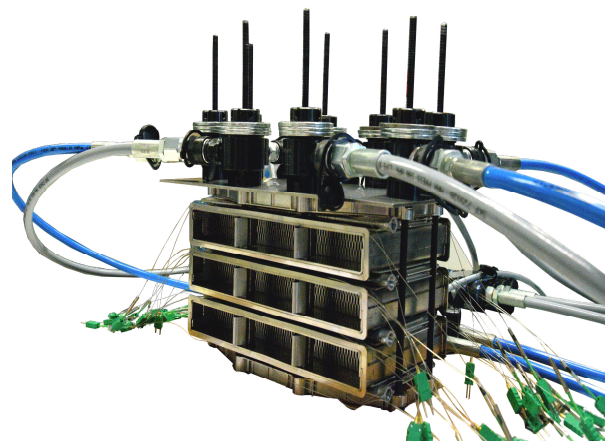
<sup>93</sup>Die Leckage von kostenoptimierten Bypassklappen in der Fahrzeugtechnik liegt bei bis zu 5 %.

## 7.2.2. TEG-Gesamtsystemaufbau

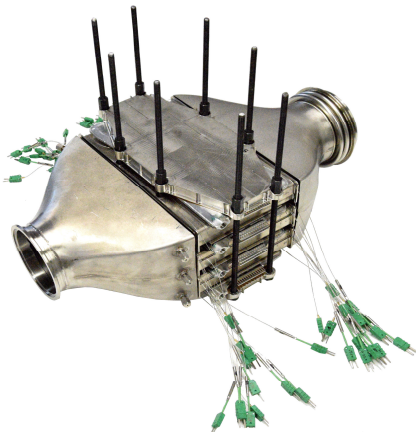
Die Hardwarerealisierung und Untersuchungen erfolgen im Maßstab 1:1 beispielhaft für die Zielanwendung im Erdgas-NFZ anhand des TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO (s. Abschnitt 8.2.1). Als Optimierungsergebnis der Moduluntersuchungen werden segmentierte HT-Module der Materialklassen  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und SKD mit Bezeichnung LG2-31-31-3.2 als Eigenentwicklung in Zusammenarbeit mit dem Modulhersteller eingesetzt (s. Abschnitt 7.1.2 und Tabelle 7.3). Diese Module wurden hinsichtlich der Kosten-Nutzen-Relation optimiert, d. h. minimale Kosten bei gleichzeitig maximalem Wirkungsgrad und maximaler Leistungsdichte. Dies sollte zu einer kürzeren Amortisationszeit des TEG-Systems beitragen, als es die Zinnselenid-Module des TEG-Teilsystemaufbaus aus dem vorangegangenen Abschnitt 7.2.1 ermöglicht haben. Beispielhafte Fertigungsschritte der gewählten hochintegrierten TEG-Stapelbauweise mit drei getrennten Volumina sind in Abbildung 7.13 dargestellt. In den Teilabbildungen (a) und (b) erfolgt zunächst die Positionierung der Komponenten im sogenannten TEG-Kern. In jeder der 6 Modulebenen kommen 24 TEM zu je 3 Modulstreifen in



(a) Teilaufbau des TEG-Kern



(b) Simultane hydraulische Bolzenvorspannung



(c) TEG-Kern mit Diffusor und Konfusor



(d) TEG-Funktionsmuster mit TEM LG2-31-31-3.2

Abbildung 7.13.: Beispielhafte Fertigungsschritte des TEG-Gesamtsystemaufbaus

elektrischer Reihenschaltung zum Einsatz. Die große Anzahl der Thermoelemente (grüne Anschlüsse) ist ausschließlich für die wissenschaftliche Untersuchung erforderlich. An beiden Enden des Stapelaufbaus werden gewichtsoptimierte Deckelstrukturen als Fräsbauteile eingesetzt. Zur Erzielung einer hohen Biegefestigkeit des Strukturbauteils erfolgt die Auslegung anhand einer Kreuzverrippung im Kern und beidseitigen Deckschichten. Trotz der Einleitung der erforderlichen hohen Druckkräfte und einer überspannten Fläche von  $150 \times 300 \text{ [mm}^2\text{]}$  beträgt das Bauteilgewicht einer Deckelstruktur lediglich 1,1 kg. Im TEG-Gesamtsystemaufbau entspricht das Gewicht der beiden Deckel rund 9% (s. Tabelle E.1 im Anhang).<sup>94</sup> Der dominante Strömungsquerschnitt der drei HGWÜ des TEG-Kerns wird in Teilabbildung 7.13 (b) ersichtlich und stellt ein Ergebnis der optimierten Auslegung dar. Zur Erzielung einer möglichst homogenen Druckspannung im Aufbau und damit Vorspannkraft der verwendeten acht Gewindebolzen, werden hydraulische Bolzenvorspannvorrichtungen der Firma SKF eingesetzt. Diese stellen eine Eigenentwicklung in Zusammenarbeit mit dem Hersteller dar und ermöglichen die simultane und gleichmäßige Krafteinleitung über alle Gewindebolzen. Die erzielte Vorspannung beträgt im Mittel 2,2 MPa. Der TEG-Kern ist nach Aufbringung des Anpressdrucks einschließlich der abgasseitigen Stromführungskomponenten in Teilabbildung (c) dargestellt. Zur Reduzierung der thermomechanischen Spannungen des hochintegrierten Aufbaus, aufgrund von beispielsweise thermischen Längenänderungen und Vibrationen, wird am Diffusor ein rundes Kompensationselement in Form eines Metallbalgs aus Edelstahl vorgesehen. Die Wahl eines Ausgleichselements und dessen Positionierung ist auf die ökonomischen Systemauslegung zurückzuführen. In Teilabbildung (d) wird das Funktionsmuster in der sogenannten Einhausung gezeigt, wie es als experimenteller Versuchsaufbau im Heißgaserzeuger-Prüfstand verwendet wird. Bei der dargestellten Hardwarerealisierung sind typische Prüfstandsflansche, seitliche Wartungsdeckel und eine spezielle Kühlmittelführung zur Integration der zusätzlichen Messtechnik in die seitlichen Gehäusestrukturen angebracht worden. Dies stellt die

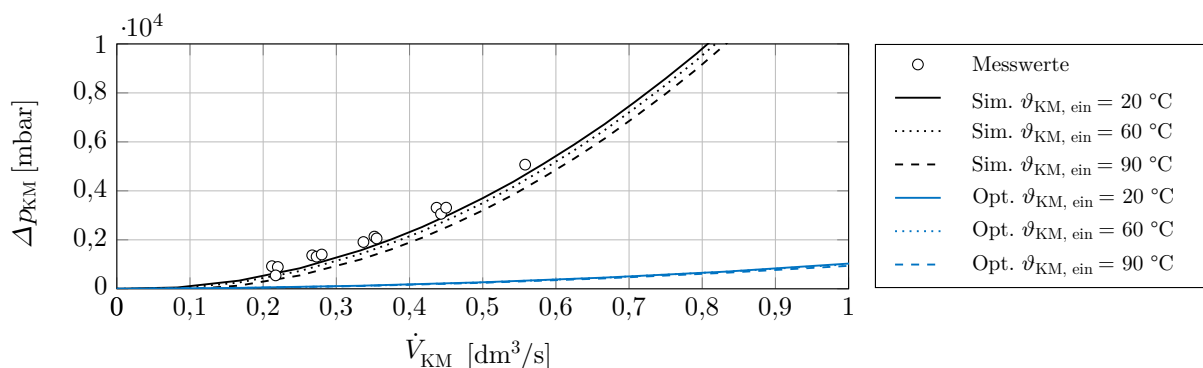


Abbildung 7.14.: Kühlmittelseitige Auswertung des experimentellen TEG-Gesamtsystemaufbaus

<sup>94</sup>Das Leichtbaupotential und die Gewichtsoptimierung, insbesondere der Strukturbauteile im TEG sind nur teilweise erfolgt. Der Schwerpunkt lag auf der einwandfreien Fertigung und dem zuverlässigen Betrieb des Systems, sodass die Auslegung mit überhöhten Sicherheitsfaktoren erfolgt ist.

Prüfstandskonfiguration dar, entspricht jedoch nicht den optimalen Ausgestaltungen für die Fahrzeugintegration. Am Beispiel der Kühlmittelführung wird dies im Folgenden verdeutlicht. Der Gegendruck  $\Delta p_{KM}$  des realisierten Funktionsmusters sowie das Ergebnis der Optimierung für die Fahrzeugintegration sind in Abbildung 7.14 dargestellt. Die verwendeten 4 KMWÜ werden jeweils parallel durchströmt. Unter anderem wurden jedoch die verwendeten Strömungsquerschnitte der Rohrverbindungen für die Fahrzeugintegration erweitert und für Volumenströme von bis zu  $0,7 \text{ dm}^3/\text{s}$  anstelle von bis zu  $0,3 \text{ dm}^3/\text{s}$  strömungsoptimiert. Somit ist der kühlmittelseitige Gegendruck des TEG-Systems bei der Fahrzeugintegration deutlich geringer.

Die ausgelegte elektrische Verschaltung der 18 Modulstreifen mit 6 MPPT ist Abbildung E.2 im Anhang zu entnehmen. Effiziente *Buck-Boost*-Wandler von [252] mit Wirkungsgraden von bis zu 98,3% werden bei einer Ausgangsspannung von 24 V eingesetzt (vgl. [103]).

**Thermoelektrische Untersuchung:** Die simulativen Ergebnisse der TEG-Auslegung und die Ergebnisse der experimentellen Validierung sind in Tabelle 7.5 für den Betriebspunkt  $\text{SHHS}_{40 \text{ t, max}}^*$  bei Vollast dargestellt.<sup>95</sup> Bemerkenswert sind die geringen Abweichungen der Messwerte von den Simulationen im Bereich von weniger als 6% und die maximal gemessene elektrische Leistung von rund 2700 W. Der höchste Wirkungsgrad der Module  $\eta_{\text{TEM}}$  wird mit 7,4% im Betriebspunkt  $\text{SHHS}_{40 \text{ t, max}}^*$  ermittelt. Der höchste Wirkungsgrad der HGWÜ  $\eta_{\text{HGWÜ}}$  ergibt sich bei Teillast im Betriebspunkt  $\text{WHVC}_{15 \text{ t, m}}^*$  mit 52,3%. In diesem wird zudem der höchste effektive Wirkungsgrad  $\eta_{\text{e, TEG}}$  mit 3,3% erreicht (s. Gleichung 5.34). Eine Gewichtstabelle der relevanten Komponenten und Ergebnisse weiterer Betriebspunkte sind in Tabelle E.1 und E.2 im Anhang aufgeführt.

Tabelle 7.5.: Ergebnisse des TEG-Gesamtsystemaufbaus im maximalen Betriebspunkt  $\text{SHHS}_{40 \text{ t, max}}^*$

Bezeichnung	Formelzeichen	TEG-Gesamtsystemaufbau		
		Simulation	Experiment	Abweichung
thermoelektrisches Material		$\text{Bi}_2\text{Te}_3\&\text{SKD}$	$\text{Bi}_2\text{Te}_3\&\text{SKD}$	
TEM-Anzahl	$n_{\text{TEM}}$	144	144	
elektrische Leistung	$P_{\text{el}}$	2796 W	2697 W	-3,6 %
Gegendruck	$\Delta p_{\text{TEG}}$	29,3 mbar	28,7 mbar	-2,0 %
Wirkungsgrad	$\eta_{\text{TEM, max}}$	7,3 %	7,4 %	1,4 %
	$\bar{\eta}_{\text{TEM}}$	7,2 %	7,1 %	-2,0 %
	$\eta_{\text{e, TEG}}$	1,4 %	1,3 %	-5,6 %
	$\eta_{\text{HGWÜ}}$	19,8 %	19,0 %	-3,7 %
Ausnutzungsgrad	$\epsilon_{\text{HGWÜ}}$	14,8 %	14,5 %	-2,3 %
(Leer-)Gewicht**	$m_{\text{TEG}}$	24,7 kg	25,3 kg	2,3 %

\* Abweichung zum BP (s. Tabelle 4.4):  $\dot{m}_{\text{AG}} = 0,25 \text{ kg/s}$  (max. Heißgaserzeugerleistung: 200 kW);  $\vartheta_{\text{KM, ein}} = 20 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{\text{KM}} = 0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ .

\*\* Angabe für den TEG-Kern ohne Messtechnik.

<sup>95</sup>In diesem Abschnitt 7.2.2 stellt die \*-Angabe die Abweichungen zu den definierten Betriebspunkten aus Tabelle 4.4 dar. Abweichend gilt:  $\vartheta_{\text{KM, ein}} = 20 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{\text{KM}} = 0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$  sowie zudem für  $\text{SHHS}_{40 \text{ t, max}}^*$ :  $\dot{m}_{\text{AG}} = 0,25 \text{ kg/s}$ , da die Heißgaserzeugerleistung limitiert ist auf 200 kW.



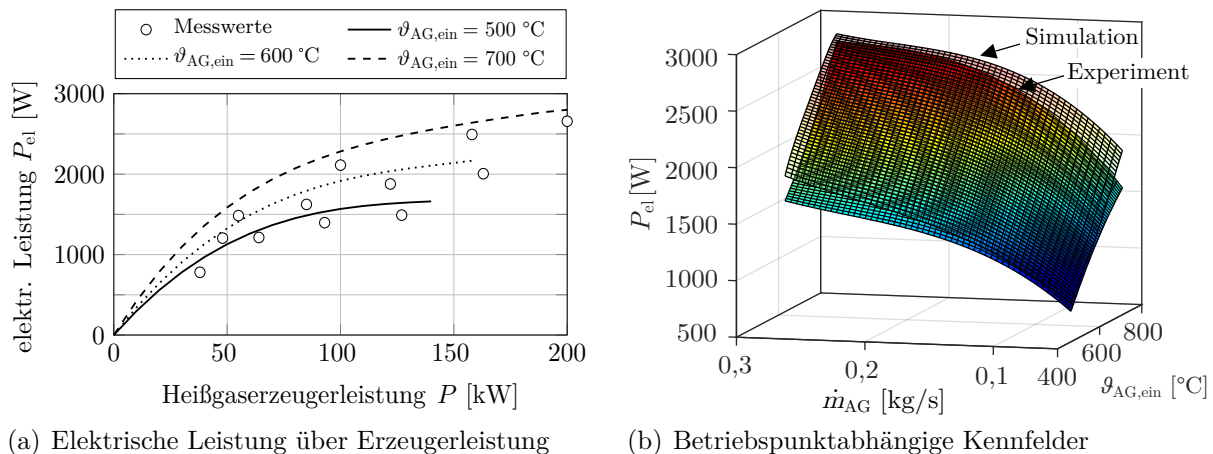
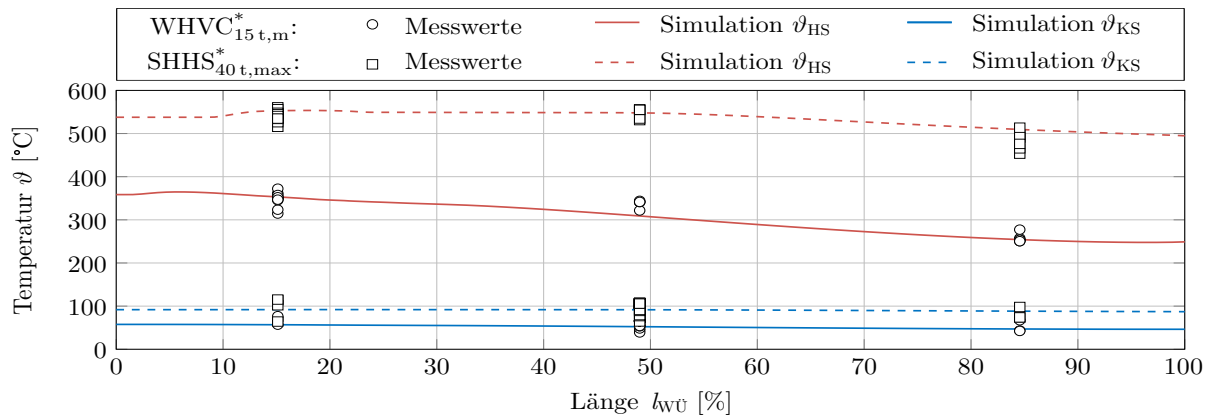


Abbildung 7.15.: Ergebnisse des TEG-Gesamtsystemaufbaus für das Erdgas-NFZ in Form des Vergleichs von Simulation und Experiment; Teilabbildung (b) aus [48]

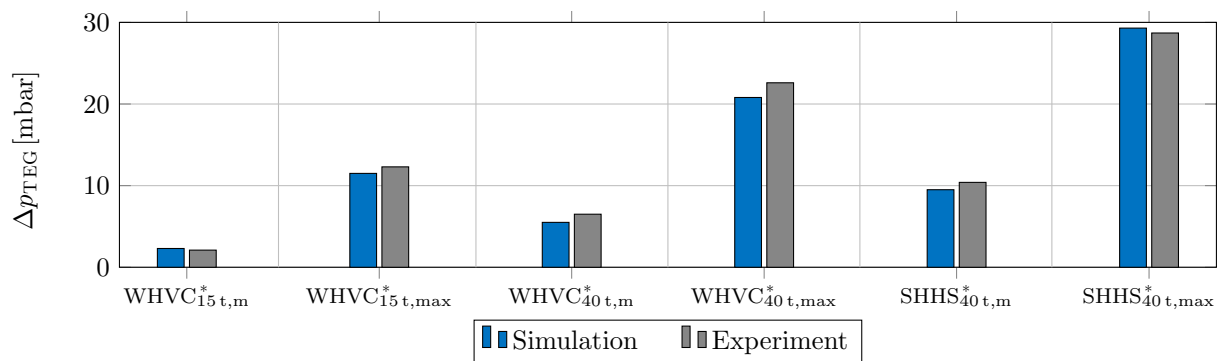
Die elektrische Leistungscharakteristik  $P_{el}$  in Abhängigkeit von der Leistung des Heizgaserzeugers und der Eingangstemperatur des Abgases  $\vartheta_{AG,ein}$  sind in Teilabbildung 7.15 (a) dargestellt. Leistungskennfelder in Abhängigkeit von der Abgastemperatur und dem Massenstrom  $\dot{m}_{AG}$  sind zudem in Teilabbildung (b) illustriert. Im Allgemeinen sinkt die elektrische Leistung mit ansteigendem Temperaturniveau des Kühlmittels. Beispielsweise sinkt diese bei einer Eingangstemperatur von  $60\text{ °C}$  im Mittel um rund 20 % und bei  $90\text{ °C}$  um rund 30 % im Vergleich zu den dargestellten Ergebnissen bei  $20\text{ °C}$ . Weitere detaillierte Ergebnisse zur Temperaturverteilung in Längsrichtung der WÜ sind in Teilabbildung 7.16 (a) illustriert. Die auf den Oberflächen gemessenen gleichmäßigen Temperaturverteilungen ( $\vartheta_{HS}$ ;  $\vartheta_{KS}$ ) sind für die Betriebspunkte bei Teillast ( $WHVC_{15t,m}^*$ ) und bei Volllast des Motors ( $SHHS_{40t,max}^*$ ) erkennbar. Bei Teillast fällt die mittlere Oberflächentemperatur der HGWÜ um 3,3 % bzw. liegt der Temperaturabfall pro Längeneinheit bei  $11,7\text{ K/cm}$ . Bei Volllast sind es 0,8 % bzw.  $4,6\text{ K/cm}$ . Zudem wurden variierende Oberflächentemperaturen in Querrichtung<sup>96</sup> gemessen. Für den HGWÜ liegen diese bei Teillast im Bereich von  $\pm 10\%$  bzw.  $\pm 35\text{ K}$ . Bei Volllast sind die Abweichungen geringer und liegen im Bereich von  $\pm 2\%$  bzw.  $\pm 10\text{ K}$ . Der abgasseitige Gegendruck  $\Delta p_{TEG}$  ist für unterschiedliche Betriebspunkte in Teilabbildung (b) dargestellt. Insbesondere in den Teillastbetriebspunkten sind die Gegendrucke mit weniger als 10 mbar gering.

Der Anteil der parasitären Verluste des TEG liegt im Mittel aller Betriebspunkte bei rund 2 % (s. Gleichung 5.37). Im Minimum betragen die parasitären Wärmeströme  $0,6\text{ kW}$  im Betriebspunkt  $WHVC_{15t,m}^*$ , was einem Anteil von 1,7 % entspricht. Im Maximum sind es  $8,6\text{ kW}$  und 4,2 % im Betriebspunkt  $SHHS_{40t,max}^*$ .

<sup>96</sup>Das typische Temperaturprofil in einem (Abgas-)Rohr weist radial absinkende Temperaturen zu den Grenzschichten und der Wand auf. Dieses Phänomen zeigt sich auch im HGWÜ-Rohr.



(a) Oberflächentemperaturverteilung in x-Koordinatenrichtung



(b) Gegendruck in verschiedenen Betriebspunkten; Abbildung aus [48]

Abbildung 7.16.: Experimentelle Ergebnisse des TEG-Gesamtsystemaufbaus

**Vergleich zum Stand der Technik:** Zu Beginn dieser Arbeit waren vier Arbeiten mit Hardwarerealisierungen im NFZ-Maßstab 1:1 bekannt (vgl. [22, 59, 103, 129]). Alle haben einen geringeren technologischen Reifegrad als der hochintegrierte Gesamtsystemaufbau dieser Arbeit. Die Einordnung der erzielten Ergebnisse ergibt die höchste elektrische Leistungsmessung in Höhe von 2697 W für TEG-Systeme im SNFZ-Anwendungsgebiet (s. Tabelle 2.2) sowie auch für automobiler Anwendungen. Die Steigerung beträgt 253 % im Vergleich zur Untersuchung von Bass und Elsner [59] für Diesel-NFZ. Die experimentelle Leistungsdichte dieser Arbeit beträgt 174 W/kg (simulativ: 189 W/kg) bzw. 327 W/dm<sup>3</sup> (simulativ: 354 W/dm<sup>3</sup>). Im Vergleich zu Bass und Elsner stellt das eine Steigerung um 237 % bzw. 547 % dar. Dabei kommen 0,8 kg thermoelektrisches Material zum Einsatz, was einer Reduktion auf rund 12 % gegenüber der Arbeit von Bass und Elsner mit 6,8 kg entspricht (s. Tabelle A.1 im Anhang). Der höchste effektive Wirkungsgrad (s. Gleichung 5.34) dieser Arbeit beträgt 3,3 %, was eine Steigerung von 157 % im Vergleich zu Zhang [22] darstellt.

### 7.3. Untersuchung zur Langzeitstabilität

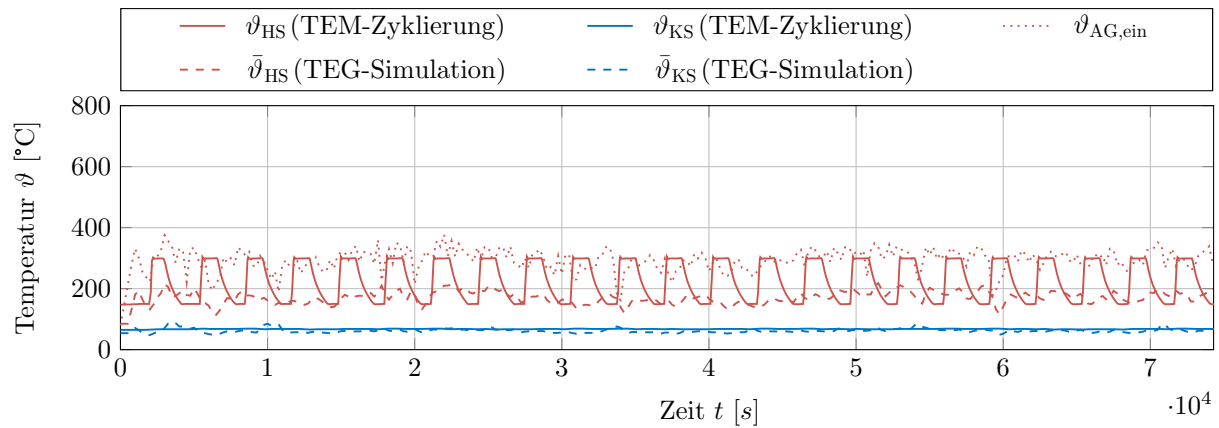
Der Stand der Technik liefert keine fundierten Erkenntnisse über die Langzeitstabilität von TEG-Systemen und es ist keine wissenschaftliche Vorgehensweise bekannt, um diese für Fahrzeuganwendungen zu bestimmen.

Die folgenden Ergebnisse bezüglich der thermischen Zyklierung<sup>97</sup> der Module liefern Erkenntnisse, die für die langzeitstabile TEG-Auslegung dieser Arbeit berücksichtigt werden. Allgemein führen thermische Wechselbeanspruchungen zur Degradation und folglich zur Leistungsminderung der Module, die sich im reduzierten Wirkungsgrad bzw. in der Gütezahl bemerkbar machen (vgl. bspw. [257]). Grundsätzlich sind zwei thermische Alterungseffekte zu unterscheiden, die durch thermische Zyklierung und durch thermische Auslagerung über eine Zeitdauer auftreten. Beide Effekte lassen sich nicht isoliert und unabhängig voneinander untersuchen. Zur besseren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse werden zwei NT-TEM mit Bezeichnung LG1-31-31-3.3 und zwei segmentierte HT-TEM mit Bezeichnung LG2-31-31-4.4 für die Untersuchung ausgewählt (s. Tabelle 7.3). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden geometrisch ähnliche Module verwendet. Die Experimente erfolgen auf der Modulprüfmaschine TEGMA unter Schutzgasatmosphäre (s. Teilabbildung 7.18 (a)).

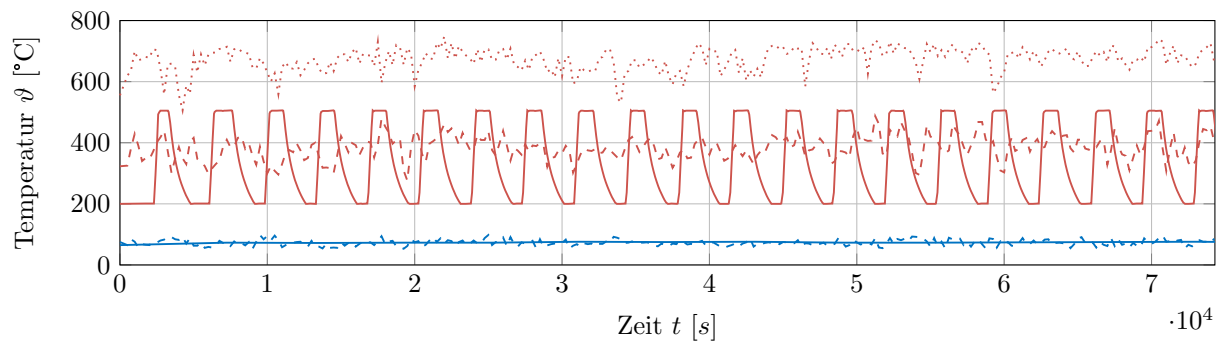
Die Temperaturen der thermischen Zyklierung des untersuchten NT-TEM sind in Teilabbildung 7.17 (a) und des HT-TEM in (b) im Zeitverlauf dargestellt. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen werden erstmals Randbedingungen der TEG-Zielanwendung bei der Zyklierung berücksichtigt.<sup>98</sup> Die Auswahl der Heiseiten-  $\vartheta_{HS}$  und Kaltseitentemperatur  $\vartheta_{KS}$  der Zyklierung erfolgt anhand von Grobschätzungen der resultierenden mittleren Heiß- und Kaltseitentemperaturen der TEG-Designs. Für die Zyklierung des NT-TEM sind die Temperaturen  $\vartheta_{KS} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{HS1} = 150\text{ }^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{HS2} = 300\text{ }^\circ\text{C}$  sowie eine Zyklusdauer von 4600 s definiert worden. Für die Zyklierung der HT-TEM sind es die Temperaturen  $\vartheta_{KS} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_{HS1} = 200\text{ }^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{HS2} = 500\text{ }^\circ\text{C}$  sowie eine Zyklusdauer von 3510 s. Die Auswahl basiert auf den vorhandenen Abgastemperaturen am Ausgang der jeweiligen AGN, d. h. den Temperaturen am TEG-Eingang  $\vartheta_{AG, \text{ein}}$ , und den entsprechenden Kühlmitteltemperaturen des NT-KMK (s. Abschnitt 4.2; Angaben zur Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub>). Beispielhaft und als Vorgriff auf die weitere Arbeit werden in der Abbildung zudem die tatsächlich resultierenden mittleren Heiseitentemperaturen  $\bar{\vartheta}_{HS}$  und Kaltseitentemperaturen  $\bar{\vartheta}_{KS}$  im Zeitverlauf der jeweiligen TEG-Varianten zur Minimierung

<sup>97</sup>Weitere Untersuchungsaspekte zur Langzeitstabilität von TEG-Systemen mit geringerer Relevanz stellen u. a. Vibrationsprüfungen, mechanische und thermische Schockprüfungen der Module wie auch des TEG sowie Langzeiteffekte der Ablagerungsbildung in den WÜ dar.

<sup>98</sup>Typischerweise wird die thermische Zyklierung bislang vom Modulhersteller ohne Kenntnis der Zielanwendung durchgeführt. Dies erfolgt zumeist zwischen der maximal Heiß- und minimalen Kaltseite. Die Haltezeiten der Zyklen werden meist durch die vorhandene Prüfstandsinfrastruktur bestimmt. Die Ergebnisse haben daher nur eine geringe Aussagekraft für die Zielanwendung.



(a) NT-Module und TEG-Entwicklung im Diesel-NFZ



(b) HT-Module und TEG-Entwicklung im Erdgas-NFZ

Abbildung 7.17.: Thermische Zyklierung der Module sowie Vergleich zu TEG-Systemrandbedingungen und TEG-Simulationsergebnissen unter der Zielsetzung  $TCO_{\min}$ 

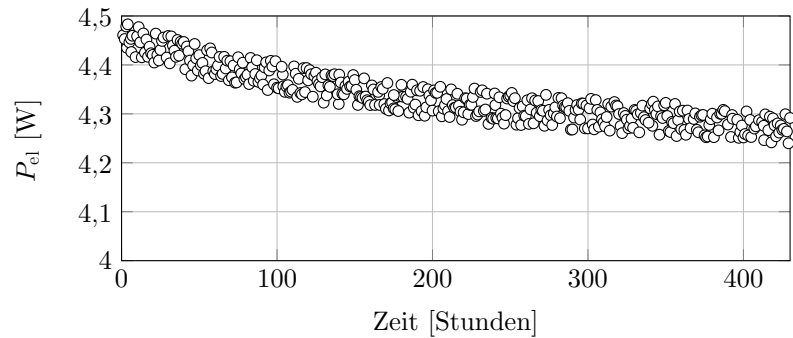
der TCO angegeben (s. Abschnitt 8.2.1).<sup>99</sup> Zu erkennen sind Temperaturdifferenzen im Zeitverlauf zwischen den Heiseitentemperaturen der Module während der Zyklierung und den tatsächlich auftretenden im optimierten TEG-Ergebnisdesign. Außerdem sind die absoluten Änderungen der Heiseitentemperaturen in der Zielanwendung geringer als bei der Zyklierung definiert. Dies sollte sich positiv auf die Langzeitstabilität auswirken.

Beide Zyklierungen wurden im Dauertest über 430 Stunden durchgeführt. Die Zyklenanzahl beträgt 485 für die NT-TEM und 675 für die HT-TEM. Dies entspricht jeweils einer Einsatzdauer von etwa einem Vierteljahr, wenn die kumulative Veränderung des Betrages der Heiseitentemperaturen zu Grunde gelegt wird. Nach der Zyklierung wurden Leistungsreduzierungen festgestellt, wie z. B. in Teilabbildung 7.18 (b) zu erkennen ist. Diese sind auf die Alterung der Module zurückzuführen. Die Kurvenverläufe der elektrischen Leistung der Module über die Zeit weisen einen regressiven Verlauf und ein asymptotisches Verhalten auf. Die direkten Wiederholungen der Versuche zeigen jeweils nur geringe statistische Abweichungen. Die elektrische Leitungsreduktion des NT-TEM beträgt im Mittel 3,2% für den Zeitraum eines Vierteljahres. Basierend

<sup>99</sup>Die mittleren Oberflächentemperaturen der TEG-Ergebnisdesigns standen zum Zeitpunkt der Definition von den Randbedingungen der Zyklierung, aufgrund der parallelen Arbeiten, noch nicht zur Verfügung.



(a) Modulprüfstand TEGMA



(b) Messwerte der Modulleistung über die Zeit

Abbildung 7.18.: Thermische Zyklierung des NT-TEM mit Bezeichnung LG1-31-31-3.3

auf den experimentellen Messwerten wird die extrapolierte Leitungsreduktion, bei Annahme eines asymptotischen Alterungsverhaltens, auf bis zu 6,8 % pro Jahr und bis zu 14,7 % im Zeitraum von 3 Jahren abgeschätzt. Zum Vergleich weist die Zyklierung des Modulherstellers eine Leistungsreduktion von rund 6 % pro Jahr auf (Rdb.:  $\vartheta_{KS} = 50\text{ °C}$ ;  $\vartheta_{HS} = 300\text{ °C}$  und eine Zyklusdauer von 1200 s).

Für das HT-TEM liegt der Mittelwert der elektrischen Leistungsabnahme bei 2,3 % im Zeitraum eines Vierteljahres. Die Leistungsreduktion wird mit bis zu 3,1 % pro Jahr und bis zu 8,3 % im Zeitraum von 3 Jahren abgeschätzt.

**Fazit:** Thermische Zyklierungen von NT- und HT-Modulen konnten zur Bestimmung ihres Alterungsverhaltens und der Langzeitstabilität erfolgreich durchgeführt werden. Alle Module sind nach Abschluss der Experimente noch funktionsfähig. Ein Vergleich der Ergebnisse ist aufgrund von unterschiedlichen Randbedingungen bei der Zyklierung schwierig. Die Auswahl der Temperaturniveaus und der Haltezeiten während der Zyklierung ist für aussagekräftige Ergebnisse nicht trivial. Die Auslegungsweise hat entscheidenden Einfluss auf die Langzeitstabilität der TEG-Systeme.

**Vergleich zum Stand der Technik:** Die Einordnung der erzielten Ergebnisse ist wie beschrieben aufgrund des Fehlens eines standardisierten methodischen Ansatzes, unterschiedlicher Modulauslegungen und Auswahl der Randbedingungen bei der Zyklierung erschwert. Die wenigen öffentlich zugänglichen empirischen Studien (vgl. [22, 103, 104]) zeigen im Allgemeinen optimistischere Ergebnisse als die in dieser Arbeit. Am Beispiel der NT-TEM hat sich gezeigt, dass sich diese stabiler gegenüber thermischen Zyklen aber instabiler gegenüber thermischer Auslagerung zeigen. Laut [105] sollten zum Beispiel NT-Module der Materialklasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  bei einer maximalen Heißseitentemperatur von  $250\text{ °C}$  betrieben werden, um lange Lebensdauern ( $> 10$  Jahre) zu erzielen.

## Kapitel 8.

# Ergebnisse der Gesamtsystemuntersuchung und Diskussion

Dieses Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der Gesamtsystemoptimierung bei unterschiedlichen Zielsetzungen im Rahmen des abschließenden Arbeitsschrittes des methodischen Vorgehens dieser Arbeit (s. Abschnitt 3.2). Anschließend werden die Auswirkungen der optimierten TEG-Ergebnisdesigns auf des Gesamtfahrzeug erläutert. Darüber hinaus wird die Gesamtsystemsimulation einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um den Einfluss der Parameter auf das Systemverhalten zu untersuchen. Im Anschluss erfolgt eine Diskussion der Ergebnisse, einschließlich eines Vergleichs der Forschungsergebnisse mit dem Stand der Technik und konkurrierenden Abwärmenutzungstechnologien. Dieses Kapitel endet mit der Bewertung des methodischen Vorgehens dieser Arbeit.

### 8.1. Effizienzsteigerung durch thermoelektrische Generatorsysteme

Die Effizienzsteigerung im Sinne der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger erhöhter Wirtschaftlichkeit stellt eine Zielsetzung dieser Arbeit dar (s. Abschnitt 3.2). Mithilfe der ganzheitlichen Simulationsumgebung als Lösungsweg für diese komplexe Problemstellung werden unterschiedliche TEG-Ergebnisdesigns virtuell abgebildet und bewertet. Die Kosten-Nutzen-Relation ist als ausgewählte Ergebnisgröße der multikriteriellen Optimierung über der WÜ-Fläche  $A_{WÜ}$  für die jeweilige Referenzanwendung in Abbildung 8.1 dargestellt. Die Kosten-Nutzen-Relation stellt das Verhältnis zwischen den prognostizierten Serienstückkosten des TEG-Systems und den verringerten  $\text{CO}_2$ -Emissionen in Gramm pro Kilometer des Referenzfahrzeugs einschließlich des TEG-Systems dar. Um den Vergleich verschiedener Lastpunkte aufzuzeigen und die Übersichtlichkeit zu wahren, werden die drei relevantesten Betriebspunkte illustriert ( $\text{WHVC}_{40\text{t,m}}$ ,  $\text{WHVC}_{40\text{t,max}}$  und  $\text{SHHS}_{40\text{t,m}}$ ; s. Tabelle 4.2). Die Punkte stellen unterschiedliche TEG-Ergebnisdesigns dar. Qualitativ bilden die Punktakkumulationen für jeden Betriebspunkt eine Pareto-Front aus und ein Minimum der Kosten-Nutzen-Relation lässt sich in den Teilabbildungen 8.1 (a) und (b) bestimmen.

---

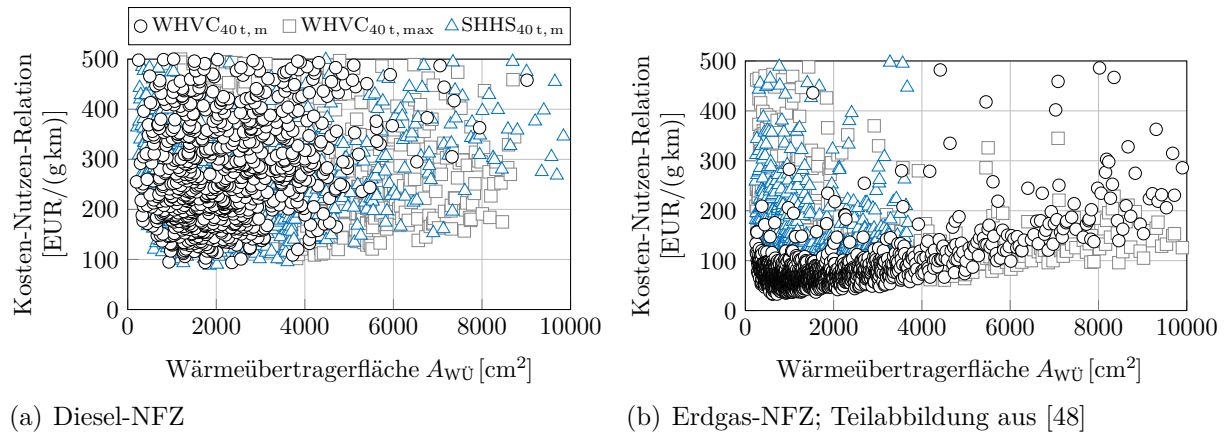


Abbildung 8.1.: Ergebnisübersicht der multikriteriellen Optimierung anhand der Kosten-Nutzen-Relation in Abhängigkeit von der Wärmeübertragerfläche für beide Anwendungsszenarien

Die Minima der Kosten-Nutzen-Relation liegen im Diesel-NFZ deutlich höher als beim Erdgas-Pendant aufgrund der vergleichsweise geringeren Abgasenthalpien und der Verwendung von NT-Modulen mit begrenztem Wirkungsgrad. Beispielsweise liegt das allgemeine Minimum der Optimierung der Kosten-Nutzen-Relation, d. h. Optimierung auch außerhalb der genannten Betriebspunkte, für das Diesel-NFZ bei 85 EUR/(g km) bzw. 805 EUR/% und für das Erdgas-Pendant bei 32 EUR/(g km) bzw. 344 EUR/%.<sup>100</sup> In beiden Anwendungsszenarien sind kleinflächige TEG-Varianten mit relativ kleinen WÜ-Flächen von weniger als 2000 cm<sup>2</sup> im Hinblick auf die Kosten-Nutzen-Relation vorteilhaft, wie in der Konzeptionsphase in Abschnitt 6.5 erwartet. Großflächigere TEG-Systeme bieten den Vorteil einer höheren elektrischen Ausgangsleistung, haben jedoch den Nachteil einer höheren Kosten-Nutzen-Relation. Eine Ergebnisübersicht der TEG-Ergebnisdesigns unter der Zielsetzung der Minimierung der Kosten-Nutzen-Relation bei geometrisch freier Parameteroptimierung ist Tabelle 8.1 zu entnehmen.

Tabelle 8.1.: Ergebnisübersicht der erzielten minimalen Kosten-Nutzen-Relation dieser Arbeit

Referenz(-zyklus / -strecke)	Diesel-NFZ minimale Kosten-Nutzen-Relation		Erdgas-NFZ minimale Kosten-Nutzen-Relation	
	[EUR/(g km)]	[EUR/%]	[EUR/(g km)]	[EUR/%]
Minimum der Optimierung	85	805	32	344
WHVC <sub>15 t, m</sub>	186	1261	64	406
WHVC <sub>40 t, m</sub>	92	1057	41	441
SHHS <sub>40 t, m</sub>	89	822	53	479
Konstantfahrt <sub>40 t, m</sub> <sup>1</sup>	224	1568	79	557

<sup>1</sup> Reale Konstantfahrt in der Ebene bei 80 ± 1 km/h.

<sup>100</sup>Angabe erfolgt in Geldeinheit pro reduziertem Gramm der CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kilometer sowie in der nutzfahrzeugtypischen Angabe in Geldeinheit pro Prozent der Kraftstoffreduktion.

## 8.2. Variantenanalyse

In den folgenden Analysen der TEG-Varianten werden die Integrationskonzepte am Ausgang der AGN und im NT-KMK der Fahrzeuge betrachtet, da diese die Vorteile von hohen Abgasenthalpien und niedrigen Kühlmitteltemperaturen bieten (s. Kapitel 4 und Abschnitt 6.1). Das jeweilige Optimum wird als Ergebnis der Mehrzieloptimierung unter Berücksichtigung einer großen Anzahl von Last- und Betriebspunkten ermittelt. Für die Bewertung eines Systems gilt es, Anforderungen zu definieren anhand derer das Leistungsvermögen geprüft werden kann. Da es keine zulassungsrelevanten oder einheitlich genormten Fahrzyklen für schwere NFZ auf Gesamtfahrzeugebene gibt, wie in Abschnitt 4.2.2 angeführt, wurden als Randbedingungen für die TEG-Entwicklung der Referenzfahrzyklus WHVC und die Referenzstrecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart festgelegt.

### 8.2.1. TEG-Varianten zur Minimierung der Gesamtbetriebskosten

Zur Beantwortung des zentralen Bestandteils der Forschungsfrage dieser Arbeit gilt es nachzuweisen (bzw. zu widerlegen), dass mindestens eine (bzw. keine) TEG-Systemlösung existiert, welche die Gesamtbetriebskosten im Vergleich zum Referenzfahrzeug ohne TEG (als Referenz) senkt (s. Abschnitt 3.2). Die Bestimmung des Optimums stellt einen Auswahlprozess dar, der infolge mehrerer Iterationsschritte unter Gewichtung der Ergebnisgrößen erfolgt. Nach abnehmender Relevanz geordnet werden unter anderem die Systemkosten, der Nutzen in Form der Kraftstoffreduktion, die TEG-Leistung, der Wirkungsgrad und damit der resultierende Wärmestrom ins Kühlmittel, der Gegendruck, das resultierende Volumen und Gewicht berücksichtigt. Es werden die Ergebnisse verschiedener Betriebspunkte wie Durchschnitts- und Maximallastpunkte einbezogen. Dazu zählen die Ergebnisse der Mittelwerte im Referenzzyklus ( $WHVC_{40t,m}$ ) und der Referenzstrecke ( $SHHS_{40t,m}$ ) bei Zuladung sowie die Modalwerte. Die Ergebnisse der jeweiligen Maxima, der Leerfahrt und der charakteristischen Lastpunkte (Nennleistung, Nenndrehmoment und Leerlauf) werden mit geringerer Gewichtung einbezogen.

#### Ergebnisse im Diesel-NFZ

Als Optimum wird das TEG-Ergebnisdesign mit Bezeichnung TEG-3-1-3 sowie Stückkosten von 784 EUR, einem Gewicht<sup>101</sup> von 24,5 kg, einer WÜ-Fläche von 1260 cm<sup>2</sup> und NT-TEM der Materialklasse Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> mit Bezeichnung Y1-125-84-1.6 (s. Tabelle 7.2) ermittelt. Das Design ist kompakt, leicht und kostengünstig im Vergleich zu den weiteren ausgewählten TEG-Ergebnisdesigns (s. Tabelle D.2 im Anhang).

**Referenzzyklus WHVC:** Die Ergebnisse der dynamischen Simulation werden in Abbildung 8.2 dargestellt. Die Motorleistung  $P_{VKM}$  ist auf der linken Abszisse und die

<sup>101</sup>In diesem Kapitel erfolgt die Angabe als TEG-Gesamtwicht im Fahrzeug, d. h. TEG-System inklusive sämtlicher Komponenten wie z. B. Bypass, Leistungselektronik und Kühlmittel.



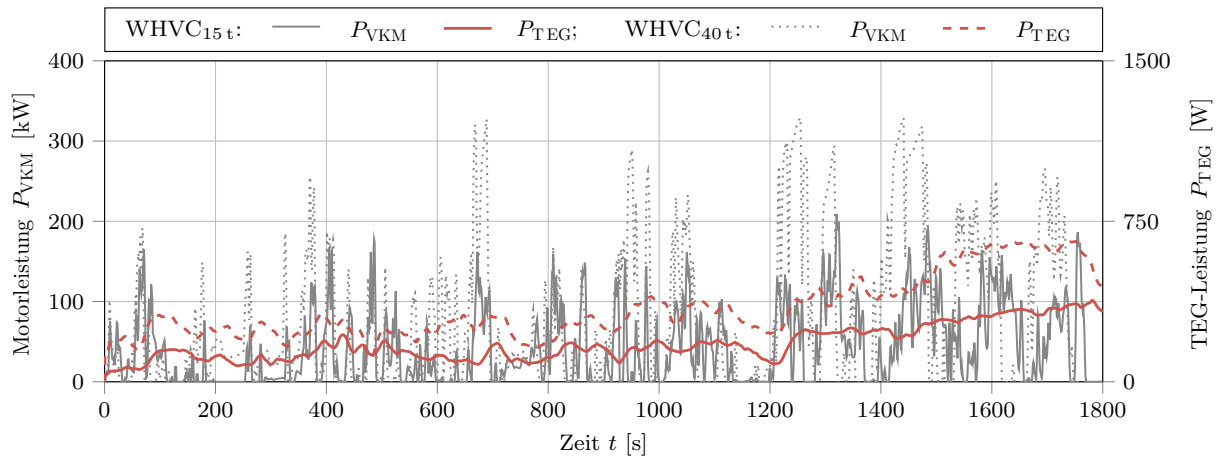


Abbildung 8.2.: Motor- und TEG-Leistung im WHVC mit TEG-Ergebnisdesign zur Minimierung der TCO des Diesel-NFZ

ermittelte TEG-Leistung  $P_{\text{TEG}}$  auf der rechten Abszisse im Zeitverlauf aufgetragen. Die hohe Dynamik der Lastpunktverschiebung der VKM ist für die beiden Fahrzyklen (ohne Einfluss der Topografie) ersichtlich, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben. Die TEG-Leistung ist im Vergleich zur VKM-Leistung aufgrund der thermischen Trägheit des Systems im Zeitverlauf stark gedämpft. Alle Fahrzyklen wurden mit einem vorkonditionierten Fahrzeug ermittelt. Daher wird der Kaltstart mit anschließender Warmlaufphase der Abgasanlage nicht berücksichtigt. Die TEG-Leistung nimmt mit der Zeit zu, weil die VKM-Lastpunkte und damit die Abgasenthalpien ansteigen. Der Autobahnteil des Fahrzyklus, der die Beschleunigung auf Höchstgeschwindigkeit hohe beinhaltet, beginnt ab dem Zeitschritt 1382 s (s. Abbildung B.1 im Anhang).

Für das Ergebnisdesign werden im WHVC<sub>15t</sub> maximale TEG-Leistungen von 399 W und als Mittelwert 184 W ermittelt. Im WHVC<sub>40t</sub> sind es 656 W und 339 W. Daraus resultiert eine netto Kraftstoffreduktion<sup>102</sup>  $|\Delta B|$  von 0,6 % und eine Amortisationszeit  $t_A$  von 5,9 Jahren bzw. 0,7 % und 1,8 Jahre unter Annahmen des Basisszenarios (s. Abschnitt 5.1.3). Für das TEG-System im Diesel-NFZ bei Leerfahrt konnte kein Ergebnisdesign gefunden werden, das die abgezielte Amortisationszeit von weniger als 3 Jahre ermöglicht. Die verfügbaren Abgasenthalpien und -temperaturen sind am Ausgang der AGN zu gering. Die Wärmeübertrager lassen sich nicht effizient genug auslegen, um ausreichend hohe Wirkungsgrade der Module zu ermöglichen. Der Referenzverbrauch im WHVC<sub>40t</sub> ist deutlich größer als im Zyklus ohne Zuladung (s. Tabelle 4.2). Die prozentuale Reduktion in Höhe von 0,7 % stellt eine ausreichend hohe monetäre Einsparung der Kraftstoffkosten dar, um die Amortisationszeit innerhalb der Zielsetzung dieser Arbeit zu realisieren.

**Referenzstrecke SHHS:** In der Referenzstrecke führen die topografischen Randbedingungen zu deutlich gesteigerten Lastanforderungen. Dies bedingt höhere Abgasenthalpien (s. Abschnitt 4.2.3) und ermöglicht höhere TEG-Leistungen als in den

<sup>102</sup>Die Nettoangabe stellt den Bruttowert der Kraftreduktion abzüglich der parasitären (negativen) Effekte der Fahrzeugwechselwirkungen dar.

Fahrzyklen. Auf der Gesamtstrecke SHHS<sub>40t</sub> werden maximale TEG-Leistungen in Höhe von 992 W und im Mittel von 560 W im Diesel-NFZ erzielt, wie anhand der VKM- über der TEG-Leistung als Streudiagramm in Teilabbildung D.17 (a) im Anhang illustriert. Negative Bremsleistungen wurden zur Nullleistung negiert. Die Darstellung erfolgt für die Gesamtstrecke SHHS und in ausgewählten Teilstrecken ‚leicht‘ bis ‚schwer‘ (s. zudem Tabelle D.5 im Anhang). Für die Gesamtstrecke resultiert die TEG-Leistung in eine netto Kraftstoffreduktion von 1 % und einer Amortisationszeit von 2 Jahren. Einen Überblick der Ergebnisse im Diesel-NFZ gibt Tabelle 8.2.

Tabelle 8.2.: Ergebnisübersicht des TEG-Systems im Diesel-NFZ bei minimalen TCO

Bezeichnung	Variable	Einheit	WHVC <sub>15t</sub>	WHVC <sub>40t</sub>	SHHS <sub>40t</sub>
Maximum el. TEG-Leistung	$P_{\text{TEG,max}}$	[W]	399	656	992
Mittelwert el. TEG-Leistung	$\bar{P}_{\text{TEG}}$	[W]	184	339	560
Mittelwert thermoel. Wirkungsgrad	$\bar{\eta}_{\text{TEM}}$	[%]	2,5	3,3	3,5
Mittelwert Temperaturdifferenz	$\Delta\bar{T}_{\text{AG}}$	[K]	66	72	89
Mittelwert Kühlmittelwärmestrom	$\dot{Q}_{\text{KM,zu}}$	[kW]	7,8	11	13
Mittelwert effektiver Gegendruck	$\Delta\bar{p}_e$	[mbar]	2,3	4,6	6,8
Verbrauchsänderung netto (brutto)	$\Delta B_s$	[%]	-0,6 (0,8)	-0,7 (0,9)	-1 (1,1)
CO <sub>2</sub> -Änderung netto (brutto)	$\Delta c$	[g/km]	-4,2 (5,6)	-8,5 (10,6)	-8,8 (11)
Amortisationszeit	$t_A$	[Jahr]	5,9	1,8	2

(Ergebnisdesign: TEG-3-1-3,  $K_{\text{TEG}} = 784$  EUR,  $m_{\text{TEG}} = 24,5$  kg,  $A_{\text{WÜ}} = 1260$  cm<sup>2</sup>)

### TEG-Ergebnisdesign in der AGR-Strecke des Diesel-NFZ

Im Folgenden wird das optimale TEG-Ergebnisdesign für die AGR-Strecke des Diesel-NFZ ermittelt. Dies dient dem Vergleich mit dem soeben ermittelten TEG-Ergebnisdesign am Ausgang der AGN und der Beantwortung der offenen Fragestellung aus Abschnitt 4.3.

Als Ergebnis der Fahrzeuguntersuchung stehen im Diesel-NFZ für die motornahe AGR-Strecke ein Bauraum von  $800 \times 250 \times 200$  [mm<sup>3</sup>] zur Verfügung. Das Strömungsvolumen des AGR-WÜ beträgt  $600 \times 100 \times 90$  [mm<sup>3</sup>]. Die TEG-Integration erfolgt vor diesem und übernimmt zudem teilweise dessen Funktion der Wärmeübertragung (vgl. [34, 58, 103]). Für die generische Gewichts- und Kostenmodellierung wird die Annahme getroffen, dass keine Bypassstrecke notwendig ist. Im Falle einer potenziellen Überhitzung der Module schließt die AGR-Klappe.<sup>103</sup> Die Kostenreduktion aufgrund des verkleinerten AGR-WÜ wird zunächst nicht eingerechnet.

Als Optimum wird das TEG-Ergebnisdesign mit Bezeichnung TEG-2-1-2 und Stückkosten von 593 EUR, einem Gewicht von 19,6 kg und einer WÜ-Fläche von 580 cm<sup>2</sup> bestimmt. Es werden die gleichen NT-TEM wie bei der Integration am Ausgang der AGN als Optimum ermittelt. Für das Ergebnisdesign werden beispielsweise im WHVC<sub>40t</sub> maximale TEG-Leistungen von 628 W und als Mittelwert 293 W bestimmt. Daraus resultiert eine Nettokraftstoffreduktion von 0,5 % (brutto: 0,8 %) und eine Amortisationszeit von 2,8 Jahren für das Basiskostenszenario. Die ermittelte Kosten-Nutzen-Relation

<sup>103</sup>Der gesamtsystemische Einfluss der veränderten AGR-Betriebsstrategie wird nicht bewertet.

liegt bei 113 EUR/(g km) bzw. 1295 EUR/%. Der zusätzliche Wärmestrom durch das TEG-System ins Kühlmittel beträgt im Maximum 18 kW und im Durchschnitt 8,9 kW. Das TEG-Ergebnisdesign am Ausgang der AGN stellt eine vorteilhaftere Lösungsvariante dar, als dasjenige in der AGR-Strecke. Die Kraftstoffreduktion ist am Beispiel des genannten Fahrzyklus um 138 % höher und die Amortisationszeit niedriger. Die erzielte Kosten-Nutzen-Relation ist um rund 18 % geringer. Die Verwendung der AGR-Klappe anstelle einer Bypassstrecke kann negativen Einfluss auf die Abgasemissionen und die Ladeluftkühlung haben. Im Fahrzyklus ist kein Bypassbetrieb erforderlich, jedoch in der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub>.

Kritisch sei angemerkt, dass je nach Anwendung und fahrzeugspezifischer AGR-Konfiguration zu überprüfen ist, ob die Anforderungen an die AGR-Strecke nach der (Teil-)Substitution des AGR-WÜ durch den TEG nach wie vor erfüllt werden. Liegt in dem untersuchten Beispiel die Kostenreduzierung des verkleinerten AGR-Kühlers über 20 % der TEG-Kosten (entspricht in dieser Arbeit mehr als 120 EUR), erzielt das TEG-Ergebnisdesign in der AGR die gleiche Kosten-Nutzen-Relation wie dasjenige am Ausgang des AGN. Allerdings ist das Potential der Kraftstoffreduktion geringer.

### Ergebnisse im Erdgas-NFZ

Als Optimum wird das Ergebnisdesign mit Bezeichnung TEG-3-3-8 sowie Stückkosten von 1002 EUR, einem Gewicht von 27,4 kg, einer WÜ-Fläche von 1420 cm<sup>2</sup> und segmentierten HT-TEM der Materialkassen Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> & SKD mit der Bezeichnung LG2-31-31-3.2 (s. Tabelle 7.3) ermittelt. Der TEG-Kern besteht aus abwechselnd übereinander gestapelten 3 HGWÜ, 4 KMWÜ und dazwischenliegenden 144 Modulen (s. Abbildung 6.10). Das Ergebnisdesign wurde in geringfügig modifizierter Form in Hardware realisiert und konnte die ganzheitliche Simulationsumgebung auf Gesamtsystemebene erfolgreich validieren (s. Abschnitt 7.2.2).

**Referenzzyklus WHVC:** Die jeweiligen Ergebnisse bei Leerfahrt (WHVC<sub>15t</sub>) und mit Zuladung (WHVC<sub>40t</sub>) sind Abbildung 8.3 zu entnehmen. Die Abgasenthalpie besitzt im Zeitverlauf eine höhere Dynamik als beim Diesel-Pendant. Dies resultiert in höheren Schwankungen der TEG-Leistung. Bei Leerfahrt werden 1954 W als Maximum und 1030 W im Mittel im Fahrzyklus erzielt. Bei maximaler Zuladung sind es 2371 W im Maximum und 1424 W im Mittel. Dies führt zu einer netto Kraftstoffreduktion von 2,5 % und einer Amortisationszeit von 1,8 Jahren für den WHVC<sub>15t</sub>. Für den WHVC<sub>40t</sub> werden 2,3 % und 1 Jahr erreicht. Die verfügbaren Abgasenthalpien sind bei Zuladung höher als bei Leerfahrt, was zu größeren TEG-Leistungen führt. Diese erzielen jedoch eine geringere prozentuale Verbrauchsreduktion, da sich der zugrunde liegende Gesamtverbrauch deutlich unterscheidet. Im WHVC<sub>15t</sub> werden 25 kg/100 km und im WHVC<sub>40t</sub> werden 42,7 kg/100 km für das Erdgas-NFZ angenommen (s. Tabelle 4.2). Die absolute Verbrauchsreduktion ist somit höher, was die größere finanzielle Kostenreduktion bei den TCO und die damit einhergehende geringere Amortisationszeit erklärt.

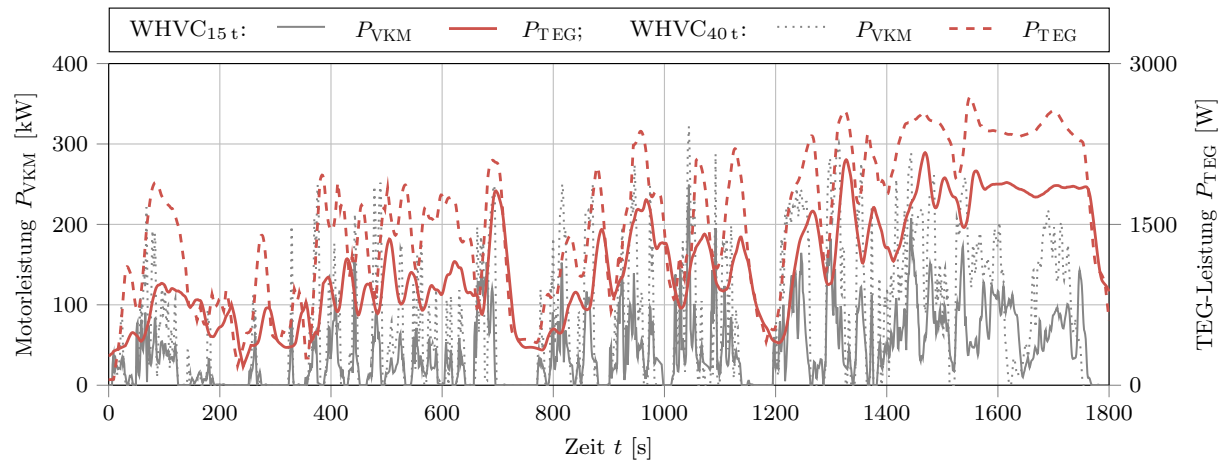


Abbildung 8.3.: VKM- und TEG-Leistung im WHVC mit TEG-Ergebnisdesign zur Minimierung der TCO des Erdgas-NFZ

**Referenzstrecke SHHS:** Aus analogen Gründen wie beim Diesel-Pendant sind die erzielten TEG-Leistungen auf der Realfahrstrecke höher als in den Fahrzyklen. Das Maximum liegt bei 2688 W und der Mittelwert bei 1686 W, wie in Teilabbildung D.17 (b) im Anhang illustriert. Die Nettokraftstoffreduktion liegt bei 2,1 % und die Amortisationszeit beträgt damit 1,4 Jahre. Die Ergebnisse der Teilstrecken mit unterschiedlichen Schweregraden sind Tabelle D.5 dem Anhang zu entnehmen. Eine Übersicht der Ergebnisse für das Erdgas-NFZ ist in Tabelle 8.3 dargestellt.

Tabelle 8.3.: Ergebnisübersicht des TEG-Systems im Erdgas-NFZ bei minimalen TCO

Bezeichnung	Variable	Einheit	WHVC <sub>15t</sub>	WHVC <sub>40t</sub>	SHHS <sub>40t</sub>
Maximum el. TEG-Leistung	$P_{\text{TEG,max}}$	[W]	1954	2371	2688
Mittelwert el. TEG-Leistung	$\bar{P}_{\text{TEG}}$	[W]	1030	1424	1686
Mittelwert thermoel. Wirkungsgrad	$\bar{\eta}_{\text{TEM}}$	[%]	5,2	5,8	6,4
Mittelwert Temperaturdifferenz	$\Delta\bar{T}_{\text{AG}}$	[K]	388	330	319
Mittelwert Kühlmittelwärmestrom	$\bar{Q}_{\text{KM,ein}}$	[kW]	21,1	26,1	29,9
Mittelwert effektiver Gegendruck	$\Delta\bar{p}_e$	[mbar]	0,5	1,2	2,6
Verbrauchsänderung netto (brutto)	$\Delta B_e$	[%]	-2,5 (2,8)	-2,3 (2,5)	-2,1 (2,2)
CO <sub>2</sub> -Änderung netto (brutto)	$\Delta c$	[g/km]	-15,7 (17,8)	-24,6 (25,7)	-19,2 (20)
Amortisationszeit	$t_A$	[Jahr]	1,8	1	1,4

(Ergebnisdesign: TEG-3-3-8,  $K_{\text{TEG}} = 1002$  EUR,  $m_{\text{TEG}} = 27,4$  kg,  $A_{\text{WÜ}} = 1420$  cm<sup>2</sup>)

## Zusammenfassung

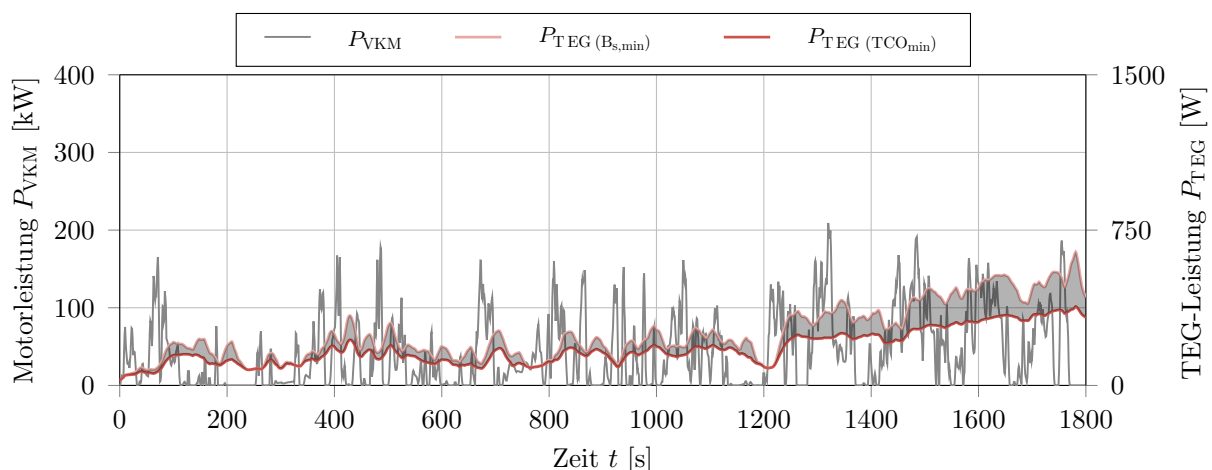
Es konnten erstmalig TEG-Systemlösungen nachgewiesen werden, welche die TCO von NFZ im Vergleich zur Referenz ohne TEG senken. Mit Ausnahme der Leerfahrt des Diesel-NFZ im Fahrzyklus WHVC<sub>15t</sub> wurden Ergebnisdesigns gefunden, welche die Zielsetzung dieser Arbeit erfüllen und eine Amortisationszeit von weniger als 3 Jahren ermöglichen. Unter den Annahmen des TCO-Basisszenarios (s. Abschnitt 5.1.3) werden 1,8 Jahre für das Diesel-NFZ und 1 Jahr für das Erdgas-NFZ im WHVC<sub>40t</sub> ermittelt. Im Minimum sind es im Teilabschnitt ‚Landstraße‘ des Fahrzyklus 1,4 Jahre im Diesel-NFZ und im Teilabschnitt ‚Stadt‘ 0,7 Jahre im Erdgas-NFZ (s. Tabelle D.5 im Anhang). Die Wahl des

Fahrscenarios hat einen großen Einfluss auf die TEG-Ergebnisgrößen und damit auf die Amortisationszeit.

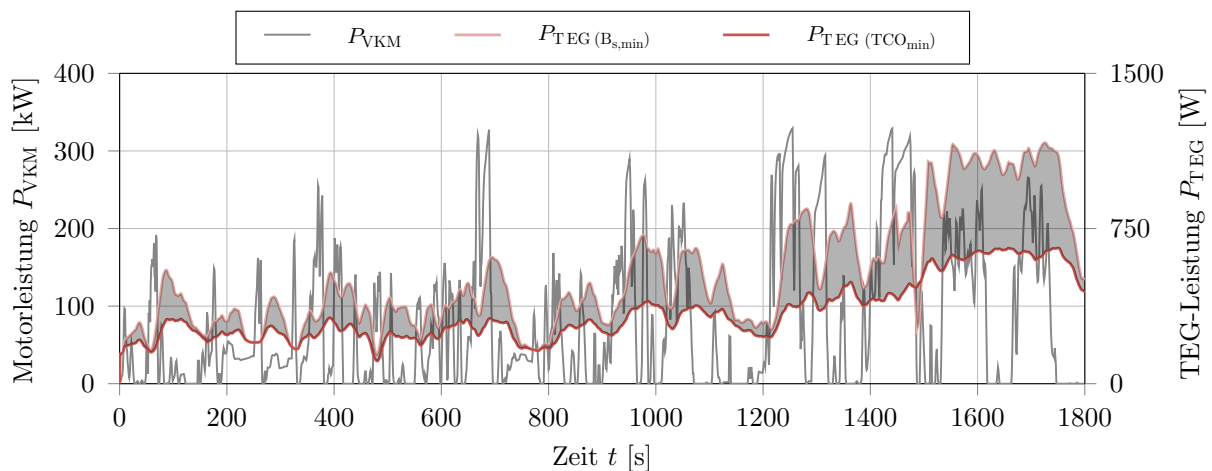
Insbesondere die deutlich höheren Abgastemperaturen im Erdgas-NFZ ermöglichen im Durchschnitt rund 400 % höhere TEG-Leistungen als im Diesel-NFZ. Dies entspricht je nach Fahrprofil zwischen 846–1715 W. Die mittlere Kraftstoffreduktion liegt im Erdgas-NFZ mit 2,3 % um 290 % höher als im Diesel-NFZ mit 0,8 %. In absoluten Zahlenwerten entspricht dies rund 0,2 kg/100 km (rund 0,21/100 km) für das Diesel-NFZ und rund 0,8 kg/100 km (rund 0,71/100 km) für das Erdgas-NFZ.

## 8.2.2. TEG-Varianten zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs

Das Vorgehen erfolgt analog zu dem im vorherigen Abschnitt 8.2.1. Die erzielte Verbrauchsreduktion des Ergebnisdesigns wird durch die Fahrzeugwechselwirkungen und die parasitären Effekte reduziert sowie durch die elektrische Energiespeicherkapazität der



(a) WHVC<sub>15t</sub> mit TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK



(b) WHVC<sub>40t</sub> mit TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK

Abbildung 8.4.: VKM- und TEG-Leistungen im WHVC der TEG-Ergebnisdesigns minimaler TCO und minimalem Kraftstoffverbrauch des Diesel-NFZ

Referenzfahrzeuge limitiert. Die TEG-Systemkosten werden jedoch nicht berücksichtigt, was die ganzheitliche Simulationsumgebung vereinfacht. Durch den Entfall einer Ergebnisgröße wird die Komplexität der multikriteriellen Simulation reduziert und andere TEG-Ergebnisdesigns als Optima bestimmt. Diese weisen zumeist größere WÜ-Flächen und damit Modulflächen als die TEG-Varianten zur Minimierung der TCO aus, da die Kosten vernachlässigt werden und das zusätzliche Gewicht einen vergleichsweise geringen negativen Einfluss auf die Kraftstoffreduktion hat. Für die Varianten zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs werden die jeweiligen Modulauslegungen der Varianten zur Minimierung der TCO übernommen, da diese ebenfalls vorteilhaft sind.

### Ergebnisse im Diesel-NFZ

Als Optimum wird das Ergebnisdesign TEG-2-2-4 mit Stückkosten von 1254 EUR, einem Gewicht von 35,6 kg sowie einer WÜ-Fläche von 3360 cm<sup>2</sup> ermittelt. Im Vergleich zum Design für die Minimierung der TCO sind die Kosten um 60 %, das Gewicht um 45 % und die WÜ-Fläche um 170 % gestiegen. Als Simulationsergebnisse werden damit größere elektrische TEG-Leistungen berechnet, was nach Abzug der parasitären Effekte die resultierende Kraftstoffreduktion weiter erhöht. Die TEG-Leistung zur Minimierung der TCO  $P_{\text{TEG}(TCO_{\min})}$  (s. Abbildung 8.2) und zur Minimierung des Verbrauchs  $P_{\text{TEG}(B_{s,\min})}$  sind im Zeitverlauf des WHVC in Abbildung 8.4 dargestellt. Zur Verdeutlichung der gesteigerten TEG-Ausgangsleistung wurde die Differenzfläche grau hinterlegt. Die Mittelwerte der TEG-Leistung steigen von 184 W auf 247 W für das Fahrzeug im WHVC<sub>15t</sub> bzw. von 339 W auf 521 W im WHVC<sub>40t</sub>. Dies erhöht die Nettoverbrauchsreduktion von 0,6 % auf 0,8 % bzw. von 0,7 % auf 1 %. Das Design  $B_{s,\min}$  verlängert die Amortisationszeit aufgrund der gestiegenen Kosten-Nutzen-Relationen von 5,9 Jahre auf über 10 Jahre bzw. von 1,8 Jahre auf 2,9 Jahre. Die höheren Systemstückkosten dominieren das Verhältnis zum gesteigerten Zusatznutzen. Die entsprechenden Ergebnisse auf der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> sind in Teilabbildung D.18 (a) im Anhang dargestellt. Analog zu den Fahrzyklen ist quantitativ erkennbar, dass die TEG-Leistungen des Ergebnisdesigns zur Minimierung

Tabelle 8.4.: Ergebnisübersicht des TEG-Systems im Diesel-NFZ bei minimalem Kraftstoffverbrauch

Bezeichnung	Variable	Einheit	WHVC <sub>15t</sub>	WHVC <sub>40t</sub>	SHHS <sub>40t</sub>
Maximum el. TEG-Leistung	$P_{\text{TEG,max}}$	[W]	645	1165	1891
Mittelwert el. TEG-Leistung	$\bar{P}_{\text{TEG}}$	[W]	247	521	925
Mittelwert thermoel. Wirkungsgrad	$\bar{\eta}_{\text{TEM}}$	[%]	1,7	2,4	3,2
Mittelwert Temperaturdifferenz	$\Delta\bar{T}_{\text{AG}}$	[K]	121	139	162
Mittelwert Kühlmittelwärmestrom	$\bar{Q}_{\text{KM,ein}}$	[kW]	14,8	22,5	31,5
Mittelwert effektiver Gegendruck	$\Delta\bar{p}_e$	[mbar]	2,4	4,3	6
Verbrauchsänderung netto (brutto)	$\Delta B_s$	[%]	-0,8 (1,1)	-1 (1,2)	-1,2 (1,5)
CO <sub>2</sub> -Änderung netto (brutto)	$\Delta c$	[g/km]	-5,7 (7,5)	-12 (13,8)	-11,4 (13,9)
Amortisationszeit	$t_A$	[Jahr]	>10	2,9	3,1

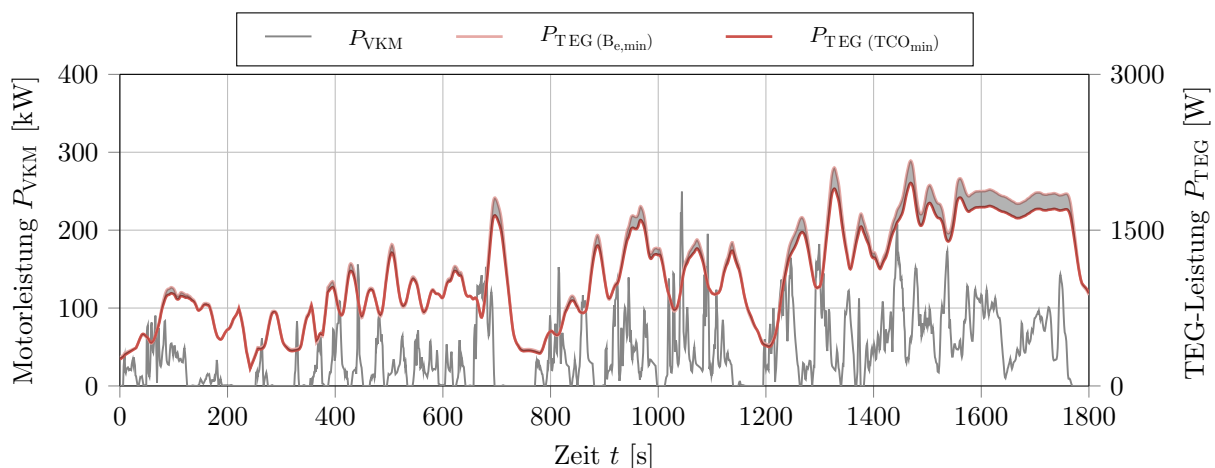
(Ergebnisdesign: TEG-2-2-4,  $K_{\text{TEG}} = 1254$  EUR,  $m_{\text{TEG}} = 35,6$  kg,  $A_{\text{WÜ}} = 3360$  cm<sup>2</sup>)

des Kraftstoffverbrauches höher sind als für das Design zur Minimierung der TCO. Der Mittelwert der TEG-Leistung steigt von 560 W auf 925 W. Dies erhöht die Nettoverbrauchsreduktion um 0,2 Prozentpunkte auf 1,2 %. Die Amortisationszeit des Designs  $B_{s,min}$  verlängert sich aufgrund der gleichzeitig erhöhten Systemkosten von 2 Jahre auf 3,1 Jahre. Die relevantesten Ergebnisse der Variantenuntersuchung des Diesel-NFZ stellt Tabelle 8.4 dar.

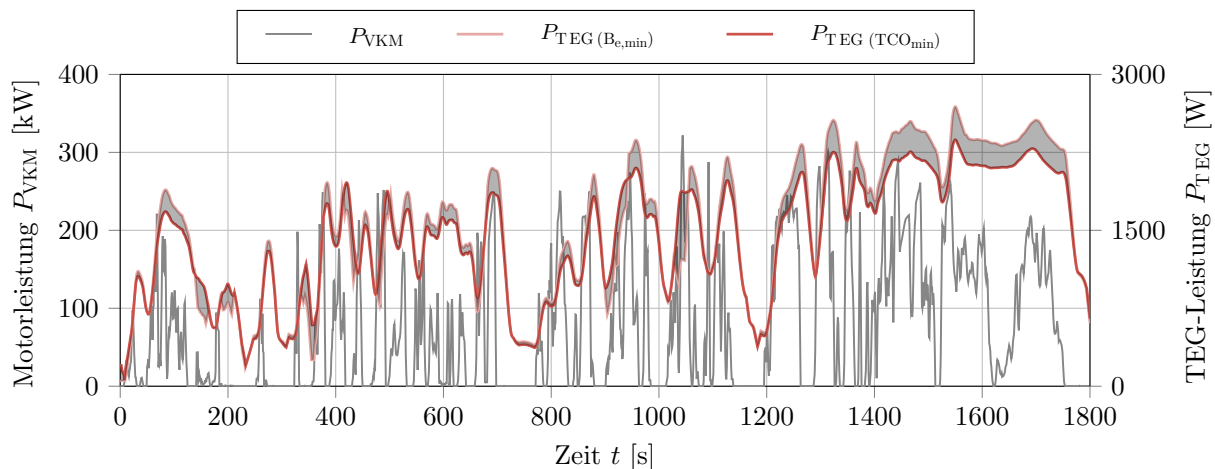
Im Allgemeinen hat die TEG-Variante zur Minimierung des Kraftstoffverbrauches den Nettokraftstoffverbrauch im Diesel-NFZ um rund 30 % bzw. im Bereich von 0,2–0,3 Prozentpunkten im Vergleich zur Variante minimaler TCO gesenkt.

### Ergebnisse im Erdgas-NFZ

Als Optimum ergibt sich das Ergebnisdesign mit Bezeichnung TEG-4-3-7, Stückkosten von 1053 EUR, einem Gewicht von 28,3 kg und einer WÜ-Fläche von 1655 cm<sup>2</sup>. Im Vergleich zum entsprechenden Design zur Minimierung der TCO sind die Kosten



(a) WHVC<sub>15t</sub> mit TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK



(b) WHVC<sub>40t</sub> mit TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK

Abbildung 8.5.: VKM- und TEG-Leistungen im WHVC der TEG-Ergebnisdesigns minimaler TCO und minimalem Kraftstoffverbrauch des Erdgas-NFZ; Abbildung aus [48]

um 5 %, das Gewicht um 3 % und die WÜ-Fläche um 17 % gestiegen. Ein Vergleich der TEG-Varianten ist am Beispiel des WHVC in Abbildung 8.5 dargestellt. Für das Design  $B_{\min}$  werden im Mittel 1085 W im WHVC<sub>15t</sub> und 1506 W im WHVC<sub>40t</sub> simulativ erreicht. Dies stellt eine Steigerung zum entsprechenden Ergebnisdesign  $TCO_{\min}$  von 5 % und 6 % dar. Daraus resultiert die Steigerung der Nettoverbrauchsreduktion um jeweils 0,1 Prozentpunkte auf 2,6 % und 2,4 %. Durch den Anstieg der Stückkosten verlängert sich die Amortisationszeit analog zum Diesel-Pendant um jeweils 0,1 Jahre auf 1,9 Jahre und 1,1 Jahre.

Im Vergleich zum Diesel-NFZ fällt die Steigerung der Kraftstoffreduktion gering aus, da die parasitären Effekte der Fahrzeugwechselwirkungen keine deutliche Verbesserung erlauben. Für Ergebnisdesigns mit einer größeren WÜ-Fläche und höheren Wärmeströmen ins Kühlmittel stellt insbesondere die Kühlsystemkapazität eine Limitierung dar. Unter den ermittelten Randbedingungen ist eine weitere Steigerung des Wärmestroms in vielen Betriebspunkten nicht möglich ohne dass der Lüfter des Fahrzeugs zugeschaltet wird und die Kraftstoffreduktionen des TEG-Systems negiert (s. Abschnitt 2.1.2.3). Daher wird in diesen Betriebszuständen die Bypassklappe geöffnet. Für das Design  $B_{\min}$  erhöht sich der prozentuale Bypassanteil der Gesamtzeit des WHVC<sub>40t</sub> im Vergleich zum Design  $TCO_{\min}$  um 3,4 Prozentpunkte auf 6,2 %, was einer Zeit von 110 s entspricht. In der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> liegt die Erhöhung bei 5,6 Prozentpunkte auf 14,2 % (entspricht einer Zeit von 10.550 s). Für das Design  $B_{\min}$  beträgt die mittlere Leistung 1697 W auf der Referenzstrecke. Trotz der größeren TEM-Fläche ist diese aufgrund des höheren Bypassanteils nur geringfügig höher als beim Ergebnisdesign  $TCO_{\min}$ . Eine höhere Kraftstoffreduktion kann nicht erreicht werden. Aufgrund der gleichzeitig gestiegenen Stückkosten verlängert sich die Amortisationszeit um 0,1 Jahre auf 1,5 Jahre.

Die relevanten Ergebnisse der Variantenuntersuchung des Erdgas-NFZ werden in Tabelle 8.5 zusammengefasst. Für die TEG-Variante zur Minimierung des Kraftstoffverbrauches im Erdgas-NFZ konnte der Nettokraftstoffverbrauch prozentual um rund 4 % bzw. im Bereich von 0,1 Prozentpunkten im Vergleich zur Variante zur Minimierung der TCO in den Fahrzyklen gesenkt werden.

Tabelle 8.5.: Ergebnisübersicht des TEG-Systems im Erdgas-NFZ bei minimalem Kraftstoffverbrauch

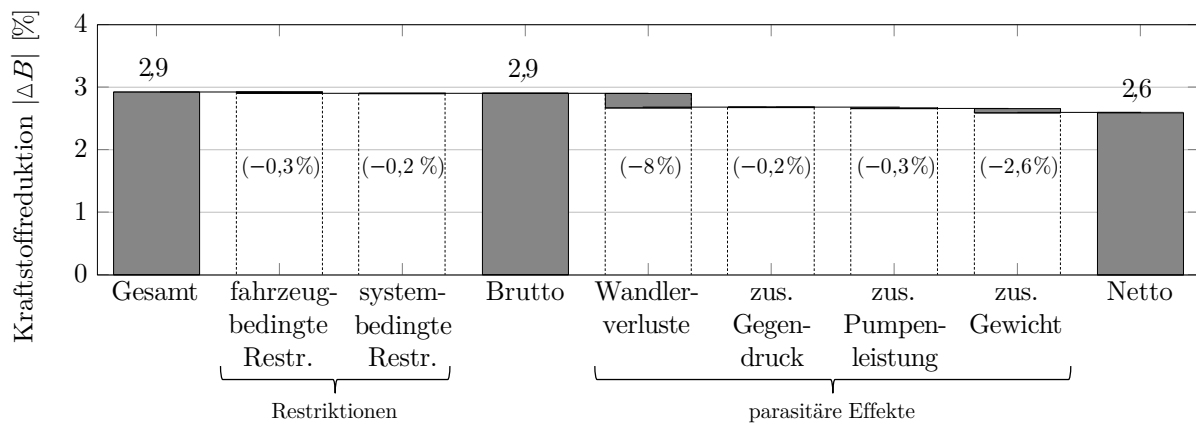
Bezeichnung	Variable	Einheit	WHVC <sub>15t</sub>	WHVC <sub>40t</sub>	SHHS <sub>40t</sub>
Maximum el. TEG-Leistung	$P_{\text{TEG,max}}$	[W]	2169	2691	3150
Mittelwert el. TEG-Leistung	$\bar{P}_{\text{TEG}}$	[W]	1085	1506	1697
Mittelwert Modulwirkungsgrad	$\bar{\eta}_{\text{TEM}}$	[%]	4,9	5,6	6,2
Mittelwert Temperaturdifferenz	$\Delta\bar{T}_{\text{AG}}$	[K]	420	361	352
Mittelwert Kühlmittelwärmestrom	$\bar{Q}_{\text{KM,ein}}$	[kW]	23,3	29,3	33,8
Mittelwert effektiver Gegendruck	$\Delta\bar{p}_e$	[mbar]	0,3	0,8	2,4
Verbrauchsänderung netto (brutto)	$\Delta B_e$	[%]	-2,6 (2,9)	-2,4 (2,6)	-2,1 (2,2)
CO <sub>2</sub> -Änderung netto (brutto)	$\Delta c$	[g/km]	-16,4 (18,4)	-25,1 (28,5)	-19,4 (20,2)
Amortisationszeit	$t_A$	[Jahr]	1,9	1,1	1,5

(Ergebnisdesign: TEG-4-3-7,  $K_{\text{TEG}} = 1053$  EUR,  $m_{\text{TEG}} = 28,3$  kg,  $A_{\text{WÜ}} = 1655$  cm<sup>2</sup>)

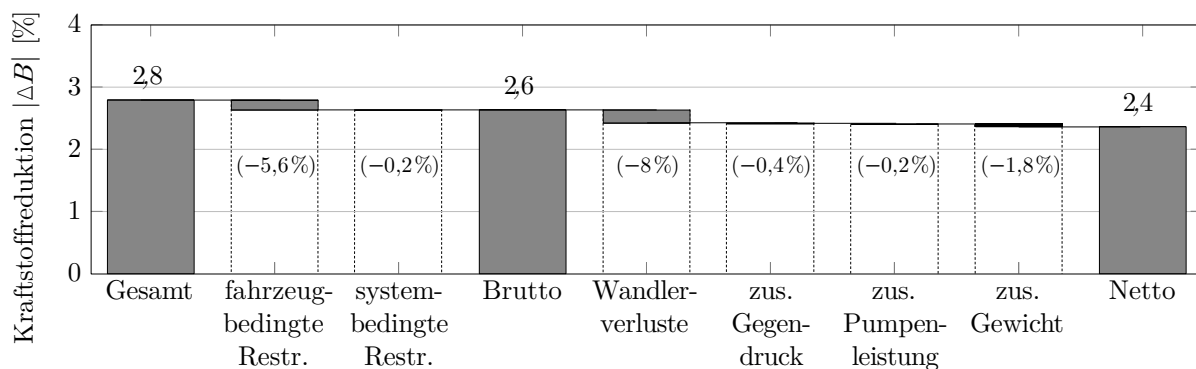


### Weitere Potentiale zur Kraftstoffverbrauchsreduktion

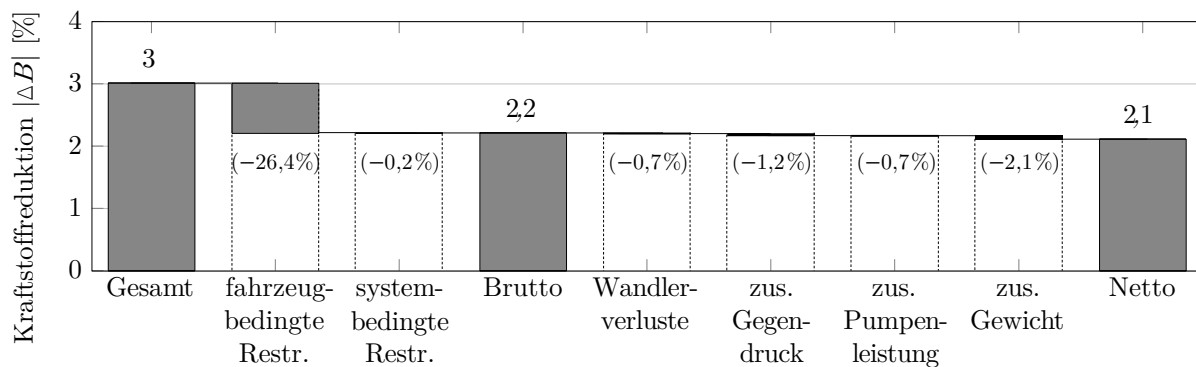
Die Einflüsse von Restriktionen und der vier parasitären Effekte auf die Kraftstoffreduktion werden am Beispiel des Erdgas-NFZ sowie der drei Fahrscenarien in Abbildung 8.6 dargestellt. In der gewählten Darstellungsweise wird die Gesamt-, die Brutto- und Netto- kraftstoffreduktion angegeben. Unter der Gesamtangabe wird die Bruttoangabe zuzüglich der Potentiale aufgrund von fahrzeug- und systembedingten Restriktionen verstanden. Erstgenannte Restriktionen fassen die begrenzte Batteriekapazität im Referenzfahrzeug, den maximalen Strömungswiderstand der Abgasanlage bei TEG-Integration und die



(a) Referenzfahrzyklus WHVC<sub>15t</sub>



(b) Referenzfahrzyklus WHVC<sub>40t</sub>



(c) Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub>

Abbildung 8.6.: Einfluss von Restriktionen und parasitärer Effekte auf die Kraftstoffreduktion im Erdgas-NFZ (mit TEG-Ergebnisdesign zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs)

Kühlmittelkapazität ohne zusätzliche Einkopplung des Lüfters zusammen. Zweitgenannte beinhaltet die maximale Heißseitentemperatur der eingesetzten thermoelektrischen Module und elektrische Leistungsverluste der Modulverschaltung aufgrund der kosten- und gewichtsreduzierenden MPPT-Anzahl. Mit Ausnahme der Batteriekapazitat und der Leistungsverluste führen alle genannten Restriktionen zur Bypassöffnung. Die in der Abbildung genannten parasitaren Effekte der Fahrzeugwechselwirkungen bedingen die Differenz zwischen der Brutto- und der Nettoangabe. Am Beispiel des WHVC<sub>15t</sub> in Teilabbildung 8.6 (a) ist erkennbar, dass der größte Anteil davon aus der Berücksichtigung der Wandlungsverluste der Leistungselektronik resultiert. Die relative Veranderung betragt 8 %, was 0,2 Prozentpunkten entspricht. Die weiteren parasitaren Effekte bedingen vergleichsweise geringe Veranderungen im Bereich von 0,2–2,6 %. Die Einflüsse auf die Kraftstoffreduktion andern sich bei unterschiedlichen Fahrscenarien, wie den Teilabbildungen 8.6 (b) und (c) zu entnehmen ist. Im WHVC<sub>40t</sub> haben die fahrzeugbedingten Restriktionen, insbesondere die begrenzte Khlmittelkapazitat, eine größere Bedeutung mit einem relativen Anteil an der Kraftstoffreduktion von 5,6 %. In der Strecke SHHS<sub>40t</sub> steigt dieser Anteil auf 26,4 % an, wobei 25 Prozentpunkte durch eine zusatzliche Batteriekapazitat begründet sind. Die gewandelte mittlere TEG-Leistung liegt in der Realfahrt über dem elektrischen Bordnetzbedarf des Basisszenarios (s. Abschnitt 5.1.2.4) und durch die zusatzliche Speicherkapazitat ist ein Zusatznutzen gegeben.

Die Verringerung von parasitaren Effekten und die Nutzung von zusatzlichen Potentialen kann die Kraftstoffreduktion durch das TEG-System weiter steigern.

### 8.2.3. TEG-Varianten zur Maximierung der elektrischen Leistung

Es gilt zu differenzieren zwischen den Definitionen der maximalen elektrischen Leistung ( $P_{el,max}$ ), der maximalen TEG-Leistung ( $P_{TEG,max}$ ), dem Mittelwert von dieser ( $\bar{P}_{TEG,max}$ ) im Zeitintervall  $T = [t_1, t_2]$  und der Nennleistung ( $P_{TEG,N}$ ). Für die jeweilige Ermittlung wird die ganzheitliche TEG-Optimierungsumgebung derart vereinfacht, dass die negativen Fahrzeugwechselwirkungen und die Systemkosten nicht berücksichtigt werden. Durch die Reduzierung der Komplexitat der Mehrzieloptimierung werden andere Lösungen als Optima ermittelt.

#### Maximale elektrische Leistung und TEG-Leistung

Die W-Flache ( $A_{W}$ ) und die Modulflache wird unter Berücksichtigung der vorgegebenen Randbedingungen derart vergrößert, bis die elektrische Leistung ( $P_{el}$ ) im jeweils ausgewahlten Betriebspunkt (s. Tabelle 4.4) ihr Maximum erreicht. Dies ist der Fall, sobald der Wirkungsgrad der W das Maximum annimmt. Die weitere Flachenvergrerung führt zu abfallenden Temperaturdifferenzen an den Modulen, zu geringeren Wirkungsgraden und damit Leistungen. Die Ergebnisse der optimierten TEG-Ergebnisdesigns sind in Abbildung 8.7 dargestellt. Die einzelnen Punkte der jeweiligen Teilabbildung stellen geometrisch sich unterscheidende TEG-Ergebnisdesigns dar und resultieren in

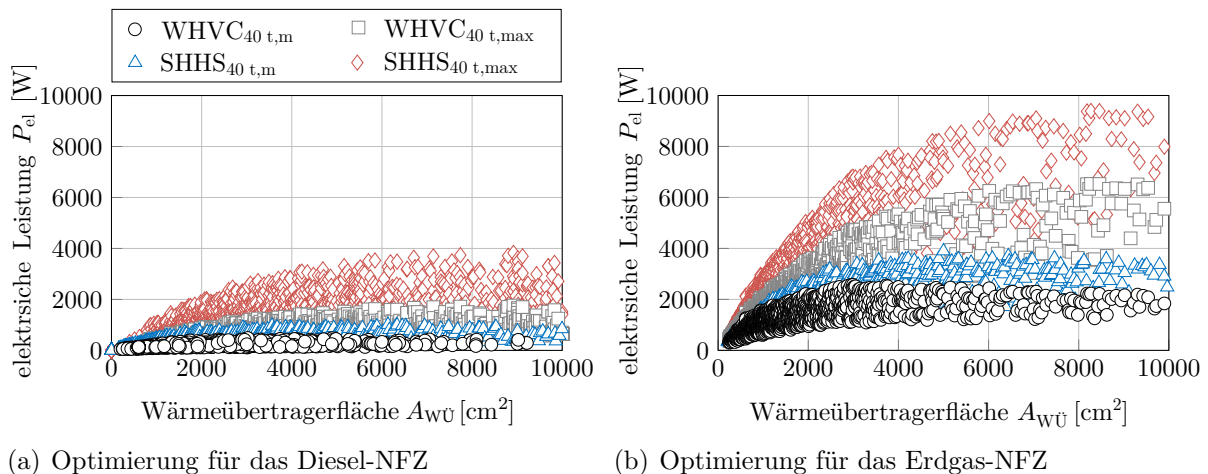


Abbildung 8.7.: Ergebnisübersicht der multikriteriellen Optimierung für beide Referenzszenarien anhand der elektrischen Leistung in Abhängigkeit von der Wärmeübertragerfläche

lastpunktabhängige Pareto-Fronten. Es werden in beiden Anwendungsszenarien jeweils die gleichen Modulauslegungen wie bei den TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO aus Abschnitt 8.2.1 berücksichtigt.

Für das Diesel-NFZ wird das Maximum der elektrischen Leistung im Betriebspunkt  $WHVC_{40t,m}$  bei 620 W und einer WÜ-Fläche von rund  $4300\text{ cm}^2$  bestimmt (s. Teilabbildung 8.7 (a)). Im selten auftretenden Betriebspunkt  $SHHS_{40t,max}$ , d. h. Lastpunkt maximal verfügbarer Abgasenthalpie, wird das Maximum bei rund 3900 W und rund  $8000\text{ cm}^2$  erzielt.

Aufgrund der höheren Abgasenthalpie werden im Erdgas-NFZ deutlich größere elektrische Spitzenleistungen als Optimierungsergebnis erzielt. Im Betriebspunkt  $WHVC_{40t,m}$  wird das Maximum der elektrischen Leistung bei rund 2590 W und einer WÜ-Fläche von rund  $3170\text{ cm}^2$  erreicht (s. Teilabbildung 8.7 (b)). Im Betriebspunkt  $SHHS_{40t,max}$  liegt das Maximum bei rund 9400 W und rund  $8600\text{ cm}^2$ .

Die jeweilige maximale TEG-Leistung wird berechnet anhand der Multiplikation der maximalen elektrischen Leistung mit dem Wirkungsgrad der Leistungselektronik (s. Gleichung 5.32).

### Mittelwert der elektrischen Leistung

Der Mittelwert der elektrischen Leistung ( $\bar{P}_{TEG,max}$ ) wird im Zeitverlauf von dynamischen Fahrprofilen maximiert. Als Ergebnis kann diese beispielsweise im  $WHVC_{40t}$  im Diesel-NFZ um bis zu 27 % auf 660 W bei einer WÜ-Fläche von  $7740\text{ cm}^2$  und im Erdgas-NFZ um bis zu 56 % auf 2350 W bei  $6050\text{ cm}^2$  im Vergleich zur Auslegungsvariante bei Minimierung des Kraftstoffverbrauchs gesteigert werden (s. Abschnitt 8.2.2). Dadurch erhöhen sich auch die Wärmeströme ins Kühlmittel. Da die Kühlsystemkapazität begrenzt ist führt dies zu deutlich höheren Betriebszeiten des Fahrzeuglüfters. Im  $WHVC_{40t}$  wären es 45 % der Gesamtzeit im Diesel-NFZ und 65 % im Erdgas-NFZ.

## Nennleistung und Ermittlung der Leistungsdichte

Um eine Vergleichbarkeit mit anderen TEG-Systemen aus dem Stand der Technik zu ermöglichen werden die Leistungskennzahlen außerhalb von Fahrzyklen und Realfahrstrecke bei Nennleistung ermittelt (vgl. [72]). Dazu werden die Systemkosten sowie der Abgasgegendruck bei der Optimierung der ganzheitlichen Simulationsumgebung nicht berücksichtigt. Für die Ermittlung der Nennleistung wird die Kühlmitteltemperatur am Einlass auf 20 °C festgelegt.<sup>104</sup> Zur Ermittlung der Nennleistung werden Heißgasmassenstrom und -temperatur im Bereich der vorliegenden Fahrzeugmesswerte soweit gesteigert, bis diese ihr Maximum erreichen bzw. zuvor die maximale Heißseitentemperatur der Module erreicht wird. Die Ergebnisse der TEG-Ergebnisdesigns optimiert für die Nennleistung der beiden Anwendungsszenarien sind in Tabelle 8.6 dargestellt. Die Ergebnisdesigns erzielen außerhalb von Fahrzyklus und Realfahrstrecke deutlich höhere elektrische Leistungen (s. bspw. Tabelle D.7.5 im Anhang). Im Diesel-NFZ wird eine Nennleistung  $P_{\text{TEG,N}}$  in Höhe von 2100 W und im Erdgas-NFZ von 3705 W erreicht. Dies verdeutlicht das hohe Potential der Technologie. Allerdings treten im Vergleich zu den Referenzfahrzyklen hohe Abgasgegendrucke  $\Delta p_{e,N}$  auf.

Tabelle 8.6.: Ergebnisse der TEG-Ergebnisdesigns im Nennleistungspunkt für beide Referenzfahrzeuge

Fahrzeug	$P_{\text{el,N}}$ [W]	$P_{\text{TEG,N}}$ [W]	$\eta_{\text{TEM,N}}$ [%]	$\eta_{\text{TEG,N}}$ [%]	$\Delta T_{\text{AG,N}}$ [K]	$\dot{Q}_{\text{KM, zu,N}}$ [kW]	$\Delta p_{e,N}$ [mbar]
Diesel-NFZ	2288	2100	5	4	74	47,7	64
Erdgas-NFZ	4032	3705	7,5	6	123	54,9	48

Die gravimetrische und volumetrische Leistungsdichte werden anhand der Gleichungen 8.1 und 8.2 definiert:

$$\psi_{\text{TEG,N}} = \frac{P_{\text{el,N}}}{m_{\text{TEG-Kern}}} \quad (8.1)$$

$$\phi_{\text{TEG,N}} = \frac{P_{\text{el,N}}}{V_{\text{TEG-Kern}}} \quad (8.2)$$

Die elektrische Leistung der Module im Nennleistungspunkt wird mit  $P_{\text{el,N}}$  angegeben. Für das Gewicht  $m_{\text{TEG-Kern}}$  und das Volumen  $V_{\text{TEG-Kern}}$  werden ausschließlich die

Tabelle 8.7.: Ergebnisse zur Leistungsdichte im Nennleistungspunkt für beide Referenzfahrzeuge

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Diesel-NFZ	Erdgas-NFZ
Gravimetrische Leistungsdichte	$\psi_{\text{TEG,N}}$	[W/kg]	159	298
Volumetrische Leistungsdichte	$\phi_{\text{TEG,N}}$	[W/dm <sup>3</sup> ]	248	568
Wärmestromdichte*	$\dot{q}_{\text{TEM,N}}$	[W/cm <sup>2</sup> ]	25	16
Flächenspezifische Leistungsdichte	$p_{\text{TEM,N}}$	[W/cm <sup>2</sup> ]	1,1	3

\* Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  wird als Wärmestrom je Flächeneinheit definiert:  $\dot{q} = \frac{dQ}{dA}$ .

<sup>104</sup>Das Vorgehen wird ausschließlich für die Simulation der Nennleistung verwendet. Weitere Simulationsergebnisse basieren auf den Mess- bzw. Simulationsergebnissen der (realen) Kühlmitteltemperaturen.

Komponenten des TEG-Kern (exklusive Diffusor / Konfusor, Leistungselektronik und Bypass) zur Berechnung herangezogen. Die resultierenden Ergebnisgrößen sowie die erreichte Wärmestromdichte  $\dot{q}_{\text{TEM},N}$  und die flächenspezifische Leistungsdichte  $p_{\text{TEM},N}$  sind für beide Anwendungsszenarien in Tabelle 8.7 angegeben. Für die TEG-Ergebnisdesigns des Diesel-NFZ werden Leistungsdichten in Höhe von  $159 \text{ W/kg}$  bzw.  $248 \text{ W/dm}^3$  sowie für die des Erdgas-NFZ, aufgrund der höheren Abgasenthalpie und Modulwirkungsgrade, von  $298 \text{ W/kg}$  bzw.  $568 \text{ W/dm}^3$  ermittelt.

### 8.2.4. TEG-Varianten zur Maximierung des Wirkungsgrades

Zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit gilt es möglichst effiziente TEG-Systeme, im Sinne von hohen Wirkungsgraden, zu entwickeln.

#### Thermoelektrischer Wirkungsgrad

Dieser stellt das Verhältnis von elektrischer Leistung und zugeführtem Wärmestrom dar (s. Gleichung 2.9). Im Gegensatz zum Vorgehen in der Arbeit wird die Formulierung

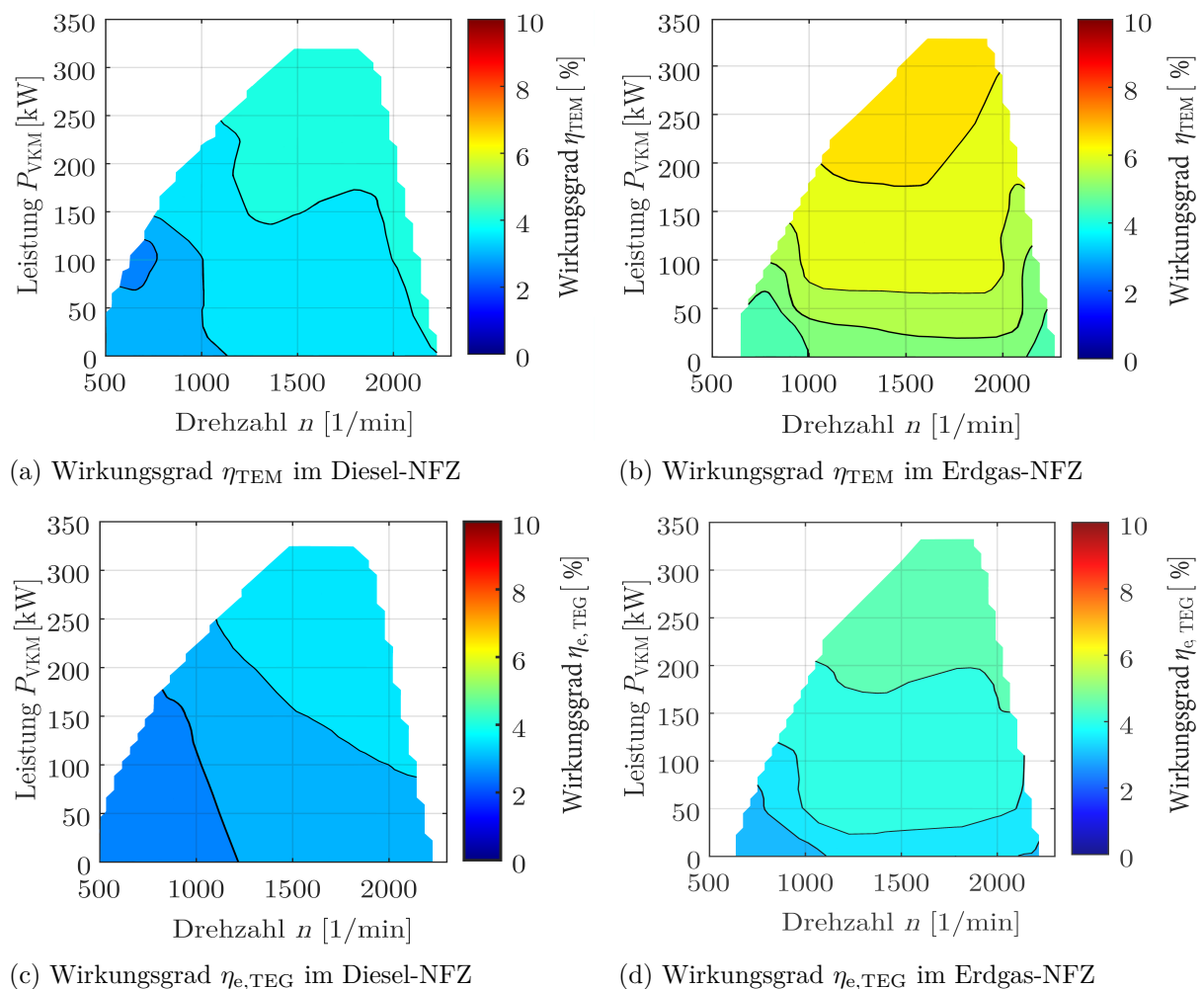


Abbildung 8.8.: Wirkungsgrade der TEG-Systeme mit Zielsetzung  $TCO_{\text{min}}$  in den Referenzfahrzeugen (Interpolation basiert auf dynamischen Werten der Referenzzyklen und -strecke)

des maximalen Wirkungsgrades im Folgenden berücksichtigt (s. Gleichungen 2.13). Der jeweilige thermoelektrische Wirkungsgrad  $\eta_{\text{TEM}}$  in Form der interpolierten Simulationsdaten der TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO auf der Realfahrstrecke SHHS<sub>40t</sub> ist in den Teilabbildungen 8.8 (a) und (b) dargestellt. Für das Diesel-NFZ werden Mittelwerte von 3,6 % und 4,8 % im Maximum ermittelt. Für das Erdgas-NFZ sind es 4,9 % und 6,8 %. Im Allgemeinen sind noch höhere Wirkungsgrade möglich, abhängig von den gewählten Modulen und ihrer Verschaltung innerhalb des TEG-Designs. In dieser Arbeit wurden Modulauslegungen mit Wirkungsgraden von bis zu 5,5 % für NT-Anwendungen und bis zu 9 % für HT-Anwendungen experimentell nachgewiesen (s. Tabelle 7.2 und 7.3). Prinzipiell erzielen kleinflächige TEG die höchsten Wirkungsgrade und theoretisch wird mit einem Modul das Maximum erreicht. Desto mehr Module in Reihen- und/oder Parallelschaltung integriert werden, desto größer werden die Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Heiß- und Kaltseiten und desto höher sind die elektrischen und thermischen Verluste.

### **Effektiver thermoelektrischer Generatorwirkungsgrad**

Dieser stellt das Verhältnis von elektrischer TEG-Leistung und dem verfügbaren Abgaswärmestrom dar (s. Gleichung 5.34). Der Nenner ist somit abhängig von den Randbedingungen der Anwendung. Die Abhängigkeit der Wirkungsgrade vom Lastpunkt ist in den Teilabbildungen 8.8 (c) und (d) erkennbar. Mit zunehmender Antriebsleistung und damit Abgasenthalpie steigen die Wirkungsgrade an. Für das Diesel-NFZ liegt der effektive Generatorwirkungsgrad  $\eta_{e,\text{TEG}}$  auf der dynamischen Realfahrt im Mittel bei 2,6 % und im Maximum bei 3,2 %. Im Erdgas-NFZ liegen diese bei 3,7 % und 5 %. Bei den Angaben handelt es sich um dynamische Simulationsergebnisse, die der thermischen Trägheit unterliegen und den Wirkungsgrad tendenziell überschätzen. Bei großen WÜ-Flächen wie beispielsweise den Ergebnissen der TEG-Variantenuntersuchung zur Maximierung der elektrischen Leistung (s. Abschnitt 8.2.3) werden die maximalen effektiven TEG-Wirkungsgrade erzielt. Für den stationären Betriebspunkt WHVC<sub>40t,m</sub> sind es bis zu 2,6 % im Diesel-NFZ und bis zu 3,7 % im Erdgas-NFZ. Für den Betriebspunkt SHHS<sub>40t,m</sub> werden bis zu 2,8 % und 4,2 % ermittelt.

## **8.3. Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug**

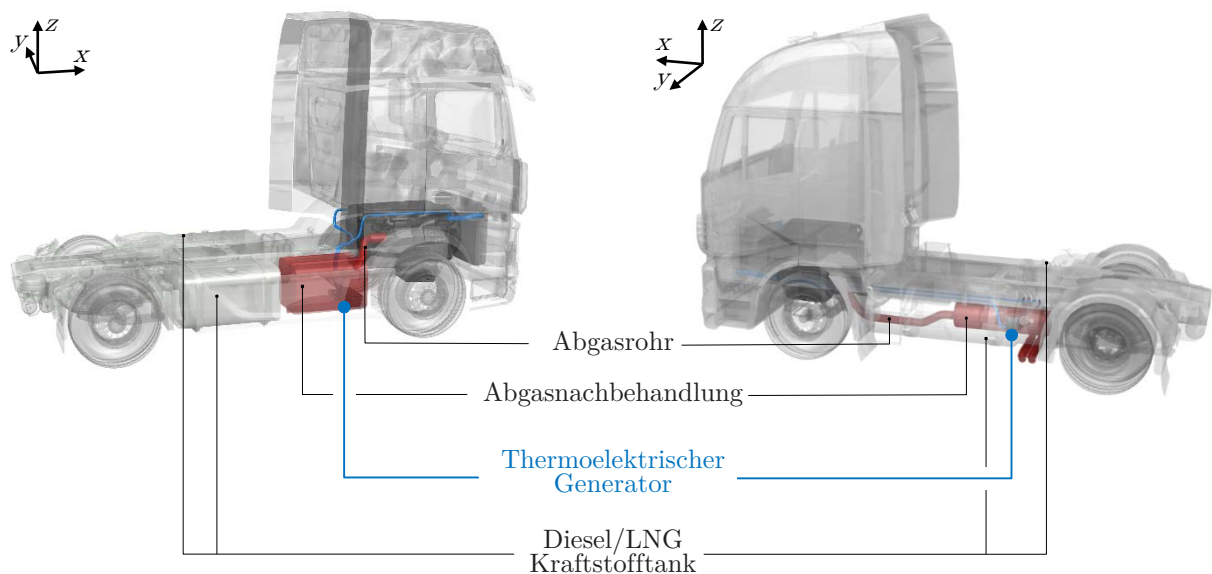
Abwärmenutzungstechnologien haben neben den positiven Effekten auch negative Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug, welche im Folgenden für das TEG-System erläutert werden.

### **8.3.1. Fahrzeugintegrationskonzepte und -betriebsstrategien**

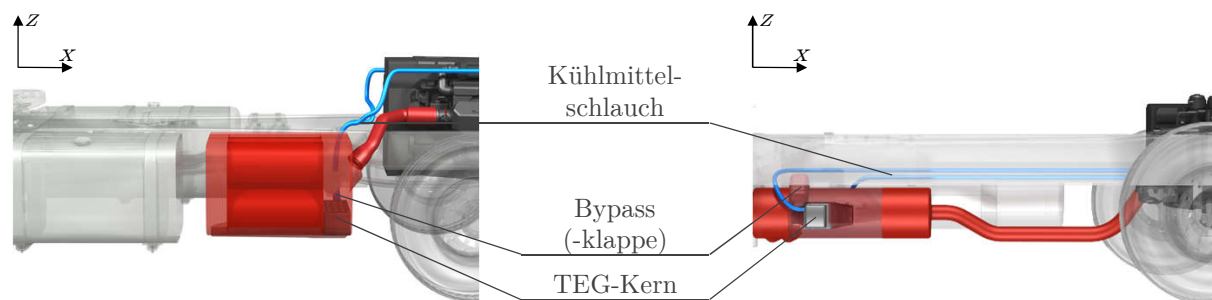
Das gewählte Integrationskonzept hat entscheidenden Einfluss auf die Effizienz eines Abwärmenutzungssystems und seine ganzheitliche Bewertung. Die Ergebnisse des

Konstruktionsprozesses der Fahrzeugintegrationskonzepte, am Beispiel derjenigen mit den größten Nutzen am Ausgang der AGN und im NT-KMK, sind in Abbildung 8.9 dargestellt. Angaben der berücksichtigten TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO sind Abschnitt D.6 dem Anhang zu entnehmen. Die divergierenden Fahrzeugrandbedingungen der Anwendungsszenarien erfordern zwei unterschiedliche Integrationskonzepte.

Als Ergebnis des Lösungsfindungsprozesses konnten erstmals vollständige Integrationen in die bestehenden AGN der beiden Referenzfahrzeuge realisiert werden. Es ist kein bedeutender Bauraumverlust durch An- und Umbauteile zu verzeichnen, was eine mögliche Serienentwicklung erleichtert. Die TEG-Systeme konnten in der sogenannten Abgasbox im Diesel-NFZ und in der zylindrisch ausgeführten AGN im Erdgas-NFZ integriert werden. Die als geringfügig bewerteten konstruktiven Änderungen an der Gestaltung der jeweiligen AGN mit TEG-Integration ergeben sich aus der gegenüber dem Stand der Technik deutlich gesteigerten Leistungsdichte (und dem daraus resultierenden geringeren Bauvolumen), der Entscheidung für eine hochintegrierte Bauweise und der Fokussierung bei der Entwicklung auf die Kosten-Nutzen-Relation des Systems. Das Fahrzeuggewicht



(a) TEG-Integration in das jeweilige Gesamtfahrzeug



(b) Detaildarstellung der Abgasnachbehandlung mit TEG-Integration

Abbildung 8.9.: Konstruktive Ergebnisse der TEG-Fahrzeugintegrationskonzepte (Ergebnisdesign:  $TCO_{\min}$ ) für das Diesel-NFZ (links) und das Erdgas-NFZ (rechts)

steigt je nach TEG-Variante um weniger als 36 kg (s. Tabelle D.5) und reduziert die Nutzlast der Fahrzeuge geringfügig. Zudem bleiben sämtliche Kraftstofftankvarianten für den Endkunden konfigurierbar, was die Arbeiten des Standes der Technik bislang nicht ermöglichten (vgl. [103, 118]). Beim Diesel-Referenzfahrzeug ist die Integration durch die im Vergleich zum Erdgas-NFZ deutlich komplexere AGN erschwert. Bei beiden Integrationskonzepten ist die Leistungselektronik zentral am Einbindungspunkt zur elektrischen Bordnetztopologie positioniert, auf Grund der genannten Vorteilen aus Abschnitt 6.1.3. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kommt eine elektrisch regelbare Klappe im Bypassrohr kurz vor der Wiedereinmündung des Bypassrohrs in das Abgasrohr zum Einsatz.<sup>105</sup>

Die Rekuperation von thermischer Energie durch das TEG-System bedingt Einbauten von zusätzlichen Komponenten ins Fahrzeug. Dies stellt Herausforderungen in Form von erhöhter Systemkomplexität dar, die zumindest höhere Entwicklungskosten bedingt. Die geometrischen Veränderungen des Abgasstrangs und des Kühlsystems führen unter anderem zu höheren Gegendrücken. Der zusätzliche Wärmeeintrag ins Kühlsystem ist nicht unerheblich. In dieser Arbeit wurden ausschließlich die Kühlerkonfigurationen der Referenzfahrzeuge für gemäßigte Klimazonen berücksichtigt.<sup>106</sup> Die rekuperierte Energie stellt eine Beeinflussung des elektrischen Bordnetzes dar. Die Einflüsse der TEG-Integrationskonzepte werden einzeln für die relevanten Fahrzeugteilsysteme und deren Wechselwirkungen im Folgenden analysiert. Der Einfluss des TEG-Systems auf weitere Gesamtfahrzeugaspekte, wie z. B. der Aerodynamik, werden vom Autor als gering eingeschätzt.

### 8.3.2. Verbrennungskraftmaschine

Der Einsatz des TEG-Systems resultiert in einen Differenzverbrauch des Fahrzeuges, der in dieser Arbeit anhand der Änderung der Wellenleistung berechnet wird (s. Abschnitt 5.1.2.1). Das System führt somit zu einer Lastpunktverschiebung der VKM, die sich in einer Veränderung des Fahrzeugwirkungsgrad, des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen niederschlägt. Der Betrag der Änderung der Wellenleistung  $|\Delta P_{\text{Welle}}|$  aufgrund der TEG-Leistung  $P_{\text{TEG}}$  ist für beide Referenzfahrzeuge beispielhaft im Zeitverlauf des WHVC<sub>40t</sub> in Abbildung 8.10 dargestellt.

Der Unterschied in der Leistung und der zeitlichen Dynamik der beiden Anwendungsszenarien wird erneut deutlich. Der Vergleich zwischen den Referenzfahrzeugen ohne und

<sup>105</sup>Im Versuch am TEG-Teilsystemaufbau im Abschnitt 7.2.1 erwies sich diese Bauweisenvariante als ausreichend für den TEM-Komponentenschutz. Als kostenintensivere Variante mit höherem Gegendruck kann z. B. eine Abgasklappe mit Duoklappensteuerung im Y-Rohr vor dem TEG und der Bypassstrecke integriert werden, sodass beide Abgaswege unabhängig geöffnet und geschlossen werden können.

<sup>106</sup>Es existieren NFZ-Varianten mit größerer Kühlerfläche, die vorzugsweise für tropische Klimaregionen zum Einsatz kommen. Die Wärmekapazität der Kühlsysteme würde erhöht und damit der Bypassanteil verringert, jedoch gleichzeitig die Kosten erhöht.



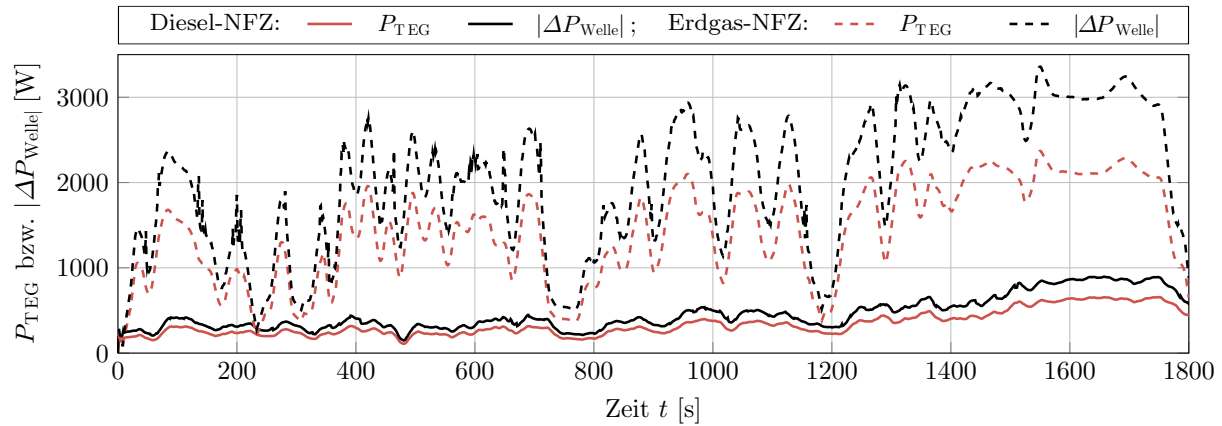


Abbildung 8.10.: TEG-Leistung im WHVC<sub>40t</sub> mit TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO (TEG-System jeweils integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK)

mit TEG-Integration ist anhand der Leistungs- und Energiebilanz für die Fahrscenarien in Tabelle 8.8 dargestellt. Neben den bereits beschriebenen Ergebnisgrößen wird der gemittelte absolute Fahrzeugwirkungsgrad  $\bar{\eta}_{\text{abs,FZ}}$  (s. Gleichung 2.1) und dessen Änderung durch das TEG-System  $\Delta\bar{\eta}_{\text{abs,FZ}}$  angegeben. Die relative Steigerung des Wirkungsgrades liegt in einem niedrigeren Bereich von 0,2–1%, als der Betrag der gravimetrischen Kraftstoffreduktion  $|\Delta B_e|$  im Bereich von 0,6–2,5%.

Tabelle 8.8.: Einfluss des TEG-System auf die VKM mit TEG-Variante zur Minimierung der TCO

	Formelzeichen	Einheit	Diesel-NFZ			Erdgas-NFZ		
			WHVC <sub>15t</sub>	WHVC <sub>40t</sub>	SHHS <sub>40t</sub>	WHVC <sub>15t</sub>	WHVC <sub>40t</sub>	SHHS <sub>40t</sub>
Fahrzeug ohne TEG	$B_e^1$	[kg/100 km]	21,2	36,5	29,2	25	42,7	35,5
	$c$	[g/km]	669,8	1153	923	634,2	1084,6	889,9
	$\bar{\eta}_{\text{abs,FZ}}$	[%]	38,9	42,1	40,4	32	35	33,1
	$\bar{v}$	[km/h]	43,3	43	75,4	40,2	39,3	74,9
	$\bar{P}_{\text{VKM}}$	[kW]	42	77	105	42	77	114
Veränderung mit TEG	$\Delta B_e$ (netto)	[kg/100 km]	-0,1	-0,3	-0,3	-0,6	-1	-0,8
		[%]	-0,6	-0,7	-1	-2,5	-2,3	-2,1
	$\Delta c$	[g/km]	-4,2	-8,5	-8,8	-15,7	-24,6	-18,9
	$\Delta\bar{\eta}_{\text{abs,FZ}}$	[%]	0,2	0,3	0,5	0,8	0,8	1
	$\Delta\bar{P}_{\text{Welle}}$	[W]	-247	-458	-779	-1447	-2004	-2355
	[kJ]	-444	-825	-28.951	-2604	-3607	-87.508	

<sup>1</sup> Für Diesel-NFZ erfolgt die Angabe typischerweise in volumetrischer Form.

### 8.3.3. Abgasanlage

Die Potentialbewertung und TEG-Systemauslegung haben das Integrationskonzept am Ausgang der jeweiligen AGN als erfolgversprechendste Lösungsvariante ermittelt (s. Abschnitt 4.3 und 8.2.1). Damit wird der Einfluss auf die Funktion der AGN minimiert, was ein Ziel dieser Arbeit darstellt. Da der TEG zumindest teilweise die Funktion eines Endschalldämpfers übernimmt, wird dieser im Erdgas-NFZ entsprechend kleiner dimensioniert. Konstruktiv sind die Abgasführungen geringfügig

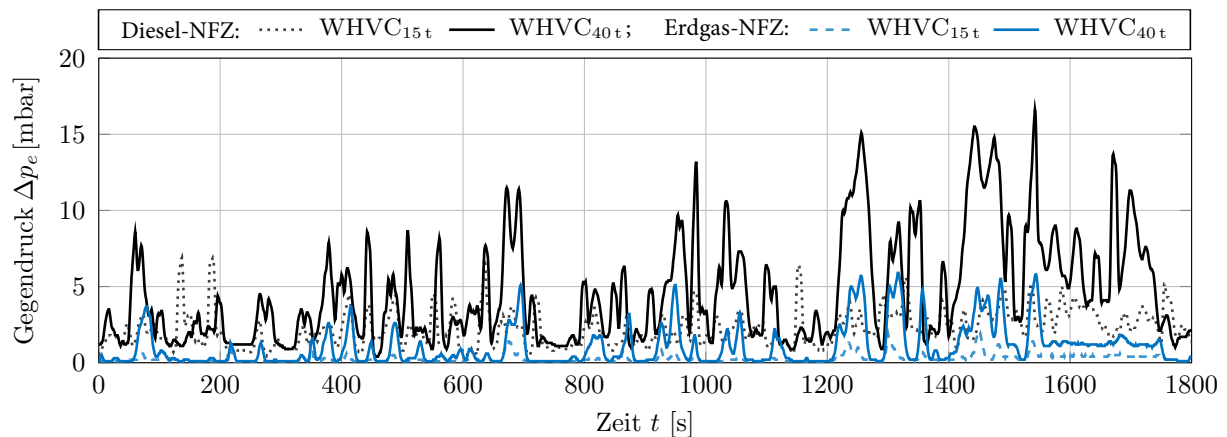


Abbildung 8.11.: Ergebnisse des effektiven Gegendrucks am Beispiel der Fahrzyklen WHVC (TEG-Variante:  $TCO_{\min}$ )

zu modifizieren, um die TEG-Integration zu ermöglichen. Die zusätzliche Integration der Bypassstrecke und Klappe stellt einen größeren Eingriff dar. Die effektiven Gegendrücke  $\Delta p_e$  sind bei der jeweiligen TEG-Systemintegration des Anwendungsszenario beispielhaft für den WHVC in Abbildung 8.11 illustriert. Qualitativ fällt die hohe Dynamik des Gegendrucks im Zeitverlauf auf. Dies ist auf die Lastpunktverschiebungen der VKM und die großen Änderungsraten des Abgasmassenstroms zurückzuführen. Im Diesel-NFZ treten in den Fahrzyklen um bis zu 180% höhere Massenströme als im Erdgas-Pendant auf (s. Tabelle 4.4). Das vergleichsweise kompakte TEG-Ergebnisdesign mit Zielsetzung  $TCO_{\min}$  im Diesel-NFZ (s. Abschnitt 8.2.1) und die kleine Querschnittsfläche der HGWÜ erklären die höheren Gegendruckwerte. Quantitativ werden für das Diesel-NFZ im jeweiligen Fahrzyklus Mittelwerte von 2,3 mbar und 4,6 mbar sowie für das Erdgas-NFZ Mittelwerte von 0,5 mbar und 1,2 mbar ermittelt. Die Maxima betragen 17 mbar bzw. 6 mbar und werden zu Beginn des Autobahnabschnitts während der Beschleunigung ab dem Zeitschritt 1382s erreicht. Das geringere effektive Gegendruckniveau im Erdgas-NFZ wird durch die hohen Abgaseingangstemperaturen in Kombination mit der Integrationsposition begünstigt. Die hohen Abkühlungsraten der Abgastemperatur (s. Tabelle 8.3) bewirken eine Absenkung des Druckniveaus am Ausgang des TEG, aufgrund der geänderten Stoffgrößen. Dies wirkt den zusätzlichen Abgasgegendrücken des TEG entgegen. Für die Referenzstrecke SHHS werden höhere effektive Gegendrücke als im Referenzfahrzyklus bestimmt. Im Durchschnitt sind es 6,8 mbar beim Diesel-NFZ und 2,6 mbar beim Erdgas-NFZ.

Der negative Effekt des zusätzlichen Gegendrucks wurde in der ganzheitlichen Simulationsumgebung entsprechend berücksichtigt. Die definierte Anforderung der Limitierung des Abgasgegendruckes der Abgasanlage (s. Nr. 16.E in Abbildung D.3 im Anhang) wird bei TEG-Integration in dieser Arbeit jederzeit eingehalten. Im Allgemeinen existieren neben den beschriebenen Ergebnisdesigns weitere Lösungsvarianten mit deutlich geringeren als auch höheren Abgasgegendruckniveaus.

### 8.3.4. Kühlsystem

Die Auswirkungen der TEG-Systeme auf das Kühlsystem werden beispielhaft, bei gleichzeitiger abgasseitiger Integration am Ausgang der jeweiligen AGN und unter Berücksichtigung der Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO, erläutert. Der Einfluss des gewählten TEG-Integrationskonzeptes ins Kühlsystem wird anhand des resultierenden Wärmeeintrags ins Kühlmittel  $\dot{Q}_{KM, zu}$  in Abbildung 8.12 dargestellt. Die einzelnen Balken repräsentieren den jeweiligen Mittel- (mittel) und Maximalwert (max) der drei Fahrscenarien. Die Höhe des Wärmeeintrags steigt mit der verfügbaren Abgasenthalpie aufgrund der Lastanforderung durch die Dynamik des Fahrprofils, der Zuladung und der Topografie. Dementsprechend werden die höchsten Wärmeströme für die Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> mit 23 kW im Diesel-NFZ und 46 kW im Erdgas-NFZ ermittelt. Qualitativ sinkt der Wärmeeintrag ins Kühlmittel mit steigendem Temperaturniveau des verwendeten Kühlmittelkreislaufs (NT-KMK  $\approx 60^\circ\text{C}$ , HT-KMK1  $\approx 80^\circ\text{C}$ , HT-KMK2  $\approx 90^\circ\text{C}$ ; s. Abschnitt 6.1.2), aufgrund von abnehmenden Temperaturdifferenzen im TEG. Der Wärmeeintrag über den zeitlichen Verläufen der Fahrzyklen ist beispielhaft in Teilabbildung D.12 (a) im Anhang illustriert. Aufgrund der zunehmenden Lastanforderung an die VKM steigen zudem die Wärmeströme mit der Zeit an. Darüber hinaus wird die höhere Dynamik im Erdgas-NFZ erkennbar. Dies ist durch die beschriebenen dynamischeren Abgasenthalpien begründet (s. Abbildung 8.3). Qualitativ sinken die Leistungen des TEG-Systems bei ansteigendem Temperaturniveau des Kühlmittels. Der Einfluss des gewählten kühlmittelseitigen TEG-Integrationskonzeptes auf die resultierende TEG-Leistung ist am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub> im Zeitverlauf in Teilabbildung D.12 (b) im Anhang dargestellt. Eine Übersicht der Ergebnisse ist Tabelle 8.9 zu entnehmen. Neben den bereits beschriebenen Kenngrößen werden zudem die resultierende Kraftstoffverbrauchsänderung  $\Delta B_{s/e}$  und der Zeitanteil der Öffnung der Bypassklappe  $\epsilon_{\text{Bypass}}$  aufgelistet. Im Diesel-NFZ ist die Klappenöffnung

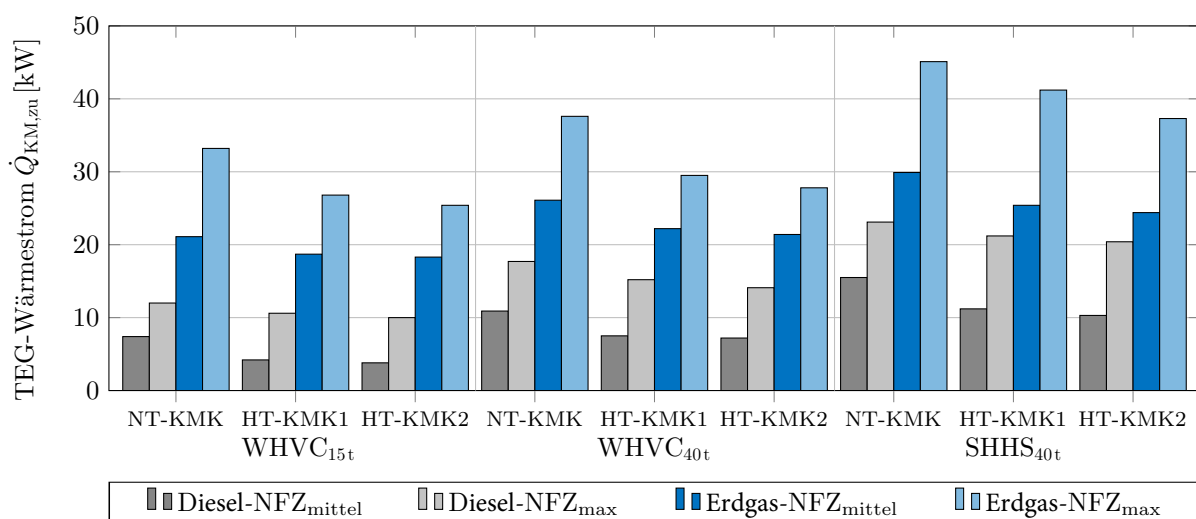


Abbildung 8.12.: Vergleich der Kühlmittelwärmeeinträge des TEG-Systems (TEG-Variante:  $TCO_{\min}$ )

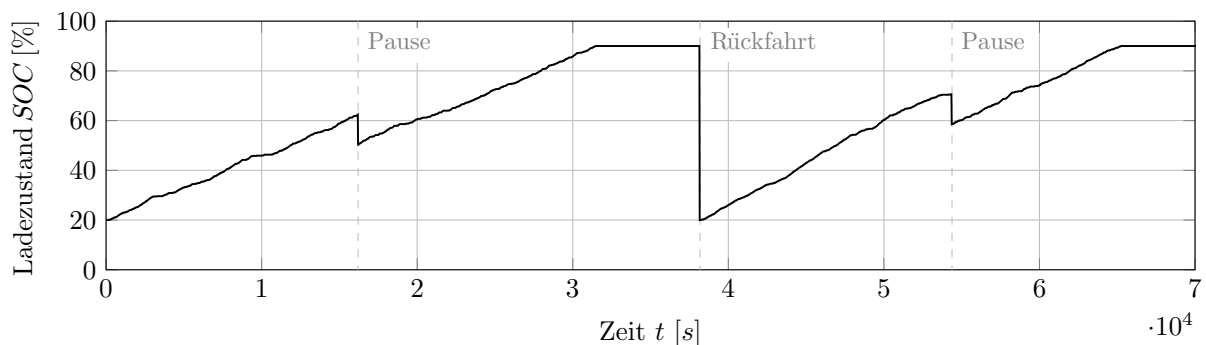
Tabelle 8.9.: Ergebnisübersicht des Einflusses der KMK-Integrationskonzepte (TEG-Variante:  $TCO_{\min}$ )

Referenz	KMK	Diesel-NFZ				Erdgas-NFZ			
		$\Delta B_s$ [%]	$\bar{P}_{TEG}$ [W]	$\bar{Q}_{KM,zu}$ [kW]	$\epsilon_{Bypass}$ [%]	$\Delta B_e$ [%]	$\bar{P}_{TEG}$ [W]	$\bar{Q}_{KM,zu}$ [kW]	$\epsilon_{Bypass}$ [%]
WHVC <sub>15t</sub>	NT-KMK	-0,6	184	7,8	0	-2,5	1030	21,1	1,3
	HT-KMK1	-0,2	84	4,2	0	-2	854	18,7	0
	HT-KMK2	-0,2	71	3,8	0	-1,9	837	18,3	0,6
WHVC <sub>40t</sub>	NT-KMK	-0,7	339	11	0	-2,3	1424	26,1	2,8
	HT-KMK1	-0,4	194	7,5	0	-1,8	1160	22,2	0,6
	HT-KMK2	-0,4	174	7,2	0,3	-1,7	1109	21,4	2,2
SHHS <sub>40t</sub>	NT-KMK	-1	560	13	2,4	-2,1	1686	29,9	8,6
	HT-KMK1	-0,7	338	11,2	2,5	-1,8	1330	25,4	7,2
	HT-KMK2	-0,5	275	10,3	6,4	-1,4	1094	24,4	17,4

insbesondere in der Realfahrstrecke SHHS<sub>40t</sub> notwendig. Im Erdgas-NFZ ist die Nutzung der Bypassfunktion bis auf den WHVC<sub>15t</sub> zwangsläufig erforderlich. Der Zeitanteil der Öffnung der Bypassklappe beträgt bis zu 17,4% in der Realfahrt SHHS<sub>40t</sub> bei TEG-Integration in den HT-KMK2 (entspricht 12.930s). Daraus ergibt sich eine Kraftstoffverbrauchsänderung von -1,4% und eine Amortisationszeit von 2,5 Jahren. Im Vergleich zum Integrationskonzept im NT-KMK mit einer Bypassöffnung von 8,6% (s. Abschnitt 8.2.1) ist die Kraftstoffreduktion um 0,7 Prozentpunkte geringer und die Amortisationszeit verlängert sich dadurch um 1,1 Jahre.

### 8.3.5. Elektrisches Bordnetz

Die TEG-Variante zur Minimierung der TCO erzielt im Diesel-NFZ im Durchschnitt derart hohe Ausgangsleistungen (s. Tabelle D.5 im Anhang), dass der elektrische Generator des Fahrzeugs entlastet wird und kleiner dimensioniert werden kann. Im Erdgas-Pendant übersteigt die mittlere TEG-Leistung diejenige der elektrischen Verbraucher (s. Abschnitt 5.1.2.4), sodass der Generator vollständig ersetzt werden könnte. Die darüber hinaus gewandelte Energie lässt sich im Akkumulator speichern. Auf längeren Strecken reicht die Speicherkapazität jedoch nicht aus ( $SOC = 90\%$ ), wie beispielhaft für die Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> in Abbildung 8.13 dargestellt.

Abbildung 8.13.: Batterieladezustand des Erdgas-NFZ mit TEG-Ergebnisdesign zur Minimierung der TCO auf der Realfahrstrecke SHHS<sub>40t</sub>

## 8.4. Sensitivitätsanalyse

Um die Unsicherheit der ganzheitlichen Auslegungsmethode zu quantifizieren und das Zusammenwirken einzelner Modellparameter darzustellen wird deren Sensitivität<sup>107</sup> untersucht. Dabei wird überprüft, welche Parameter einen großen Einfluss auf das Systemverhalten ausüben und welche Parameter keinen oder nur einen geringen Einfluss aufweisen. Diese können bei zukünftigen Entwicklungen vernachlässigt werden (vgl. [162, 163]). Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bei der Auswahl der Eingangsgrößen der TEG-Simulationsumgebung (s. Abschnitt 5.2.4) und bei der Entscheidungsfindung während des Entwicklungsprozesses in dieser Arbeit (s. Kapitel 6) verwendet, um den Lösungsraum zu reduzieren.

Als Ausgangsbasis der Sensitivitätsanalyse werden die TEG-Varianten zur Minimierung der TCO bei Berücksichtigung der Integrationskonzepte am Ausgang der AGN sowie im NT-KMK im Fahrzyklus WHVC<sub>40t</sub> des Diesel- und Erdgas-NFZ verwendet. Dies bedeutet

Tabelle 8.10.: Übersicht der erzielten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse anhand ausgewählter Modellparameter und deren Einflüsse auf das Systemverhalten am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub>

Modellsensitivität (-parameter)	Fahrzeug	Amortisationszeit $t_A^*$ [Jahr]		Abschnitt
		Minimaler Wert	Maximaler Wert	
Gesamtbetriebskostenmodell	Diesel-NFZ	0,7	5,7 ( $> 10^{**}$ )	8.4.1
	Erdgas-NFZ	0,4	2,3 ( $> 10^{**}$ )	
Langzeitbetrieb	Diesel-NFZ	1,8	3 ( $> 10^{**}$ )	D.7.6.1
	Erdgas-NFZ	1	1,3 (3,3 <sup>**</sup> )	
Fahrzeugrandbedingungen	Diesel-NFZ	1,3	2,6	D.7.6.2
	Erdgas-NFZ	1	3,7	
elektrischer Generator	Diesel-NFZ	0,8	2,8	8.4.2
	Erdgas-NFZ	0,5	2,7	
Kaltstart	Diesel-NFZ	0,8	2,8	D.7.6.3
	Erdgas-NFZ	0,6	1,3	
thermoelektrisches Material & Modul	Diesel-NFZ	1,4	2,8	D.7.6.4
	Erdgas-NFZ	0,7	1,7	
Wärmeübertrager	Diesel-NFZ	1,4	2,2	D.7.6.5
	Erdgas-NFZ	0,9	1,2	
Umgebungsrandbedingungen	Diesel-NFZ	1,6	2,2	D.7.6.6
	Erdgas-NFZ	0,9	1,1	
elektrisches Bordnetz	Diesel-NFZ	1,8	1,9	D.7.6.7
	Erdgas-NFZ	0,7	1,1	
Kühlmittel	Diesel-NFZ	1,8	1,8	D.7.6.8
	Erdgas-NFZ	1	1	

\* Ausgangsbasis ist TEG-Ergebnisdesign  $TCO_{\min}$ , Diesel-NFZ: 1,8 Jahre und Erdgas-NFZ: 1 Jahr.

\*\* Ungünstigste Annahmen, deren (gleichzeitiges) Eintreten als äußerst unwahrscheinlich bewertet wurde.

<sup>107</sup>Die Sensitivität beschreibt die Empfindlichkeit einer Ausgangsgröße auf die Veränderung einer oder mehrerer Eingangsgrößen (Variablen).

eine Kraftstoffreduktion von 0,7 % und eine Amortisationszeit von 1,8 Jahren für das Diesel-NFZ sowie 2,3 % und 1 Jahr für das Erdgas-NFZ (s. Abschnitt 8.2.1). Als entscheidende Ergebnisgröße wird die Amortisationszeit ausgewählt. Die Ergebnisse der Analyse aller untersuchten Modellparameter sind in Tabelle 8.10 nach Relevanz, d. h. mit abnehmendem positiven und negativem Einfluss aufgelistet. Die Minimal- und Maximalwerte stellen die Ergebnisse im Variationsbereich dar, dessen Auswahl im jeweiligen Abschnitt beschrieben wird. Allgemein resultiert eine Kraftstoffreduktion von weniger als 0,5 Prozentpunkte im Diesel-NFZ bzw. weniger als 1,1 Prozentpunkte im Erdgas-NFZ in Amortisationszeiten von mehr als 3 Jahren und damit zum Verfehlen einer der Zielsetzungen dieser Arbeit. Parameter mit großem positivem Einfluss auf das TEG-Systemverhalten sind in folgenden Teilmodellumgebungen enthalten: Gesamtbetriebskostenmodell, elektrischer Generator, Kaltstart, thermoelektrische Materialien und Wärmeübertrager. Der positive Einfluss des Kaltstarts und der negative Einfluss des Langzeitbetriebs wurden in der Arbeit bislang nicht berücksichtigt (Begründungen s. Abschnitt D.7.6.3 und D.7.6.1 im Anhang). Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für das Gesamtbetriebskostenmodell und den elektrischen Generator vorgestellt. Weitere Ergebnisse sind Abschnitt D.7.6 im Anhang zu entnehmen.

Bei günstigster Annahme aller Modellparameter der Sensitivitätsanalyse, d. h. Annahme aller Parameter zur Erzielung der maximalen Kraftstoffreduktion, wird das weitere Potential der Technologie erkennbar. Für das Diesel-NFZ bedeutet das eine Nettokraftstoffreduktion von bis zu 3,2 % (ohne Kaltstart: 2,5 %) und für das Erdgas-NFZ von bis zu 7 % (ohne Kaltstart: 5,6 %) im Fahrzyklus WHVC<sub>40t</sub>.

#### 8.4.1. Einfluss des Gesamtbetriebskostenmodells

Der Einfluss der Änderung der Eingangsvariablen auf die Sensitivität der Ergebnisgröße wird für das TCO-Modell am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub> untersucht. Folgende Variablen werden einzeln im Bereich von –100 % bis 100 % variiert (Angabe der Ausgangsbasiswerte des Diesel-NFZ / Erdgas-NFZ):

- Jahreslaufleistung  $s$  (150 Tkm / „)
- Nutzungsdauer  $t_N$  (5 Jahre / „)
- TEG-Stückkosten  $K_{\text{TEG}}$  (784 EUR / 1002 EUR)
- TEG-Kraftstoffreduktion  $|\Delta B|$  (0,7 % / 2,3 %)

Die Ergebnisse der prozentualen Veränderungen und damit des Einflusses auf die Amortisationszeit sind in Abbildung 8.14 dargestellt. Mit Ausnahme der Stückkosten verlängert sich die Amortisationszeit, wenn die jeweilige Eingangsgröße reduziert wird. Die resultierenden Kurven haben einen regressiven Verlauf, die bei Steigerung der Ausgangswerte ein asymptotisches Verhalten aufweisen. Der Kurvenverlauf der Stückkosten ist progressiv. Steigende Kosten führen zu einer höheren Amortisationszeit.

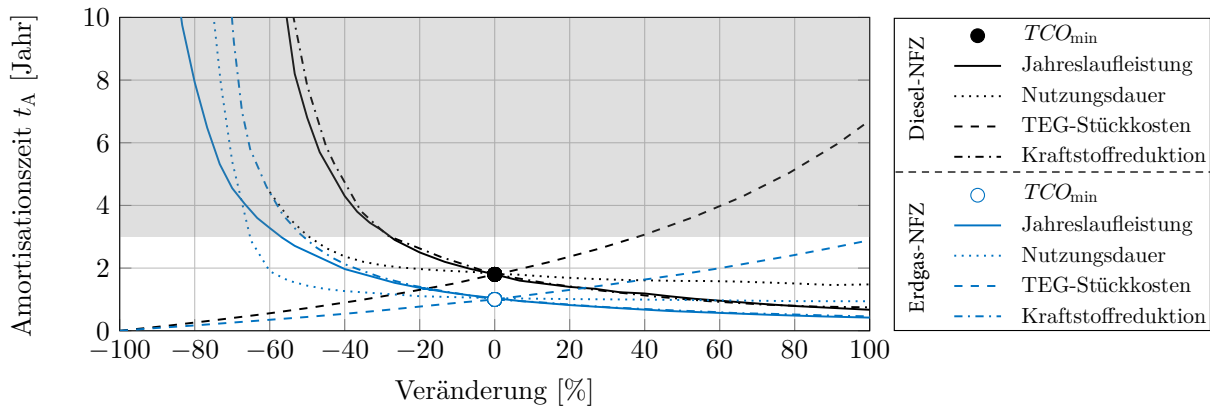


Abbildung 8.14.: Einfluss relevanter Variablen des TCO-Modells auf die Amortisationszeit am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub> und TEG-Ergebnisdesign  $TCO_{min}$  ( $t_A > 3$  Jahre grau hinterlegt)

Bei Variation der Jahreslaufleistung beträgt die minimale Amortisationszeit 0,7 Jahre für das Diesel-NFZ und 0,4 Jahre für das Erdgas-NFZ. Die Veränderung um 100 Prozentpunkte vom Ausgangswert entsprechen 300 Tkm. Bei einer Jahresfahrleistung von 80 Tkm, entspricht dem Verteilerverkehr von SNFZ (vgl. [5, 6]), werden 5,7 Jahre für das Diesel-NFZ und 2,3 Jahre für das Erdgas-NFZ ermittelt. Für die Variation der kalkulierten Nutzungsdauer besteht ein ähnlich großer Einfluss bei dessen negativer Änderung. Dabei entspricht der genannte Variationsbereich 0–10 Jahre. Für das Diesel-NFZ wird die erforderliche Annahme zur Berechnung der Amortisation erst ab 2 Jahren und für das Erdgas-Pendant ab 1 Jahr erfüllt (s. Abschnitt 5.1.3). Für die Kostenbetrachtung werden im Maximum bei 100 % Änderung (entspricht TEG-Stückkosten von 1568 EUR bzw. 2004 EUR) eine Amortisationszeit von 2,9 Jahre im Diesel-NFZ und 6,7 Jahre im Erdgas-NFZ erzielt. Für die Änderung der Kraftstoffreduktion<sup>108</sup> werden bei Steigerung der Ausgangsbasiswerte um 100 % (entspricht Reduktion um 1,4 % bzw. 4,6 %) 0,7 Jahre und 0,5 Jahre erreicht. Die maximal betrachtete Amortisationszeit von 10 Jahren wird beim Diesel-NFZ bei einer Reduktion von -54 % (entspricht einer Kraftstoffreduktion von 0,3 %) und beim Erdgas-NFZ bei -70 % (entspricht 0,2 %) der Ausgangsbasiswerte erzielt.

Allgemein gilt, dass die Eingangsgrößen bei Änderung kleiner als -30 % und größer als 38 % für das Diesel-NFZ sowie kleiner als -55 % für das Erdgas-NFZ die Zielsetzung dieser Arbeit nicht mehr erfüllen. Dies wird durch den grau hinterlegten Bereich in der Abbildung verdeutlicht. Im Minimum werden 0,7 Jahre für das Diesel-NFZ und 0,4 Jahre für das Erdgas-NFZ sowie im jeweiligen Maximum mehr als 10 Jahre ermittelt.

<sup>108</sup>Eine entsprechende Änderung der Kraftstoffkosten (s. Abschnitt 5.1.3) führt zu ähnlichen Werten wie bei der Änderung der Kraftstoffreduktion, weshalb diese Variable in Abbildung 8.14 nicht aufgeführt ist.

## 8.4.2. Einfluss des elektrischen Generators

Nach den Annahmen der Modellbildung in Abschnitt 5.1.2.4 erreichen moderne Kompaktgeneratoren maximale Wirkungsgrade von 77 %. Im Folgenden wird das Wirkungsgradkennfeld von einem Minimum von 30 % bis zu einem Maximum von 100 % variiert, was dem idealen Wirkungsgrad entspricht. Die Veränderung liegt im Vergleich zum jeweiligen Ausgangsbasisniveau (Kraftstoffreduktion Diesel-NFZ: 0,7 % bzw. Erdgas-NFZ: 2,3 %; s. Abschnitt 8.2.1) bei bis zu –60 % bzw. bei bis zu 30 %, wie in Abbildung 8.15 illustriert. Die Annahmen unterstellen die Verwendung einer älteren Generatorgeneration oder eines nahezu idealen Generators, der die Energieumwandlung im Nennleistungspunkt verlustfrei realisiert.

Im Diesel-NFZ führt die Veränderung des Wirkungsgrades zur Kraftstoffreduktion im Bereich von 0,6–1,5 % im  $WHVC_{40t}$  (Ausgangsbasis:  $\bar{\eta}_G = 74$  %). Die Zeit der Amortisation verlängert sich auf bis zu 2,8 Jahre bzw. verkürzt sich auf 0,8 Jahre im Vergleich zur Ausgangsbasis. Die Veränderung des Wirkungsgrades lässt die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Erdgas-NFZ im Bereich von 1,6–4,3 % variieren (Ausgangsbasis:  $\bar{\eta}_G = 71$  %). Die Amortisationszeit verlängert sich auf bis zu 2,7 Jahre bzw. verkürzt sich auf 0,5 Jahre. In der Untersuchung wird berücksichtigt, dass bei Annahme eines (in-)effizienteren Generators der Gesamtverbrauch des Fahrzeuges ohne TEG (steigt) sinkt.

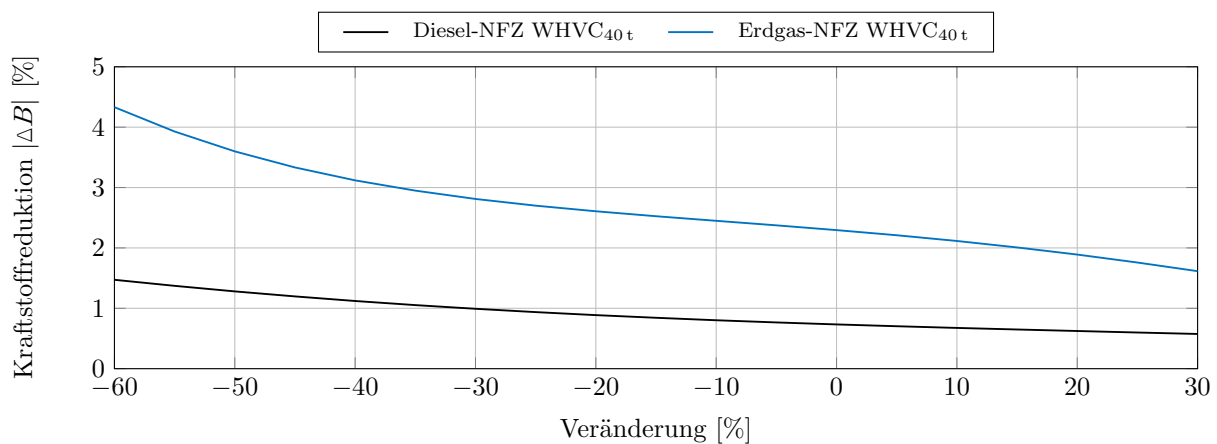


Abbildung 8.15.: Einfluss der Veränderung des Generatorwirkungsgrads auf die Kraftstoffreduktion am Beispiel des Referenzfahrzyklus  $WHVC_{40t}$

## 8.5. Ergebnisdiskussion

### 8.5.1. Einordnung in den Stand der Technik

Die Einordnung der wissenschaftlichen Erkenntnisse dieser Arbeit erfolgt durch Vergleiche der Ergebnisse der Variantenanalyse aus Abschnitt 8.2 mit der jeweils besten Kennzahl des Standes der Technik. Alle Angaben unterliegen gewissen Unsicherheiten, da zumeist verschiedene Randbedingungen und TEG-Auslegungsstrategien gewählt wurden. Zudem wurden die Schwerpunkte auf unterschiedliche Ergebnisgrößen gelegt und es mangelt an detaillierten Systemangaben (s. Tabelle 2.2).



Im Allgemeinen haben die Ergebnisse dieser Arbeit den Stand der Technik deutlich gesteigert und durch neues Wissen erweitert. Hervorzuheben ist als neuartiger Untersuchungsaspekt die methodische Untersuchung des Abwärmepotentials von NFZ mit Erdgas-VKM und der Vergleich zu Diesel-NFZ. Durch die Berücksichtigung der Systemkosten zu Beginn des Entwicklungsprozesses war es zudem erstmals möglich, wirtschaftlich vorteilhafte Systemlösungen zu erforschen. Durch den Nachweis kostengünstiger TEG-Systeme wurde der Reifegrad der Technologie deutlich erhöht. Entscheidende Aussagen für potentielle Kunden und Hersteller auf allen Ebenen der Technologie, wie z. B. zur Kosten-Nutzen-Relation und Systemamortisation, werden durch diese Arbeit erstmals ermöglicht.

### Elektrische Spitzenleistung

Im wissenschaftlichen Diskurs hat die Kennzahl der Spitzenleistung eine große Bedeutung (vgl. [70, 214, 258]). Für die Anwendung der Technologie ist diese aus mehreren Gründen weniger relevant. Die Spitzenleistung eines TEG ist in erster Linie abhängig von den Randbedingungen, insbesondere von der verfügbaren Abgastemperatur, und der gewählten Modulfläche wie in Abschnitt 8.2.3 beschrieben. Zudem hat die Auslegungsstrategie einen großen Einfluss, wie z. B. durch den gewählten thermischen Gesamtwiderstand des TEG und den flächenspezifischen TE-Materialeinsatz.

Bei freier geometrischer Optimierung wird, unter Berücksichtigung der maximal verfügbaren Abgasenthalpie, eine maximale Leistung von 3800 W bei einer WÜ-Fläche von rund 8000 cm<sup>2</sup> für das Diesel-NFZ ermittelt. Im Nennleistungspunkt sind es für das TEG-Design mit Zielsetzung  $TCO_{\min}$  bis zu 2288 W bei 1260 cm<sup>2</sup> (s. Abschnitt 8.2.3). Nach [58] liegen die Simulationswerte des Standes der Technik bei bis zu 2730 W (s. Tabelle 2.2), bei deutlich höheren Abgasenthalpien und -temperaturen im Abgaskrümmen. Eine experimentelle Validierung ist unbekannt.

Für das Erdgas-NFZ liegen die Werte der freien geometrischen Optimierung im Maximum bei 9400 W und einer WÜ-Fläche von rund 12.000 cm<sup>2</sup>. Im Nennleistungspunkt sind es für das TEG-Design mit Zielsetzung  $TCO_{\min}$  bis zu 4032 W bei 1420 cm<sup>2</sup>. Simulationswerte des Standes der Technik nach [130] liegen vergleichsweise bei bis zu 820 W. Bei der Hardwarerealisierung des TEG-Designs  $TCO_{\min}$  für das Erdgas-NFZ wurde eine maximale elektrische Leistung von 2697 W gemessen (s. Abschnitt 7.2.2). Im Stand der Technik lagen die Messwerte der TEG-Systeme von [59] bei maximal 1068 W für Diesel-NFZ und von [130] bei 245 W für Erdgas-NFZ.

Die Steigerung des Standes der Technik soll im Folgenden beispielhaft anhand des Vergleichs zur Untersuchung von Scania et al. [103] aufgezeigt werden. In der Arbeit wurden zwei TEG-Systeme, mit 224 und 300 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Modulen des Herstellers Thermonamic in Stapelbauweise entwickelt für die Integrationspositionen nach der AGN und vor dem Wärmeübertrager der AGR-Strecke. In den neun Betriebspunkten des

Tabelle 8.11.: Vergleich der TEG-Auslegung von Scania et al. [103] mit dieser Arbeit am Beispiel des Diesel-NFZ (grau hinterlegt sind kritische Auslegungsbetriebspunkte)

TEG- Position	Randb. / Ergebnis	Betriebspunkte Long Haulage Cycle (LHC)									Quelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
AGN	$\vartheta_{AGN}$ [°C]	248	347	386	259	352	251	313	346	396	[103]
	$\dot{m}_{AGN}$ [kg/s]	0,12	0,15	0,28	0,12	0,26	0,15	0,22	0,30	0,39	[103]
	$P_{el}^1$ [W]	185	340	377	229	362	260	350	317	375	[103]
	$P_{el}^1$ [W]	429	1000	1344 <sup>3</sup>	472	1231	529	951	1154	1427 <sup>3</sup>	diese Arbeit
	$\Delta P_{el}$ [%]	232	294	357	206	340	204	272	364	381	
AGR	$\vartheta_{AGR}$ [°C]	318	452	551	335	489	325	425	481	560	[103]
	$\dot{m}_{AGR}$ [kg/s]	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,06	[103]
	$P_{el}^2$ [W]	50	205	238	90	285	125	288	365	410	[103]
	$P_{el}^2$ [W]	321	645	872 <sup>4</sup>	464	823	455	706	763 <sup>3</sup>	940 <sup>3,4</sup>	diese Arbeit
	$\Delta P_{el}$ [%]	642	315	367	516	289	364	245	209	229	

<sup>1</sup> Lastpunktabhängig;  $\vartheta_{KM,ein} = 25...65$  °C;  $\dot{V}_{KM} = 0,3$  dm<sup>3</sup>/s.

<sup>2</sup> Lastpunktabhängig;  $\vartheta_{KM,ein} = 25...65$  °C;  $\dot{V}_{KM} = 0,2$  dm<sup>3</sup>/s.

<sup>3</sup> Kühlmittelausgangstemperatur kritisch hoch; daher gegebenenfalls Bypass-Betrieb erforderlich.

<sup>4</sup> Abgaseingangstemperatur kritisch hoch; Überhitzung möglich; Langzeitstabilität negativ beeinflusst; daher gegebenenfalls Bypass-Betrieb erforderlich.

gewählten Referenzzyklus Long Haulage Cycle (LHC)<sup>109</sup> wurde eine mittlere elektrische Leistung ( $\bar{P}_{el}$ ) von 311 W in der AGN und von 228 W in der AGR-Strecke simulativ ermittelt, wie in Tabelle 8.11 aufgeführt.

Zum Vergleich erfolgte die TEG-Auslegung mit den optimierten NT-TEM dieser Arbeit (s. Tabelle 7.2) bei nahezu gleicher Modulfläche (+4 % für die AGN und -1 % für die AGR-Strecke im Vergleich zu Scania et al.). Das optimierte TEG-System in der AGN benötigt 32 Module und das in der AGR-Strecke 40 Module. Als Vorteil konnte die Modulzahl durch die Verwendung des großflächigen NT-TEM der Bezeichnung Y1-125-84-1.6 erheblich reduziert werden. Die Komplexität der Bauweise sowie der TE-Materialeinsatz und damit die Kosten werden erheblich reduziert. In der Tabelle sind die ermittelten Leitungen  $P_{el}$  der TEG-Auslegungen sowie die Abweichung  $\Delta P_{el}$  zwischen den Ergebnissen von Scania et al. und dieser Arbeit aufgeführt. Nach der Auslegung dieser Arbeit ist die mittlere Leistung mit 949 W für die AGN um 294 % und mit 666 W für die AGR-Strecke um 353 % höher als die Ergebnisse von Scania et al. Das größere Potential der TEG-Integration am Ausgang der AGN im Vergleich zu derjenigen in der AGR-Strecke wird wiederum erkennbar (s. Abschnitt 4.3 und 8.2.1). Aufgrund der vergleichsweise geringeren thermischen Gesamtwiderstände der TEG dieser Arbeit können kritische Betriebszustände auftreten (s. grau hinterlegte Angaben in Tabelle 8.11), wie z. B. Überhitzung des Kühlmittels oder der Module. Durch eine Erhöhung des Kühlmitteldurchflusses könnte dies beispielsweise verhindert werden.

<sup>109</sup>Dieser Fahrzyklus besteht aus neun Konstantpunkten, die typische Lastpunkte einer Fernverkehrsfahrt mit einem SNFZ repräsentieren (Drehzahlen: 1000, 1150 und 1300 [1/min]; relative Lasten in den Schrittweiten: 25, 75 und 100 [%]); analoges Vorgehen wie bei der Erstellung des WHSC.

## Leistungsdichte von TEG-Systemen

Für die TEG-Auslegung in NFZ-Anwendungen stellt diese Kennzahl eine Nebenzielgröße dar. Im Allgemeinen wurde die Leistungsdichte des Standes der Technik für Diesel-NFZ deutlich gesteigert, wie in Abbildung 8.16 dargestellt. Die gravimetrische konnte um 238 % auf 159 W/kg und die volumetrische Leistungsdichte um 340 % auf 248 W/dm<sup>3</sup> gesteigert werden, jeweils im Vergleich zur Arbeit von Bass und Elsner [59]. Dafür sind rund 0,3 kg des TE-Materials Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> erforderlich, was einer Materialreduzierung auf unter 5 % des Wertes von Bass und Elsner entspricht (s. Tabelle A.1 im Anhang).

Für das Erdgas-NFZ weist der Stand der Technik für die Leistungsdichte eine Forschungslücke auf. Die Ergebnisse von 298 W/kg und 568 W/dm<sup>3</sup> stellen somit Spitzenwerte ohne direkte Vergleichsmöglichkeit dar. Dafür sind 0,8 kg des TE-Materials der Materialklassen Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> und SKD erforderlich. Auf Basis der experimentellen Messwerte konnte allgemein die gravimetrische Leistungsdichte für Automobilanwendungen um 193 % im Vergleich zur Arbeit von Kober et al. [108] auf 174 W/kg und die volumetrische Leistungsdichte um 200 % auf 327 W/dm<sup>3</sup> gesteigert werden.

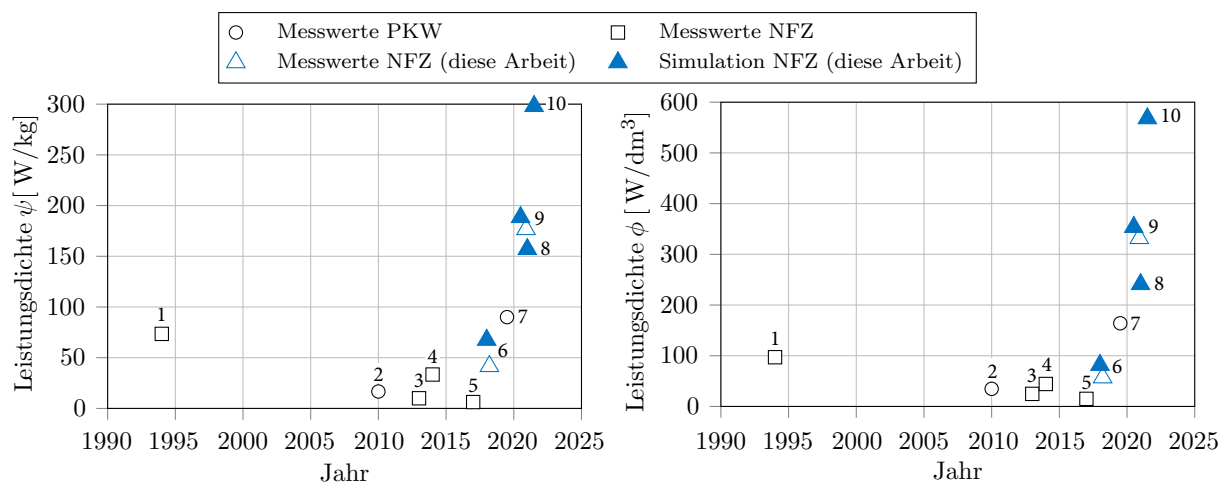


Abbildung 8.16.: Gravimetrische (links) und volumetrische Leistungsdichte (rechts) von TEG-Systemen des Standes der Technik und dieser Arbeit; Quellen: 1: [59], 2: [32], 3: [129], 4: [22], 5: [103], 6: Erdgas-NFZ Teilsystemaufbau (s. Abschnitt 7.2.1), 7: [108], 8: Diesel-NFZ max. Leistungsdichte, 9: Erdgas-NFZ Gesamtsystemaufbau (s. Abschnitt 7.2.2), 10: Erdgas-NFZ max. Leistungsdichte; Abbildung aus [48] und i. A. a. [72]

## Flächenspezifische Leistungsdichte von thermoelektrischen Modulen

Für NT-Anwendungen im Diesel-NFZ werden Leistungsdichten von bis zu 1,1 W/cm<sup>2</sup> unter Berücksichtigung der passiven Modulfläche ermittelt ( $\Delta T = 290^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_{\text{KS}} = 50^\circ\text{C}$ ; s. Abschnitt 7.1.2). Bislang waren nach [103] für TEM der Materialklasse Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Werte von weniger als 0,7 W/cm<sup>2</sup> bekannt. Die Modulauslegungen des Standes der Technik weisen vergleichsweise große Modulhöhen von über 5 mm auf, um hohe Temperaturgradienten aufgrund des höheren thermischen Widerstands zu ermöglichen. Ergebnisse dieser Auslegungen und der NT-Modulauslegungen dieser Arbeit (Bezeichnung als LG12-31-31-3.3 und Y1-125-84-1.6; s. Abschnitt 7.1.2) sind in

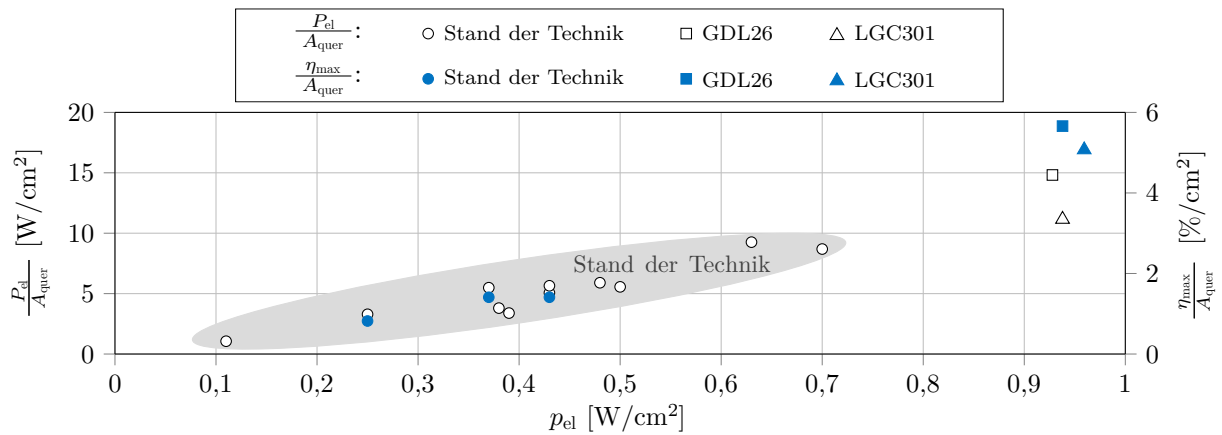


Abbildung 8.17.: Einordnung der NT-TEM-Auslegungen der Materialklasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dieser Arbeit in den Stand der Technik nach [32, 103, 146, 259] (Messwerte bei  $\Delta T = 270 \text{ K}$  und  $\vartheta_{KS} = 30 \text{ °C}$ )

Abbildung 8.17 dargestellt. Der Vergleich basiert auf der flächenspezifischen  $p_{el}$  und auf der querschnittsflächenspezifischen Leistungsdichte  $\frac{P_{el}}{A_{quer}}$ . Diese ist auf der linken Ordinate der Abbildung aufgetragen. Auf der rechten Ordinate ist zudem das Verhältnis aus dem Wirkungsgrad  $\eta_{TEM}$  und der Querschnittsfläche  $A_{quer}$  abgebildet. Die deutlichen Verbesserungen gegenüber den Arbeiten des Standes der Technik werden erkennbar.

Für HT-Anwendungen im Erdgas-NFZ werden Leistungsdichten von bis zu  $3 \text{ W/cm}^2$  ermittelt und im TEG-Gesamtsystemaufbau bis zu  $2,3 \text{ W/cm}^2$  experimentell nachgewiesen (s. Abschnitt 7.2.2). Simulationswerte lagen nach [111] bei weniger als  $1,2 \text{ W/cm}^2$  und nach [104] wurden bislang weniger als  $0,6 \text{ W/cm}^2$  im NFZ-TEG gemessen.

### Kraftstoffverbrauchsreduktion

In Abhängigkeit vom Einsatzszenario und der Zielsetzung der TEG-Optimierung liegt die Nettokraftstoffreduktion für das Diesel-NFZ im Bereich von  $0,5\text{--}1,5\%$  und für das Erdgas-NFZ im Bereich von  $1,8\text{--}2,8\%$ , wie Tabelle D.5 im Anhang zu entnehmen ist. Die maximale Kraftstoffreduktion von  $1,5\%$  wird für das Diesel-NFZ in einem Streckenabschnitt mit leichter Topografie der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> und bei TEG-Optimierung hinsichtlich minimalem Kraftstoffverbrauch ermittelt. Im Vergleich zur Arbeit von Bernath [34] stellt dies eine Steigerung von  $375\%$  dar. Die maximale Kraftstoffreduktion von  $2,8\%$  des Erdgas-NFZ wird unter den gleichen Randbedingungen und Zielsetzung der TEG-Optimierung wie beim Diesel-NFZ ermittelt. Das Ergebnis bedeutet eine Steigerung von  $930\%$  gegenüber der Arbeit von Hervas-Blanco et al. [130]. Für beide Anwendungen wurden signifikante Steigerungen erreicht, obwohl in dieser Arbeit sämtliche Fahrzeugwechselwirkungen und die Systemkosten berücksichtigt werden.

### **Kosten-Nutzen-Relation**

Erstmals wird die Kosten-Nutzen-Relation für das TEG-System im NFZ-Anwendungsgebiet untersucht. Im Minimum werden 85 EUR/(g km) bzw. 805 EUR/% im Diesel-NFZ und 32 EUR/(g km) bzw. 344 EUR/% im Erdgas-NFZ ermittelt. Dies entspricht einer deutlichen Verbesserung des allgemeinen Standes der Technik nach Kober [72] für Anwendungen im Hybrid-PKW von 55 EUR/(g km). In dieser Arbeit wird die niedrigste Kosten-Nutzen-Relation, sofern der Nutzen im Folgenden als elektrische Leistung definiert wird, für die jeweilige Nennleistung und das TEG-Ergebnisdesign  $TCO_{\min}$  mit 0,34 EUR/W im Diesel-NFZ und 0,25 EUR/W im Erdgas-NFZ erreicht. Dies liegt unterhalb der konservativsten Forderung von [119] mit 0,3 USD/W und innerhalb des Zielbereichs dieser Arbeit mit weniger als 0,5 EUR/W (s. Abschnitt 3.2).

### **Amortisation**

Dieser Aspekt wurde bislang für TEG-Systeme im Stand der Technik nicht untersucht. Stellvertretend resümieren Risseh et al. [103], dass TEG-Systeme sich nicht wirtschaftlich im Diesel-NFZ einsetzen lassen:

„The efficiency of the modules [BiTe] commercially available today [2016] is still far from automotive industry requirements, why a groundbreaking thermoelectric material is necessary. In order to have an economic beneficial integration into automotive applications, the power output per installation space / weight of future TEGs has to increase, and the price per generated power needs to decrease.“ [103, S. 43]

Im Gegensatz dazu wurde in dieser Arbeit erstmals nachgewiesen, dass sich TEG-Systeme im schweren Nutzfahrzeug amortisieren können (s. Abschnitt 8.2.1). Im Diesel-NFZ beträgt die minimale Amortisationszeit 1,4 Jahre im Teilabschnitt ‚Landstraße‘ des Fahrzyklus  $WHVC_{40t}$  und im Erdgas-NFZ sind es 0,7 Jahren im Teilabschnitt ‚Stadt‘ desselben Fahrzyklus (s. Tabelle D.5 im Anhang).

## **8.5.2. Vergleich mit weiteren Technologien zur Abwärmenutzung**

Für Abwärmenutzungssysteme im SNFZ ist bislang kein Nachweis für einen wirtschaftlichen Betrieb bekannt. Die TEG-Varianten der Anwendungsszenarien mit der jeweils geringsten Amortisationszeit von 1,8 Jahren für das Diesel-NFZ und 1 Jahr für das Erdgas-NFZ sind im Referenzzyklus  $WHVC_{40t}$  (s. Tabelle D.7.5 im Anhang) in Abbildung 8.18 aufgeführt. Darüber hinaus sind der Rankine-Prozess und die Turbo-Compound unter Verwendung von Literaturangaben und der Kostenschätzungen für das Jahr 2020 aus Tabelle 2.1 angegeben. Für den Vergleich wird der Kraftstoffverbrauch des jeweiligen Fahrzyklus  $WHVC_{40t}$  berücksichtigt (s. Tabelle 4.2). Beide konkurrierenden Technologien erreichen die Gewinnschwelle erst nach 3 Jahren. Das RP-System erzielt die höchste Kraftstoffreduktion von 2,5%. Selbst bei Kostenreduktionen von 56% für das RP-System und 18% für das TC-System gemäß der Abschätzung aus Tabelle 2.1 für das Jahr 2030, beträgt die Amortisationszeit für beide Systeme über 2 Jahre. Die

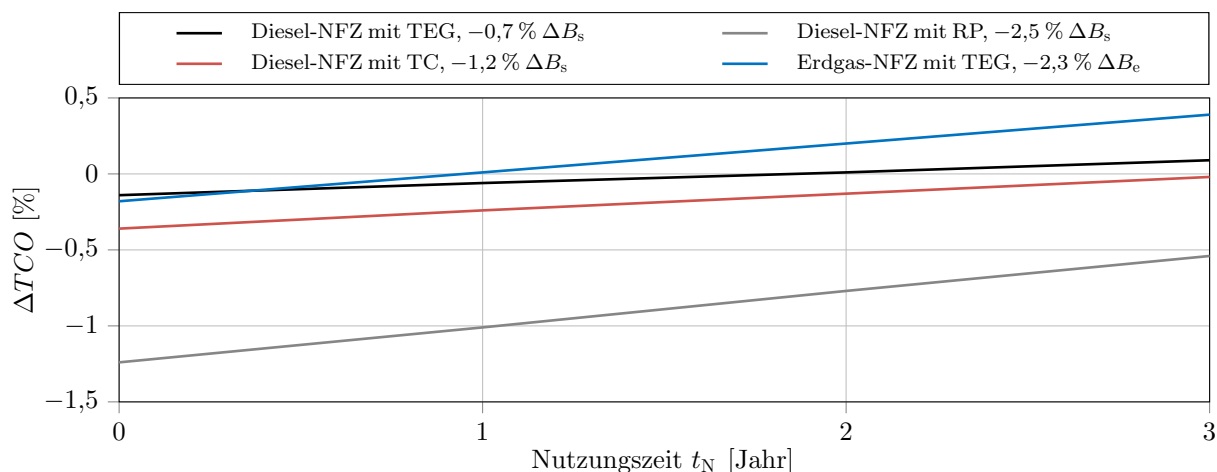


Abbildung 8.18.: Vergleich von Abwärmenutzungssystemen im Kontext der Gesamtbetriebskosten (Annahmen: Jahreslaufleistung von 150 Tkm, Nutzungsdauer von 5 Jahren, Systemkosten s. Tabelle 2.1 und D.7.5 im Anhang)

TEG-Systeme der beiden Anwendungsszenarien erreichen die Gewinnschwelle früher. Wartungs- und Reparaturkosten wurden bei den Kalkulationen nicht berücksichtigt. Von einer steigenden Systemkomplexität vom TEG-, über das TC- bis zum RP-System ist auszugehen, aufgrund des Einsatzes von rotierenden Teilen und eines zusätzlichen Arbeitsmediums. Daher kann mit einer in etwa proportionalen Entwicklung der Kosten ausgegangen werden. Für das TEG-System rechnet der Autor mit den geringsten Kosten in der Nutzungszeit, wie z. B. durch Reinigung der WÜ oder Justierung der Bypassklappe. Für das TC- und RP-System sind deutlich höhere Kosten dieser Art zu erwarten, wie beispielsweise Ersatz des Arbeitsmediums des RP-Systems. Dies würde die Zeit bis zum Erreichen der Gewinnschwelle erheblich verlängern, zumindest bei den beiden letztgenannten Systemen. Zum Beispiel beträgt die Amortisationszeit des RP-Systems nach [45] für ein SNFZ mit 40 t GG 6,8 Jahre, insbesondere aufgrund der hohen Systemstückkosten von 11.000 EUR. Dies stellt eine wesentlich konservativere Annahme dar, als sie in dieser Arbeit mit 6985 EUR im Jahr 2020 und 3005 EUR im Jahr 2030 getroffen wurde.

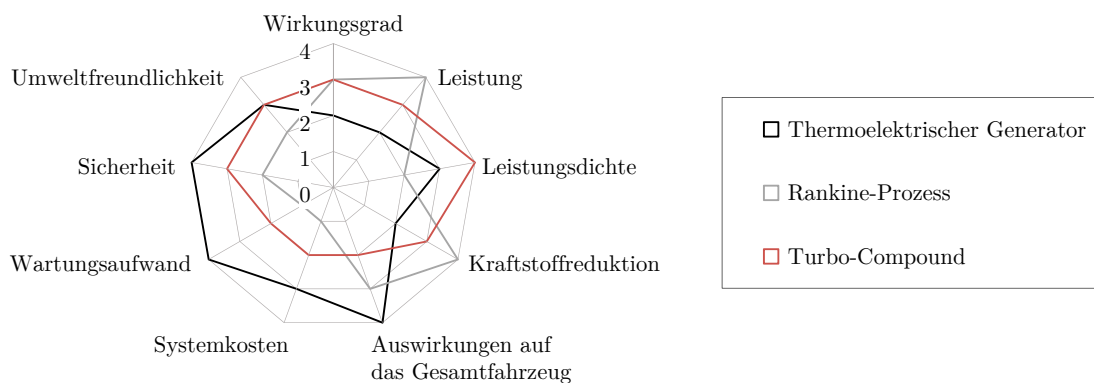


Abbildung 8.19.: Multikriterieller Vergleich verschiedener Abwärmenutzungssysteme: TEG, RP und TC; Punktbewertung i. A. a. [244]

Im Allgemeinen sind die theoretisch möglichen Wirkungsgrade bei TEG-Systemen aufgrund der bislang geringen TE-Materialqualität deutlich niedriger als bei TC- und RP-Systemen, wie in Abschnitt D.7.7 im Anhang erläutert wird. Weitere Vergleichskriterien der aktuell vielversprechendsten Abwärmenutzungssysteme im schweren NFZ sind in Abbildung 8.19 dargestellt. Mit Hilfe der Skala werden unbefriedigende Merkmalerfüllungen mit 0 Punkten und sehr gute mit 4 Punkten bewertet (vgl. [244]). Die Vorteile des TEG-Systems liegen demnach in der hohen Sicherheit, dem geringen oder nicht notwendigen Wartungsaufwand, den günstigsten Systemkosten und den geringen Auswirkungen auf das Gesamtfahrzeug.

Ein wissenschaftlicher Mehrwert dieser Arbeit besteht darin, dass konkurrierende Abwärmenutzungssysteme mit Hilfe einer TCO-Analyse auf der Grundlage der resultierenden Amortisationszeit verglichen werden können. Für TEG-Systeme konnten erstmalig wissenschaftlich fundiert Kennzahlen ermittelt werden. Der Vergleich im Diesel-NFZ zu weiteren Abwärmenutzungsverfahren zeigt, dass TEG-Systeme auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit die kürzeste Amortisationszeit aufweisen.

## 8.6. Bewertung des methodischen Vorgehens

Das übergeordnete Vorgehensmodell in Anlehnung an den V-Modell-Ansatz hat (s. Abschnitt 3.2), unter Einbeziehung der weiteren eigens entwickelten Methoden und Werkzeuge (s. Abschnitt 5.4), die erfolgreiche Erforschung des beschriebenen Forschungsbedarfs ermöglicht. Die erzielten Ergebnisse haben den Stand der Technik signifikant verbessert (s. Abschnitt 8.5.1). Der Ansatz hat einen ganzheitlichen Entwicklungsprozess in einer bislang unbekanntem Entwicklungsbreite bei gleichzeitig großer Entwicklungstiefe ermöglicht. Die methodische Vorgehensweise kam erfolgreich anhand von zwei ausgewählten Szenarien des Diesel- und Erdgas-NFZ zur Anwendung und konnte verifiziert werden. Die methodische Herangehensweise stellt einen wesentlichen Mehrwert dieser Arbeit dar. Die im Modell vorgesehenen Iterationen zu vorhergehenden Arbeitsschritten haben die Optimierung der Ergebnisse ermöglicht. Am Beispiel der Sensitivitätsanalyse aus Abschnitt 8.4 werden zudem der Umfang und der Grad der berücksichtigten Komplexität als weitere Vorteile der ausgewählten methodischen Vorgehensweise deutlich. Zukünftige Nutzer können bereits zu Beginn der Entwicklung auf die wissenschaftlichen Erkenntnisse dieser Arbeit zurückgreifen. Die zielgerichtete Auslegung von TEG-Systemen vermeidet Iterationsschleifen und ermöglicht kürzere Entwicklungszeiten sowie Kostenreduktionen.

Die Vorgehensweise kann im Vergleich zu sukzessiven Entwicklungsprozessen, wie beispielsweise von [32] realisiert, als effizient bezeichnet werden und Restriktionen hinsichtlich der TEG-Bauweise oder der Komponenten mussten nicht frühzeitig im Entwicklungsprozess ohne Evaluation vorgenommen werden (vgl. z. B. [34, 72]).

# Kapitel 9.

## Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine detaillierte Untersuchung von thermoelektrischen Generatorsystemen in schweren Nutzfahrzeugen durchgeführt. Die Konzeptionierung, simulative Optimierung und experimentelle Validierung standen im Vordergrund.

### 9.1. Zusammenfassung und Fazit

In dieser Forschungsarbeit wurde erstmalig der Nachweis erbracht, dass TEG-Systeme die Effizienz im Sinne von Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit von SNFZ steigern können. Bei günstiger Systemauslegung und ausgewählten Einsatzprofilen wird die ökonomische Gewinn- und damit Nutzenschwelle in einer Amortisationszeit von weniger als zwei Jahren überschritten. Die Kosten-Nutzen-Relation konnte für diese Systeme im Vergleich zum Stand der Technik derart verbessert werden, dass zudem die Amortisationszeit geringer ausfällt als bei Konkurrenztechnologien, wie z. B. Rankine-Prozess und Turbo-Compound. Damit einhergehend werden der Kraftstoffverbrauch und insbesondere die CO<sub>2</sub>-Emissionen der NFZ signifikant reduziert. Die Forschungsfragestellung konnte somit positiv beantwortet werden (s. Abschnitt 3.2). Die ursprünglich herausfordernd formulierten Hauptziele dieser Arbeit bezüglich Kraftstoff-, CO<sub>2</sub>- und Kostenreduktion sowie zur Amortisationszeit (s. Tabelle 1.1) konnten übertroffen werden.

Eine Übersicht der erzielten **Ergebnisse** der ganzheitlichen und multikriteriellen TEG-Optimierung ist für die betrachteten Anwendungsszenarien und den Variantenanalysen aus Abschnitt 8.2.1 und 8.2.2 in Tabelle 9.1 dargestellt. Bemerkenswert ist die große Spannweite der Ergebnisse zur Kraftstoff- und Emissionsreduktion. Dies ist auf die Abhängigkeit vom gewählten Einsatzszenario des Fahrzeugs zurückzuführen (s. bspw.

Tabelle 9.1.: Übergeordnete Ergebnisse des TEG-Entwicklungsprozesses dieser Arbeit

Anwendungs-szenario	Kraftstoff-reduktion* [%]	Emissions-reduktion** [g/km]	Minimale Kosten-Nutzen-Relation			Minimale Amortisationszeit [Jahr]
			[EUR/(g km)]	[EUR/%]	[EUR/W]	
Diesel-NFZ	0,5–1,5	3,8–14,5	85	805	0,34	1,4
Erdgas-NFZ	1,8–2,8	12,7–34,9	32	344	0,25	0,7

\* Ohne Berücksichtigung des Kaltstarts; Einfluss des Kaltstarts s. Abschnitt D.7.6.3.

\*\* Annahmen: Nutzlast von 10–25 t; CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion im Diesel-NFZ von 0,1–1,2 g/tkm und im Erdgas-NFZ von 0,5–2,6 g/tkm.



Tabelle D.5 im Anhang). Insbesondere aufgrund der höheren Abgastemperaturen und -enthalpien im Erdgas-NFZ wurden noch bessere Ergebnisse als im Diesel-Pendant erzielt. Im **Diesel-NFZ** konnte eine Kraftstoffreduktion für dynamische Fahrprofile von bis zu 1,5 % nachgewiesen werden. Abhängig vom Gesamtverbrauch entspricht das bis zu 0,4 kg/100 km und einer CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion von bis zu 14,5 g/km. Die minimale Amortisationszeit beträgt 1,4 Jahre. Bis auf wenige Ausnahmen, bei denen z. B. die Abgasenthalpien in den Fahrprofilen zu niedrig sind, wurden Systemlösungen mit einer Amortisation von weniger als 3 Jahren ermittelt (s. Tabelle D.5 im Anhang). Die minimalen spezifischen Systemkosten betragen 0,34 EUR/W. Als Nebenzielgrößen ergeben sich eine günstigste Kosten-Nutzen-Relation von 85 EUR/(g km) und eine maximale Leistungsdichte von 159 W/kg bzw. von 248 W/dm<sup>3</sup>.

Im **Erdgas-NFZ** wurden Kraftstoffreduktionen für dynamische Fahrprofile von bis zu 2,8 % nachgewiesen, was bis zu 1 kg/100 km Kraftstoff entspricht. Die äquivalente CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion liegt bei bis zu 34,9 g/km. Die minimale Amortisationszeit beträgt 0,7 Jahre. Die Amortisationszeit liegt in allen betrachteten Fahrprofilen bei weniger als 3 Jahren. Die TEG-Auslegung hat spezifische Systemkosten von 0,25 EUR/W ergeben. Die günstigste Kosten-Nutzen-Relation liegt bei 32 EUR/(g km) und die Leistungsdichte bei bis zu 298 W/kg bzw. bei bis zu 568 W/dm<sup>3</sup>.

### **Bewertung der Ergebnisse**

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse beruhen zumeist auf konservativen Annahmen. Beispielsweise wurden für die elektrischen Generatoren der Fahrzeuge im Vergleich zum Stand der Technik höhere Wirkungsgrade angenommen (s. Abschnitt 5.1.2.4), was den Nutzen der TEG-Systeme verringert. Kostensenkungen für eine kleinere Dimensionierung oder den Ersatz des Generators durch das TEG-System wurden nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurde weiteres Potential der Technologie durch die Verkürzung der Warmlaufphase nicht in die Ergebnisse einbezogen (s. Abschnitt D.7.6.3).

Gegenüber dem bisherigen Stand der Technik nach Bernath [34] oder Hervas-Blasco et al. [130] wurde eine signifikante Steigerung der Kraftstoffreduktion um 375 % bei Diesel-NFZ und 930 % bei Erdgas-NFZ erreicht. Erstmals wurde der ökonomische Einsatz von TEG-Systemen im Nutzfahrzeugbereich untersucht. Die bislang existierende Forschungslücke wurde mit großen Unsicherheiten bei den Schätzungen der Komponenten- und Peripheriekosten begründet (vgl. z. B. [34]). Die Amortisation in einem Zeitraum von weniger als zwei Jahren für Diesel-NFZ und weniger als einem Jahr für Erdgas-NFZ zeigt, dass das System für den Erstkunden bereits betriebswirtschaftlich rentabel ist. Die günstigsten spezifischen Stückkosten dieser Arbeit, basierend auf detaillierten Kostenberechnungen eines ausgelegten TEG-Systems, liegen bei 0,25 EUR/W und damit um 8 % unterhalb der konservativsten Serienkostenprognose der zulässigen Systemkosten des Standes der Technik von Aixala [119]. Die Kostenschätzung beim Stand der Technik von Risseh et al. [103] ergab beispielsweise 150 EUR/W.

Die neuartige methodische Vorgehensweise hat im hohen Maße zur Erzielung dieser Ergebnisse beigetragen (s. Abschnitt 3.2). Die TEG-Auslegungen weisen in dynamischen Fahrprofilen im Vergleich zum Stand der Technik hohe elektrische Bruttoleistungen von bis zu 1891 W für das Diesel-NFZ und 3150 W für das Erdgas-NFZ auf (s. Tabelle D.5 im Anhang). Die effizienzgetriebene TEG-Auslegung hat zur Wirkungsgradsteigerung der Systeme beigetragen. Der effektive Wirkungsgrad (s. Gleichung 5.34) wurde beispielsweise im Diesel-NFZ um 154 % auf 3,2 % im Vergleich zur Arbeit von Zhang et al. [22] gesteigert. Im Erdgas-NFZ sind es bis zu 5 %. Die umfassende Untersuchung des Potentials rippenbasierter und neuartiger WÜ-Strukturen sowie der anwendungsspezifische Einsatz optimierter Modulauslegungen hat dazu beigetragen. Beispielhaft wurden NT-Module mit einer spezifischen Leistungsdichte von bis zu  $1,1 \text{ W/cm}^2$  und HT-Module mit bis zu  $3 \text{ W/cm}^2$  ausgelegt. Dieses stellt eine Steigerung des Standes der Technik von Risseh et al. [103] und von der Firma Furukawa [111] um 173 % und um 250 % dar. Segmentierte HT-Module haben einen höheren Wirkungsgrad von bis zu 4,2 Prozentpunkten gegenüber unsegmentierten Modulen gezeigt (s. Tabelle 7.3).

Der Vergleich mit weiteren Abwärmenutzungssystemen des Rankine-Prozesses und des Turbo-Compounds zeigt erstmals, dass die Thermoelektrik die günstigste Kosten-Nutzen-Relation und die geringste Amortisationszeit für SNFZ bietet (s. Tabelle D.7.5 im Anhang). Dies setzt die in dieser Arbeit erzielten Verbesserungen im Vergleich zum Stand der Technik voraus.

Ein herausragendes Ergebnis stellt die Hardwarerealisierung des TEG-Gesamtsystemaufbaus mit Zielsetzung der Minimierung der TCO des Erdgas-NFZ dar. Experimentell wurde eine maximale elektrische Leistung von 2697 W gemessen. Dies entspricht einer Verbesserung des Standes der Technik von Bass et al. [59] von 253 %. Die Leistungsdichte wurde um 237 % auf  $174 \text{ W/kg}$  und um 547 % auf  $327 \text{ W/dm}^3$  im Vergleich zu Bass et al. gesteigert.

### **Wissenschaftlicher Mehrwert**

Dieses Forschungsvorhaben beinhaltet mehrere neuartige Vorgehensweisen und Methoden. Ein wissenschaftlicher Mehrwert wurde auf allen betrachteten Systemhierarchieebenen vom Gesamtfahrzeug bis hin zu den Komponenten erzielt.

Erstmalig wurde ein neuartiger Ansatz erforscht, der die Gesamtbetriebskosten berücksichtigt und die Amortisation des Systems ermöglicht. Dieser Ansatz mündete in eine neuartige Entwicklungsmethode, welche für konventionelle Diesel-NFZ und innovative Erdgas-NFZ zur Anwendung kam. Diese Methode erlaubte zudem erstmals den Vergleich des Potentials der thermoelektrischen Abwärmenutzung für verschiedene NFZ-Antriebsstränge. Die Modelle der Fahrzeugwechselwirkungen wurden wissenschaftlich fundiert abgebildet und im Kontext des unbefriedigenden Standes der Technik kritisch diskutiert. Hervorzuheben ist bei der Entwicklungsmethode, dass die Bewertung für dynamische und kontinuierliche Realfahrbedingungen erstmals möglich wurde.

Die Restriktion der begrenzten Kühlsystemkapazität wurde in einem bislang nicht vergleichbar komplexen Umfang berücksichtigt. Bei TEG-Systemen wurden bislang nicht erreichte Gesamtwirkungsgrade und elektrische Spitzenleistungen auch experimentell, anhand von Funktionsmustern nachgewiesen. Erreicht wurde dies durch eine thermische Anpassung, bei der die Wärmeübertrager und Module gleichzeitig auf maximale Effizienz bei niedrigsten Kosten optimiert wurden. Neuartige Erkenntnisse wurden durch die Erforschung von bis zum Beginn der Arbeit unbekanntem Wärmeübertragerstrukturen erlangt, wie z. B. offenzellige Metallschäume und topologieoptimierte Strukturen mit Hilfe des *Additiv-Manufacturing*. Für die detaillierte thermoelektrische Modulauslegung wurde eine neuartige gekoppelte Auslegungsmethode, basierend auf einer multiphysikalischen FEM und thermodynamischen CFD-Simulation erstellt und validiert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass TEG-Systeme nach technischer und wirtschaftlicher Bewertung vorteilhaft in NFZ eingesetzt werden können. Die vorliegende Arbeit stellt eine methodische Vorgehensweise in Anlehnung an den V-Modell-Ansatz zur effizienten Auslegung von diesen Systemen und die notwendigen Simulationsumgebungen, Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. Die methodische Herangehensweise hat die signifikanten Verbesserungen gegenüber dem Stand der Technik ermöglicht und stellt somit einen wesentlichen Mehrwert dieser Arbeit dar (s. Abschnitt 8.6).

Als Fazit lässt sich resümieren, dass die Ergebnisse der ganzheitlichen TEG-Systemoptimierung einen wichtigen Beitrag leisten, um die Thermoelektrik technologisch und wirtschaftlich der Einsatzreife näher zu bringen. Die Arbeit ermöglicht ein tieferes Gesamtverständnis der Rekuperation thermischer Energie im Bereich der NFZ-Technik.

## 9.2. Ausblick

Bei schweren NFZ dominiert der Dieselmotor mit einem Anteil von 97% am Fahrzeugbestand (vgl. [142]). Die Kraftstoffreduktion des TEG-Systems dieser Arbeit liegt bei bis zu 1,5% für Diesel-NFZ. Bei einer typischen Fahrleistung von 150 Tkm und einem Verbrauch nach [24] von 35l/100 km würde dies eine Einsparung von rund 800l Kraftstoff, 40l Harnstoff und damit 2100 kg CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr bedeuten. Bei einer Nachrüstung der EU-Nutzfahrzeugflotte, d. h. 6,2 Millionen mittelschwere und schwere NFZ (vgl. [142]), könnten demnach 5 Milliarden Liter Kraftstoff, 250 Millionen Liter Harnstoff und 13 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr eingespart werden. Aufgrund des hohen Energiebedarfs und der hohen Jahreslaufleistungen von NFZ haben Effizienztechnologien einen großen positiven Einfluss.

Der TEG-Entwicklungsprozess dieser Arbeit hat attraktive Lösungen hervorgebracht, die einen Beitrag zur Emissionsreduktion unter wirtschaftlichen Kriterien leisten. Darüber hinaus können TEG-Systeme dazu beitragen zukünftige Strafzahlungen für die Überschreitung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten in der EU zu vermeiden (s. Abschnitt 1.1). Ausgehend von den spezifischen Emissionsminderungen dieser Arbeit aus Tabelle 9.1 könnten durch den Einsatz des TEG-Systems ab dem Jahr 2025 Strafzahlungen in Höhe

von bis zu 6200 EUR pro Fahrzeug für das Diesel-NFZ und bis zu 14.800 EUR pro Fahrzeug für das Erdgas-NFZ vermieden werden.<sup>110</sup>

### Weiterer Forschungsbedarf

Anhand der Analyse des Standes der Technik wurde der Schwerpunkt dieser Arbeit auf die ganzheitliche Systemauslegung gelegt, um Aussagen über die Potentiale von TEG-Systemen zur Steigerung der Effizienz heutiger SNFZ zu treffen. Im Allgemeinen werden weitere Arbeiten empfohlen, um die Kosten-Nutzen-Relation weiter zu optimieren. Verbesserungen zum Beispiel im Bereich der thermoelektrischen Module und weitere Optimierungen zwischen dem Abwärmenutzungssystem und dem Gesamtfahrzeug versprechen in Zukunft noch höhere Einsparungspotentiale. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben beispielsweise gezeigt, dass der elektrische Generator des Diesel-NFZ deutlich kleiner dimensioniert und der des Erdgas-NFZ für den Fahrbetrieb vollständig ersetzt werden könnte (s. Abschnitt 8.3.5). In dieser Arbeit war es ein Ziel, die Fahrzeugarchitektur nicht zu verändern (s. Abschnitt 3.2). Als weiterer Forschungsbedarf sollte eine optimierte Auslegungs- und Regelungsstrategie zwischen dem elektrischem Generator und dem TEG-System durchgeführt und ganzheitlich bewertet werden. Dies sollte weitere Effizienzvorteile bieten.

Um die Technologiereife zu erhöhen wird eine Fahrzeugintegration empfohlen, um das nachgewiesene große Potential der Technologie im Gesamtfahrzeug zu validieren. Die ermittelten Kraftstoffreduktionen liegen im Bereich von weniger als 3% (s. Tabelle 9.1), was jedoch im Bereich des zu erwartenden Messfehlers im Fahrzeugversuch liegt.<sup>111</sup> Die experimentelle Validierung erscheint daher, neben der Integration als solche, als komplex (vgl. [103]). Weitere experimentelle Untersuchungen zur Langzeitstabilität und zum Langzeitbetrieb mit statistisch abgesicherter Vorgehensweise für die relevanten Komponenten, d. h. insbesondere Wärmeübertrager und Module, sowie für TEG-Systeme sind für eine potentielle Serienentwicklung unumgänglich. Die TEG-Auslegungen sind in dieser Arbeit im Schwerpunkt mit Zielsetzung minimaler Gesamtbetriebskosten und minimalem Kraftstoffverbrauch erfolgt. Weitere könnten der Langzeitbetrieb und die Zuverlässigkeit sowie die Nachhaltigkeit und das Recycling im fortgeschrittenen Produktlebenszyklus sein. Für NFZ-Hersteller ist die Untersuchung des TEG-Systems und seines Einflusses auf zukünftige Abgasnormen und die zulassungsrelevanten Prüfzyklen, insbesondere beim Kaltstart, empfehlenswert und bislang unbekannt. In dieser Arbeit wurde das Fahrzeugsegment LKW im Fernverkehr untersucht, das hinsichtlich der Abwärmenutzung und der techno-ökonomischen Analyse Vorteile bietet. Untersuchungen bezüglich weiterer NFZ-Fahrzeugklassen oder Anwendungen mit Synergieeffekten sind zu befürworten.

<sup>110</sup>Ab dem Jahr 2030 und infolge der Erhöhung der Strafzahlungen würde sich dies nochmals auf bis zu 9900 EUR für das Diesel-NFZ und bis zu 23.700 EUR pro Fahrzeug für das Erdgas-NFZ erhöhen.

<sup>111</sup>Beispielsweise wird im VECTO-Projekt [12] eine Abweichung der simulierten zu den experimentellen Verbrauchswerten von bis zu 3% angegeben.

### Thermoelektrik bei zukünftigen NFZ-Antriebssträngen

Die Nutzfahrzeugbranche steht vor großen technischen, ökonomischen und ökologischen Herausforderungen, um die angestrebte Klimaneutralität des Straßengüterverkehrs in der EU im Jahr 2050 zu erreichen (vgl. [3, 260]). Insbesondere die Entwicklung zukünftiger Antriebsstränge wird einen Wandel erfahren der die Möglichkeiten und Qualität der Abwärmenutzung stark beeinflussen wird.

In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass sich das Potential von TEG-Systemen bei einer teilweisen Elektrifizierung des Antriebsstrangs als noch attraktiver erweist (s. Abschnitt D.7.6.7). Es ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf des elektrischen Bordnetzes zum Beispiel durch die Elektrifizierung von Nebenaggregaten oder das automatisierte Fahren steigen wird (vgl. [45]). Für konventionelle NFZ stellt die Umrüstung von einem 24-Volt-Bordnetz auf ein 48-Volt-Bordnetz eine vergleichsweise einfache technische Lösung dar. Die elektrische Generatorleistung würde auf bis zu 20 kW erhöht werden, was jedoch für SNFZ in der Zukunft als nicht ausreichend erachtet wird (vgl. [39]). Ein (Teil-)Hochspannungsbordnetz mit einer Nennspannung von 400 Volt oder bis zu 800 Volt wird derzeit als ausreichend für zukünftige Fahrzeuge angesehen.

Die Technologiepfade zur Erreichung des EU-Klimaschutzziels sind noch nicht definiert und Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten (vgl. z. B. [142]). Szenarioanalysen sind Bestandteil der aktuellen Forschung und zeigen mögliche Entwicklungspfade auf, aus denen sich Handlungsempfehlungen für die Technologieentwicklung ableiten lassen (vgl. bspw. [9, 45, 261–263]). Demnach werden Dieselmotoren ihre dominierende Stellung schrittweise zugunsten alternativer Antriebe mit vergleichsweise höherem Wirkungsgrad und geringeren Emissionen verlieren. Der Zeithorizont bis zum Jahr 2050 erscheint jedoch als kurz und ambitioniert. Im Jahr 2020 lag in der EU der Anteil der alternativen Antriebsstränge bei den Neuzulassungen nach [142] bei unter 3,5 %<sup>112</sup> und eine typische Entwicklungszeit einer neuen LKW-Generation betrug bislang durchschnittlich acht Jahre. Eine Problemstellung bei der Serienentwicklung von alternativen Antriebstechnologien wird wie folgt beschrieben:

„Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs von Nutzfahrzeugen stehen vor einem Dilemma: Fahrzeugsegmente, in denen neue energiesparende Antriebstechniken eingeführt werden könnten, absolvieren nur geringe Fahrleistungen bei geringen Durchschnittskraftstoffverbräuchen. Im Straßengüterfernverkehr mit hohen und wachsenden Fahrzeugfahrleistungen erfüllen indes alternative Antriebe die Anwenderanforderungen auf absehbare Zeit [noch] nicht.“ [9, S. 5]

Wie sich der Wandel bei den Neuzulassungen und in der Fahrzeugflotte niederschlagen wird, bleibt abzuwarten (vgl. [264]) und hängt von einer Reihe von Faktoren ab, wie z. B. der Kundenakzeptanz oder der Preisentwicklung fossiler Kraftstoffe.

Technologiepfade für SNFZ zum Erreichen der Klimaneutralität sind neben alternativen

<sup>112</sup>Von den insgesamt rund 226.000 Neuzulassungen in der EU stellen 2,9 % alternative Kraftstoffe (z. B. Erdgas und Ethanol), 0,4 % elektrisch geladene und 0,1 % Hybride-NFZ dar.

Kraftstoffen<sup>113</sup> die Brennstoffzellentechnologie, die Wasserstoffverbrennung und der batterieelektrische Antriebsstrang (vgl. bspw. [260, 265, 266]). Die Technologien sind jedoch aufgrund der hohen Fahrzeugkosten, der unsicheren Reichweite, der ungewissen Zuverlässigkeit, der hohen Instandhaltungskosten und des ungewissen Wiederverkaufswerts (noch) nicht wirtschaftlich realisierbar.

Die Brennstoffzellentechnologie bietet eine ausreichende Energiedichte, um den hohen Energiebedarf von SNFZ zu decken. Die Herstellung, Speicherung und Distribution des benötigten Wasserstoffs gilt jedoch als ähnlich komplexe Problemstellung, wie der Aufbau einer elektrischen Ladeinfrastruktur (vgl. [265]). Die Fahrzeuge gelten bislang als noch kostenintensiver und unwirtschaftlicher als batterieelektrische LKW und die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird aufgrund des geringen Gesamtwirkungsgrads als nachteiliger prognostiziert (vgl. z. B. [267]). Bei der aktuellen Entwicklungsgeneration werden ausschließlich NT-Brennstoffzellen (BZ) mit Polymermembran als Elektrolyt eingesetzt. HT-BZ beispielsweise in Form der Festoxidbrennstoffzelle sind Bestandteil aktueller Forschung aber noch nicht ausgereift für die Fahrzeugintegration.

Der Wasserstoffverbrennungsmotor (H<sub>2</sub>-VKM) wurde von der EU als sogenannte „Zero Emission“-Technologie deklariert (vgl. [268]). In Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit stellt dieser nach dem Stand der Technik eine vorteilhafte Alternative zur Brennstoffzellentechnologie dar (vgl. [264]). Herausforderungen bestehen beim Umgang mit der Komplexität des Systems und bei der Steigerung des Gesamtsystemwirkungsgrads. Der batterieelektrische LKW für den Fernverkehr ist technologisch noch nicht ausgereift (vgl. [9]). Für den hohen Energiebedarf von SNFZ sind die Energiedichten der aktuellen Batterietechnologie zu gering. Entsprechend skaliert sind sie zu voluminös, schwer und kostenintensiv (vgl. [269]). Zukünftige Entwicklungen werden nach [265] zu erheblichen Fortschritten beitragen. Demnach könnte das Batteriegewicht im Jahr 2030 für einen batterieelektrischen LKW mit 40 t GG für den Fernverkehr 5 t betragen. Die Batteriekosten könnten sich bei spezifischen Kosten von 45 EUR/kWh auf rund 64 TEUR belaufen. Dies entspricht einer Reduzierung des Batteriegewichts um 65 % und der Kosten um 85 % gegenüber dem Vergleichsjahr 2011. Vorerst erscheint die Einführung dieser Technologie nach [43] im Verteilerverkehr oder bei Abfallsammelfahrzeugen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen vielversprechender. Eine Lösung für die bislang geringen Reichweiten bieten sogenannte Oberleitungs-LKW, die während der Fahrt geladen werden können. Ergebnisse mit Hybrid-LKW zeigten nach [270] Einsparungen von rund 10 % gegenüber einem konventionellen Diesel-NFZ, bei deutlich höheren Fahrzeug- und Infrastrukturkosten. Die Erwartungen lagen bei bis zu 50 % (vgl. [271]). Die Investitionskosten für ein Oberleitungsnetz in Deutschland werden laut [272] auf mindestens 10 Milliarden Euro geschätzt, zuzüglich jährlicher Betriebskosten von zwei Prozent der Investitionskosten.

<sup>113</sup>Die Ergebnisse des Diesel-NFZ dieser Arbeit können verwendet werden, um das TEG-Potenzial für biogene oder synthetische Kraftstoffe mit geringen Abweichungen abzuschätzen.

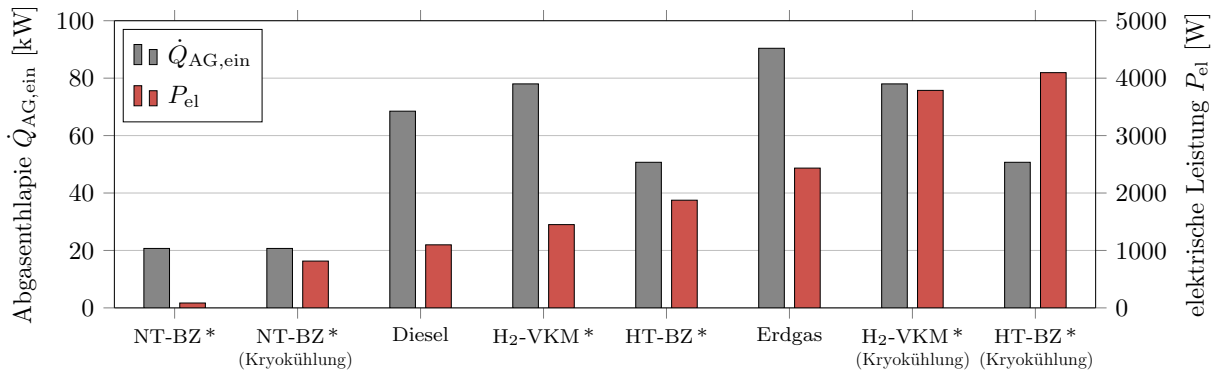


Abbildung 9.1.: Potentialanalyse für TEG-Systeme in verschiedenen NFZ-Antriebssträngen mit Ergebnisdesign für minimalen Kraftstoffverbrauch (\*: Abschätzung; Rdb. u. a.:  $\vartheta_{KM,ein} = 60^\circ\text{C}$  (Ausnahme Kryokühlung); eigene Berechnung mit Angaben aus [273–280])


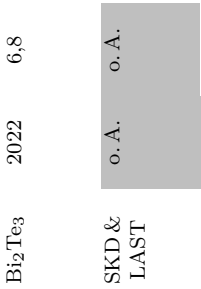
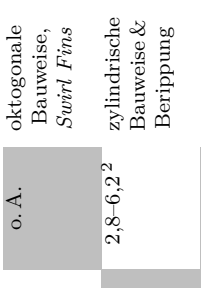
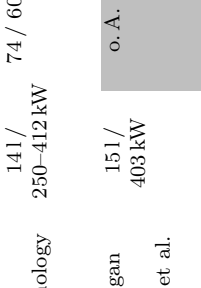

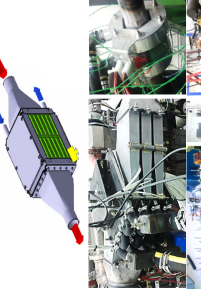
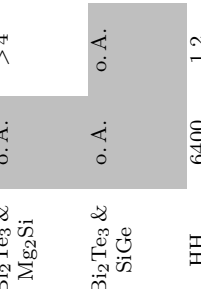
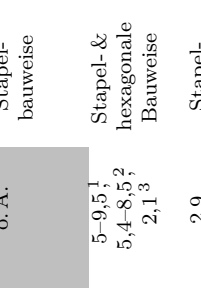
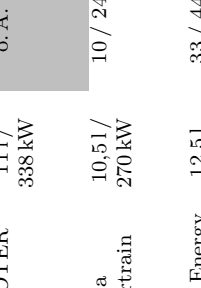
Im Rahmen der Arbeit wurde eine Potentialanalyse für TEG-Systeme in potentiellen Antriebssträngen von SNFZ der Zukunft erstellt. Die Ergebnisse sind anhand der verfügbaren Abgasenthalpie  $\dot{Q}_{AG,ein}$  und der umgewandelten elektrischen Leistung  $P_{el}$  bei einer Konstantfahrt mit 80 km/h in Abbildung 9.1 dargestellt. Die NT-BZ, H<sub>2</sub>-VKM und HT-BZ sind als potentielle Antriebsstränge aufgeführt. Die Ergebnisse des Diesel-NFZ und des Erdgas-NFZ dieser Arbeit sind ebenfalls zum Vergleich dargestellt. Rein elektrische Antriebsstränge wurden nicht berücksichtigt, da keine gerichtete Ableitung der Abwärme zur Nutzung mittels TEG zur Verfügung steht und das maximale Temperaturniveau von Elektromotoren bei rund  $120^\circ\text{C}$  liegt. Die elektrische Leistung des TEG beträgt bei der NT-BZ rund 100 W bei einem Temperaturniveau der Abwärme von rund  $80^\circ\text{C}$ . Das Potential der H<sub>2</sub>-VKM und der HT-BZ liegt mit einer Leistung von 1400 W und 1900 W zwischen dem Diesel- und Erdgasantrieb. Unter anderem wird ein Verbrennungsluftverhältnis nach [274, 280] von über zwei angenommen, um zukünftige Emissionsnormen zu erfüllen. Sofern eine Kryokühlung verwendet wird (s. Abschnitt 6.1.2), steigen die Potentiale der zukünftigen Antriebsstränge deutlich an. Für die HT-BZ mit Kryokühlung wird das Potential höher eingeschätzt als für den Erdgasantrieb. Die Kryokühlung hat den Vorteil, dass die Kaltseite deutlich niedrigere Temperaturen erreicht als bei der Verwendung eines herkömmlichen Kühlmittels. Dies ermöglicht höhere Wirkungsgrade des TEG-Systems (s. Gleichung 2.11). Die notwendige Kraftstoffwärmerung nach der Speicherung im Fahrzeugtank könnte zumindest teilweise durch den TEG erfolgen.

Perspektivisch kann diese Arbeit als Referenz dienen und Synergieeffekte beim Einsatz der Thermoelektrik in weiteren Anwendungsgebieten erzielen. Dazu zählen beispielsweise die Energiewirtschaft, die industrielle Abwärmenutzung, die Bahnindustrie oder die Schifffahrt. Die Thermoelektrik hat ein großes noch nicht ausgeschöpftes Anwendungspotential und kann mit Hilfe einer kosten- und nutzenoptimierten Systemauslegung zu Effizienzsteigerungen und Emissionsminderungen beitragen. In dieser Arbeit wurde dies im Anwendungsbereich von schweren Nutzfahrzeugen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgreich aufgezeigt.

# Anhang

## A. Stand der Technik von TEG-Systemen im SNFZ

Tabelle A.1.: Stand der Technik für TEG-Systeme im Anwendungsgebiet schwerer NFZ (Erweiterung)

System- bezeichnung	Referenz ( $V_H / P_N$ )	Leistungs- dichte $\psi / \phi$ [W/kg/ W/dm <sup>3</sup> ]	Wirkungs- grad $\eta_{TEG,max}$ [%Sim.]	Layout- Topologie	TE- Material	TEM- Fläche $A_{TEM}$ [cm <sup>2</sup> ]	TEM- Gewicht $m_{TEM}$ [kg]	Beispielabbildung
Hi-Z Technology	141/ 250–412 kW	74 / 60	o. A.	oktagonale Bauweise, <i>Swirl Fins</i>	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	2022	6,8	
Michigan State Univ. et al.	151/ 403 kW	o. A.	2,8–6,2 <sup>2</sup>	zylindrische Bauweise & Berippung	SKD & LAST	o. A.	o. A.	
RENOTER	111/ 338 kW	o. A.	o. A.	Stapel- bauweise	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> & Mg <sub>2</sub> Si	o. A.	> 4	
Magna Powertrain Eng.	10,51/ 270 kW	10 / 24	5–9,5 <sup>1</sup> , 5,4–8,5 <sup>2</sup> , 2,1 <sup>3</sup>	Stapel- & hexagonale Bauweise	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> & SiGe	o. A.	o. A.	
GMZ Energy et al.	12,51	33 / 44	2,9, (2,1Exp.)	Stapel- bauweise	HH	6400	1,2	
Eberspächer	12,81	14 / 21	(1,6Exp. <sup>4</sup> )	Stapel- bauweise	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	3584	2,1	
Bernath / MAN	12,41	o. A.	o. A.	zylindrische Bauweise & Berippung	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> & SKD	o. A.	o. A.	
Scania et al.	12,71/ 440 kW	6 <sup>4</sup> / 15 <sup>4</sup>	1,9 <sup>4</sup> –5,4 <sup>2</sup>	Stapel- bauweise	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , TAGS	8384	6,5	
GASTone	8,71/ 243 kW	o. A.	o. A.	runde Kartuschen	SKD <sup>5</sup>	o. A.	o. A.	

<sup>1</sup> TEG im Abgaskrümmter (AGK) von Diesel-NFZ integriert.

<sup>2</sup> TEG in Abgasrückführung (AGR) von Diesel-NFZ integriert.

<sup>3</sup> TEG nach Turbolader (TL) vom Diesel-NFZ integriert.



<sup>4</sup> TEG am Ausgang der Abgasnachbehandlung (AGN) vom Diesel-NFZ bzw. <sup>5</sup> Erdgas-NFZ integriert.



## B. Referenzfahrzeuge und -strecken

### B.1. Technische Spezifikation der Referenzfahrzeuge

Tabelle B.1.: Übersicht der technischen Spezifikationen der ausgewählten Referenzfahrzeuge

Bezeichnung	Fz.	Einheit	Diesel-NFZ	Erdgas-NFZ
<b>Fahrzeug</b>				
EG-Fahrzeugklasse			N3	N3
Einsatzprofil			Fernverkehr	Fernverkehr
Referenzfahrzeug			Mercedes-Benz Actros 1845 MP4	Iveco Stralis NP460
Erscheinungsjahr			2011	2017
Beispielabbildung				
Fahrzeugtyp			Sattelzugmaschine	Sattelzugmaschine
Achskonfiguration			4x2	4x2
Motorbezeichnung			OM 471 LA	Cursor 13 NG
Kraftstoffart			Diesel	LNG & oder CNG
Zylinderzahl	$n_Z$	[-]	6 (Reihenmotor)	6 (Reihenmotor)
Hubvolumen	$V_H$	[dm <sup>3</sup> ]	12,8	12,9
Bohrung / Hub	$d / h$	[mm]	132 / 156	135 / 150
Verdichtungsverhältnis	$\varepsilon$	[-]	17:1	12:1
Nennleistung	$P_N$	[kW]	330 (bei 1600 min <sup>-1</sup> )	338 (bei 1900 min <sup>-1</sup> )
Nennmoment	$M_N$	[Nm]	2200 (bei 1100 min <sup>-1</sup> )	2000 (bei 1100 min <sup>-1</sup> )
Bordnetz-Nennspannung	$U_N$	[V]	24	24
Generator Nennstrom	$I_{G,N}$	[A]	100	90
Batteriekapazität	$C_{Bat}$	[kWh]	5,4	5,4
Max. Reichweite	$s_{max}$	[km]	1200	1600 / 1035 / 570
Abgasnorm			Euro VI A	Euro VI C
Abgasnachbehandlung			AGR, DOC, DPF, SCR	Drei-Wege-Katalysator
Leergewicht	$m_{LG}$	[t]	7,6	7,9
Zulässige Gesamtgewicht	$m_{zGG}$	[t]	18	18
<b>Anhänger</b>				
Anhängertyp			Planenaufleger	Planenaufleger
Referenzanhänger			Curtain-SAL	Curtain-SAL
Leergewicht	$m_{LG}$	[t]	6,6	6,6
<b>Lastzug</b>				
Lastzugtyp			Sattelzug	Sattelzug
Zul. Zuggesamtgewicht	$m_{zGG}$	[t]	40 (44 <sup>1</sup> )	40 (44 <sup>1</sup> )
(Abbildungs-)Quelle			[145]	[181]

<sup>1</sup> Kombiniertes Verkehr

Tabelle B.2.: Differenzverbrauchs-Konstanten und Kraftstoffkennwerte

Formelzeichen	Einheit	Dieselmotor (EURO VI)	Erdgasmotor (EURO VI)	Quelle
$\bar{v}_{\text{VKM}}$	[l/kWh]	0,2	0,25	[29]
$v_{\text{VKM1}} / v_{\text{VKM2}}$	[l/kWh]	0,18 / 0,22	0,21 / 0,28	eigene Angabe
$\bar{b}_{\text{e,diff}}^1$	[g/kWh]	171	203	[29]
$b_{\text{e,diff1}} / b_{\text{e,diff2}}$	[g/kWh]	154 / 188	175 / 230	eigene Angabe
$\bar{\eta}_{\text{diff}}^2$	[%]	50	37	[29]
$\eta_{\text{diff1}} / \eta_{\text{diff2}}$	[%]	55 / 45	42 / 32	eigene Angabe
$\rho$	[kg/dm <sup>3</sup> ]	0,84	0,83	[28]
$H_i$	[MJ/kg]	42,6	49 (LNG)	[28, 281]

<sup>1</sup> Der spezifische Differenzverbrauch  $b_{\text{e,diff}}$  lässt sich nach [29] mit Hilfe der Dichte  $\rho$  des Kraftstoffs ermitteln als:  $b_{\text{e,diff}}$  [g/kWh] =  $v_{\text{VKM}} \cdot \rho$ .

<sup>2</sup> Der Differenzwirkungsgrad  $\eta_{\text{diff}}$  lässt sich nach [29] mit Hilfe der Dichte  $\rho$  und dem Heizwert  $H_i$  des Kraftstoffs ermitteln als:  $\eta_{\text{diff}}$  [%] =  $\frac{1}{\rho \cdot v_{\text{VKM}} \cdot H_i}$ .

## B.2. Relevante Fahrzyklen und -strecken

### B.2.1. Referenzfahrzyklus: *World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)*

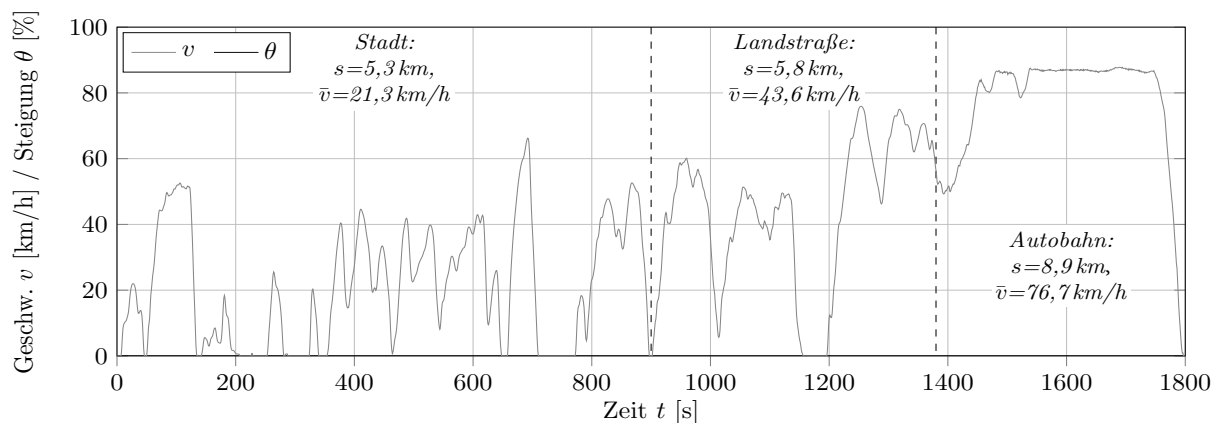


Abbildung B.1.: Detaillierte Darstellung des Referenzfahrzyklus WHVC

( $T = 1800$  s,  $\bar{v} = 40,1$  km/h,  $v_{\text{max}} = 87,7$  km/h,  $s \approx 20$  km,  $\theta(t) = 0$  %)

Tabelle B.3.: Relevante Eigenschaften des WHVC am Beispiel des Diesel-NFZ mit 40 t GG

Bezeichnung	Fz.	Einheit	Wert	Proz. Wert
Energie Luftwiderstand	$E_L$	[kWh]	6,5	14,1 %
Energie Rollwiderstand	$E_R$	[kWh]	16,1	35 %
Energie Steigungswiderstand	$E_S$	[kWh]	0	0 %
Energie Beschleunigungswiderstand	$E_B$	[kWh]	23,4	50,8 %
Summe Energie	$\sum E_i$	[kWh]	46	100 %
Kilometer-spezifische Energie an der Antriebswelle	$\sum E_i / s$	[kWh/km]	1,9	
Gesamtkraftstoffverbrauch	$B_s$	[l/100 km]	43,7	
Durchschnittliche Leistung	$\bar{P}_{\text{VKM}}$	[kW]	77	

### B.2.2. Referenzstrecke: Stuttgart–Hamburg–Stuttgart (SHHS)



Strecke (Bezeichnung)	Steigung [%]	Länge [km]	Streckenanteil [%]
Gesamt (SHHS)	-	1560	100
Hinfahrt (SHH)	-	777	49,8
	-9...-7	7	0,4
	-6...-4	23	1,5
	-3...-1	149	9,5
	0	414	26,5
	1...3	159	10,2
	4...6	19	1,3
	7...9	6	0,4
Rückfahrt (HHS)	-	783	50,2

Abbildung B.2.: Übersicht und Eigenschaften der Referenzstrecke SHHS (topografische Karte aus [282]);  
Abbildung aus [146]

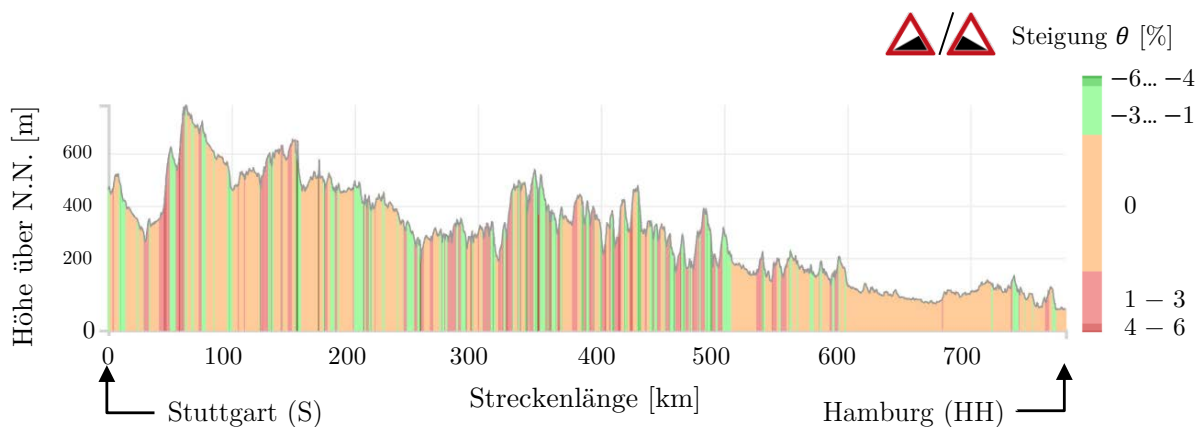


Abbildung B.3.: Streckentopographie der Referenzstrecke SHHS (topografische Daten aus [282]);  
Abbildung aus [146]

Tabelle B.4.: Relevante Eigenschaften der Strecke SHHS am Beispiel des Diesel-NFZ mit 40 t GG

Bezeichnung	Fz.	Einheit	Wert	Proz. Wert
Energie Luftwiderstand	$E_L$	[kWh]	815,7	25,2 %
Energie Rollwiderstand	$E_R$	[kWh]	826,5	25,6 %
Energie Steigungswiderstand	$E_S$	[kWh]	1121,1	34,7 %
Energie Beschleunigungswiderstand	$E_B$	[kWh]	470,6	14,6 %
Summe Energie	$\sum E_i$	[kWh]	3233,8	100 %
Kilometer-spezifische Energie an der Antriebswelle	$\sum E_i/s$	[kWh/km]	2,1	
Gesamtkraftstoffverbrauch	$B_s$	[l/100 km]	34,9	
Durchschnittliche Leistung	$\bar{P}_{VKM}$	[kW]	105	

### B.2.3. Randbedingungen aus Fahrzeuguntersuchungen



(a) Beladungs- (links) und Entladungsvorgang (rechts) mit Wasser des Diesel-NFZ (Actros 1845)

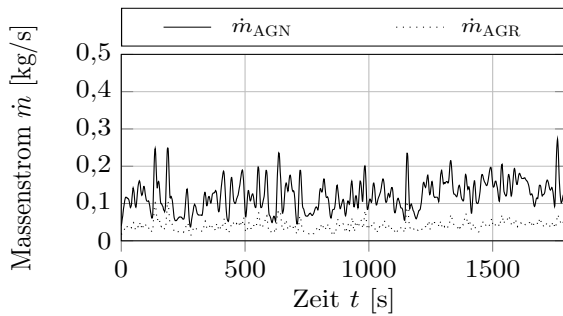


(b) Bauraumbegutachtung im Bereich des Abgasaustritts (IVECO Stralis NP460); Abbildung aus [150]

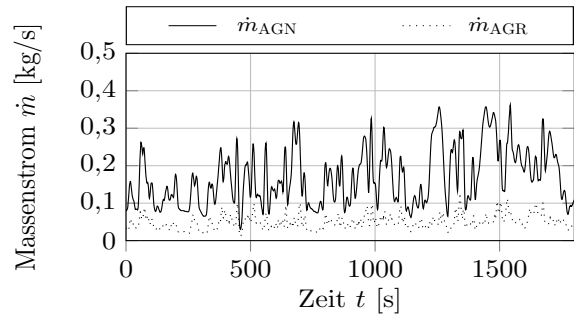
Abbildung B.4.: Ermittlung der Randbedingungen aus experimentellen Fahrzeuguntersuchungen

## B.3. Energetische Potentialanalyse

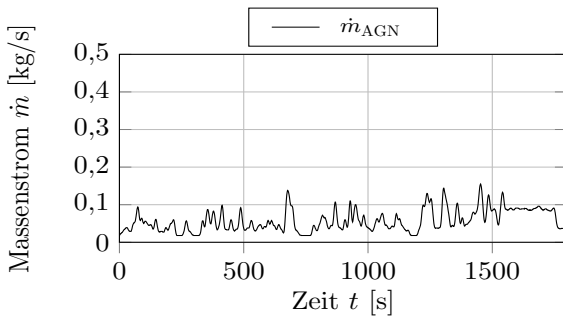
### B.3.1. Abgasmassenströme im WHVC



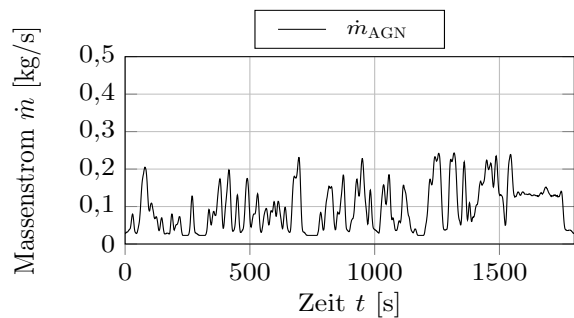
(a) Diesel-NFZ WHVC<sub>15t</sub>



(b) Diesel-NFZ WHVC<sub>40t</sub>



(c) Erdgas-NFZ WHVC<sub>15t</sub>



(d) Erdgas-NFZ WHVC<sub>40t</sub>

Abbildung B.5.: Ergebnisse der Potentialanalyse im WHVC: Abgasmassenströme

### B.3.2. Kühlmitteltemperaturen und -volumenströme im WHVC

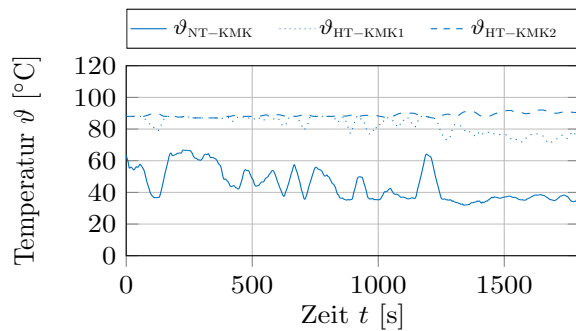
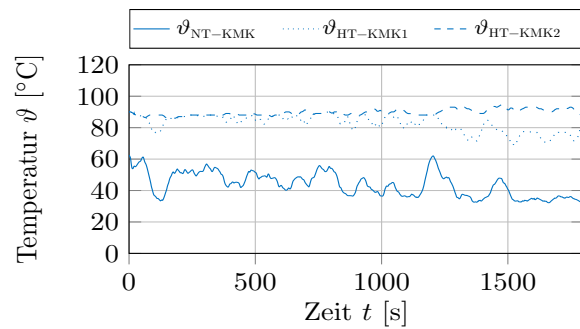
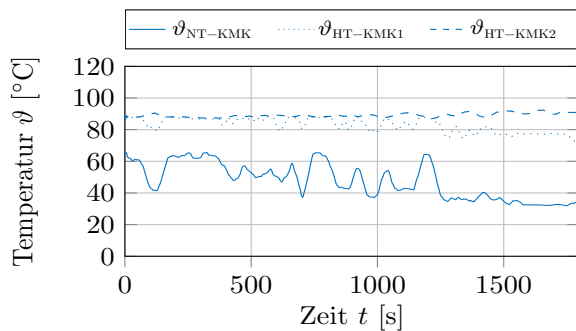
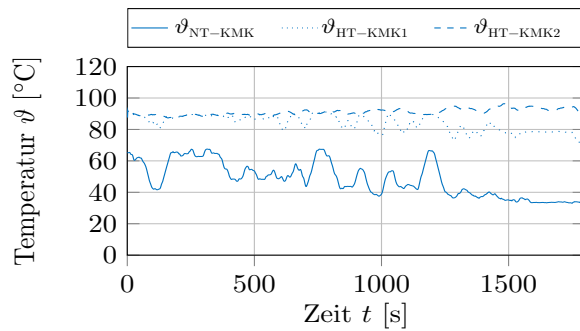
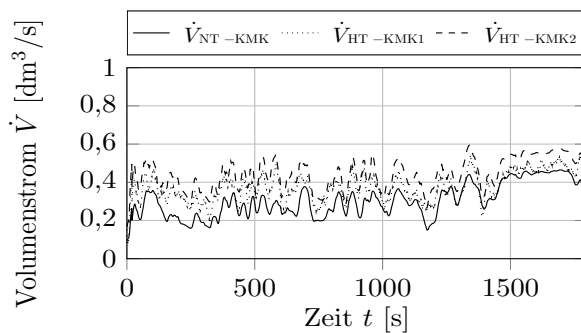
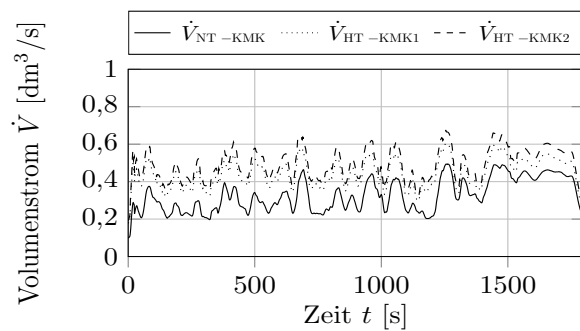
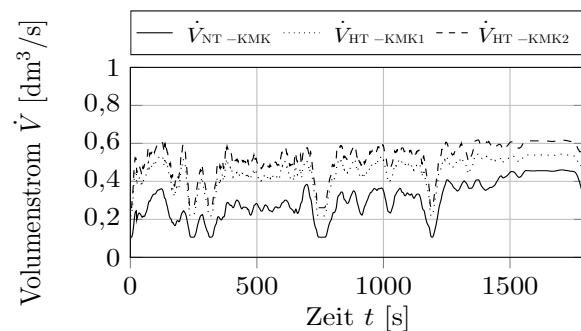
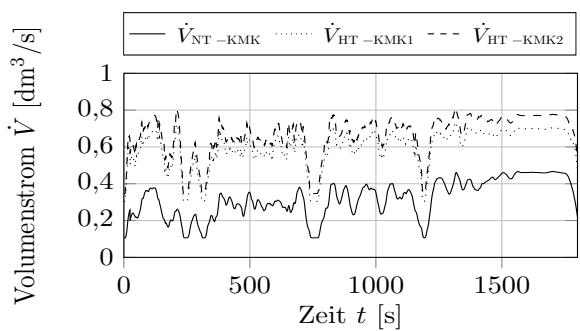
(a) Diesel-NFZ WHVC<sub>15t</sub>(b) Diesel-NFZ WHVC<sub>40t</sub>(c) Erdgas-NFZ WHVC<sub>15t</sub>(d) Erdgas-NFZ WHVC<sub>40t</sub>(e) Diesel-NFZ WHVC<sub>15t</sub>(f) Diesel-NFZ WHVC<sub>40t</sub>(g) Erdgas-NFZ WHVC<sub>15t</sub>(h) Erdgas-NFZ WHVC<sub>40t</sub>

Abbildung B.6.: Ergebnisse der Potentialanalys im WHVC: Kühlmitteltemperaturen und -volumenströme

### B.3.3. Abgaswärmeströme am Ausgang der Abgasnachbehandlung

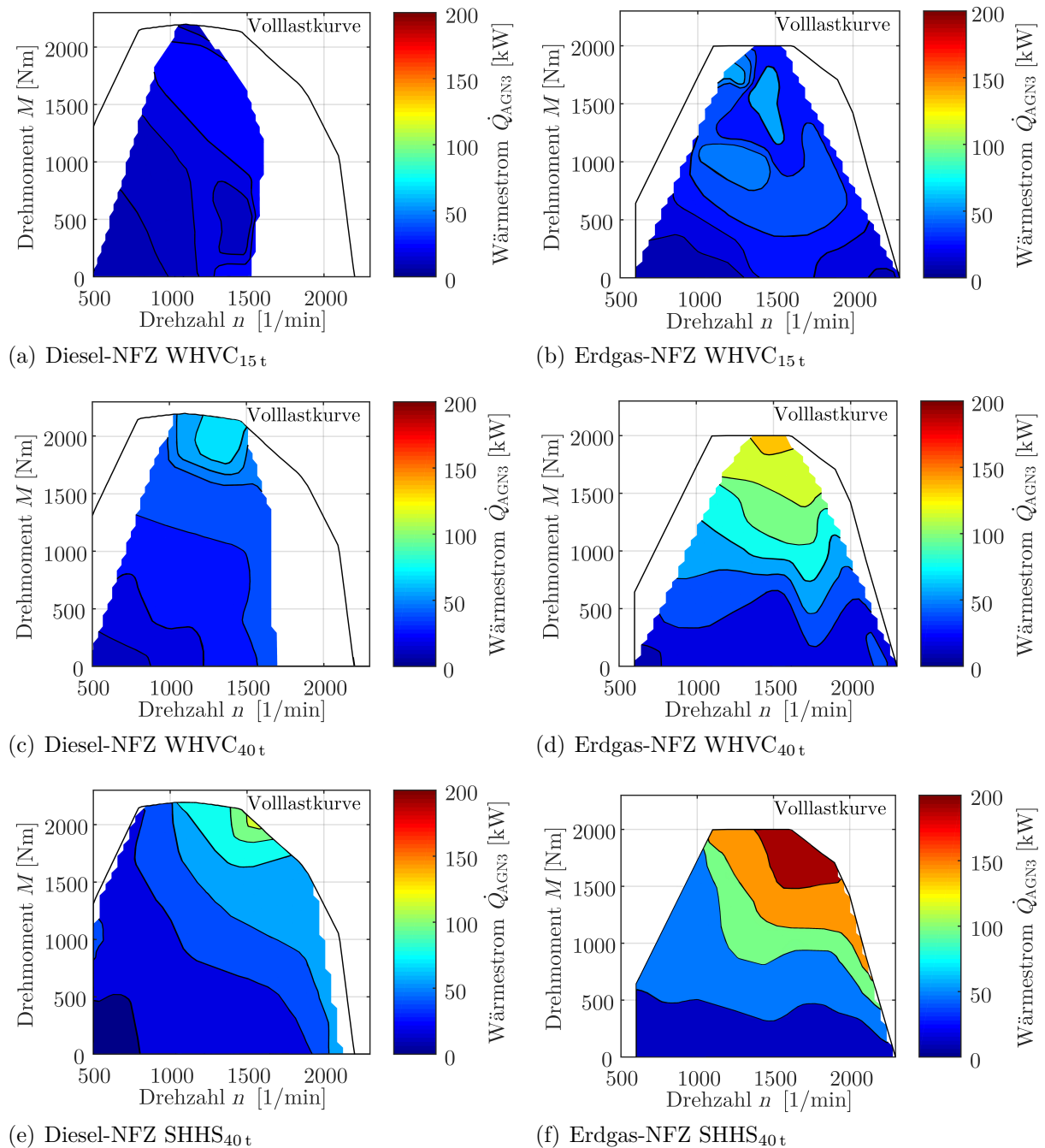
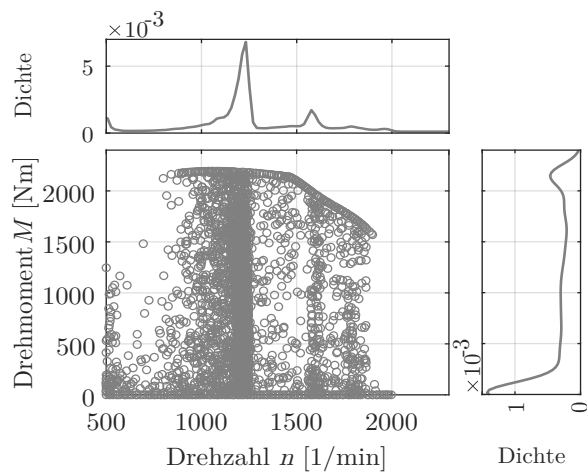
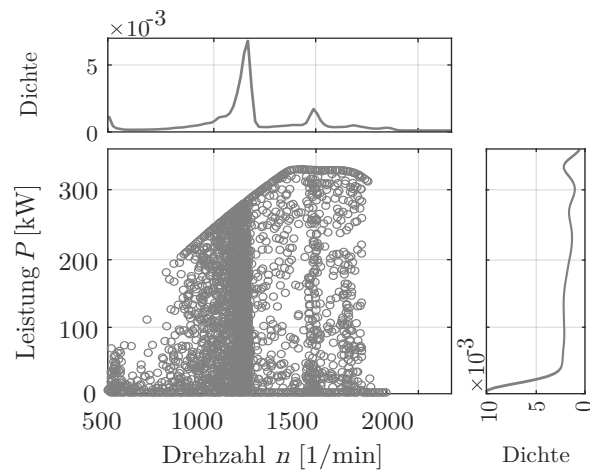


Abbildung B.7.: Potentialanalyse der verfügbaren Abgaswärmeströme am Ausgang der Abgasanlage (Interpolationen basieren auf dynamischen Werten)

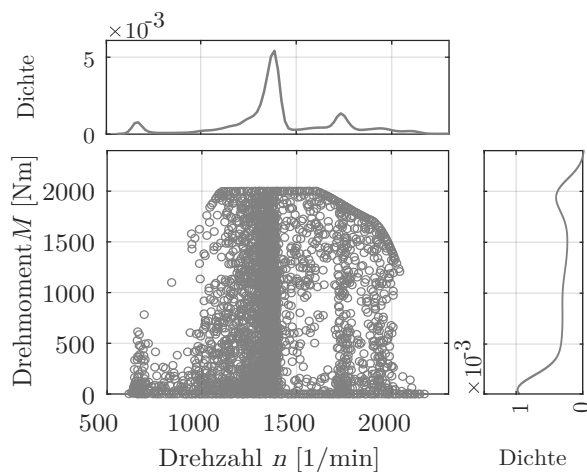
### B.3.4. Drehmoment- und Lastpunktverteilungen der VKM auf der Realfahrstrecke SHHS



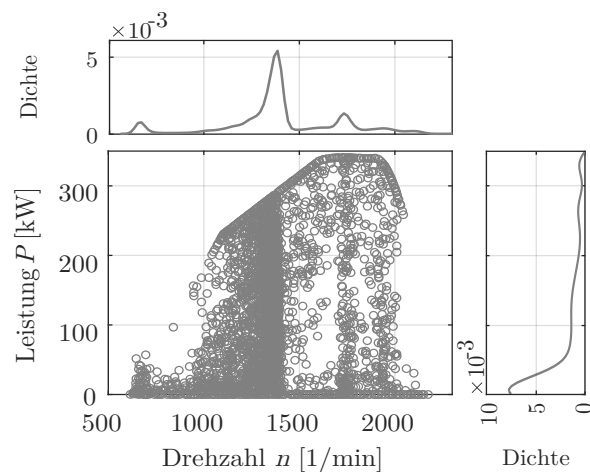
(a) Drehmoment über Drehzahl des Diesel-NFZ



(b) Leistung über Drehzahl des Diesel-NFZ



(c) Drehmoment über Drehzahl des Erdgas-NFZ



(d) Leistung über Drehzahl des Erdgas-NFZ

Abbildung B.8.: Verteilung des Drehmoments und der Leistung über der Drehzahl auf der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> (Bremsmoment und -leistung negiert)

## B.4. Nebenaggregate

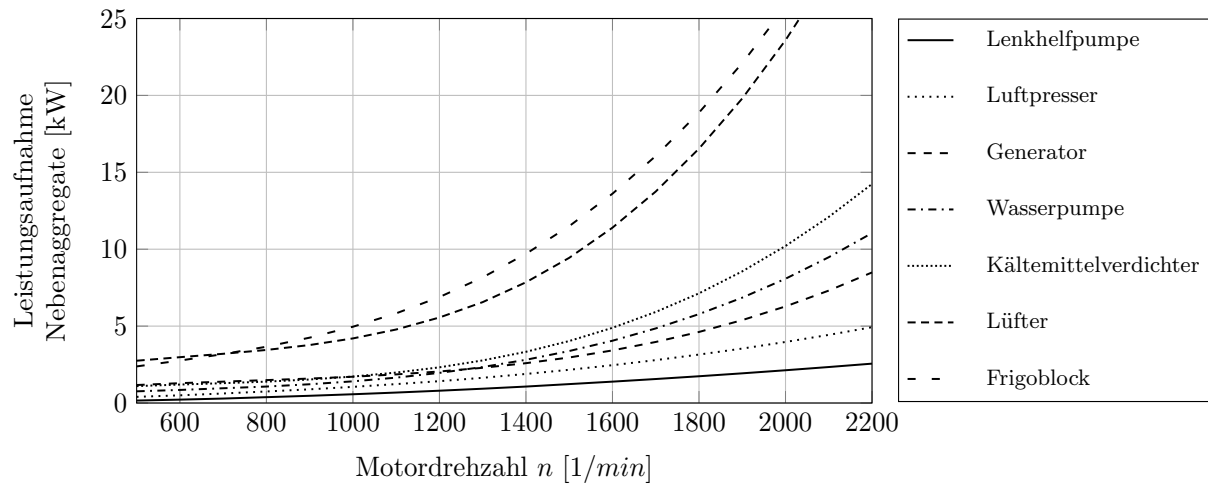


Abbildung B.9.: Leistungsaufnahme der Nebenaggregate eines konventionellen Diesel-NFZ; Darstellung i. A. a. [37]

## C. Relevante Stoffgrößen

### C.1. Abgase

Die in den Simulationen dieser Arbeit verwendeten spezifischen Wärmekapazitäten der jeweiligen nutzbaren Abgaszusammensetzung sind in Abbildung C.1 dargestellt (für Dieselabgase kann das Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda_L$  variieren). Weitere relevante Stoffgrößen, wie z. B. die Dichte oder die universelle Gaskonstante wurden der Literatur entnommen (vgl. z. B. [28]).

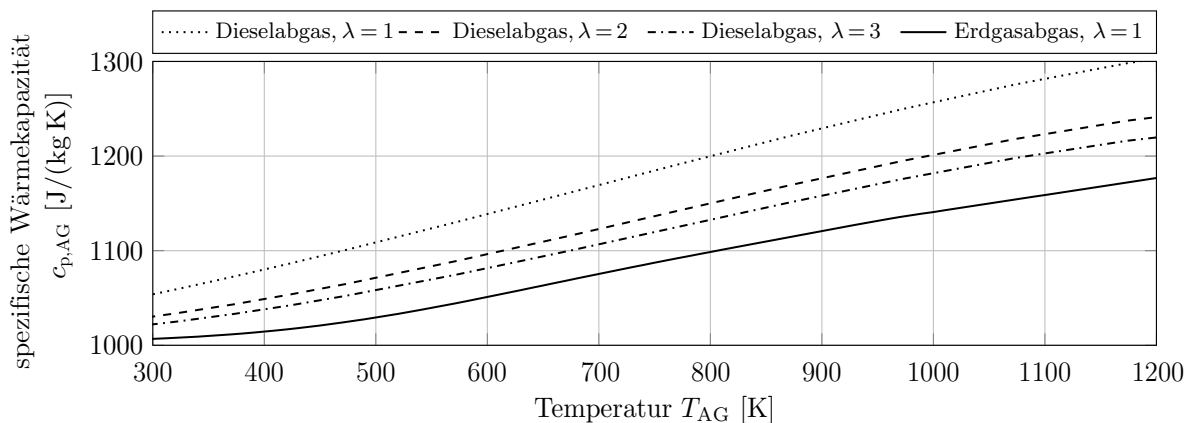


Abbildung C.1.: Spezifische Wärmekapazitäten von Abgasen eines Diesel- und Erdgasverbrennungsmotors; Stoffdaten aus [28]



### C.2. Kühlmittel

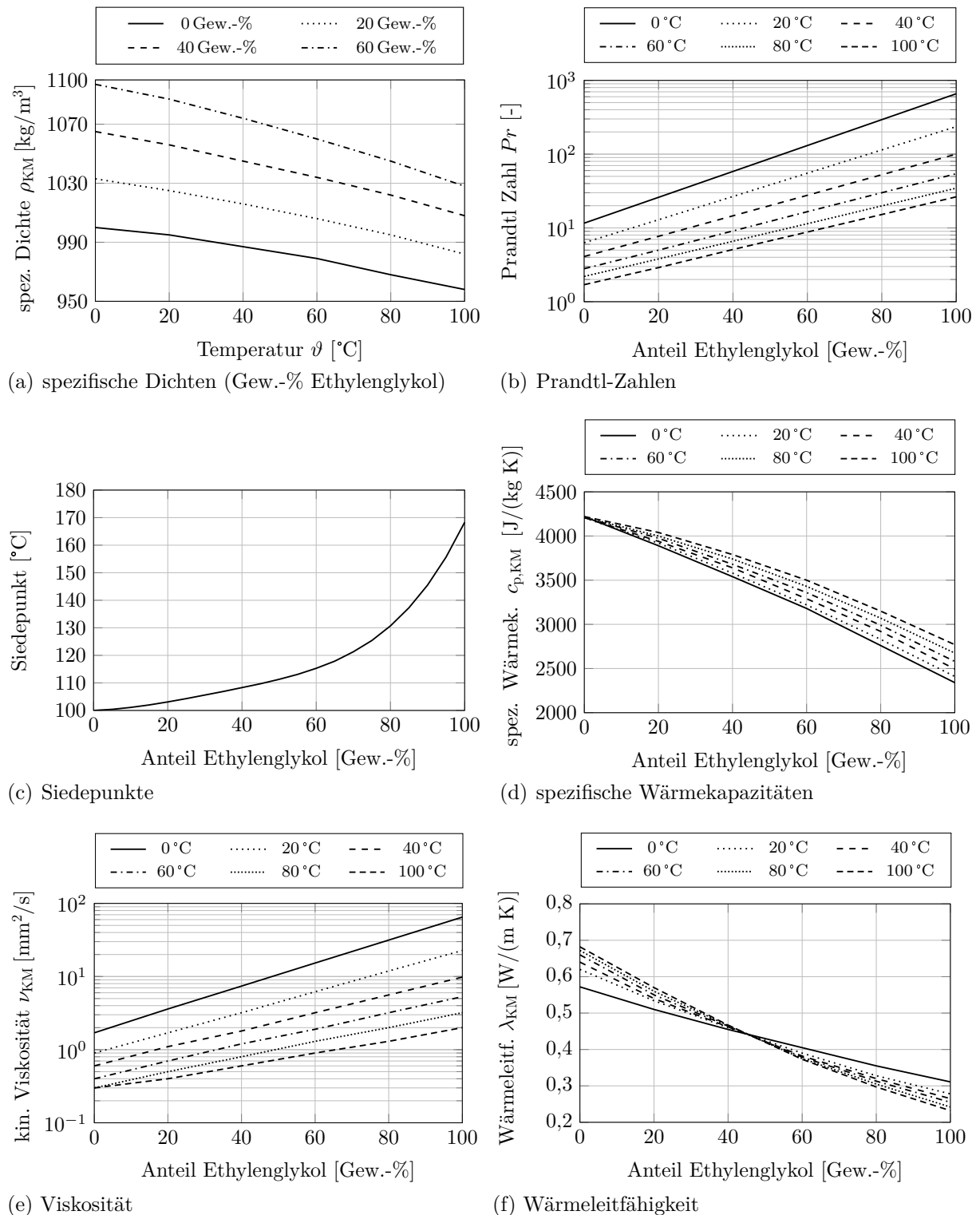


Abbildung C.2.: Relevante Stoffeigenschaften von Ethylenglykol-Wasser-Kühlmittelgemischen bei Normaldruck (1013 mbar) mit Stoffdaten aus [283, 284]

## D. Entwicklungsprozess

### D.1. Funktionsstruktur in Blockdarstellung

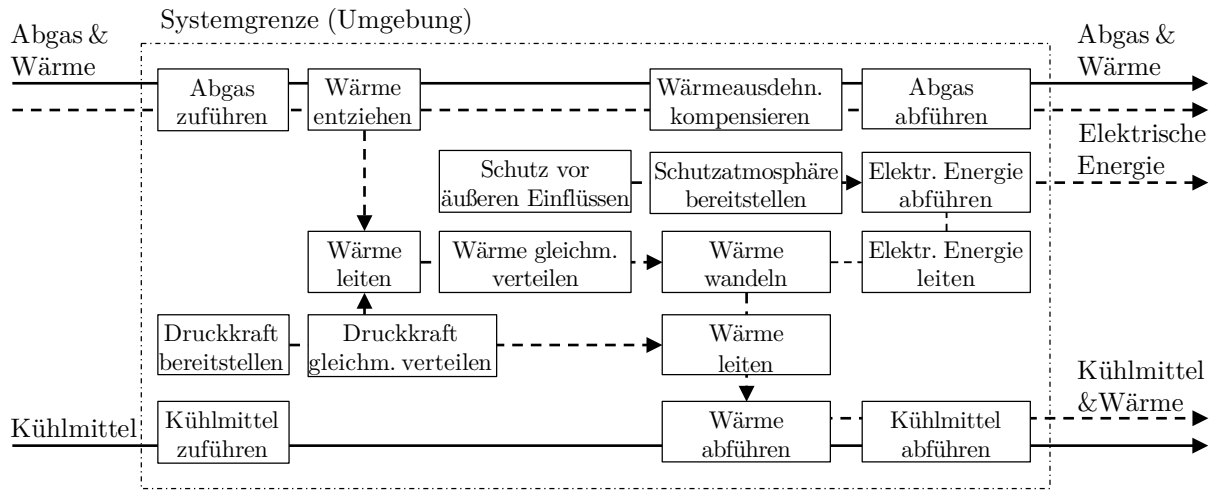


Abbildung D.1.: Blockdarstellung der Funktionsstruktur eines nutzfahrzeuggerechten TEG, Darstellung i. A. a. [32, 72]

### D.2. Thermisches Ersatzschaltbild des planaren Modulaufbaus

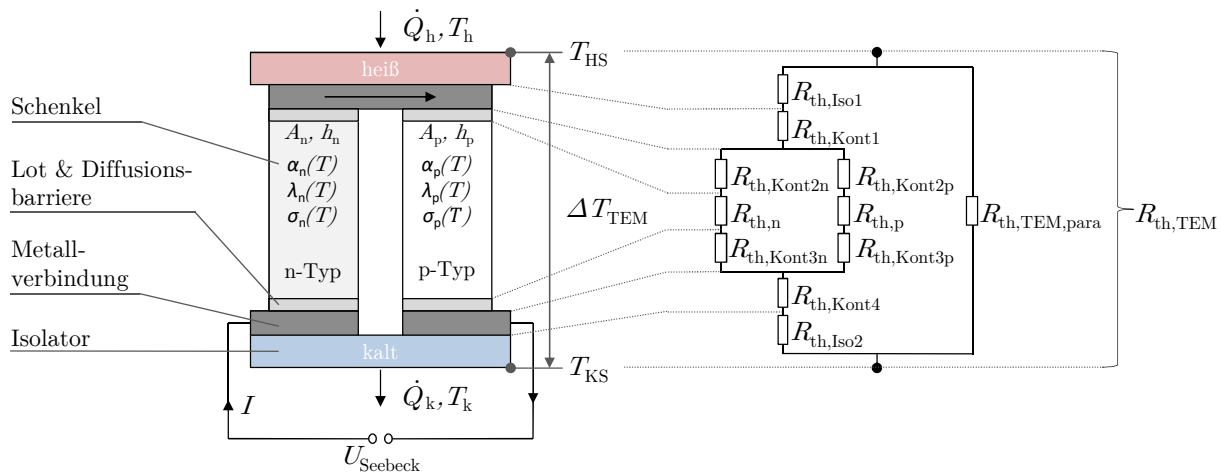


Abbildung D.2.: Thermisches Ersatzschaltbild eines thermoelektrischen Schenkelpaares

### D.3. Anforderungsliste für TEG-Systeme im SNFZ

DLR - Institut für Fahrzeugkonzepte		Anforderungsliste für nutzfahrzeuggerechte Thermoelektrische Generatoren	1. Ausgabe Blatt: 1 Seite:1
Nr.	F W	Anforderungen	ver- antw.
01.G	F	<b>1. Geometrie</b>	
02.G	F	Geringer Bauraum (bspw. AGN): < 700x750x550* bzw. < 750x800x600** [mm <sup>3</sup> ]	
		Bauvolumen: in vorhandene Bauräume integrierbar	
03.Ge	W	<b>2. Gewicht</b>	
		Minimalgewicht, Leichtbauweise: < 100 kg	
04.K	F	<b>3. Kräfte</b>	
05.K	F	VKM- und fahrbahnerregten Schwingungen standhalten	
06.K	F	Vertikalbeschleunigungen bis 30 g standhalten	
		Anpresskraft für thermoelektrische Module bereitstellen: > 1 MPa	
07.T	F	<b>4. Temperaturen</b>	
08.T	F	Minimaltemperatur der Umgebung: -40 °C	
09.T	F	Maximale Abgastemperatur (abhängig vom Einbauort): 800* / 900** [°C]	
10.T	F	Abgastemperaturwechsel standhalten von („ „ „): 10* / 15,5** [K/s]	
		Maximale Kühlmitteltemperatur: 120 °C	
11.E	F	<b>5. Energie(-effizienz)</b>	
12.E	F	Steigerung des Fahrzeugwirkungsgrades; Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um:	
13.E	F	Kraftstoffreduktion um:	
		≥ 1* / 2** [%]	
14.E	W	≥ 3* / 5** [%]	
15.E	W	Hohe elektrische TEG-Abgabeleistung	
16.E	W	Geringer Abgas- (Abgasanlage inkl. TEG ≤200 mbar) und Kühlmittelgegendruck	
17.E	W	Geringe zusätzliche Kühllast (<80* / <120** [kW])	
18.E	W	Verkürzung der Warmlaufphase beim Kaltstart	
19.St	F	<b>6. Stoff</b>	
		Korrosionsbeständig, abgasseitig: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl, saure Chloride; äußerlich: Salzwasser	
20.S	F	<b>7. Signal</b>	
		Messen von relevanten Temperaturen, Drücken, TEG-Spannungen und -Strömen	
21.Si	F	<b>8. Sicherheit</b>	
22.Si	F	Maximale elektrische Abgabespannung: < 60 V	
		Bestdruck Kühlsystem: ≥ 2 bar (Absolutdruck)	
23.Z	W	<b>9. Zuverlässigkeit und Wartung</b>	
24.Z	F	Hohe Zuverlässigkeit (700 tkm oder 7 Jahre) und Wartungsfreiheit (min. 100 tkm)	
25.Z	W	Langzeit- und Dauerbetrieb: ≥ 3 Jahre	
26.Z	W	Langzeitstabilität der Module ( $\eta_{TEM}$ ): < -2 %/Jahr	
		Geringe Ablagerungsbildung (Fouling) in den WÜ	
27.K	F	<b>10. Kosten / Industrialisierbarkeit</b>	
28.K	W	Geringe Materialkosten	
29.K	F	Geringe bauweisen- und auslegungsspezifische Kosten: < 0,5 EUR/W	
30.K	F	Gute Industrialisierbarkeit	
31.K	F	Erreichen der Gewinnschwelle und Amortisation unter Berücksichtigung der TCO in:	
32.K	W	< 3 Jahren	
		< 2 Jahren	
33.N	W	<b>11. Nachhaltigkeit / Recycling</b>	
		Ressourcenschonende Herstellung, hohe Recyclingfähigkeit	

Abbildung D.3.: Generierte Anforderungsliste für die Entwicklung von TEG-Systemen für SNFZ; Darstellung i. A. a. [140] und mit Angaben von [32, 33, 37, 72, 162]

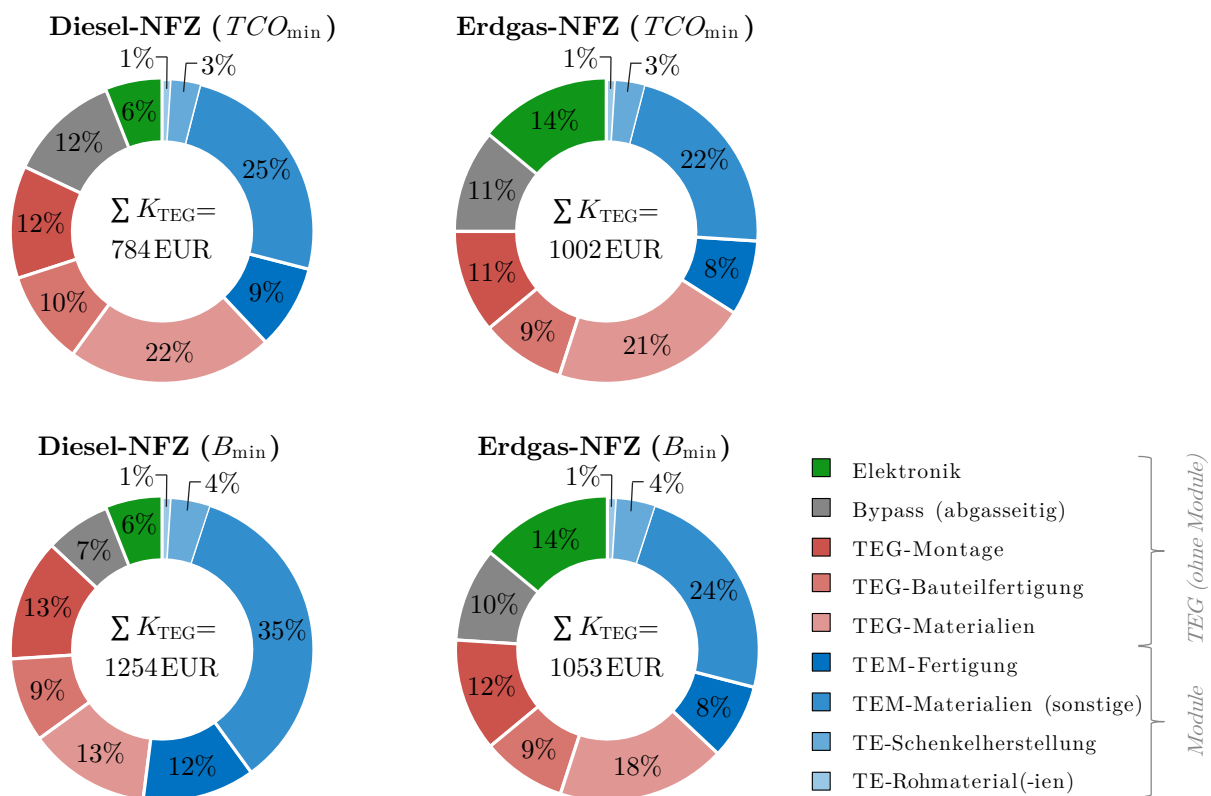
## D.4. Analyse der Gesamtbetriebskosten eines Nutzfahrzeuges

<b>Total Cost of Ownership (TCO)</b>	<b>Variable Kosten</b>	<b>Fahrzeug- betriebs- kosten</b>	Leistungsabhängige Abschreibung („Abnutzungs“)
			Kraftstoffkosten
			Sonstige Betriebsmittel
			Schmierstoffe
			Instandhaltung und Reparatur (inklusive Ersatzteile)
			Fahrzeug-Reinigung
			Reifenkosten
			Kilometerbezogene Straßenbenutzungsgebühr (z. B. Maut)
			Sonstiges
	<b>Fixe Kosten Fahrzeug</b>	<b>Fahrer- kosten</b>	Spesen
			Zuschläge
			Sozialabgaben
			Lohn
			Zeitabhängige Abschreibung
			Fremdfinanzierungskosten (Zins, Leasing)
	<b>Allgemeine Kosten</b>	<b>Kosten des Fahrzeug- besitzers</b>	KFZ-Steuer
			Zeitbezogene Straßenbenutzungsgebühr (z. B. Vignetten)
			Versicherung
			Prüfgebühren (TÜV, usw.)
			Stellplatzkosten
			Personalkosten Verwaltung
			Miete Büro
			Büromaterial, Kommunikationskosten, usw.
			Versicherung (ohne Fahrzeug)
			Risikovorhalt (Zahlungsausfall, usw.)
			Beratungskosten, Beiträge und Provisionen
<b>Sonstiges</b>			
		<b>Kalkulatorischer Unternehmerlohn</b>	

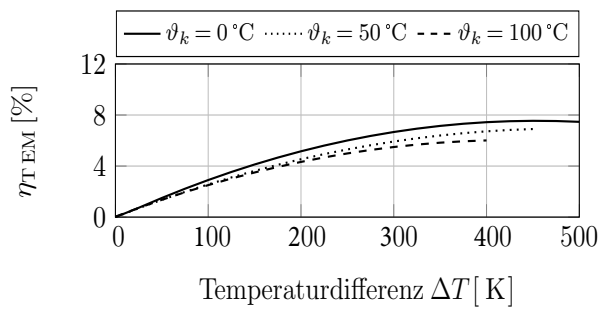
Abbildung D.4.: Kostenbeiträge zur Gesamtbetriebskostenbetrachtung eines Nutzfahrzeuges im Fernverkehr, Darstellung i. A. a. [6]

Tabelle D.1.: Darstellung der jährlichen Gesamtbetriebskostenstruktur ( $TCO$ ) von Diesel- und Erdgas-NFZ bei einer Nutzungsdauer von 5 Jahren

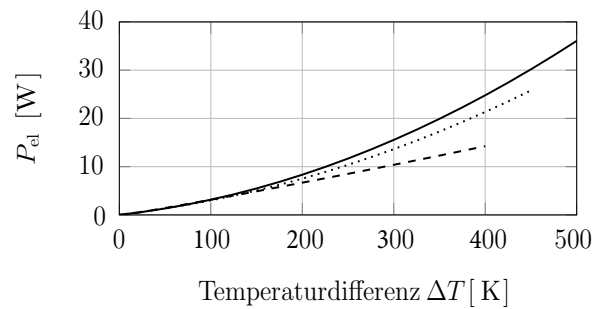
Kostenart	Gesamtwert Diesel-NFZ [EUR/Jahr]	Gesamtwert Erdgas-NFZ [EUR/Jahr]
Abschreibungen	22.297	33.734
Fahrpersonal	51.000	51.000
Kapitalverzinsung	4.095	5.785
Steuern & Versicherung	6.429	6.429
Verwaltung	21.481	21.700
<b>Fixkosten</b>	<b>105.303</b>	<b>118.648</b>
Kraftstoff (inkl. Harnstoff) & Betriebsmittel	53.154	37.983
Mautgebühr	15.255	15.255
Reifen	3.608	3.608
Wartung & Reparaturen	9.750	11.750
<b>Variable Kosten</b>	<b>81.768</b>	<b>68.597</b>
<b>Gesamtbetriebskosten (<math>TCO</math>)</b>	<b>187.070</b>	<b>187.244</b>

Abbildung D.5.: Kostenaufteilung der TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der  $TCO$  ( $TCO_{\min}$ ) und des Kraftstoffverbrauchs ( $B_{\min}$ )

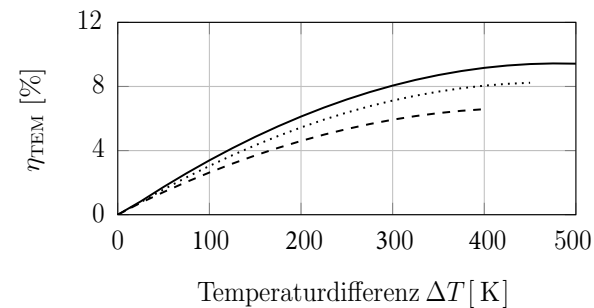
## D.5. Betriebscharakteristik der thermoelektrischen Modulauswahl



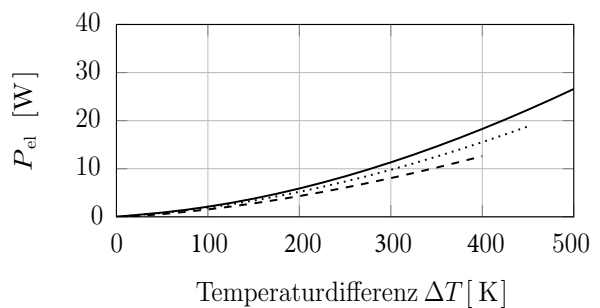
(a) LG2-31-31-3.2 Wirkungsgradkennfeld



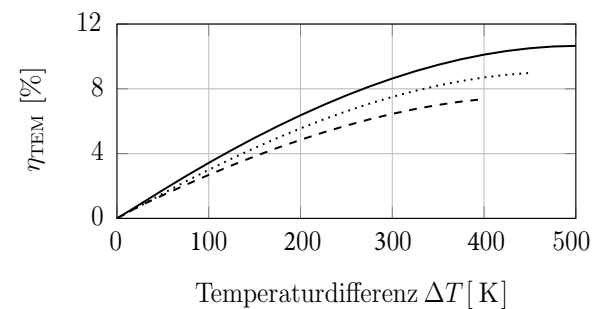
(b) LG2-31-31-3.2 elektrisches Leistungskennfeld



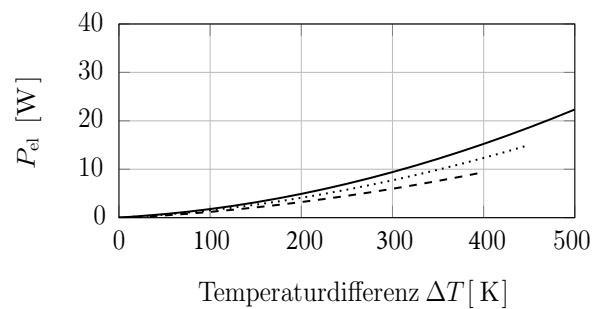
(c) LG2-31-31-4.4 Wirkungsgradkennfeld



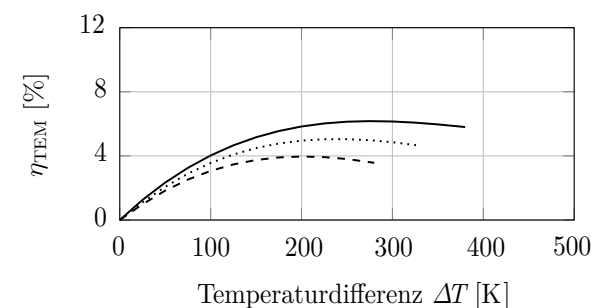
(d) LG2-31-31-4.4 elektrisches Leistungskennfeld



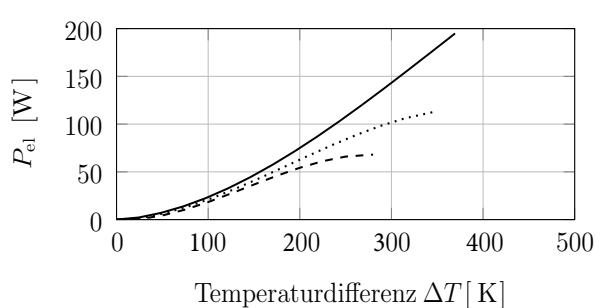
(e) LG2-31-31-5.2 Wirkungsgradkennfeld



(f) LG2-31-31-5.2 elektrisches Leistungskennfeld



(g) Y1-125-84-1.6 Wirkungsgradkennfeld



(h) Y1-125-84-1.6 elektrisches Leistungskennfeld

Abbildung D.6.: Betriebscharakteristik der Modulauswahl dieser Arbeit basierend auf Messwerten; Teilabbildungen (e) und (f) aus [48]

## D.6. Konstruktionsergebnisse

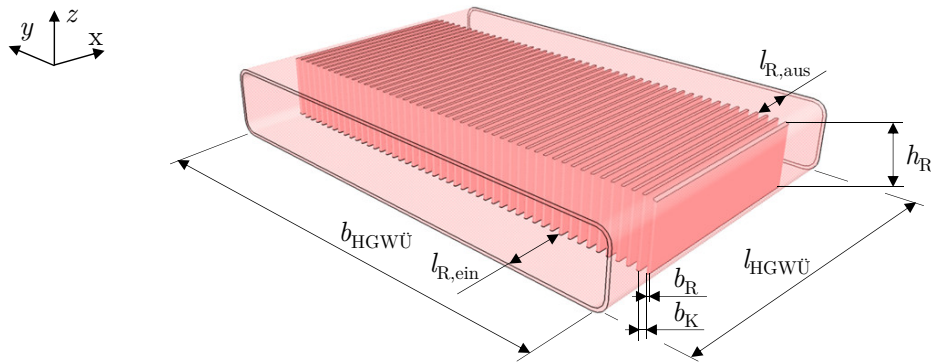


Abbildung D.7.: Parametrisierung eines Heißgaswärmeübertragers mit geraden Rippen als 3D-CAD-Modell (TEG-Ergebnisdesign: Erdgas-NFZ  $TCO_{min}$ )

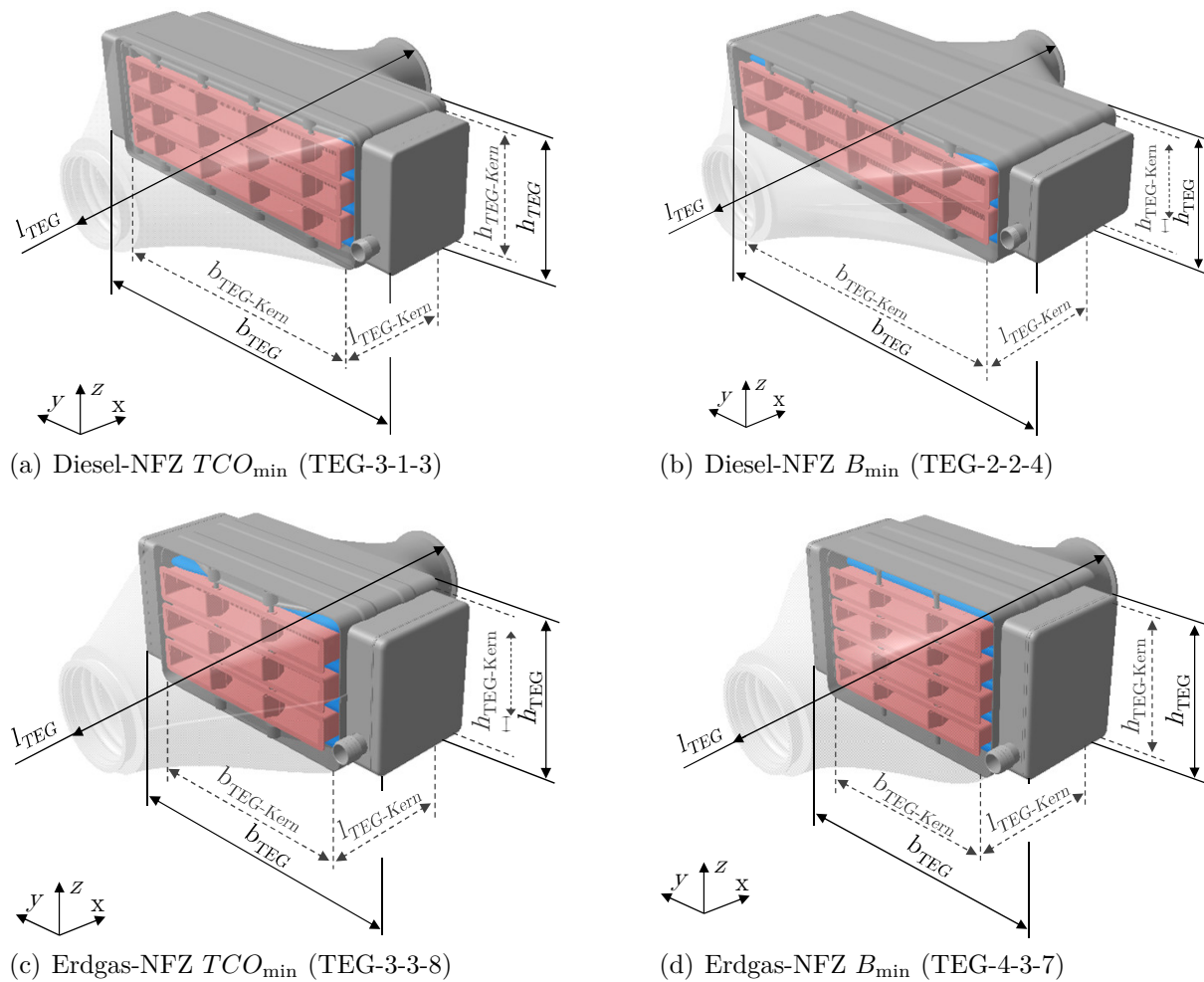


Abbildung D.8.: Ergebnisse der generischen TEG-Bauweise als 3D-CAD-Modelle der Ergebnisdesigns (Darstellung mit transparentem Diffusor; TEG jeweils in Prüfstandskonfiguration)

Tabelle D.2.: Technische Spezifikationen der ausgewählten TEG-Ergebnisdesigns

TEG-Ergebnisdesign		Diesel-NFZ		Erdgas-NFZ	
Bezeichnung		$TCO_{\min}$	$B_{\min}$	$TCO_{\min}$	$B_{\min}$
Variable	Einheit	TEG-3-1-3	TEG-2-2-4	TEG-3-3-8	TEG-4-3-7
$l_{\text{TEG-Kern}} / l_{\text{TEG}}$	[mm]	130 / 520	230 / 600	160 / 530	160 / 530
$b_{\text{TEG-Kern}} / b_{\text{TEG}}$	[mm]	425 / 550	540 / 660	295 / 420	260 / 375
$h_{\text{TEG-Kern}} / h_{\text{TEG}}$	[mm]	170 / 175	125 / 137	175 / 180	194 / 202
$m_{\text{TEG-Kern}} / m_{\text{TEG}}$	[kg]	14,6 / 24,5	23,2 / 35,6	15,5 / 27,4	18,0 / 28,3
$m_{\text{TM}}$	[kg]	0,3	0,6	0,8	0,9

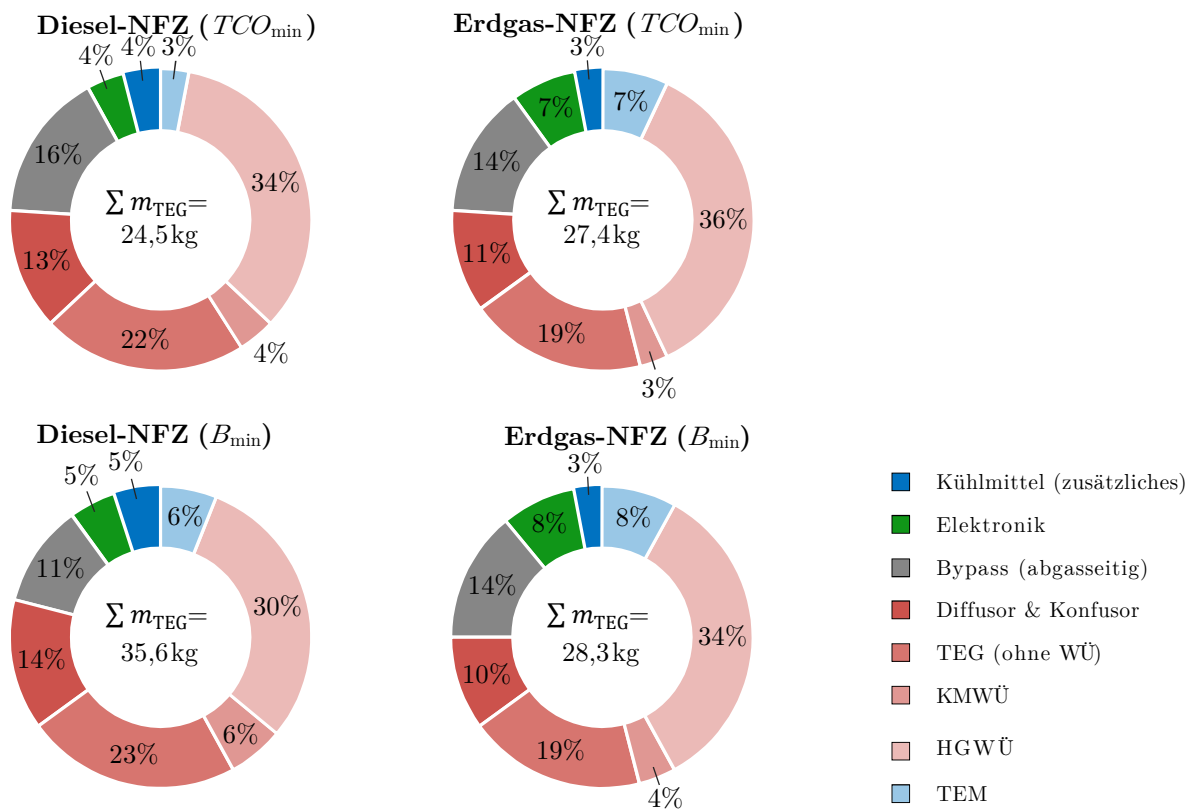


Abbildung D.9.: Gewichtsufteilung der TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO ( $TCO_{\min}$ ) und des Kraftstoffverbrauchs ( $B_{\min}$ )



## D.7. Simulationsmodelle und -ergebnisse

### D.7.1. Auslegung von Kühlsystemen

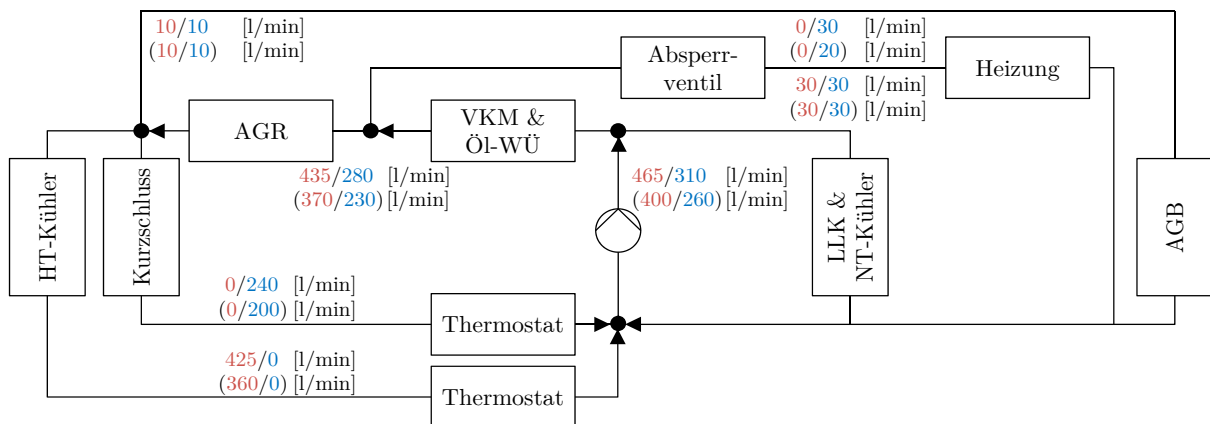


Abbildung D.10.: Ersatzschaltbild der Kühlsystemauslegung bei Sollvolumenströmen (bei Nenndrehzahl im Sommer- / Winterbetrieb für das Diesel-NFZ; Erdgas-NFZ in Klammern)

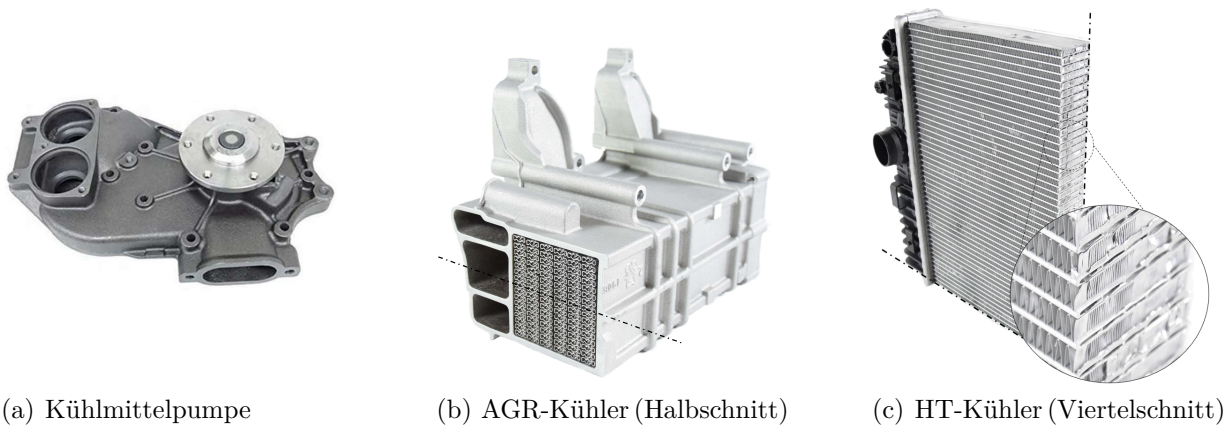
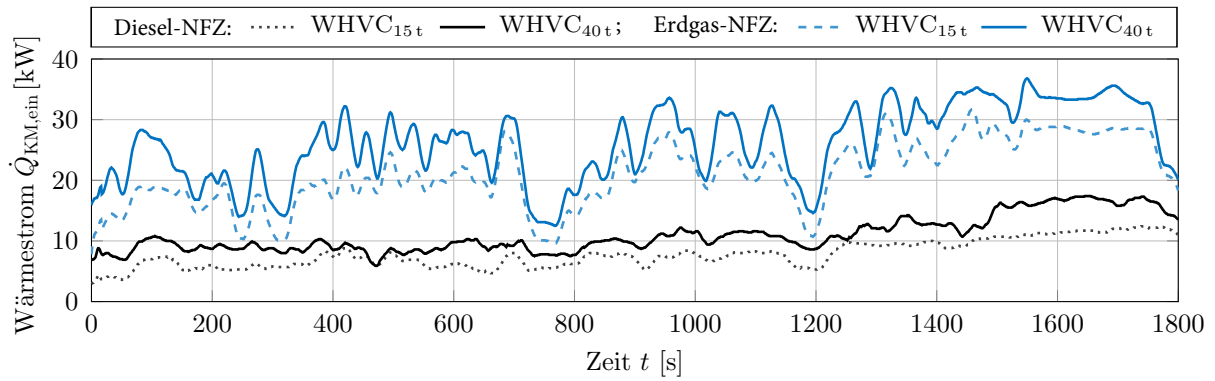
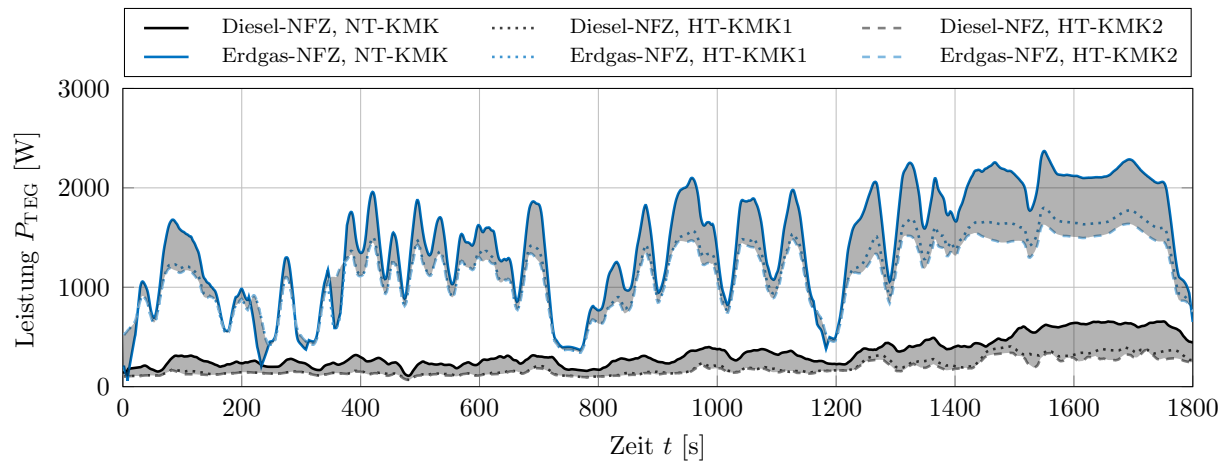
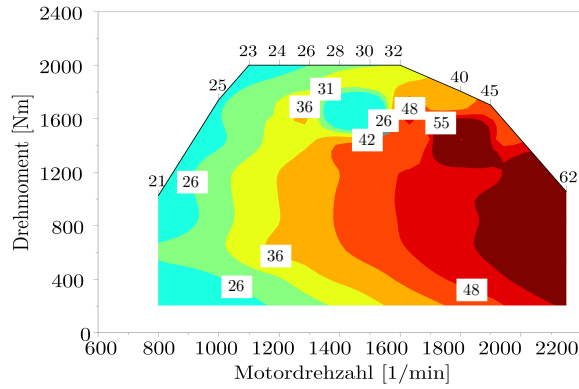


Abbildung D.11.: Untersuchung ausgewählter Kühlmittelkomponenten des Diesel-NFZ (Actros 1845)

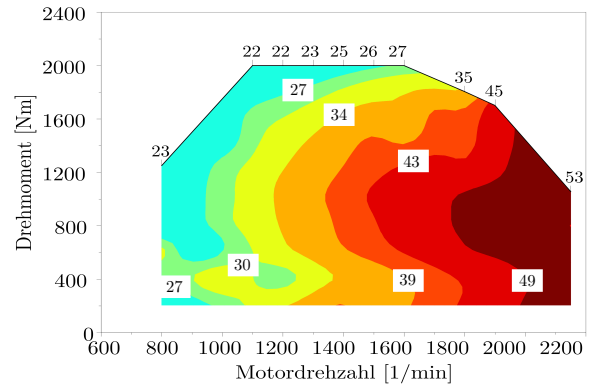


(a) Kühlmittelwärmeeinträge im Zeitverlauf

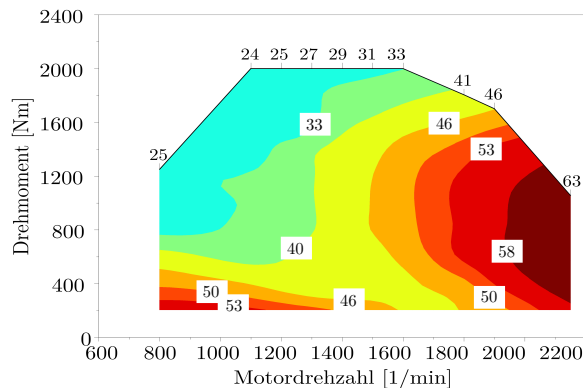
(b) Einfluss auf die TEG-Leistung am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub> (Differenzfläche jeweils grau hinterlegt)Abbildung D.12.: Kühlmittelwärmeeinträge im jeweiligen Fahrzyklus und Einfluss des TEG-Integrationskonzeptes auf die TEG-Leistung (TEG-Variante:  $TCO_{\min}$ )



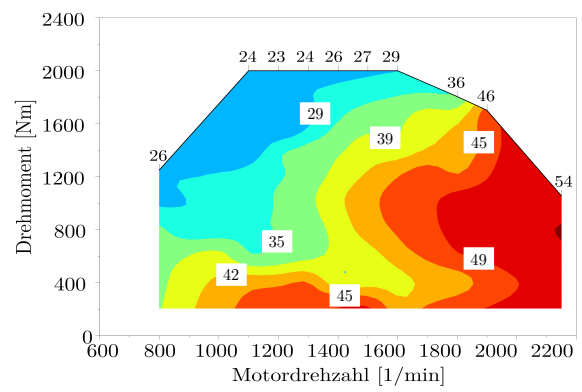
(a) Integrationskonzept  $TEG_{HT-KMK1}$  (20 km/h)



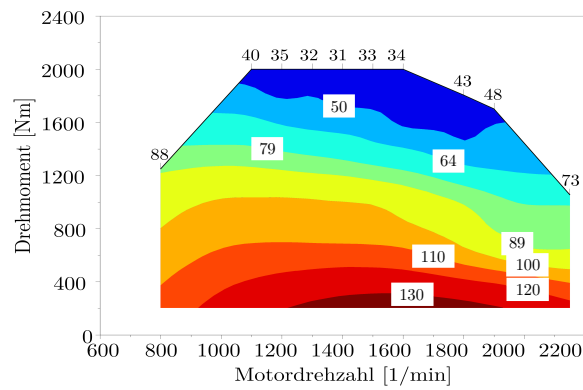
(b) Integrationskonzept  $TEG_{NT-KMK}$  (20 km/h)



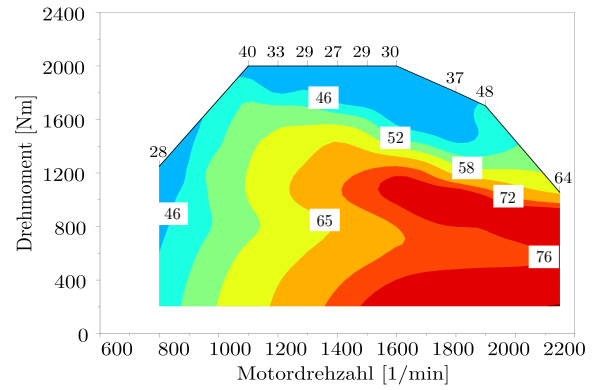
(c) Integrationskonzept  $TEG_{HT-KMK1}$  (40 km/h)



(d) Integrationskonzept  $TEG_{NT-KMK}$  (40 km/h)



(e) Integrationskonzept  $TEG_{HT-KMK1}$  (80 km/h)



(f) Integrationskonzept  $TEG_{NT-KMK}$  (80 km/h)

Abbildung D.13.: Kennfelder des Kühlpotentials  $\dot{Q}_{KM,Pot}$  [kW] im Erdgas-NFZ in Abhängigkeit vom TEG-Integrationskonzept und der Fahrzeuggeschwindigkeit (Rdb.:  $\vartheta_U = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $p = 1013\text{ hPa}$ ;  $\varphi = 0\%$ ;  $\vartheta_{VKM,aus(max)} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ); Abbildungen aus [150]

### D.7.2. Auslegung von unterschiedlichen inneren Strukturen für den Heißgaswärmeübertrager (HGWÜ)

Im Rahmen der simulationsgestützten Auslegung von Wärmeübertragern wurden unterschiedliche innere WÜ-Strukturen untersucht, um eine optimale Auswahl für die TEG zu ermöglichen. Betriebscharakteristiken der ausgewählten HGWÜ-Strukturen sind in Abbildung D.14 und in Abbildung D.15 dargestellt. Der ‚ideale WÜ‘ erzielt den theoretisch maximal möglichen Wärmestrom  $\dot{Q}_{h,max}$  gemäß Gleichung 6.1 unter den gegebenen Randbedingungen. Die angegebenen Varianten ‚geraden Rippen V.1‘ bis zu den ‚topologieoptimierten Strukturen V.1‘ sind gute Lösungskandidaten des Optimierungsprozesses aus Abschnitt 6.3.2. Diese wurden in Hardware realisiert, um die Simulationsumgebung zu validieren (s. Abschnitt 7.1.1).

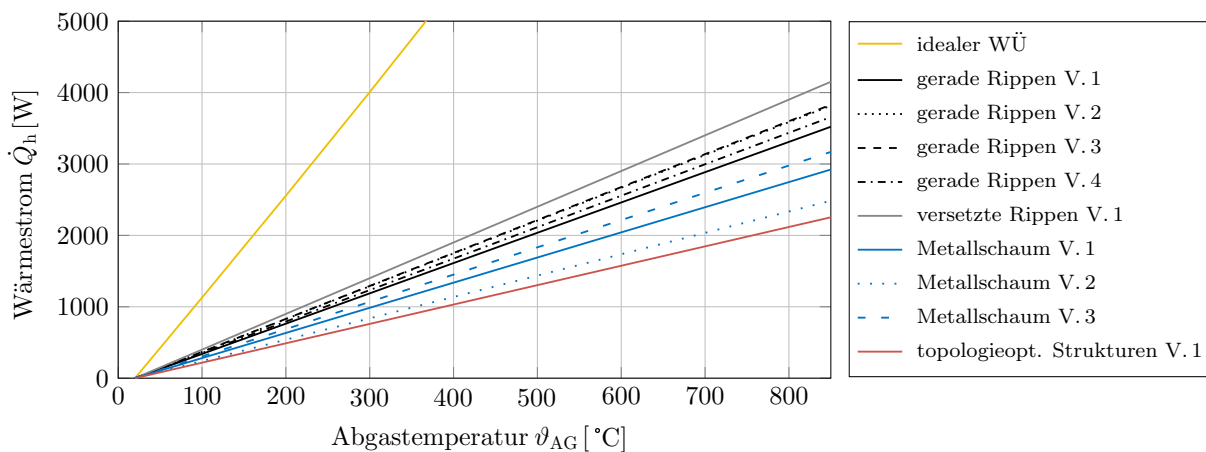


Abbildung D.14.: Wärmeübertragung der untersuchten HGWÜ-Strukturen  
(Rdb.:  $\dot{m}_{AG} = 0,01 \text{ kg/s}$ ;  $\vartheta_{KM,ein} = 60 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM} = 0,25 \text{ dm}^3/\text{s}$ )

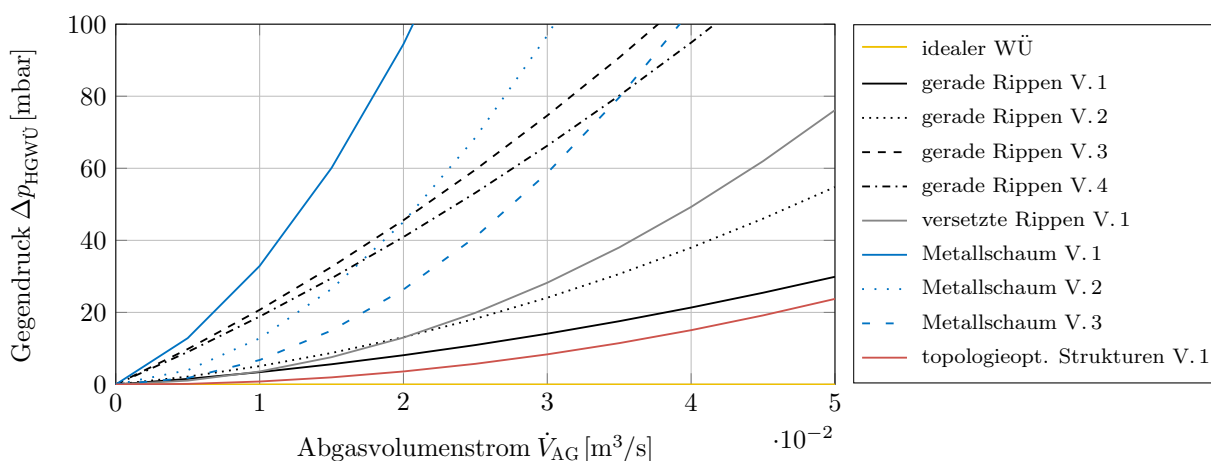


Abbildung D.15.: Gegendruck der untersuchten HGWÜ-Strukturen  
(Rdb.:  $\vartheta_{AG} = 600 \text{ °C}$ ;  $\vartheta_{KM,ein} = 60 \text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM} = 0,25 \text{ dm}^3/\text{s}$ )

### D.7.3. Simulationsumgebung

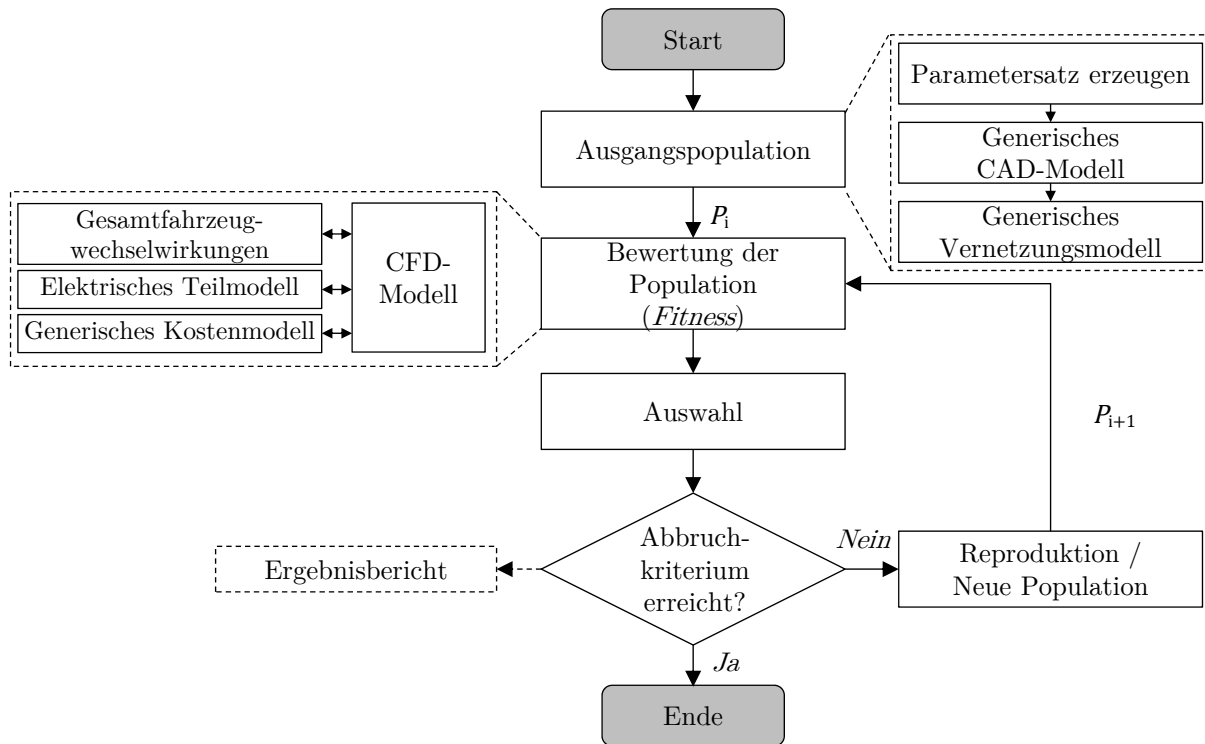


Abbildung D.16.: Allgemeines Vorgehen des evolutionären Algorithmus für die TEG-Optimierung; Abbildung aus [184]

Tabelle D.3.: Zielgrößen der ganzheitlichen Gesamtsystemsimulation, Darstellung i. A. a. [72]

	Zielgröße	Bereich	Berechnung	Zielformulierung
Hauptziele	Kraftstoffreduktion <sup>1</sup>	Fahrprofil	kumuliert	Maximum
	Systemkosten	Fahrprofil	Summe	Minimum
Nebenziele	Elektrische TEG-Leistung	Fahrprofil	Mittelwert	Maximum
		Hochlastbereich	Mittelwert	Maximum
	TEG-Wirkungsgrad	Fahrprofil	Mittelwert	Maximum
	Kraftstoffverbrauch für Fahrwiderstände	Fahrprofil	kumuliert	Minimum
	Effektiver Abgasgegendruck	Fahrprofil	Mittelwert	Minimum
	Effektiver Abgasgegendruck	Hochlastbereich	Mittelwert	Minimum
	Gradient der TEM-Heißseitentemperatur <sup>2</sup>	Fahrprofil	Mittelwert	Minimum
TEM-Heißseitentemperatur	Fahrprofil	Mittelwert	Minimum	
TEM-Heißseitentemperatur	Fahrprofil	Mittelwert	Minimum	

<sup>1</sup> Die äquivalente CO<sub>2</sub>-Reduktion stellt ein weiteres Hauptziel dieser Arbeit dar und wird anhand des Kraftstoffverbrauchs ermittelt.

<sup>2</sup> In Längsrichtung des HGWÜ.

## D.7.4. Technisch-wirtschaftliche Bewertung von TEG-Bauweisen

Tabelle D.4.: Ergebnisse der technisch-wirtschaftlichen Bewertung unterschiedlicher TEG-Bauweisen

TEG	Technische Merkmale	Ideal	Variante 1 TEG-Teil- systemaufbau	Variante 2 Diesel-NFZ $TCO_{\min}$	Variante 3 Diesel-NFZ $B_{\min}$	Variante 4 Erdgas-NFZ $TCO_{\min}$	Variante 5 Erdgas-NFZ $B_{\min}$
Stapelbauweise mit geraden Rippen	TEG-Bruttoleistung	4	1	2	3	3	3
	Gegendruck	4	1	2	3	3	3
	KMP-Leistung	4	2	3	3	3	3
	KMK-Wärmeeintrag	4	2	3	2	3	3
	Gewicht	4	2	3	2	3	3
	Volumen	4	1	3	1	2	2
	Summe	24	9	15	13	16	16
	Technische Wertigkeit $x$	1	0,38	0,63	0,56	0,65	0,66
	Wirtschaftliche Wertigkeit $y$	1	0,33	0,77	0,5	0,6	0,57
Stapelbauweise mit versetzten Rippen	TEG-Bruttoleistung	4	1	1	2	3	4
	Gegendruck	4	1	2	2	3	3
	KMP-Leistung	4	2	3	3	3	3
	KMK-Wärmeeintrag	4	2	3	2	2	2
	Gewicht	4	3	4	2	3	3
	Volumen	4	1	3	1	2	2
	Summe	24	10	15	12	16	17
	Technische Wertigkeit $x$	1	0,4	0,63	0,57	0,65	0,67
	Wirtschaftliche Wertigkeit $y$	1	0,3	0,72	0,46	0,56	0,55
Stapelbauweise mit Metallschäumen	TEG-Bruttoleistung	4	1	1	2	3	4
	Gegendruck	4	1	2	2	3	3
	KMP-Leistung	4	2	3	3	3	3
	KMK-Wärmeeintrag	4	2	3	2	2	2
	Gewicht	4	3	4	2	3	3
	Volumen	4	1	3	1	2	2
	Summe	24	10	15	12	16	17
	Technische Wertigkeit $x$	1	0,4	0,64	0,51	0,69	0,7
	Wirtschaftliche Wertigkeit $y$	1	0,25	0,64	0,4	0,55	0,53
polyg. Bauweise mit gerade Rippen	TEG-Bruttoleistung	4	1	1	2	3	4
	Gegendruck	4	1	2	2	3	3
	KMP-Leistung	4	2	3	3	3	3
	KMK-Wärmeeintrag	4	2	3	2	2	2
	Gewicht	4	2	4	3	2	2
	Volumen	4	1	3	1	2	2
	Summe	24	9	15	12	15	15
	Technische Wertigkeit $x$	1	0,38	0,64	0,51	0,63	0,64
	Wirtschaftliche Wertigkeit $y$	1	0,17	0,33	0,21	0,22	0,21
polyg. Bauweise mit versetzte Rippen	TEG-Bruttoleistung	4	1	1	2	3	4
	Gegendruck	4	1	2	2	3	3
	KMP-Leistung	4	2	3	3	3	3
	KMK-Wärmeeintrag	4	2	3	2	2	2
	Gewicht	4	2	3	2	2	2
	Volumen	4	1	3	1	2	2
	Summe	24	9	15	12	15	15
	Technische Wertigkeit $x$	1	0,38	0,62	0,49	0,61	0,63
	Wirtschaftliche Wertigkeit $y$	1	0,16	0,31	0,2	0,21	0,2
polyg. Bauweise mit Metallschäumen	TEG-Bruttoleistung	4	1	1	2	3	3
	Gegendruck	4	1	2	2	3	3
	KMP-Leistung	4	2	3	3	3	3
	KMK-Wärmeeintrag	4	2	3	2	2	2
	Gewicht	4	3	4	3	3	3
	Volumen	4	3	4	3	3	3
	Summe	24	9	16	13	16	16
	Technische Wertigkeit $x$	1	0,39	0,65	0,53	0,66	0,67
	Wirtschaftliche Wertigkeit $y$	1	0,15	0,28	0,17	0,21	0,2

### D.7.5. Ergebnisse der TEG-Entwicklung

Tabelle D.5.: Ergebnisübersicht der TEG-Entwicklungen bei Zielsetzung  $TCO_{\min}$  und  $B_{\min}$  dieser Arbeit (TEG-System integriert am Ausgang der AGN und im NT-KMK)

Fahrzeug (TEG- Design)	Referenzzyklus/ -strecke	Gesamtfahrzeug		TCO-Bilanz		TEG-System		
		$\Delta B$ [%]	$\Delta c$ [g/km]	$K_{\text{TEG}}$ [EUR]	$t_A$ [Jahr]	$P_{\text{TEG,max}}$ [W]	$\bar{P}_{\text{TEG}}$ [W]	$m_{\text{TEG}}$ [kg]
Diesel- NFZ ( $TCO_{\min}$ ) <sup>1</sup>	WHVC <sub>15t</sub>	-0,6	-4,2	784	5,9	399	184	24,5
	WHVC <sub>40t</sub>	-0,7	-8,5		1,8	656	339	
	„ Stadt	-0,6	-7,8		2,3	318	237	
	„ Landstraße	-1	-12,4		1,4	491	339	
	„ Autobahn	-0,6	-6,5		2	656	558	
	SHHS <sub>40t</sub>	-1	-8,8		2	992	560	
	„ leicht	-1,3	-7,6		2,7	663	475	
	„ mittelschwer	-0,6	-6,1		4,1	868	614	
	„ schwer	-0,8	-10,4		1,7	992	642	
Konstantfahrt <sub>40t</sub> <sup>5</sup>	-0,5	-3,8	6,3	643	594			
Diesel- NFZ ( $B_{s,\min}$ ) <sup>2</sup>	WHVC <sub>15t</sub>	-0,8	-5,7	1254	9,8	645	247	35,6
	WHVC <sub>40t</sub>	-1	-12		2,9	1165	521	
	„ Stadt	-0,8	-10,7		3,5	612	336	
	„ Landstraße	-1,1	-14,5		2,1	871	536	
	„ Autobahn	-0,8	-9,5		4,5	1165	897	
	SHHS <sub>40t</sub>	-1,2	-11,4		3,1	1891	925	
	„ leicht	-1,5	-8,7		5,1	1144	699	
	„ mittelschwer	-0,9	-8,5		5,7	804	1476	
	„ schwer	-0,8	-11,2		3,2	1891	1607	
Konstantfahrt <sub>40t</sub> <sup>5</sup>	-1	-7,3	> 10	1165	1010			
Erdgas- NFZ ( $TCO_{\min}$ ) <sup>3</sup>	WHVC <sub>15t</sub>	-2,5	-15,7	1002	1,8	1954	1030	27,4
	WHVC <sub>40t</sub>	-2,3	-24,6		1	2371	1424	
	„ Stadt	-2,3	-34,1		0,7	1959	1100	
	„ Landstraße	-1,9	-22,4		1,1	2252	1518	
	„ Autobahn	-2,4	-19,2		1,3	2371	2009	
	SHHS <sub>40t</sub>	-2,1	-19,2		1,4	2688	1686	
	„ leicht	-2,5	-15,9		1,8	1977	1422	
	„ mittelschwer	-2	-19,8		1,3	2134	1567	
	„ schwer	-2,1	-27,3		0,9	2688	1897	
Konstantfahrt <sub>40t</sub> <sup>5</sup>	-1,8	-12,7	2,5	2256	2015			
Erdgas- NFZ ( $B_{e,\min}$ ) <sup>4</sup>	WHVC <sub>15t</sub>	-2,6	-16,4	1053	1,9	2170	1085	28,3
	WHVC <sub>40t</sub>	-2,4	-25,6		1,1	2691	1506	
	„ Stadt	-2,4	-34,9		0,8	2099	1127	
	„ Landstraße	-2	-23		1,2	2560	1585	
	„ Autobahn	-2,6	-21,5		1,4	2691	2227	
	SHHS <sub>40t</sub>	-2,1	-19,2		1,5	3150	1697	
	„ leicht	-2,8	-17,4		1,9	2199	1367	
	„ mittelschwer	-2,1	-20,3		1,3	2220	1685	
	„ schwer	-1,8	-22,5		1,2	3150	1881	
Konstantfahrt <sub>40t</sub> <sup>5</sup>	-2	-14,3	2,7	2549	2239			

<sup>1</sup> Ergebnisdesign: TEG-3-1-3,  $A_{W\dot{U}} = 1260 \text{ cm}^2$ .

<sup>2</sup> Ergebnisdesign: TEG-2-2-4,  $A_{W\dot{U}} = 3360 \text{ cm}^2$ .

<sup>3</sup> Ergebnisdesign: TEG-3-3-8,  $A_{W\dot{U}} = 1420 \text{ cm}^2$ .

<sup>4</sup> Ergebnisdesign: TEG-4-3-7,  $A_{W\dot{U}} = 1655 \text{ cm}^2$ .

<sup>5</sup> Reale Konstantfahrt in der Ebene bei  $80 \pm 1 \text{ km/h}$ .

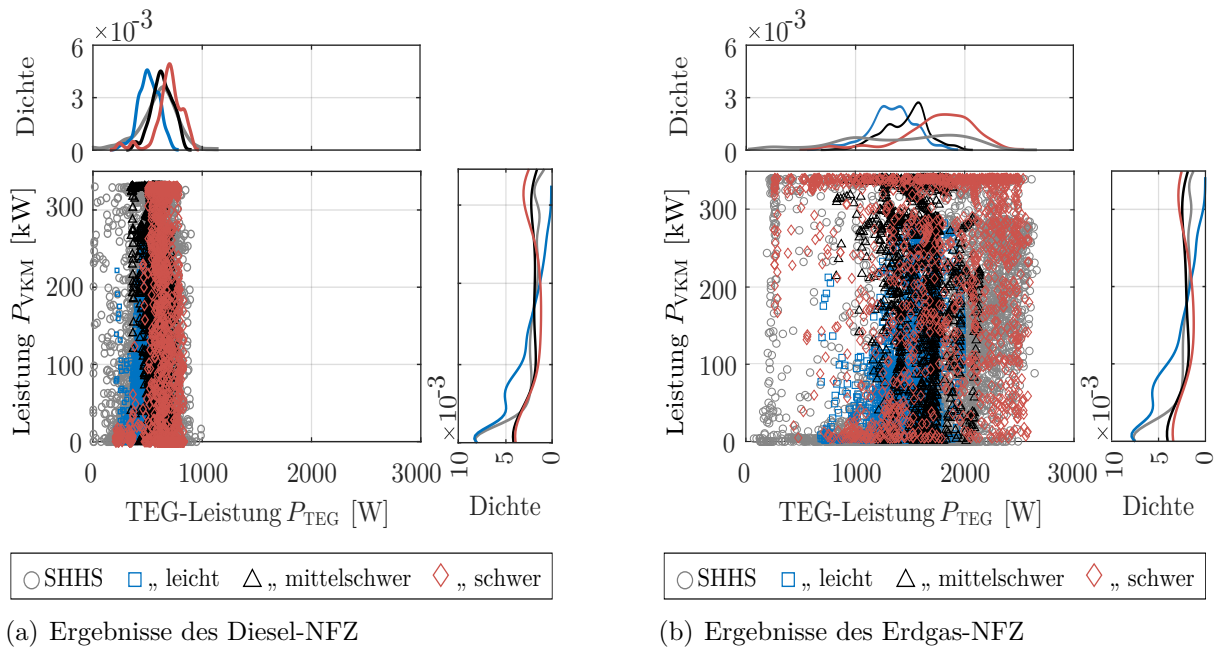


Abbildung D.17.: Verteilung der VKM- über der TEG-Leistung auf der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> bei minimalen TCO (gesamt sowie Teilstrecken ‚leicht‘, ‚mittelschwer‘ und ‚schwer‘)

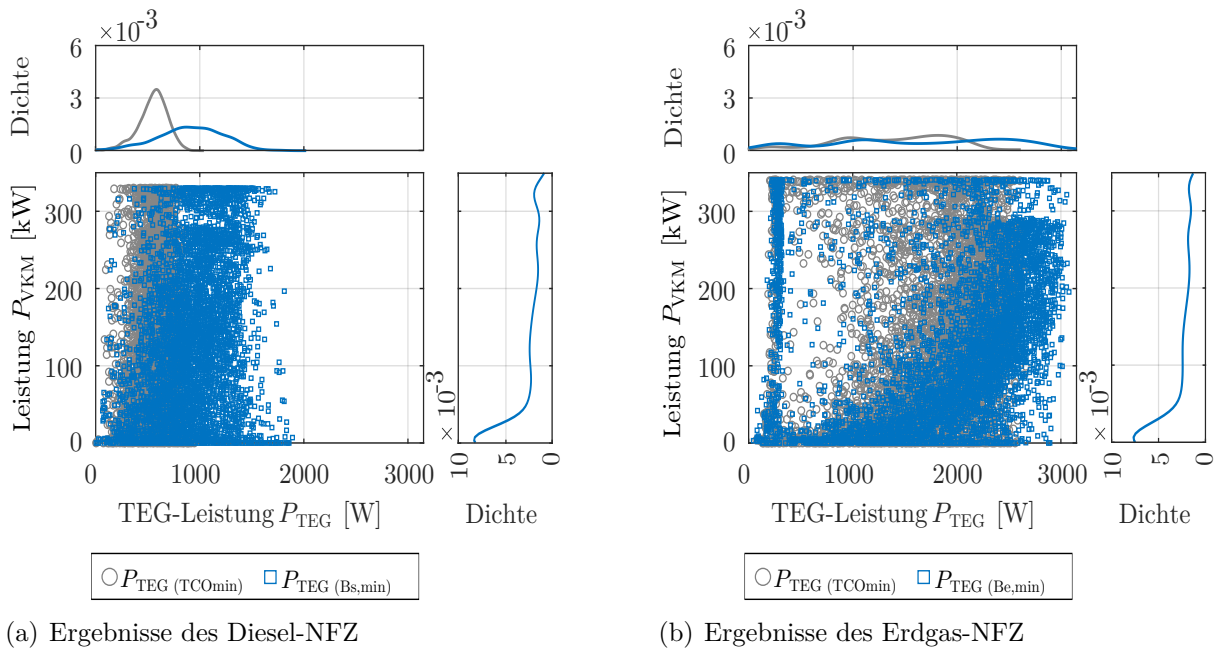


Abbildung D.18.: Verteilung der VKM- über der TEG-Leistung auf der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> bei minimalen TCO und minimalem Kraftstoffverbrauch; Teilabbildung (b) aus [48]



## D.7.6. Sensitivitätsanalyse (Erweiterung)

### D.7.6.1. Einfluss des Langzeitbetriebs

Bei den bisherigen simulativen Untersuchungen dieser Arbeit wurden Einflüsse des Langzeitbetriebs und der Systemalterung während des Betriebs nicht berücksichtigt. TEG sind für ihre zuverlässige Langzeitstabilität bei Raumfahrtanwendungen bekannt.<sup>114</sup> Für terrestrische, automobile und insbesondere für NFZ-Anwendungen ist der wissenschaftliche Kenntnisstand als sehr gering zu bezeichnen.

Die folgenden Untersuchungen erfolgen auf Basis von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigenen experimentellen Ergebnissen (s. Abschnitt 7.3). Mithilfe der ganzheitlichen Simulationsumgebung und zusätzlichen analytischen Modellen zur Langzeitstabilität können die Einflüsse des Langzeitbetriebes simulativ abgebildet werden. Untersuchungsgegenstände sind folgende Aspekte:

- Reduzierung der TEG-Leistung ( $P_{\text{TEG}}$ ) aufgrund von Modulalterung,
- Erhöhung des thermischen Widerstandes des TEG ( $R_{\text{th,TEG}}$ ),
- Erhöhung des Gegendrucks der HGWÜ ( $\Delta p_{\text{HGWÜ}}$ ) und der KMWÜ ( $\Delta p_{\text{KMWÜ}}$ ).

Diese haben Einfluss auf den resultierenden Systemnutzen. Aufgrund der hohen Temperaturdifferenzen und dynamischen Temperaturschwankungen wird, trotz Verwendung einer hochintegrierten TEG-Bauweise, eine Reduktion der Modulwirkungsgrade und der TEG-Ausgangsleistung im Zeitverlauf erwartet. Ein relevanter Wirkungsgradabfall der Leistungselektronik wird im betrachteten Zeithorizont nicht erwartet. Eine Erhöhung des thermischen Widerstandes des TEG im Zeitverlauf ist begründet durch steigende Kontaktverluste der Module und der WÜ, z. B. durch Ablagerungsbildungen. Typische Foulingwiderstände<sup>115</sup> können Tabelle D.6 entnommen

Tabelle D.6.: Übersicht typischer Foulingwiderstände mit Relevanz für diese Arbeit

Bezeichnung	Foulingwiderstand $R_f$ [m <sup>2</sup> K/W]	Quelle
Kühlkreislauf (aufbereitet; < 120 °C)	0,00018–0,0002	[113]
Ethylen-Glykol-Lösungen	0,000352–0,0004	[113, 161]
Motor Kühlwasser (in Platten-WÜ)	0,000052	[113, 159]
Motorabgas (allgemein)	0,0018–0,002	[159, 161]
Dieselabgase	0,00176–0,006	[287]
Dieselabgase (in Rippen-WÜ in der AGR-Strecke)	0,008–0,012	[160]
Erdgasabgase	0,001–0,005	[161]

<sup>114</sup>Die *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) hat zum Beispiel Radioisotopengeneratoren mit einer jährlichen Leistungsreduzierung im Bereich von 1,4–4,2 % und einer Betriebsdauer von bis zu 20 Jahren eingesetzt (je nach Mission und Systemgeneration sowie bei einer jährlichen thermischen Leistungsreduktion des Plutoniums von rund 0,8 %; vgl. [285, 286]). Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen, wie z. B. konstante Heißeitentemperatur, Systemauslegungen und Betriebscharakteristiken sind die Ergebnisse jedoch nicht mit denen dieser Arbeit vergleichbar.

<sup>115</sup>Im Allgemeinen basieren die Angaben auf Überschlagswerten vor dem Jahr 1950 der TEMA [288], welche die Widerstände überschätzen und WÜ-Entwicklungsfortschritte nicht berücksichtigen (vgl. [113]).

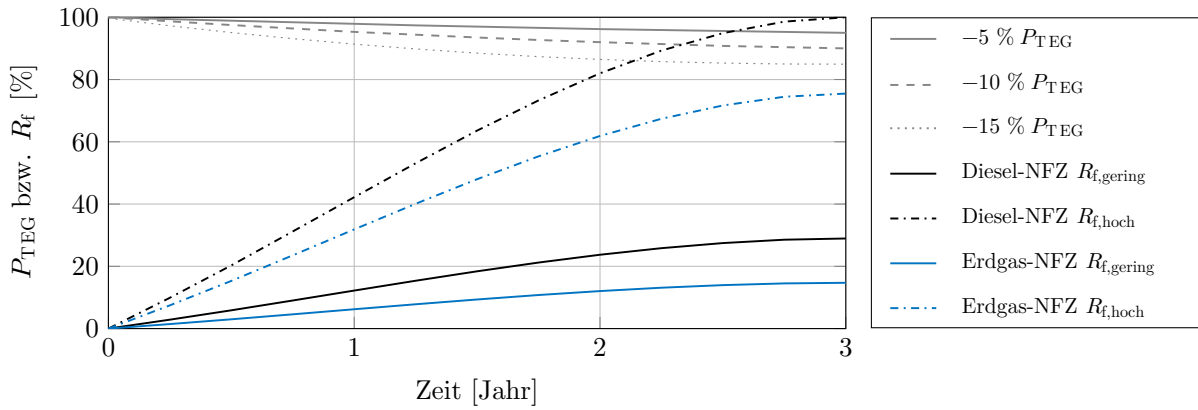


Abbildung D.19.: Modellannahmen zur Reduktion der TEG-Leistung und zur Entwicklung der Ablagerungsbildung in den Wärmeübertragern mit der Zeit

werden. Aufgrund der auftretenden Ablagerungen in den WÜ wird sich der Gegendruck in Abhängigkeit von der Geometrieänderung und den Betriebsbedingungen erhöhen. Die Modellannahmen für die zeitabhängige Entwicklung der prozentualen TEG-Leistung und der Foulingwiderstände  $R_f$  der WÜ sind in Abbildung D.19 dargestellt. Es werden drei Szenarien je Anwendung untersucht: geringe ( $-5\% \Delta P_{\text{TEG}}$ ), mittlere ( $-10\% \Delta P_{\text{TEG}}$ ) und hohe Leistungsreduktion ( $-15\% \Delta P_{\text{TEG}}$ ) in der Einsatzdauer. 100 Prozentpunkte entsprechen der mittleren TEG-Ausgangsleistung für das jeweilige TEG-Ergebnisdesign  $TCO_{\text{min}}$  (s. Tabelle D.7.5 im Anhang). Die zeitabhängige Entwicklung der WÜ-Ablagerungen wird nach dem Modellansatz<sup>116</sup> von Kern und Seaton [289] angenommen. Die zeitabhängige netto Foulingrate  $\varphi_f$  ist anhand der Ablagerungsrate  $\varphi_{f,\text{zu}}$  und der Abtragsrate  $\varphi_{f,\text{ab}}$  definiert:

$$\varphi_f(t) = \varphi_{f,\text{zu}}(t) - \varphi_{f,\text{ab}}(t) \quad (\text{D.1})$$

Mit Verständnis dieser Gleichung lässt sich die Entwicklung des asymptotischen Foulingwiderstands  $R_f$  als Funktion der Zeit  $t$  beschreiben:

$$R_f = R_f^* \cdot [1 - \exp(-b^* \cdot t)] \quad (\text{D.2})$$

Dabei stellen  $R_f^*$  den asymptotischen Foulingwiderstand und  $b^*$  die Zeitkonstante dar. Die Widerstände haben in der Abbildung einen degressiven Verlauf über der Zeit und münden in asymptotische Ablagerungsniveaus (vgl. [113, 159]). Hierbei werden zwischen zwei Szenarien unterschieden: geringen ( $R_{f,\text{gering}}$ ) und hohen Ablagerungen ( $R_{f,\text{hoch}}$ ). 100 Prozentpunkte entsprechen einem zusätzlichen Widerstand von  $0,05 \text{ K/W}$  im TEG. Dafür wird ein spezifischer Foulingwiderstand der HGWÜ von  $0,012 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  für ungefilterte Diesel-Abgase in der AGR-Strecke berücksichtigt (vgl. [160]). Dies stellt den ungünstigsten Fall nach der Einsatzdauer für Diesel-NFZ dar.

<sup>116</sup>Es existieren unterschiedliche Fouling-Modelle (vgl. bspw. [113, 159]), die die Zunahme der Ablagerungen und des Foulingwiderstands als linear, asymptotisch oder als Sägezahnverlauf beschreiben.

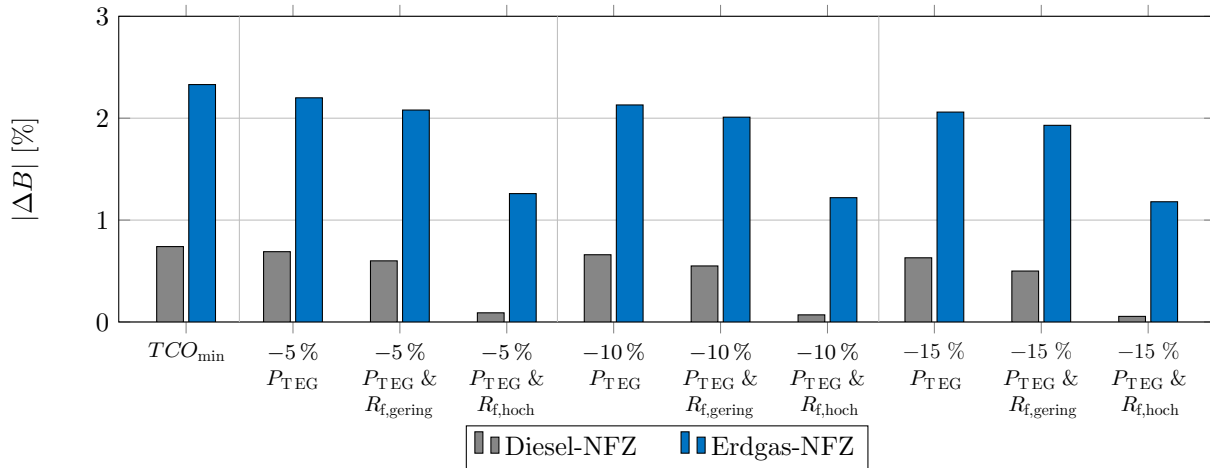


Abbildung D.20.: Einfluss des Langzeitbetriebs des TEG-Systems auf die Kraftstoffreduktion am Beispiel des Referenzfahrzyklus WHVC<sub>40t</sub>

Die Ergebnisse der Untersuchungen anhand des jeweiligen Einflusses auf die Kraftstoffreduktion werden in Abbildung D.20 am Beispiel des Fahrzyklus WHVC<sub>40t</sub> dargestellt. Qualitativ nimmt mit zunehmender Leistungsreduktion und zunehmendem Foulingwiderstand die Kraftstoffreduktion ab. Im ungünstigsten Fall wird diese im Diesel-NFZ um 91 % verringert auf ein Niveau von 0,06 %. Im Erdgas-NFZ verringert sich die Kraftstoffreduktion um bis zu 50 % auf ein Niveau von 1,2 %.

Der Einfluss des Langzeitbetriebs ist als groß zu bewerten. In beiden Anwendungsszenarien kann die Amortisationszeit über 3 Jahre betragen und damit die Zielsetzung dieser Arbeit überschreiten. Zumindest für das Erdgas-NFZ ist das Szenario der hohen Leistungsreduktionen um 15 % eine zu konservative Annahme. Die experimentellen Ergebnisse zur Langzeitstabilität der Module (s. Abschnitt 7.3) und die Herstellerangaben lassen bessere Ergebnisse erwarten. Da in dieser Arbeit der Ausgang der AGN und nicht die AGR-Strecke für die TEG-Integration gewählt wurde (s. Abschnitt 6.1.1), wird das Szenario mit geringen Ablagerungen  $R_{f,gering}$  als Ergebnis dieser Analyse herangezogen.

Die Abhängigkeit der Foulingwiderstände von den Betriebsbedingungen wurde in dieser Untersuchung vereinfacht abgeschätzt. Als weiterer Forschungsbedarf sollten diese Modellannahmen experimentell validiert werden. Insbesondere das zeitabhängige Foulingverhalten unterliegt nach [113] erheblichen Einflüssen der Betriebsbedingungen, wie z. B. Strömungsgeschwindigkeit, Fluidtemperatur und -zusammensetzung sowie Wärmestromdichte.

Maßnahmen zum Umgang mit Alterungsvorgängen beziehungsweise spezifischer mit den auftretenden Ablagerungen stellen Sicherheitszuschläge bei der TEG-Auslegung dar. Diese bedingen nach [113, 159] die Überdimensionierung der WÜ, konstruktive Optimierungsmaßnahmen oder Verminderungsstrategien.

### D.7.6.2. Einfluss der Fahrzeugrandbedingungen

Die ermittelten Fahrzeugrandbedingungen, insbesondere der **Abgas- und Kühlmittelenthalpien** (s. Abschnitt 4.2), stellen relevante Eingangsgrößen der ganzheitlichen Simulationsumgebung dar. Diese unterliegen gewissen Unsicherheiten, wie z. B. Messabweichungen und -fehlern. Daher wird der Einfluss von Temperatur- und Volumenstromvariation des Abgases und Kühlmittels im Variationsbereich von  $-10\%$  bis  $10\%$  im Vergleich zur Ausgangsbasis untersucht. Die Enthalpien der Fahrzeugrandbedingungen und deren Änderungsbereiche sind in Tabelle D.7 angegeben.

Tabelle D.7.: Verfügbare Enthalpien als Mittelwerte des  $WHVC_{40t}$  und Variation dieser Fahrzeugrandbedingungen (Ausgangsbasis grau hinterlegt)

Fahrzeug	Referenzzyklus	Parameter der Sensitivitätsuntersuchung				
		Veränderung [%]	$\bar{\vartheta}_{AGN, \text{ein}}$ [°C]	$\bar{m}_{AGN}$ [kg/s]	$\bar{\vartheta}_{KM, \text{ein}}$ [°C]	$\bar{V}_{KM}$ [dm <sup>3</sup> /s]
Diesel-NFZ	$WHVC_{40t}$	-10	219	0,15	46	0,3
		0	243	0,17	51	0,33
		10	267	0,19	56	0,36
Erdgas-NFZ	$WHVC_{40t}$	-10	587	0,09	47	0,29
		0	652	0,1	52	0,32
		10	720	0,11	57	0,35

Die Ergebnisse der Untersuchung sind Abbildung D.21 zu entnehmen. Der jeweils größte Einfluss auf die Kraftstoffreduktion hat die abgasseitige Eingangstemperatur  $\vartheta_{AG, \text{ein}}$ . Den zweitgrößten Einfluss stellt die kühlmittelseitige Eingangstemperatur  $\vartheta_{KM, \text{ein}}$  dar. Die Einflüsse der jeweiligen Fluidströme ( $\vartheta_{AGN, \text{ein}}$ ,  $\dot{V}_{KM}$ ) sind vergleichsweise gering.

Im Diesel-NFZ resultiert Maximum aller Eingangsparameter in einer Kraftstoffreduktion von 1,1 %. Im Minimum sind es 0,6 %. Damit liegt die Amortisationszeit bei 1,3 Jahren und 2,6 Jahren.

Im Erdgas-NFZ hat die Bypassregelung einen großen Einfluss bei Änderung der Eingangsparameter, insbesondere bei zunehmenden Temperaturen. Anders als beim Diesel-Pendant führt auch die positive Veränderung der abgasseitigen Eingangstemperatur zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch, was auf die Limitierung der Kühlsystemkapazität und der notwendigen Bypassöffnung zurückzuführen ist. Die Variation von der abgasseitigen Eingangstemperatur um  $-10\%$  führt zu einer Kraftstoffreduktion von 1,9 % bei einem Zeitanteil der Bypassöffnung von 1,8 %. Bei einer Steigerung um 10 % werden nur 1,2 % ermittelt, da der Zeitanteil der Bypassöffnung auf 64, % ansteigt. Die Amortisationszeit beträgt 1,3 Jahre bzw. 2,7 Jahre. Die Ausgangsbasis stellt somit mit einer Bypassöffnung von 2,8 % der Zykluszeit das Optimum dar und repräsentiert bei gleichzeitiger Änderung aller Eingangsparameter das Maximum der Kraftstoffreduktion. Das Minimum liegt bei 1 %. Die Amortisationszeit beträgt 3,7 Jahre.

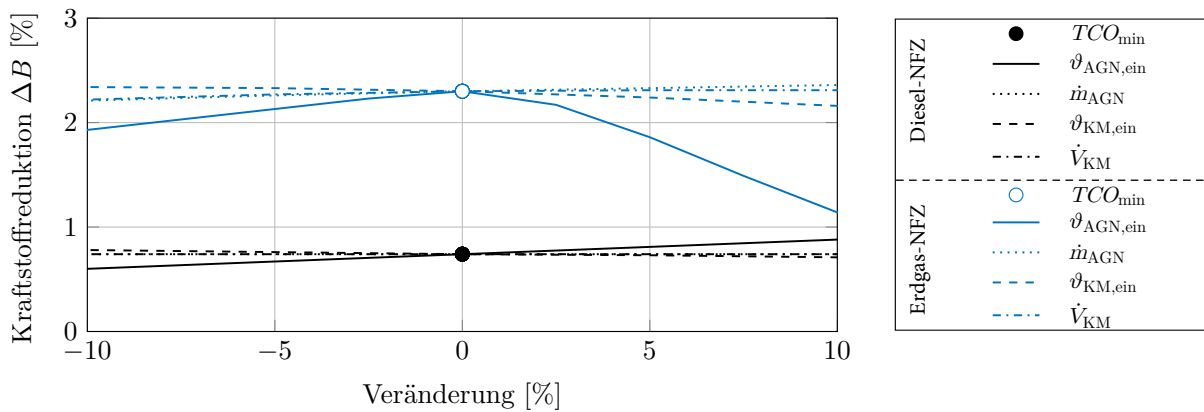


Abbildung D.21.: Einfluss der Fahrzeugrandbedingungen auf die Kraftstoffreduktion am Beispiel des  $WHVC_{40t}$

Der Einfluss der Fahrzeugrandbedingungen ist als groß zu bewerten. Darüber hinaus kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die konservativen Annahmen alle gleichzeitig eintreten und sich die Amortisationszeit in der beschriebenen Weise erhöht.

### D.7.6.3. Einfluss auf das Kaltstartverhalten

Die Änderung des Warmlaufverhaltens durch den Wärmeeintrag des TEG-Systems beim Kaltstart wurde in dieser Arbeit bislang nicht berücksichtigt. Bei realen Fahrscenarien ist dies ein seltener Anwendungsfall und für die zulassungsrelevanten Fahrzyklen von geringer Bedeutung. Der Prüfzyklus WHTC wird zuerst im Kaltstart durchgeführt, d. h. alle Komponenten des Motorenprüfstandes einschließlich der Abgasnachbehandlung werden auf eine Umgebungstemperatur von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperiert (vgl. [36]). Nach einer zehnminütigen Abkühlphase wird der Zyklus erneut im Warmstart durchlaufen. Lediglich die Einhaltung der Abgasnorm<sup>117</sup> wird geprüft (s. 4.2.2). Aus diesem Grund wurde das TEG-System in dieser Arbeit auf realistische Fahrsituationen, wie sie im Kundenbetrieb vorkommen, ausgelegt und bewertet. Für NFZ-Hersteller kann das System und dessen Einfluss auf die Abgasnormen bei Kaltstarts von Vorteil sein.

Die hohe thermische Trägheit der abgasführenden Komponenten bedingt große Unterschiede beim Kaltstart im Vergleich zum Warmstart (vgl. [36]). Für das Diesel-NFZ wird beispielsweise das gleiche Temperaturniveau am Eingang der SCR zu Beginn des Warmstarts im WHTC erst nach etwa 900 s beim Kaltstart erreicht. Zudem ist die AGR-Klappe beim Warmstart von Beginn an geöffnet, während diese beim Kaltstart erst nach rund 600 s öffnet.

Ausgehend von ermittelten Warmlaufphasen nach dem Kaltstart des jeweiligen Referenz-NFZ ist das Potential der TEG-Systeme anhand der Verkürzung der Warmlaufphase in Abbildung D.22 dargestellt. Das kleinere Kühlsystem des Erdgas-NFZ erreicht in kürzerer Zeit die Betriebstemperatur von  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , gemessen vor dem Thermostat im

<sup>117</sup> $\text{CO}_2$ -Emissionen und der Kraftstoffverbrauch sind bislang kein Bestandteil des Prüfprozesses.

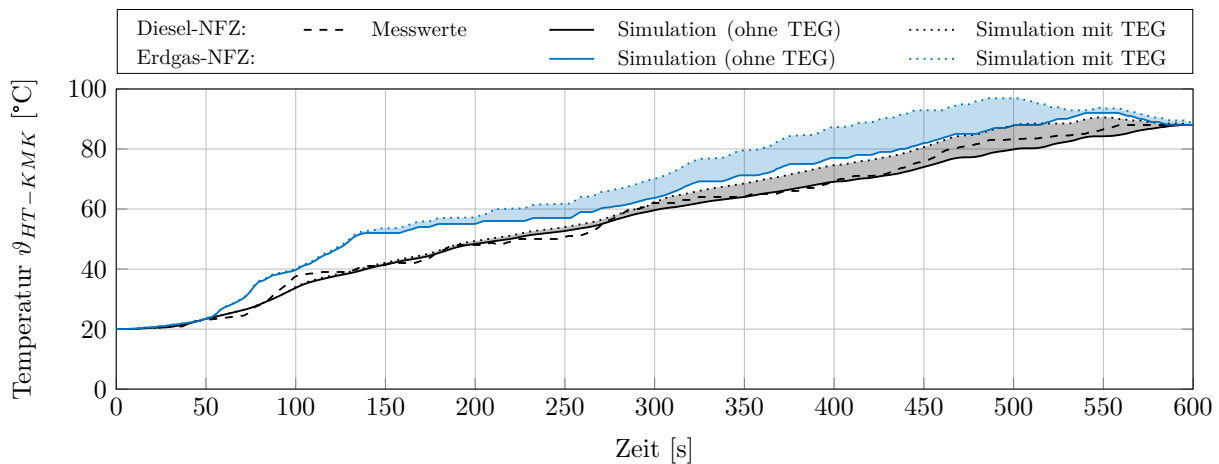


Abbildung D.22.: Einfluss der TEG-Systeme auf die Warmlaufphasen der Referenzfahrzeuge (Verkürzung der Warmlaufphasen farbig hinterlegt)

HT-KMK, als dies beim Diesel-NFZ der Fall ist. Zudem sind die Wandwärmeverluste der VKM und die Wandwärmeströme ins Kühlmittel größer. Die Simulationsumgebung wurde mit Hilfe von Messdaten von typischen Kaltstarts des Diesel-NFZ validiert. Bei integriertem TEG-System werden die ausgewählten Warmlaufphasen bis zur Erreichung der Betriebstemperatur der VKM um rund 60s im Diesel-NFZ und rund 100s im Erdgas-NFZ verkürzt.

Das zusätzliche Potential bei der Verkürzung der Warmlaufphase ist in Tabelle D.8 dargestellt. Für das Diesel-NFZ wird im  $WHVC_{40t}$  mit dem TEG-Ergebnisdesign  $TCO_{\min}$  eine zusätzliche Kraftstoffreduktion  $|\Delta B_{\text{Warmlauf}}|$  von bis zu 0,9% ermittelt. Einschließlich des Anteils durch die elektrische Leistungseinspeisung (s. Tabelle 4.2) resultiert die Kraftstoffreduktion  $|\Delta B_{\text{ges}}|$  in 1,6%. Im Erdgas-NFZ liegt die zusätzliche Kraftstoffreduktion durch die verkürzte Warmlaufphase bei bis zu 1,4%. Die größere Reduktion als im Diesel-Pendant ist durch die deutlich höheren Abgasenthalpien und den größeren Wärmeeintrag ins Kühlsystem begründet. Für die Realfahrt  $SHHS_{40t}$  fällt in beiden Anwendungen das zusätzliche Potential mit weniger als 0,1% vernachlässigbar gering aus.

Das Ausmaß des Einflusses des TEG-Systems auf das Kaltstartverhalten hängt vom Fahrprofil und insbesondere von dessen Zeitdauer ab.

Tabelle D.8.: Ergebnisübersicht des Einflusses der TEG-Systeme auf die Warmlaufphasen der Fahrzeuge

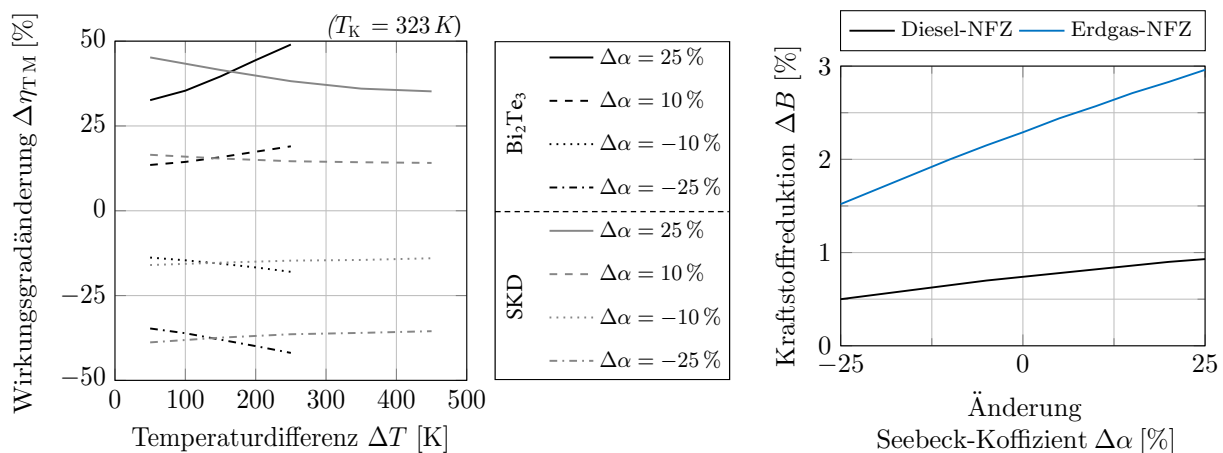
Fahrzeug	Referenzzyklus / -strecke	$ \Delta B_{\text{Warmlauf}} $	$ \Delta B_{\text{ges}} $
		[%]	[%]
Diesel-NFZ	$WHVC_{40t}$	0,9	1,6
	$SHHS_{40t}$	< 0,1	< 1,3
Erdgas-NFZ	$WHVC_{40t}$	1,4	3,7
	$SHHS_{40t}$	< 0,1	< 2,2

#### D.7.6.4. Einfluss des thermoelektrischen Materials und Moduls

Neben dem Wärmeübertrager stellt das Modul und das darin enthaltene TE-Material für die TEG-Funktion die entscheidende Komponente dar und somit ist die Analyse von dessen Einfluss von hoher Bedeutung. Dies gilt sowohl für die Varianz der Materialqualität unterschiedlicher Fertigungsarten beim Herstellungsprozess, zukünftigen Steigerungen der Materialgüte oder reduzierte Materialqualität, z. B. aufgrund von Alterung.

##### Thermoelektrisches Material

Für die Anwendungen der Referenzfahrzeuge wurden NT-TEM der Materialklasse  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und segmentierte HT-TEM aus  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  und SKD verwendet ( $zT_{\max, \text{Bi}_2\text{Te}_3} = zT_{\max, \text{SKD}} \approx 1$ ; s. Abschnitt 6.3.3). Basierend auf den Grundlagen (s. Abschnitt 2.3.2.5), den sich über die Jahre verbessernden TE-Materialien (s. Abbildung 2.5) und der Einschätzung des Autors erscheinen maximale Gütegrade von rund 1,5 als zukünftig realistisch. Um diesen erhöhten Wert zu erreichen, muss der Seebeck-Koeffizient der verwendeten TE-Materialien nach Gleichung 2.8 um rund 25 % erhöht werden. Die Änderung des Seebeck-Koeffizienten  $\Delta\alpha$  erfolgt in der Sensitivitätsanalyse im Bereich von  $-25\%$  bis  $25\%$ . Dies verändert den Wirkungsgrad des TE-Materials (s. Gleichung 2.12) im Modul und damit die TEG-Ausgangsleistung und die resultierende Kraftstoffreduktion. Die Änderungen des Wirkungsgrads  $\eta_{\text{TM}}$  bei Variation des Seebeck-Koeffizienten sind über der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  in Teilabbildung D.23 (a) dargestellt. Aufgrund der sich unterscheidenden temperaturabhängigen Materialparameter besitzen die Kurven des  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  progressive und des SKD regressive Verläufe bei positiven Ordinatenwerten der Abbildung. Dieses Verhalten ändert sich bei negativen Werten. Für die ganzheitliche TEG-Simulationsumgebung werden Kennfelder des Wirkungsgrads (in Abhängigkeit von  $T_{\text{H}}$ ,  $T_{\text{K}}$  sowie  $\alpha$ ) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Teilabbildung D.23 (b) illustriert. Es zeigt sich, dass die Erhöhung des Seebeck-Koeffizienten und damit des Wirkungsgrads zur



(a) Einfluss auf den Materialwirkungsgrad

(b) Einfluss auf die Kraftstoffreduktion

Abbildung D.23.: Einfluss der Variation vom Seebeck-Koeffizient  $\alpha$  des TE-Materials auf den Materialwirkungsgrad und die Kraftstoffreduktion am Beispiel des  $\text{WHVC}_{40\text{t}}$

erwarteten weiteren Kraftstoffreduktion führt. Im betrachteten Variationsbereich steigt diese für das Diesel-NFZ um 86 % von 0,5 % auf 0,9 % im Referenzzyklus WHVC<sub>40t</sub>. Die mittlere TEG-Leistung erhöht sich von 234 W auf 458 W. Die Amortisationszeit variiert zwischen 2,8 Jahre und 1,4 Jahre. Aufgrund des höheren Ausgangsniveaus erhöht sich die Reduktion für das Erdgas-NFZ um 95 % im Bereich von 1,5–3 %. Die Leistung erhöht sich von 952 W auf 1856 W. Die Amortisationszeit beträgt 0,7 Jahre bzw. 1,7 Jahre. Die Variation des TE-Materials hat somit einen großen Einfluss auf die Ergebnisgrößen.

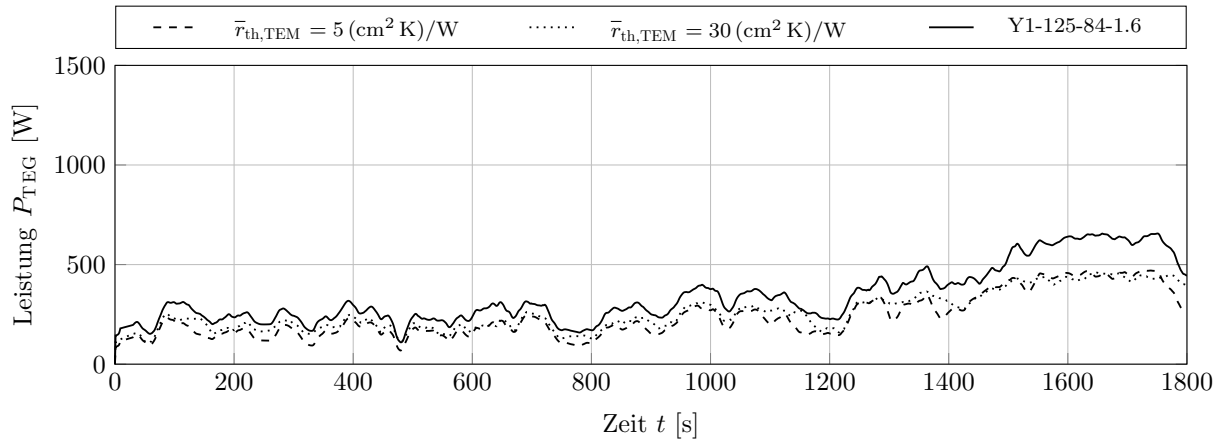
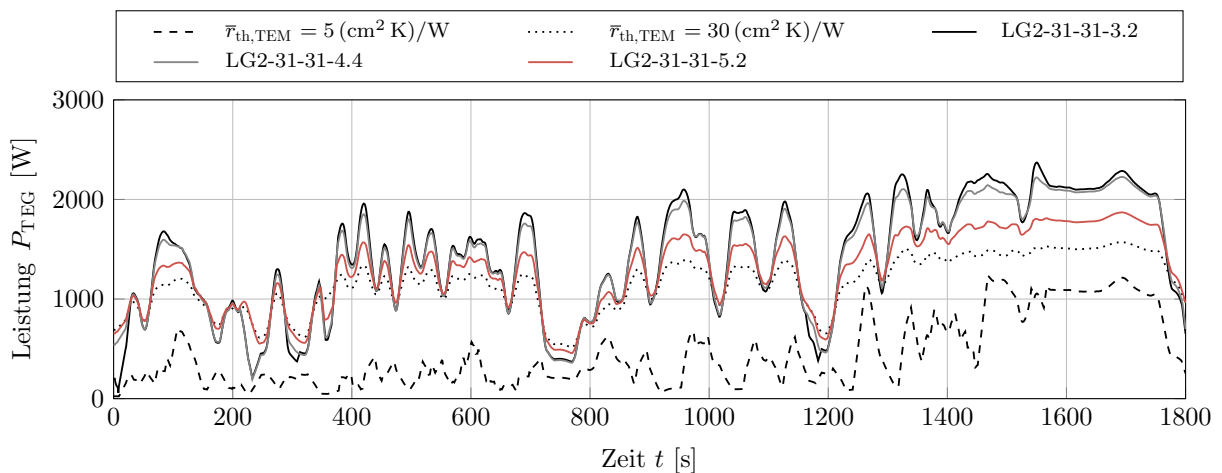
### Thermoelektrisches Modul

Zur Vollständigkeit wird der Einfluss des Moduls anhand der Variation von dessen thermischem Widerstand erläutert. Für die jeweilige Anwendung wird der spezifische Widerstand  $\bar{r}_{\text{th,TEM}} = 5 \dots 30$ <sup>118</sup> (cm<sup>2</sup> K)/W der Module variiert.

Die jeweiligen Ergebnisse sind Abbildung D.24 anhand der TEG-Leistung aufgetragen über die Zeit im Fahrzyklus WHVC<sub>40t</sub> zu entnehmen. Das NT-TEM mit der Bezeichnung Y1-125-84-1.6 (s. Tabelle 7.2) sowie segmentierte HT-TEM mit den Bezeichnungen LG2-31-31-3.2, LG2-31-31-4.4 und LG2-31-31-5.2 (s. Tabelle 7.3) werden zum Vergleich zur Untersuchung hinzugenommen. Im Diesel-NFZ wurde die Ausgangsbasis für das TEG-Design  $TCO_{\text{min}}$  mit Hilfe vom Modul Y1-125-84-1.6 ermittelt ( $\bar{r}_{\text{th,Y1-125-84-1.6}} = 8,8$  (cm<sup>2</sup> K)/W). Die vergleichsweise höchste mittlere TEG-Leistung wird mit 339 W im Fahrzyklus in Teilabbildung D.24(a) erkennbar. Für die beiden gewählten Extrema resultieren ähnliche Systemverhalten, abhängig vom Einfluss des geringen ( $\bar{r}_{\text{th,TEM}} = 5$  (cm<sup>2</sup> K)/W) bzw. hohen thermischen Widerstandes des Moduls ( $\bar{r}_{\text{th,TEM}} = 30$  (cm<sup>2</sup> K)/W) und damit des TEG. Die Kraftstoffreduktion ist um 0,2 Prozentpunkte bzw. um 0,1 Prozentpunkte geringer als in der Ausgangsbasis. Bei minimalem Widerstand wird beispielsweise eine geringere mittlere TEG-Leistung erreicht, da der Modulwirkungsgrad deutlich absinkt mit abnehmendem Widerstand ab unter 7 (cm<sup>2</sup> K)/W (s. Teilabbildung 7.7(a)). Für das Erdgas-NFZ sind analog die Ergebnisse in Teilabbildung D.24(b) dargestellt. Die Ausgangsbasis wurde mit Hilfe des TEM LG2-31-31-3.2 ermittelt ( $\bar{r}_{\text{th,LG2-31-31-3.2}} = 13,4$  (cm<sup>2</sup> K)/W)). Damit wird die vergleichsweise höchste mittlere TEG-Leistung von 1424 W erzielt. Mit ansteigendem thermischen Widerstand der Module LG2-31-31-4.4 (14,6 (cm<sup>2</sup> K)/W) und LG2-31-31-5.2 (24,4 (cm<sup>2</sup> K)/W) sinkt die mittlere Leistung, bei gleichzeitigem Anstieg der Systemkosten. Für die beiden gewählten Extrema resultieren unterschiedliche Systemverhalten. Das Modul mit maximalem Widerstand von 30 (cm<sup>2</sup> K)/W verhält sich ähnlich zu den Beispielmодulen, unter Berücksichtigung des Einflusses der höheren Widerstandscharakteristik. Das Modul mit einem minimalem Widerstand von 5 (cm<sup>2</sup> K)/W zeigt eine deutlich niedrigere mittlere TEG-Leistung von nur 443 W. Die Gründe dafür liegen in der deutlichen Verringerung des Modulwirkungsgrads (s. Teilabbildung 7.7(b))

<sup>118</sup>Das Minimum wird vom Autor als zukünftig realistisch bzw. der maximale Wert als noch relevant definiert, bevor die Modulkosten die Kosten-Nutzen-Relation zu dominieren beginnen.



(a) Ergebnisse des Diesel-NFZ mit NT-TEM (Materialklasse:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )(b) Ergebnisse des Erdgas-NFZ mit segmentierten HT-TEM (Materialklassen:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  & SKD)Abbildung D.24.: Einfluss des thermoelektrischen Moduls auf die elektrische TEG-Leistung der beiden Referenzfahrzeuge am Beispiel des  $\text{WHVC}_{40t}$ 

und an der Limitierung der Kühlsystemkapazität des gewählten NT-KMK. Durch die deutliche Verringerung des Widerstands des Moduls und damit des TEG steigt der Wärmestrom in das Kühlsystem derart an, dass die Bypassklappe nicht nur 2,8%, wie im Basisszenario, sondern 34% der Zeit geöffnet werden muss.

Die jeweilige Ausgangsbasis stellt wie erwartet das Optimum dar. Der negative Einfluss der Modulvariationen ist als groß zu bewerten. Bei einer ungünstigeren Auslegung sinkt die Kraftstoffreduktion im Diesel-NFZ um bis zu 0,2 Prozentpunkte und um bis zu 1,6 Prozentpunkte im Erdgas-NFZ.

### D.7.6.5. Einfluss der Wärmeübertrager

Gegenstand der Untersuchung ist im Folgenden der Einfluss des thermischen Widerstandes der Wärmeübertrager inklusive der jeweiligen Kontaktierung  $r_{\text{th},\text{WÜ}+\text{Kont}}$ . Die Variation erfolgt anhand der Änderung von diesem im Bereich von  $-25^{119}$  % bis 25 %. Dies verändert den Gesamtwiderstand des TEG ( $r_{\text{th},\text{TEG}}$ ), wobei derjenige vom TEM ( $r_{\text{th},\text{TEM}}$ ) konstant gehalten wird.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung D.25 dargestellt. In der Ausgangsbasis, d. h. bei 0 % Veränderung, liegt der spezifische thermische Widerstand der TEG-Designs auslegungsspezifisch bei  $16 \text{ (cm}^2\text{K)/W}$  (entspricht  $0,013 \text{ K/W}$ ) im Diesel-NFZ und bei  $20 \text{ (cm}^2\text{K)/W}$  (entspricht  $0,016 \text{ K/W}$ ) im Erdgas-NFZ. Qualitativ führt die Verringerung des Widerstandes der WÜ zur weiteren Reduktion des Kraftstoffverbrauches. Der Anteil der HGWÜ am Gesamtwiderstand des TEG beträgt über 85 % in beiden Anwendungen. Im Variationsbereich variiert die Kraftstoffreduktion im Bereich von 0,6–0,9 %. Die Amortisationszeit beträgt 2,2 Jahre bzw. 1,4 Jahre. Für das Erdgas-NFZ ändert sich die Verbrauchsreduktion im Bereich von 2–2,5 %. Die Amortisationszeit beträgt 1,2 Jahre bzw. 0,9 Jahre.

Die weitere Reduzierung des thermischen Widerstandes der WÜ wird beinahe ausschließlich durch die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten erreicht. Dies führt gleichzeitig zu einer Erhöhung des Gegendrucks. Die Effekte heben sich gegenseitig auf, sodass keine weitere Kraftstoffreduktion außerhalb der Sensitivitätsanalyse erzielt wird. Die Veränderung des thermischen Widerstands der eingesetzten Module  $r_{\text{th},\text{TEM}}$  ist zudem in der Abbildung ersichtlich. Die Veränderung des Modulwiderstandes führt zu keiner weiteren Verbesserung der Kraftstoffreduktion, wie in Abschnitt D.7.6.4 beschrieben.

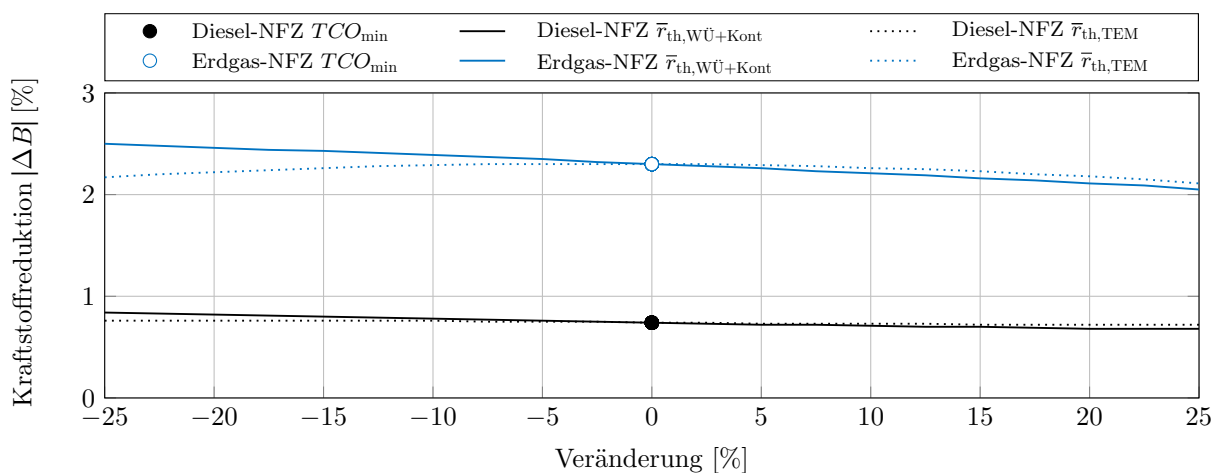


Abbildung D.25.: Einfluss der thermischen Widerstände der Wärmeübertrager und der thermoelektrischen Module auf die Kraftstoffreduktion am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub>

<sup>119</sup>Das Minimum wird vom Autor als zukünftig realistisch erachtet bei weiterer intensiver WÜ-Optimierung (ohne den Gegendruck zu erhöhen).

### D.7.6.6. Einfluss der Umgebungsrandbedingungen

Die Umgebungsrandbedingungen sind abhängig von Klima, Jahreszeit und Wetter. Für ein TEG-System im Fahrzeugeinsatz bedingt das insbesondere die Änderung des Zustandes der Luft bezüglich Temperatur sowie Dichte, Druck und Feuchte. Die experimentellen Fahrzeugmessungen ergaben keinen relevanten Einfluss der Variation von Luftdruck und Luftfeuchtigkeit auf die Abgasenthalpien oder den Kraftstoffverbrauch. Daher werden diese im Fortgang der Untersuchungen vernachlässigt.

Die Variation der Umgebungstemperatur hat relevanten Einfluss auf TEG-Systeme (vgl. bspw. [34, 58]). Der Kraftstoffverbrauch wird von temperaturabhängigen Reibungskomponenten des Fahrzeuges und die Abgasenthalpien von der verfügbaren Ansauglufttemperatur der VKM beeinflusst. Zudem wird die Kühlsystemkapazität beeinträchtigt. Die Umgebungstemperatur wird im Rahmen der typischerweise betrachteten Temperaturrendbedingungen der gemäßigten Klimazone Europas von  $-20\text{ °C}$  bis  $40\text{ °C}$  variiert (vgl. bspw. [34, 37]). Die Ausgangstemperatur beträgt  $20\text{ °C}$ . Der mit zunehmender Umgebungstemperatur abnehmende Gesamtverbrauch wird berücksichtigt, wie in Teilabbildung D.26 (a) dargestellt. Zudem werden die sich ändernden Abgasenthalpien ( $< 0,5\%$ ) und die jeweils verfügbare Kühlsystemkapazität einkalkuliert. Letztere stellt insbesondere für das Erdgas-NFZ bei erhöhter Umgebungstemperatur eine Limitierung dar und führt zur Öffnung des Bypasssystems des TEG.

Die Kraftstoffreduktion steigt jeweils um bis zu 0,1 Prozentpunkte mit zunehmender Umgebungstemperatur im Vergleich zur Ausgangsbasis, wie in Teilabbildung D.26 (b) ersichtlich ist. Der Variationsbereich liegt im Diesel-NFZ zwischen 0,6–0,8 %, woraus eine Amortisationszeit von 2,2 Jahren bzw. 1,6 Jahren resultiert. Im Erdgas-NFZ liegt dies im Bereich von 2,2–2,4 %. Die Amortisationszeit beträgt 1,1 Jahre bzw. 0,9 Jahre.

Im Allgemeinen ist die höhere Kraftstoffreduktion begründet durch den reduzierten Gesamtverbrauch, der sich im betrachteten Temperaturbereich um 16 % verringert.

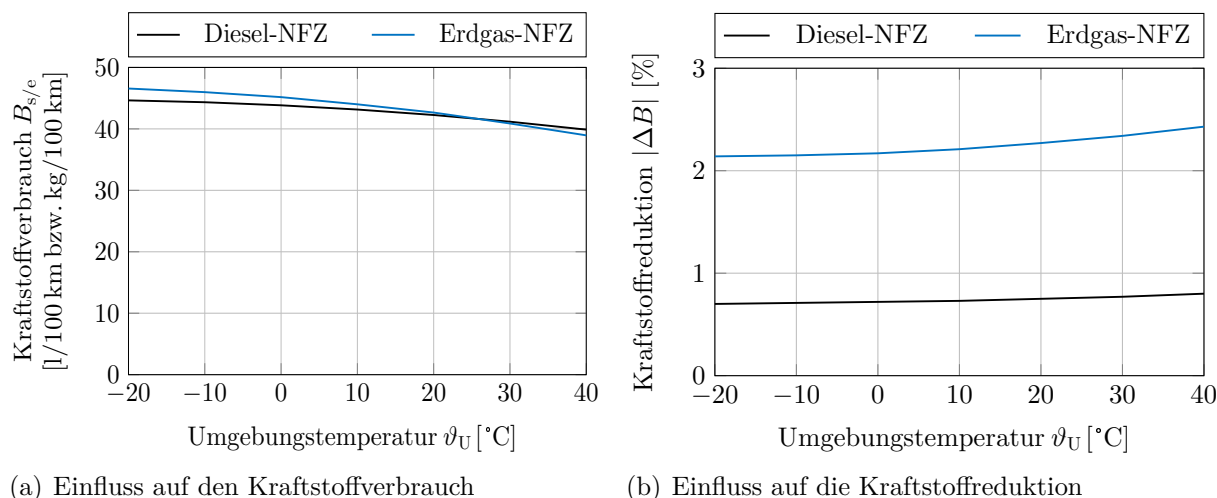


Abbildung D.26.: Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Kraftstoffverbrauch der NFZ sowie die Kraftstoffreduktion am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub>

### D.7.6.7. Einfluss der elektrischen Bordnetztopologie und Elektronik

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bietet eine Möglichkeit zukünftige Fahrzeuge effizienter zu gestalten und Nebenaggregate bedarfsgerechter und unabhängig von der VKM zu betreiben. Für NFZ beträgt das Potential der Kraftstoffreduktion bis zu 8% (vgl. [15, 45]). Im Folgenden wird exemplarisch der Einfluss einer gesteigerten Elektrifizierung auf die Ergebnisgrößen des TEG-Systems untersucht.

#### Steigerung der elektrischen Generatorleistung

Die elektrischen Generatoren der Referenzfahrzeuge erzeugen maximale Ausgangsleistungen von rund 3 kW. Die Umstellung von einem 24 V- auf ein 48 V-Bordnetz führt zu einer gesteigerten elektrischen Erzeugerleistung von über 5 kW bei gleichbleibenden Nennströmen. Größere elektrische Maschinen weisen höhere Wirkungsgrade auf, wie in Abschnitt 5.1.2.4 beschrieben.<sup>120</sup> Nach [290] wird angenommen, dass der Spitzenwirkungsgrad mit zunehmender Größe des Generators steigt. Für diese Untersuchung wird ein Anstieg von 77% auf 85% angenommen. Der Einfluss der Veränderung des Wirkungsgrades wurde im Abschnitt 8.4.2 beschrieben. Zudem wird angenommen, dass die Lenkhilfpumpe und der Luftpresser elektrifiziert werden. Der jeweilige Leistungsbedarf ist Tabelle B.9 im Anhang zu entnehmen. Der mechanische Leistungsbedarf der beiden Nebenaggregate entfällt. Der elektrische Leistungsbedarf des Fahrzeuges steigt durch den größeren elektrischen Generatoren.

Die Ergebnisse des Einflusses der Elektrifizierung werden anhand der Kraftstoffreduktion und der Amortisationszeit in Tabelle D.9 aufgezeigt. Im Allgemeinen gilt, dass die Elektrifizierung aufgrund der reduzierten Lastanforderung an der Antriebswelle einen verringerten Gesamtverbrauch bedingt. Im Fahrzyklus WHVC<sub>40t</sub> beträgt die Kraftstoffreduktion unter den genannten Annahmen und mit der gleichen Abgasenthalpie wie im Basisszenario bis zu 5,6%. Im Vergleich dazu führen die gesteigerten Generatorwirkungsgrade zu kleineren Verbrauchsreduktionen, wie im Abschnitt 8.4.2 beschrieben. Die relative Nettoerduktion  $|\Delta B|$  erhöht sich im Erdgas-NFZ

Tabelle D.9.: Einfluss des gesteigerten Elektrifizierungsgrads auf die TEG-Ergebnisgrößen am Beispiel des WHVC<sub>40t</sub> (Ausgangsbasis grau hinterlegt)

Fahrzeug	$P_{G,max}$ [kW]	Sensitivitätsuntersuchung		
		Veränderung [%]	$ \Delta B $ [%]	$t_A$ [Jahr]
Diesel-NFZ	> 3	0	0,7	1,8
	> 5	150	0,7	1,9
Erdgas-NFZ	> 3	0	2,3	1
	> 5	150	2,5	1,1

<sup>120</sup>Beispielsweise verändert sich durch eine Verdoppelung der linearen Abmessungen nach [290] das Maschinengewicht mit dritter Potenz, die Querschnitte jedes Magnetpols und Ankerleiters aber um das 4-fache und die Leistungsfähigkeit um das 16-fache. Die volumetrisch doppelt so große Maschine leistet im Verhältnis zu ihrem Gewicht doppelt so viel.

um 0,2 Prozentpunkte auf 2,5 %, da diese als Anteil des Absolutwertes vom verringerten Gesamtverbrauch ermittelt wird. Im Diesel-NFZ heben sich die gegenläufigen Effekte nahezu auf. Die Amortisationszeit verlängert sich jeweils um 0,1 Jahre.

Der Nutzen von TEG-Systemen nimmt mit höheren Generatorwirkungsgraden und geringerem Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge ab. Die Umstellung auf ein 48 V-Bordnetz hat keinen großen Einfluss auf die relevanten TEG-Ergebnisgrößen.

### **Steigerung der Speicherkapazität**

Die verfügbaren Abgastemperaturen sind im Diesel-NFZ zu gering, um mit den bislang verfügbaren NT-Modulen derart hohe Leistungen zu erzeugen, die den elektrischen Bordnetzbedarf des NFZ übersteigen. Für das Erdgas-NFZ ist dies jedoch der Fall (s. Abschnitt 8.3.5). Beispielsweise liegt die mittlere TEG-Leistung des TEG-Ergebnisdesigns mit Zielsetzung  $TCO_{\min}$  auf der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> mit rund 660 W über dem angenommenen Bordnetzbedarf (s. Abschnitt 5.1.2.4). Unter den getroffenen Annahmen des Batterieladezustands bei Abfahrt  $SOC_{t0}$  und der Batteriekapazität von 225 Ah des Referenzfahrzeuges kann zwangsläufig nach einer gewissen Fahrzeit die gewandelte Energiemenge nicht mehr gespeichert werden. Die Vergrößerung der Batteriekapazität um 60 Ah würde auf der Referenzstrecke SHHS<sub>40t</sub> die Nettokraftstoffreduktion weitere 0,4 Prozentpunkte auf 2,5 % erhöhen. Für das Ergebnisdesign mit Zielsetzung  $B_{\min}$  ist im gleichen Fahrscenario eine Vergrößerung um bis zu 80 Ah erforderlich. Damit würde die Nettoerduktion um 0,5 Prozentpunkte auf 2,6 % ansteigen (s. Teilabbildung 8.6 (c)).

Die Erhöhung der Batteriekapazität im Bereich von 60–80 Ah führt zu einem zusätzlichen Gewicht im Bereich von mindestens 25–32 kg (Annahmen s. Abschnitt 2.1.2.4), was den Kraftstoffverbrauch um rund 0,05 % erhöht. Die Bauraumproblematik stellt das schwierigere zu lösende Problem dar. Moderne SNFZ verfügen über keinen freien Bauraum für die Integration einer zusätzlichen Speicherkapazität.

Im Falle, dass die mittlere TEG-Ausgangsleistung den Bordnetzbedarf übersteigt, sollte der Leistungsbedarf der Verbraucher und nicht die Speicherkapazität erhöht werden. Auf diese Weise können die höchsten Kraftstoffeinsparungen erzielt werden.

### **Optimierungspotentiale der Leistungselektronik**

Diese Option bedingt zumeist die Lösung des Zielkonflikts aus geringen Stückkosten und Bauteilgewicht, kompaktem Design bei gleichzeitig hohen Wirkungsgraden. Am Beispiel der Leistungselektronik des TEG-Systems im Erdgas-NFZ bewirkt ein Erhöhung des Wirkungsgrades auf das theoretische Maximum von 100 % eine weitere Steigerung der Kraftstoffreduktion um bis zu 8 % (s. Abbildung 8.6). Das entspricht 0,2 Prozentpunkte. Höhere Wirkungsgrade und Leistungsdichten führen jedoch in der Regel zu höheren Komponentenkosten, was bislang in der Fahrzeugtechnik auf wenig Akzeptanz trifft.

#### D.7.6.8. Einfluss des ausgewählten Kühlmittels

Für die TEG-Auslegung ist der KMWÜ von untergeordneter Bedeutung, wie in Abschnitt 6.3.2 angeführt. Der Einfluss des Kühlmittelgemisches soll nachfolgend anhand der Variation des Mischungsverhältnisses<sup>121</sup> in Schritten von 0–60<sup>122</sup> Gewichtsprozent (Gew.-%) Ethylenglykol beschrieben werden. Die Untersuchung weiterer Kühlmittelalternativen, wie gasförmige oder flüssige Kühlmittelgemische, z. B. Wasserstoff in Form von kryogener Kühlung, ist aufgrund bislang fehlender Fahrzeuganwendung nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Variation des Kühlmittelgemischs einen vernachlässigbaren geringen Einfluss hat. Die Kraftstoffreduktion variiert um weniger als 1,5 % für beide Referenzfahrzeuge im Fahrzyklus WHVC<sub>40t</sub>. Im Allgemeinen steigt der Nutzen des TEG mit abnehmendem Anteil des Ethylenglykols, begründet u. a. durch die höhere spezifische Wärmeleitfähigkeit und Dichte des eingesetzten Kühlmittels (s. Abbildung C.2 im Anhang). Für das Diesel-NFZ steigt die mittlere TEG-Leistung um bis zu 5 W, im Erdgas-NFZ sind es maximal 20 W im Fahrzyklus.

---

<sup>121</sup>Als Standard dieser Arbeit ist ein Mischungsverhältnis der Anteile von 50:50 implementiert.

<sup>122</sup>Die weitere Erhöhung bspw. auf 70 Gew.-% ist aus technischer Sicht kontraproduktiv (vgl. [38]). Der Gefrierpunkt wird reduziert auf rund  $-13\text{ °C}$ . Bei Temperaturen über  $0\text{ °C}$  wird zudem die Wärmeleitfähigkeit derart abgesenkt, sodass die VKM-Abwärme nicht ausreichend abgeführt wird.

### D.7.7. Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Abwärmenutzungssysteme

Zur Bewertung soll ein Vergleich der effektiven Wirkungsgrade des TEG-Systems nach der Definition aus Gleichung 5.34, des Rankine-Prozesses und des Turbo-Compounds in Anlehnung an die Potentialstudie von [167] erfolgen.

Das RP-System lässt sich anhand des thermodynamischen Clausius-Rankine-Kreisprozesses beschreiben (s. Abschnitt 2.2). Unter Berücksichtigung des Arbeitsmediums, der Kenntnis der jeweiligen Temperaturen der Prozessschritte (s. Abbildung 2.3 (a);  $T_1$  bis  $T_4$ ) und der Druckzustände kann der effektive Wirkungsgrad  $\eta_{e,RP}$  mithilfe der Enthalpien bzw. unter vereinfachten Annahmen (z. B.  $T_1 \approx T_2$ ) näherungsweise bestimmt werden:

$$\eta_{e,RP} = \frac{h_1 - h_2 - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \cdot \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{el}} \approx \underbrace{\left(1 - \frac{T_3}{T_{13}}\right)}_{\eta_{\text{th}}} \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{el}} \quad (\text{D.3})$$

Der Gütegrad  $\eta_g$  stellt nach [31] ein Maß für die inneren Verluste dar und gibt an, wie weit der reale thermodynamische Prozess dem theoretischen idealen Vergleichsprozess angenähert ist. Dieser kann nach [291] mit 0,9 sowie der mechanische  $\eta_{\text{mech}}$  und der elektrische Wirkungsgrad  $\eta_{\text{el}}$  des erforderlichen Generators nach [182] mit 0,95 und 0,92 angenommen werden.

Das TC-System lässt sich anhand der Turbinenstufe des Joule-Vergleichsprozesses beschreiben (s. Abschnitt 2.2). Der effektive Wirkungsgrad  $\eta_{e,TC}$  kann mit Hilfe der Temperaturen des jeweiligen Prozessschritts (s. Abbildung 2.3 (b);  $T_1$  und  $T_2$ ) vereinfacht beschrieben werden als:

$$\eta_{e,TC} \approx \underbrace{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)}_{\eta_{\text{th}}} \cdot \eta_{\text{is,T}} \cdot \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{el}} \quad (\text{D.4})$$

Der enthaltene isentrope Wirkungsgrad der Turbine  $\eta_{\text{is,T}}$  wird nach [182] mit 0,85 angenommen.

Der Carnot-Wirkungsgrad ( $\eta_c$ ; s. Gleichung 2.11) und die drei effektiven Wirkungsgrade der Abwärmenutzungsverfahren werden in Abhängigkeit von der oberen Prozesstemperatur  $T_1$  in Abbildung D.27 dargestellt. Als untere Referenztemperatur  $T_3$  wird diejenige des NT-KMK des NFZ mit 60 °C bzw. 333 K definiert. Es werden die Annahmen getroffen, dass die obere Prozesstemperatur die durchschnittliche Abgaseintrittstemperatur im RP- und TC-System ist und der Temperatur der Heißseite der TEM im TEG-System entspricht.

Das RP-System erzielt effektive Wirkungsgrade von bis zu 34,9%, das TC-System von bis zu 45,6% und das TEG-System von bis zu 8% ( $\eta_{e,TEG(zT,\text{max}=1)}$ ) bzw. bis zu 14,5% ( $\eta_{e,TEG(zT,\text{max}=3)}$ ) im definierten Temperaturbereich. Für das TEG-System werden zwei effektive thermoelektrische Wirkungsgrade angegeben. Es wird ein

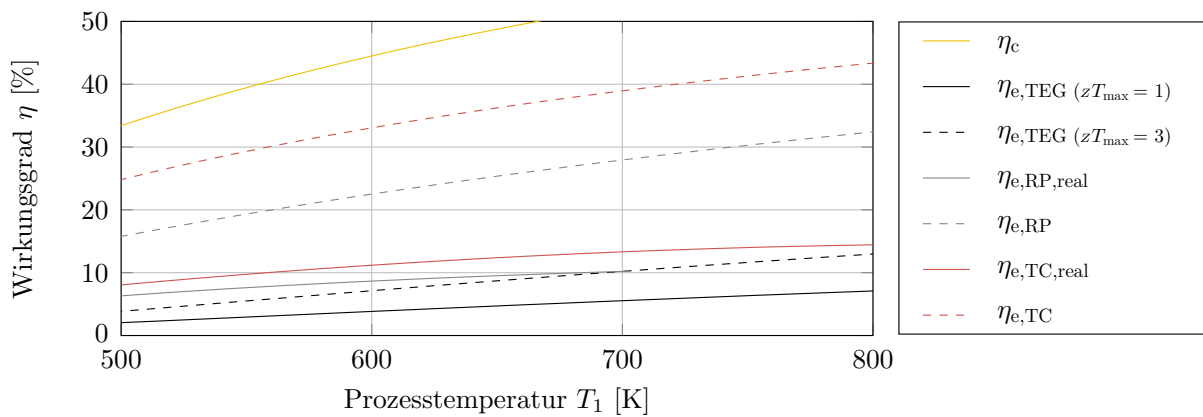


Abbildung D.27.: Vergleich des Wirkungsgrads verschiedener Abwärmenutzungssysteme

maximaler Gütegrad für aktuelle Kleinserienmodule ( $zT_{max} = 1$ ; s. Abbildung 6.6) angenommen, mit einem konstanten  $z$ -Wert über den gesamten Temperaturbereich. Zudem wird ein maximaler Gütegrad für zukünftige TE-Materialentwicklungen ( $zT_{max} = 3$ ) berücksichtigt (s. Abbildung 2.5;  $zT_{max} = 2,6$ ). Demnach liegt der effektive Wirkungsgrad vom TEG-System deutlich niedriger als bei den anderen beiden Systemen.

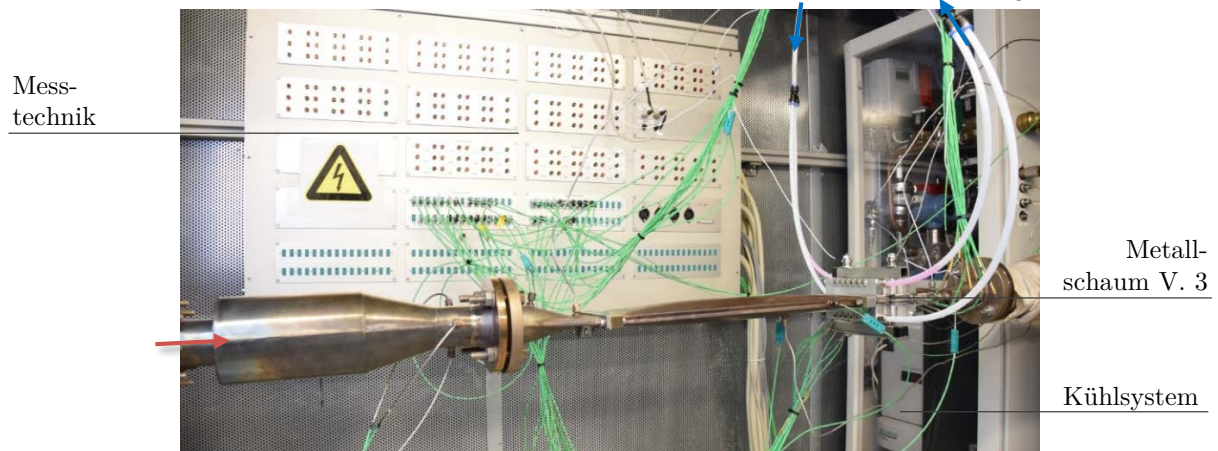
Dieser theoretische Prozessvergleich basiert auf Annahmen, die bei der Fahrzeugintegration nicht realisierbar sind. Für das RP-System bedeutet dieses beispielsweise, dass der Wärmeübertrager zwischen Arbeitsmedium und Kühlmittel eine begrenzte Fläche und einen strömungsoptimierten Wärmedurchgangskoeffizienten aufweist sowie das Arbeitsmedium eine maximale Einsatztemperatur hat. Unter zusätzlichen Annahmen nach Glensvig [46] ergibt sich ein realistischer effektiver Wirkungsgrad ( $\eta_{e,RP,real}$ ) von bis zu 10,2% im betrachteten Temperaturbereich. Dabei wird unter anderem eine Grenztemperatur des Arbeitsmediums Ethanol mit 250 °C bzw. 523 K berücksichtigt. Für das TC-System bedeutet dies beispielsweise, dass das Abgas nicht bis zur unteren Referenztemperatur abgekühlt wird. Unter Annahmen von Adleff et al. [292] führt eine maximale Abgasenthalpierreduktion von 20% zu einem realistischeren effektiven Wirkungsgrad ( $\eta_{e,TC,real}$ ) von bis zu 14,6% im betrachteten Temperaturbereich.

Der effektive Wirkungsgrad von TEG-Systemen liegt derzeit im Bereich von 2–7 Prozentpunkten unter dem des Rankine-Prozesses und des Turbo-Compounds. Dies ist in erster Linie auf die niedrigen TE-Materialgütegrade zurückzuführen.

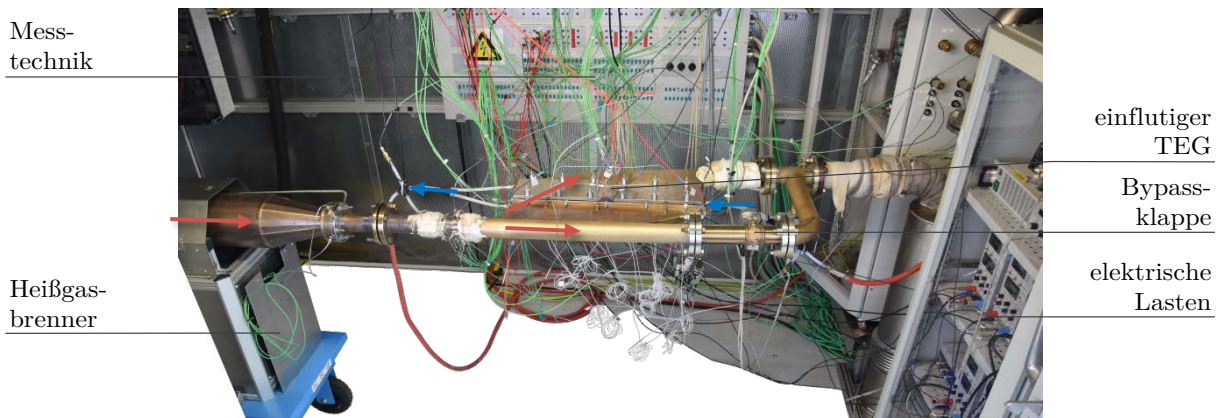


## E. Prüfstandsauftbauten

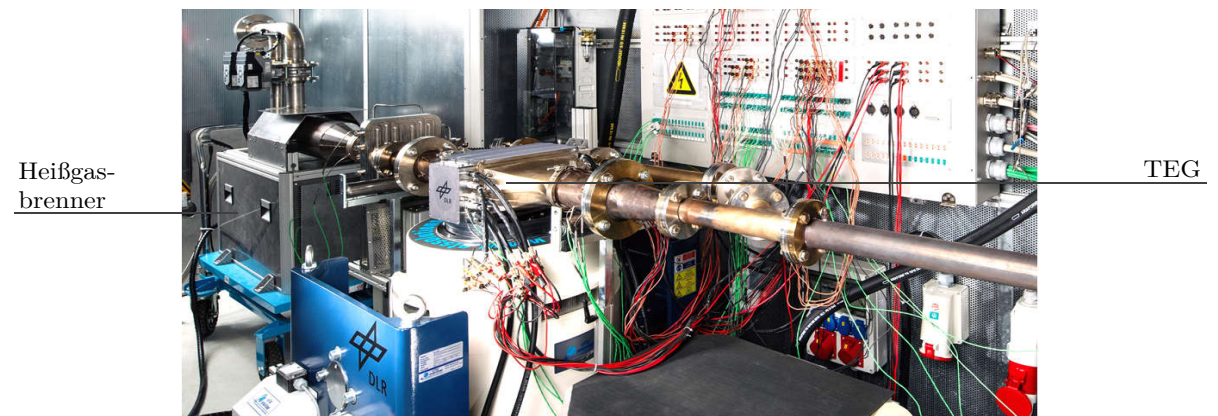
Legende: → Abgas → Kühlmittel → elektrische Leistung



(a) HGWÜ-Voruntersuchung des Funktionsmusters ‚Metallschaum V. 3‘



(b) TEG-Teilsystemaufbau mit Diffusor und Konfusor in Querstrombauweise



(c) TEG-Gesamtsystemaufbau des TEG-Ergebnisdesigns zur Minimierung der TCO des Erdgas-NFZ

Abbildung E.1.: Experimentelle Prüfstandsauftbauten auf dem institutseigenen Heißgasprüfstand

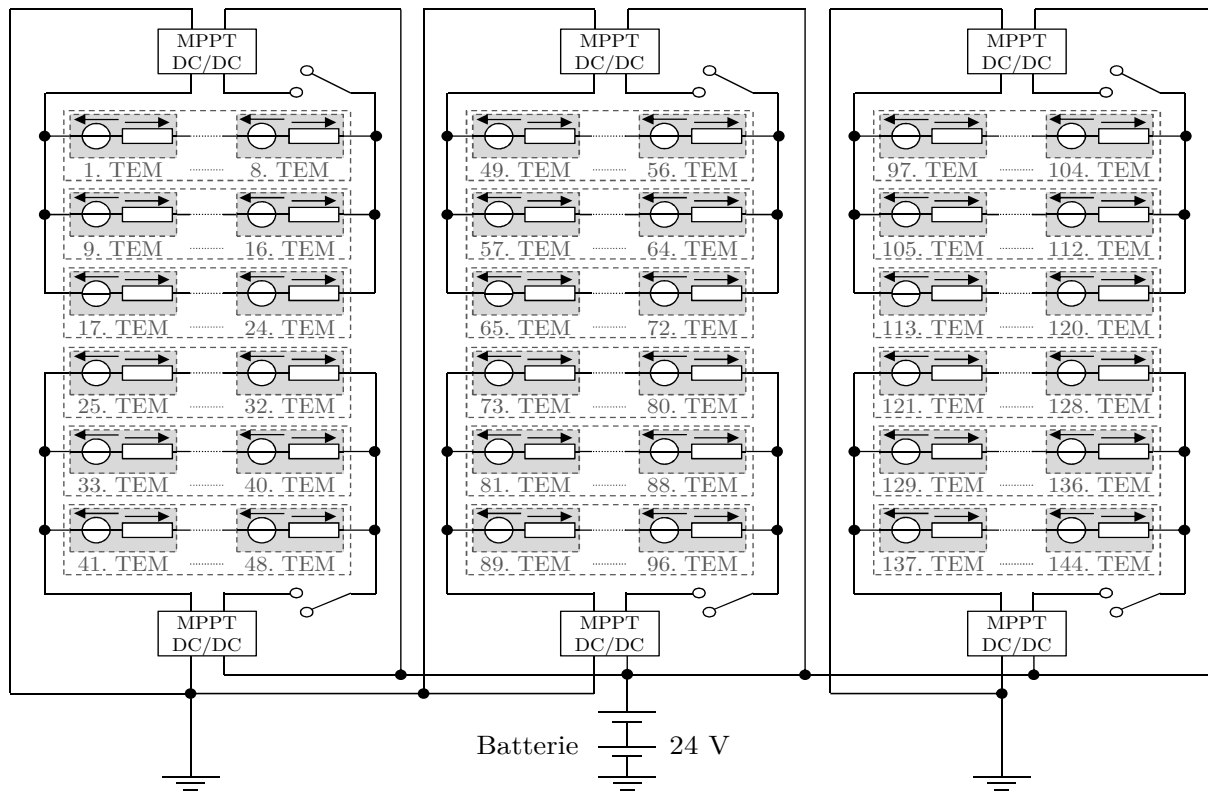


Abbildung E.2.: Ersatzschaltbild der elektrischen Verschaltung des TEG-Gesamtsystemaufbaus

Tabelle E.1.: Gewichtstabelle der Hardwarerealisierung des TEG-Gesamtsystemaufbaus

Bezeichnung	Stückgewicht [kg]	Anzahl im TEG [-]	Komponenten- gewicht [kg]	TEG-Gewichts- anteil [%]
HGWÜ	3,8	3	11,4	45
KMWÜ	0,4	4	1,6	7
TEM (LG2-31-31-3.2)	0,01	144	2	8
Graphitfolie	0,02	6	0,1	0
Bolzen	0,11	8	0,8	3
Deckelstruktur	1,12	2	2,2	9
Gehäuse	1,84	1	1,8	7
Diffusor	1,73	1	1,7	7
Konfusor	1,69	1	1,6	7
Verkabelung	<i>unterschiedlich</i>	<i>Vielzahl</i>	0,8	3
Elektrische Durchführung	0,25	4	1	4
<b>Summe</b>			<b>25,3</b>	<b>100</b>
Messtechnik			4,1	
Summe (inkl. Messtech.)			29,4	

Tabelle E.2.: Validierung des TEG-Gesamtsystemaufbaus für die Zielanwendung des Erdgas-NFZ in unterschiedlichen Betriebspunkten, Darstellung i. A. a. [150]

Formelzeichen	Einheit		Betriebspunkte					
			WHVC* <sub>15 t,m</sub>	WHVC* <sub>15 t,max</sub>	WHVC* <sub>40 t,m</sub>	WHVC* <sub>40 t,max</sub>	SHHS* <sub>40 t,m</sub>	SHHS** <sub>40 t,max</sub>
$\bar{\vartheta}_{HS}$	Sim.	[°C]	299,6	437,7	390,5	493,7	432,3	512,1
	Exp.	[°C]	315,7	438,1	394,2	486,4	439,3	518,2
	Abw.	[%]	5,4	0,1	0,9	-1,5	1,6	-2,6
$\bar{\vartheta}_{KS}$	Sim.	[°C]	53,1	75,9	67,6	81,6	73,6	90,5
	Exp.	[°C]	57,3	79,4	69,8	81,8	78,1	90,6
	Abw.	[%]	7,9	4,5	3,2	0,3	6,1	0,1
$P_{el}$	Sim.	[W]	1162	2075	1733	2507	2104	2796
	Exp.	[W]	1177	2057	1745	2489	2060	2697
	Abw.	[%]	1,2	-0,9	0,7	-0,7	-2,1	-3,6
$\Delta p_{TEG}$	Sim.	[mbar]	2,3	11,5	5,5	20,8	9,5	29,3
	Exp.	[mbar]	2,1	12,3	6,5	22,6	10,6	28,7
	Abw.	[%]	-8,7	6,7	15,5	8,2	8,8	-2,0
$\bar{\eta}_{TEM}$	Sim.	[%]	5,4	6,5	6,2	6,7	6,5	7
	Exp.	[%]	6,4	7,4	7,3	7,3	7,1	7,1
	Abw.	[%]	17,2	14,6	16,6	8,4	9	1,5
$\eta_{e,TEG}$	Sim.	[%]	3,2	1,9	2,6	1,5	2,1	1,4
	Exp.	[%]	3,3	1,9	2,6	1,5	2,1	1,3
	Abw.	[%]	4,6	0,7	2,9	0,7	-0,2	-2,2
$\eta_{HGW\ddot{U}}$	Sim.	[%]	58,6	29	41,4	22,5	32,1	19,8
	Exp.	[%]	52,3	25,5	36,6	20,9	29,4	19
	Abw.	[%]	-10,8	-12,1	-11,7	-7,1	-8,4	-3,7
$\epsilon_{HGW\ddot{U}}$	Sim.	[%]	40,7	20,9	29,7	16,7	23,5	14,8
	Exp.	[%]	36,3	18,6	26,4	15,7	21,7	14,5
	Abw.	[%]	-10,7	-11,3	-11,2	-6	-7,6	-2,3

Abweichung zu den definierten BP (s. Tabelle 4.4):

\*  $\vartheta_{KM,ein} = 20\text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM} = 0,5\text{ dm}^3/\text{s}$ ;

\*\*  $\dot{m}_{AG} = 0,25\text{ kg/s}$  (max. Heißgaserzeugerleistung 200 kW);  $\vartheta_{KM,ein} = 20\text{ °C}$ ;  $\dot{V}_{KM} = 0,5\text{ dm}^3/\text{s}$ .

## Abkürzungsverzeichnis

0D–3D	nulldimensional bis dreidimensional
Abb.	Abbildung(en)
Abw.	Abweichung(en)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (dt. Verband der europäischen Automobilhersteller)
AFA	Absetzung für Abnutzung
AGB	Ausgleichsbehälter
AGK	Abgaskrümmmer
AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
AM	Additive Manufacturing (dt. Additive Fertigung)
AUS	Aqueous Urea Solution (dt. wässrige Harnstofflösung)
BP	Betriebspunkt(e)
bspw.	beispielsweise
BZ	Brennstoffzelle
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-Aided Design (dt. rechnergestütztes Konstruieren)
CAE	Computer-Aided Engineering (dt. rechnergestützte Entwicklung)
CFD	Computational Fluid Dynamics (dt. numerische Strömungsmechanik)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> e	Kohlenstoffdioxid Äquivalente (Treibhausgasemissionen)
DBC	Direct bonded copper (dt. direkt verbundenes Kupfer)
DC	Direct Current (dt. Gleichstrom)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DOC	Dieseloxydationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
dt.	deutsch
EG	Europäische Gemeinschaft
Einh.	Einheit
el.	elektrisch
engl.	englisch
ESD	Endschalldämpfer
EU	Europäische Union
Exp.	Experiment(e)

---

F	(Fest-)Forderung
FE	Finite(-s) Element(e)
FEM	Finite Elemente Methode
FK	Institut für Fahrzeugkonzepte
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
fr.	französisch
Fz.	Formelzeichen
G	Generator
GG	Gesamtgewicht
HGWÜ	Heißgaswärmeübertrager
HH	Halb-Heusler
HPDI	High Pressure Direct Injection (dt. Hochdruck-Direkteinspritzung)
HT	Hochtemperatur
i. A. a.	in Anlehnung an
ISO	International Organization for Standardization (dt. Internationale Organisation für Normung)
KMK	Kühlmittelkreislauf / (-läufe)
KMP	Kühlmittelpumpe
KMWÜ	Kühlmittelwärmeübertrager
LHC	Long Haul Cycle (stationärer NFZ-Motorenprüfstandszyklus)
LKW	Lastkraftwagen
LL	Ladeluft
LLK	Ladeluftkühler
LNG	Liquified Natural Gas (dt. verflüssigtes Erdgas)
M	Motor
MPPT	Maximum Power Point Tracking (dt. Maximal-Leistungspunkt-Suche)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFZ	Nutzfahrzeug(e) / (-en)
NT	Niedertemperatur
o. A.	ohne Angabe
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PKW	Personenkraftwagen
PPI	Pores per Inch (dt. Poren pro Zoll)
Rdb.	Randbedingung(en)
RP	Rankine-Prozess

---

s.	siehe
S.	Seite
SCR	Selective Catalytic Reduction (dt. selektive katalytische Reduktion)
SHHS	(Referenz-)Strecke Stuttgart-Hamburg-Stuttgart
Sim.	Simulation(en)
SKD	Skutterudit
SNFZ	schweres Nutzfahrzeug
SOC	State of Charge (dt. Ladezustand)
t	Tonnen
T	Tausend
TC	Turbo-Compound (dt. Turbogenerator)
TCO	Total Cost of Ownership (dt. Gesamtbetriebskosten)
TE	Thermoelektrische(s)
TEG	Thermoelektrische(r) Generator(en)
TEGMA	Absolute Thermoelectric Generator Measurement Apparatus (dt. Modulprüfmaschine nach der Absolutmessmethode)
TEM	Thermoelektrische(s) Modul(e)
THG	Treibhausgasemissionen
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
UDF	User-Defined Function (dt. benutzerdefinierte Funktion)
USD	United States Dollar (Währungseinheit der Vereinigten Staaten)
V.	Variante
VBA	Visual Basic Applications (skriptbasierte Programmiersprache)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VECTO	Vehicle Energy Consumption calculation TOol (dt. Programm zur Berechnung des Fahrzeugenergieverbrauchs)
vgl.	vergleiche
VKM	Verbrennungskraftmaschine
W	Wunsch
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle
WHTC	World Harmonized Transient Cycle
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WÜ	Wärmeübertrager
z. B.	zum Beispiel
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Symbole

$a, b, c, d, e$		Parameter
$A$		Alternative
$A$	$m^2$	Flächeninhalt
$afa$	EUR	jährliche Absetzung für Abschreibung
$b$		Zeitkonstante
$b$	m	Breite
$b_e$	$\frac{kg}{kWh}$	spezifischer Kraftstoffverbrauch
$B_e$	$\frac{kg}{100 km}$	gravimetrischer Kraftstoffverbrauch
$B_s$	$\frac{l}{100 km}$	volumetrischer Kraftstoffverbrauch
$c$	$\frac{kg}{km}$	kilometerspezifische Kohlenstoffdioxidemissionen
$C$	Wh	elektrische Kapazität
$c_p$	$\frac{J}{kg K}$	spezifische isobare Wärmekapazität
$d$	m	Schichtdicke/ Materialstärke/ charakteristische Länge
$d, D$	m	(Bohrungs-)Durchmesser
$E$	MPa	Elastizitätsmodul
$E$	J	Energie
$\dot{E}$	W	Exergiestrom
$f, g, v$		Faktor/ Funktion
$\mathbf{f}$		Zielfunktionsvektor
$F$	N	Kraft
$F_{GV}$		Getriebeverlustfaktor
$g$	EUR	jährlicher Gewinn
$h$	m	Höhe/ Kolbenhub
$h$	$\frac{J}{kg}$	spezifische Enthalpie
$H$	J	Enthalpie
$\dot{H}$	kW	Enthalpiestrom
$H_i$	$\frac{J}{kg}$	Heizwert
$i$		Übersetzungsverhältnis/ Zinssatz
$I$	A	(Last-)Strom
$J$	$\frac{I}{m^2}$	elektrische Stromdichte
$k, n, m$		Laufindex

---

$k$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient
$k$	$\frac{\text{EUR}}{\text{cm}^2}$	(flächen-)spezifische Kosten
$K$	EUR	Kosten
$l$		Lernrate
$l$	m	Länge
$L$	H	elektrische Induktivität
$L$	$\frac{\text{V}^2}{\text{K}^2}$	Lorenz-Zahl
$m$		(Lauf-)Index
$m$	kg	Masse, Gewicht
$\dot{m}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom
$M$	Nm	Drehmoment
$n$		Anzahl
$n$	$\frac{1}{\text{min}}$	Drehzahl
$n_R$		natürliche Rekuperation
$N$		Endwert
$p$		Punktzahl
$p$	Pa	Druck
$p$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	flächenspezifische elektrische Leistungsdichte
$p_{\text{me}}$	Pa	effektiver Mitteldruck
$P$		Betriebscharakteristik/ Population
$P$	W	Leistung
$Pr$		Prandtl-Zahl
$\dot{q}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Wärmestromdichte
$Q$	C	Ladungsmenge
$Q$	W	Wärme
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$Q_{\text{kum}}$		Produktionsmenge
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$Re$		Reynolds-Zahl
$R_f$	$\frac{\text{K}}{\text{W}}$	Foulingwiderstand (dt. Ablagerungswiderstand)
$r_{\text{th}}$	$\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$	flächenspezifischer thermischer Widerstand
$R_{\text{th}}$	$\frac{\text{K}}{\text{W}}$	thermischer Widerstand
$s$	m	Strecke/ Weg
$SOC$		State Of Charge (dt. Ladezustand)
$t$	s	Zeit
$T$	s	Gesamtzeit
$T$	K	Temperatur
$TCO$	EUR	Gesamtbetriebskosten
$u$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Strömungsgeschwindigkeit
$U$	V	Spannung



$v$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Geschwindigkeit
$v$	$\frac{1}{\text{kWh}}$	Proportionalitätskonstante
$V$	$\frac{1}{\text{h}}$	Kraftstoffverbrauch
$\dot{V}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom
$V_H$	$\text{m}^3$	Hubvolumen
$W$	J	Arbeit
$W$	EUR	Wiederverkaufswert
$\dot{W}$	$\frac{\text{J}}{(\text{sK})}$	Wärmekapazitätsstrom
$x$		technische Wertigkeit
$\mathbf{x}$		Vektor
$x, y, z$		Achsen im kartesischen Koordinatensystem
$x, X, Y, Z$		(geometrische) Variablen
$y$		wirtschaftliche Wertigkeit
$z$	$\frac{1}{\text{K}}$	Gütezah (lokale Temperatur, engl. figure of merit)
$Z$	$\frac{1}{\text{K}}$	Gütezah (globale Temperatur)
$zT$		dimensionslose Gütezah (lokale Temperaturen)
$ZT$		dimensionslose Gütezah (globale Temperaturen)

### Griechische Symbole

$\alpha$	$\frac{\text{V}}{\text{K}}$	Seebeck-Koeffizient
$\alpha$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	Wärmeübergangskoeffizient
$\delta$		Differential/ Diskontierungsfaktor
$\Delta$		Differenz
$\epsilon$		Anteil/ Wirkungsgrad/ Dehnung/ Verdichtungsverhältnis
$\eta$		Wirkungsgrad
$\eta$	Pa s	dynamische Viskosität
$\eta_g$		Gütegrad
$\theta$		(Steigungs-)Winkel
$\Theta$		dimensionslose mittlere Temperaturdifferenz
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$\lambda$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_L$		Verbrennungsluftverhältnis
$\mu$	$\frac{\text{V}}{\text{K}}$	Thomson-Koeffizient
$\nu$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	kinematische Viskosität
$\Pi$	V	Peltier-Koeffizient
$\pi$		Kreiszahl
$\rho$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
$\sigma$	$\frac{1}{\Omega \text{m}}$	elektrische Leitfähigkeit
$\sigma$	MPa	mechanische Spannung
$\varphi$	%	Luftfeuchtigkeit

$\varphi_f$	%	Foulingrate
$\phi$	$\frac{W}{m^3}$	volumetrische Leistungsdichte
$\Phi$		Porosität
$\psi$	$\frac{W}{kg}$	gravimetrische Leistungsdichte
$\omega$		Gewichtung

### Indizes

0	Leerlauf/ Ausgangszustand
A	Amortisation
ab	abgeführt
abs	absolut
AG	Abgas
AGK	Abgaskrümmen
AGR	Abgasrückführung
AGN	Abgasnachbehandlung
AK	Anschaffungskosten
An	Antrieb
aus	Ausgang/ aus(-strömend)
B	Beschleunigung/ Brennstoff
Bat	Batterie
BK	Betriebskosten
BP	Betriebspunkt
c	Carnot
chem	chemisch(e)/ (-er)
D	Diode
DC/DC	Gleichspannungswandler
diff	differenziell(er)
e	effektiv(e)/ (-er)
ein	Eingang/ ein(-strömend)
el	elektrisch
Fl	Fluid
FZ	Fahrzeug
G	Generator/ Getriebe
ges	gesamt
Grenz	Grenzfall
h	heiß
HGWÜ	Heißgaswärmeübertrager
HS	Heißseite
i	innerer/ induziert(e)/ (-er)
i, j, k	(Lauf-)Index

is	isentrop(e)/ (-er)
Iso	Isolierung
k	kalt
K	Kanal/ Kurzschluss
KM	Kühlmittel
KMK	Kühlmittelkreis
KMP	Kühlmittelpumpe
KMWÜ	Kühlmittelwärmeübertrager
Kont	Kontakt(-ierung)
KS	Kaltseite
L	Last/ Luft
LE	Leistungselektronik
LG	Leergewicht
log	logarithmisch(e)/ (-er)
m	mittel
M	Drehmoment
max	maximal(e)/ (-er)
mech	mechanisch(e)/ (-er)
min	minimal(e)/ (-er)
n	negativ dotiert (n-Typ Leiter)
N	Nutzung/ Nenngröße
Null	Nullleistung
p	positiv dotiert (p-Typ Leiter)
P	Pore(n)
para	parasitär
Pot	Potential(e)
r	Reibungsverlust(e)
R	Roll(-reibung)/ Riemen/ Rippe
Ref	Referenz
RP	Rankine-Prozess
S	Steigung/ Steg/ Schaum
SO	sonstige
T	Turbine
TC	Turbo-Compound
TEG	Thermoelektrische(r) Generator(en)
TEM	Thermoelektrische(s) Modul(e)
th	thermisch
TL	Turbolader
TM	Thermoelektrische(s) Material(ien)
U	Umgebung

VKM	Verbrennungskraftmaschine
VP	Verbindungspunkt
W	Wiederverkaufswert/ Wand
WÜ	Wärmeübertrager
Z	Zelle/ Zylinder
zGG	zulässiges Gesamtgewicht
zu	zugeführt
zul	zulässig(e)/ (-er)

### Chemische Elemente

Al	Aluminium
Bi	Bismut
C	Kohlenstoff
Ce	Cerium
Cl	Chlor
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Fe	Eisen
Ge	Germanium
H	Wasserstoff
Hf	Hafnium
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
N	Stickstoff
Nb	Niob
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
Pb	Blei
S	Schwefel
Sb	Antimon
Se	Selen
Si	Silicium
Sn	Zinn
Te	Tellur
Yb	Ytterbium
Zr	Zirconium

# Literaturverzeichnis

- [1] UBA, *Emissionsberichterstattung: THG-Emissionen des Verkehrssektors in den Jahren 1990–2019 (Trendtabellen zur Emissionsentwicklung in Deutschland mit Detailangaben für Verkehrsträger und sonstige mobile Emissionsquellen)*, persönliche Korrespondenz vom 16.03.2020.
  - [2] Müller-Eberstein, R. und Siegemund, S., *Nachhaltige Mobilität mit Erdgas und Biomethan. Marktentwicklung 2015/2016*, 4. Fortschrittsbericht, Deutsche Energie-Agentur, Berlin, Aug. 2016.
  - [3] UBA, *Klimaschutzziele Deutschlands: Internationale Vereinbarungen weisen den Weg*, 2019. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimaschutzziele-deutschlands> (Zugriff am: 19.06.2019).
  - [4] KBA, *Statistik: Fahrzeuge*, 2019. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/fahrzeugklassen\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/fahrzeugklassen_node.html) (Zugriff am: 15.03.2019).
  - [5] BGL, *Modellrechnungen zur Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr*. Verfügbar unter: [https://www.bgl-ev.de/web/der\\_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm](https://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm) (Zugriff am: 02.03.2020).
  - [6] Hilgers, M., *Gesamtfahrzeug*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
  - [7] UBA, *Emissionen des Verkehrs: Daten im Verkehrssektor*, Dessau-Roßlau, 2020. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/> (Zugriff am: 01.03.2020).
  - [8] Schubert, M., Kluth, T., Nebauer, G., Ratzenberger, R., Kotzagiorgis, S., Butz, B., Schneider, W. und Leible, M., *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Zusammenfassung und Forschungsergebnisse: Forschungsbericht FE-Nr.: 96.0981/2011 im Auftrag des BMVI*, Berlin, 2014.
  - [9] Lenz, B., Lischke, A., Knitschky, G., Adolf, J., Balzer, C. und Haase, F., *Diesel oder alternative Antriebe - womit fahren LKW und Busse morgen? Shell Nutzfahrzeug-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040*, Hamburg, 2016. Verfügbar unter: <https://www.shell.de/nutzfahrzeugstudie> (Zugriff am: 03.05.2017).
  - [10] OECD, *Welthandel: Internationaler Frachtverkehr vervierfacht sich bis 2050*. Verfügbar unter: <https://www.oecd.org/berlin/presse/> (Zugriff am: 30.03.2020).
  - [11] European Commission 2018/0143(COD) 284 final, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Setting CO2 Emission Performance Standards for new Heavy-Duty Vehicles*, 2018. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/> (Zugriff am: 27.02.2019).
-

- [12] VECTO, *VECTO Standarddaten 07/2014*. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en) (Zugriff am: 18.08.2018).
- [13] Zacharof, N.-G. und Fontaras, G., *Report on VECTO technology simulation capabilities and future outlook*, Luxemburg: Publications Office, 2016, Jg. EUR 28272 EN.
- [14] Renschler, A., *Vision 2020*, ACEA-Pressekonferenz auf der 62. IAA Nutzfahrzeuge, Hannover, Deutschland, 25. Sep. – 02. Okt. 2008.
- [15] Hill, N., Finnegan, S., Norris, J., Brannigan, C., Wynn, D., Baker, H. und Skinner, I., *Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy: Abschlussbericht für die Europäische Kommission - DG Climate Action – DG Climate Action Ref: DG ENV. 070307/2009/548572/SER/C3*, Brüssel, Belgien, 2011.
- [16] Lastauto Omnibus, *Messfahrten 1967–2019: Testberichte der jeweiligen Zeitschriftenausgaben*, Lastauto Omnibus, 2019.
- [17] Todts, W., *20 Years of Truck CO2 Progress*, 2018. Verfügbar unter: <https://www.transportenvironment.org/newsroom/blog/20-years-truck-co2-progress-revisited> (Zugriff am: 06.12.2018).
- [18] Merker, G. P. und Teichmann, R., *Grundlagen Verbrennungsmotoren*, Wiesbaden: Springer, 2018.
- [19] Kalghatgi, G., *Is it Really the End of Internal Combustion Engines and Petroleum in Transport?* Applied Energy, Jg. 225, S. 965–974, 2018.
- [20] Serrano, J., *Imagining the Future of the Internal Combustion Engine for Ground Transport in the Current Context*, Applied Sciences, Jg. 7, Nr. 10, S. 1001, 2017.
- [21] Delgado, O. und Gonzalez, F., *CO<sub>2</sub> Emissions and Fuel Consumption Standards for Heavy-Duty Vehicles in the European Union*. Verfügbar unter: <https://www.theicct.org/publications/co2-emissions-and-fuel-consumption-standards-heavy-duty-vehicles-european-union> (Zugriff am: 25.10.2018).
- [22] Zhang, Y., Cleary, M., Wang, X., Kempf, N., Schoensee, L., Yang, J., Joshi, G. und Meda, L., *High-Temperature and High-Power-Density Nanostructured Thermoelectric Generator for Automotive Waste Heat Recovery*, Energy Conversion and Management, Jg. 105, S. 946–950, 2015.
- [23] Karvonen, M., Kapoor, R., Uusitalo, A. und Ojanen, V., *Technology Competition in the Internal Combustion Engine Waste Heat Recovery: A Patent Landscape Analysis*, Cleaner Production, Jg. 112, S. 3735–3743, 2016.
- [24] Lastauto Omnibus, *Vergleichstest*, Lastauto Omnibus, Nr. 1-2/2017, S. 19 ff., 2017.
- [25] Lastauto Omnibus, *Test: Iveco Stralis 460 NP*, Nr. 1-2/2019, S. 24 ff., 2019.
- [26] Schumpeter, J. A., *The Creative Response in Economic History*, Economic History, Jg. 7, Nr. 2, S. 149–159, 1947.

- [27] Wilde, A., *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*, Diss., München, 2010.
- [28] Pischinger, R., Klell, M. und Sams, T., *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*, 3. Aufl., Wien: Springer, 2009.
- [29] Liebl, J., Lederer, M., Rohde-Brandenburger, K., Biermann, J.-W., Roth, M. und Schäfer, H., *Energiemanagement im Kraftfahrzeug*, Wiesbaden: Springer, 2014.
- [30] Pachernegg, S. J., *A Closer Look at the Willans-Line*, SAE Technical Paper 690182, 1969.
- [31] Todsen, U., *Verbrennungsmotoren*, 2. Aufl., München: Hanser, 2017.
- [32] Häfele, C., *Entwicklung fahrzeuggerechter Thermoelektrischer Generatoren zur Wandlung von Abgaswärme in Nutzenergie*, Diss., Stuttgart, 2016.
- [33] Hoepke, E. und Breuer, S., Hg., *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten*, 8. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [34] Bernath, M. G., *Ganzheitliche Modellerstellung zur Wirkungsgraderhöhung von Nutzfahrzeugen durch thermische Rekuperation*, Diss., München, 2015.
- [35] Bünger, U., Landinger, H., Weindorf, W., Rheinhold, W., Zerhusen, J. und Zittel, W., *Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr: Abschlussbericht*, Ludwig-Bölkow Systemtechnik GmbH, Hg., Ottobrunn, 2016.
- [36] Dieselnets, *Engine & Emission Technology*. Verfügbar unter: <https://dieselnets.com/> (Zugriff am: 02.02.2018).
- [37] Zürn, J., *Grundsätze der Nutzfahrzeugentwicklung*, Vorlesungsreihe am Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2015.
- [38] Behr Hella, *Motorkühlung für NKW: Anspruchsvoll: Motorkühlung für Nutzfahrzeuge*. Verfügbar unter: <https://www.hella.com/truck/de/Downloads-2444.html> (Zugriff am: 04.03.2018).
- [39] Heerwagen, M. und Rosenberger, T., *Energieversorgung: Wachsende Spannung*, 2015. Verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/energieversorgung-wachsende-spannung-6642786.html> (Zugriff am: 15.06.2017).
- [40] Banzhaf, M., Edwards, S. und Pantow, E., *Thermomanagement für künftige Nutzfahrzeuge*, ATZ, Jg. 112, Nr. 9, S. 650–655, 2010.
- [41] Dietsche, K.-H. und Reif, K., *Bosch Automotive Handbuch*, 10. Aufl., Karlsruhe und Chichester, West Sussex: Robert Bosch GmbH und Wiley, 2018.
- [42] Pellegrino, G., Vagati, A., Guglielmi, P. und Boazzo, B., *Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Jg. 59, Nr. 2, S. 803–811, 2012.
- [43] Hilgers, M., *Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.

- [44] Franke, A., *Thermische Rekuperation im instationären Betrieb - Ein Beitrag zur Optimierung des Clausius-Rankine-Prozesses zur Wärmerückgewinnung im Kraftfahrzeug*, Diss., Darmstadt, 2016.
- [45] Dünnebeil, F., Reinhard, C., Lambrecht, U., Kies, A., Hausberger, S. und Rexeis, M., *Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde- rung bei schweren Nutzfahrzeugen: Endbericht*, ifeu, UBA, Texte | 32/2015, Heidelberg, Apr. 2015.
- [46] Glensvig, M., *Abwärmenutzung für Nutzfahrzeuge: Herausforderungen und Ergebnisse von Fahrzeugversuchen*, in: 3. VDI Fachkonferenz - Thermische Rekuperation in Fahrzeugen, Stuttgart, Deutschland, 25. – 26. Jan. 2017.
- [47] Volvo, *Volvo D13 Turbo Compound Engine*, 2017. Verfügbar unter: <https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2017/jul/volvo-d13-turbo-compound-engine-powers.aspx> (Zugriff am: 16.08.2017).
- [48] Heber, L., Schwab, J. und Knobelspies, T., *3kW Thermoelectric Generator for Natural Gas-Powered Heavy-Duty Vehicles – Holistic Development, Optimization and Validation*, Energies, Jg. 15, S. 1–15, 2022.
- [49] Gstrein, W., *Nutzung weiterer Potenziale zur Erhöhung des Wirkungsgrades von Dieselmotor-Antrieben*, in: ÖVK Vortrag, Graz, Österreich, 16. Jan. 2008.
- [50] Marlok, H., Pfeifer, A., Hötger, M. und Bucher, M., *Modulares Abwärmerück- gewinnungssystem mit elektrischer Leistungsabgabe*, ATZ heavyduty, Jg. 12, Nr. 2, S. 32–37, 2019.
- [51] Pasini, G., Lutzemberger, G., Frigo, S., Marelli, S., Ceraolo, M., Gentili, R. und Capobianco, M., *Evaluation of an Electric Turbo Compound System for SI Engines: A Numerical Approach*, Applied Energy, Jg. 162, S. 527–540, 2016.
- [52] Kennel, D. und Raimer, M., *Waste Heat Recovery - Marktsicht zur Technologieführerschaft*, in: Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren, Siebenpfeiffer, W., Hg., Wiesbaden: Springer, 2018, S. 189–200.
- [53] Park, T., Teng, H., Hunter, G. L., van der Velde, B. und Klaver, J., *A Rankine Cycle System for Recovering Waste Heat from HD Diesel Engines - Experimental Results*, SAE Technical Paper 2011-01-1337, 2011.
- [54] Mahle, *E-Waste Heat Recovery System*. Verfügbar unter: <https://www.mahle.com/trucks/de/trucks/> (Zugriff am: 26.04.2019).
- [55] Daccord, R., *Cost to Benefit Ratio of an Exhaust Heat Recovery System on a Long Haul Truck*, Energy Procedia, Jg. 129, S. 740–745, 2017.
- [56] Meszler, D., Delgado, O., Rodríguez, F. und Muncrief, R., *European Heavy-Duty Vehicles: Cost-Effectiveness of Fuel-Efficiency Technologies for Long-Haul Tractor-Trailers in the 2025-2030 Timeframe*, 2018. Verfügbar unter: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT\\_EU-HDV-tech-2025-30\\_20180116.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU-HDV-tech-2025-30_20180116.pdf) (Zugriff am: 01.03.2019).



- [57] Teo Sheng Jye, A. E., Pesiridis, A. und Rajoo, S., *Effects of Mechanical Turbo Compounding on a Turbocharged Diesel Engine*, SAE Technical Paper 2013-01-0103, 2013.
- [58] Eglseer, A., Hager, J. und Höfer, C., *Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit von Thermoelektrischen Generatoren im Nutzfahrzeug*, in: Thermische Rekuperation im Kraftfahrzeug, Neugebauer, S., Hg., München: Expert, 2009, S. 51–59.
- [59] Bass, J. C., Elsner, N. B. und Leavitt, F. A., *Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines*, in: Proceedings of the 13th ICT Konferenz, Kansas City, Missouri, USA, 1994, S. 295–298.
- [60] Heghmanns, A., *Konzeption, Optimierung und Evaluation von thermoelektrischen Generatorsystemen für den Einsatz in dieselelektrischen Lokomotiven*, Diss., Dresden, 2017.
- [61] Min, G. und Rowe, D. M., *Ring-structured thermoelectric module*, Semiconductor Science and Technology, Jg. 22, Nr. 8, S. 880–883, 2007.
- [62] Seebeck, T. J. und von Oettingen, A. J., Hg., *Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz*, Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften, Leipzig: Engelmann, 1895.
- [63] Oersted, H. C., *Notiz von neuen electrisch - magnetischen Versuchen des Herrn Seebeck in Berlin*, Annalen der Physik und der physikalischen Chemie, Jg. 73, Nr. 4, S. 430–432, 1823.
- [64] Pelster, R., Hüttl, I. und Pieper, R., *Thermospannungen - viel genutzt und fast immer falsch erklärt*, PhyDid, Jg. 1, S. 10–22, 2005.
- [65] Peltier, J. C. A., *Nouvelles Expériences sur la Caloricité des Courants Électriques*, in: Annales de chimie et de physique, Jg. 56, 1834.
- [66] Thomson, W., *Philosophical Transactions*, in: The Royal Society, London, 1856.
- [67] Thomson, W., *Mathematical and Physical Papers 1+2*, in: Cambridge University Press, 1882.
- [68] Chen, J., Yan, Z. und Wu, L., *The Influence of Thomson effect on the Maximum Power Output and Maximum Efficiency of a Thermoelectric Generator*, Energy Conversion and Management, Jg. 79, Nr. 11, S. 8823–8828, 1996.
- [69] Sandoz-Rosado, E. J., *Investigation and Development of Advanced Models of Thermoelectric Generators for Power Generation Applications*, Diss., Rochester, 2009.
- [70] Rowe, D. M., Hg., *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, Boca Raton, Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [71] Junior, C., *Analyse thermoelektrischer Module und Gesamtsysteme*, Diss., Lohmar, 2010.
- [72] Kober, M., *Thermoelektrischen Generatoren zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen – Methode zur ganzheitlichen Entwicklung und Bewertung*, Diss., Stuttgart, 2020.

- [73] Altenkirch, E., *Elektrothermische Kälteerzeugung und reversible elektrische Heizung*, Physikalische Zeitschrift, Nr. 12, S. 920–924, 1911.
- [74] Altenkirch, E., *Über den Nutzeffekt der Thermosäule*, Physikalische Zeitschrift, Nr. 10, S. 560–568, 1909.
- [75] Snyder, G. J. und Snyder, A. H., *Figure of Merit  $ZT$  of a Thermoelectric Device Defined from Materials Properties*, Energy & Environmental Science, Jg. 10, Nr. 11, S. 2280–2283, 2017.
- [76] Müller, E., *Thermoelectric materials for waste heat recovery, linearized thermal sensors and Peltier cooling*, in: Steinfurter Keramiktage, Münster/Steinfurt, 15.–19. Feb. 2002.
- [77] Dresselhaus, M. S., Chen, G., Ren, Z. F., Dresselhaus, G., Henry, A. und Fleurial, J.-P., *New composite thermoelectric materials for energy harvesting applications*, Global Innovations: Materials for Energy, Jg. 61, Nr. 4, S. 86–90, 2009.
- [78] Chen, Z.-G., Cheng, L., Han, G., Yang, L. und Zou, J., *Nanostructured Thermoelectric Materials: Current Research and Future Challenge*, Progress in Natural Science: Materials International, Jg. 22, Nr. 6, S. 535–549, 2012.
- [79] Tan, G., Zhao, L.-D. und Kanatzidis, M. G., *Rationally Designing High-Performance Bulk Thermoelectric Materials*, Chemical Reviews, Jg. 116, Nr. 19, S. 12 123–12 149, 2016.
- [80] Zhao, L.-D., Lo, S.-H., Zhang, Y., Sun, H., Tan, G., Uher, C., Wolverton, C., Dravid, V. P. und Kanatzidis, M. G., *Ultralow Thermal Conductivity and High Thermoelectric Figure of Merit in  $\text{SnSe}$  Crystals*, Nature, Jg. 508, Nr. 7496, S. 373–377, 2014.
- [81] Zhu, B., Liu, X., Wang, Q., Qiu, Y., Shu, Z., Guo, Z., Tong, Y., Cui, J., Gu, M. und He, J., *Realizing Record High Performance in  $n$ -Type  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based Thermoelectric Materials*, Energy & Environmental Science, Jg. 13, Nr. 7, S. 2106–2114, 2020.
- [82] Jood, P., Ohta, M., Yamamoto, A. und Kanatzidis, M. G., *Excessively Doped  $\text{PbTe}$  with  $\text{Ge}$ -Induced Nanostructures Enables High-Efficiency Thermoelectric Modules*, Joule, Jg. 2, Nr. 7, S. 1339–1355, 2018.
- [83] de Boor, J., Dasgupta, T., Saparamadu, U., Müller, E. und Ren, Z. F., *Recent progress in  $p$ -type thermoelectric magnesium silicide based solid solutions*, Materials Today Energy, Jg. 4, S. 105–121, 2017.
- [84] Rogl, G., Sauerschnig, P., Rykavets, Z., Romaka, V. V., Heinrich, P., Hinterleitner, B., Grytsiv, A., Bauer, E. und Rogl, P.,  *$(\text{V},\text{Nb})$ -Doped Half Heusler Alloys based on  $\text{Ti},\text{Zr},\text{HfNiSn}$  with High  $ZT$* , Acta Materialia, Jg. 131, S. 336–348, 2017.
- [85] Vaccumschmelze, *VACOTHERM: Halb-Heusler Material ohne Hafnium*. Verfügbar unter: <https://vacuumschmelze.de/Produkte/Einzigartige-Technologien/Thermoelektrische-Werkstoffe---VACOTHERM> (Zugriff am: 12.12.2020).

- [86] Rogl, G., Grytsiv, A., Rogl, P., Bauer, E., Hochenhofer, M., Anbalagan, R., Mallik, R. und Schaffler, E., *Nanostructuring of p- and n-Type Skutterudites Reaching Figures of Merit of Approximately 1.3 and 1.6, Respectively*, Acta Materialia, Jg. 76, S. 434–448, 2014.
- [87] Zebarjadi, M., Joshi, G., Zhu, G., Yu, B., Minnich, A., Lan, Y., Wang, X., Dresselhaus, M., Ren, Z. und Chen, G., *Power factor enhancement by modulation doping in bulk nanocomposites*, Nano Letters, Jg. 11, Nr. 6, S. 2225–2230, 2011.
- [88] Yu, K., Zhou, Y., Liu, Y., Liu, F., Hu, L., Ao, W., Zhang, C., Li, Y., Li, J. und Xie, H., *Near-room-temperature thermoelectric materials and their application prospects in geothermal power generation*, Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, Jg. 6, Nr. 1, 2020.
- [89] Fu, C., Bai, S., Liu, Y., Tang, Y., Chen, L., Zhao, X. und Zhu, T., *Realizing High Figure of Merit in Heavy-Band p-Type Half-Heusler Thermoelectric Materials*, Nature communications, Jg. 6, S. 8144, 2015.
- [90] Banik, A. und Biswas, K., *Lead-free thermoelectrics: promising thermoelectric performance in p-type  $\text{SnTe}_{1-x}\text{Sex}$  system*, Materials Chemistry A, Jg. 2, Nr. 25, S. 9620, 2014.
- [91] Yu, B., Zebarjadi, M., Wang, H., Lukas, K., Wang, H., Wang, D., Opeil, C., Dresselhaus, M., Chen, G. und Ren, Z., *Enhancement of thermoelectric properties by modulation-doping in silicon germanium alloy nanocomposites*, Nano letters, Jg. 12, Nr. 4, S. 2077–2082, 2012.
- [92] Gürth, M., Rogl, G., Romaka, V., Grytsiv, A., Bauer, E. und Rogl, P., *Thermoelectric High ZT Half-Heusler Alloys  $\text{Ti}_{1-x-y}\text{Zr}_x\text{Hf}_y\text{NiSn}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ;  $0 \leq y \leq 1$ )*, Acta Materialia, Jg. 104, S. 210–222, 2016.
- [93] Fu, C., Zhu, T., Liu, Y., Xie, H. und Zhao, X., *Band Engineering of High Performance p-Type  $\text{FeNbSb}$  based Half-Heusler Thermoelectric Materials for Figure of Merit  $zT > 1$* , Energy Environ. Sci., Jg. 8, Nr. 1, S. 216–220, 2015.
- [94] Rogl, G., Grytsiv, A., Yubuta, K., Puchegger, S., Bauer, E., Raju, C., Mallik, R. C. und Rogl, P., *In-Doped Multifilled n-Type Skutterudites with  $ZT = 1.8$* , Acta Materialia, Jg. 95, S. 201–211, 2015.
- [95] Treibacher Industrie AG, *Nichteisenmetalllegierungen – Produkte: Skutterudite für Thermoelektrik*, 2016. Verfügbar unter: <https://www.treibacher.com/de/produkte/nichteisenmetalllegierungen.html> (Zugriff am: 13.09.2017).
- [96] Fabián-Mijangos, A., Min, G. und Alvarez-Quintana, J., *Enhanced Performance Thermoelectric Module having Asymmetrical Legs*, Energy Conversion and Management, Jg. 148, S. 1372–1381, 2017.
- [97] Shi, Y., Mei, D., Yao, Z., Wang, Y., Liu, H. und Chen, Z., *Nominal Power Density Analysis of Thermoelectric Pins with Non-Constant Cross Sections*, Energy Conversion and Management, Jg. 97, S. 1–6, 2015.

- [98] Erturun, U., Erermis, K. und Mossi, K., *Effect of Various Leg Geometries on Thermo-Mechanical and Power Generation Performance of Thermoelectric Devices*, Applied Thermal Engineering, Jg. 73, Nr. 1, S. 128–141, 2014.
- [99] Schock, H., *Thermoelectric Conversion of Waste Heat to Electricity in an IC Engine Powered Vehicle: Final Report DEFC2604NT42281: Submitted to: US Department of Energy*, East Lansing, Michigan, USA, 2011.
- [100] Crane, D. T. und Bell, L. E., *Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator*, in: 25. ICT Konferenz, Wien, Österreich: IEEE, 06.–10. Aug. 2006, S. 11–16.
- [101] O-Flexx Technologies, *Thermoelektrische Generatoren - Ein variabler Leichtbauansatz*, 2012. Verfügbar unter: <https://www.o-flexx.com/> (Zugriff am: 06.10.2015).
- [102] Bass, J. C., Kushch, A. S. und Elsner, N. B., *Thermoelectric Generator (TEG) for heavy diesel trucks*, in: Proceedings of the 20th ICT Konferenz, Peking, China, 2001, S. 422–430.
- [103] Risseh, A. E., Nee, H.-P., Erlandsson, O., Brinkfeldt, K., Contet, A., Frobenius, F., Gaiser, G., Saramat, A., Skare, T., Nee, S. und Dellrud, J., *Design of a Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery Application on a Drivable Heavy Duty Vehicle*, SAE Commercial Vehicles, Jg. 10, Nr. 1, S. 26–44, 2017.
- [104] Cleary, M., Zhang, Y., Mazzotta, A., Young, H., Meda, L., Wang, X., Joshi, G., Yang, J., Engber, M. und Ma, Y., *Development of Thermoelectric Generators for Multiple Vehicle Exhaust Waste Heat Recovery Applications*, in: 4. Thermoelectrics Konferenz - Utilizing Waste Heat, Berlin, Deutschland, 10.–12. Okt. 2014.
- [105] Hi-Z Technology, I., *HZ-20 Thermoelectric Module*, San Diego, Kalifornien, 2014. Verfügbar unter: <https://hi-z.com/wp-content/uploads/2019/03/DataSheets/Data%20Sheet%20HZ-20.pdf> (Zugriff am: 01.03.2019).
- [106] Zuckermann, D., Balke, B., Prinz, P., Brockhaus, S., Macin, V., Eirich, D., Schewtschuk, A., Klingelhöfer, C., Fey, A. und Trache, M., *Industrialized Half-Heusler Materials and Thermoelectric Modules Therefrom*, in: 37. ICT/ 16. ECT Konferenz, Caen, Frankreich, 1.–5. Jul. 2018.
- [107] Bartholomé, K., Balke, B., Zuckermann, D., Köhne, M., Müller, M., Tarantik, K. und König, J., *Thermoelectric Modules Based on Half-Heusler Materials Produced in Large Quantities*, Electronic Materials, Jg. 43, Nr. 6, S. 1775–1781, 2014.
- [108] Kober, M., Knobelspies, T., Rossello, A. und Heber, L., *Thermoelectric Generators for Automotive Applications: Holistic Optimization and Validation by a Functional Prototype*, Electronic Materials, Jg. 49, Nr. 5, S. 2902–2909, 2020.
- [109] Kober, M., Heber, L., Heuer, J., Rinderknecht, F., König, J. und Friedrich, H. E., *RExTEG – Neuartiger Thermoelektrischer Generator zur Steigerung der Effizienz von Hybrid- und Range Extender Fahrzeugen: Projektbericht*, Stuttgart, 2015.

- [110] Salvador, J. R., Cho, J. Y., Ye, Z., Moczygemba, J. E., Thompson, A. J., Sharp, J. W., Koenig, J. D., Maloney, R., Thompson, T., Sakamoto, J., Wang, H. und Wereszczak, A. A., *Conversion Efficiency of Skutterudite-based Thermoelectric Modules*, Physical chemistry chemical physics : PCCP, Jg. 16, Nr. 24, S. 12 510–12 520, 2014.
- [111] Furukawa, *Skutterudite Thermoelectric Materials and Modules*. Verfügbar unter: <https://www.furukawakk.co.jp/pdf/e/130305.pdf> (Zugriff am: 16.12.2016).
- [112] Ziolkowski, P., Blaschkewitz, P. und Müller, E., *Heat flow measurement as a key to standardization of thermoelectric generator module metrology: A comparison of reference and absolute techniques*, Measurement, Jg. 15, Nr. 1627, S. 1–33, 2021.
- [113] VDI, Hg., *VDI-Wärmeatlas*, 12. Aufl., Wiesbaden: Springer, 2019.
- [114] Webb, R. L., *Plate fin surface geometries*, in: Heat Exchanger Design Handbook Multimedia, Danbury, Connecticut: Begellhouse, 2014. Verfügbar unter: [https://hedhme.com/content\\_map/](https://hedhme.com/content_map/) (Zugriff am: 14.08.2016).
- [115] Lee, W.-H., Hwang, H.-C., Lee, J.-S., Kim, P.-J., Lim, S.-H., Rhi, S.-H., Lee, K.-B. und Lee, K.-W., *Study on the Characteristics of an Alkali-Metal Thermoelectric Power Generation System*, Electronic Materials, Jg. 44, Nr. 10, S. 3534–3544, 2015.
- [116] Webb, R. L. und Kim, N.-H., *Principles of enhanced heat transfer*, 2. Aufl., Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2005.
- [117] Shah, R. K. und Sekulić, D. P., *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2003.
- [118] Gaiser, G. und Frobenius, F., *Potentiale und Grenzen von Thermoelektrischen Generatoren bei der Integration in Abgasanlagen von Kraftfahrzeugen*, in: 2. VDI Fachkonferenz - Thermische Rekuperation in Fahrzeugen, Stuttgart, Deutschland, 03. – 04. Mar. 2015.
- [119] Aixala, L., *RENTER Project*, in: Vortrag zum 2. Workshop - Thermoelectric Applications, San Diego, Kalifornien, USA, 04. Jan. 2011.
- [120] Hale, L. E., *Thermo Electric Battery for Motor Vehicles*, US1 134 452A, Patent, 1915.
- [121] Osipkov, A., Poshekhonov, R., Shishov, K. und Shiriaev, P., *Prospects and Problems of Increasing the Automotive Thermoelectric Generators Efficiency*, in: Bringing Thermoelectricity into Reality, Aranguren, P., Hg., London: IntechOpen, 2018. Verfügbar unter: <https://www.intechopen.com/chapters/61447doi:10.5772/intechopen.76971> (Zugriff am: 14.05.2018).
- [122] Fathabadi, H., *Internal Combustion Engine Vehicles: Converting the Waste Heat of the Engine Into Electric Energy to Be Stored in the Battery*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Jg. 67, Nr. 10, S. 9241–9248, 2018.
- [123] Arefin, A. M. E., Masud, M., Joardder, M. U. H., Mourshed, M., Hasan, N. und Rashid, F., *Waste heat recovery systems for internal combustion engines: A review*, in: 1. Internationale MEAS Konferenz, Dhaka, Bangladesh, 22. – 23. Feb. 2017, S. 1–4.

- [124] Crane, D., *Thermoelectric Waste Heat Recovery Program for Passenger Vehicles*, 2013. Verfügbar unter: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace080\\_crane\\_2013\\_o.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace080_crane_2013_o.pdf) (Zugriff am: 25.10.2015).
- [125] Elsner, N. B., Bass, J. C., Ghamaty, S., Krommenhoek, D., Kushch, A., Snowden, D. und Marchetti, S., *Clean Diesel Engine Component Improvement Program: Diesel Truck Thermoelectric Generator*, in: *Advanced Combustion Engine R&D*, Jg. IV.3 Waste Heat Recovery, S. 297–301.
- [126] Bass, J. C. und Elsner, N. B., *Thermoelectric applications to truck essential power*, in: *Essential Power Systems Workshop*, Washington, D. C., USA, 12.–13. Dez. 2001.
- [127] Schock, H., Brereton, G., Case, E., D'Angelo, J., Hogan, T., Lyle, M., Maloney, R., Moran, K., Novak, J., Nelson, C., Panayi, A., Ruckle, T., Sakamoto, J., Shih, T., Timm, E., Zhang, L. und Zhu, G., *Prospects for Implementation of Thermoelectric Generators as Waste Heat Recovery Systems in Class 8 Truck Applications*, *Energy Resources Technology*, Jg. 135, Nr. 2, 2013.
- [128] Espinosa, N., Lazard, M., Aixala, L. und Scherrer, H., *Modeling a Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery*, *Electronic Materials*, Jg. 39, Nr. 9, S. 1446–1455, 2010.
- [129] Steiner, B. und Follmer, M., *Application of Thermoelectric Generators for Commercial Vehicles*, in: *Konferenz - Automotive Thermoelectricity*, Wiesbaden, Deutschland, 02.–04. Dez. 2013.
- [130] Hervás-Blasco, E., Navarro-Peris, E., de Rosa, M. und Corberán, J. M., *Potential fuel saving in a powertrain derived from the recovery of the main energy losses for a long haul European mission*, *Energy Conversion and Management*, Jg. 150, S. 485–499, 2017.
- [131] Navarro-Peris, E., Hervás-Blasco, E., Corberan, J. M. und Rinaldi, A., *GASTONE: New Powertrain Concept for CNG Engines*, *SAE Technical Paper 2016-01-0548*, 2016.
- [132] Rinaldi, A., Merlo, A. M., Hervás-Blasco, E., Navarro-Peris, E. und Salvador, J. M. C., *GASTONE – Development of a New Powertrain Concept Based on the Integration of Electric Generation, Energy Recovery and Storage*, *Transportation Research Procedia*, Jg. 14, S. 1061–1070, 2016.
- [133] Thacher, E. F., Helenbrook, B. T., Karri, M. A. und Richter, C. J., *Testing of an Automobile Exhaust Thermoelectric Generator in a Light Truck*, *Automobile Engineering*, Jg. 221, Nr. 1, S. 95–107, 2007.
- [134] Bell, L. E., *State of Thermoelectric Waste Heat Recovery and Coolin/Heating in the U.S.* in: *Proceedings of Thermal Recuperation in the Motor Vehicle Conference*, Irwindale, Kalifornien, USA, 05.–06. Nov. 2009.
- [135] LaGrandeur, J. W. und Crane, D., *Combustion Exhaust Gas Heat to Power using Thermoelectric Generators: Automotive Waste Heat Conversion to Power Program-2011 Vehicle Technologies Program Annual Merit Review*, 2013. Verfügbar unter: [https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit\\_review\\_2011/adv\\_combustion/ace051\\_lagrandeur\\_2011\\_o.pdf](https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2011/adv_combustion/ace051_lagrandeur_2011_o.pdf) (Zugriff am: 10.10.2015).

- [136] Vale, S., Heber, L., Coelho, P. J. und Silva, C. M., *Parametric Study of a Thermoelectric Generator System for Exhaust Gas Energy Recovery in Diesel Road Freight Transportation*, Energy Conversion and Management, Jg. 133, S. 167–177, 2017.
- [137] Ponnusamy, P., de Boor, J. und Müller, E., *Using the Constant Properties Model for Accurate Performance Estimation of Thermoelectric Generator Elements*, Applied Energy, Jg. 262, Nr. 114587, S. 1–26, 2020.
- [138] Kishore, R. A., Sanghadasa, M. und Priya, S., *Optimization of Segmented Thermoelectric Generator using Taguchi and ANOVA Techniques*, Scientific reports, Jg. 7, Nr. 16746, S. 1–15, 2017.
- [139] Zhang, Q., Liao, J., Tang, Y., Gu, M., Ming, C., Qiu, P., Bai, S., Shi, X., Uher, C. und Chen, L., *Realizing a Thermoelectric Conversion Efficiency of 12% in Bismuth Telluride/Skutterudite Segmented Modules through Full-Parameter optimization and energy-loss minimized integration*, Energy & Environmental Science, Jg. 10, Nr. 4, S. 956–963, 2017.
- [140] VDI-Richtlinie 2206, *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, Berlin, 2004.
- [141] Hadas, Z., Singule, V., Vechet, S. und Ondrusek, C., *Development of Energy Harvesting Sources for Remote Applications as Mechatronic Systems*, in: Proceedings of 14th International EPE-PEMC, Ohrid, Macedonia: IEEE, 06.–08. Sep. 2010, S. T10–13–T10–19.
- [142] Fabian, T., *The Future of Trucks: The EU Perspective*, in: 16. Internationale VDI Commercial Vehicle Konferenz, Linz, Österreich, 07.–08. Sep. 2021.
- [143] Verkehrsrundschau, *CO<sub>2</sub>-Berechnung: Das Sonderheft zur Ermittlung von Treibhausgas-Emissionen in der Logistik*, 2011. Verfügbar unter: [https://www.verkehrsrundschau.de/fm/3576/VR-CO<sub>2</sub>\\_Spezial\\_2011\\_Juni.pdf](https://www.verkehrsrundschau.de/fm/3576/VR-CO2_Spezial_2011_Juni.pdf) (Zugriff am: 15.11.2018).
- [144] Heber, L., Sónia, V. und Friedrich, H. E., *Preliminary Investigations for a Thermoelectric Generator as an Alternative Energy Converter for Commercial Vehicles*, in: 11. Internationale Konferenz EVER, IEEE, Monte Carlo, Monaco, 06.–08. Apr. 2016, S. 1–8.
- [145] Mercedes-Benz, *Actros MP4*, 2018. Verfügbar unter: [https://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/trucks\\_.flash.html](https://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/trucks_.flash.html) (Zugriff am: 12.06.2018).
- [146] Heber, L., Schwab, J. und Friedrich, H. E., *Design of a Thermoelectric Generator for Heavy-Duty Vehicles: Approach Based on WHVC and Real Driving Vehicle Boundary Conditions*, in: Energy and Thermal Management, Air-Conditioning, and Waste Heat Utilization, ETA, Junior, C. und Dingel, O., Hg., Cham: Springer, 2019, S. 206–221.
- [147] Dunger, T., *CO<sub>2</sub>-Reduktion für schwere Güterkraftfahrzeuge im Fernverkehr: Eine systematische Analyse von Optionen für Kraftstoffauswahl und Antriebsstrang*, Diss., Berlin, 2018.

- [148] Holloh, K.-D., *Technologien für einen energieeffizienten Straßenverkehr*, Diss., Berlin, 2008.
- [149] ICCT, *Real-Driving Emissions Test Procedure for Exhaust Gas Pollutant Emissions of Cars and Light Commercial Vehicles in Europe*, 2017. Verfügbar unter: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/> (Zugriff am: 02.09.2019).
- [150] Heber, L., Schwab, J., Kangyi, Y., Grill, M., Rinderknecht, F. und Friedrich, H. E., *HD-TEG: Effizienzsteigerungspotential bei Nutzfahrzeugen durch den Einsatz eines neuartigen Abwärmenutzungssystems (Thermoelektrik): Projektbericht*, Stuttgart, 2021.
- [151] BMVI, *Amtliche Güterkraftverkehrsstatistik*, 2020. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/amtliche-gueterkraftverkehrsstatistik.html> (Zugriff am: 16.03.2020).
- [152] Ludanek, H., *Herausforderungen in der Lkw-Entwicklung – das passende Technikkonzept zu den Anforderungen zur Effizienzsteigerung in der Logistik*, in: 2. Lastauto Omnibus-Zukunftskongress, Ludwigsburg, Deutschland, 24. Sep. 2013. Verfügbar unter: <https://www.eurotransport.de/artikel/zukunftskongress-vortraege-herunterladen-6502006.html> (Zugriff am: 26.04.2015).
- [153] MAN Bus & Truck AG, *Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik: LKW und Bus*, 4. Aufl., München und Bonn: MAN Truck & Bus AG und Kirschbaum, 2016.
- [154] Parzen, E., *On Estimation of a Probability Density Function and Mode*, The Annals of Mathematical Statistics, Jg. 33, Nr. 3, S. 1065–1076, 1962.
- [155] Zürn, J., *Shaping future Transportation. Fuel efficiencies*, Vortrag anlässlich der Mercedes-Benz LKW Rekordfahrt in Nardo, Stuttgart, Deutschland, 01.05.2008.
- [156] Dittler, A., Zimmermann, F. und Gärtner, U., *Welchen Beitrag leistet die Abgasnachbehandlung zur CO<sub>2</sub> Reduktion?* in: 12. FAD Konferenz, Dresden, Deutschland, 05.–06. Nov. 2014.
- [157] Baehr, H. D. und Kabelac, S., *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, 16. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [158] Treffinger, P., Häfele, C., Weiler, T., Eder, A., Richter, R. und Mazar, B., *Energierückgewinnung durch Wandlung von Abwärme in Nutzenergie*, in: Konferenz Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte, Dresden, Deutschland, 06.–07. Nov. 2008, S. 385–405.
- [159] Klemes, J. J., Arsenyeva, O., Kapustenko, P. und Tovazhnyanskyy, L., *Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2015.
- [160] Bravo, Y., Larrosa, C., Arnal, C. und Gargiulo, V., *Untersuchung der Ablagerungsbildung bei AGR-Kühlern*, MTZ, Jg. 76, Nr. 5, S. 36–41, 2015.
- [161] Lee, H. S., *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2010.



- [162] Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H., *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*, 6. Aufl., München: Hanser, 2017.
- [163] Lindemann, U., *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, 3. Aufl., VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [164] Van Zyl, S., Heijne, V. und Ligterink, N., *Using a Simplified Willans Line Approach as a Means to evaluate the Savings Potential of CO<sub>2</sub> Reduction Measures in Heavy-duty Transport*, Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Jg. 7, Nr. 1, S. 99–117, 2017.
- [165] Giannelli, R. A., Nam, E. K., Helmer, K., Younglove, T., Scora, G. und Barth, M., *Heavy-Duty Diesel Vehicle Fuel Consumption Modeling Based on Road Load and Power Train Parameters*, SAE Technical Paper 2005-01-3549, 2005.
- [166] Grelet, V. und Tipner, P., *Assessment of Evaporators Used in Waste Heat Recovery Rankine Cycle Based Systems for Heavy Duty Truck Application*, in: Energy and Thermal Management, Air Conditioning, Waste Heat Recovery, Junior, C., Jänsch, D. und Dingel, O., Hg., Cham: Springer, 2017, S. 41–52.
- [167] Kitte, J., *Beurteilung und Optimierung thermoelektrischer Systeme im Rahmen der Rekuperation und Wandlung von thermischer Energie im Fahrzeug*, Diss., Berlin, 2015.
- [168] Haupt, C., *Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug*, Diss., München, 2013.
- [169] Woschni, G., *Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren*, in: MTZ, Jg. 31, 1970, S. 491–499.
- [170] Hohenberg, G., *Experimentelle Erfassung der Wandwärme von Kolbenmotoren*, Habilitation, Graz, 1980.
- [171] Bargende, M., *Ein Gleichungsansatz zur Berechnung der instationären Wandwärmeverluste im Hochdruckteil von Ottomotoren*, Diss., Darmstadt, 1990.
- [172] Mital, M., *Analytical analysis of heat transfer and pumping power of laminar nanofluid developing flow in microchannels*, Applied Thermal Engineering, Jg. 50, Nr. 1, S. 429–436, 2013.
- [173] Yang, K., Grill, M. und Bargende, M., *Simulative Investigation of the Influence of a Rankine Cycle Based Waste Heat Utilization System on Fuel Consumption and Emissions for Heavy Duty Utility Vehicles*, in: Energy and Thermal Management, Air-Conditioning, and Waste Heat Utilization, ETA, Junior, C. und Dingel, O., Hg., Cham: Springer, 2019, S. 172–193.
- [174] Jääskeläinen, H., *Engine Exhaust Back Pressure*, 2007. Verfügbar unter: [https://dieselnet.com/tech/diesel\\_exh.php](https://dieselnet.com/tech/diesel_exh.php) (Zugriff am: 12.04.2018).
- [175] Ghebru, D., *Modellierung und Analyse des instationären thermischen Verhaltens von Verbrennungsmotor und Gesamtfahrzeug*, Diss., Karlsruhe, 2013.

- [176] Varga, P., *Thermisches Modell eines Verbrennungsmotors zur Untersuchung des Warmlaufverhaltens*, Diss., Magdeburg, 2014.
- [177] Park, S. und Jung, D., *Numerical Modeling and Simulation of the Vehicle Cooling System for a Heavy Duty Series Hybrid Electric Vehicle*, SAE Technical Paper 2008-01-2421, 2008.
- [178] Karl, C. und Feldhaus, U., *CFD-Simulation für den Kühlkreislauf eines Lkw-Dieselmotors*, MTZ, Jg. 69, Nr. 2, S. 116–123, 2008.
- [179] The MathWorks, Inc., *Motorkühlsystem: Beispielmodell*, 2019. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/physmod/hydro/ug/engine-cooling-system.html;jsessionid=915be46bc719e43b89d0cc28969d> (Zugriff am: 31.08.2019).
- [180] Kurek, R., *Nutzfahrzeug-Dieselmotoren: Stand der Technik - Entwicklungs- und Innovationspotenziale - Optimierungspotenziale*, München: Carl Hanser, 2006.
- [181] Iveco, *Stralis NP*, 2018. Verfügbar unter: <https://www.iveco.com/germany/neufahrzeuge/pages/new-stralis-np-gas-truck.aspx> (Zugriff am: 06.12.2018).
- [182] Sigloch, H., *Strömungsmaschinen: Grundlagen und Anwendungen*, 6. Aufl., München: Hanser, 2018.
- [183] Oberfell, R., *Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug: Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren*, Diss., Karlsruhe, 2015.
- [184] Heber, L. und Schwab, J., *Modelling of a Thermoelectric Generator for Heavy-Duty Natural Gas Vehicles: Techno-Economic Approach and Experimental Investigation*, Applied Thermal Engineering, Jg. 174, S. 115–156, 2020.
- [185] Haberkorn, *Optimierung von Riemenantrieben*. Verfügbar unter: <https://www.haberkorn.com/kataloge/leitfaden-fuer-die-auswahl-energieeffizienter-riemen/files/assets/common/downloads/publication.pdf> (Zugriff am: 15.05.2020).
- [186] Centro Ricerche Fiat, *Case Study Fiat: The First Light Commercial Vehicle Equipped with a Thermoelectric Generator*, in: 3. Internationale Konferenz: Thermal Management for EV/HEV, Darmstadt, Deutschland, 24.–26. Jun. 2013.
- [187] Smith, K. und Thornton, M., *Feasibility of Thermoelectrics for Waste Heat Recovery in Conventional Vehicles: Technical Report NREL/TP-540-44247: Forschungsbericht für U.S. Department of Energy*, 2009. Verfügbar unter: <https://www.osti.gov/bridge> (Zugriff am: 20.05.2014).
- [188] Barwig, U. und Hartmann, H., *Kosten- und Leistungsrechnung in der Spedition*, Oldenbourg: De Gruyter, 2015.
- [189] Wittenbrink, P., *Transportmanagement: Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe*, 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [190] Redelbach, M., *Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative PKW-Antriebskonzepte*, Diss., Stuttgart, 2016.

- [191] Geissdörfer, K., Gleich, R. und Wald, A., *Standardisierungspotentiale lebenszyklusbasierter Modelle des strategischen Kostenmanagements*, Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Jg. 79, Nr. 6, S. 693–715, 2009.
- [192] Eberhardt, M., Egger, N. und Weckbach, M., *Rechnungswesen Spedition und Logistikdienstleistung*, 16. Aufl., Braunschweig: Winklers, 2015.
- [193] Marek, R. und Nitsche, K., *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben*, 3. Aufl., München: Carl Hanser, 2012.
- [194] König, J. D., Tarantik, K., Bartholomé, K., Heuer, J., Horzella, J., Vetter, U. und Vergez, M., *Thermoelectrics on the Way to Mass Production: Fraunhofer IPM*, in: 3. VDI Fachkonferenz - Thermische Rekuperation in Fahrzeugen, Stuttgart, Deutschland, 25.–26. Jan. 2017.
- [195] Hendricks, T. J., Yee, S. und LeBlanc, S., *Cost Scaling of a Real-World Exhaust Waste Heat Recovery Thermoelectric Generator: A Deeper Dive*, Electronic Materials, Jg. 45, Nr. 3, S. 1751–1761, 2016.
- [196] LeBlanc, S., *Thermoelectric generators: Linking material properties and systems engineering for waste heat recovery applications*, Sustainable Materials and Technologies, Jg. 1-2, S. 26–35, 2014.
- [197] LeBlanc, S., Yee, S. K., Scullin, M. L., Dames, C. und Goodson, K. E., *Material and Manufacturing Cost Considerations for Thermoelectrics*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 32, S. 313–327, 2014.
- [198] Felten, F., *Thermoelectric Generator for Automotive Application: Prerequisites for Industrialization*, in: 4. Thermoelectrics Konferenz - Utilizing Waste Heat, Berlin, Deutschland, 10.–12. Okt. 2014.
- [199] Salzgeber, K., Prenninger, P., Grytsiv, A., Rogl, P. und Bauer, E., *Skutterudites: Thermoelectric Materials for Automotive Applications?* Electronic Materials, Jg. 39, Nr. 9, S. 2074–2078, 2010.
- [200] Hagelüken, C., *Autoabgaskatalysatoren: Grundlagen - Herstellung - Entwicklung - Recycling - Ökologie*, 3. Aufl., Renningen: Expert, 2016.
- [201] Yelle, L. E., *Estimating learning curves for potential products*, Industrial Marketing Management, Jg. 5, Nr. 2-3, S. 147–154, 1976.
- [202] Mock, P., *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)*, Diss., Stuttgart, 2010.
- [203] Thermalforce, *TEM Datenblatt TEG 070-600-6*. Verfügbar unter: <https://thermalforce.de/de/product/thermogenerator/> (Zugriff am: 22.08.2018).
- [204] Demir, M. E. und Dincer, I., *Performance Assessment of a Thermoelectric Generator Applied to Exhaust Waste Heat Recovery*, Applied Thermal Engineering, Jg. 120, S. 694–707, 2017.

- [205] Wang, Y., Li, S., Zhang, Y., Yang, X., Deng, Y. und Su, C., *The influence of inner topology of exhaust heat exchanger and thermoelectric module distribution on the performance of automotive thermoelectric generator*, Energy Conversion and Management, Jg. 126, S. 266–277, 2016.
- [206] Bai, S., Lu, H., Wu, T., Yin, X., Shi, X. und Chen, L., *Numerical and Experimental Analysis for Exhaust Heat Exchangers in Automobile Thermoelectric Generators*, Case Studies in Thermal Engineering, Jg. 4, S. 99–112, 2014.
- [207] Su, C. Q., Wang, W. S., Liu, X. und Deng, Y. D., *Simulation and Experimental Study on Thermal Optimization of the Heat Exchanger for Automotive Exhaust-based Thermoelectric Generators*, Case Studies in Thermal Engineering, Jg. 4, S. 85–91, 2014.
- [208] Bargende, M., *Zukunft der Motorprozessrechnung und 1D-Simulation*, MTZ, Jg. 75, Nr. 15, S. 108–113, 2014.
- [209] Marler, R. T. und Arora, J. S., *Survey of multi-objective optimization methods for engineering*, Structural and Multidisciplinary Optimization, Jg. 26, Nr. 6, S. 369–395, 2004.
- [210] Eschenauer, H. A., *Multidisciplinary Optimization Procedure in Design Processes*, in: Emerging Methods for Multidisciplinary Optimization, Blachut, J. und Eschenauer, H. A., Hg., Wien: Springer, 2001, S. 1–51.
- [211] Gnielinski, V., *Wärmeübertragung bei der Strömung durch Rohre*, in: VDI-Wärmeatlas, VDI, Hg., Wiesbaden: Springer, 2018, S. G1–G9.
- [212] Manglik, R. M. und Bergles, A. E., *Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger*, Experimental Thermal and Fluid Science, Jg. 10, Nr. 2, S. 171–180, 1995.
- [213] Yang, Y. und Li, Y., *General prediction of the thermal hydraulic performance for plate-fin heat exchanger with offset strip fins*, Heat and Mass Transfer, Jg. 78, S. 860–870, 2014.
- [214] Champier, D., *Thermoelectric Generators: A Review of Applications*, Energy Conversion and Management, Jg. 140, S. 167–181, 2017.
- [215] Dukhan, N., Hg., *Metal Foams: Fundamentals and Applications*, Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2013.
- [216] Wang, T., Luan, W., Wang, W. und Tu, S.-T., *Waste heat recovery through plate heat exchanger based thermoelectric generator system*, Applied Energy, Jg. 136, S. 860–865, 2014.
- [217] Wang, T., Luan, W., Liu, T., Tu, S.-T. und Yan, J., *Performance enhancement of thermoelectric waste heat recovery system by using metal foam inserts*, Energy Conversion and Management, Jg. 124, S. 13–19, 2016.
- [218] Lu, C., Wang, S., Chen, C. und Li, Y., *Effects of Heat Enhancement for Exhaust Heat Exchanger on the Performance of Thermoelectric Generator*, Applied Thermal Engineering, Jg. 89, S. 270–279, 2015.

- [219] Aquino, J., Duarte, I. und Dias-de Oliveira, J., *Modelling and effective properties prediction of metal foams*, Science and Technology of Materials, Jg. 30, Nr. 1, S. 43–49, 2018.
- [220] Suleiman, A. S. und Dukhan, N., *Basic Cell Geometry for Modeling Flow in Metal Foam*, in: Proceedings of the ASME Power Conference, Volume 2, Jg. V002T11A002., Boston, Massachusetts: American Society of Mechanical Engineers, 29. Jul. – 01. Aug. 2013.
- [221] Kneer, A., *Numerische Untersuchung des Wärmeübertragungsverhaltens in unterschiedlichen porösen Medien*, Diss., Karlsruhe, 2014.
- [222] Ando, K., *An Accurate Experimental Determination of Interstitial Heat Transfer Coefficients of Ceramic Foams Using the Single Blow Method*, The Open Transport Phenomena Journal, Jg. 5, Nr. 1, S. 7–12, 2013.
- [223] Nakayama, A., *Heat Transfer in Metal Foams*, in: Metal Foams Fundamental and Applications, Dukhan, N., Hg., Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2013, S. 217–284.
- [224] Du Plessis, P., Montillet, A., Comiti, J. und Legrand, J., *Pressure Drop Prediction for Flow through High Porosity Metallic Foams*, Chemical Engineering Science, Jg. 49, Nr. 21, S. 3545–3553, 1994.
- [225] Dukhan, N., *Principles of Fluid Flow through Open-Cell Metal Foam*, in: Metal Foams Fundamental and Applications, Dukhan, N., Hg., Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2013, S. 31–74.
- [226] Hwang, J.-J., Hwang, G.-J., Yeh, R.-H. und Chao, C.-H., *Measurement of Interstitial Convective Heat Transfer and Frictional Drag for Flow Across Metal Foams*, Heat Transfer, Jg. 124, Nr. 1, S. 120–129, 2002.
- [227] Jung, A., *Offenporige, nanobeschichtete Hybrid-Metallschäume: Herstellung und mechanische Eigenschaften*, Diss., Saarbrücken, 2011.
- [228] Ashby, M. F. und Medalist, R. F. M., *The mechanical properties of cellular solids*, Metallurgical Transactions A, Jg. 14, Nr. 9, S. 1755–1769, 1983.
- [229] Hayes, A. M., Khan, J. A., Shaaban, A. H. und Spearing, I. G., *The Thermal Modeling of a Matrix Heat Exchanger using a Porous Medium and the Thermal Non-Equilibrium Model*, Thermal Sciences, Jg. 47, Nr. 10, S. 1306–1315, 2008.
- [230] Klaas Haertel, J. H., Engelbrecht, K., Lazarov, B. S. und Sigmund, O., *Topology Optimization of Thermal Heat Sinks*, in: Proceedings COMSOL Konferenz, Grenoble, Schweiz, 14.–16. Okt. 2015, S. 1–6.
- [231] Dede, E. M., Joshi, S. N. und Zhou, F., *Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink*, Mechanical Design, Jg. 137, Nr. 11, S. 1–9, 2015.
- [232] Niknam, S. A., Mortazavi, M. und Li, D., *Additively Manufactured Heat Exchangers: A Review on Opportunities and Challenges*, Advanced Manufacturing Technology, Jg. 112, Nr. 3–4, S. 601–618, 2021.

- [233] Scheithauer, U., Kordaß, R., Noack, K., F. Eichenauer, M., Hartmann, M., Abel, J., Ganzer, G. und Lordick, D., *Potentials and Challenges of Additive Manufacturing Technologies for Heat Exchanger*, in: *Advances in Heat Exchangers*, Castro Gómez, L. und Manuel Velázquez Flores, V., Hg., London: IntechOpen, 2018. Verfügbar unter: <https://www.intechopen.com/chapters/63132doi:10.5772/intechopen.80010> (Zugriff am: 20.05.2019).
- [234] Henning, F. und Moeller, E., *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, 2. Aufl., München: Hanser, 2020.
- [235] Kim, H. S., Kikuchi, K., Itoh, T., Iida, T. und Taya, M., *Design of Segmented Thermoelectric Generator based on Cost-Effective and Light-Weight Thermoelectric Alloys*, *Materials Science and Engineering: B*, Jg. 185, S. 45–52, 2014.
- [236] Ponnusamy, P., de Boor, J. und Müller, E., *Averaging of Material Properties for Performance Estimation of Thermoelectric Generators using a Constant Property Model (CPM)*, in: MSE Konferenz, Darmstadt, Deutschland, 26.–28. Sep. 2018.
- [237] Suarez, F., Nozariasbmarz, A., Vashaee, D. und Öztürk, M. C., *Designing Thermoelectric Generators for Self-Powered Wearable Electronics*, *Energy & Environmental Science*, Jg. 9, Nr. 6, S. 2099–2113, 2016.
- [238] Lossec, M., Multon, B. und Ben Ahmed, H., *Sizing Optimization of a Thermoelectric Generator Set with Heatsink for Harvesting Human Body Heat*, *Energy Conversion and Management*, Jg. 68, S. 260–265, 2013.
- [239] Tian, H., Sun, X., Jia, Q., Liang, X., Shu, G. und Wang, X., *Comparison of Segmented and Traditional Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery of Diesel Engine*, *Energy Procedia*, Jg. 75, S. 590–596, 2015.
- [240] Marti, H., Heel, A., Populoh, S., Brunko, O., Roos, M., Acremann, Y., Meier, G., Hurschler, P. und Uebersax, R., *Konzept/ Machbarkeitsstudie eines 50 kW-TEGenerators im Schwerindustrienumfeld: Schlussbericht*, Bern, Schweiz, Aug. 2014.
- [241] Saqr, K. M., Mansour, M. K. und Musa, M. N., *Thermal Design of Automobile Exhaust based Thermoelectric Generators: Objectives and Challenges*, *Automotive Technology*, Jg. 9, Nr. 2, S. 155–160, 2008.
- [242] Castro Gómez, L. und Manuel Velázquez Flores, V., Hg., *Advances in Heat Exchangers*, London: IntechOpen, 2019. Verfügbar unter: <https://www.intechopen.com/books/7273doi:10.5772/intechopen.74640> (Zugriff am: 25.10.2019).
- [243] Zhang, X., Keramati, H., Arie, M., Singer, F., Tiwari, R., Shooshtari, A. und Ohadi, M., *Recent Developments in High Temperature Heat Exchangers: A Review*, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, Jg. 11, S. 1–14, 2018.
- [244] VDI-Richtlinie 2225, *Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren: Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, VDI-Richtlinien, Düsseldorf: VDI, Nov. 1998, Blatt 3.

- [245] Stiewe, C. und Müller, E., *Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen Chancen für NRW: Studie im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft, Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen*, Köln, DLR-Forschungsbericht, 2015. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/100251/1/> (Zugriff am: 19.11.2015).
- [246] König, J. D., *Current Status of Thermoelectrics History, Recent Progress and Future Aspects: Fraunhofer IPM*, in: 2. VDI Fachkonferenz - Thermische Rekuperation in Fahrzeugen, Stuttgart, Deutschland, 03. – 04. Mar. 2015.
- [247] Yamaha, *Thermoelectric Generator Examples: Press release*. Verfügbar unter: [https://device.yamaha.com/en/thermoelectric\\_cooler/generator/](https://device.yamaha.com/en/thermoelectric_cooler/generator/) (Zugriff am: 19.07.2021).
- [248] Bosch, H., *From Modules to a Generator: An Integrated Heat Exchanger Concept for Car Applications of a Thermoelectric Generator*, *Electronic Materials*, Jg. 45, Nr. 3, S. 1606–1612, 2016.
- [249] Quan, R., Tang, X., Quan, S. und Huang, L., *A Novel Optimization Method for the Electric Topology of Thermoelectric Modules Used in an Automobile Exhaust Thermoelectric Generator*, *Electronic Materials*, Jg. 42, Nr. 7, S. 1469–1475, 2013.
- [250] Montecucco, A. und Knox, A. R., *Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 30, Nr. 2, S. 828–839, 2015.
- [251] Carstens, J. H. H., *Control and Optimization of a DC-DC Converter for Thermoelectric Generators*, Diss., Berlin, 2016.
- [252] Thermoelectric Conversion Systems Ltd., *KM3 – Wide-Ranging MPPT Converter*, 2019. Verfügbar unter: <https://www.teconversion.com/product/km3-wide-ranging-mppt-converter/> (Zugriff am: 19.11.2019).
- [253] VDI-Richtlinie 2225, *Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren: Vereinfachte Kostenermittlung*, VDI-Richtlinien, Düsseldorf: VDI, Nov. 1997, Blatt 1.
- [254] Daimler AG, *Industrialisierungskonzept für hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung in Automobilen auf Basis neuartiger Materialien: EcoTEG; Abschlussbericht Daimler AG; Laufzeit: 01.01.2011 – 31.12.2013*, Ulm und Hannover, 2013.
- [255] Kieselstein GmbH, *Strucwire*, 2014. Verfügbar unter: [https://www.kieselstein.com/csdata/download/1/de/produktblatt\\_strucwire\\_662.pdf](https://www.kieselstein.com/csdata/download/1/de/produktblatt_strucwire_662.pdf) (Zugriff am: 20.03.2018).
- [256] Montecucco, A., Siviter, J. und Knox, A. R., *The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel*, *Applied Energy*, Jg. 123, S. 47–54, 2014.
- [257] Barako, M. T., Park, W., Marconnet, A. M., Asheghi, M. und Goodson, K. E., *Thermal Cycling, Mechanical Degradation, and the Effective Figure of Merit of a Thermoelectric Module*, *Electronic Materials*, Jg. 42, Nr. 3, S. 372–381, 2013.

- [258] Rodriguez, R., Preindl, M., Cotton, J. S. und Emadi, A., *Review and Trends of Thermoelectric Generator Heat Recovery in Automotive Applications*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Jg. 68, Nr. 6, S. 5366–5378, 2019.
- [259] Heber, L., *Thermoelectric Generators for Heavy-Duty Vehicles: A Systemic Approach and Development*, in: 37. ICT/ 16. ECT Konferenz, Caen, Frankreich, 1.–5. Jul. 2018.
- [260] Schlott, S., *Entwicklungspfade zum CO<sub>2</sub>-neutralen Güterverkehr*, ATZ, Jg. 122, Nr. 4, S. 8–13, 2020.
- [261] Kleiner, F., *Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft: Systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte*, Diss., Stuttgart, 2020.
- [262] Heidt, C., Biermann, K., Dünnebeil, F., Jamet, M., Lambrecht, U. und Wüthrich, P., *Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen: Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes*, Heidelberg, 2018.
- [263] Blum, V., *Wirtschaftliche Erfüllung von CO<sub>2</sub>-Vorschriften für schwere Nutzfahrzeuge*, Diss., Aachen, 2017.
- [264] Mayr, K., Hofer, F., Ragowsky, G., Gruber, W., Arnberger, A., Kabza, A., Wolf, P., Schmidt, M. und Jörissen, L., *Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug: Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte*, e-mobil BW GmbH - Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive, Stuttgart, Jul. 2021.
- [265] Dorfer, F. J., *Physical Transport in a Digital World*, in: 16. Internationale VDI Commercial Vehicle Konferenz, Linz, Österreich, 07.–08. Sep. 2021.
- [266] Lozanovski, A., Dingel, O., Semper, T. und Geß, A., *Technische und ökobilanzielle Analyse von Langstrecken-Lastkraftwagen für das Jahr 2050*, ATZ heavyduty, Jg. 13, Nr. 1, S. 56–61, 2020.
- [267] Jöhrens, J., Allekotte, M., Heining, F., Helms, H., Räder, D., Köllermeier, N. und Waßmuth, V., *Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht*, ifeu, Heidelberg/ Karlsruhe, Jan. 2022.
- [268] EU, *Verordnung 2019/1242 des europäischen Parlaments und des Rates zur Festlegung von CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge*, 20. Jun. 2019. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1242/oj> (Zugriff am: 2021-12-28).
- [269] Lastauto Omnibus, *Spezial: Herkunft + Ausblick: Die Herausforderungen der LKW-Industrie*, Lastauto Omnibus, Sonderheft, S. 14–22, 2019.
- [270] Köllner, C., *Pro und Contra Oberleitungs-LKW*, Onlineartikel, Springer Professional, 16.04.2020. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/schwere-lkw/emissionen/pro-und-contra-oberleitungs-lkw/17781332> (Zugriff am: 20.04.2020).



- [271] Wietschel, M., Plötz, P., Moll, C., Speth, D., Buch, J., Stütz, S., Schellert, M., Rüdiger, D., Balz, W., Frik, H., Waßmuth, V., Paufler-Mann, D., Rödl, A., Schade, W. und Mader, S., *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw: Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie*, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Feb. 2017.
- [272] Hacker, F., Blanck, R., Görz, W., Bernecker, T., Speiser, J., Röckle, F., Schubert, M. und Nebauer, G., *StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge: Endbericht*, Öko-Institut e.V, Freiburg, Feb. 2020.
- [273] Ballard, *Brennstoffzellen: Datenblatt*. Verfügbar unter: <https://www.ballard.com/> (Zugriff am: 13.08.2020).
- [274] Koch, D., Ebert, T. und Sousa, A., *Transformation vom Diesel zum H2-Hoch-AGR-Magerkonzept*, ATZ heavyduty, Jg. 13, Nr. 2, S. 32–41, 2020.
- [275] Nikola Motor Company, *NikolaOne*. Verfügbar unter: <https://nikolamotor.com/one> (Zugriff am: 13.08.2020).
- [276] PowerCell, *Brennstoffzellen: Datenblatt*. Verfügbar unter: <https://powercell.se/> (Zugriff am: 13.08.2020).
- [277] Koch, D. und Bertram, D., *Der Wasserstoffverbrennungsmotor als nachhaltige Alternative im stationären Anwendungsfall*, Nordhausen, Deutschland, S. 27–42, 07. – 09. Feb. 2019.
- [278] Zhang, L., Xing, Y., Xu, H., Wang, H., Zhong, J. und Xuan, J., *Comparative Study of Solid Oxide Fuel Cell Combined Heat and Power System with Multi-Stage Exhaust Chemical Energy Recycling: Modeling, Experiment and Optimization*, Energy Conversion and Management, Jg. 139, S. 79–88, 2017.
- [279] Kurzweil, P., *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung*, 3. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [280] Takezawa, S., Wakahara, K., Araki, T., Onda, K. und Nagata, S., *Cycle Analysis using Exhaust Heat of SOFC and Turbine Combined Cycle by Absorption Chiller*, Electrical Engineering in Japan, Jg. 167, Nr. 1, S. 49–55, 2009.
- [281] Hilgers, M., *Kraftstoffverbrauch und Verbrauchsoptimierung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [282] Openrouteservice, *Topografisches Kartenmaterial*. Verfügbar unter: <https://maps.openrouteservice.org/> (Zugriff am: 12.05.2018).
- [283] Artec, *Motor-Kühlmittel*. Verfügbar unter: <https://www.arteco-coolants.com/> (Zugriff am: 22.10.2020).
- [284] Affolter, *Gefrierverhalten von Frostschutz: Ethylenglykol-Wasser Gemische*. Verfügbar unter: <https://www.affolterchem.ch/> (Zugriff am: 21.10.2020).
- [285] Grandidier, J., Woerner, D. und Burk, T., *Cassini Power During the 20 Year Mission and Until the Final Plunge Into Saturn*, NETS 2018 Konferenz, Las Vegas, Nevada, USA, 26. Feb. – 01. Mar. 2018.

- [286] Fleurial, J. P., *Advanced Radioisotope Power Systems for Future Space Science & Exploration*, 18. ECT Konferenz, Barcelona, Spanien, 14.–16. Sep. 2022.
- [287] Kakaç, S., Liu, H. und Pramuanjaroenkij, A., *Heat Exchangers*, 2. Aufl., London: Chapman and Hall/CRC, 2002.
- [288] TEMA, *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 6. Aufl., New York: TEMA, 1978.
- [289] Kern, D. Q. und Seaton, R. E., *A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling*, British Chemical Engineering, Jg. 4, Nr. 5, S. 258–262, 1959.
- [290] Giersch, H.-U., Harthus, H. und Vogelsang, N., *Elektrische Maschinen: Prüfen, Normung, Leistungselektronik*, 5. Aufl., Stuttgart: Vieweg + Teubner, 2003.
- [291] Bošnjaković, F. und Knoche, K. F., *Technische Thermodynamik*, 8. Aufl., Darmstadt: Steinkopff, 1998.
- [292] Adleff, K., Kamossa, K. und Kley, M., *Turbo-Compound-Systeme an Nutzfahrzeugmotoren – Anforderungen, Nutzen und innovative Lösungsansätze*, in: Proceedings-1. Internationaler Motorenkongress, Springer, Liebl, J., Hg., Wiesbaden, Deutschland, 18. – 19. Feb. 2014, S. 403–415.