

Kompakte Hochleistungs-Rekuperatoren mit 3D-Druck-Bauteilen für höchste Anforderungen

Marco Fuchs¹, Wolfgang Bender², Philipp Schwarz³, Stephan Kabelac¹

¹Institut für Thermodynamik, Leibniz Universität Hannover

²Hülsenbusch Apparatebau GmbH & Co. KG

³Rosswag Engineering GmbH

3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess Kolloquium, 07. - 08.10.2021, Aachen

Agenda

1. Motivation
2. Design der beiden Wärmeübertrager
3. Prüfstand
 - Auswertungsmethode
4. Experimentelle Ergebnisse
5. Zusammenfassung & Ausblick

Entwickelt im Rahmen des Projektes:

MULTISCHIBZ

Gefördert durch:



Koordiniert durch:

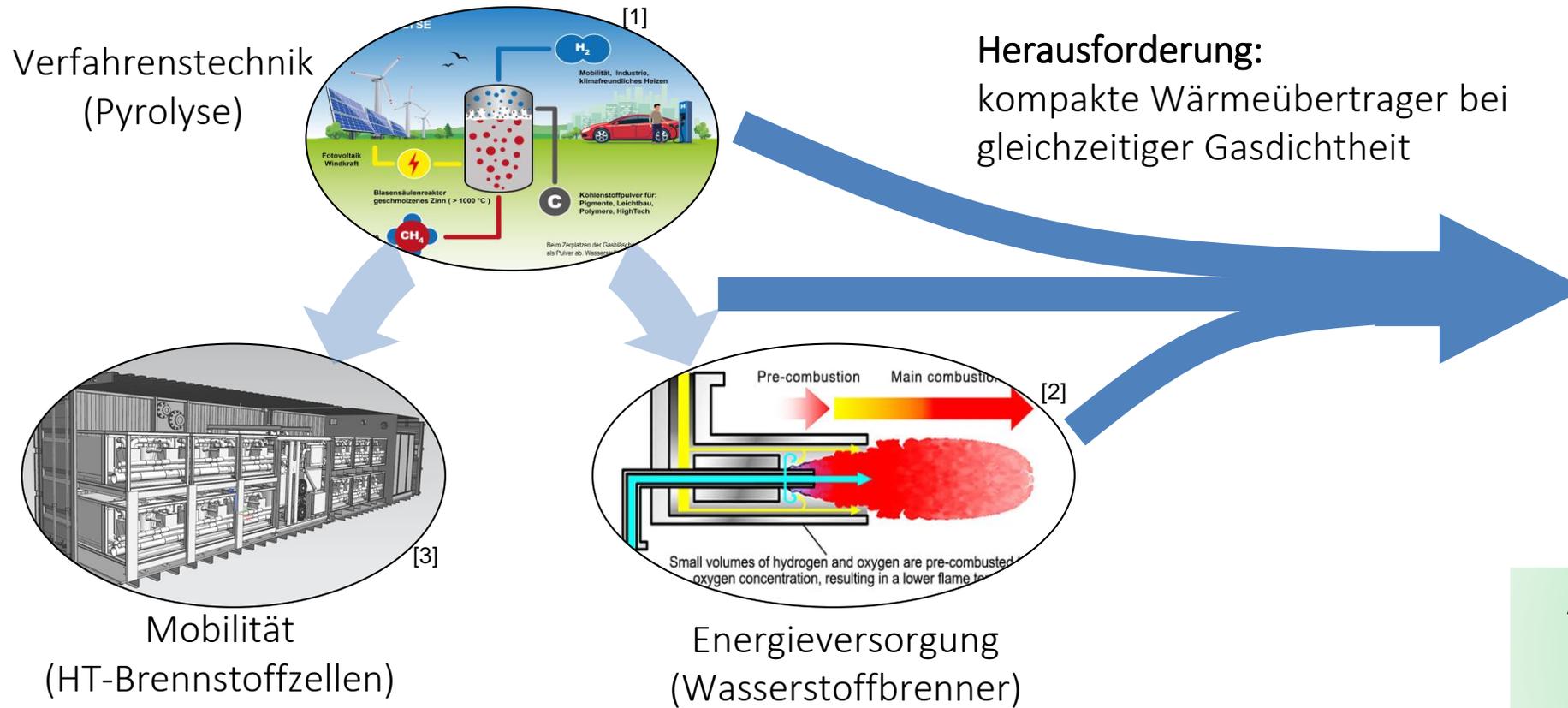


Projektpartner



Motivation

Entwickeln von Wärmeübertragern für neue Brennstoffe und für Effizienzsteigerungen von Prozessen



Additive Fertigung ermöglicht leistungsfähige und sichere Wärmeübertrager

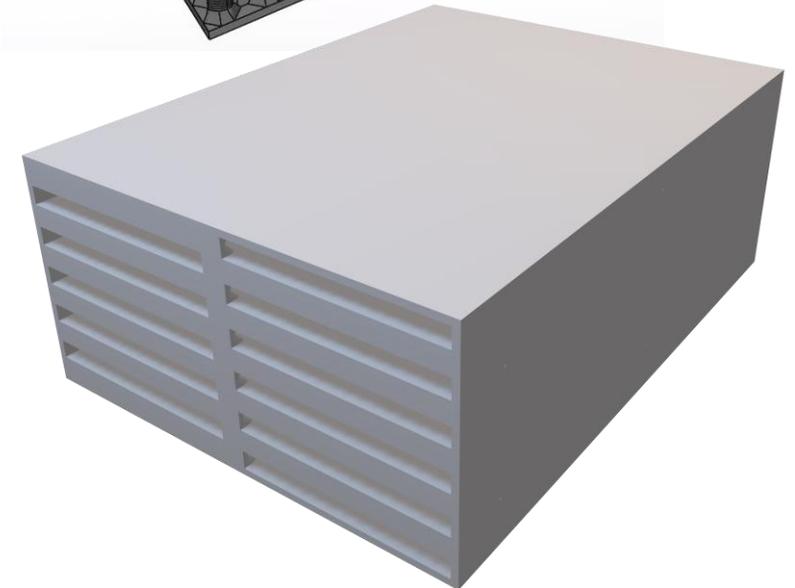
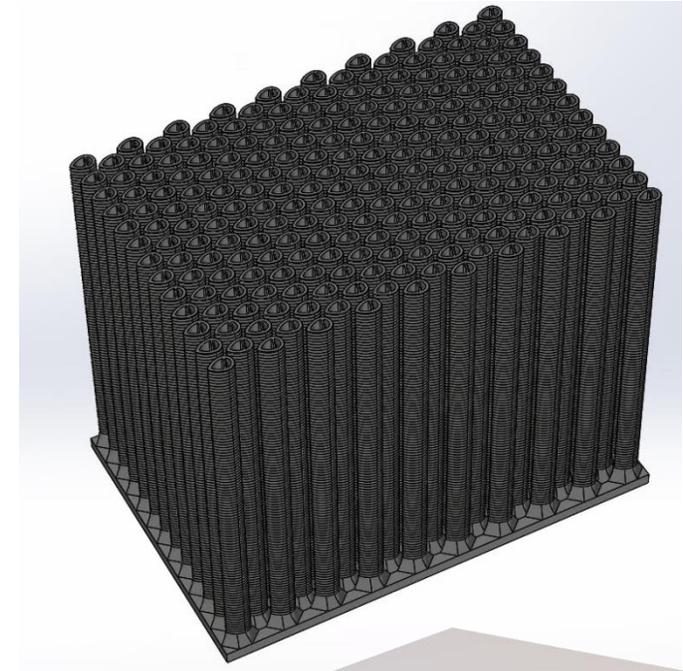
Design der beiden Wärmeübertrager

Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager "Rohrbündel 2.0"

- Steigerung der Leistung durch zusätzliche Flächen und Turbulenz
- Beibehalten der positiven thermo-mechanischen Eigenschaften der Rohrbündel-Ausführung
- Einsatz als Sicherheits-Wärmeübertrager

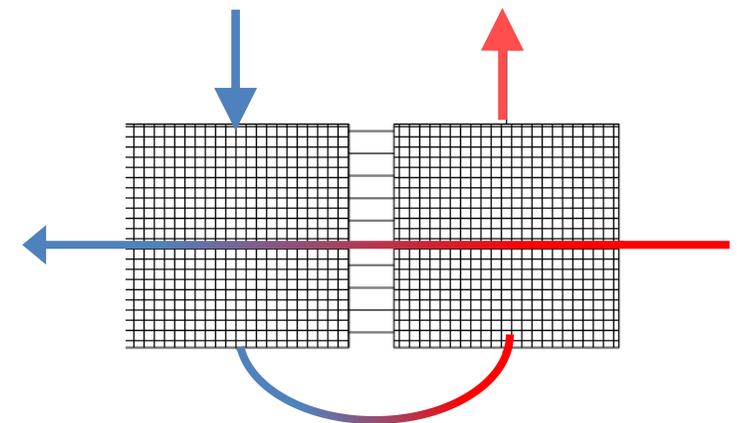
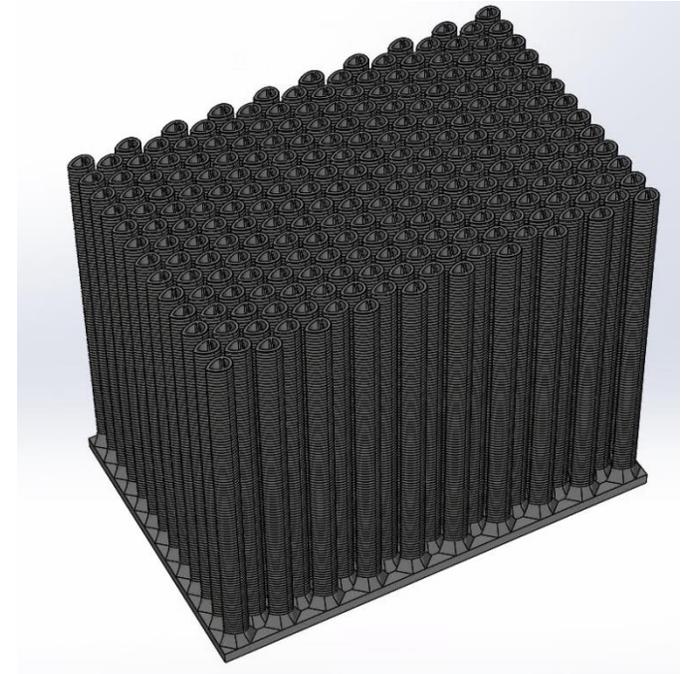
Gegenstrom-Wärmeübertrager "Plate-Fin"

- Variante für höchste Leistungen
- große innere Fläche
- Mechanisch stabile Ausführung durch "wie aus einem Guss"-Fertigung



Design des „Rohrbündel 2.0“ Wärmeübertragers

Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager „Rohrbündel 2.0“

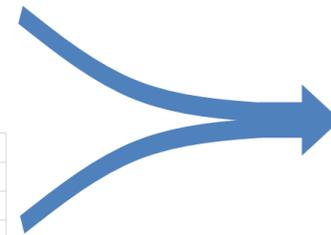
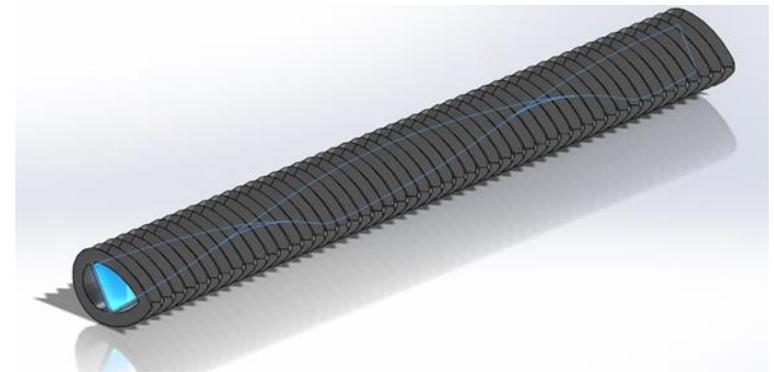
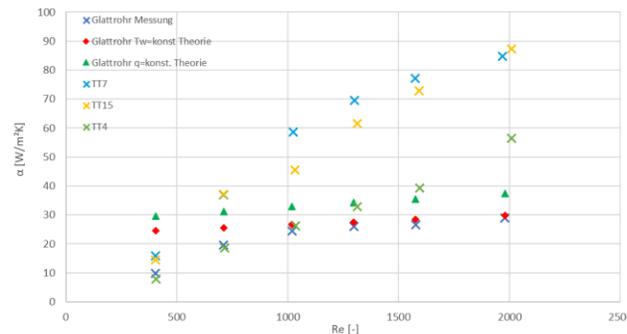
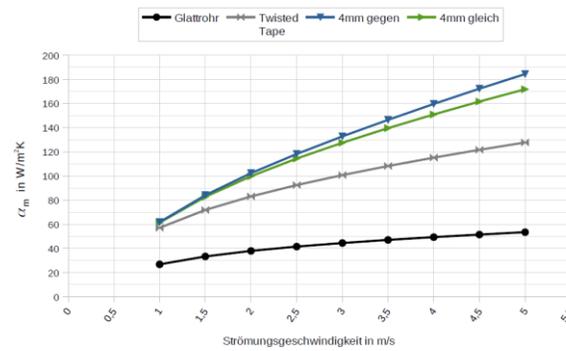
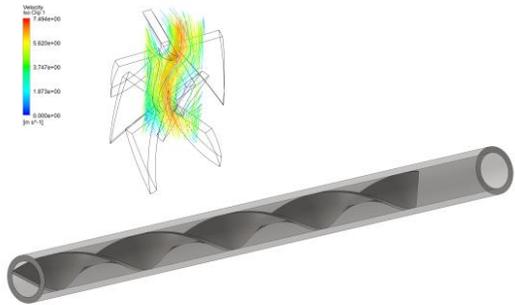
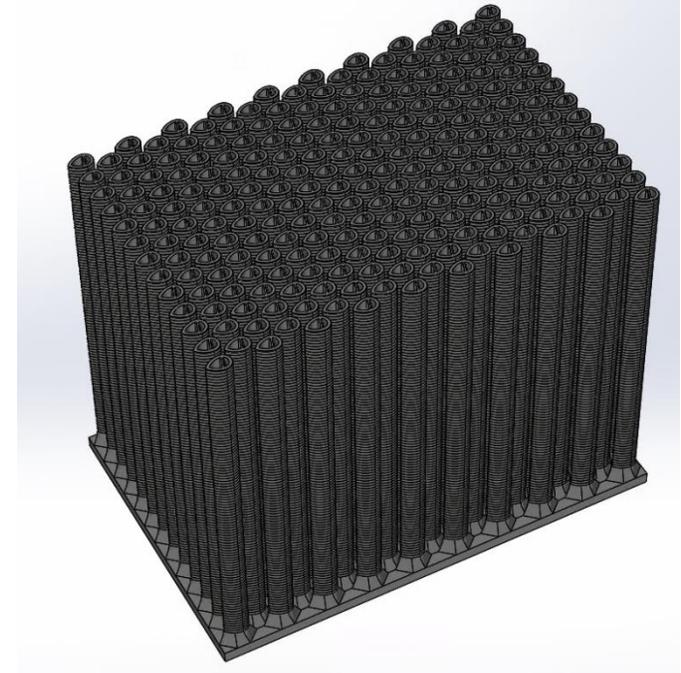


Design des „Rohrbündel 2.0“ Wärmeübertragers

Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager „Rohrbündel 2.0“

Vorgenommenen Optimierungen

- rohrseitiger Einbau von Drallerzeugern zur Steigerung des Wärmeübergangs
 - Auswahl durch vorab durchgeführte Experimente & Berechnungen

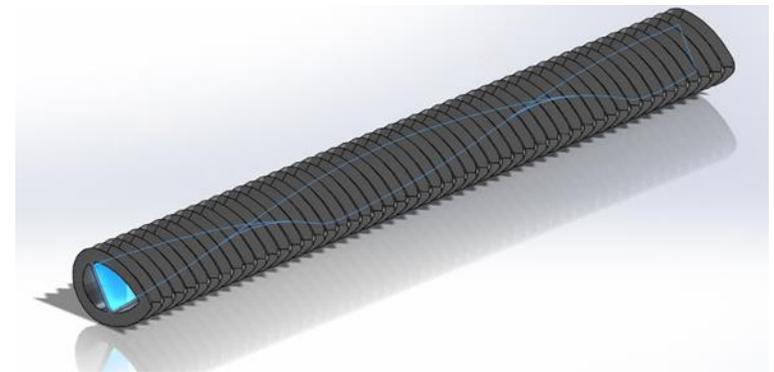
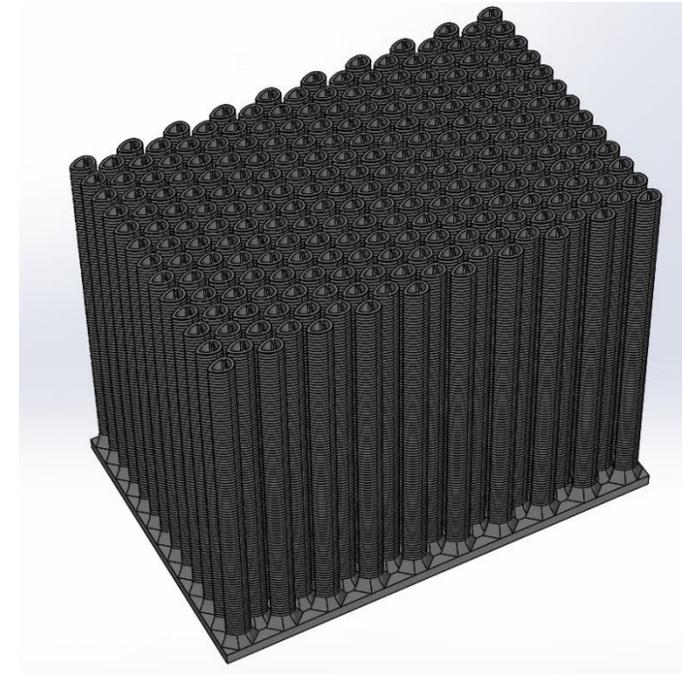
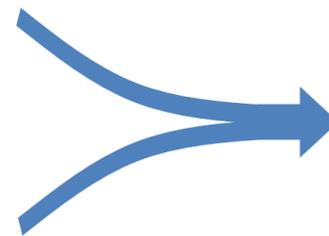
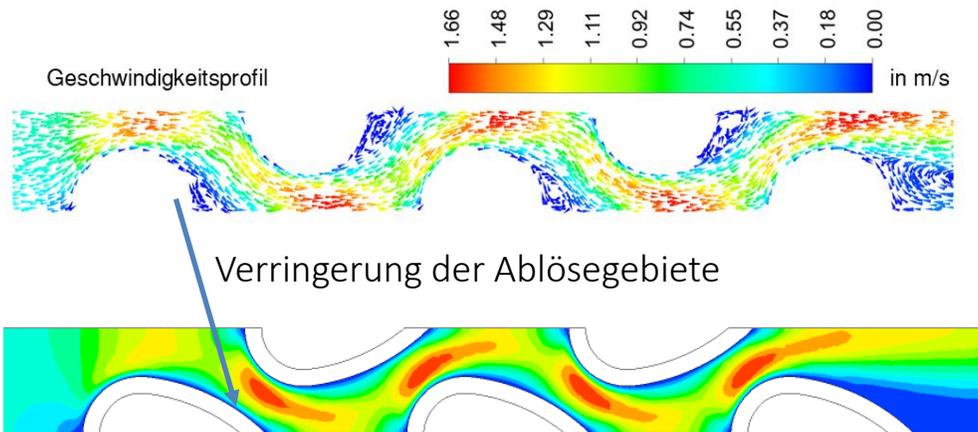


Design des „Rohrbündel 2.0“ Wärmeübertragers

Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager „Rohrbündel 2.0“

Vorgenommenen Optimierungen

- mantelseitig strömungsoptimierte Rohrform sowie Flächenvergrößerung durch Rippen

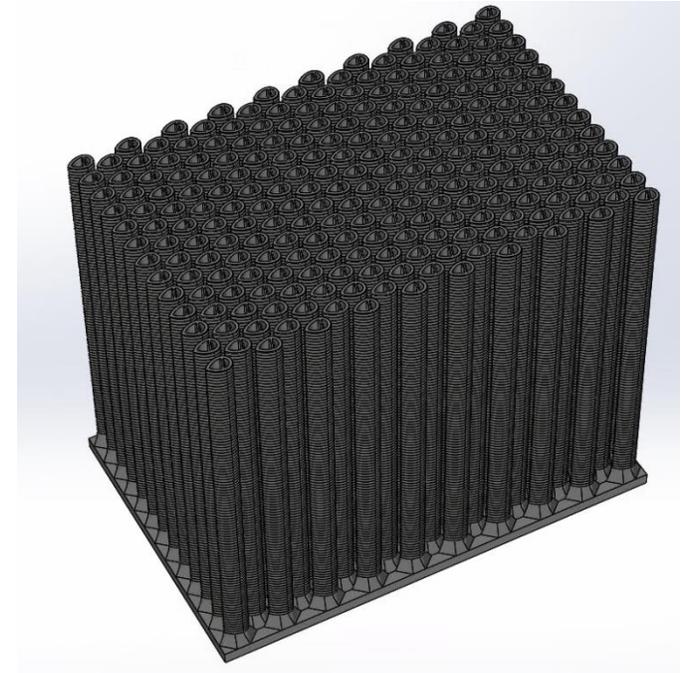
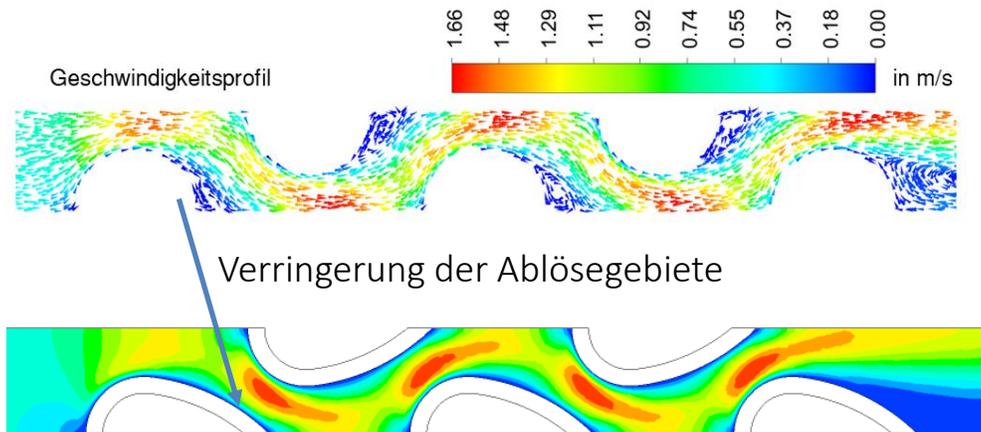


Design des „Rohrbündel 2.0“ Wärmeübertragers

Kreuzgegenstrom-Wärmeübertrager „Rohrbündel 2.0“

Vorgenommenen Optimierungen

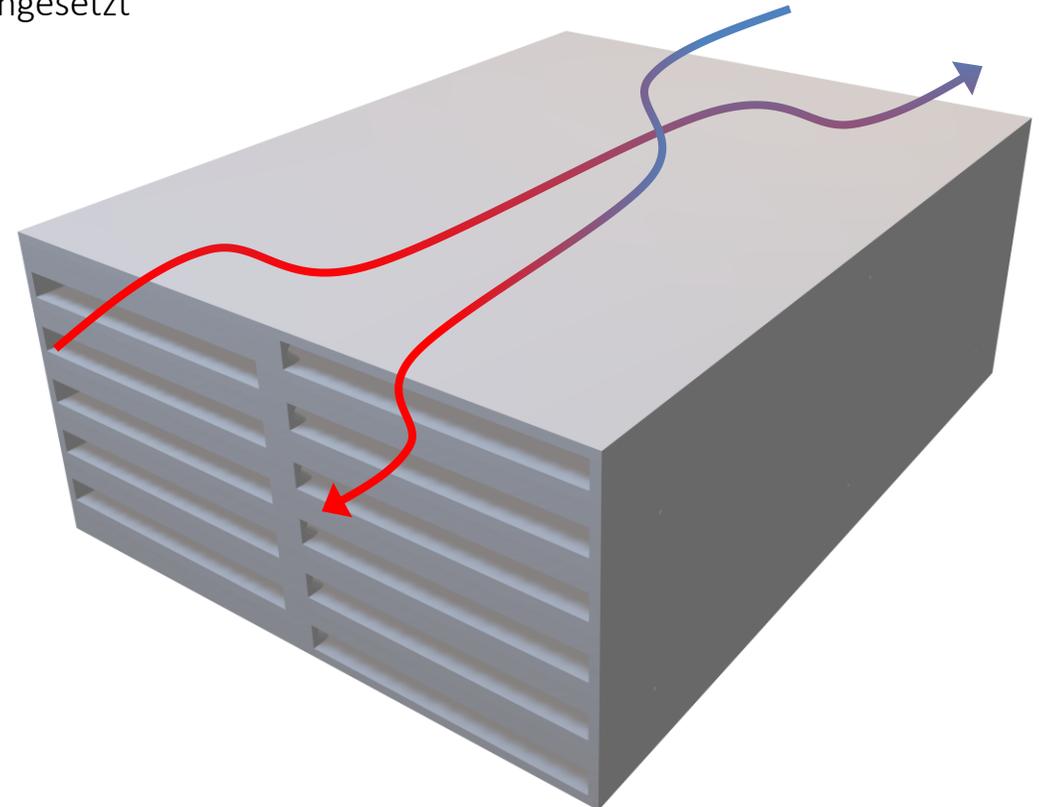
- mantelseitig strömungsoptimierte Rohrform sowie Flächenvergrößerung durch Rippen



Design des „Plate-Fin“ Wärmeübertragers

Gegenstrom-Wärmeübertrager „Plate-Fin“

- Der Wärmeübertrager ist als reiner Gegenströmer ausgeführt
- Der hier gezeigte Wärmeübertrager ist aus insgesamt 11 Schichten zusammengesetzt
 - 5 für die Heißgasseite
 - 6 für die Kaltgasseite
- Das gesamte Bauvolumen beträgt <6 Liter



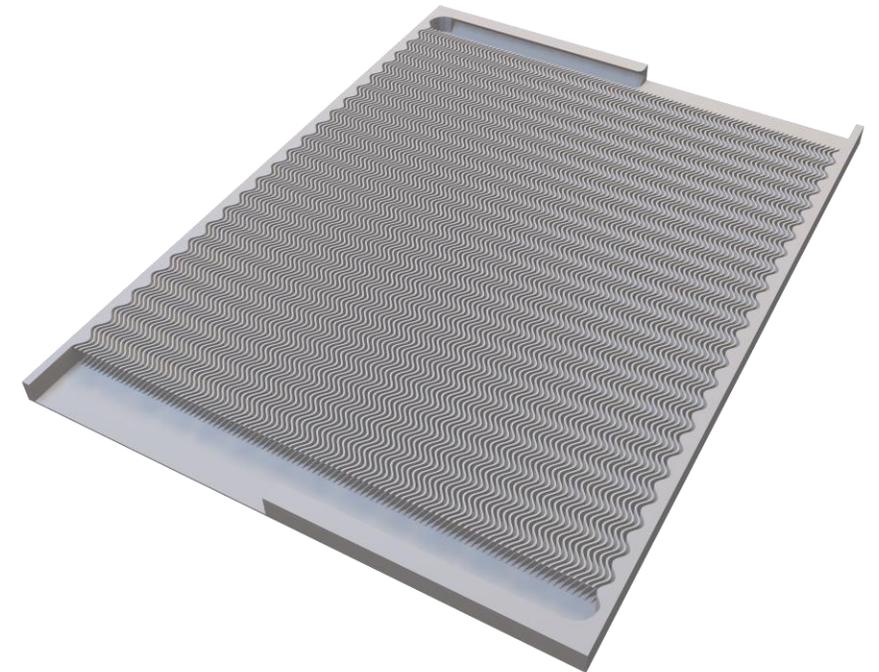
Design des „Plate-Fin“ Wärmeübertragers

Gegenstrom-Wärmeübertrager „Plate-Fin“

- Der Wärmeübertrager ist als reiner Gegenströmer ausgeführt
- Der hier gezeigte Wärmeübertrager ist aus insgesamt 11 Schichten zusammengesetzt
 - 5 für die Heißgasseite
 - 6 für die Kaltgasseite
- Das gesamte Bauvolumen beträgt <6 Liter

Geometrie der wärmeübertragenden Fläche

- „wavy-fin“ basierter Wärmeübertrager
- Rippengeometrie mittels Literaturkorrelationen und CFD Berechnungen optimiert



Design des „Plate-Fin“ Wärmeübertragers

Gegenstrom-Wärmeübertrager „Plate-Fin“

- Der Wärmeübertrager ist als reiner Gegenströmer ausgeführt
- Der hier gezeigte Wärmeübertrager ist aus insgesamt 11 Schichten zusammengesetzt
 - 5 für die Heißgasseite
 - 6 für die Kaltgasseite
- Das gesamte Bauvolumen beträgt <6 Liter

Geometrie der wärmeübertragenden Fläche

- “wavy-fin” basierter Wärmeübertrager
- Rippengeometrie mittels Literaturkorrelationen und CFD Berechnungen optimiert

- Minimales Bauvolumen
- Spezifische thermische Leistung
- Spezifischer Druckverlust



Kostenfunktion f

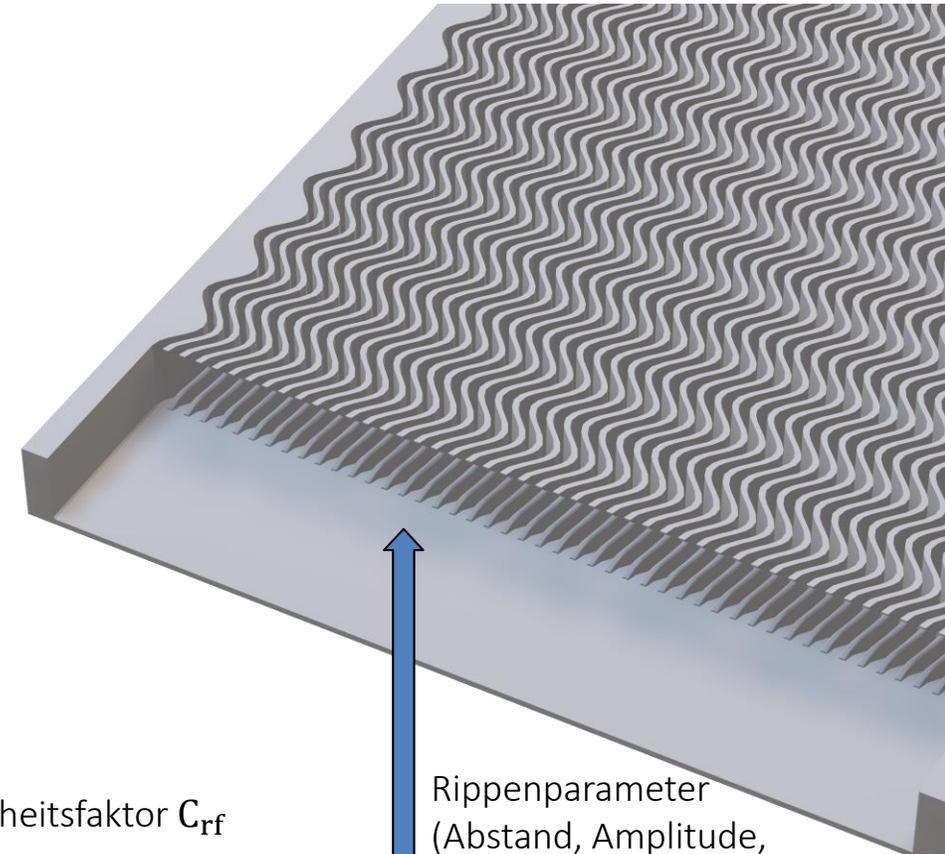


← Sicherheitsfaktor C_{rf}

Optimierung mittels
Matlab Algorithmus *particleswarm*



Rippenparameter
(Abstand, Amplitude,
Wellenlänge)



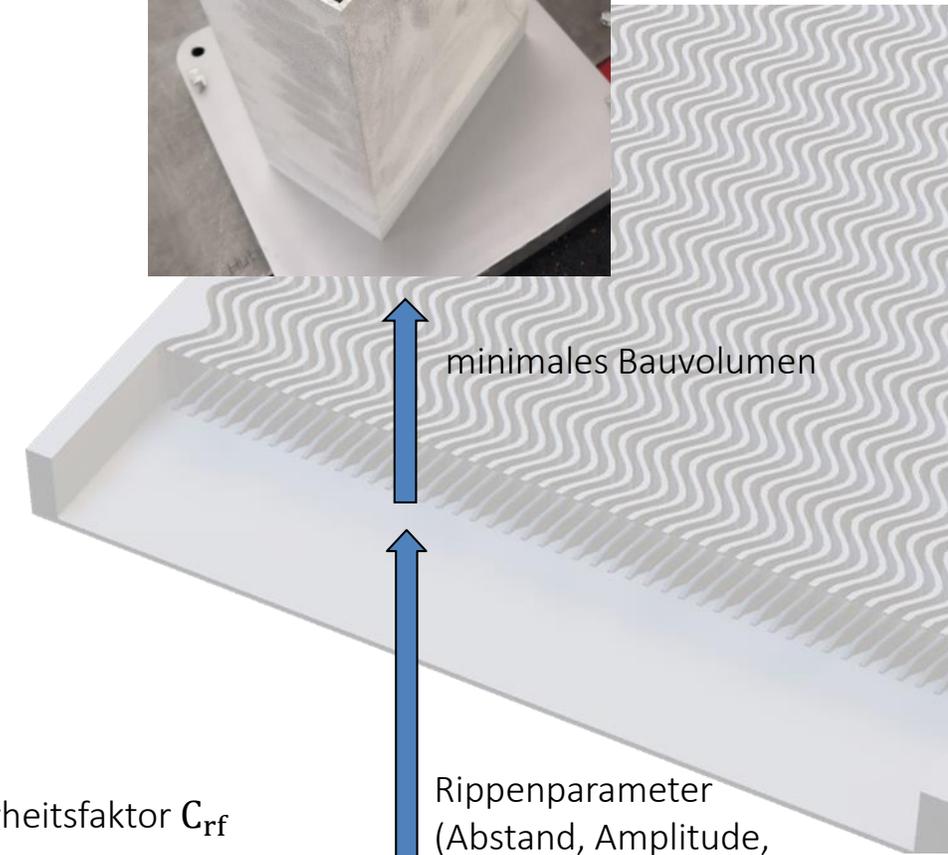
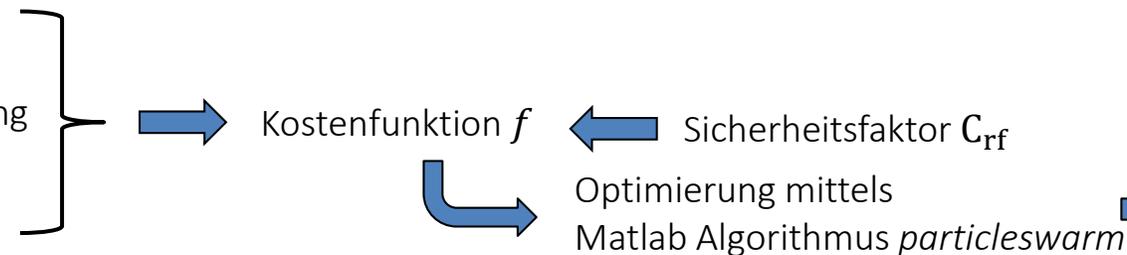
Design des „Plate-Fin“ Wärmeübertragers

Gegenstrom-Wärmeübertrager „Plate-Fin“

- Der Wärmeübertrager ist als reiner Gegenströmer ausgeführt
- Der hier gezeigte Wärmeübertrager ist aus insgesamt 11 Schichten zusammengesetzt
 - 5 für die Heißgasseite
 - 6 für die Kaltgasseite
- Das gesamte Bauvolumen beträgt <6 Liter

Geometrie der wärmeübertragenden Fläche

- „wavy-fin“ basierter Wärmeübertrager
- Rippengeometrie mittels Literaturkorrelationen und CFD Berechnungen optimiert
 - Minimales Bauvolumen
 - Spezifische thermische Leistung
 - Spezifischer Druckverlust

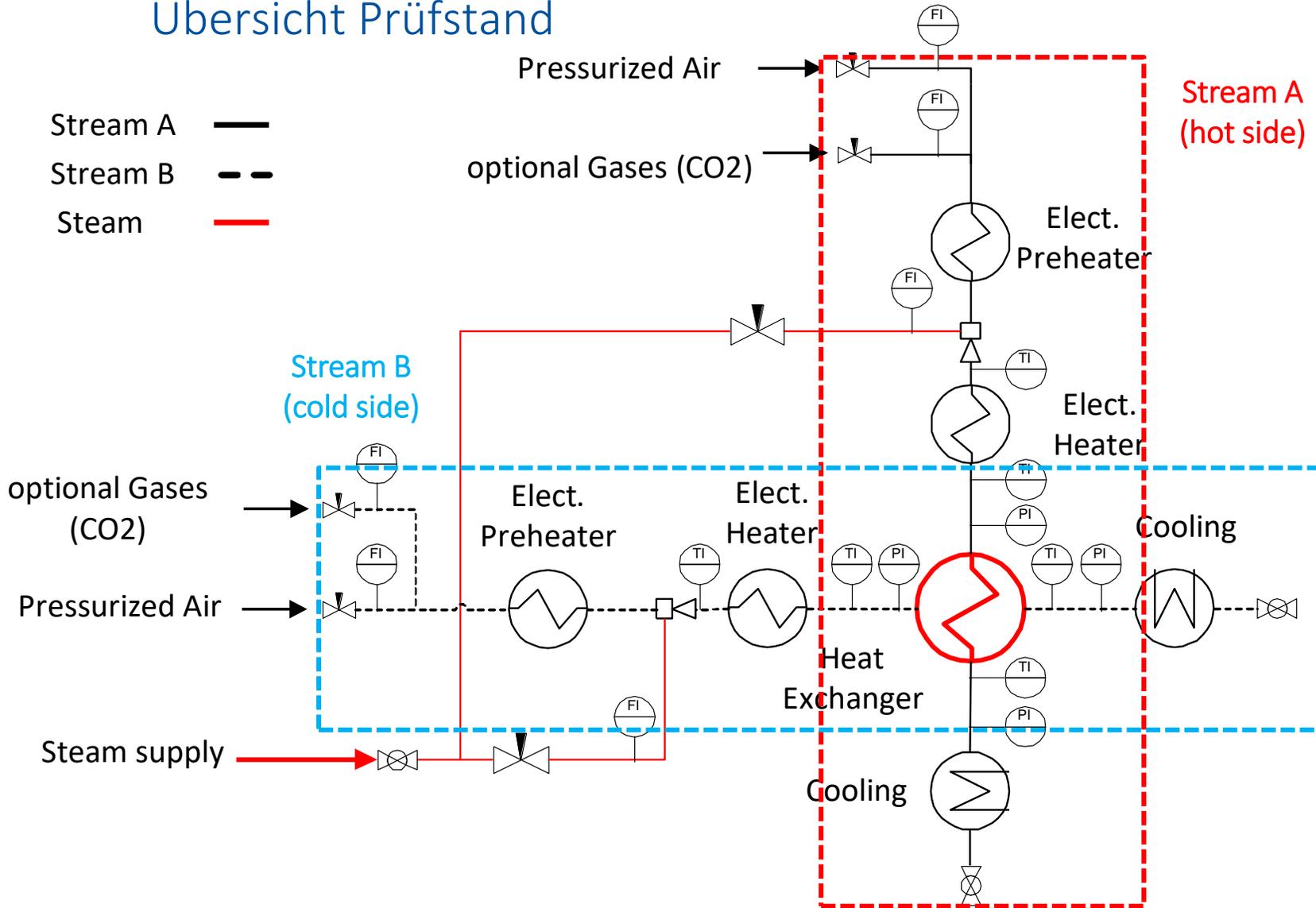


minimales Bauvolumen

Rippenparameter
(Abstand, Amplitude,
Wellenlänge)

Übersicht Prüfstand

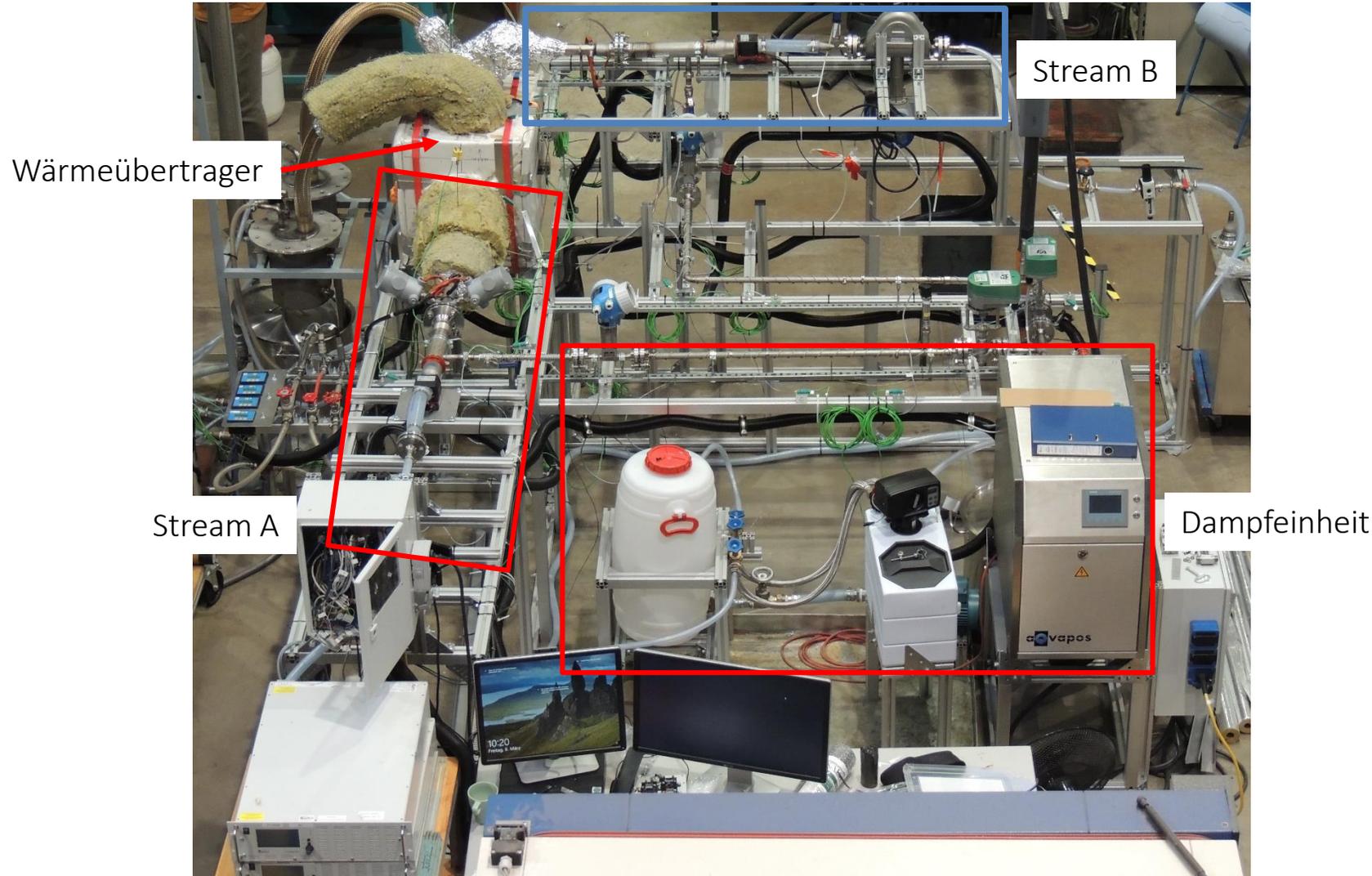
- Stream A ———
- Stream B - - -
- Steam ———



Prüfstand, wichtige Daten

- Maximale Temperatur am Wärmeübertragereintritt:
heiße Seite: 900°C
kalte Seite: 750°C
 - Volumenstrom Luft: 5-35 Nm³/h
 - Optionale Zugabe von Dampf & weiteren Gasen
- Experimente:**
- 2 Temperaturniveaus:
567/203°C
750/250°C
 - Volumenstrom Luft: 5-35 Nm³/h

Aufbau Prüfstand & Wärmeübertrager



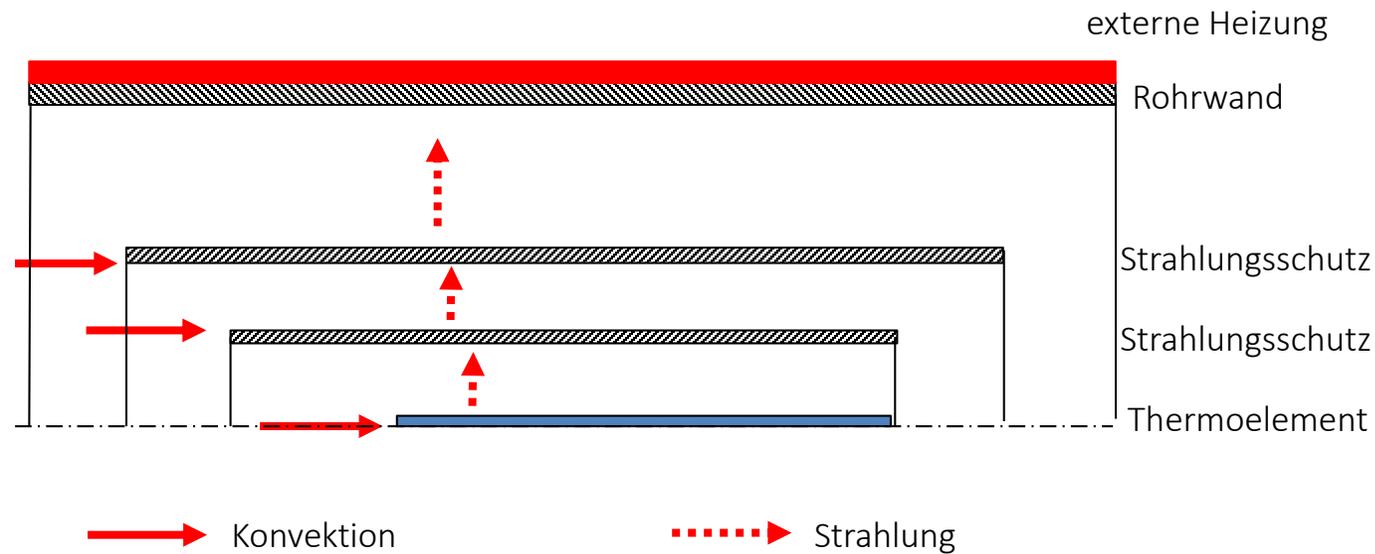
Wärmeübertrager

- 50mm mikroporöse Dämmung
- Zusätzliche Bohrungen für Wandthermoelemente im Wärmeübertrager (nur Plate-Fin)

Temperaturmessung

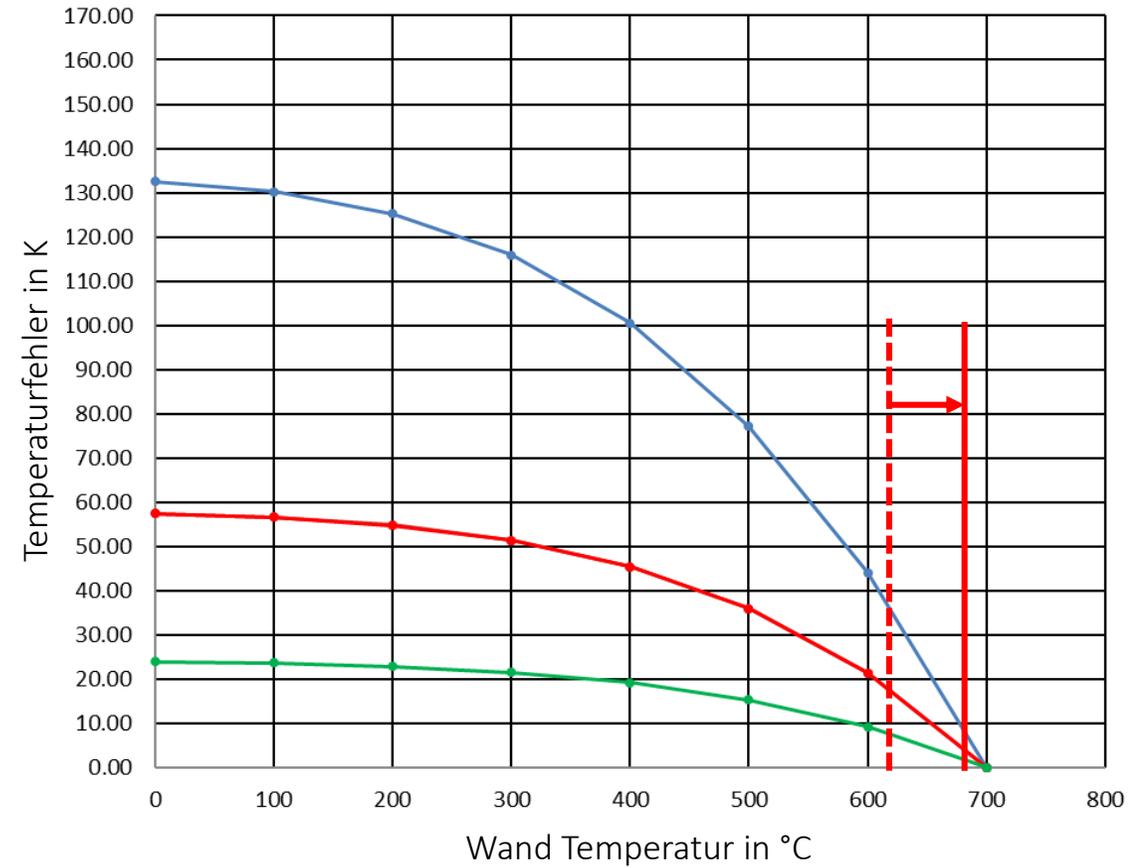
Einfluss der Wärmestrahlung auf Temperaturmessung reduzieren

- Kombination von doppeltem Strahlungsschutz und externer Beheizung
- Regelung der externen Heizung durch Thermoelemente auf der Wandoberfläche und an dem Heizdraht



$$\dot{Q}_\alpha \propto \alpha, T_{fl} - T_{w,i}$$

$$\dot{Q}_{Str} \propto \epsilon_{i,j}, T_{w,i}^4 - T_{w,j}^4$$

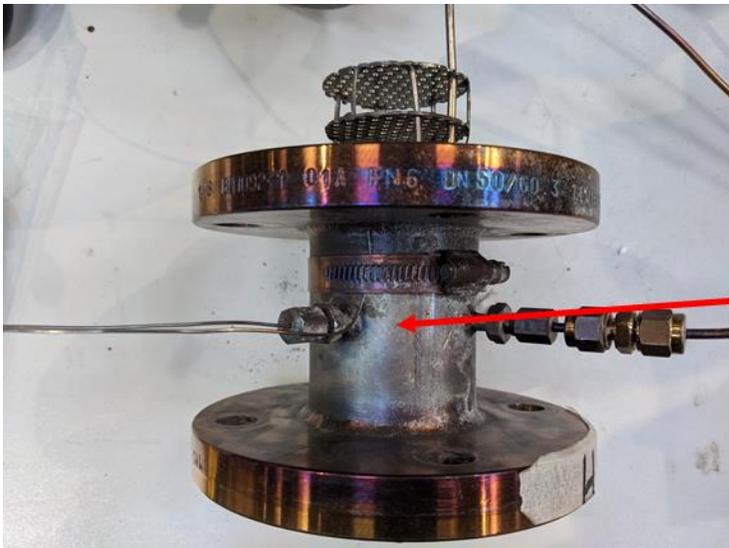


Temperaturmessung

Einfluss der Wärmestrahlung auf Temperaturmessung reduzieren

- Kombination von doppeltem Strahlungsschutz und externer Beheizung
- Regelung der externen Heizung durch Thermoelemente auf der Wandoberfläche und an dem Heizdraht

Messeinsatz



doppelter Strahlungsschutz



externe Beheizung um Messeinsatz angebracht



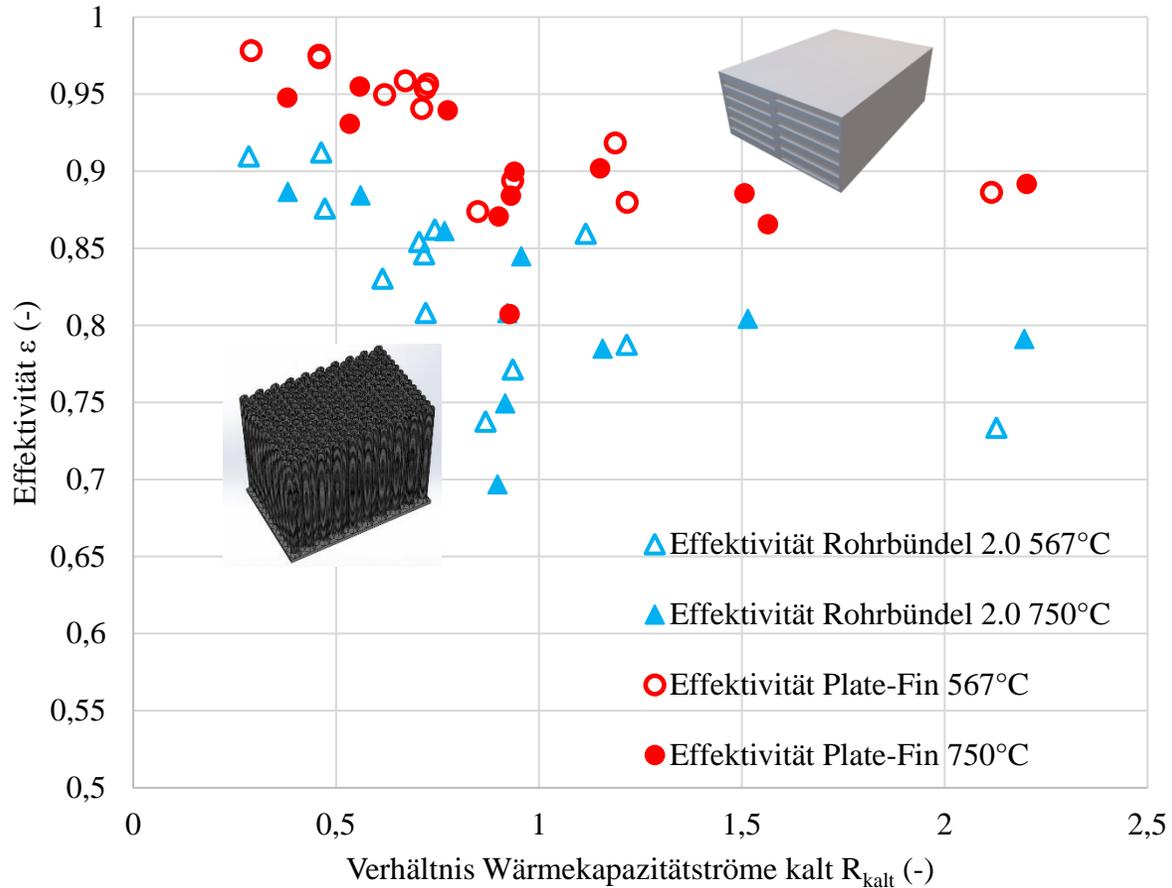
30 cm

Auswertungsmethode

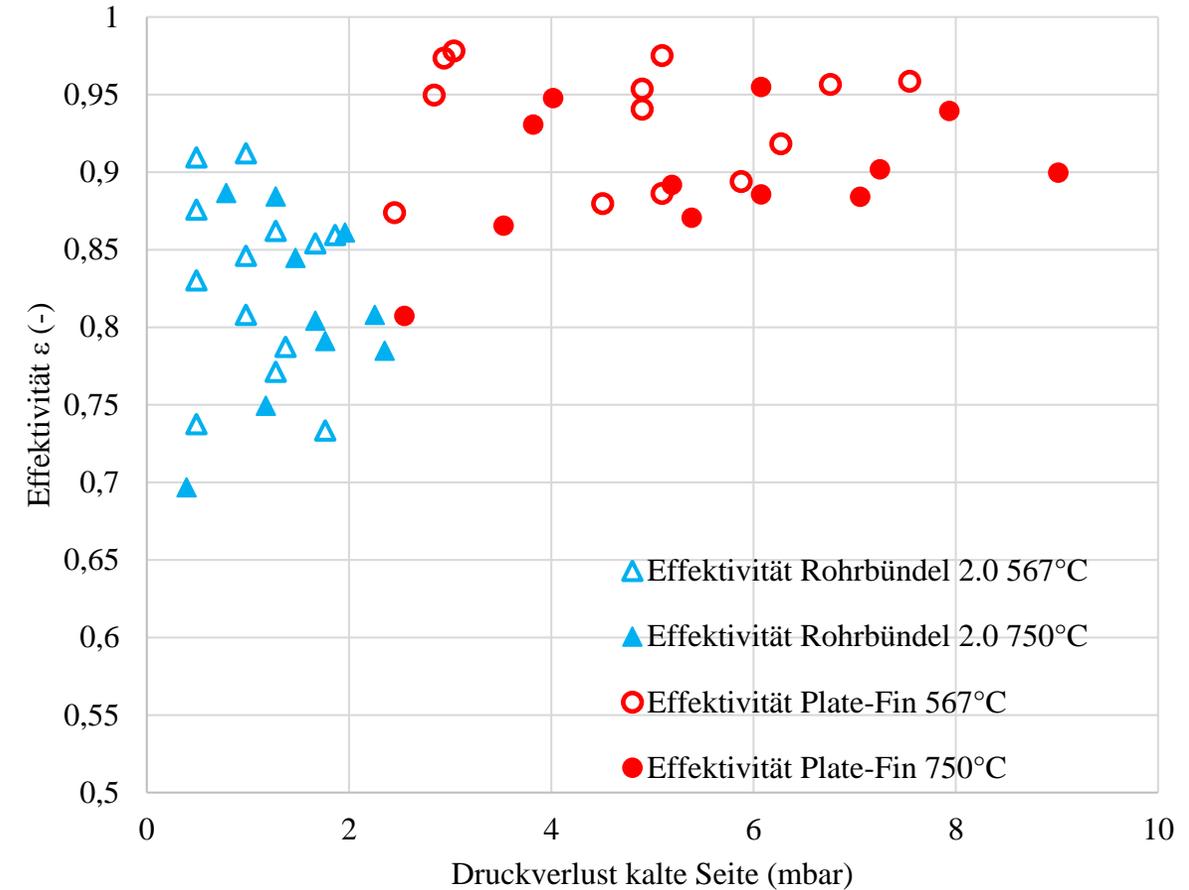
- Der Wärmeübertrager wird mittels zweier Methoden bewertet
 - Effektivität

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{(\dot{m} c_p)_{\text{cold}} (T_{\text{cold,out}} - T_{\text{cold,in}})}{(\dot{m} c_p)_{\text{min}} (T_{\text{hot,in}} - T_{\text{cold,in}})}$$

Ergebnisse Effektivität & axiale Wärmeleitung



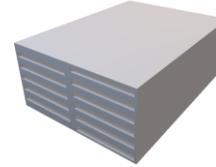
- Temperaturniveaus haben nur geringen Einfluss auf Effektivität



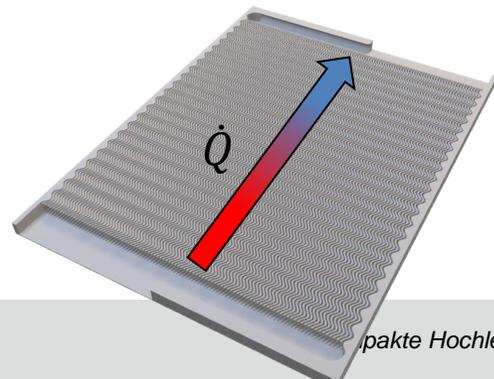
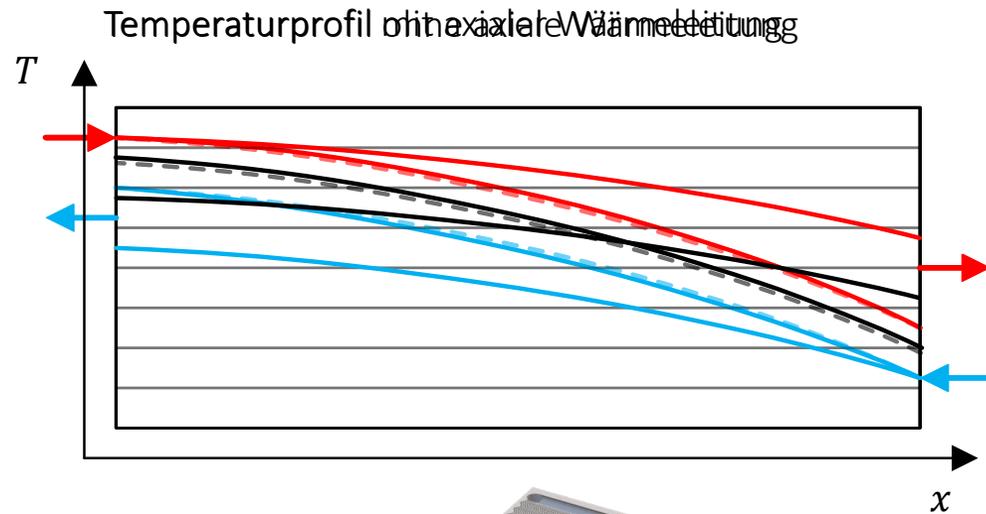
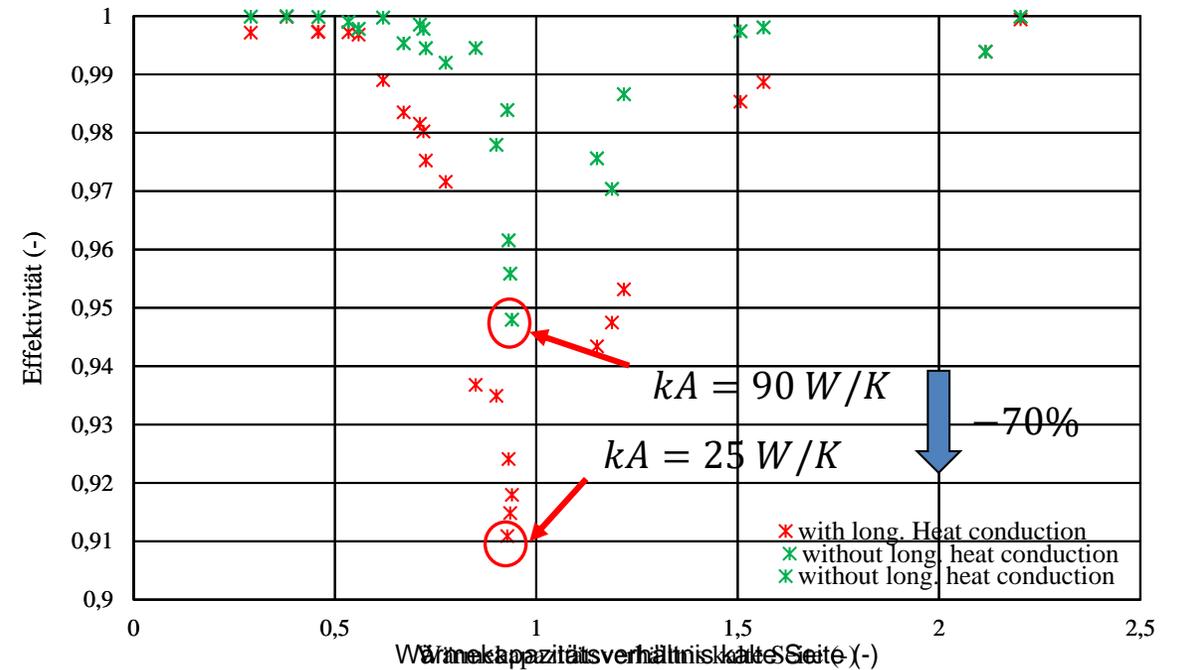
- Plate-Fin zeigt deutlich größere Abhängigkeit des Druckverlustes von der Strömungsgeschwindigkeit

Ergebnisse axiale Wärmeleitung

- Einfluss der axialen Wärmeleitung auf die Effektivität des Plate-Fin

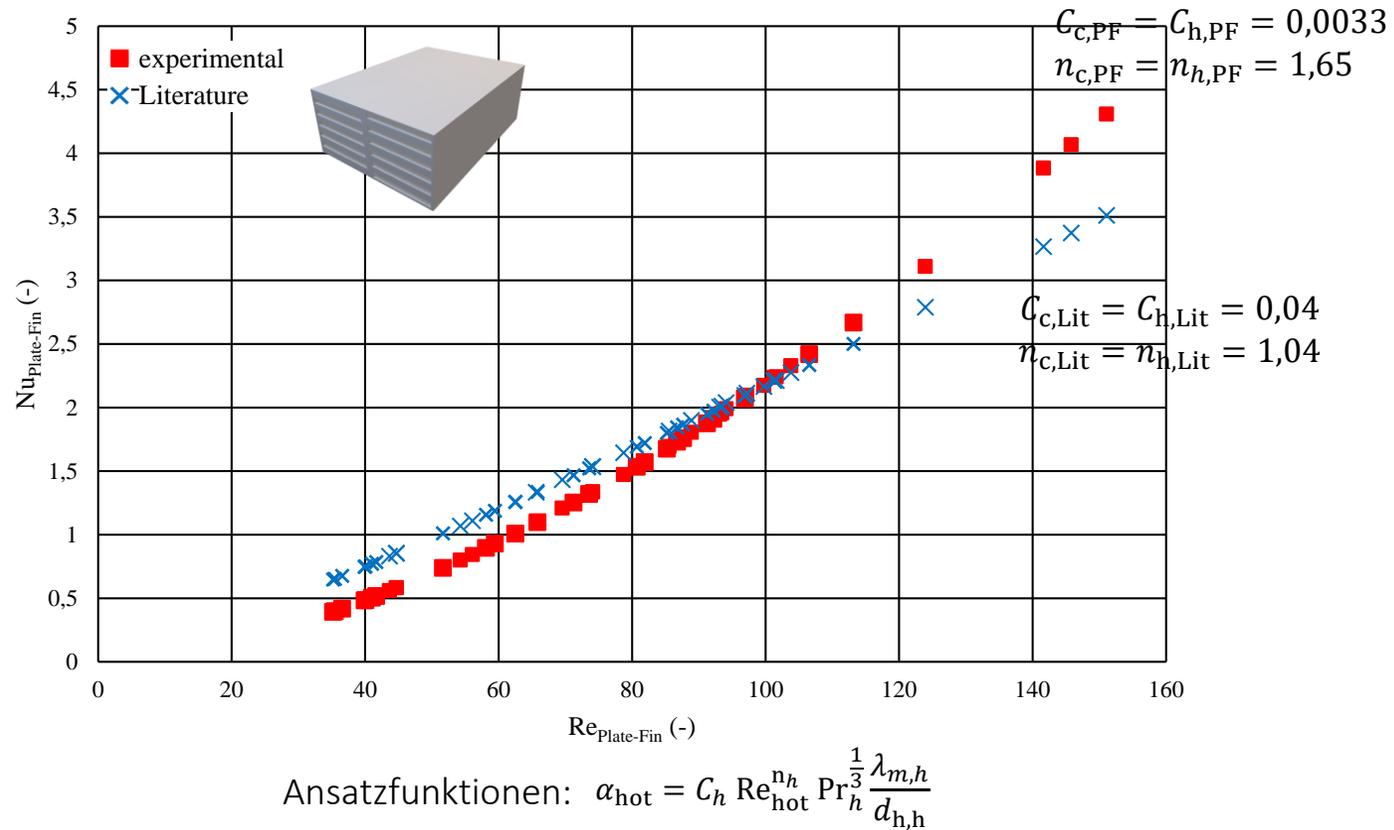


Effektivität in Abhängigkeit von axialer Wärmeleitung

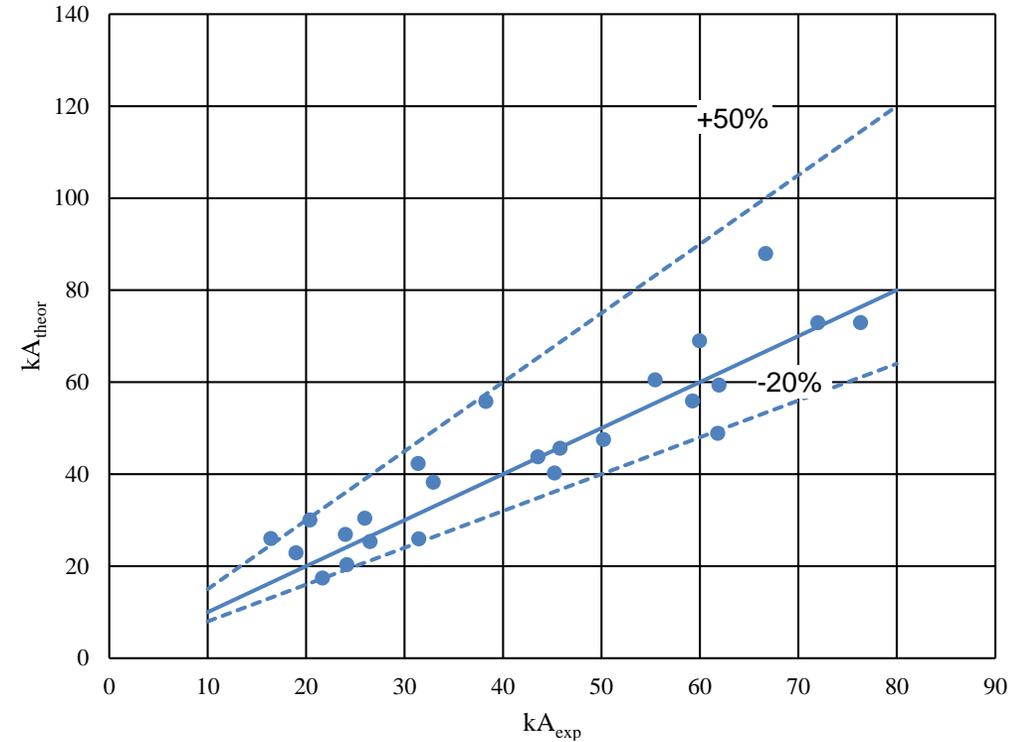


- Einfluss der axialen Wärmeleitung muss bei der Auslegung berücksichtigt werden!

Ergebnisse Wärmeübergangskoeffizienten beim Plate-Fin



- Abweichungen zwischen experimentellen und theoretischen Werten durch Messunsicherheiten begründet



- Paritätsplot ergibt bei Abweichungen zwischen -20 und +50% zwischen exp. und theo. kA-Werten

Zusammenfassung und Ausblick

- Ein “Plate-Fin” und ein Rohrbündel-Wärmeübertrager wurden ausgelegt, additiv hergestellt und experimentell untersucht
- Axiale Wärmeleitung wurde während des Design Prozesses des Plate-Fin berücksichtigt
- Ein multivariable Wilson-Plot ermöglicht die Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten aus den Messdaten
- Der Plate-Fin Wärmeübertrager erreicht eine Effektivität von >80%, in den meisten Fällen > 87% - 98%
- Der Wärmeübergangskoeffizient kann mittels einfacher Ansatzfunktionen beschrieben werden, auch wenn die Abweichung noch groß ist

Ausblick

- Weiteres Verbessern der entwickelten Strukturen für höhere Wärmeübergänge und geringere Druckverluste
- Verbessern der Temperaturmesstechnik um Abweichungen zu reduzieren
- Testen weiterer Ansatzfunktionen zur besseren Beschreibung der sich einstellenden Wärmeübergangskoeffizienten



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Leibniz Universität Hannover

Institut für Thermodynamik

M.Sc. Marco Fuchs

0511 762 14756

fuchs@ift.uni-hannover.de

Quellen

- [1] <https://www.gasconnect.at/aktuelles/news-presse/positionen/news/detail/News/wasserstoffherstellung-wie-geht-pyrolyse>
[Zugegriffen: 27-Sep-2021]
- [2] <https://www.toyota-media.de/blog/unternehmen/artikel/toyota-entwickelt-weltweit-ersten-wasserstoffbrenner-fur-industrie/text>
[Zugegriffen: 27-Sep-2021]
- [3] Leites, K.:MultiSchIBZ Projektbeschreibung, thyssenkrupp Marine Systems, 2021