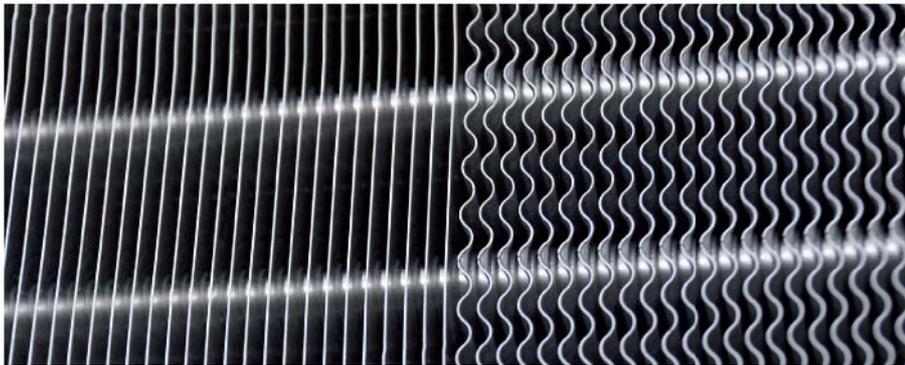


## Teil 2: Messtechnische Validierung, Verringerung des elektrischen Aufwands und messtechnische Untersuchung



**Bild 1**

Anströmseite eines Wärmeübertragers mit glatter Lamelle (l., Stand der Technik) gegenüber der strukturierten Lamelle (r.)

In diesem zweiten Teil des in Heft Nr. 7-8 begonnenen Artikels werden die umfangreichen Messreihen beschrieben, die der TÜV Süd nach EN 308 an Wärmeübertragern mit der innovativen strukturierten Lamelle durchgeführt hat. Die Ergebnisse belegen eindrucksvoll, dass bei der Verwendung von quer zur Luftströmung strukturierten Lamellen und dem Einsatz von Ovalrohren statt Rundrohren in Wärmeübertragern höhere spezifische Leistungen gewonnen werden können. Es ergeben sich signifikante Einsparungen beim Elektroenergieeinsatz.

Nach den zuvor beschriebenen Leistungsmessungen erfolgte die Herstellung der neu strukturierten Lamelle und es konnte eine tatsächliche Flächenvergrößerung von +17 % realisiert werden (**Bild 1**).

### Messtechnische Validierung

Diese Wärmeübertrager wurden in einem Kreislaufverbundsystem messtechnisch nach EN 308 durch den TÜV Süd untersucht. Dabei wurde sowohl die Luftmenge mittels Einlaufmessdüsen als auch die Wassermenge mit einem magnetisch induktiven Durchflussmesser im Wärmeübertrager erfasst.

Die Medientemperaturen wurden auf den Luftertrittsseiten und auf den Luftaustrittsseiten ermittelt. Auf der Wasserseite wurden der Eintritt und der Austritt jeweils aufgenommen und parallel dazu die Druckverluste sowohl auf der Luftseite als auch auf der Wasserseite gemessen. Eine Vergleichsmessung vom Technikum Luzern liegt aus 1998 vor, die an baugleichen Baumustern mit glatter, konventioneller Lamelle ermittelt wurde (**Tabelle 1**).

Bei den Messungen stellte sich heraus, dass der luftseitige Druckabfall entgegen den CFD-Simulationen nicht stieg, sondern durchschnittlich um rund 14 % geringer ausfiel. Dabei wurde die vorausberechnete Druckverluststeigerung von rund +28 % deutlich unter-

schritten. Die Wärmeleistung bezogen auf NTU ( $k \cdot A / \dot{W}_i$ ) stieg um durchschnittlich +26 % gegenüber den prognostizierten +29 %. Hier lieferte die CFD-Simulation ein relativ gut übereinstimmendes Ergebnis.

### Möglichkeiten zur Verringerung des elektrischen Aufwandes

Um den elektrischen Aufwand durch die Druckverluste weiter zu reduzieren, wurde der Einsatz von Ovalrohren untersucht. Auch hierzu wurden wiederum durch den TÜV Süd CFD-Simulationen an entsprechenden Modellen durchgeführt.

Bei den zu untersuchenden Geometrien wurde eine veränderte Rohrgeometrie untersucht. Beide Varianten wurden bereits mit der strukturierten

und längs zur Luftströmung gewellten Lamelle berechnet. Der Unterschied beider Varianten lag lediglich in der Rohrform, während alle anderen Geometriedaten (Rohrabstände, Lamellenabstände etc.) identisch waren.

So wurde die Variante Rundrohr mit dem Rohrdurchmesser von 12 mm mit einem Ovalrohr mit einem identischen Rohrumfang (39 mm) verglichen.

Aus **Bild 2** wird ersichtlich, dass die Wärmeleistung des Rundrohrwärmeübertragers in der Simulation nahezu identisch mit der des Ovalrohrwärmeübertragers ist.

Der ebenfalls als Kühler gerechnete Wärmeübertrager erreichte mit Rundrohrgeometrie eine Austrittstemperatur von 13,6 °C, während der mit Ovalrohrgeometrie 13,1 °C erreichte.

Berechnet man analog die Temperaturübertragungsgrade, so ergeben sich folgende Werte für die Rundrohrgeometrie ( $\varnothing_R$ ):

$$\varnothing_R = (24,7 - 13,6) / (24,7 - 6,0) = 0,594$$

Der Änderungsgrad der Ovalrohrgeometrie ( $\varnothing_O$ ) betrug:

$$\varnothing_O = (24,7 - 13,1) / (24,7 - 6,0) = 0,620$$

Aus dem Temperaturänderungsgrad ergibt sich ein NTU-Zuwachs der Ovalrohrgeometrie von etwa 11 % gegenüber der Rundrohrgeometrie.

Gleichzeitig konnte eine Reduzierung des Druckabfalls von 50 % berechnet werden (**Bild 3**). Die Druckverluste sanken von 62,6 Pa (Rundrohr) auf 33,8 Pa

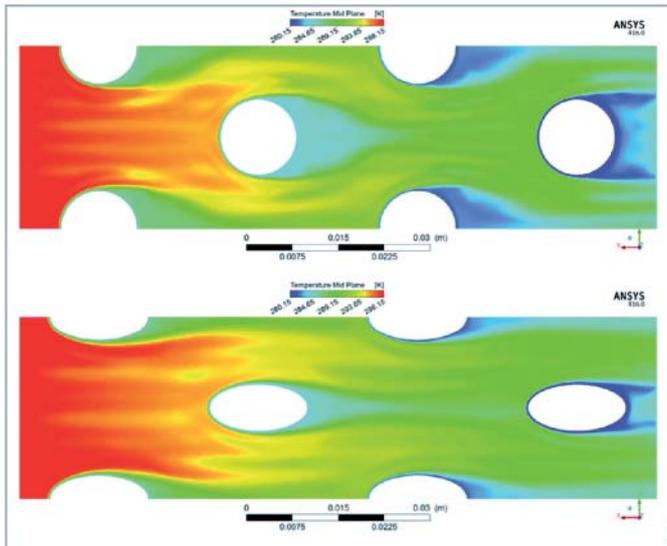
(Ovalrohr). Um die Anlaufstrecken bei tieferen Wärmeübertragern (> vier Rohrreihen) nicht zu hoch zu bewerten, wurde der hintere Teil der Lamelle (die letzten beiden Rohrreihen) separat betrachtet. Hier wurde ein Differenzdruck von 29,2 Pa (Rundrohr) zu 15 Pa (Ovalrohr) berechnet.

**Tabelle 1**

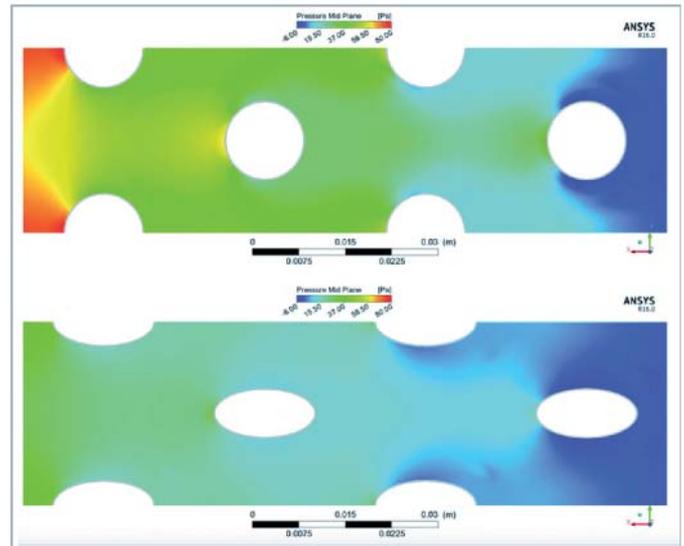
Vergleich einer konventionellen Lamelle gegenüber der strukturierten Lamelle

Messung HTL Luzern 1998				Messung TÜV Süd 2012 				
w m/sec	$\Phi$	$\Delta p$ Pa	NTU „konv.“	$\Phi$	$\Delta p$ Pa	NTU „Struktur“	NTU Faktor	Faktor $\Delta p$
1,5	0,77	166	3,348	0,80	140	3,967	1,18	0,84
2,5	0,72	364	2,571	0,77	313	3,420	1,33	0,86
3,5	0,70	619	2,333	0,75	543	2,980	1,28	0,88
konventionelle Lamelle* LA 2,5 mm				strukturierte Lamelle* umgerechnet auf LA 2,5 mm				

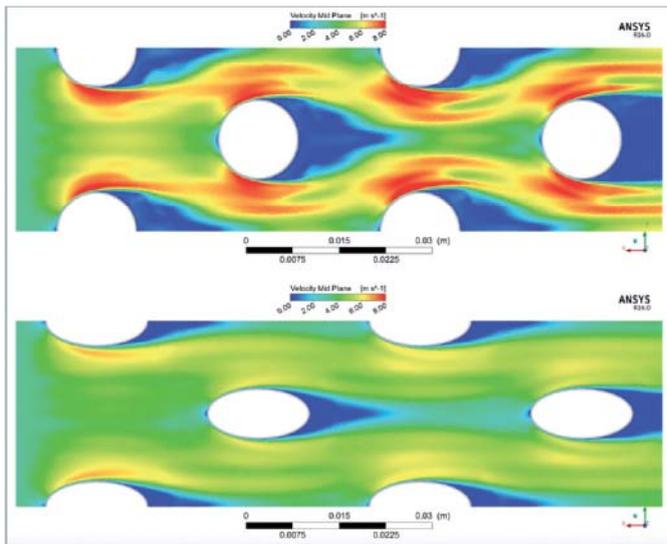
\* Systeme geometrisch baugleich (Rohrreihen, Rohrabstände, Lamellendicke etc. identisch) Messungen nach EN 308



**Bild 2**  
Lufttemperaturprofile Rundrohrgeometrie (oben) im Vergleich zur Ovalrohrgeometrie



**Bild 3**  
Druckverläufe Rundrohrgeometrie (oben) im Vergleich zur Ovalrohrgeometrie



**Bild 4**  
Geschwindigkeitsprofile Rundrohrgeometrie (oben) im Vergleich zur Ovalrohrgeometrie

Diese Reduktion des Druckabfalls kann durch die deutlich geringeren Geschwindigkeitsspitzen erklärt werden (**Bild 4**).

Der Differenzdruck ändert sich bei Rippenrohrwärmeübertragern mit dem experimentell ermittelten Exponenten von 1,6 bis 1,7 zur Luftgeschwindigkeit.

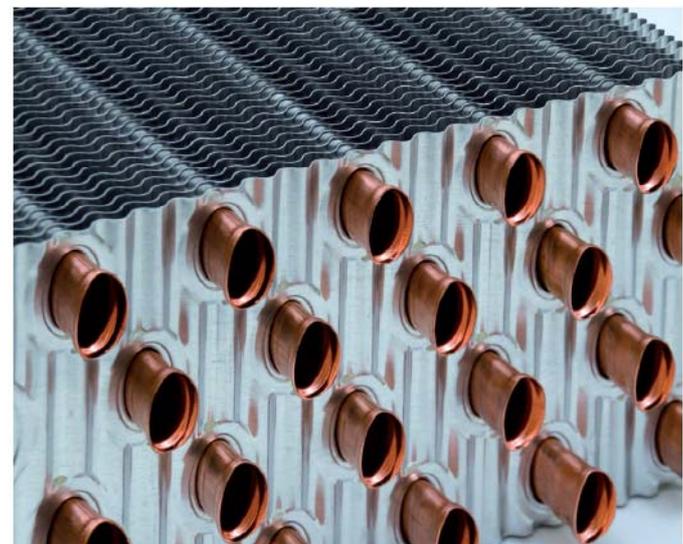
Anhand der Bilder 2 und 4 lässt sich sehr gut erkennen, dass durch den Einsatz des Ovalrohrs die „Strömungstot-Gebiete“ hinter den Rohrdurchführungen deutlich geringer ausgeprägt sind als bei der Verwendung des Rundrohrs. Dadurch wird der Effekt der geringeren Turbulenz beim Ovalrohr offensichtlich mehr als aufgewogen.

### Messtechnische Untersuchung

Nach der Herstellung von sonst baugleichen Wärmeübertragern mit Rund- und Ovalrohrgeometrie (**Bild 5**) konnten diese ebenfalls auf dem Prüfstand des TÜV Süd nach EN 308 messtechnisch untersucht werden. Bei den Systemen handelte es sich um Kreislaufverbundsysteme mit ansonsten identischen Geometrien (gleiche Anzahl der Rohrreihen, Lamellenabstände, Rohrabstände etc.).

Dabei ergaben sich folgende Messwerte (**Bild 6**). Der Temperaturübertragungsgrad des Systems lag bei 0,752 (Rundrohrgeometrie 12 mm) zu 0,731 (Ovalrohrgeometrie 12 mm).

Aufgrund der Herstellungsmöglichkeiten wurde auch ein System mit einer Ovalrohrgeometrie mit einem äquivalenten Umfang eines 15 mm Rundroh-

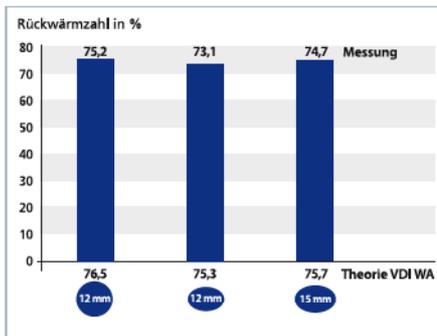


**Bild 5**  
Ovalrohrwärmeübertrager mit strukturierter (quer zur Luftrichtung gewellter) Lamelle

res gemessen. Der Übertragungsgrad lag hier bei 0,747.

Die theoretisch berechneten Temperaturübertragungsgrade der Systeme lagen um etwa 1,0 bis 1,8 %-Punkte höher als die Messwerte nach EN 308. Aus den berechneten und messtechnisch ermittelten Temperaturübertragungsgraden ergibt sich bei der Ovalrohrgeometrie eine Verschlechterung von 1,2 %-Punkten (berechneter Wert) zu 1,9 %-Punkten (gemessener Wert), wobei die Differenz im Rahmen der Messunsicherheit der EN 308 liegt.

Ließe man diese Unsicherheit außer Betracht, ergäbe sich ein NTU-Unterschied ( $k \cdot A$ ) von -10,3 %. Aus den



**Bild 6**  
Vergleichende Messung des Temperaturübertragungsgrades durch den TÜV Süd

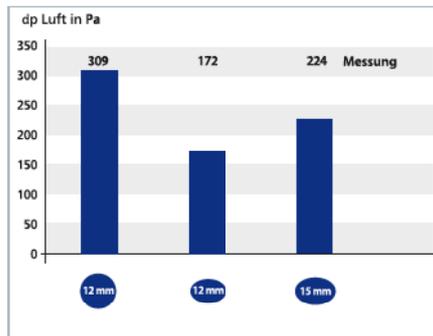
theoretisch berechneten Temperaturübertragungsgraden ergibt sich eine Reduktion von -6,8 %.

Die reduzierte Wärmeleistung lässt sich durch die niedrigeren mittleren Luftgeschwindigkeiten erklären. Die Wärmeübertragungsleistung ändert sich mit dem Exponenten von etwa 0,2 bis 0,4 zur Luftgeschwindigkeit.

Die Messungen der luftseitigen Differenzdrücke ergaben eine Reduzierung von 309 Pa der Rundrohrgeometrie zu 172 Pa (-44 %) gegenüber der vergleichbaren Ovalrohrgeometrie. Eine Variante mit größerer Ovalrohrgeometrie (~15 mm) lag bei 224 Pa (**Bild 7**).

Selbst wenn man die etwas geringere spezifische Wärmeleistung (NTU -10,3 %) berücksichtigen würde, indem man den Ovalrohrwärmeübertrager um +10,3 % in der Bautiefe vergrößerte, wären die Wärmeleistungen (Temperaturübertragungsgrade) völlig identisch zum Rundrohrwärmeübertrager und der Differenzdruck würde proportional um +10,3 % steigen. Damit läge die Differenzdruckeinsparung immer noch bei netto -40 %. Somit konnte die Messung die CFD-Simulation sehr gut bestätigen, wobei auffallend ist, dass bei der CFD-Berechnung die Ovalrohrgeometrie eine höhere Leistung hat, während sowohl die Messung als auch in der VDI-WA-Berechnung tendenziell das Gegenteil ergaben. Letztendlich sind die Messergebnisse im Rahmen der Messtoleranz gleich.

Gleichzeitig wurden auch die Wasserglykol-seitigen Mediendruckverluste im Wärmeübertrager ermittelt (**Bild 8**). Der vergleichbare Ovalrohrwärmeübertrager liegt rund +11 % höher als der Rundrohrwärmeübertrager. Dies ist



**Bild 7**  
Vergleichende Messung des luftseitigen Druckabfalls durch den TÜV Süd

durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit im Rohr von +9 % zu erklären, die sich aufgrund der geänderten Verschaltung der Rohre ergab, da nur ganzzahlige Medienwege herstellbar sind und damit eine identische Mediengeschwindigkeit kaum zu realisieren ist.

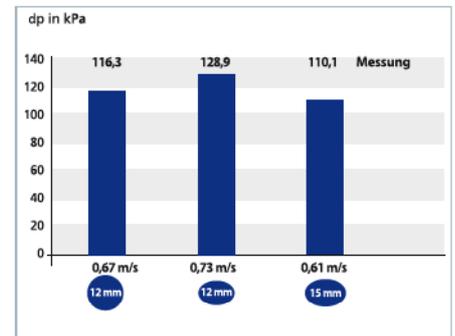
Im energetischen Vergleich ergaben sich abschließend folgende COP-Werte (**Bild 9**).

Die Leistungszahl der Rundrohrgeometrie lag bei 15,2. Dies bedeutet, dass bei Bedingungen nach EN 308 (25 °C Abluft- und 5 °C Außenlufttemperatur) mit 1 kW Stromeinsatz eine Wärmeleistung von 15,2 kW zurückgewonnen werden kann.

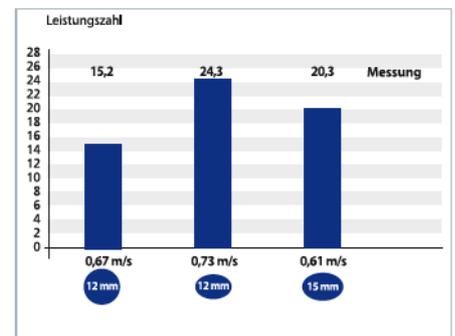
Die Leistungszahl verbesserte sich bei der äquivalenten Ovalrohrgeometrie (~12 mm) auf 24,3. Damit kann bei einem identischen Strom- und Materialeinsatz statt 15,2 kW eine Wärmeleistung von 24,3 kW gewonnen werden beziehungsweise die gleiche Leistung wird mit einem etwa 38 % geringeren elektrischen Aufwand erreicht.

### Fazit

Bei der Verwendung von quer zur Luftströmung strukturierten Lamellen kann die Leistung eines berippten Wärmeübertragers gesteigert werden. Bei gleicher Leistung könnte der Wärmeübertrager mit einem Bauvolumen von nur 79 % seines ursprünglichen Volumens hergestellt werden. Als Ergebnis hätte dieser Wärmeübertrager dann einen geringeren Druckverlust, da der Wärmeübertrager in seiner Baulänge bei gleichem Querschnitt um etwa 20 % kleiner hergestellt werden kann. Alternativ könnte aus einem Wärmeübertrager unter Verwendung der neuen Lamelle



**Bild 8**  
Vergleichende Messung des medienseitigen Druckabfalls durch den TÜV Süd



**Bild 9**  
Vergleich der COP's basierend auf den Messungen durch den TÜV Süd

eine um rund 27 % höhere spezifische Leistung gewonnen werden. Werden zusätzlich statt Rundrohren ovale Rohre zur weiteren Druckverlustminimierung eingesetzt, können die Druckverluste des Wärmeübertragers um weitere 40 bis 45 % reduziert werden.

Insgesamt trägt die Innovation dazu bei, dass nicht nur mehr Wärmeleistung zurückgewonnen werden kann, sondern dass diese Wärmeleistung auch mit wesentlich reduzierten Elektroenergiebedarfen zur Verfügung steht.

Damit kann die Effizienz der WRG deutlich verbessert werden oder es können bei schlechten Platzverhältnissen auch mit kleinen Abmessungen noch sehr effiziente Systeme hergestellt werden. Kreislaufverbundsysteme mit einem trockenen Übertragungsgrad von bis zu 0,8 bei einem Druckabfall von etwa 150 Pa sind bei Strömungsgeschwindigkeiten von rund 2 m/s realistisch.

Da bei diesen Systemen auch der Materialaufwand nicht erhöht wird, verbessert sich die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung ebenfalls signifikant.