

Eberhard Wegener

Planung eines Wärmeübertragers

Ganzheitliche Aufgabenlösung bis zur Instand-
setzung eines Rohrbündel-Wärmeübertragers



Eberhard Wegener

**Planung eines
Wärmeübertragers**

***Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel
zu diesem Thema***

Bunge, R.

**Mechanische Aufbereitung
Primär- und Sekundärrohstoffe**

2012

978-3-527-33209-0

Sattler, K., Adrian, T.

**Thermische Trennverfahren
Aufgaben und Auslegungsbeispiele**

2007

978-3-527-31022-7

Worthoff, R., Siemes, W.

**Grundbegriffe der
Verfahrenstechnik
Mit Aufgaben und Lösungen**

2012

978-3-527-33174-1

Eberhard Wegener

Planung eines Wärmeübertragers

Ganzheitliche Aufgabenlösung bis zur Instandsetzung eines
Rohrbündel-Wärmeübertragers



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Wegener
Technische Hochschule Wildau
Bahnhofstraße
15745 Wildau

1. Auflage 2013

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

**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.

© 2013 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,
Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN: 978-3-527-33304-2

ePDF ISBN: 978-3-527-67355-1

ePub ISBN: 978-3-527-67357-5

Mobi ISBN: 978-3-527-67356-8

Satz Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld

Druck und Bindung Markono Print Media Pte Ltd,
Singapore

Umschlaggestaltung Adam-Design, Weinheim

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	<i>XI</i>
1	Aufgabenstellung „Auslegung und Konstruktion eines Rohrbündel-Wärmeübertragers (RWÜ)“	1
1.1	Allgemeine Voraussetzungen für die Auslegung eines RWÜ	1
1.2	Hinweise zur Aufgabenstellung	1
1.3	Aufgabenstellung mit Detailangaben:	2
1.4	Hinweise zur Lösungsmethodik	4
2	Wärmetechnische Auslegung des RWÜ	7
2.1	Allgemeines	7
2.2	Verwendete Formelzeichen und Kenngrößen	11
2.3	Ausgangsdiskussion	14
2.3.1	Gegebene Größen	15
2.3.2	Stoffwerte aus der erweiterten Aufgabenstellung	17
2.4	Überschlägige Berechnung der erforderlichen Wärmeübertragungsfläche	17
2.4.1	Ermittlung des abzuleitenden Wärmestromes \dot{Q}	17
2.4.2	Berechnung der erforderlichen Kühlwassermenge \dot{m}_2	18
2.4.3	Wahl des Wärmedurchgangskoeffizienten k	19
2.4.4	Ermittlung der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta\delta_m$	20
2.4.5	Berechnung der erforderlichen Wärmeübertragungsfläche A_{erf}	24
2.4.6	Begründung der Medienführung	24
2.4.7	Aussagen zur Verschmutzung von Wärmeübertragungsflächen	25
2.5	Grundlagen für die konstruktive Ausführung	29
2.5.1	Anordnung und Abmessung der Innenrohre	30
2.5.2	Anzahl der Rohre und Länge des Rohrbündels	34
2.6	Nachweise für den Rohrraum und den Mantelraum	38
2.6.1	Wärmeübertragung im Rohrraum	39
2.6.1.1	Ermittlung der Reynoldszahl Re	40
2.6.1.2	Ermittlung der Nusselt-Zahl Nu_i	40
2.6.1.3	Ermittlung der Wärmeübergangszahl α_i	43

2.6.2	Wärmeübertragung im Mantelraum ohne Einbauten	43
2.6.3	Wärmeübertragung im Mantelraum mit Einbauten	45
2.6.3.1	Auswahl der Einbauelemente	45
2.6.3.2	Notwendige Ergebniskorrekturen	47
2.6.3.3	Auslegung der Umlenksegmente	49
2.6.3.4	Ermittlung der Reynoldszahl Re_a	52
2.6.3.5	Ermittlung der Nusselt-Zahl Nu_a	54
2.6.3.6	Ermittlung der Wärmeübergangszahl α_a im Außenraum	62
2.6.3.7	Ermittlung der Wärmedurchgangszahl k	63
2.7	Nachweis der Wandtemperatur	65
2.8	Korrektur der Wärmeübertragungsfläche	67
2.9	Kompensator-kriterium	69
2.9.1	Festlegungen in WN 75-0094 Höchst AG [37]	70
2.9.1.1	Kaltes Medium um die Rohre	70
2.9.1.2	Warmes Medium um die Rohre	71
2.9.2	Vorgehensweise in der Fachliteratur	72
2.9.3	Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 3/7 [45]	75
2.10	Zusammenfassung der wärmetechnischen Auslegung	78
3	Druckverlustberechnung im Mantel- und im Rohrraum des RWÜ	83
3.1	Druckverlust im Rohrraum Δp_{RR}	84
3.1.1	Druckverlust beim Einströmen in die Eintrittskammer Δp_E	85
3.1.2	Druckverlust beim Einströmen in die Rohre Δp_{ER}	88
3.1.3	Druckverlust beim Durchströmen der Rohre Δp_R	90
3.1.4	Druckverlust beim Ausströmen aus den Rohren Δp_{AR}	93
3.1.5	Druckverlust infolge Umlenkung in den Kammern Δp_U	94
3.1.6	Druckverlust beim Ausströmen aus der Austrittskammer Δp_A	94
3.1.7	Gesamtdruckverlust im Rohrraum Δp_{RR}	95
3.2	Druckverlust im Mantelraum des RWÜ mit Einbauten	97
3.2.1	Druckverlust in den Mantelstützen Δp_S	104
3.2.2	Druckverlust in einer Endzone Δp_{QE}	105
3.2.3	Druckverlust in der Querströmungszone Δp_Q	112
3.2.4	Druckverlust in einer Fensterzone Δp_F	117
3.2.5	Gesamtdruckverlust im Mantelraum	120
3.3	Ergebnis der strömungstechnischen Berechnungen	120
4	Überlegungen zum konstruktiven Entwurf	125
4.1	Allgemeine Vorgehensweise	125
4.2	Berücksichtigung von Gestaltungsanforderungen	127
4.2.1	Funktionsgerechte Gestaltung des RWÜ	127
4.2.2	Werkstoffgerechte Gestaltung des RWÜ	128
4.2.3	Beanspruchungsgerechte Gestaltung des RWÜ	130
4.2.4	Fertigungsgerechte Gestaltung des RWÜ	131
4.2.5	Prüfgerechte Gestaltung und Prüfungen im Lebenslauf des RWÜ	134

4.2.6	Transport- und montagegerechte Gestaltung des RWÜ	135
4.2.7	Wartungs- und instandhaltungsgerechte Gestaltung des RWÜ	139
5	Konstruktive Aufgabenstellung	141
6	Rechnerische Nachweise für die Apparatelemente	145
6.1	Grundlagen	145
6.2	Formelzeichen und Einheiten	147
6.3	Ermittlung von Berechnungswerten [6]	148
6.3.1	Berechnungsdruck p	148
6.3.2	Berechnungstemperatur ϑ, T	149
6.3.3	Festigkeitskennwert K	149
6.3.4	Sicherheitsbeiwert S	149
6.3.5	Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen, Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen v	150
6.3.6	Zuschläge	150
6.3.6.1	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung c_1	150
6.3.6.2	Abnutzungszuschlag c_2	151
6.4	Werkstoffauswahl	151
6.5	Berechnungsparameter	151
6.6	Berechnung der Apparatelemente	153
6.6.1	Zylindrische Wandung (Mantel) unter innerem Überdruck	153
6.6.2	Gewölbte Böden unter innerem Überdruck	156
6.6.3	Rohrbündelrohre	158
6.6.3.1	Bemessung auf inneren Überdruck	158
6.6.3.2	Bemessung auf äußeren Überdruck	159
6.6.4	Berechnung der Rohrböden	161
6.6.5	Bemessung der Flanschverbindungen	165
6.7	Stabilitätsberechnung	167
6.7.1	Lokale Lasteinleitung durch die Sattellager	168
6.7.1.1	Tragfähigkeitsnachweis für den Zylinder	170
6.7.1.2	Nachweis des Sattellagers	172
6.7.2	Tragfähigkeitsnachweis für die Tragösen und ihren Anschluss	172
6.7.3	Zusatzbelastungen durch Einzelkräfte	177
7	Konstruktion des RWÜ	181
7.1	Konstruktionszeichnung	181
7.2	Entwurfsprüfung	181
8	Fertigung des Rohrbündel-Wärmeübertragers	185
8.1	Wesentliche Einzelteile zur RWÜ-Fertigung	186
8.1.1	Gewölbte Böden	186
8.1.2	Ebene Böden	190
8.1.3	Flanschverbindungen	197

8.1.4	Rohre	202
8.2	Wesentliche allgemeine Fertigungsschritte	203
8.2.1	Fertigung des Mantels	203
8.2.2	Verbindung Rohre/Rohrboden	205
8.2.2.1	Einschweißen der Rohre	206
8.2.2.2	Einwalzen der Rohre	212
8.2.2.3	Hydraulisches Aufweiten der Rohre	216
8.2.2.4	Verbindung Rohr/Rohrboden durch Kombination verschiedener Befestigungsarten	217
8.3	Schlussprüfung und Druckprüfung	219
8.3.1	Schlussprüfung	219
8.3.2	Druckprüfung	220
8.4	Oberflächensauberkeit und Oberflächenschutz	220
8.5	Korrosionsschutzanstrich	224
8.6	Fertigungstechnologie des RWÜ DN 400	225
8.6.1	Fertigung der Ein- und Austrittshauben	225
8.6.2	Fertigung des Mantels	226
8.6.3	Fertigung des Rohrbündels	226
8.6.4	Zusammenbau	227
8.6.5	Abschlussarbeiten	227
9	Transport und Montage des RWÜ	229
9.1	Transport	229
9.2	Montage	231
10	Wärmedämmung	233
10.1	Allgemeine Aussagen	233
10.2	Dämmung als Berührungsschutz für den RWÜ DN 400	238
11	Instandsetzung von Rohrbündel-Wärmeübertragern – Schadensbehebung durch Reinigung	241
11.1	Allgemeines	241
11.2	Logistische Vorleistungen für die mechanische Reinigung von RWÜ	243
11.3	Mechanische Reinigung von RWÜ	248
11.3.1	Hochdruckwasserstrahlreinigung	249
11.3.2	Hochdruckreinigung unter Einsatz entsprechender Reinigungskörper	254
11.3.3	Reinigungsverfahren mit rotierenden Werkzeugen	262
11.4	Chemische Reinigung von RWÜ	262
11.4.1	Allgemeines	262
11.4.2	Anwendung auf den RWÜ DN 400	263
11.5	Thermische Reinigung	266

11.6	Trockeneisreinigung	267
11.7	<i>In-situ</i> -Reinigung von RWÜ	270
12	Instandsetzung von Rohrbündel-Wärmeübertragern – Schadensbehebung durch Verstopfen, Rohraustausch oder Neuberohrung	273
12.1	Allgemeines	273
12.2	Schäden an Rohrbündel-Wärmeübertragern und Schadensbehebung	273
12.2.1	Einsetzen von Stopfen	276
12.2.2	Ersatz einzelner Rohre	281
12.2.3	Neuberohrung	284
12.2.4	Sanierung von Rohrböden	288
Anhang 1	Bezeichnungen und Begriffe für Werkstoffe Kurzzeichen in Werkstoffbezeichnungen	293
Anhang 2	Zusammenstellung der Prüfbescheinigungen nach EN 1024:2004 (D)	295
Anhang 3	Kennwerte für die Bemessung der Rohre nach DIN EN 10 216-1, und DIN EN 10 217-1 (AD 2000-Merkblatt W 4 Tafel A 2)	297
Anhang 4	Kennwerte für Flacherzeugnisse nach DIN EN 10 028-2, Mindestwerte der Dehngrenze $R_{p0,2}$ bei erhöhten Temperaturen	299
Anhang 5	Verschwächungsbeiwert v_A bei $s_A/D_i = 0,01$ AD 2000-Merkblatt B 9	301
Anhang 6	Verschwächungsbeiwert v_A bei $s_A/D_i = 0,05$ AD 2000-Merkblatt B 9	303
Anhang 7	Verschwächungsbeiwert v_A für $s_A/\frac{D_i}{2} = 0,10$ AD 2000-Merkblatt B 9	305
Anhang 8	Berechnungsbeiwerte β für gewölbte Böden in Klöpperform nach AD 2000-Merkblatt B 3	307
Anhang 9	Einsatzgrenzen für Stahlflansche nach DIN EN 1092-1	309
Anhang 10	Diagramme zur Ermittlung der Beiwerte K für Tragösen nach TGL 32903/17 [47] und RKF BR – A 62 [48]	311
	Schlussbetrachtung	313
	Index	315

Vorwort

Es ist eine immer wiederkehrende Feststellung, dass sich nicht nur bei der Lösung konstruktiver Aufgaben im Rahmen der Apparatechnik bzw. der Anlagentechnik in den verschiedensten Studienrichtungen, wie Verfahrenstechnik, Energietechnik oder auch Maschinenbau, Probleme bei den Studierenden ergeben. Dies zeigt sich insbesondere in einem nicht ausreichenden Vermögen, Sachverhalte aus zurückliegenden bzw. angrenzenden Lehrgebieten eigenständig zu berücksichtigen und darüber hinaus Aufgabenstellungen methodisch so aufzubereiten, dass implizit enthaltene Forderungen erfasst werden bzw. das Fehlen von Informationen rechtzeitig erkannt wird. Diese Schwierigkeiten führen natürlich zu Problemen im Bearbeitungsablauf, die sich dann auch meist negativ auf die Motivation der Studierenden zur Lösung komplexer Aufgabenstellungen auswirken.

Die Ursachen für diesen Tatbestand sind sicher vielseitig. Einerseits liegen sie im Stoff Zeit-Problem der Lehrenden, das ja in den verschiedensten Studienfächern immer wieder auftritt, sicher auch bedingt durch noch nicht vorhandene Grundkenntnisse der Studierenden infolge fehlender Berufspraxis und damit Schwierigkeiten in den für sie ja meist neuen Lehrgebieten wie Fertigungsverfahren, Werkstofftechnik, Strömungsmechanik oder Technische Mechanik. Es bleibt damit wenig Raum für den Lehrenden, Nachweise und Verbindungen zur Anwendung in den fachspezifischen Studienfächern herzustellen und Verständnis für die später gestellten Anforderungen bereits in den Grundlagenlehrgebieten zu wecken. Dazu kommt auch oft die fehlende Einsicht bei den Studierenden, dass eine ingenieurtechnische Ausbildung eben auch solides Wissen in Grundlagenlehrgebieten erfordert, um in den fachspezifischen Lehrveranstaltungen und darüber hinaus im späteren Berufsleben bestehen zu können. Ein weiteres Problem ist sicher darin zu sehen, dass die Studierenden meist mit einer Fülle von Literaturangaben aufgrund der vorhandenen umfangreichen Fachliteratur auf den einzelnen Gebieten konfrontiert werden. Sie sind damit einfach überfordert, hieraus Allgemeines, Einzelnes oder Besonderes in einer Aufgabenstellung selbstständig abzuleiten und die gestellten Aufgaben effektiv und zufriedenstellend zu lösen.

Aus dieser Situation entstand die Projektidee, für die Studierenden der höheren Semester, besonders an den Fachhochschulen mit den Studienrichtungen Verfahrenstechnik und Energietechnik, die auch die Apparatechnik und den Anlagen-

bau beinhalten, aber auch für die maschinenbauliche Ausbildung, eine reale, praxisrelevante Aufgabenstellung beispielhaft unter einer ganzheitlichen Betrachtung abzuarbeiten, d. h. die methodische Entwicklung der konstruktiven Lösung unter Berücksichtigung der im Lebenslauf eines Apparates entstehenden Einflussfaktoren bis zur Instandsetzung. Hierzu bietet sich das Thema „Wärmeübertrager“, speziell ein Rohrbündel-Wärmeübertrager, als Aufgabenstellung an. Als meist in der Industrie angewendeter Wärmeübertrager ist er auch überwiegend Inhalt der Studienfächer Wärmeübertragung/Wärmeübertrager. Allgemein endet ja die Stoffvermittlung in diesen Studienfächern mit der Ermittlung der erforderlichen Übertragungsfläche, der Druckverlustberechnung und dem konstruktiven Entwurf eines Wärmeübertragers. Es bleibt wenig Zeit für den Lehrenden nachzuweisen, dass für einen störungsfreien Betrieb des Apparates neben den erforderlichen Angaben zu Medien, Temperaturen und Drücken zusätzliche Informationen aus dem Betriebsregime einschließlich Reinigung und Instandhaltung benötigt werden. Eine Ergänzung der Stoffvermittlung unter diesem Gesichtspunkt soll durch die vorgestellte Komplexübung erfolgen. Sie vereint in sich die wärme- und strömungstechnische Auslegung sowie konstruktive Teilgebiete und gestattet die festigkeitsmäßige Bemessung der unterschiedlichen Apparateelemente in ihrem Zusammenhang auf der Grundlage der Vorschriftenwerke. Darüber hinaus beinhaltet sie einen Einblick in fertigungs- und montagetechnologische Einflussfaktoren, die durch Betriebsanforderungen ergänzt werden. Dabei wird bewusst auf eine „glatte“ Aufgabenstellung, die problemlos abgearbeitet werden kann, verzichtet. Fehlende bzw. unzureichende Aussagen führen zu Auseinandersetzungen mit der Aufgabenstellung und zur Notwendigkeit, begründet Entscheidungen zu treffen, um weiterarbeiten zu können. Damit soll die Ausarbeitung folgende Zielstellungen erreichen:

- Erkennen der Kommunikationsnotwendigkeit mit dem Auftraggeber hinsichtlich Präzisierung der Aufgabenstellung und Diskussion eigener Lösungsvorschläge,
- Reaktivierung bzw. Erweiterung des Grundwissens über Wärmeübertragung – Strömungsmechanik (Druckverlustberechnung) – Apparatekonstruktion und Festigkeits-/Stabilitätsberechnung sowie Werkstofftechnik und Fertigungstechnik hinsichtlich der Anwendung auf eine spezielle Aufgabe,
- Erkennen der Notwendigkeit zur Abstimmung zwischen wärmetechnischer Auslegung und konstruktiv/technologischer Umsetzung zur Berücksichtigung beiderseitiger Randbedingungen,
- Erkennen der Notwendigkeit, die aus den der Entwurfsarbeit nachgelagerten Prozessstufen resultierenden speziellen Anforderungen möglichst frühzeitig zu berücksichtigen.

Der abgehandelte Stoffumfang in den Teilgebieten ermöglicht auch eine effiziente Vorbereitung auf die jeweilig zu erbringenden Kenntnissnachweise bzw. die Abarbeitung komplexer Aufgabenstellungen im Rahmen von Beleg- bzw. Abschlussarbeiten. Über diese Zielstellung hinaus stellt eine derartige Problembehandlung

sicher auch ein unterstützendes Material für die Lehrenden in den einzelnen Studienfächern dar, um das Stoff–Zeit-Problem etwas zu entschärfen, und auch für die jungen Absolventen wird es durch den Zwang, sich stets mit Randbedingungen auseinanderzusetzen als Leitfaden in der praktischen Tätigkeit dienen können.

Das vorliegende Buch soll und kann keines der Standardwerke auf den Gebieten der Wärmeübertragung oder des Apparatebaues ersetzen. Durch die komplexe Behandlung eines ausgewählten einfachen Wärmeübertragers vom Entwurf bis zur Instandsetzung ist es als sinnvolle Ergänzung der umfangreichen Fachliteratur gedacht, um weitere Randbedingungen in die Überlegungen mit einzubeziehen.

Dem Wiley-VCH-Verlag wird an dieser Stelle für die Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Gestaltung des Buches, insbesondere bei der Bearbeitung des umfangreichen Bildmaterials, gedankt. Der Dank gilt gleichermaßen den Unternehmen, die durch die Bereitstellung technischer Unterlagen das Vorhaben unterstützt und damit wesentlich zum Praxisbezug beigetragen haben.

Fürstenwalde im Dezember 2012,

Eberhard Wegener

1

Aufgabenstellung „Auslegung und Konstruktion eines Rohrbündel-Wärmeübertragers (RWÜ)“

1.1

Allgemeine Voraussetzungen für die Auslegung eines RWÜ

Für den Entwurf und die Auslegung eines Wärmeübertragers ist in erster Linie die möglichst vollständige Angabe aller an den Apparat gestellten verfahrenstechnischen Anforderungen erforderlich. Dazu zählen: der zu übertragende Wärmestrom, die Art, der Aggregatzustand und die Zusammensetzung der Medien am Ein- und Austritt des Wärmeübertragers, die Massen- bzw. Volumenströme, die Eingangs- und Ausgangstemperaturen, die Betriebsdrücke und die zulässigen Druckverluste, die thermodynamischen Eigenschaften der Medien in Abhängigkeit von Temperatur und Druck, sowie Angaben zum Verschmutzungsverhalten der Medien. Darüber hinaus sind die Berechnungstemperatur, der zulässige Betriebsdruck, der Prüfdruck, Werkstoffe, Stutzen-Nennweiten und Stutzenbelastungen, Anschlussmaße sowie Angaben zur Wärme- bzw. Kälte­dämmung des Apparates erforderlich, die teilweise auch innerhalb des Berechnungsablaufes ermittelt werden. Weiterhin sollten Informationen zum anzuwendenden Regelwerk, zum Aufstellungsort und damit zum benötigten Platzbedarf sowie sonstige Anforderungen aus der Sicht der Montage, des Betriebes und der Instandhaltung vorgegeben werden.

1.2

Hinweise zur Aufgabenstellung

Eingangs soll bemerkt werden, dass – entgegen manch anderer gängiger Literatur (Wärmetauscher) – hier der Begriff „Wärmeübertrager“ verwendet und damit auch dem VDI-Wärmeatlas [1] entsprochen wird.

Für die Gesamthematik wurde von einem Auftraggeber die nachfolgende Aufgabenstellung vorgegeben. Wie beim Durcharbeiten unschwer zu erkennen ist, entspricht sie nicht den im Abschnitt 1.1 gestellten Anforderungen und ist nicht in allen Bereichen eindeutig. Natürlich wäre es möglich, alle diese fehlenden Aussagen bzw. Konkretisierungen der Aufgabenstellung hier bereits festzulegen oder einzuarbeiten und damit eine „glatte“ Abarbeitung zu ermöglichen. Aber das Anliegen der

Ausarbeitung liegt ja darin, dass sich die Studierenden mit derartigen, in Teilbereichen unzulänglichen Aufgabenstellungen neben den theoretischen Grundlagen auseinandersetzen sollen. Es wäre auch möglich, hier Elemente der Konstruktionsmethodik hinsichtlich der Präzisierung der Aufgabenstellung anzuwenden (Festforderungen, Mindestforderungen, Wünsche, Ziele). Da aber insgesamt ganz unterschiedliche Teilbereiche – vom Entwurf über die Konstruktion, ergänzt bis zur Instandsetzung – auch in unterschiedlicher Tiefe behandelt werden, wird zweckmäßigerweise davon abgesehen und dann besser an entsprechender Stelle diskutiert.

Um demzufolge also nicht im Vorfeld bereits Dinge in den Vordergrund zu rücken, über die erst in einer späteren Bearbeitungsphase zu entscheiden ist, erfolgt anschließend eine systematische Abarbeitung der Aufgabe, innerhalb derer dann auf die offenen bzw. nicht eindeutigen Problemstellungen eingegangen und begründet entschieden wird, um die Weiterführung der Arbeit zu ermöglichen. Dies führt dann zur sogenannten „Präzisierung der Aufgabenstellung“, wie aus der Konstruktionsmethodik bekannt. So soll der Studierende bewusst dazu geführt werden, Aufgabenstellungen kritisch zu betrachten und mögliche, erforderliche Ergänzungen/Klarstellungen rechtzeitig einzufordern.

1.3

Aufgabenstellung mit Detailangaben:

Technologische Grundlage In einer Ethylenanlage soll das Speisewasser (Mittel-druck-Kondensat) für zwei Dampferzeuger durch Weichwasser ersetzt werden. Hierbei muss eine kontinuierliche Absalzung erfolgen. Diese Abschlammung soll in einem Rohrbündel-Wärmeübertrager (RWÜ) mittels Kühlwasser auf +40 °C abgekühlt werden und anschließend in das Abwasser abgeleitet werden.

Technische Daten:

Abschlammung ND-Dampferzeuger:

Menge:	4 bis 4,5 t/h
Druck:	0,35 MPa
Temperatur:	150 °C
Kesselinhaltswasser Salzgehalt:	3000 mg/l
Salzgehalt des Dampfes:	max. 1 mg/l.

Kühlwasser:

Druck (Vorlauf):	0,35 bis 0,50 MPa
Rücklauf:	0,15 MPa nicht zu unterschreiten
Eintrittstemperatur:	(im Jahresmittel) +25 °C
Kühlzonenbreite:	5 bis max. 10 °C, mit 8 °C anzusetzen.

Zur Verschmutzung sind folgende Aussagen gemacht:

Auf der Abschlammseite ist mit keinen Ablagerungen zu rechnen, während das Kühlwasser zur Verkrustung neigt. Diese wird vorzugsweise chemisch beseitigt.

Die Reinigung erfolgt vor Ort. Der Spülvorgang läuft unter folgenden Bedingungen ab:

Temperatur:	30 °C
Druck:	0,1 MPa
Spülmedium:	1-%-ige Salzsäure

Für die wärmetechnische Auslegung werden nach Tabelle 1.1 folgende Stoffwerte vorgegeben:

Tabelle 1.1 Stoffwerte aus der Aufgabenstellung.

Stoffkenngröße	Einheit	Abschlammung	Kühlwasser
Dichte ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	962	996
Spezifische Wärmekapazität c_p	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	4,21	4,18
Kinematische Zähigkeit ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$0,309 \cdot 10^{-6}$	$0,838 \cdot 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit λ	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$	0,679	0,658

Zu beachtende Randbedingungen:

Der RWÜ muss in eine vorhandene Anlage eingebaut werden. Daraus ergeben sich folgende Zwangspunkte:

- Die vorhandene Standortgröße begrenzt die Länge des RWÜ auf 4 m bis max. 4,5 m.
- Die vorgesehene Wiederverwendung der Fundamente (2 Sockel im Mittenabstand von 2,0 m, Auflagefläche 500×200 mm) erfordert eine liegende Anordnung des Wärmeübertragers; der RWÜ wird in einer Behältertasche aufgestellt. Bevorzugt wird ein eingängiger RWÜ. Bei Betriebsabstellung und Instandhaltungsmaßnahmen ist durch die Auskleidung der Wanne eine gefahrlose Entleerung des RWÜ gegenüber Leckflüssigkeit gegeben.
- Die Freiaufstellung des RWÜ verlangt einen Außenanstrich. Muss aus verfahrenstechnischen Gründen das heißgehende Medium im Mantelraum fließen, ist der Anstrich entsprechend auszuwählen und erforderlichenfalls ist ein Berührungsschutz zu berücksichtigen.
- In der Ethylenanlage herrscht Schweißverbot. Damit ist der RWÜ komplett zu liefern. Alle Instandsetzungsarbeiten – von den periodischen Reinigungsarbeiten abgesehen – müssen in der Werkstatt erfolgen.
- Die auftretenden Rohrlasten der Ver- und Entsorgungsleitungen sind zu erfassen und bei der RWÜ-Konstruktion entsprechend zu berücksichtigen. Da die

Anschlüsse des bisherigen Apparates mit denen des neuen RWÜ nicht identisch sind, müssen alle Leitungen neu verlegt und angepasst werden.

- Belastungen im System: Die Lebensdauer der Anlage wird mit 15 Jahren angesetzt. Für diesen Zeitraum werden aus Erfahrung 10^3 Lastwechsel, resultierend aus notwendigen Generalüberholungen, Abstellen bei Betriebsstörungen sowie anderen Betriebsbedingungen, beim Spül- und Prüfzustand sowie auftretenden Systemschwankungen des Kühlwasserkreislaufes, angesetzt.
- Im Zusammenhang mit der Neugestaltung des Rohrleitungssystems ist zu prüfen, ob die 1 %-ige Salzsäure durch ein anderes chemisches Reinigungsverfahren ersetzt werden kann.
- Infolge der Medienzustände ist ein Reinigungsintervall von 3 Monaten vorgesehen.

1.4

Hinweise zur Lösungsmethodik

Entsprechend der Aufgabenstellung, die die wesentlichen Anforderungen hinsichtlich der Parameter und bereits einige Forderungen für die konstruktive Gestaltung sowie Aussagen zur Fahrweise enthält, wird generell die Forderung nach einer funktionsgerechten, wartungsarmen und robusten Konstruktion mit einer einfachen Montage und effektiver Reinigungsmöglichkeit gemacht.

Ein Apparat hat die Aufgabe, ein Verfahren oder einen Verfahrensschritt zu realisieren. Das Verfahren steht also im Vordergrund. Da es aber unumgänglich ist, Verfahren, Apparat und Anlage als Einheit zu sehen, um eine optimale Lösung zu erreichen, steht innerhalb der Aufgabenstellung die wärmetechnische Auslegung als erster Schritt in der Ablauffolge. Zunächst muss Klarheit über die Bauart geschaffen werden, d. h. es werden die Bauarten ausgeschlossen, die aufgrund der eingesetzten Medien, des Betriebsdruckes, der Betriebstemperatur, der Volumenströme und des Platzbedarfes oder aufgrund von Betriebserfahrungen für die Lösung der Aufgabenstellung nicht einsetzbar sind. Für die gewählte Bauart wird die wärmetechnische Auslegung vorgenommen. Die anschließende strömungstechnische Berechnung fußt auf deren Ergebnissen im Zusammenhang. Die Ablagerungsbildung während des Betriebes wird dabei üblicherweise durch Foulingwiderstände berücksichtigt, aus denen dann für den Anfangszustand eine Überdimensionierung der Wärmeübertragungsfläche resultiert, die regelungstechnisch berücksichtigt werden muss. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass bei der Ermittlung und Festlegung von Bauelementen bereits hier die entsprechenden Normen bezüglich der Abmessungen berücksichtigt werden müssen, um die Berechnungsergebnisse konstruktiv abzusichern. Auf die wärme- und strömungstechnische Berechnung folgt der konstruktive Entwurf in Verbindung mit der Werkstoffauswahl. Berechnung und Entwurf liefern die Grundlage für die festigkeitsmäßige Auslegung der druckbeanspruchten Apparatelemente und Aussagen über den Einfluss der für den Transport und die Montage erforderlichen Tragelemente. Diese werden ergänzt durch die Be-

rücksichtigung von Zusatzlasten wie sie im Rahmen der Fertigung, des Transportes und der Montage sowie auch beim An- und Abfahren oder beim Reinigen entstehen. Unter Berücksichtigung von Anforderungen aus der Fertigung, z. B. der Schweißtechnik oder der Rohrbündelmontage, entstehen letztlich die Konstruktionsunterlagen für den RWÜ und damit auch die notwendigen Grundlagen für die Entwurfsprüfung (früher Vorprüfung) der Unterlagen durch den TÜV (Technischer Überwachungsverein) vor Fertigungsbeginn, wenn es sich – wie noch nachzuweisen – um einen abnahmepflichtigen Druckbehälter handelt.

Nach Abschluss der eigentlichen Aufgabenstellung mit den Konstruktionsunterlagen gemäß der Titelangabe für die vorliegende Ausarbeitung erfolgt eine Beschreibung der RWÜ-Fertigung unter Berücksichtigung des im Studienfach Fertigungstechnik erworbenen Wissens, erweitert um bei RWÜ fertigungsspezifischen Abläufen/Verfahren und Fertigungseinrichtungen. Um eine ganzheitliche Betrachtung der Thematik zu erreichen, werden auch Gesichtspunkte aus den sich an die Fertigung anschließenden Prozessen des Transportes und der Montage als Überblickswissen vermittelt sowie auf den in der Aufgabenstellung angeführten Reinigungsprozess eingegangen und Aussagen zur Instandsetzung getroffen.

Da es sich bei der vorliegenden Ausarbeitung im Wesentlichen um Studienmaterial für Studenten relevanter Fachrichtungen wie Verfahrenstechnik, Maschinenbau und angrenzender Studiengänge handelt, erfolgt nur eine begrenzte Wiederholung von Stoffinhalten, die mit dem Lösungsablauf im Zusammenhang stehen, aber eine Diskussion und Begründung des eingeschlagenen Weges und der Auslegungsgrundlagen mit entsprechenden Literaturvermerken. Wenngleich weitgehend Abbildungen und Tabellen aus den Vorschriftenwerken als Auszüge angeführt werden, um eine übersichtliche Themenabarbeitung zu gewährleisten, schließt dies das Studium der Originalliteratur nicht aus. Lediglich an ausgewählten Teilthemen, die meist nicht Gegenstand der Lehrveranstaltungen der genannten Fachrichtungen sind, erfolgt eine etwas erweiterte Darstellung des Sachverhaltes, insbesondere unter Nutzung von ausgewähltem Bildmaterial. Damit soll die Nachvollziehbarkeit des Lösungsweges gewährleistet und zugleich eine selbständige Übertragbarkeit durch die Studierenden auf andere Aufgabenstellungen erreicht werden. Parallel dazu soll die Erkenntnis gestärkt werden, dass bei der wärme-/strömungstechnischen Auslegung eines Wärmeübertragers bereits konstruktive Details, aber auch Anforderungen aus dem Betriebsregime berücksichtigt werden müssen, wie z. B. die weitgehende Verwendung von genormten Bauteilen bei der Festlegung von Querschnitten. Für die konstruktive Gestaltung wiederum sind die wärme-/strömungstechnischen Ergebnisse als sog. Festforderungen anzusehen, d. h. eine Abweichung von den vorgegebenen Abmessungen beeinflusst in jedem Fall die vorhergehende RWÜ-Auslegung und ist damit nur in Abstimmung mit dem Wärmetechniker statthaft. Andererseits sind oft konstruktive Ergänzungen des wärme-/strömungstechnischen Entwurfs erforderlich. Sie ergeben sich aus der notwendigen Berücksichtigung von Maßnahmen zur Sicherung einer fertigungs- und montagegerechten Konstruktion.

So wird in den einzelnen Abschnitten auf diese Anforderungen jeweils eingegangen, um die studienfachbezogene Denkweise zu erweitern.

6 | 1 Aufgabenstellung „Auslegung und Konstruktion eines Rohrbündel-Wärmeübertragers (RWÜ)“

Literatur

- 1 (2006) *VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*, 10. bearbeitete und erweiterte Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf.

2

Wärmetechnische Auslegung des RWÜ

2.1

Allgemeines

Wärmeübertrager sind Apparate, die in Richtung eines Temperaturgefälles Wärme zwischen zwei oder mehr Medienströmen übertragen. Sie werden allgemein nach der Art des Wärmeübergangs in drei Gruppen eingeteilt:

- Rekuperatoren, bei denen sich zwischen den Medienströmen stets eine Trennwand befindet (Übertragungsfläche). Die Apparate dieser indirekten Wärmeübertragung sind bevorzugt dort eingesetzt, wo sich die Medien weder vermischen noch verunreinigen dürfen. Umfangsreichste Gruppe sind die Rohrbündel-Wärmeübertrager (RWÜ).
- Regeneratoren als Wärmeübertrager mit Speichermassen.
- Kontakt-Wärmeübertrager, die die Medienströme zwecks Wärmeübertragung in die direkte Berührung bringen.

Ziel der Berechnung von Wärmeübertragern der ersten Gruppe, in die die Aufgabenstellung fällt, ist es, für vorgegebene Massenströme, Temperaturen oder Wärmeströme die geeignete Bauart zu ermitteln und dann die erforderliche Übertragungsfläche und die Strömungsquerschnitte für die beteiligten Stoffströme zu bestimmen. Wärmeübertrager lassen sich nicht aus Vorgabedaten in direkter Ergebnisermittlung auslegen. Sie müssen demzufolge iterativ aus gegebenen und errechneten kalorischen Zustandsgrößen, aus Stoffwerten unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur und über eine vorerst angenommene Apparategeometrie dimensioniert werden. Insofern ist der Entwurf bzw. die Bemessung eine schwierigere Aufgabe als die Nachrechnung eines gegebenen RWÜ. In diesem Fall sind ja sämtliche Geometrien des Apparates bekannt, und es sind die thermische Leistung und der Druckverlust zu ermitteln.

Im praktischen Fall steht natürlich von Unternehmen der Verfahrenstechnik und des wärmetechnischen Apparatebaues eine ausgereifte Software zur Verfügung, mit der RWÜ für unterschiedliche Medien und Bauarten schnell und sicher ausgelegt werden können, auch mit dem Ergebnis einer maßstabsgerechten Skizze des Apparates. Aber für den Lernprozess steht hier die „handwerkliche“

Themenbearbeitung im Vordergrund, mit der es später möglich wird, sich in die Dimensionierung von Wärmeübertragern mittels Software einzuarbeiten, denn jegliche Nutzung von Berechnungssoftware setzt ja die Fachkenntnis der Zusammenhänge voraus.

In den nachfolgenden Ausführungen wird grundlegend auf den bereits angeführten VDI-Wärmeatlas [1] Bezug genommen sowie natürlich auf die einschlägigen DIN-Normen und, wo angebracht, ein Hinweis auf weiterführende bzw. häufig in der Lehre empfohlene Literatur, so z. B. [2].

Die allgemeine Vorgehensweise bei der wärmetechnischen Auslegung der RWÜ erfolgt in den bekannten Schritten:

- Ermittlung der zu übertragenden Wärmemenge aus den Vorgaben,
- Bestimmung der erforderlichen Kühlwassermenge,
- Ermittlung der erforderlichen Wärmeübertragungsfläche über $\Delta\vartheta_m$ und eine geschätzte k -Zahl,
- Festlegung der Medienführungen und der konstruktiven Grundlagen wie Nennweite der RWÜ, Anzahl und Länge der Rohre,
- Nachweisführung für den Wärmeübergang im Rohr- und im Mantelraum = $f(Re, Nu, \alpha_i, \alpha_a, Einbauten)$,
- Ergebniskorrekturen (k -Zahl, Nachweis der Wandtemperaturen, Korrektur der Wärmeübertragungsfläche),
- Überprüfung des Kompensatorkriteriums,
- Ergebnis der wärmetechnischen Auslegung.

Die Grundgleichung für den Wärmestrom lautet:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad (2.1)$$

mit	\dot{Q}	[kW]	Wärmestrom,
	k	$[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}]$	Wärmedurchgangskoeffizient,
	A	$[\text{m}^2]$	Übertragungsfläche,
	$\Delta\vartheta_m$	[K]	mittlere Temperaturdifferenz,

wobei bei Wärmeübertragern im Gleich- oder Gegenstromprinzip für $\Delta\vartheta_m$ die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}}{\ln \frac{\Delta\vartheta_{gr}}{\Delta\vartheta_{kl}}} \quad (2.2)$$

einzusetzen ist. Dabei ist zu beachten, dass diese Beziehung nur für RWÜ mit rohrseitig einfachem Durchgang gilt, andernfalls muss sie korrigiert werden gem. [3].

Bemerkung: Gl. (2.2) wird rechnerisch ungenau, wenn $\Delta\vartheta_{gr} \rightarrow \Delta\vartheta_{kl}$ geht. In diesen Fällen wird zur Ermittlung von $\Delta\vartheta_m$ empfohlen, die Reihenentwicklung

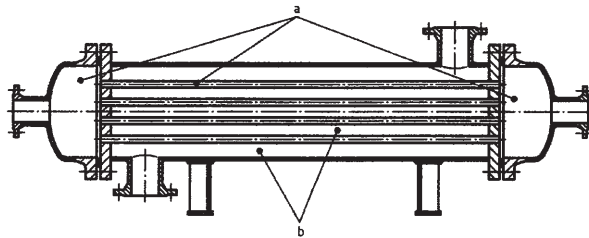
$$\Delta\vartheta_m = \frac{1}{2} \cdot (\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}) - \frac{1}{6} \cdot \frac{(\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl})^2}{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}} \quad (2.3)$$

anzuwenden. Für $1 \leq \Delta\vartheta_{gr}/\Delta\vartheta_{kl} \leq 1,2$ braucht nur das erste Glied der Reihe berücksichtigt zu werden, der Fehler liegt dabei unter 0,3 %. Für $1,2 \leq \Delta\vartheta_{gr}/\Delta\vartheta_{kl} \leq 2,4$ müssen beide Glieder berücksichtigt werden, der Fehler liegt dann ebenfalls unter 0,3 %.

Einflüsse auf den Wärmeübergang haben die Strömungsart und die Strömungsgeschwindigkeit, die Stoffeigenschaften der Medien, deren Aggregatzustand und die Wärmestromrichtung, die Länge der Strömungskanäle sowie die Rauigkeit der Übertragungsflächen. Bei der Auslegung muss zunächst festgestellt werden, welche Bauart bevorzugt wird und welches Medium durch die Rohre und welches um die Rohre strömen soll. Entsprechend Aufgabenstellung soll ein eingängiger RWÜ ermittelt werden. DIN 28 183 [4] legt die Bezeichnungen gem. Abbildung 2.1 fest.

Der RWÜ mit festem Rohrbündel besteht aus zwei Rohrböden, in denen die erforderliche Anzahl gerader Rohre eingeschweißt oder eingewalzt ist, in Sonderfällen auch eingewalzt und verschweißt. Rohre und Rohrboden bilden als Ganzes das Rohrbündel. Die beiden Rohrböden können als eigene Flanschausführung mit dem Mantel, der je einen Stutzen für den Ein- bzw. Auslauf des Mantelraum-Mediums enthält, verschweißt, oder aber in einen Vorschweißflansch mit entsprechender Ausdrehung eingepasst und verschweißt werden. Die Hauben mit Vor-

Benennung	Erläuterung
Rohrraum oder Raum in den Rohren	Der von den einzelnen Rohren gemeinsam gebildete Rohrrinnenraum einschließlich des Raumes in den Hauben.
Mantelraum oder Raum um die Rohre	Der vom Mantel umschlossene und von den Rohrwandungen abgegrenzte Raum zwischen den Rohren.



- a Rohrraum oder Raum in den Rohren
- b Mantelraum oder Raum um die Rohre

Abb. 2.1 Räume in Rohrbündel-Wärmeübertragern.

schweißflanschen, die mit den Mantelflanschen verschraubt sind, enthalten die Stutzen für Ein- und Auslauf des in den Rohren strömenden Mediums. Auf weitere notwendige Anschlüsse wird bei der Entwicklung der konstruktiven Lösung eingegangen.

Mit Erfahrungswerten von Wärmedurchgangskoeffizienten k wird eine Übertragungsfläche A abgeschätzt und danach die Apparategeometrie (z. B. Rohr-abmessungen, Rohranzahl, Gängigkeit usw.) einschließlich der Strömungsführung angenommen. Die Strömungsführung und gegebene oder errechnete Ein- und Ausgangstemperaturen gestatten dann die Bestimmung der mittleren Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$.

Die Geschwindigkeit der Medien in den freien Strömungsquerschnitten A_q ergibt sich bei vorliegendem, gemäß der Aufgabenstellung kontinuierlichem Betrieb aus der Beziehung

$$w = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d_i^2 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.4)$$

mit w Geschwindigkeit (in anderen Literaturstellen auch v bzw. u),
 \dot{V} Volumenstrom,
 A_q Strömungsquerschnitt,
 \dot{m} Massenstrom,
 ρ Dichte des Strömungsmediums,
 n Anzahl der durchströmten Rohre,
 d_i Innendurchmesser der Rohre.

Durch Änderung der Strömungsquerschnitte im RWÜ sind geeignete Strömungsgeschwindigkeiten zu ermitteln. Sie werden nach oben durch zu hohe Druckverluste, Erosion an den angeströmten Flächen oder auch durch Geräuschentwicklung begrenzt, nach unten durch eine zu geringe Wärmeübertragung und einen zu hohen Verschmutzungsgrad an den wärmeübertragenden Flächen, allgemein als Fouling bezeichnet. Hierzu erfolgen noch Ausführungen an entsprechender Stelle.

Der Wärmeübergang beiderseits der Übertragungsfläche (berücksichtigt durch den Wärmeübergangskoeffizienten α) bestimmt die Größe des Wärmedurchgangskoeffizienten k . Bei dessen Errechnung müssen auch Wärmeleitwiderstände (dargestellt durch die Wärmeleitfähigkeit λ), vor allem aber die durch Verschmutzung der beteiligten Medien verursachten, berücksichtigt werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass der beim Durchströmen des Wärmeübertragers entstehende Druckunterschied zwischen Ein- und Austritt der Medien

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \sum_{n=1}^i \xi_i \quad (2.5)$$

mit Δp Druckdifferenz
 ρ Dichte des Mediums,

w Geschwindigkeit im Strömungsquerschnitt,
 $\sum_{n=1}^i \zeta_i$ Summe der Widerstände,

durch eine äußere Energiezufuhr aufgebracht werden muss, d. h. seine Größe ist eine Randbedingung für die Auslegung der Pumpenleistungen. In der Aufgabenstellung sind bereits Angaben über die einzuhaltenden Druckbereiche gemacht worden. Sie sind natürlich bei der strömungstechnischen Berechnung anhand der vorgesehenen konstruktiven Durchbildung der RWÜ zu überprüfen. Gegebenenfalls muss dann eine Korrektur des Entwurfes vorgenommen werden.

Die Anforderungen, die an einen Wärmeübertrager gestellt werden, können so unterschiedlich sein, dass für jeden Anwendungsfall eine den Betriebsverhältnissen besonders angepasste Konstruktion vorgesehen werden muss. Demzufolge besteht eine Vielzahl von Bauarten, die den Wärmeübergang zwischen den unterschiedlichen Medien realisieren. Die Bauformen werden im Wesentlichen bestimmt

- durch die Art und das betriebliche Verhalten der Medien (einschließlich chemischer Aggressivität),
- durch äußere Prozessgrößen wie Temperaturen, zu übertragende Wärmemengen und durchzusetzende Mengenströme,
- durch die für die Dimensionierung maßgebenden Größen wie Strömungsführung im Inneren, d. h. im Rohrraum und im Mantelraum, die Geometrie der Kanäle, die eingesetzten Werkstoffe und die entstehenden Druckverhältnisse,
- durch die thermodynamischen Eigenschaften der Stoffströme,
- durch die Gefahr der Verschmutzung und Verkrustung durch gelöste oder ungelöste Feststoffe und die damit erforderliche Reinigungstechnologie.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Wärmeübertrager-Bauformen, die hier nicht noch einmal angeführt werden, enthält der VDI-Wärmeatlas [1] und ist auch meist in der Fachliteratur über Wärmeübertrager enthalten.

2.2

Verwendete Formelzeichen und Kenngrößen

Es erscheint nicht zweckmäßig, den nachfolgenden Berechnungen die üblicherweise verwendeten Formelzeichen in ihrer Gesamtheit voranzustellen. Sie können sicher auch als bekannt vorausgesetzt werden. In den Berechnungen sind jeweils die erforderlichen Kenngrößen mit ihren Einheiten angeführt. Infolge der in der Fachliteratur auch unterschiedlich verwendeten Formelzeichen werden hier für die wärme- und strömungstechnische Berechnung die Formelzeichen gemäß VDI-Wärmeatlas [1] angewendet, bei speziell genannter Literatur die dort angewendeten mit entsprechenden Erläuterungen. Es wird aber bereits an dieser Stelle darauf

hingewiesen, dass selbst im VDI-Wärmeatlas in den einzelnen Abschnitten keine einheitlichen Formelzeichen für gleiche Sachverhalte verwendet werden. Das erschwert etwas die Vorgehensweise.

Die wärmetechnische und auch die strömungstechnische Auslegung der RWÜ beruhen auf der Anwendung dimensionsloser Kennzahlen, die bestimmte Vorgänge beschreiben. Ihre Kenntnis kann sicher vorausgesetzt werden, sie werden aber nachfolgend im notwendigen Maße vorangestellt. Hinsichtlich der Stoffwertetabellen, die sich auf °C beziehen, ist in den allgemeingültigen Formeln statt T bereits die Temperatur in °C angegeben.

Nusselt-Zahl Nu : dient zur Beschreibung des Wärmeüberganges an ein strömendes Medium. Je größer die Nu -Zahl ist, desto besser ist der Wärmeübergang. Sie wird als Funktion der Strömungsparameter, der Stoffwerte und der Strömungsgeometrie angegeben. Aus ihr kann die Wärmeübergangszahl α bestimmt werden.

Es gilt

$$Nu = \frac{\dot{q}_w \cdot l}{\lambda \cdot \Delta\vartheta} \quad (2.6)$$

mit \dot{q}_w	[W/m ²]	Wärmestromdichte,
l	[m]	charakteristische Länge,
λ	[W/m · °C]	Wärmeleitfähigkeit des Mediums,
$\Delta\vartheta$	[°C]	charakteristische Temperaturdifferenz.

Prandtl-Zahl Pr stellt eine Kombination von reinen Stoffwerten dar, die Aussagen über die Vorgänge in den Grenzschichten zulässt. Im Verhältnis ν/a ist die kinematische Viskosität ν ein Maß für die Dicke der Strömungsgrenzschicht, und die Temperaturleitfähigkeit a ein Maß für die Dicke der Temperaturgrenzschicht.

Es gilt:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (2.7)$$

mit η	[kg/m · s]	dynamische Viskosität des Mediums,
c_p	[m ² /s ² · °C]	spezifische isobare Wärmekapazität des Mediums,
λ	[W/m · °C]	Wärmeleitfähigkeit des Mediums,
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität des Mediums, $\nu = \eta/\rho$,
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit des Mediums, $a = \lambda/\rho \cdot c_p$.

Reynolds-Zahl Mit der Re-Zahl werden bei den Wärmeübertragungsprozessen die von der Geometrie abhängigen unterschiedlichen Strömungsverhältnisse berücksichtigt. Ihre Größe lässt die wichtige Aussage zu, ob die bei der Strömung vorliegende Re-Zahl größer oder kleiner als die kritische Re-Zahl Re_{krit} ist. Diese trennt die Strömungsform in Bereiche mit laminarer und mit turbulenter Strömung. Für voll die ausgebildete Rohrströmung liegt der Wert bei $Re_{krit} = 2300$. Unterhalb

dieses Wertes liegt laminare Strömung vor. Der Bereich bis 10^4 wird als Übergangsbereich bezeichnet.

Es gilt:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot w \cdot l}{\eta} = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (2.8)$$

mit ρ [kg/m³] Dichte des Mediums,
 w [m/s] charakteristische Geschwindigkeit im Strömungsquerschnitt,
 l [m] charakteristische Länge,
 η [kg/m · s] dynamische Viskosität des Mediums,
 ν [m²/s] kinematische Viskosität des Mediums, $\nu = \eta/\rho$.

Neben den dimensionslosen Kennzahlen sind grundlegender Bestandteil der Berechnungen:

- die Temperaturleitfähigkeit α als Stoffeigenschaft zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der räumlichen Verteilung der Temperatur durch Wärmeleitung infolge eines Temperaturgefälles,

$$\alpha = \frac{\dot{q}_w}{\rho \cdot c_p}, \quad (2.9)$$

- die Wärmeübergangszahl α zur Beschreibung der Intensität des Wärmeüberganges an einer Grenzfläche, abhängig von der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte und dem Wärmeleitkoeffizienten des Mediums, der Strömungsgeschwindigkeit bzw. Art der Strömung, sowie den geometrischen Verhältnissen,

$$\alpha = \frac{\dot{q}_w}{\Delta\vartheta}, \quad (2.10)$$

- der Wärmedurchgangszahl k als Maß für den Wärmestrom durch eine ein- oder mehrschichtige Materialschicht, wenn von beiden Seiten unterschiedliche Temperaturen vorliegen,

$$k = \frac{\dot{Q}_w}{A_i \cdot \Delta\vartheta}, \quad (2.11)$$

- die Wärmeleitfähigkeit λ zur Beschreibung der Fähigkeit eines Stoffes, thermische Energie mittels Wärmeleitung in Form von Wärme zu transportieren. λ ist eine temperaturabhängige Stoffkonstante.

2.3

Ausgangsdiskussion

Die Aufgabenstellung und die vorgegebene Einbausituation erfordern bereits eine Ausführung als Apparat zur indirekten Wärmeübertragung in Form eines liegenden Rohrbündel-Wärmeübertragers, d. h. eine tiefgehende Betrachtung über Vor- und Nachteile liegender bzw. stehender Ausführungen mit einer entsprechenden Entscheidungsbegründung ist hier nicht vorzunehmen. Vorteilhaft ist ja in jedem Fall, dass diese Ausführung universell einsetzbar ist und dass ihre Apparateelemente weitgehend genormt sind. Dazu kommt, dass eine mehrfache Umlenkung des im Außenraum strömenden Mediums möglich ist und dadurch wirtschaftliche Strömungsgeschwindigkeiten erreicht werden und einhaltbar sind. Nachteilig wirkt sich aus, dass möglicherweise ein mantelseitiger Dehnungsausgleicher infolge größerer Temperaturdifferenzen zwischen den Medien erforderlich wird. Je nach Medienführung könnte sich zudem ggf. eine schlechte Reinigungsmöglichkeit im Innen- oder Außenraum ergeben, wozu im Zusammenhang mit der Aufgabenformulierung noch Stellung zu nehmen ist. Von der Stromführung her wird das Gegenstromprinzip angenommen. Es hat den Vorteil, dass die Austrittstemperatur des wärmeaufnehmenden Mediums höher sein kann als die Austrittstemperatur des wärmeabgebenden Mediums. Dieser Vorteil der vorgesehenen Stromführung wird aber noch nachgewiesen. Die Frage, ob dann ein festes oder ein ausziehbares Rohrbündel zur Anwendung kommt, bleibt ebenfalls erst einmal offen.

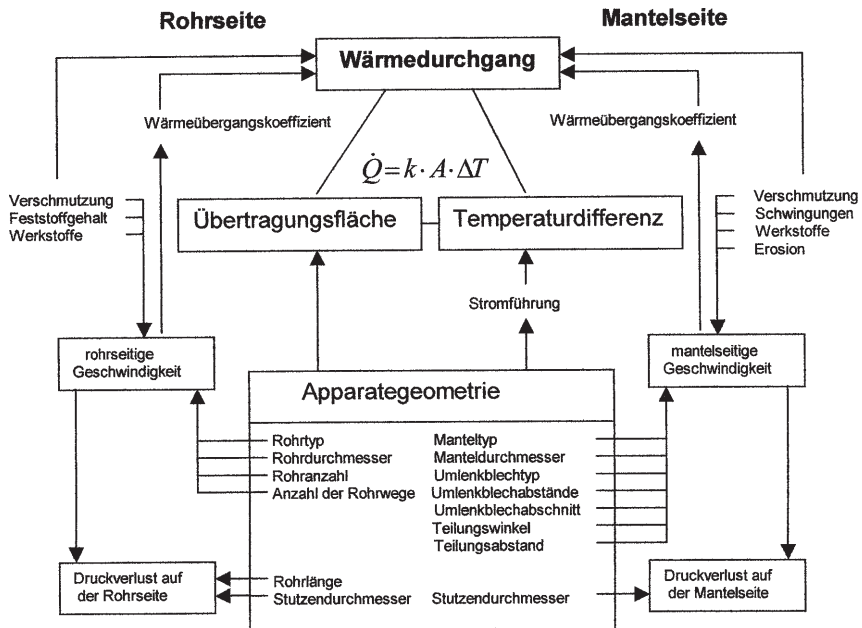


Abb. 2.2 Einflussgrößen auf die Wärmeübertragung.