

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 Gasturbinentreibwerke in der Luftfahrt	14
2.3.4 Moderne Gasturbinentreibwerke 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 Kombinierter Joule-Prozess mit Wärmezufuhr bei Über- druck und Wärmeabfuhr bei Unterdruck – Combined In- verse Brayton Cycle	33

Inhaltsverzeichnis

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 einfachen 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 Verbrennungsmotoren	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	Laufradaustritt und Minderleistungsfaktor	131
5.4.4	Laufradverluste – Teil I	132
5.4.5	Laufradverluste – 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

Inhaltsverzeichnis

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 Verstelleinrichtung	171
7.2	Optimaler Verlauf des realen Leerlaufkreisprozesses über der Drehzahl mit Beeinflussung durch die Verstelleinrichtung	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 Verstelleinrichtungen	178
8.3	Verlauf des Leerlaufbrennstoffverhältnisses mit und ohne Beeinflussung durch die Verstelleinrichtungen	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 Verdichtereintritt	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