

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Nomenklatur	X
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik und Präzisierung der Aufgabenstellung	5
2.1 Grundlagen zur Thermoelektrik	5
2.2 Anwendung in der Automobilindustrie	7
2.3 Materialien	8
2.4 Module	9
2.5 Wärmeübertrager	11
2.6 Systemintegration	11
2.7 Virtueller Design-Prozess	12
2.8 Präzisierung der Aufgabenstellung	13
3 Energetische und exergetische Betrachtung am Antriebssystem	15
3.1 Verlustleistungsanalyse am aktuellen Antriebssystem	15
3.2 Exergieflussbetrachtung am Antriebssystem	16
3.3 Kreisprozesse	18
3.3.1 Kennzahlen	19
3.3.2 Carnot-Prozess	19
3.3.3 Joule-Brayton-Prozess	20
3.3.4 Clausius-Rankine-Prozess	22
3.3.5 Seebeck-Prozess	23
3.4 Prozessvergleich	25
3.5 Implementierung in das Fahrzeug	27

4 Entwurf einer virtuellen Systemumgebung	28
4.1 Allgemeiner Design-Prozess	28
4.2 Modell- und Simulationsumgebung	29
4.3 Quasi-zweidimensionales dynamisches Simulationsmodell	31
4.3.1 Bilanzraum - Thermoelektrisches System	32
4.3.2 Bilanzraum - Wärmeübertragungssystem	34
4.4 Das quasi-stationäre kontinuierliche Simulationsmodell	38
4.4.1 Bilanzraum - Thermoelektrisches System	40
4.4.2 Bilanzraum - Wärmeübertragungssystem	43
4.5 Verifikation der Modellebenen	45
4.5.1 Ergebnisvergleich zwischen Ebene 3 und Ebene 1	45
4.6 Das virtuelle Fahrzeugmodell	48
4.7 Experimentelle Analysen	51
4.7.1 Modulprüfstand	51
4.7.2 Heißgasprüfstand	53
5 Thermogeneratoranalyse am Beispiel eines planaren mehrflutigen Systems	56
5.1 Definition der Zielleistung	56
5.2 Aufbau der Grundstruktur	57
5.3 Veränderliche Größen	59
5.4 Randbedingungen	59
5.4.1 Thermische und volumetrische Randbedingungen	60
5.4.2 Fertigungstechnische Randbedingungen	61
5.4.3 Geometrische Randbedingungen	61
5.4.4 Materielle Zwangsbedingungen - Einfluss Rippenmaterial	62
5.4.5 Ermittlung einer geeigneten Kanalzahl	64
5.4.6 Untersuchung der Einbauposition	66
5.4.7 Bypassintegration im 1-Kanal-System	67
5.5 Verifikation mit CFD-Ergebnissen	70

6	Thermogeneratorsynthese am Beispiel der ausgewählten Kanalvarianten	72
6.1	Aufbau der Grundstruktur sowie thermische und elektrische Kontaktierung	72
6.2	Schenkelpaargeometrie	73
6.3	Materialegmentierung	78
6.4	Vergleich ausgewählter Ergebnisse mit einem FEM-Zweischenkelmodul	80
6.5	Ganzheitliche ortsabhängige Optimierung	83
6.5.1	Definition geeigneter Optimierungsvariablen	87
6.6	Optimierungsmethode - Simplex-Verfahren	88
6.7	Optimierung am Beispiel des dreiflutigen Thermogenerators	88
6.7.1	Optimierung im Auslegungspunkt	88
6.7.2	Optimierung im Betriebsbereich	93
6.8	Ergebnisvergleich der ausgewählten Maßnahmen mit dem ein- und zweiflutigen System	99
6.9	Dimensionierung der Module	102
6.10	Ergebnisvergleich zwischen der Modellebene 2 und der Modellebene 1	106
6.11	Vergleich des einflutigen Thermogenerators mit ausgewählten Messergebnissen	107
7	Gesamtsystembetrachtung und Energiemanagement	109
7.1	Integration Abgasstrang	110
7.2	Integration Kühlsystem	110
7.3	Integration Bordnetz	111
7.4	Definition von Funktionalitäten für ein ganzheitliches Energiemanagement	114
7.5	Gesamtsystemsimulation am Beispiel des einflutigen Thermogenerators	115
7.5.1	Einfluss der Betriebsstrategien	117
7.5.2	Verbrauchseinsparung	120
7.5.3	Systemkostenoptimierung	122

8	Generalisierung des integralen thermoelektrischen Systemverhaltens	128
8.1	Definition von generalisierten Kennzahlen	128
8.1.1	Ableitung materialbezogener Kennzahlen	128
8.1.2	Ableitung systembezogener Kennzahlen	130
8.1.3	Erörterung und Ableitung geeigneter Einflussvariablen	133
8.1.4	Änderungen der Kanalrandbedingungen	134
8.2	Ableitung eines „Wunsch“-ZTs	139
8.2.1	Vergleich der geschlossenen Lösung mit dem kontinuierlichen Modell	141
9	Vergleich der Kanalvarianten anhand der definierten Bewertungskriterien	144
9.1	Absolute elektrische Leistung und Leistungspreizung	144
9.2	Leistungsdichte und Systemwirkungsgrad	146
9.3	Sensitivität	148
9.4	Schnittstellenvariablen zum Gesamtsystem	150
9.5	Vergleich im Gesamtsystem	153
9.5.1	Betriebsstrategien	153
9.5.2	Verbrauchseinsparung	157
9.5.3	Vergleich der kostenoptimalen Varianten	158
9.6	Vergleich der Systemskalierung anhand der drei Flutvarianten	160
10	Zusammenfassung der Arbeit und Ausblick	165
A	Anhang	169
	Literaturverzeichnis	175