

Inhaltsverzeichnis

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

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

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