

Einfluss der Rohr- und Lamellengeometrie bei Wärmeübertragern

Wie wirken sich die Rohranordnung und die Geometrie der Rohre und der Lamellen auf die thermische Leistung von Lamellenwärmeübertragern in Kreislaufverbundsystemen aus? Umfangreiche Messreihen dokumentieren die Vorteile der Nutzung von Ovalrohren in versetzter Anordnung und speziell strukturierten Lamellen in Wärmeübertragern.

Heute werden Wärmeübertrager mit strukturierten Lamellen und Rohren als Wärmeübertrager in Kreislaufverbundsystemen zur Wärmerückgewinnung (WRG) eingesetzt. Hierbei dienen auf der Luftseite berippte Rohre zur Wärmeübertragung, die im Gegenstrom zur Luft durchströmt werden.

Zur Erreichung des benötigten Temperaturänderungsgrades, bezogen auf den Zuluftstrom, wird eine entsprechende dimensionslose Kenngröße NTU (Num-

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup, Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Geschäftsführender Gesellschafter der Howatherm Klimatechnik GmbH. Vorsitzender des Vorstands des Fachverbands Gebäude Klima e. V., Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 16798, EN 308, EN 13053 und EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803. Vorsitzender der VDI Richtlinie VDI 3803 Blatt 1.

Boris Wollscheid, B. Eng., Entwicklungsingenieur, Leiter Entwicklung Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.

Maria Swiderek, M. Sc., B. Eng., Entwicklungsingenieurin Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.

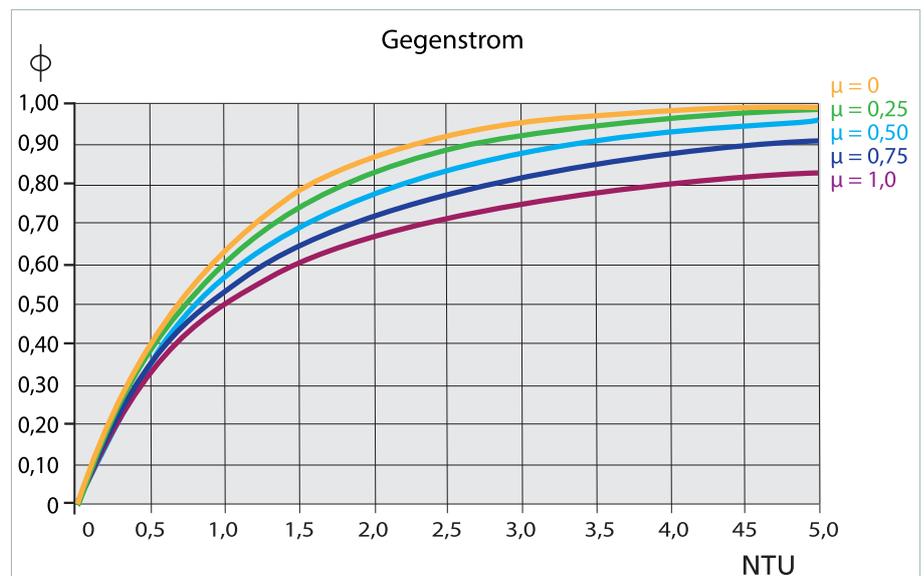


Bild 1

Temperaturänderungsgrade (Φ) im Gegenstrom, bezogen auf die dimensionslose Wärmeübertragerkenngröße NTU

ber of Transfer Units) benötigt, die den Wärmeübertrager in seiner Charakteristik beschreibt.

Aus dieser dimensionslosen Kennzahl NTU ergibt sich dann mit der Gegenstrombeziehung der thermodynamische Temperaturänderungsgrad (Übertragungsgrad oder Rückwärmzahl) der Wärmerückgewinnung (**Bild 1**).

Dieser Änderungsgrad wird durch eine Exponentialgleichung wie folgt beschrieben:

$$\Phi_i = (1 - e^{-(\mu_i - 1) \cdot NTU_i}) / (1 - \mu_i \cdot e^{-(\mu_i - 1) \cdot NTU_i})$$

für $\mu < 1$

wobei:

μ_i = Wärmekapazitätenstromverhältnis der beiden Medien zum Beispiel $\mu_1 = W_1 / W_2$

NTU_i = Number of Transfer Units bezogen auf die einzelnen Ströme i

Sind beide Wärmekapazitätenströme gleich, also $W_1 = W_2$ und damit $\mu = 1$, wie dies beispielsweise bei einer Wärmerückgewinnung bei ausgeglichenen Luft-Massenströmen im Optimum der Fall ist, vereinfacht sich die Gegenstrombeziehung zu:

$$\Phi = NTU_i / (1 + NTU_i)$$

Die dimensionslose Kennzahl NTU errechnet sich dabei aus der Beziehung:

$$NTU_i = k \cdot A / \dot{W}_i$$

wobei:

k = Wärmedurchgangskoeffizient in $W/m^2/K$

A = wärmeübertragende Fläche in m^2

\dot{W}_i = Wärmekapazitätstrom in W/K des betreffenden Mediums

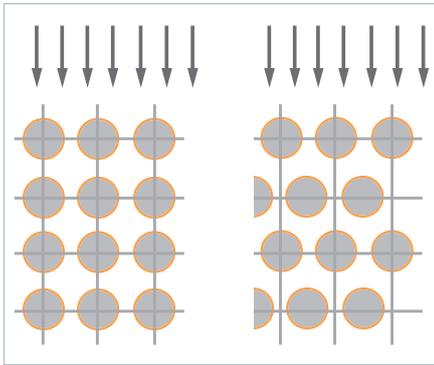


Bild 2

Fluchtende (l.) und versetzte (r.) Rohrordnung von berippten Wärmeübertragern mit vier Rohrreihen

\dot{m}_i = jeweiliger Massenstrom (zum Beispiel Zuluftstrom)

mit:

$$\dot{W}_i = \dot{m}_i \cdot c_p$$

mit:

\dot{m}_i = Massenstrom des Mediums in kg/s
 c_p = spezifische Wärmekapazität in kJ/kg/K

Die dimensionslose Kennzahl NTU beschreibt damit das Produkt aus der Güte der Wärmeübertragung, dem Wärmedurchgangskoeffizienten (k) und der wärmeübertragenden Fläche (A), bezogen auf den Wärmekapazitätenstrom (\dot{W}) des betrachteten Luftstroms.

Aus dieser Beziehung erkennt man, dass zur Erreichung eines hohen NTU entweder ein hoher Wärmedurchgangskoeffizient (k) oder/und eine große wärmeübertragende Fläche (A) notwendig sind, da der Wärmekapazitätenstrom durch den zu erwärmenden oder zu kühlenden Massenstrom vorgegeben ist und damit nicht verändert werden kann.

Je höher die k -Zahl ist, desto weniger Fläche wird im Wärmeübertrager benötigt, um die geforderten Änderungsgrade zu erreichen, und desto geringer ist prinzipiell der Druckverlust des Wärmeübertragers zur WRG.

Da die Luftseite der limitierende Faktor bei der Wärmeübertragung ist, muss die Luftseite besonders betrachtet werden. Auch spielt der luftseitige Druckabfall der

Wärmerückgewinnung eine wichtige Rolle, da die Druckverluste der WRG durch elektrische Energie auszugleichen sind und damit die Wirtschaftlichkeit der WRG wesentlich beeinflusst wird.

Um die Wärmeleistung, aber auch den Druckverlust zu beeinflussen, bestehen grundsätzlich zwei prinzipielle Möglichkeiten, die berippten Rohre anzuordnen. Neben der versetzten Anordnung können die Rohre auch fluchtend angeordnet werden (**Bild 2**).

Beide Anordnungsvarianten haben prinzipielle Vor- und Nachteile, die sich gegenseitig bedingen. Bei der fluchtenden Rohrordnung wird ein geringerer Druckverlust ermöglicht, als dies bei versetzter Rohrordnung gegeben ist. Dagegen ist der Wärmeübergang bei fluchtender Rohrordnung deutlich geringer als bei versetzter Rohrordnung.

Auf dem Prüfstand des Technikums Luzern wurden zwei Baumuster eines Kreislaufverbundsystems messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse der Messung ergeben sich aus **Tabelle 1**.

Es wird ersichtlich, dass die versetzte Rohrordnung eine signifikant größere Rückwärmzahl (RWZ) (Übertragungsgrad) erreicht. Die RWZ steigt bei dieser Rohrordnung im Vergleich zur fluchtenden Rohrordnung von 68 % auf 72 % bei identischen Abmessungen (24 Rohrreihen) beziehungsweise bei acht Rohrreihen von 42 % auf 48 %.

Wenn die Gegenstrombeziehung genutzt wird, um die RWZ in die dimensionslose Wärmeübertragerkennzahl NTU umzurechnen, so vergrößert sich diese um durchschnittlich +24 % von fluchtender zur versetzten Rohrordnung. Die spezifische Leistung steigt also um diesen Betrag bei versetzter Rohrordnung gegenüber der fluchtenden Anordnung.

Der Vorteil der fluchtenden Rohrordnung liegt allerdings im reduzierten Druckabfall. So liegt der gemessene Druckabfall im Durchschnitt um 39 % geringer als der Druckabfall der versetzten Rohrordnung. Aus diesem Grund wird in der Praxis häufig die fluchtende Rohrordnung gewählt. Der Nachteil der geringeren RWZ muss in diesem Fall allerdings in Kauf genommen werden.

Die Nachrechnung der messtechnisch ermittelten Werte nach VDI Wärmeatlas ¹⁾ ergibt eine auffallend gute Überein-

stimmung zwischen theoretischer Berechnung und Messung (**Tabelle 2**).

Die Abweichung zwischen der theoretischen Berechnung und der Messung liegt bei fluchtender Anordnung bei rund -1 % (-0,8 bis -1,2 Prozentpunkten), während bei versetzter Anordnung die Abweichung bei rund +1 % (0 bis 0,7 Prozentpunkten) liegt. Da die Messtoleranz der RWZ nach EN 308 ²⁾ drei Prozentpunkte beträgt, liegen die theoretischen Berechnungen somit im zulässigen Rahmen der gemessenen Werte.

Die Charakteristik der versetzten Rohrordnung kann allerdings sowohl im Hinblick auf den Druckabfall als auch im Hinblick auf die thermische Leistung verbessert werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeit moderat reduziert wird. **Tabelle 3** zeigt die Messung von zwei Kreislaufverbundsystemen bei 2,5 m/s und 2,2 m/s (untere Zeile). Weiterhin beruht die Verbesserung insbesondere im Hinblick auf die RWZ auf geänderten horizontalen und vertikalen Rohrabständen, die signifikant um 20 % horizontal und 31 % vertikal verringert wurden und auf einem kleineren Rohrdurchmesser.

Die RWZ steigt von 72 auf 75,5 % (+5 % Leistung). Gleichzeitig sinkt der Differenzdruck von 362 Pa auf 295 Pa (-18,5 %), obwohl die Rohrabstände vertikal deutlich um 20 % reduziert wurden. Allerdings wurde der Rohrdurchmesser ebenfalls um 20 % verringert.

Der prinzipielle Nachteil der versetzten Rohrordnung kann jedoch noch weiter reduziert werden, wenn ovale Rohre anstatt runder Rohre im Wärmeübertrager verwendet werden. Wegen der strömungsgünstigen Form eines Ovalrohres verlagert sich bei gleichen Strömungsbedingungen der Ablösepunkt stromabwärts (**Bild 3**). Das Wirbelgebiet hinter dem Ovalrohr ist daher erheblich kleiner als hinter einem Kreisrohr und der Strömungswiderstand ist entsprechend geringer.

Tabelle 4 zeigt die Messergebnisse, welche auf dem Prüfstand des TÜV Süd er-

1) VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage 1994: CA 13
 2) DIN EN 308, Juni 1997: Wärmeaustauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308:1997.

Rohr	Rohrform	Anordnung	Abstand Hub	Abstand RR	Lamelle	RR	LT	Δp	RWZ	$+\Delta p$	$+NTU$	$+RWZ$
%			%	%		Stck.	mm	Pa	%			
100	rund	fluchtend	100	100	glatt	24	2,5	221	68			
100	rund	fluchtend	100	100	glatt	8	2,5	74	42			
100	rund	versetzt	100	100	glatt	24	2,5	362	72	1,64	1,21	1,06
100	rund	versetzt	100	100	glatt	8	2,5	122	48	1,64	1,27	1,14

Tabelle 1

Messung von zwei Kreislaufverbundsystemen mit fluchtender und versetzter Rohranordnung bei 2,5 m/s

Rohr	Rohrform	Anordnung	Abstand Hub	Abstand RR	Lamelle	RR	LT	RWZ Mess.	VDI-WA RWZ Ber.	Abweichung
%			%	%		Stck.	mm	%	%	%-Punkte
100	rund	fluchtend	100	100	glatt	24	2,5	68	67,2	1,012 – 0,8
100	rund	fluchtend	100	100	glatt	8	2,5	42	40,8	1,029 – 1,2
100	rund	versetzt	100	100	glatt	24	2,5	72	72,7	0,990 0,7
100	rund	versetzt	100	100	glatt	8	2,5	48	48	1,000 0,0

Tabelle 2

Messung und Berechnung von zwei Kreislaufverbundsystemen mit fluchtender und versetzter Rohranordnung bei 2,5 m/s

Rohr	Rohrform	Anordnung	Abstand Hub	Abstand RR	Lamelle	RR	LT	Δp	RWZ	$+\Delta p$	$+NTU$	$+RWZ$
%			%	%		Stck.	mm	Pa	%			
100	rund	versetzt	100	100	glatt	24	2,5	362	72,0			
80	rund	versetzt	80	69	gewellt	24	2,5	295	75,5	0,81	1,20	1,05

Tabelle 3

Messung und Berechnung von zwei Kreislaufverbundsystemen mit versetzter Rohranordnung und verschiedenen Lamellenformen

Rohr	Rohrform	Anordnung	Abstand Hub	Abstand RR	Lamelle	RR	LT	Δp	RWZ	$+\Delta p$	$+RWZ$
%			%	%		Stck.	mm	Pa	%		
80	rund	versetzt	80	69	gewellt	24	2,5	295	75,5		
80	oval	versetzt	80	69	gewellt	24	2,5	169	73,1	0,57	0,97

Tabelle 4

Messung von zwei Kreislaufverbundsystemen mit versetzter Rohranordnung und verschiedenen Rohrformen (rund und oval)

mittelt wurden. Die RWZ liegt beim Ovalrohr bei 73,1 % und damit im Rahmen der Messtoleranz (drei Prozentpunkte) auf dem gleichen Niveau wie das Ergebnis des Rundrohres mit 75,5 %. Gleichzeitig wird der Druckverlust von 295 Pa auf 169 Pa (-42,7 %) erheblich reduziert.

Wird diese Messung ebenfalls mit der theoretischen Berechnung nach VDI-WA verglichen, so ergibt sich auch in diesem Fall eine gute Übereinstimmung. Die Abweichung der Berech-

nung zur Messung liegt bei 1,3 bis 2,2 Prozentpunkten (**Tabelle 5**).

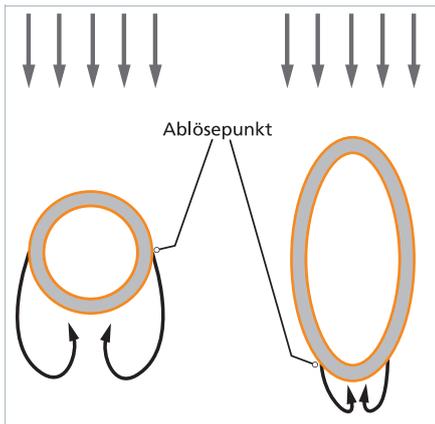
Ein weiterer großer Vorteil der ovalen Rohrform ist der etwas geringere Querschnitt gegenüber dem runden Rohr. Denn WRG-Systeme auf Basis des Kreislaufverbundsystems müssen systembedingt mit niedriger Umlaufmenge betrieben werden, da das Optimum der WRG bei einem Wärmestromkapazitätenverhältnis von 1 erreicht wird. Also muss das Produkt aus Wärmekapazität (cp) und

Massenstrom (m) des Luftstromes gleich sein dem Produkt aus Wärmekapazität und Massenstrom des Umlaufstromes. Da die beiden cp-Werte sich etwa um den Faktor 4 und die Dichten von Luft und Zwischenkreisstrom etwa um den Faktor 1,2 zu 1 000 unterscheiden, muss der Umlaufvolumenstrom etwa ein Viertausendstel des Luftmassenstromes betragen, um das Optimum der Wärmeübertragung sicherstellen zu können. Trotz der geringen Umlaufmenge muss die Me-

Rohr	Rohrform	Anordnung	Abstand Hub	Abstand RR	Lamelle	RR	LT	RWZ Mess.	VDI-WA RWZ Ber.	Abweichung	
%			%	%		Stck.	mm	%	%		%-Punkte
80	rund	versetzt	80	69	gewellt	24	2,5	75,5	76,8	0,986	1,3
80	oval	versetzt	80	69	gewellt	24	2,5	73,1	75,3	0,973	2,20

Tabelle 5

Vergleich Messung und Berechnung von zwei Kreislaufverbundsystemen mit versetzter Rohranordnung und verschiedenen Rohrformen (rund und oval)



Quelle: VDI Wärmetlas 2002 Lad 9

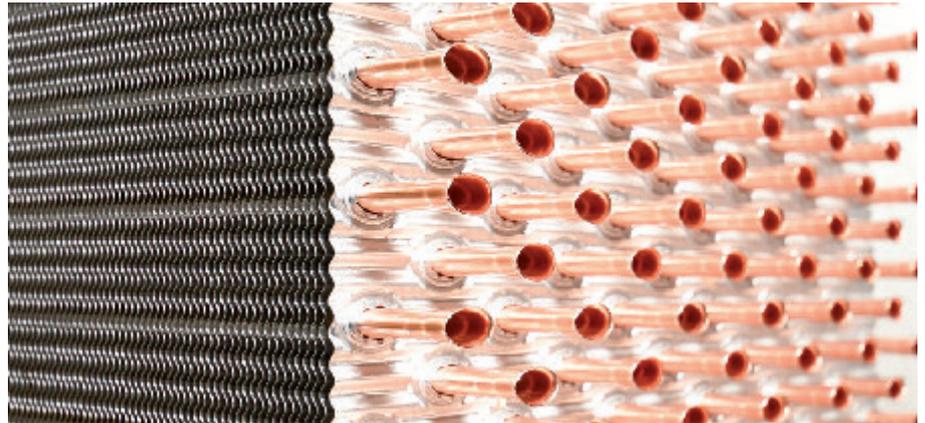


Bild 3

Links: Rundrohr mit Wirbelgebiet hinter dem Rohr, rechts: Ovalrohr mit deutlich geringerem Wirbelgebiet

Bild 4

Ovalrohrwärmeübertrager mit strukturierter Lamelle (+17 % Fläche)

diengeschwindigkeit im Rohr so hoch sein, dass eine turbulente Strömung erreicht wird. Dazu ist der kleinere Rohrquerschnitt des Ovalrohres sehr hilfreich. Zudem müssen spezielle Gegenstromverschaltungen benutzt werden, die den fast reinen Gegenstrom (Bild 1) sicherstellen.

Fazit

Als Ergebnis wird deutlich, dass die Rohranordnung, aber auch die Geometrie der Rohre und der Lamelle einen erheblichen Einfluss auf die thermische Leistung als auch auf den Druckabfall der Wärmerückgewinnung haben. Häufig wird die fluchtende Rohranordnung gewählt, um die Druckverluste zu reduzieren, jedoch reduziert sich damit zwingend die thermische Leistungsfähigkeit der WRG im Vergleich zur versetzten Rohranordnung deutlich.

Der Nachteil der höheren Druckverluste bei Verwendung der thermisch optimalen versetzten Rohranordnung kann durch die Nutzung von Ovalrohren mehr

als kompensiert werden. Gleichzeitig kann durch die Verwendung von speziell strukturierten Lamellen (quer zur Luftichtung gewellt) die thermische Leistungsfähigkeit noch weiter gesteigert werden, ohne den Druckverlust zu erhöhen (Bild 4).

An den Messungen wird deutlich, dass die RWZ von 68 % (fluchtende Anordnung) auf 73 % (versetzte Anordnung) gesteigert werden konnte. Gleichzeitig wurde der Druckabfall von 221 Pa auf 169 Pa (-23,5 %) reduziert. Zusätzlich wurde der Wärmeübertrager in der Bautiefe um 31 % kürzer und damit kompakter, wobei die Strömungsgeschwindigkeit um 12 % reduziert wurde. Selbst bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit (2,2 m/s) hätte die WRG mit fluchtender Anordnung zwar auch nur einen Druckabfall von 173 Pa (+2,4 %) und damit eine ähnliche Größenordnung wie die Variante mit ovalen Rohren, allerdings würde gleichzeitig die RWZ nur um 1 Prozentpunkt von

68 % auf 69 % steigen. Das sind rund 5 Prozentpunkte weniger als mit strukturierter Lamelle in versetzter Anordnung und mit Ovalrohr.

Das Rundrohr in versetzter Anordnung erreicht eine Leistungsziffer von 15,2. Dies bedeutet, dass unter Bedingungen der EN 308 zur Übertragung der thermischen Leistung von 1 kW eine elektrische Leistung von 1/15,2, also 66 W notwendig ist. Mit dem Ovalrohr wird eine Leistungsziffer von 24,3 erreicht. Dies heißt: Für die Übertragung der gleichen thermischen Leistung werden nur noch 1/24,3, also 41 Watt elektrische Leistung benötigt.

Leider gibt es in der Praxis allzu häufig grob fehlerhafte Auslegungen mit fluchtender Anordnung, die die thermische Leistung offensichtlich mit der versetzten Anordnung gleichsetzen und damit zu hohe Wirkungsgrade ausweisen, aber den niedrigen Wert des Druckverlustes der fluchtenden Anordnung gerne angeben.