

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	XXI
Lateinische Formelzeichen . . . . .	XXI
Griechische Formelzeichen . . . . .	XXXIII
Abkürzungen . . . . .	XXXVII
Glossar . . . . .	XXXVII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit . . . . .	2
2 Spezifische Aspekte zum Stand der Technik	5
2.1 Gasturbinenanlagen – Gasturbinenantriebe . . . . .	5
2.2 Geschichte der Gasturbinenentwicklung . . . . .	6
2.3 Gasturbinen in ausgewählten Einsatzfeldern . . . . .	9
2.3.1 Gasturbinen in der Stromerzeugung . . . . .	12
2.3.2 Industriegasturbinen für den Antrieb von Schiffen . . . . .	13
2.3.3 Frühe Gasturbinentriebwerke in der Luftfahrt . . . . .	14
2.3.4 Moderne Gasturbinentriebwerke in der Luftfahrt . . . . .	15
2.3.5 Rechnerische Abschätzung der Strahlleistung von Strahl- triebwerken . . . . .	20
2.4 Verbesserung des maximalen Wirkungsgrades . . . . .	24
2.4.1 Regenerative Gasturbinenprozesse . . . . .	24
2.4.2 Der Gleichraum-Gasturbinenprozess . . . . .	26
2.4.3 Gemischte Kreisprozesse . . . . .	29
2.4.3.1 Innere Verdichterkühlung durch Verdunstung . . . . .	30
2.4.3.2 Kombination des Gasturbinenprozesses mit Dampfprozessen . . . . .	30
2.4.3.3 Regenerative Prozesse mit Wärmerückgewinnung durch Verdampfung . . . . .	31
2.4.4 Kombierter Joule-Prozess mit Wärmezufuhr bei Über- druck und Wärmeabfuhr bei Unterdruck – Combined In- verse Brayton Cycle . . . . .	33

2.5	Verbesserung des Wirkungsgradverlaufes . . . . .	34
2.5.1	Geschlossener Gleichdruck-Gasturbinenprozess . . . . .	35
2.5.2	Abschalten einzelner Gasturbineneinheiten . . . . .	36
2.5.3	Reduktion des Massenstroms durch Leiteinrichtungen an Verdichter und Turbine . . . . .	38
3	Theoretische Grundlagen . . . . .	41
3.1	Vergleichsprozesse von Gasturbinenanlagen . . . . .	41
3.1.1	Der Joule-Kreisprozess . . . . .	41
3.1.1.1	Wirkungsgrade im Joule-Prozess . . . . .	47
3.1.1.2	Der thermische Wirkungsgrad . . . . .	48
3.1.1.3	Das optimale Druckverhältnis . . . . .	51
3.1.1.4	Das Grenzdruckverhältnis . . . . .	54
3.1.1.5	Der exergetische Wirkungsgrad . . . . .	55
3.1.2	Vergleichsprozess und Realprozess für den Leerlauf einer ein- fachen Gasturbinenanlage ohne Wärmerückgewinnung . . .	60
3.1.2.1	Der Kreisprozess des Leerlaufes . . . . .	60
3.1.2.2	Der spezifische Leerlaufbrennstoffverbrauch . . .	64
3.1.2.3	Die spezifische Leerlaufwärmezufuhr . . . . .	67
3.1.2.4	Das Leerlaufverbrauchsverhältnis – Einführung einer neuen dimensionslosen Kennzahl . . . . .	67
3.1.3	Der Ericsson-Kreisprozess und der Ackeret-Keller- Kreisprozess – Carnotisierung des Gasturbinenprozesses . . .	68
3.1.3.1	Der Ericsson-Kreisprozess . . . . .	69
3.1.3.2	Die Ackeret-Keller-Anlagen . . . . .	72
3.2	Teillastverhalten von Gasturbinen im Vergleich zu Verbrennungsmo- toren . . . . .	78
3.2.1	Teillastverhalten von Gasturbinen . . . . .	79
3.2.1.1	Leistungskennlinie nach dem Propellergesetz . . .	80
3.2.1.2	Konstante Drehzahl im offenen Kreisprozess . . .	81
3.2.1.3	Konstante Drehzahl im offenen Kreisprozess mit konstanter Turbinenaustrittstemperatur . . . . .	81
3.2.1.4	Konstante Drehzahl im geschlossenen Kreisprozess	82
3.2.1.5	Optimale variable Drehzahl . . . . .	83
3.2.2	Vergleich des Teillastverhaltens von Gasturbinen mit denen von Otto- und Dieselmotoren . . . . .	84
4	Experimentelle Voraussetzungen . . . . .	87
4.1	Vorstudien . . . . .	87

4.2	Entwicklung, Aufbau und Funktionsweise der Versuchsgasturbine . . .	90
4.2.1	Mechanischer Aufbau . . . . .	90
4.2.2	Brennstoffsystem und Schmier- und Kühlkreislauf der Versuchsgasturbine . . . . .	96
4.2.3	Anlassen, Betrieb und Abstellen der Versuchsgasturbine . . .	97
4.3	Messsystem, Datenerfassung, Datenaufbereitung und Analyse . . . .	99
4.3.1	Messschrank . . . . .	99
4.3.2	Messfühler . . . . .	102
4.3.3	Datenerfassung, -aufbereitung und -analyse . . . . .	104
4.4	Durchführung der Experimente . . . . .	107
5	Auslegung der Versuchsgasturbine	113
5.1	Charakterisierung der Versuchsgasturbine . . . . .	113
5.2	Auslegungsstrategie . . . . .	113
5.3	Neuabstimmung eines Kfz-Abgasturboladers für den Einsatz in einer Gasturbinenanlage . . . . .	114
5.4	Überschlägige Berechnung des erreichbaren Verdichterdruckverhältnisses und des maximalen Wirkungsgrades anhand elementarer Geometriedaten . . . . .	125
5.4.1	Umgebungsbedingungen . . . . .	129
5.4.2	Verdichtereintritt . . . . .	129
5.4.3	Lauftradaustritt und Minderleistungsfaktor . . . . .	131
5.4.4	Lauftradvverluste – Teil I . . . . .	132
5.4.5	Lauftradvverluste – Teil II . . . . .	138
5.4.6	Diffusorverluste . . . . .	138
5.4.7	Luftleitung bis zur Messstelle vor dem Brennkammereintritt .	139
5.4.8	Die Druckzahl . . . . .	142
5.4.9	Mittlere spezifische Wärmekapazität . . . . .	143
5.5	Auslegung des Gasturbinenprozesses auf Basis eines gegebenen Verdichters . . . . .	144
5.5.1	Thermodynamische Randbedingungen . . . . .	144
5.5.2	Verdichtung der angesaugten Luft . . . . .	144
5.5.3	Wärmezufuhr in der Brennkammer . . . . .	145
5.5.4	Expansion in der Turbine . . . . .	146
5.5.5	Leistungsbilanz . . . . .	148
5.5.6	Wirkungsgrade . . . . .	150
5.5.7	Volumenströme . . . . .	151
5.5.8	Ergebnis der Auslegung der Versuchsgasturbine . . . . .	151

6	Der reale Kreisprozess der Versuchsgasturbine im Leerlauf	153
6.1	Berechnung der realen Kreisprozessparameter aus Momentanmesswerten . . . . .	153
6.2	Umrechnung der experimentellen und berechneten Momentanwerte auf normiert-reduzierte Größen . . . . .	166
6.3	Der spezifische Leerlaufbrennstoffverbrauch und die Kruschik-Zahl der Versuchsgasturbine . . . . .	169
7	Thermodynamische Charakterisierung der Versuchsgasturbine im Leerlauf	171
7.1	Verlauf des realen Leerlaufkreisprozesses über der Drehzahl ohne Verstellereinrichtung . . . . .	171
7.2	Optimaler Verlauf des realen Leerlaufkreisprozesses über der Drehzahl mit Beeinflussung durch die Verstellereinrichtung . . . . .	174
8	Verlauf des spezifischen Leerlaufbrennstoffverbrauches und der Kruschik-Zahl	177
8.1	Auswirkungen der alleinigen Verstellung des Verdichtervorleitrades .	177
8.2	Der Leerlaufbrennstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Drehzahl mit Beeinflussung durch die Verstellereinrichtungen . . . . .	178
8.3	Verlauf des Leerlaufbrennstoffverhältnisses mit und ohne Beeinflussung durch die Verstellereinrichtungen . . . . .	179
8.4	Auswirkungen bei optimaler Verstellung der Leitapparate auf die charakteristischen Größen der Versuchsgasturbine . . . . .	184
8.5	Vergleich der Versuchsgasturbine mit anderen Wärmekraftmaschinen	186
9	Zusammenfassung und Ausblick	191
	Anhang	194
A	Relevante Vorarbeiten	195
A.1	Mechanische Leistungsauskopplung aus einer Experimentalgasturbine	195
A.2	Luftgelagerter Abgasturbolader . . . . .	197
A.2.1	Einleitung . . . . .	197
A.2.2	Modifizierung des Versuchsturboladers mit einer aerodynamischen Lagerung . . . . .	202
A.2.3	Herstellung des Radialfolienlagers und des Axiallagers . . . .	205
A.2.4	Der Versuchsstand – Simulierter einfacher, offener Gasturbinenprozess mit externer Luftzufuhr . . . . .	208
A.2.5	Inbetriebnahme des Versuchsturboladers und seine Zerstörung	208
A.3	Justage des Brennstoffzerstäubers der Brennkammer . . . . .	211

A.4	Brennkammerprüfstand . . . . .	212
A.5	Prüfstand für eine Expansionsturbine . . . . .	216
A.5.1	Einleitung . . . . .	216
A.5.2	Aufbau des Prüfstandes . . . . .	220
A.5.3	Kennfelder der Turbinenstufe des untersuchten Abgasturbo- laders . . . . .	222
A.6	Thermische Versperrung der Turbine in einer Gasturbinenanlage . . .	224
B	Mathcad-Funktionen	227
B.1	Funktion zur iterativen Bestimmung der Mach-Zahl am Verdichter- eintritt . . . . .	227
B.2	Funktion zur iterativen Bestimmung des optimalen Massenstroms . .	228
B.3	Funktion zur iterativen Bestimmung der meridionalen Komponente der Laufradaustrittsgeschwindigkeit . . . . .	230
B.4	Funktion zur iterativen Bestimmung der Verlustzahl eines Krümmers	232
B.5	Funktion zur iterativen Bestimmung der statischen Temperatur aus der Ruhetemperatur, dem statischen Druck und dem Ruhedruck . .	233
	Literatur	235
	Stichwortverzeichnis	242