

# Strukturen in additiv gefertigten Wärmeübertragern

## Parameterbasierte Generierung und messtechnische Charakterisierung innerer Gitterstrukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs

Robin Kahlfeld<sup>1\*</sup>, Jasper Lachmayer<sup>1</sup>, Niklas Thies<sup>1</sup>, Stephan Kabelac<sup>1</sup>,  
Ina Meyer<sup>2</sup>, Cameron Meßmann<sup>2</sup>, Tobias Ehlers<sup>2</sup>, Roland Lachmayer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland

[kahlfeld@ift.uni-hannover.de](mailto:kahlfeld@ift.uni-hannover.de)  
[jasper.lachmayer@stud.uni-hannover.de](mailto:jasper.lachmayer@stud.uni-hannover.de)  
[niklas.thies@stud.uni-hannover.de](mailto:niklas.thies@stud.uni-hannover.de)  
[kabelac@ift.uni-hannover.de](mailto:kabelac@ift.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland

[meyer@ipeg.uni-hannover.de](mailto:meyer@ipeg.uni-hannover.de)  
[c.messmann@stud.uni-hannover.de](mailto:c.messmann@stud.uni-hannover.de)  
[ehlers@ipeg.uni-hannover.de](mailto:ehlers@ipeg.uni-hannover.de)  
[lachmayer@ipeg.uni-hannover.de](mailto:lachmayer@ipeg.uni-hannover.de)

\* Korrespondenzautor

### Kurzfassung

Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) ermöglicht als additives Fertigungsverfahren neuartige, hocheffiziente Wärmeübertrager mit komplexen inneren Strukturen. Ein Ansatz zur Steigerung der volumetrischen thermischen Leistungsdichte sind dabei Lattice Structures, Gitterstrukturen aus periodischen Einheitszellen. Zur thermofluidynamischen Optimierung kann eine Vielzahl von Parametern angepasst werden. Dies erfordert eine grundlegende Untersuchung der Auswirkung der Parametervariationen. Die Generierung solcher Strukturen erfolgt über eine skriptbasierte Konstruktionsumgebung. Im folgenden Beitrag werden drei unterschiedlich ausgerichtete Diamond-Lattice-Structures generiert und messtechnisch charakterisiert. Der Algorithmus zur Generierung wird beschrieben. Die Strukturen unterscheiden sich bezüglich Anordnung und Ausrichtung. Sie sind auf der Gas-Seite eines kompakten, mittels PBF-LB/M gefertigten, Gaskühlers verortet. Wärmeübergang und Druckverlust werden für Leerrohr-Eintritts-Reynolds-Zahlen von 700 bis 9000 vermessen und untereinander sowie mit einem konventionellen, geometrisch ähnlichen Referenz-Rohrbündel verglichen. Die effizienteste Struktur hat gegenüber den beiden anderen um 54 % bzw. 59 % niedrigere mittlere Druckverluste, wobei die Wärmeströme jedoch im Mittel nur um 23 % bzw. 18 % abnehmen. Dies zeigt, dass über Parametervariationen eine deutliche Effizienzsteigerung, also Steigerung des übertragenen Wärmestroms bezogen auf den einhergehenden Druckverlust, möglich ist. Der Rohrbündelwärmeübertrager weist eine durchgehend niedrigere volumetrische Leistungsdichte auf, wobei die auftretenden Druckverluste jedoch ebenfalls geringer ausfallen.

### Stichwörter:

Wärmeübertrager, Gitterstrukturen, Additive Fertigung, Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M)

**DKV - Peer Review**

Eingegangen am 30.08.2023  
Geprüft am 25.09.2023  
Angenommen am 25.09.2023

Von Experten aus Forschung und Industrie

## 1 Einleitung

Die konventionelle Fertigung von Wärmeübertragern ist durch verfügbare Halbzeuge und Fertigungsverfahren häufig auf einfache Apparategeometrien begrenzt. Durch verschiedene Verfahren, etwa Löten, Schweißen oder Verschrauben, werden häufig Rohren oder (geprägten) Platten zu einem Gesamtapparat zusammengefügt [1]. Die additive Fertigung bietet hier deutlich mehr Gestaltungsfreiheitsgrade und ermöglicht so andersartige, neue Apparatkonzepte und die Erstellung des Wärmeübertragers weitestgehend ohne weiteres Fügen und Nacharbeiten. Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) hat sich mittlerweile so weit entwickelt, dass diese auch zur industriellen Fertigung eingesetzt werden kann. Bei diesem Verfahren können komplexe Geometrien durch das schichtweise Auftragen und anschließende Aufschmelzen von Metallpulver erstellt werden. Eine Vielzahl von verschiedenen metallischen Werkstoffen kann dabei verarbeitet werden, unter anderem Stahlsorten wie 1.4404 und 1.2709 oder verschiedene Nickel-, Aluminium- und Titanlegierungen. Festigkeit und Porenfreiheit entsprechen dabei konventionell verarbeiteten Materialien. [2, 3] Durch Nutzung dieses Verfahrens wird für Wärmeübertrager neben neuen Kanalgometrien und Strömungsführungen, wie von Scheithauer et al. in [4] beschrieben, auch der Einsatz komplexer (innerer) Strukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs möglich, welche direkt Teil des gefertigten Wärmeübertragers sind. Der Einsatz solcher additiv gefertigten Strukturen könnten in der Klima- und Kältetechnik sowohl in den Wärmeübertragern von Kaltgasprozessen als auch auf der Gasseite von luftbeschickten Verdampfern und Kondensatoren eingesetzt werden. Durch weitere Untersuchungen und zielgerichtete Optimierung könnten die Strukturen perspektivisch auch zur Verbesserung des zweiphasigen Wärmeübergangs in Verdampfern und Kondensatoren verwendet werden. Solche Strukturen können verschiedene Formen haben und bestehen häufig aus Gitterstrukturen (Lattice Structure), die aus Einheitszellen aufgebaut sind [5–7] oder über Oberflächenfunktionen definierte TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) [7, 8].

Lattice Structures bieten dabei einen sehr großen Raum an Parametervariationen für die Strukturoptimierung. Die Form, Größe, Balkendicke und Anordnung der Einheitszelle können variiert werden. Ferner können über den Verlauf des Gitters Gradienten vorgesehen werden. In den Untersuchungen von Koneri et al. [7] und Ho et al. [5, 6] war in simulativen wie auch messtechnischen Untersuchungen erkennbar, dass eine Variation der Einheitszelle wie auch der Größe der Einheitszelle einen signifikanten Einfluss auf die Druckverlustcharakteristik der Struktur hat. Die Steigerung des Druckverlustes fällt dabei höher aus als die des Wärmeübergangs.

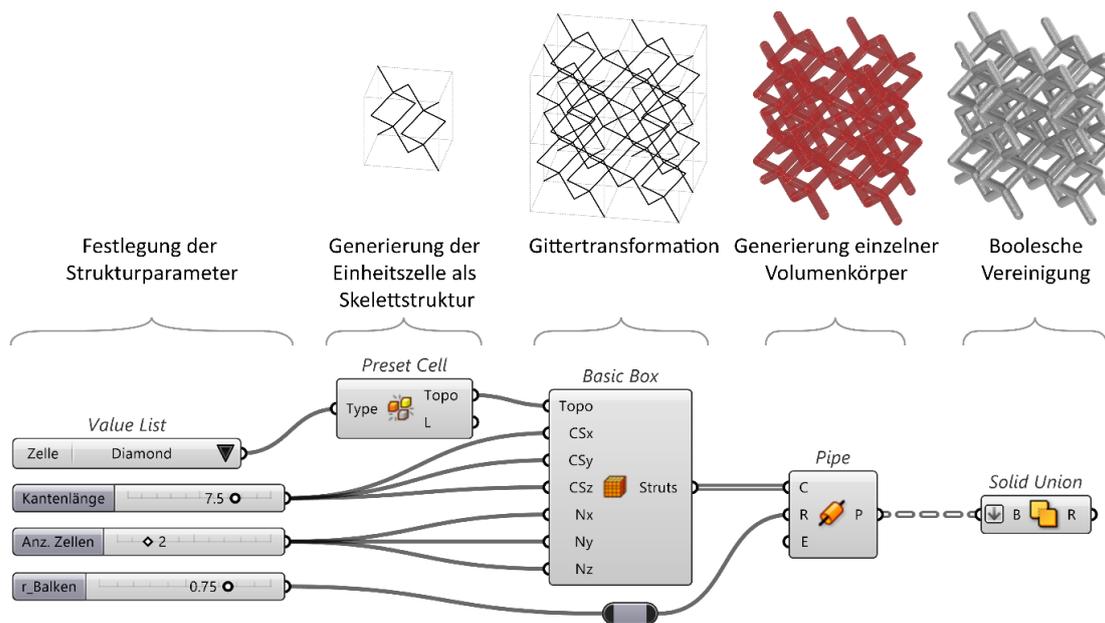
Ziel dieses Beitrags ist es, die Möglichkeiten und das Potential solcher Lattice Structures zur Verbesserung des gaseitigen Wärmeübergangs in einem Wärmeübertrager mit Fokus auf Parametervariationen in der Zellenausrichtung an einer Beispielstruktur darzustellen. Da eine effiziente Generierung und Parametervariation solcher Strukturen in konventionellen CAD-Anwendungen nur begrenzt möglich ist [9], wird zuerst der Arbeitsablauf bei der Strukturerstellung mittels skriptbasierter Konstruktion über Verwendung der Software *Rhino*<sup>®7</sup> mit der Erweiterung *Grashopper*<sup>®</sup> beschrieben. Generiert werden dabei drei unterschiedliche Strukturen aus Diamond-Lattice-Einheitszellen. Der variierte Parameter ist hierbei die Ausrichtung der Zelle im Koordinatensystem und in Strömungsrichtung. Die generierten Strukturen werden anschließend im Innenrohr eines Doppelrohr-Basiselement-Wärmeübertragers platziert und mittels des PBF-LB/M-Verfahrens additiv gefertigt. Die drei gedruckten Wärmeübertrager werden anschließend in einem Versuchsstand bezüglich ihrer Wärmeübertragungs- und Druckverlustcharakteristik messtechnisch untersucht. Dabei wird heiße Luft durch den strukturgefüllten Innenkanal des Basiselement-Wärmeübertragers geleitet und durch im Mantelraum strömendes Wasser abgekühlt. Zum Vergleichen der Ergebnisse mit konventionell gefertigten Wärmeübertragern wird ein geometrisch ähnlicher Abgaskühler, bei dem es sich um einen Rohrbündel-Wärmeübertrager handelt, unter selben Betriebsbedingungen vermessen. Wärmeübertragungs- und Druckverlustcharakteristik der Strukturen untereinander sowie der Basiselement-Wärmeübertrager und des Referenz-Wärmeübertragers werden gegenübergestellt. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Auswirkung der Parametervariation der Strukturen. Anschließend werden die Ergebnisse in einer Schlussfolgerung bewertet und zusammengefasst.

## 2 Strukturgenerierung und additive Fertigung der Wärmeübertrager

Im folgenden Abschnitt werden der Prozess zur parameterbasierten Generierung der Strukturen und die daraus resultierende Strukturen beschrieben. Anschließend wird der Basiselement-Wärmeübertrager vorgestellt, in welchem die erzeugten Strukturen per CAD integriert werden. Drei dieser Wärmeübertrager mit unterschiedlichen Strukturen werden anschließend im PBF-LB/M Verfahren gefertigt. Weiterhin wird der konventionell gefertigte Referenz-Wärmeübertrager beschrieben.

## 2.1 Strukturgenerierung

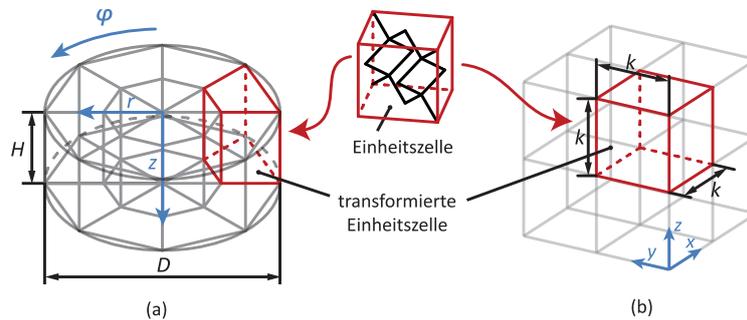
Während das PBF-LB/M die Fertigung komplett neuartiger und innovativer Strukturen ermöglicht, sind die Werkzeuge in konventionellen CAD-Umgebungen überwiegend auf ebenso konventionelle Fertigungsverfahren ausgelegt und stoßen bei der Erstellung komplexer Strukturen an ihre Grenzen [9]. Sie schöpfen das vorhandene Potential der additiven Fertigung nicht aus. Das *Algorithms-Aided-Design* stellt einen alternativen Lösungsansatz dar [10]. Ein hierfür geeignetes Werkzeug ist die CAD-Software *Rhino*® 7 mit integrierter visueller *Grasshopper*® Programmierumgebung. In dieser Benutzeroberfläche werden Algorithmen erzeugt, die sich zur automatisierten Generierung von Lattice Structures eignen. Eine umfangreiche Bibliothek an *Plugins* von Drittanbietern erweitert den anwendungsspezifischen Funktionsumfang. Für den vorliegenden Anwendungsfall soll ein geschlossener BRep (*Boundary Representation*) Volumenkörper erzeugt werden. Dieser stellt die Grundlage für einen Export als universelles STEP-Austauschformat dar und ermöglicht somit eine Weiterverarbeitung in externer Software. Es wird ein algorithmischer Ablauf zur Generierung der Gitterstruktur auf Basis des Plugins *IntraLattice* [11] erstellt, welcher exemplarisch in Bild 1 dargestellt ist. Dieser ermöglicht sowohl die Erzeugung als auch Anordnung von vor- oder selbstdefinierten Einheitszellen in verschiedenen Koordinatensystemen. Eine Auswahl vorgefertigter Einheitszellen ist bereits integriert. Der Algorithmus erzeugt nach Eingabe der Parameter zunächst eine einzelne Einheitszelle als dreidimensionales Skelett aus Linien und Knoten, transformiert diese in ein periodisches Gitter und bildet damit das Grundgerüst für die zu erzeugenden Balken. Jede Linie der Skelettstruktur fungiert in diesem Fall als Mittelachse für einen Zylinder, welcher einen einzelnen Balken darstellt. Um eine nahtlose Verbindung der Balken an den Knotenpunkten zu gewährleisten, werden diese an ihren Enden mit halbkugelförmigen Abschlüssen versehen. Hieraus resultieren einzelne kapselförmige, geschlossene Volumenkörper. Da die additive Fertigung einen einzelnen monolithischen Volumenkörper voraussetzt, wird im Anschluss eine Verschmelzung aller resultierenden Balken mittels Boolescher Vereinigung durchgeführt.



**Bild 1:** Algorithmischer Ablauf zur Generierung einer Gitterstruktur am Beispiel einer Diamond-Struktur

Der gassseitig durchströmte zylindrische Kanal im Zentrum des Basiselement-Wärmeübertragers gibt den mit den Zellen auszufüllenden Designraum vor. Auf Basis des zuvor entwickelten Ablaufs wird eine Diamond-Struktur-Einheitszelle in eine kartesische und eine zylindrisch angeordnete Gitterstruktur transformiert (siehe Bild 2). Im Gegensatz zu den kartesisch angeordneten Zellen mit gleicher 7,5 mm Kantenlänge in allen Raumrichtungen variiert diese im zylindrischen Gitter in Richtung des Azimutwinkels  $\varphi$ , was zu unterschiedlich gestauchten Zellenmorphologien in Abhängigkeit vom Abstand zur Mittelachse des Designraumes führt. Die zylindrischen Gitterparameter werden daher als Anzahl der Unterteilungen in der jeweiligen Koordinatenrichtung angegeben. Während klassisch kubische, aus der Kristallographie bekannte Einheitszellen wie kfz- und krz-Gitter eine klare Rotationssymmetrie zu allen drei Hauptachsen aufweisen, trifft dies nicht auf die gewählte Diamond-Struktur zu. Die spezifische räumliche Anordnung und Rotation der Einheitszelle kann jedoch die Durchströmungseigen-

schaften der Gitterstruktur beeinflussen, was sich wiederum auf die Effizienz des Wärmeübertragers auswirkt. Um potenzielle Effekte dieser räumlichen Variation zu berücksichtigen, wird deshalb zusätzlich eine Rotation der kartesisch angeordneten Einheitszelle um  $90^\circ$  orthogonal zur Zylinderachse der Strukturscheibe generiert.

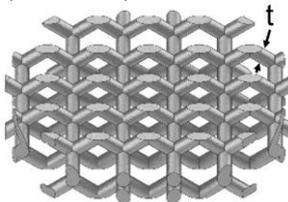
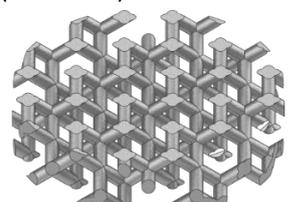
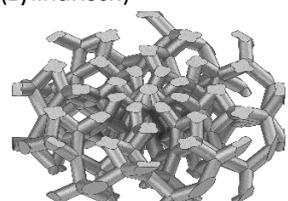


**Bild 2:** Gittertransformation der Einheitszellen: (a) zylindrisch (b) kartesisch

Zur einfacheren Weiterverarbeitung in externer CAD-Software und insbesondere zur Reduktion des benötigten Rechenaufwands bei der anschließenden Booleschen Vereinigung wird daher pro Strukturvariation jeweils eine Scheibe der Höhe einer Einzelzelle mit einem Durchmesser von 30 mm generiert und exportiert. Aufgrund der Periodizität der Struktur lässt sich diese durch anschließende lineare Anordnung in Richtung der Mittelachse nachträglich zur benötigten Länge zusammenfügen.

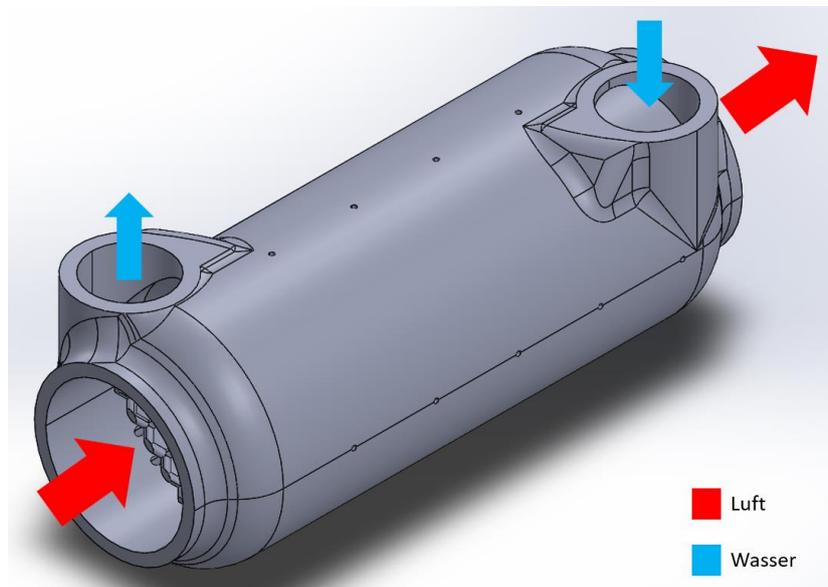
Die 3 finalen, bereits zugeschnittenen drei Strukturscheiben sind zusammen mit ihren jeweiligen Eingabeparametern in Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1:** Eingabeparameter und isometrische Darstellung der generierten Strukturvariationen

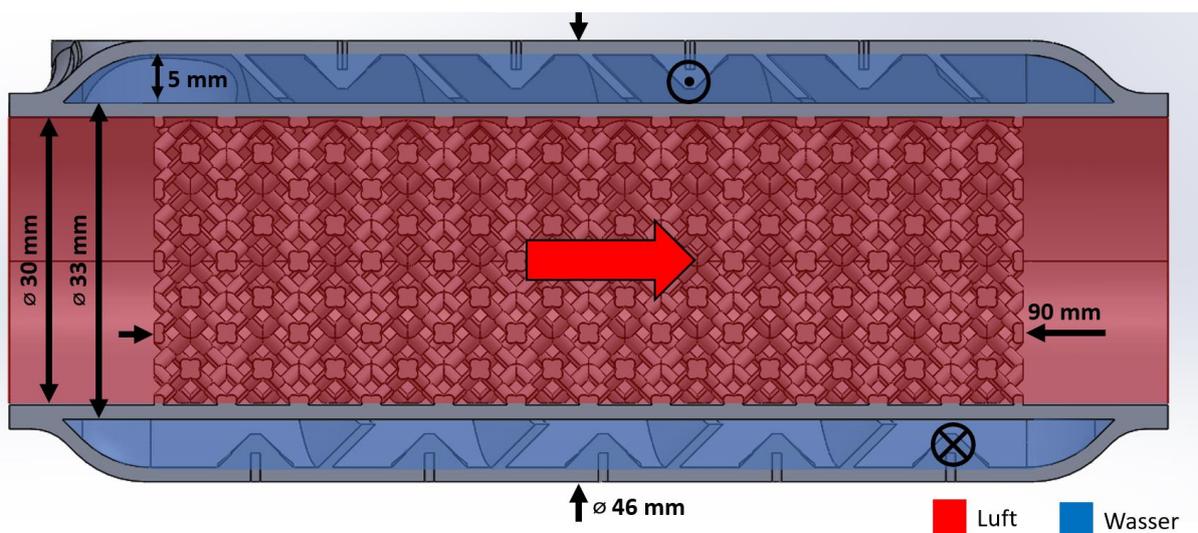
| Bezeichnung  | Eingabeparameter             |     |
|--|------------------------------|-----|
| Diamond Arrayed<br>(kartesisch)             | Zylinderhöhe $H$ [mm]        | 7,5 |
|  | Kantenlänge $k$ [mm]         | 7,5 |
|  | Balkendurchmesser $t$ [mm]   | 1,5 |
| Diamond Arrayed $90^\circ$<br>(kartesisch)  | Zylinderhöhe $H$ [mm]        | 7,5 |
|  | Kantenlänge $k$ [mm]         | 7,5 |
|  | Balkendurchmesser $t$ [mm]   | 1,5 |
| Diamond Radial<br>(zylindrisch)             | Zylinderhöhe $H$ [mm]        | 7,5 |
|  | Zylinderdurchmesser $D$ [mm] | 30  |
|  | Unterteilungen in $z$        | 1   |
|  | Unterteilungen in $\varphi$  | 8   |
|  | Balkendurchmesser $t$ [mm]   | 1,5 |

## 2.2 Basiselement- und Referenz-Wärmeübertrager

Die generierten Strukturen werden in einem mit der CAD-Software *SolidWorks*® konstruierten Basiselement-Wärmeübertrager angeordnet. Es handelt sich dabei um einen Doppelrohr-Wärmeübertrager, welcher als Gaskühler fungieren soll. Das strukturgefüllte Innenrohr besitzt einen Innendurchmesser von 30 mm und wird für die Vermessung mit Luft durchströmt. Der von Wasser durchströmte Mantelraum besitzt eine Spalthöhe von 5 mm und ist mit einer helixförmigen Wendel zur Strömungsführung versehen. Diese ermöglicht eine hohe Strömungsgeschwindigkeit bei niedrigen Volumenströmen, was die Temperaturpreizung auf der Wasserseite in einem messbaren Rahmen halten soll. Weiterhin sind pro Wendelumdrehung vier pyramidenförmige Turbulatoren vorgesehen, welche 1 mm Bohrungen für spätere lokale Wandtemperaturmessungen enthalten. Der gesamte Basiselement-Wärmeübertrager ist ohne weitere Stützstrukturen bis auf die zur Verbindung mit der Bauplattform nötige Verankerung im PBF-LB/M-Verfahren herstellbar. Im Nachgang müssen lediglich Flansche an Ein- und Austrittsbereiche der Fluide geschweißt werden. In Bild 3 und Bild 4 ist das CAD-Modell des Wärmeübertragers isometrisch und im Schnitt einschließlich der Fluidführung und den relevanten Abmaßen dargestellt.



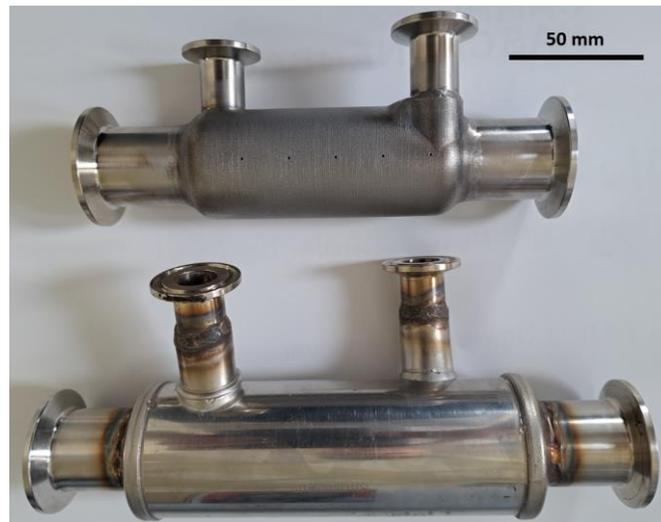
**Bild 3:** CAD-Modell des Basiselement-Wärmeübertrager ohne Anschlüsse mit ein- und austretenden Fluidströmen



**Bild 4:** CAD-Modell des Basiselement-Wärmeübertrager im Schnitt mit Fluidströmen innerhalb des Apparates mit einer Strukturlänge  $L_S = 90$  mm

Alle drei Basiselement-Wärmeübertrager werden mit den unterschiedlich ausgerichteten Diamond-Innenstrukturen aus dem Werkstoff 1.2709 auf einer *EOS M280* Anlage gedruckt. Die Auswahl des Werkstoffs erfolgt aus fertigungstechnischen Gesichtspunkten und resultiert aus der aktuellen Rüstung der Maschine. Der ursprünglich vorgesehene Werkstoff 1.4404 unterscheidet sich aus thermischer Sicht nicht nennenswert. Die Wärmeleitfähigkeiten bei 20°C betragen 15 W/(m K) für 1.4404 und 14,2 W/(m K) für 1.2709 [12, 13].

Als Referenz für die vermessenen Strukturen wird ein konventionelles Rohrbündel herangezogen, welche als Abgasrückkühler im Automobilbereich genutzt wird. In Bild 5 sind der Referenz-Wärmeübertrager und ein mit Anschlussflanschen versehener Basiselement-Wärmeübertrager dargestellt.

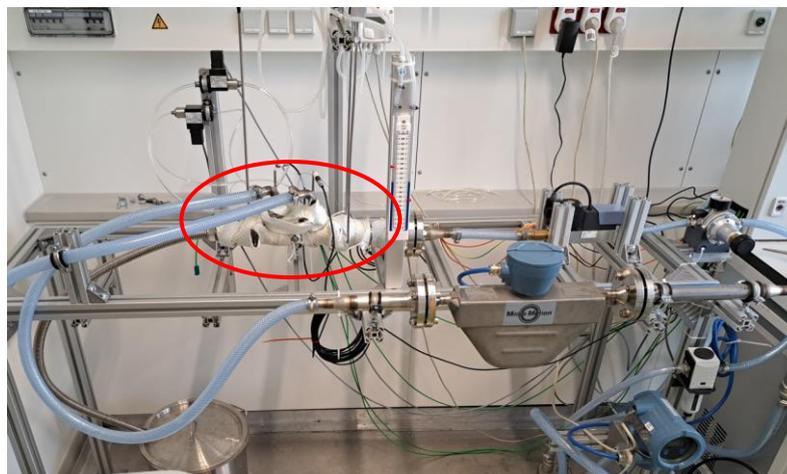


**Bild 5:** Additiv gefertigter Basiselement-Wärmeübertrager (oben) und Referenz-Wärmeübertrager (unten) mit angeschweißten Anschlüssen

Der wärmeübertragende, strukturgefüllte Bereich des Basiselement-Wärmeübertragers hat etwa die Abmaße 46 mm x 90 mm (D x l). Beim Referenz-Wärmeübertrager besitzt dieser Bereich etwa die Abmaße 54 mm x 153 mm (D x l) und besteht aus einem innen einfach durchströmten Rohrbündel mit 18 Rohren eines Innendurchmessers von 5 mm ohne mantelseitige Umlenkungen.

### 3 Vermessung der Wärmeübertrager

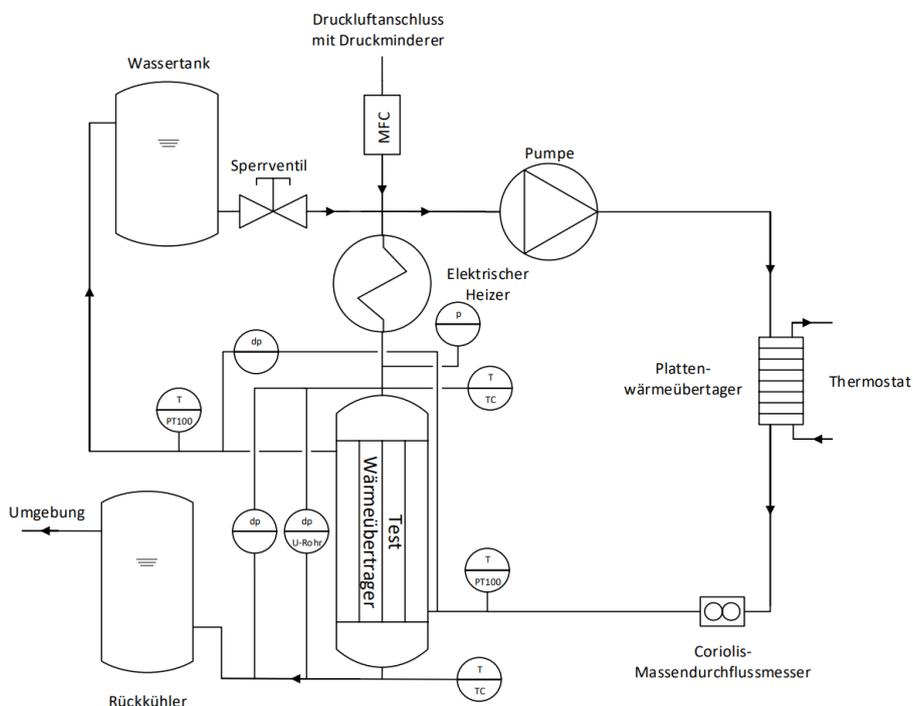
Für die Vermessung von Wärmeübergang und Druckverlust der additiv gefertigten Basiselement-Wärmeübertrager und des Referenz-Rohrbündels wird ein Versuchsstand verwendet, der Aufbau des Versuchsstands mit eingebautem Wärmeübertrager ist in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6:** Versuchsstands zu Vermessung der Wärmeübertrager (rot umkreist)

Der Versuchsstand besteht luftseitig aus einer Messstrecke, welche mit Druckluft durchströmt wird, sowie aus einem Wasserkreislauf. Mittels der gemessenen Größen können sowohl die Energiebilanzen als auch Druckverluste beider den Wärmeübertrager durchströmenden Fluide aufgestellt bzw. erfasst werden.

In Bild 7 ist das Fließschema des Versuchsstands dargestellt. Der Druckluftvolumenstrom wird durch eine Mass Flow Controller (MFC) (*bürkert Type 8746*) geregelt und durch einen über Pulsweitenmodulation (PWM) geregelten elektrischen Vorheizer mit einer Leistung von maximal 1,55 kW auf die angestrebte Eintrittstemperatur gebracht. Anschließend wird die Luft im zu vermessenden Wärmeübertrager abgekühlt und wird zur weiteren Kühlung in einen Wasserbehälter geleitet und dann an die Umgebung abgegeben. Vor und hinter dem Wärmeübertrager sind Thermoelemente mit vorgeschalteten Mischkammern in den Leitungen positioniert, welche Ein- und Austrittstemperatur der Luft messen. Der Absolutdruck der Luft am Eintritt in den Wärmeübertrager sowie der Druckverlust über den Wärmeübertrager werden gemessen. Zur Messung des Druckverlusts der Luftseite sind parallel ein 0 - 10 000 Pa Differenzdrucksensor (*KIMO CP113*) sowie ein U-Rohr verbaut. Die Luft-Messstrecke kann mit Volumenströmen von 20 - 500 NI beaufschlagt werden, welche, je nach benötigter elektrischer Leistung, bis zu einer zulässigen Betriebstemperatur von etwa 400°C beheizt werden können. Das Druckniveau am Eintritt des Wärmeübertragers liegt, abhängig vom anfallenden Druckverlust in Wärmeübertrager, folgenden Leitungen und Rückkühler wenige hundertstel bar über Umgebungsdruck.



**Bild 7:** Fließschema des Versuchsstands zur Vermessung der Wärmeübertrager

Der Wasserkreislauf dient zur Durchströmung des Mantelraums der Wärmeübertrager. Dieser besteht aus einer PWM-geregelten Umwälzpumpe mit einem Durchfluss von bis zu etwa 20 l/min, einem über einen Plattenwärmeübertrager gekoppelter *Lauda Integral T2200* Prozessthermostat sowie einem Wassertank. Der Temperaturbereich des Wasserkreislaufs beträgt 10°C – 60°C. Mantelseitig wird der Massenstrom des Wassers mittels eines Coriolis-Massendurchflussmessers erfasst. Die Ein- und Austrittstemperaturen des Wassers am Wärmeübertrager werden über PT-100 Temperatursensoren aufgenommen. Der Druckverlust wird mittels eines 0 – 60 000 Pa Differenzdrucksensors gemessen. Die Messdatenerfassung sowie die Steuerung des Versuchsstands erfolgt mittels Auswertungselektronik sowie der Software *LabVIEW™* (*National Instruments™*). Die zu vermessenden Wärmeübertrager werden im Versuchsstand bei den in Tabelle 2 aufgeführten gleichen Eintrittsbetriebsbedingungen auf der Rohrseite vermessen. Das durch die Mantelseite des Wärmeübertragers fließende Wasser wird für alle Betriebspunkte auf einen Volumenstrom von 5 l/min und eine Eintrittstemperatur von 20°C eingestellt. Da als Anwendung der Strukturen wie auch des Referenz-Wärmeübertragers die Gaskühlung angedacht ist, werden dabei zwei Temperaturniveaus der eintretenden Luft von 200°C und 300°C eingestellt und die möglichen Luftvolumenströme des Versuchsstands bis zu der Grenze durchlaufen, die der verbaute Heizer zulässt. Daraus ergeben

sich Eintritts-Reynoldszahlen von etwa 700 – 9000, wobei hier der Zustand der Strömung im noch glatten 30 mm Rohr direkt vor Eintritt in die Struktur bzw. das Rohrbündel betrachtet wird. Die für die Berechnung der Reynoldszahlen und aller weiteren Auswertungen herangezogenen Stoffdaten stammen aus der Stoffdatenbank REFPROP [14]. Für die aufgeführten Betriebspunkte werden im stationären Zustand die innerhalb von 15 Minuten gemessenen Werte gemittelt. Das U-Rohr Manometer wird während eines Betriebspunkts einmalig abgelesen.

**Tabelle 2:** Eintrittsbedingungen der Luft für Messpunkte der Wärmeübertrager bei Eintrittsdruck  $p_{L,e} = p_U + \Delta p_{L,V} \approx 1$  bar bei wasserseitig konstantem Volumenstrom von 5 l/min bei  $T_e = 20^\circ\text{C}$

| $T_e$ [°C] | $\dot{m}_L$ [g/s] | $w_{L,e}$ [m/s] | $Re_{L,e}$ |
|------------|-------------------|-----------------|------------|
| 200        | 0,5               | 0,95            | 815        |
| 200        | 1,5               | 2,85            | 2444       |
| 200        | 2,5               | 4,74            | 4074       |
| 200        | 3,5               | 6,64            | 5703       |
| 200        | 4,5               | 8,54            | 7333       |
| 200        | 5,5               | 10,43           | 8962       |
| 300        | 0,5               | 1,15            | 712        |
| 300        | 1,5               | 3,45            | 2136       |
| 300        | 2,5               | 5,74            | 3559       |
| 300        | 3,5               | 8,04            | 4983       |
| 300        | 4,5               | 10,34           | 6407       |

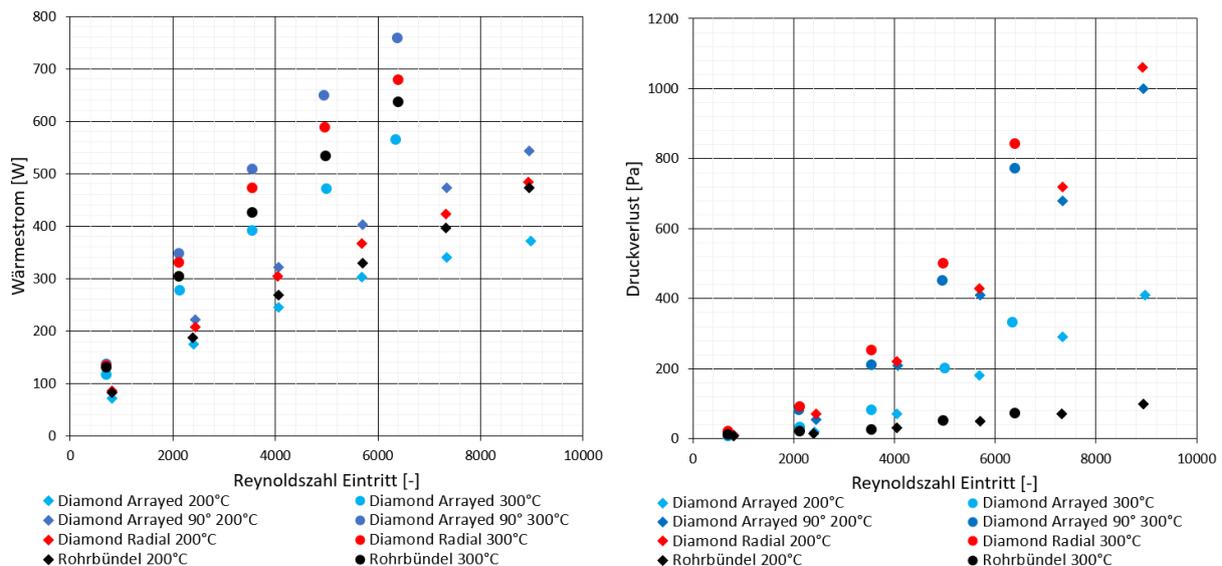
Im Folgenden werden die Auswertung der gemessenen Wärmeströme und Druckverluste sowie die Unsicherheitsanalyse beschrieben.

### 3.1 Auswertung von Wärmeübergang und Druckverlust

Die Wärmeströme  $\dot{Q}$  werden mittels der Energiebilanz über die Luftseite des Wärmeübertragers unter Verwendung der spezifischen Enthalpien  $h(T, p)$  und des Luftmassenstroms  $\dot{m}_L$  berechnet mit

$$\dot{Q} = \dot{m}_L(h_{L,e} - h_{L,a}) \tag{1.}$$

In Bild 8 sind die berechnete Wärmeströme und gemessenen Druckdifferenzen der Betriebspunkte aufgeführt.



**Bild 8:** Wärmestrom und luftseitiger Druckverlust der vermessenen Wärmeübertrager über die Eintritts-Reynoldszahl der Luft im Glattrohr

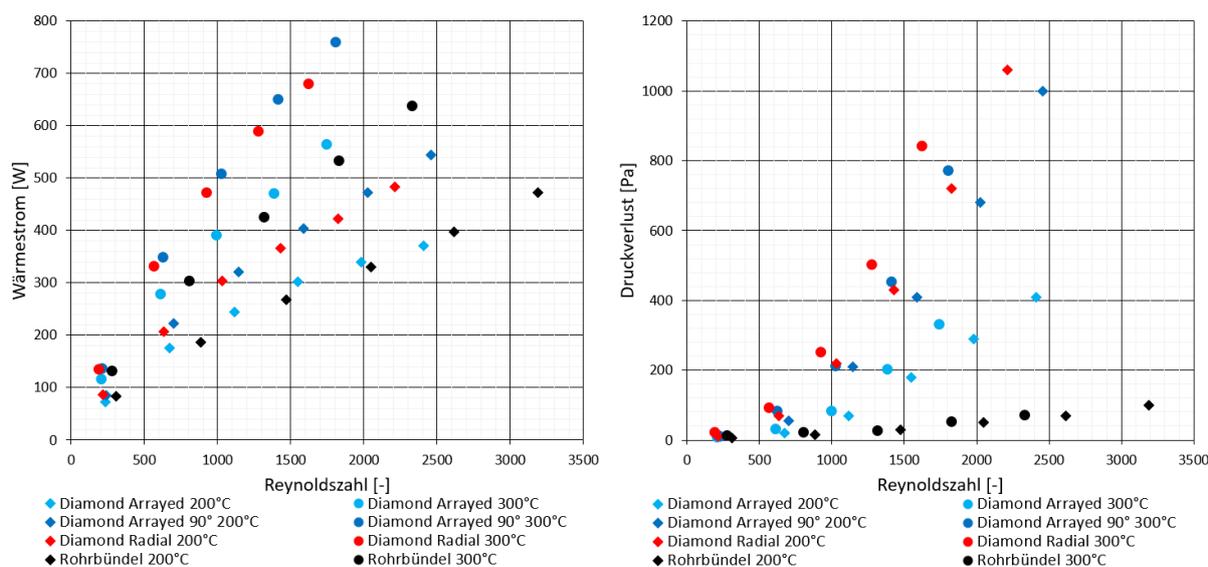
Da die Eintritts-Reynoldszahlen nicht den resultierenden Strömungszustand im Wärmeübertrager charakterisieren, werden nochmals mittlere Reynoldszahlen für den sich einstellenden Betriebspunkt und den hydraulischen Durchmesser  $d_h$  der Strukturen sowie des Referenz-Wärmeübertragers über

$$d_h = \frac{4 V_S}{A_b} = \frac{4 \text{ Fluidvolumen}}{\text{Benetzte Oberfläche}} \quad (2)$$

definiert. Der für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nötige Strömungsquerschnitt  $A_s$  wird dabei für die Strukturen der Länge  $L_S$  berechnet über

$$A_s = \frac{V_S}{L_S} \quad (3).$$

In Bild 9 sind Wärmestrom und Druckverlust über diese Reynoldszahlen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die tatsächlichen Strömungszustände in den Wärmeübertragern im Wesentlichen im laminaren Bereich liegen.

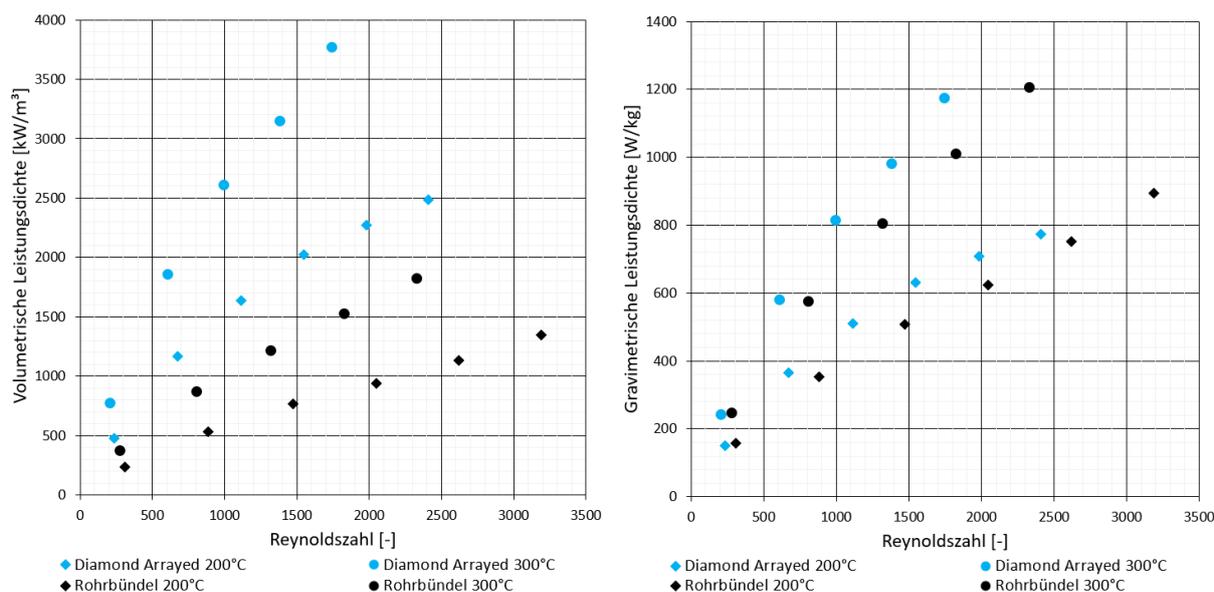


**Bild 9:** Wärmestrom und luftseitiger Druckverlust der vermessenen Wärmeübertrager über die mittlere Reynoldszahl der Luft im Wärmeübertrager

Die Diamond-Arrayed-Struktur überträgt Wärmeströme zwischen 72 W und 563 W bei Druckverlusten zwischen 10 Pa und 410 Pa. Bei der Diamond-Radial-Struktur liegen die Wärmeströme bei 86 W bis 678 W mit Druckverlusten von 10 Pa bis 1060 Pa. Im Vergleich zu den anderen Strukturen zeichnet sich die Diamant-Arrayed-90°-Struktur durch höhere Wärmeströme von 85 W bis 758 W aus, während die Druckverluste mit 10 Pa bis 1000 Pa geringfügig niedriger als die der Diamond-Radial-Struktur sind.

Bei Betrachtung der gemessenen Werte wird ersichtlich, dass sich die Strukturen untereinander bei der Druckverlustcharakteristik signifikant unterscheiden. Bei Betrachtung des Verhältnisses von übertragenen Wärmestrom zu Druckverlust erweist sich die Diamant-Arrayed-Struktur als die effizienteste. Diese überträgt im Mittel 18 % weniger Wärme als die Diamond-Radial-Struktur wobei die Druckverluste im Mittel um 59 % sinken. Bezogen auf die Diamond-Arrayed-90°-Struktur ist der Wärmestrom im Mittel um 23 % niedriger, wobei die Druckverluste im Mittel um 54 % sinken.

Der Referenz-Wärmeübertrager überträgt Wärmeströme von 83 W bis 636 W bei deutlich niedrigeren Druckverlusten von 7 Pa bis 100 Pa. Die Diamond-Arrayed-Struktur überträgt verglichen mit dem Referenz-Wärmeübertrager im Mittel 11% weniger Wärmestrom bei 206 % höheren Druckverlusten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Referenz-Wärmeübertrager auf das Volumen des wärmeübertragenden Bereiches bezogen 134 % größer ist. In Bild 10 ist die volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte des Referenz-Wärmeübertragers und der Diamond-Arrayed-Struktur dargestellt. Aus dem deutlich kleineren Volumen resultiert für die Struktur im gesamten vermessenen Betriebsbereich eine deutlich höhere volumetrische Leistungsdichte, die im Mittel um 108 % höher liegt. Die gravimetrische Leistungsdichte des strukturierten Wärmeübertragers ist der des Rohrbündels in den vermessenen Betriebsbereichen sehr ähnlich und ist im Mittel um -2 % niedriger, wobei die gravimetrische Leistungsdichte bezogen auf die mittlere Reynoldszahl bereits früher anliegt. Weiterhin ist der hier gefertigte Wärmeübertrager nicht bezüglich des Gewichts optimiert worden. Aus fertigungstechnischer Sicht könnten bei der additiven Fertigung auch geringere Wandstärken bis zu 0,6 mm realisiert werden [3].



**Bild 10:** Volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte von Basiselement-Wärmeübertrager mit Diamond-Arrayed-Struktur und Referenz-Wärmeübertrager über die mittlere Reynoldszahl der Luft im Wärmeübertrager

### 3.2 Unsicherheitsanalyse

In Tabelle 3 sind die Messunsicherheiten der einzelnen Sensoren aufgeführt. Die Gesamtunsicherheit der Druckverluste lässt sich direkt über die Messabweichung des Differenzdrucksensors abschätzen. Diese beträgt  $\pm 1,5 \%$  vom Messwert  $\pm 30 \text{ Pa}$  [15]. Die Druckverluste am U-Rohr-Manometer können auf  $\pm 10 \text{ Pa}$  genau abgelesen werden. Da das Ablesen der Druckverluste über das U-Rohr somit eine höhere Genauigkeit aufweist, werden diese Werte für die Auswertung herangezogen. Da das Ablesen einmal pro Betriebspunkt erfolgt, wird mittels des elektronisch erfassten Differenzdrucks sichergestellt, dass dieser sich nicht im Verlauf eines Betriebspunktes ändert. Für die im niedrigen Reynoldszahl-Bereich gemessenen Druckverluste ist die Messunsicherheit besonders zu berücksichtigen, da diese die gemessenen Werte in einigen Fällen signifikant überschreitet.

Die Gesamtunsicherheit des Wärmestroms  $\dot{Q}$  ergibt sich aus den Messunsicherheiten des MFC, der Thermoelemente und der Differenzdrucksensors auf der Luftseite. Für den MFC ergibt sich aus Vermessung der Messabweichung des Herstellers vom 05/2022 für die über die Normdichte berechneten Massenströme Fehler zwischen etwa  $-0,2 \%$  -  $-0,4 \%$  und  $+0,2 \%$  -  $+0,7 \%$ . Die Messabweichungen von Differenzdrucksensor und Thermoelementen verursachen eine fehlerhaft bestimmte Enthalpiedifferenz  $\Delta h = h_e(T_e, p_e) - h_a(T_a, p_a)$ . Die Enthalpiedifferenz kann durch entsprechende Richtungen der Fehler entweder zu groß oder zu klein werden. Dieser Fehler liegt bei  $\pm 1,1 \%$  -  $\pm 4,5 \%$ . Dieses Vorgehen wird hier gewählt, da der Fehler der Enthalpiedifferenz aufgrund der Entnahme der Werte aus der Stoffdatenbank REFPROP über Druck und Temperatur erfolgt und nicht über eine zugrundeliegende Funktion. Daraus folgend liegt die Gesamtunsicherheit für die berechneten Wärmeströme zwischen etwa  $-1,3 \%$  -  $-4,9 \%$  und  $+1,3 \%$  -  $+5,2 \%$ .

**Tabelle 3:** Eintrittsbedingungen der Luft für Messpunkte der Wärmeübertrager

| Sensor                            | Messunsicherheiten                                |
|-----------------------------------|---|
| Differenzdrucksensor              | $\pm 1,5 \%$ v. Messwert $\pm 30 \text{ Pa}$ [15] |
| U-Rohr Manometer                  | $\pm 10 \text{ Pa}$                               |
| Thermoelemente DIN EN 60584 Kl. 1 | $\pm 1,5 \text{ K}$                               |
| Mass Flow Controller              | $\pm 0,00 - \pm 0,19 \%$ F.S. [16]                |

## 4 Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass die skriptbasierte Generierung von Innenstrukturen für Wärmeübertrager eine effiziente Methode der Erstellung komplexer Geometrien ist und dass die Weiterverwendung dieser in konventionellen CAD-Anwendungen möglich ist. Die Fertigung der Basiselement-Wärmeübertrager mittels PBF-LB/M konnte erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde der gesamte Arbeitsablauf zur Nutzung solcher inneren Strukturen für Wärmeübertrager aufgezeigt. Die messtechnische Charakterisierung der Wärmeübertrager ergab für bezüglich der Ausrichtung der gleichen Einheitszelle unterschiedliche Strukturen mehr als doppelt so hohe Unterschiede in der Druckverlustcharakteristik wie in der Wärmeübertragungscharakteristik. Dies deckt sich mit Erkenntnissen aus der Literatur bei Variation der Zellengröße und Zellenform. Der angestellte Vergleich mit einem konventionellen Rohrbündel-Wärmeübertrager zeigte das Potential der volumetrisch hohe Leistungsdichte beim Einsatz dieser Strukturen, welche für die effizienteste Struktur im Mittel mehr als doppelt so hoch war. Allerdings wurde auch ersichtlich, dass die Druckverlustcharakteristik der untersuchten Strukturen deutlich nachteiliger als die des konventionell gefertigten Referenz-Wärmeübertragers ist.

In Zukunft sollte bei der Untersuchung und Optimierung von inneren Gitterstrukturen für additiv gefertigte Wärmeübertrager durch systematische Parametervariation eine Verbesserung der Druckverlustcharakteristik angestrebt werden. Diese spricht wirtschaftlich wie auch anlagentechnisch am ehesten gegen einen Einsatz dieser Geometrien. Aufgrund der Vielzahl möglicher Parametervariationen, welche durch die skriptbasierte Konstruktion einfach zugänglich werden, bietet sich hier, wie bereits für bestimmte Strukturen erfolgt, eine Kombination aus CFD-Simulationen und experimentellen Untersuchungen an. Für die praktische Nutzung einer optimierten Struktur müssen anschließend entsprechende Korrelationen für die Berechnung von Druckverlust und Wärmeübergang aus diesen Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden. Dies wäre hier beispielsweise für die Diamond-Arrayed-Struktur denkbar.

## 5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag befasste sich mit dem Einsatz additiv gefertigter Innenstrukturen für Wärmeübertrager. Die skriptbasierte Generierung von drei Strukturen aus Diamond-Einheitszellen mit gleichen Balkendurchmessern und Einheitszellengröße mit Variation der Zellausrichtung wurde beschrieben. Anschließend wurden die Strukturen in eine Basiselement-Wärmeübertrager integriert und aus 1.2709 im PBF-LB/M-Verfahren additiv gefertigt. Dieser Doppelrohr-Wärmeübertrager wird mantelseitig von Wasser durchströmt. Im Innenrohr sind die Strukturen verortet. Durch diese Strukturen strömt heiße Luft. Als Referenz wurde ein konventionell gefertigter Wärmeübertrager aus Edelstahl mit geometrisch ähnlichen Abmessungen bei gleichen Betriebsbedingungen herangezogen. Die vier Wärmeübertrager wurde bei Eintrittstemperaturen und 200°C und 300°C bei Eintritts- bzw. Betriebs-Reynoldszahlen von etwa 700 – 9000 bzw. etwa 230 – 3200 bezüglich ihrer Druckverlust- und Wärmeübertragungscharakteristik verglichen. Die Strukturen untereinander zeigten, trotz der weitestgehend gleichgehaltenen geometrischen Parameter, nur aufgrund der Änderung der Zellausrichtung eine stark abweichende Druckverlustcharakteristik, wohingegen die Wärmeübertragungseigenschaften der Strukturen deutlich weniger stark variierten. Beim Vergleich der Strukturen untereinander hat die Diamond-Arrayed-Struktur das vorteilhafteste Verhältnis zwischen Wärmeübertragung und Druckverlust. Zwar überträgt diese im Mittel 18 % bzw. 23 % weniger Wärmestrom als die Diamond-Radial- bzw. die Diamond-Arrayed-90° Struktur, allerdings sind die auftretenden Druckverluste um 59 % bzw. 54 % niedriger. Verglichen mit dem Referenz-Wärmeübertrager weisen alle Strukturen deutlich höhere Druckverluste auf. Bei der in Bezug auf Wärmestrom-zu-Druckverlust effizientesten Struktur, der Diamond-Arrayed, liegen diese im Mittel um 180 % höher, wobei der mittlere übertragene Wärmestrom um 11 % sinkt. Da der Referenz-Wärmeübertrager ein um 134 % größeres wärmeübertragendes Volumen aufweist, ist die volumetrische Leistungsdichte des Basiselement-Wärmeübertragers mit Diamond-Arrayed-Struktur allerdings trotzdem um mittlere 108 % höher.

## 6 Danksagung

Gefördert durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) - School for Additive Manufacturing SAM

## 7 Nomenklatur

### Formelzeichen

|           |                           |
|-----------|---------------------------|
| $A$       | Fläche (m <sup>2</sup> )  |
| $d$       | Durchmesser (m)           |
| $h$       | Enthalpie (J/kg)          |
| $L$       | Länge (m)                 |
| $\dot{m}$ | Massenstrom (kg/s)        |
| $p$       | Druck (Pa)                |
| $\dot{Q}$ | Wärmestrom (W)            |
| Re        | Reynoldszahl (–)          |
| $T$       | Temperatur (K)            |
| $V$       | Volumen (m <sup>3</sup> ) |
| $w$       | Geschwindigkeit (m/s)     |

### Indizes

|   |                  |
|---|------------------|
| a | Austrittszustand |
| b | benetzt          |
| e | Eintritt         |
| h | hydraulisch      |
| L | Luft             |
| S | Struktur         |
| s | Strömung         |
| U | Umgebung         |
| V | Verlust          |

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Y. Chudnovsky and D. P. Sekulic, "Introduction and Classification of Heat Transfer Equipment," in *Handbook of Thermal Science and Engineering*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1295–1314.
- [2] T. Ehlers, I. Meyer, M. Oel, B. Bode, P. C. Gembarski, and R. Lachmayer, "Effect-Engineering by Additive Manufacturing," in *Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2021*, R. Lachmayer, B. Bode, and S. Kaierle, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 1–19.
- [3] R. Lachmayer, T. Ehlers, and R. B. Lippert, *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022.
- [4] U. Scheithauer *et al.*, "Potentials and Challenges of Additive Manufacturing Technologies for Heat Exchanger," in *Advances in Heat Exchangers*, L. Castro Gómez and V. Manuel Velázquez Flores, Eds.: IntechOpen, 2019.
- [5] J. Y. Ho, K. C. Leong, and T. N. Wong, "Experimental and numerical investigation of forced convection heat transfer in porous lattice structures produced by selective laser melting," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 137, pp. 276–287, 2019, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.022.
- [6] J. Y. Ho, K. C. Leong, and T. N. Wong, "Additively-manufactured metallic porous lattice heat exchangers for air-side heat transfer enhancement," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 150, p. 119262, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119262.
- [7] R. Koneri, S. Mulye, K. Ananthakrishna, R. Hota, B. Khatei, and S. Bontha, "Additive Manufacturing of Lattice Structures for Heat Transfer Enhancement in Pipe Flow," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Industry 4.0 and Advanced Manufacturing*, A. Chakrabarti and M. Arora, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 233–246.
- [8] J. Kim and D.-J. Yoo, "3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 527–550, 2020, doi: 10.1093/jcde/qwaa032.
- [9] D. Fuchs, R. Bartz, S. Kuschmitz, and T. Vietor, "Necessary advances in computer-aided design to leverage on additive manufacturing design freedom," *Int J Interact Des Manuf*, vol. 16, no. 4, pp. 1633–1651, 2022, doi: 10.1007/s12008-022-00888-z.
- [10] A. Tedeschi, S. Andreani, and F. Wirz, *AAD\_Algorithms-Aided Design: Parametric strategies using Grasshopper*. Brienza: Le Penseur publisher, 2016.
- [11] ADML, *INTRA LATTICE PRO*, 2018. [Online]. Available: <http://www.intralatticepro.com/overview/>

- [12] 3D-Laserdruck GbR, *Materialdatenblatt 1.4404*. [Online]. Available: [https://www.3d-laserdruck.de/files/my\\_files/pdf/downloads/datenblaetter/3D-Laserdruck\\_Materialdatenblatt\\_14404.pdf](https://www.3d-laserdruck.de/files/my_files/pdf/downloads/datenblaetter/3D-Laserdruck_Materialdatenblatt_14404.pdf) (accessed: Aug. 29 2023).
- [13] 3D-Laserdruck GbR, *Materialdatenblatt Werkzeugstahl 1.2709*. [Online]. Available: [https://www.3d-laserdruck.de/files/my\\_files/pdf/downloads/datenblaetter/3D-Laserdruck\\_Materialdatenblatt\\_1.2709.pdf](https://www.3d-laserdruck.de/files/my_files/pdf/downloads/datenblaetter/3D-Laserdruck_Materialdatenblatt_1.2709.pdf) (accessed: Aug. 29 2023).
- [14] E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden, *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 10.0*.
- [15] KIMO Instruments, *Technisches Datenblatt Differenzdruck Transmitter CP 111 – CP 112 – CP 113*.
- [16] Bürkert Fluid Control Systems, *Mass Flow Controller Type 8746 Flow Protocol Medium 1*.