



Ganzheitliche Modellerstellung zur Wirkungsgraderhöhung  
von Nutzfahrzeugen durch thermische Rekuperation

Michael G. Bernath



Michael G. Bernath

## **Ganzheitliche Modellerstellung zur Wirkungsgraderhöhung von Nutzfahrzeugen durch thermische Rekuperation**

Herausgegeben von:  
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister  
**LVK** - Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen  
Technische Universität München

Zugleich:  
Dissertation, München, Technische Universität München, 2015

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben - auch bei nur auszugsweiser Verwendung - vorbehalten.

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht völlig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Layout und Satz: Michael G. Bernath  
Copyright © Michael G. Bernath 2015  
ISBN: 978-3-943813-14-2



# Technische Universität München

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

## **Ganzheitliche Modellerstellung zur Wirkungsgraderhöhung von Nutzfahrzeugen durch thermische Rekuperation**

Dipl.-Ing. (Univ.)

Michael G. Bernath

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Hornung

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Spliethoff

Die Dissertation wurde am 08.01.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.09.2015 angenommen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung und Schwerpunkte .....	2
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>4</b>
2.1	Thermische Rekuperation im Automobilbereich .....	4
2.2	Simulationsmodelle hinsichtlich Wärmerekuperation und Thermomanagement .....	13
<b>3</b>	<b>Potenzielle Abwärmequellen im Nutzfahrzeug.....</b>	<b>16</b>
3.1	Potenzialabschätzung der Exergieströme .....	18
3.2	Strecken- und Exergieanalyse im Nutzfahrzeug .....	24
<b>4</b>	<b>System- und Modellbeschreibung des Rankine-Cycle .....</b>	<b>27</b>
4.1	Topologie des Rankine-Cycle .....	27
4.2	Arbeitsmedium .....	29
4.3	Förderpumpen .....	30
4.4	Wärmeübertrager: Verdampfer und Kondensator .....	31
4.5	Bypass- und Drosselventil.....	43
4.6	Expansionsmaschine .....	44
4.7	Regelung.....	59
<b>5</b>	<b>System- und Modellbeschreibung des TEG .....</b>	<b>62</b>
5.1	Thermoelektrische Effekte .....	63
5.2	Topologie und Modellaufbau des Thermoelektrischen Generators .....	67
5.3	Verifikation des TEG-Modells.....	71
<b>6</b>	<b>Erstellung des ganzheitlichen Fahrzeugmodells.....</b>	<b>74</b>
6.1	Dreifach gekoppelte Simulation.....	75
6.2	Definition der Schnittstellen.....	77
6.3	Performance und Stabilität .....	79
<b>7</b>	<b>Versuchsaufbau und Messstellen .....</b>	<b>82</b>
7.1	Prüfstand Rankine-Cycle.....	83
7.2	Prüfstand Thermoelektrischer Generator .....	85
<b>8</b>	<b>Validierung der Simulationsmodelle .....</b>	<b>87</b>
8.1	Validierung der Rankine-Cycle-Modelle .....	87
8.2	Validierung der TEG-Modelle .....	92

---

<b>9</b>	<b>Simulationsergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>95</b>
9.1	Anpassung und Optimierung des thermoelektrischen Generators auf die Nutzfahrzeuganwendung .....	95
9.2	Anpassung und Optimierung des Rankine-Cycles .....	100
9.3	Auswirkungen der thermischen Rekuperation auf das Gesamtfahrzeug .....	106
9.4	Auswirkungen der thermischen Trägheit .....	113
9.5	Wirkungsgraderhöhung durch thermische Rekuperation unter dynamischen Bedingungen .....	116
<b>10</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>124</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>127</b>
<b>12</b>	<b>Studentische Arbeiten.....</b>	<b>141</b>