

Die Bewertung und numerische Optimierung von Wärmeübertragern anhand einer Energieentwertungszahl

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation**

**von
Tammo Wenterodt**

**aus
Leer (Ostfriesland)**

2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Heinz Herwig
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rudolf Eggers
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Alfons Kather

Tag der mündlichen Prüfung: 14.08.2013

Berichte aus der Thermodynamik

Tammo Wenterodt

**Die Bewertung und numerische Optimierung
von Wärmeübertragern anhand einer
Energieentwertungszahl**

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2204-9

ISSN 0946-0829

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vii
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Thermodynamische Systeme	3
2.2 Energie	4
2.3 Entropie	5
2.3.1 Temperatur	6
2.3.2 Konduktive Übertragung von Entropie	7
2.3.3 Produktion von Entropie	7
2.3.4 Umkehrbarkeit von Prozessen	8
2.4 Wärmeübertragung	8
2.4.1 Konduktive Wärmeübertragung	9
2.4.2 Konvektive Wärmeübertragung	9
2.4.3 Strahlungsbasierte Wärmeübertragung	9
2.4.4 Kalorische Mitteltemperatur	10
2.4.5 Die Nußelt-Zahl	10
2.4.6 Die Prandtl-Zahl	11
2.4.7 Temperaturleitfähigkeit	11
2.5 Strömung	12
2.5.1 Navier–Stokes-Gleichungen	12
2.5.2 Mittelgeschwindigkeit	13
2.5.3 Der hydraulische Durchmesser	13
2.5.4 Die Reynolds-Zahl in Durchströmungen	14
2.5.5 Laminare und turbulente Strömungen	14
2.5.6 Dissipation und Widerstandszahl	14
2.5.7 Rohrreibungszahl	15
2.6 Wärmeübertrager	16
2.6.1 Die Qualität eines Energiestroms: Exergie und Anergie	16
2.6.2 Bewertungskriterien für Wärmeübertragungssituationen	17
2.7 Kraftwerke	20
2.7.1 Der rechtsläufige Clausius–Rankine-Prozess	20
2.7.2 Geothermie	21
2.8 RANS-Simulation	22
2.8.1 Zeitgemittelte Navier–Stokes-Gleichungen	22

2.8.2	Turbulenzmodellierung	23
2.8.3	Die Finite-Volumen-Methode	24
2.8.4	Der SIMPLE-Algorithmus	24
3	Bewertung von Energieübertragungsprozessen	25
3.1	Arbeitsprozesse	25
3.2	Dampfkraftprozesse	27
3.2.1	Der reversible Fall	29
3.2.2	Der irreversible Fall	30
3.3	Entropieproduktion	31
3.3.1	Entropieproduktion aufgrund von Wärmeleitung	32
3.3.2	Entropieproduktion aufgrund von Dissipation	34
3.4	Das Konzept des entropischen Potentials	36
3.4.1	Energieübertrager als Teilsystem	36
3.4.2	Das entropische Potenzial	37
3.4.3	Die Energieentwertungszahl	38
3.5	Bewertung von Energieübertragern auf Bauteilebene	41
3.5.1	Einmündung (z.B. kalte Seite Wärmeübertrager, Pumpe)	43
3.5.2	Abzweig (z.B. Turbine, heiße Seite Wärmeübertrager, Kondensator)	43
3.5.3	Leiter (z.B. Rohr, Wand)	44
3.5.4	Diatherme Bauteile mit Energieverlusten	44
3.5.5	Durchströmte Bauteile bei Umgebungstemperatur	45
3.6	Bewertung von Wärmeübertragern	46
3.6.1	Beispiel: Unterschiedliche Verluste trotz gleicher Nusselt-Zahl	46
3.6.2	Die Energieentwertungszahl eines Wärmeübertragers	48
3.6.3	Beispiel: Thermo-hydraulische Effizienz vs. Energieentwertungszahl	50
3.7	Exergie und Anergie	53
4	Bestimmung von Verlusten mit RANS	55
4.1	Simulationsumgebung	55
4.2	Turbulenzmodellierung	55
4.3	Temperatur	56
4.3.1	Aufheizung durch Dissipation	56
4.3.2	Temperatur als passiver Skalar	57
4.3.3	Berechnung des Temperaturfeldes	57
4.4	Verluste	58
4.4.1	Lokale Entropieproduktion	58
4.4.2	Bestimmung der Energieentwertungszahl	59
4.4.3	Die Energieentwertungszahl als Konvergenzkriterium	59
4.5	Validierung	60

5	Numerische Geometrieoptimierung	63
5.1	Simulationsbasierte Optimierung	64
5.2	Parametrierung beliebiger Geometrien	64
5.3	Evolutionärer Algorithmus	66
5.3.1	Größe der Startpopulation	67
5.3.2	Erzeugung eines neuen Genoms	67
5.3.3	Selektion	67
5.3.4	Mutation	68
5.3.5	Gitterverzerrung	68
5.3.6	Rechnung	69
5.3.7	Optimum	70
6	Optimierung und Untersuchung ausgewählter Wärmeübertragungssituationen	71
6.1	Rohrbündel - Voruntersuchung	72
6.1.1	Geometrie und Parameter	72
6.1.2	Bestimmung der Entropieproduktion	73
6.1.3	Simulation	75
6.1.4	Ergebnisse und Interpretation	75
6.2	Rohrbündel - Optimierung anhand empirischer Korrelationen	77
6.2.1	Berechnung	77
6.2.2	Ergebnisse und Interpretation	77
6.3	Rohrbündel - Finite Volumen Simulation	83
6.3.1	Validierung	84
6.3.2	Ergebnisse und Interpretation	86
6.4	Rohrbündel - Optimierung der Querschnittsgeometrie	91
6.4.1	Parametrierung der Geometrie	93
6.4.2	Simulation	94
6.4.3	Ergebnisse und Interpretation	95
6.5	Plattenwärmeübertrager - Optimierung der Wellenprägung	102
6.5.1	Parametrierung der Geometrie	102
6.5.2	Simulation	103
6.5.3	Ergebnisse und Interpretation	105
6.6	Plattenwärmeübertrager - Freie Formoptimierung	110
6.7	Der quadratische Mikrokanal	113
7	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	127