

Dipl.-Ing. Harald Klein, Marbach

Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines Thermokompressors

Reihe **19**: Wärmetechnik/
Kältetechnik

Nr. **91**

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	X
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	4
1.1 Thermodynamische Gaskreisprozesse	5
1.2 Gaskreisprozesse mit integriertem Wärmetausch	7
1.2.1 Stirling-Prozeß	7
1.2.2 Ericsson-Prozeß	14
1.2.3 Thermokompressor	16
1.3 Inhalt und Ziel der Arbeit	18
2 Vergleichsprozeß und Bauvarianten des Thermokompressors	20
2.1 Vergleichsprozeß des Thermokompressors mit idealem Regenerator	20
2.1.1 Zustandsänderungen und Verhältnisse der Teilmassen	21
2.1.2 Verdichtungs- und Förderverhalten	26
2.1.3 Energiebilanzen der Teilmassen	27
2.1.4 Energiebilanz von Regenerator, Heizung und Kühlung	31
2.1.5 Thermodynamische Bewertung als Verdichter	32
2.1.6 Thermodynamische Bewertung als Wärmekraftmaschine	34
2.2 Bewertung des Thermokompressors mit realem Regenerator	37
2.3 Bauvarianten des Thermokompressors	40
2.4 Zusammenfassung	42

3	Dynamisches Modell des Thermokompressors	44
3.1	Modellbildung der Teilsysteme	45
3.1.1	Heißraum	45
3.1.2	Kaltraum	49
3.1.3	Regenerator	50
3.1.4	Wärmeübertrager	53
3.1.5	Verdränger	55
3.1.6	Ventile	56
3.1.7	Entspannungsmaschine	57
3.2	Modellparameter	58
3.2.1	Arbeitsgas, Wärmeträgerfluid und Temperaturen	58
3.2.2	Geometrie der Gasräume und Kinematik	59
3.2.3	Geometrie und Stoffwerte von Regenerator, Verdränger und Wärmeübertrager	61
3.2.4	Reaktionskinetik und Reaktionsenthalpie	63
3.2.5	Ventilparameter und Druckverhältnisse	64
3.2.6	Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch	64
3.3	Gesamtmodell des Thermokompressors mit bewegtem Verdränger	68
3.3.1	Zustandsgrößen und Massenströme	69
3.3.2	Thermodynamische Bewertungsgrößen	72
3.4	Numerische Lösung der Modellgleichungen	75
3.4.1	Approximation der örtlichen Differentialquotienten	75
3.4.2	Reduzierung des Index	76
3.4.3	Zeitintegration	76
3.5	Zusammenfassung	77
4	Vereinfachte Berechnung des zyklisch-stationären Zustands	79
4.1	Reduziertes Modell des periodisch durchströmten Regenerators	79
4.1.1	Grenzfall des schnellen Umschaltens und sein Gültigkeitsbereich	82
4.1.2	Approximation des Regeneratorverhaltens durch Reihenentwicklung	85

4.1.3	Gittergenerierung für Simulationsmodell des Regenerators am Beispiel des Gegenstromwärmeübertragers	86
4.1.4	Überprüfung des reduzierten Regeneratormodells	87
4.1.5	Einfluß der Kenngrößen auf den Regeneratorwirkungsgrad	89
4.2	Reduziertes Modell des Thermokompressors mit isothermen Gasräumen . .	90
4.2.1	Verdichtungs- und Förderverhalten	90
4.2.2	Berechnung der Toträume	91
4.2.3	Einfluß der Toträume auf das Verdichtungsverhalten	93
4.2.4	Berechnung der Teilmassen und Querschnittsbelastung im Regenerator	94
4.2.5	Iteratives Berechnungsschema	95
4.2.6	Energiebilanzen und Bewertungsgrößen	97
4.3	Reduziertes Modell der periodisch durchströmten Wärmeübertrager	100
4.4	Reduziertes Modell des Thermokompressors mit adiabaten Gasräumen . . .	102
4.5	Zusammenfassung	106
5	Verhalten des Thermokompressors mit isothermen Gasräumen	108
5.1	Dynamisches Verhalten des Thermokompressors	109
5.1.1	Verhalten bei idealen Regeneratoreigenschaften	111
5.1.2	Reale Regeneratoreigenschaften bei niedriger Frequenz und niedrigem Druck	117
5.1.3	Reale Regeneratoreigenschaften bei hoher Frequenz und niedrigem Druck	120
5.1.4	Reale Regeneratoreigenschaften bei niedriger Frequenz und hohem Druck	124
5.1.5	Zusammenfassung des dynamischen Verhaltens	127
5.2	Einfluß von Betriebsparametern	128
5.2.1	Einfluß des Verdichtungsverhältnisses	129
5.2.2	Einfluß der Hubfrequenz	130
5.2.3	Einfluß des Druckes	131
5.2.4	Einfluß der Heiztemperatur	131

5.2.5	Zusammenfassung der Betriebsparametereinflüsse	133
5.3	Einfluß der Regeneratorstruktur	133
5.3.1	Monolithischer Regenerator	133
5.3.2	Drahtgestrick	135
5.3.3	Zusammenfassung der Strukturparametereinflüsse	137
5.4	Einfluß der geometrischen Parameter	138
5.4.1	Verallgemeinerte Berechnung des optimalen thermischen Wirkungsgrads	139
5.4.2	Berechnung des optimalen thermischen Wirkungsgrads bei maximaler mechanischer Leistung	143
6	Varianten der Wärmez- und -abfuhr	146
6.1	Indirekte Wärmez- und -abfuhr über externe Wärmeübertrager	146
6.1.1	Luft als Wärmeträgerfluid; $T_H = 1200$ K	148
6.1.2	Wasserkühlung; $T_H = 1500$ K	151
6.2	Direkte Wärmezufuhr durch interne Verbrennung	152
6.2.1	Brennstoffzufuhr im Arbeitsgas; katalytischer Regenerator	154
6.2.2	Brennstoffzufuhr im Arbeitsgas; inerter Regenerator	157
6.2.3	Brennstoffzufuhr im Heißraum	161
6.3	Zusammenfassung	164
A	Herleitung der Bilanzgleichungen	166
A.1	Heißraum	166
A.1.1	Kontinuitätsgleichung	166
A.1.2	Materialbilanz	166
A.1.3	Energiebilanz	167
A.2	Regenerator	169
A.2.1	Kontinuitätsgleichung	169
A.2.2	Materialbilanz	170
A.2.3	Energiebilanz Gasphase	171
A.2.4	Energiebilanz Feststoffphase	172

A.2.5	Impulsbilanz	172
A.3	Mechanische Arbeit an der Schubstange	173
A.3.1	Bewegter Verdränger	174
A.3.2	Bewegter Regenerator	174
B	Reihenentwicklung als Lösung erster Ordnung des Regenerators	176
B.1	Berechnung der Temperaturprofile	176
B.2	Berechnung des Regeneratorwirkungsgrads	178
C	Herleitungen zu Abschnitt 4.3 und 4.4	181
C.1	Mittlere Temperatur im Wärmeübertrager	181
C.2	Exergieabnahme und Grenzfälle hinsichtlich des Wärmeübergangs an das Heizfluid	182
D	Herleitungen bei vereinfachter Betrachtung der Toträume	184
D.1	Verdichtetes und ausgestoßenes Volumen	184
D.2	Querschnittsbelastung im Regenerator	185
D.3	Berechnung der im Regenerator gespeicherten Wärme	186
	Literaturverzeichnis	187