

Torben Möller

Simulation und konstruktive Optimierung der Wärmeübertrager regenerativer Gaskreisprozesse

Technische Universität Dresden

Institut für Energietechnik
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

Von der
Fakultät Maschinenwesen
genehmigte

Dissertation

Zur Simulation und konstruktiven Optimierung der
Wärmeübertrager regenerativer Gaskreisprozesse

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
von

Dipl.-Ing. (FH) Torben Möller
geb. am 14.05.1981 in Gießen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann

Prof. Dr.-Ing. Olaf Strelow

Dr.-Ing. Andreas Gimsa

Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr. rer. medic. Hans-Peter Wiesmann

Tag der Einreichung: 11.06.2021

Tag der Verteidigung: 25.03.2022

Berichte aus der Thermodynamik

Torben Möller

**Simulation und konstruktive Optimierung der
Wärmeübertrager regenerativer Gaskreisprozesse**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8706-2

ISSN 0946-0829

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die Gruppe der regenerativen Gaskreisprozesse, zu denen Stirlingmotoren oder Vuilleumier-Wärmepumpen zählen, basiert auf einer thermischen Verdichtung des Arbeitsgases als gemeinsames Wirkprinzip. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Systemanalyse der Wärmeübertragerschaltung eines thermischen Verdichters aus Rekuperatoren und Regenerator zur optimalen konstruktiven Auslegung der verschiedensten Heißgasmaschinen.

Im Gegensatz zu vielen klassischen technischen Anwendungen liegt bei den regenerativen Gaskreisprozessen keine stationäre, sondern eine oszillierende Durchströmung der Wärmeübertrager zu Grunde. Diese wird durch die periodische Kolbenbewegung in den benachbarten Zylinderräumen induziert. Zur Ermittlung der dabei auftretenden periodisch instationären Strömungsdruckverluste wird die oszillierende Strömung theoretisch und numerisch untersucht.

Das Simulationsmodell zur Ermittlung der Energie- und Masseströme bestimmt durch simultanes Lösen der zugrunde liegenden Erhaltungsgleichungen das gekoppelte thermische Verhalten der Wärmeübertrager und Zylinderräume. Insbesondere die Berechnung des Regeneratoreinbaus, als leistungsstärkstes Element, kommt dabei nahezu ohne aufrägende Randbedingungen aus. Die für die Optimierung notwendige periodisch-stationäre Lösung wird mit dem Modell unmittelbar erhalten, so dass die Notwendigkeit des Einpendelns hin zu wiederkehrenden Zuständen grundsätzlich entfällt.

Die optimale Baugröße der Wärmeübertrager wird schließlich mit dem Ziel der maximalen Nutzleistung der Anlage bestimmt. Auf Basis einer entropischen Prozessbewertung wird der dabei vorhandene Totraum der thermischen Apparate immer optimal genutzt. Es werden Kennfelder für den Regenerator und dimensionslose Kennzahlen zur ersten Bewertung und Berechnung der Rekuperatoren und des Regenerators entwickelt und hergeleitet. Wie auch Diagramme für die optimale Detail-Geometrie der Apparate, in Abhängigkeit des Gasdurchsatzes und der spezifischen Leistung.

Abstract

The group of regenerative gas cycle cycles, which includes Stirling engines or Vuilleumier heat pumps, is based on the thermal compression of the working gas as a general operating principle. The aim of the present work is the system analysis of the heat transfer circuit of a thermal compressor, consisting of recuperators and regenerators, for the optimal constructive design of various hot gas machines.

In contrast to many classic technical applications, regenerative gas cycles are not based on a steady state flow, but they are based on an oscillating flow through the heat exchanger. This is induced through the periodic piston movement in the neighboring cylinder spaces. To determine the periodic transient flow pressure losses occurring in this process, the oscillating flow is investigated theoretically and numerically.

The simulation model for the determination of energy and mass flows calculates the combined thermal characteristics of the heat exchangers and cylinder spaces by simultaneously solving the conservation equations which form their basis. In particular, the calculation of the regenerator module, as the most powerful element, requires almost no impacting boundary conditions. The periodic-stationary solution necessary for the optimization is obtained directly through the model, so the requirement for balancing towards recurrent conditions is generally eliminated.

Finally, the size of the heat exchangers is optimized with the aim of maximizing the system performance. Based on an entropic process analysis, the available space in the thermal device is always used in the most effective way. This includes the development and derivation of characteristic diagrams for the regenerator and dimensionless parameters for the overall evaluation and calculation of the recuperators and the regenerator. This covers also diagrams for the optimal detailed geometry of the devices, depending on the gas flow rate and the specific performance.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xvii
1 Einleitung und Zielstellung	1
2 Maschinen nach dem Stirling-Prinzip	3
2.1 Technische Realisierung	4
2.2 Gemeinsame Wirkungsweise	5
2.3 Prozesskonfigurationen und Leistungsabschätzung	9
2.4 Stationäre Betriebsweise der thermischen Verdichterkomponenten	15
3 Berechnung und Bewertung der Rekuperatoren	21
3.1 Energiebilanz	22
3.2 Kennzahlen und Charakteristik	24
3.3 Darstellung des Temperaturprofils	28
4 Einflussgrößen und numerische Untersuchungen zum Druckverlust oszillierender Strömungen	31
4.1 Grundlagen und dimensionslose Kennzahlen	32
4.2 Auswirkungen der turbulenten oszillierenden Strömung	37
4.3 Darstellung der Strömungsdruckverluste	41
5 Wärmewiderstände und instationäre Wärmeübergangs-Korrelationen	45
5.1 Wärmeübergang bei oszillierender Strömung	46
5.2 Wärmewiderstand bei Rohrbündelwärmeübertrager	47
5.3 Wärmeleitung bei Apparaten aus Aluminiumlegierung	50
6 Detail-Optimierung der Rekuperatoren	53
6.1 Konzeptionelle Vorüberlegungen zur Geometrie	53
6.2 Bewertung von Wärmeübertragungs- und Strömungsprozessen	60
6.3 Optimierung der Geometrie eines Rohrbündels	61
6.4 Einfluss der oszillierenden Strömung	65
7 Konzeptionierung und Charakteristik der Regeneratormatrix	67
7.1 Allgemeine Anforderungen	68
7.2 Konstruktive Ausführungen	69
7.3 Empirische Beschreibung von Regeneratoren mit Fasermatrix	72

8	Einflussgrößen und dynamische Simulation der Regeneratoren	77
8.1	Charakteristische Größen	79
8.2	Allgemeines Matrix-Berechnungsmodell (KTI-Modell)	81
8.3	Temperaturverlauf in Regeneratoren	84
9	Optimierung von Fasermaterial-Regeneratoren	91
9.1	Lokale Optimierungsgrößen	91
9.2	Bewertung der Durchströmung	95
9.3	Optimaler Drahtdurchmesser	96
9.4	Anströmfläche und Wärmeleitungsverluste	98
9.5	Porosität und Temperaturschwingungsverluste	100
10	Modellierung und Simulation des thermischen Verdichters	105
10.1	KTU-Modell für den unmittelbaren periodisch-stationären Zustand	106
10.2	Bestimmung der Energie- und Masseströme	110
10.3	Schwachstellen- und Sensitivitätsanalyse des Modells	118
11	Parameterstudie zum Einfluss der dimensionslosen Kenngrößen	123
11.1	Dynamik des eingeschwungenen Temperaturprofils	123
11.2	Durchflutung der Wärmeübertrager	125
11.3	Längswärmeleitungs- und Temperaturschwingungsverluste	127
11.4	Wärmeverluste und Druckeinflüsse auf die Zylinderräume	129
12	Optimierung der Wärmeübertrager-Baugrößen	131
12.1	Vorauswahl von Drehzahl, mittlerem Prozessdruck und Arbeitsmedium	131
12.2	Thermische- und mechanische Verdichterleistung	137
12.3	Optimale Baugröße des Regenerators	142
12.4	Volumenaufteilung für die Rekuperatoren	144
13	Fazit	149
13.1	Zusammenfassung	149
13.2	Ausblick	151
	Literaturverzeichnis	153
	Anhang	159
A.1	Lösung linearer DGL-Systeme erster Ordnung	159
A.1.1	Fall konstante Koeffizientenmatrix	159
A.1.2	Allgemeine Lösung	160
A.2	Berechnung des Matrixexponentials	164
A.2.1	Taylor-Entwicklung	164
A.2.2	Matrix-Zerlegungsmethoden	165
A.2.3	Explizite Formeln	165
A.3	Ähnlichkeitstransformationen von Matrizen	168
A.3.1	Hessenberg-Verfahren	168
A.3.2	QR-Zerlegung	169
A.4	Druckverlust der oszillierenden Spaltströmung	170

A.5	Nußelt-Zahl für die stationäre Ringspaltströmung	171
A.6	Herleitung der dimensionslosen Drehzahl	172
A.7	Funktionen der mathematischen Physik	173
A.7.1	Modifizierte Besselfunktion erster Art	173
A.7.2	Gaußsche hypergeometrische Funktion	173
A.7.3	Gamma Funktion	174
A.7.4	Hesse-Matrix	174