Entwicklung von Solarabsorbern aus Stahl auf Basis partiell plattierter Hybridhalbzeuge

Dipl.-Ing. Lotta Koch[1], Dr.-Ing. Michael Hermann[1], Dipl.-Ing. Frank Steinbach[2], Dr.-Ing. Michael Trompeter[2], Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya[2]

[1]Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 / 45 88-57 44, Fax: +49 (0) 761 / 45 88-90 00
lotta.koch@ise.fraunhofer.de, http://www.ise.fraunhofer.de

[2]Institut für Umformtechnik und Leichtbau,TU Dortmund
Baroper Str. 301, 44227 Dortmund

Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der TU Dortmund (Projektleiter) mit dem Fraunhofer ISE und mehreren Industriepartnern, das von der FOSTA (Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.) bzw. AiF (ZUTECH-Projekt) gefördert wird, wird derzeit ein neuer Ansatz zur Entwicklung von Solarabsorbern verfolgt. Das untersuchte Verfahren basiert auf kaltwalzplattierten Verbunden aus kostengünstigem Stahl und anderen Metallen, die die Funktion einer Substratschicht für die spektralselektive Beschichtung oder einer Korrosionsschutzschicht übernehmen. Derart geeignete Verbunde werden im Bereich der zu erzeugenden Kanäle mit einem Trennmittel versehen und in einem zweiten Walzplattierschritt partiell flächig miteinander verbunden. Anschließend wird der Gesamtverbund durch Innenhochdruckumformen (Hydroforming) in einem Werkzeug ausgeformt. Die Prozesskette ist schematisch in Abbildung 1 dargstellt.

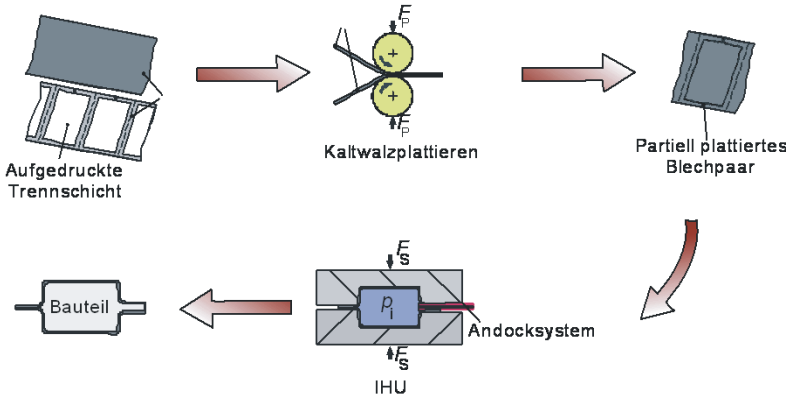

Abbildung 1: Prozesskette Walzplattieren mit Innenhochdruckumformen (IHU) [1]

Das Verfahren ist dem Rollbond-Verfahren mit Aluminium recht ähnlich. Zwei wesentliche Unterschiede sind jedoch die deutlich bessere Umformbarkeit von Stahl sowie das Umformen in Werkzeugen. Beides führt zu einer wesentlich höheren Flexibilität bei der Gestaltung der Kanalquerschnitte; so sind größere Querschnittsflächen möglich, und die Kanalhöhen können sich innerhalb einer Geometrie unterscheiden (z. B. zur Ausbildung von Sammelkanälen). Die Kanalstrukturen werden mit Hilfe des am Fraunhofer ISE entwickelten FracTherm®-Verfahrens [2] erstellt. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines möglichen Solarabsorbers sowie einen Schnitt durch einen beispielhaften Plattierverbund. In Abbildung 3 ist ein Beispiel eines Materialverbundes aus drei Bändern und rechts die Struktur eines FracTherm®-Absorbers zu sehen.

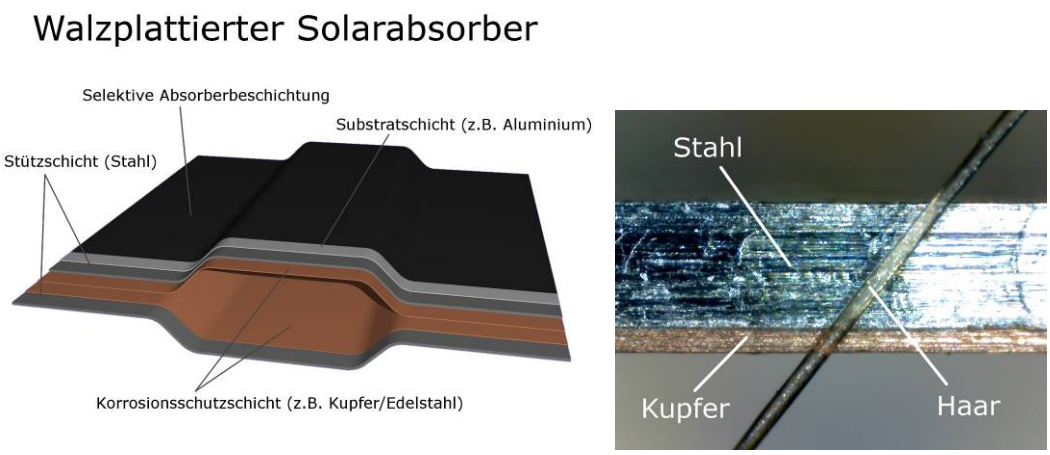

Abbildung 2: Links: Schematischer Aufbau eines walzplattierten Solarabsorbers, rechts: Schnitt durch einen beispielhaften Plattierverbund

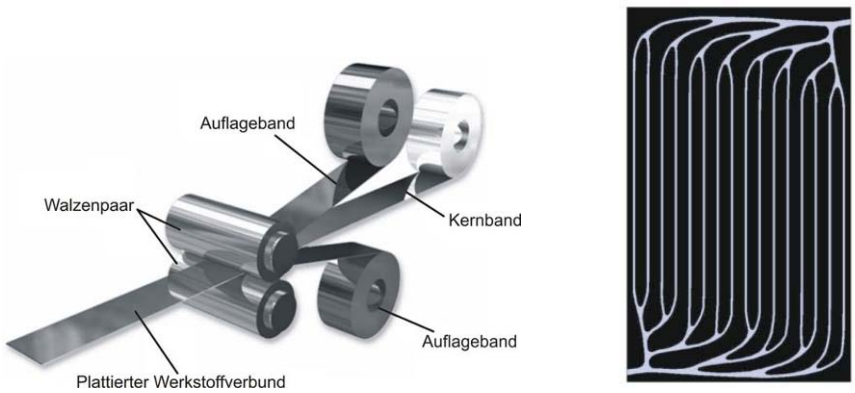

Abbildung 3: Links: Walzplattieren am Beispiel eines Werkstoffverbundes aus drei Bändern [3],
rechts: Struktur eines FracTherm®-Absorbers.

Auswahl möglicher Metallverbunde

Zunächst wurde eine Materialmatrix erstellt, in der mögliche Verbunde miteinander verglichen wurden. Dabei wurden diverse Randbedingungen und Konsequenzen der einzelnen Kombinationen berücksichtigt, z. B. Umformbarkeit, verfügbare Blechdicken der Ausgangsmaterialien, resultierende Gesamtdicke nach den einzelnen Plattierschritten, Masse, Materialkosten, resultierender Kollektorwirkungsgradfaktor F' sowie Recyclingfähigkeit. Eine mögliche Variante ist beispielsweise ein Plattierverbund Kupfer-Stahl-Kupfer--Kupfer-Stahl-Kupfer (Kupfer sowohl innen als Korrosionsschutzschicht als auch außen als Substratschicht für die spektralselektive Beschichtung), dargestellt in Abbildung 4. Ein Plattierverbund Edelstahl--Edelstahl ohne zusätzlichen Korrosionsschutz und ohne Substratschicht wurde ebenfalls diskutiert, es konnte jedoch im Plattierversuch keine ausreichende Haftung erzielt werden. Dies deckt sich mit Erfahrungen des Industriepartners. Generell lässt sich sagen, dass zwei verschiedene Materialien im Plattierverbund durch den vorhandenen Potentialunterschied meist höhere Festigkeiten erzielen als zwei gleichartige Materialien. Für die Materialpaarung Kupfer-Kupfer, der in der Trennebene des geplanten Absorbers vorliegt, konnte zwar eine geringere Schälfestigkeit (Haftung) als für Kupfer-Stahl erzielt werden, sie liegt aber nach der dem Plattierprozess anschließenden Glühbehandlung in einem für Solarabsorber als vielversprechend angesehenem Bereich.

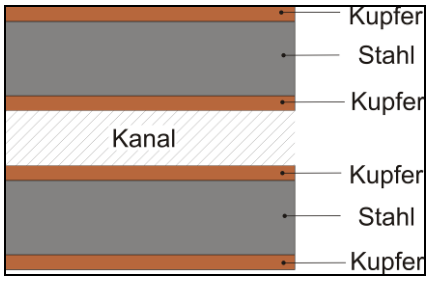

Abbildung 4: Gewählter Materialverbund

Voruntersuchungen zur Blechumformung

In der ersten Projektphase bestand das Hauptziel darin, die strömungsmechanischen Eigenschaften der zu bildenden Kanalstrukturen und die fertigungstechnischen Möglichkeiten in Einklang zu bringen. Dazu wurden im Rahmen von Voruntersuchungen am Fraunhofer ISE kleine 2-D-FracTherm®-Kanalstrukturen (270 mm x 270 mm) entworfen. Im zweiten Schritt wurde daraus ein Umformwerkzeug für die Innenhochdruckumformung mit definierter Querschnittsgeometrie erstellt

(Abbildung 5). Der Einlaufradius der Flanken betrug zunächst 2 mm, die Kanaltiefe 4 mm, die vorgesehene Blechdicke 0,5 mm. Am IUL wurde die Ausformung der Kanalstrukturen per FE-Simulation ermittelt (Abbildung 6).

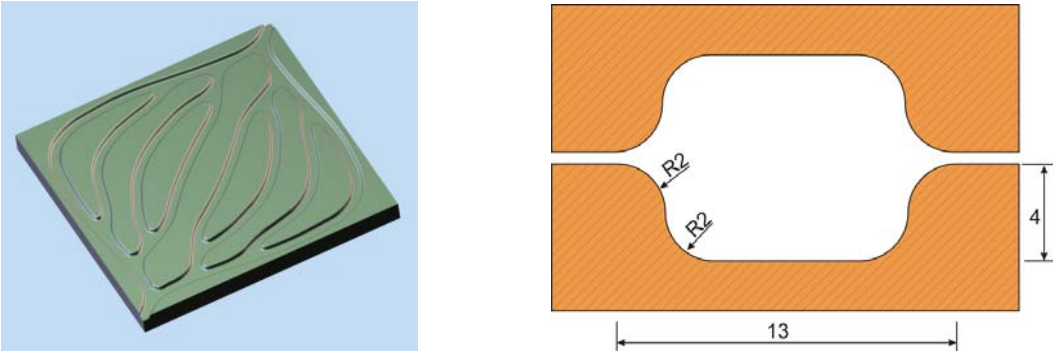

Abbildung 5: Links: Entwurf eines Umformwerkzeugs für die Innenhochdruckumformung, rechts: Querschnitt durch einen Kanal am der engsten Stelle

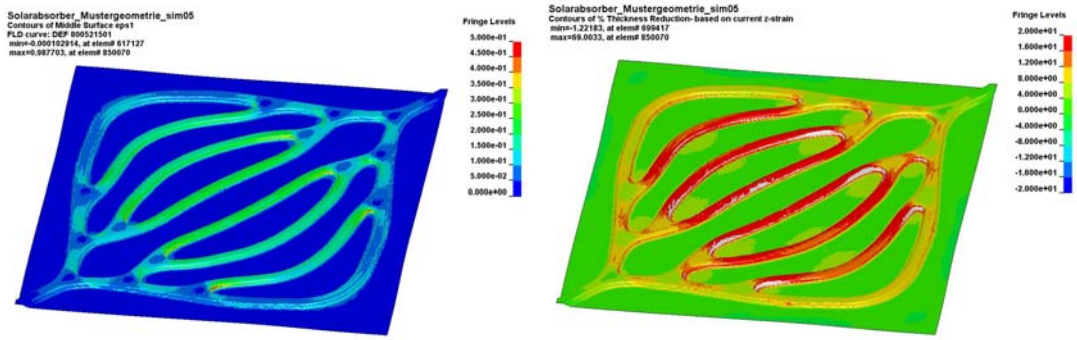

Abbildung 6: Simulationsergebnisse eines noch nicht optimierten Musterbauteils mit FracTherm®-Kanalstruktur bei einer Ausformung in das in Abbildung 5 dargestellte Formwerkzeug hinein. Material: DC04, Blechdicke 0,5 mm, Einlaufradien 2 mm, Innendruck 800 bar, links: Vergleichsdehnung, rechts: Blechdickenreduzierung.

Es wird deutlich, dass insbesondere im Bereich der Verzweigungen und innen liegenden, schmalen Kanälen hohe Dehnungen entstehen. Der weiße Bereich im rechten Bild der Abbildung 6 signalisiert eine kritische Blechdickenreduzierung von über 20 %.

Um die Simulationen mit Messdaten validieren zu können, wurde am IUL zunächst ein Umformwerkzeug mit einem einseitig ausgebildeten geraden Kanal entwickelt, dessen Querschnittsgeometrie durch Einlegeformen variabel gestaltet ist (Abbildung 7).

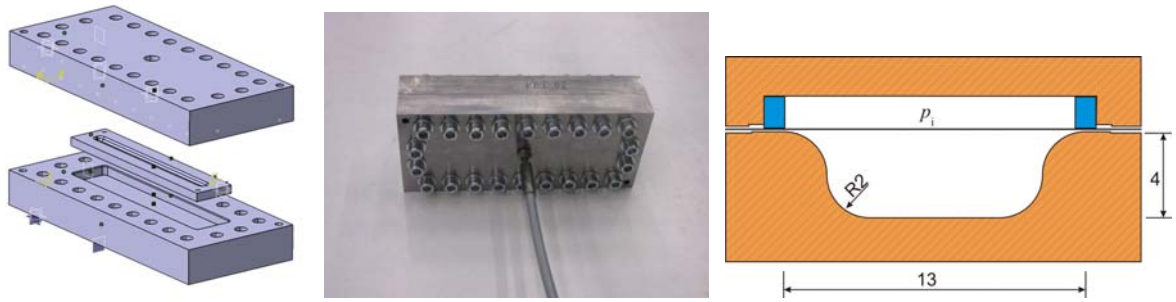

Abbildung 7: Umformwerkzeug für einen einseitig zu erzeugenden Kanal, links: CAD-Entwurf offen, Mitte: Umformwerkzeug geschlossen, rechts: Kanalquerschnitt

Die durchgeführten Kanalformtests konnten zur Validierung der FEM-Simulation herangezogen werden. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen FEM und Experiment, so dass der Prozess mittels FEM-Simulation auslegbar ist. Die für die gewählte Kanalbreite im Experiment ermittelte Reißergrenze liegt bei einer Polhöhe von 3,2 mm, was ebenfalls in der Simulation erreicht wurde.

Abbildung 8 zeigt eine Kanalprobe aus walzplattiertem Material mit einer Polhöhe von 3,2 mm, einen Schnitt durch diese Und ein doppelseitig erzeugtes Demonstratorbauteil.

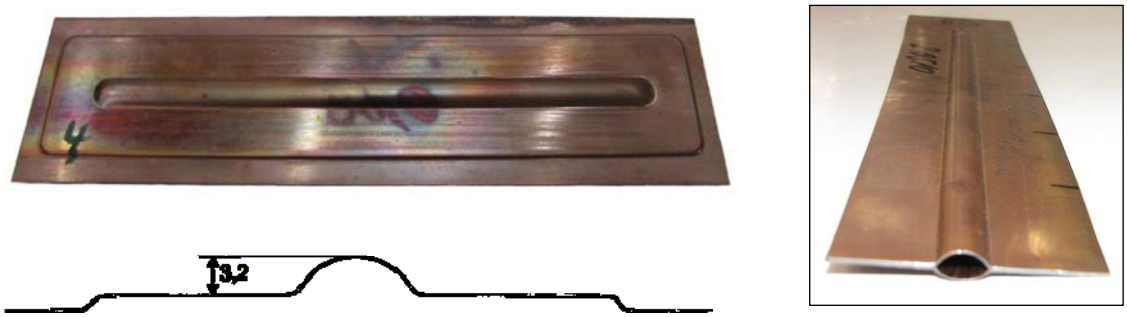

Abbildung 8: Oben: Probe einer einseitigigen Kanalausformung (Kupfer-Stahl-Kupfer), unten: Querschnitt durch die Probe, rechts: Demonstratorbauteil aus walzplattiertem Material (Kupfer-Stahl-Kupfe--Kupfer-Stahl-Kupfer).

Um die Umformeigenschaften der Verzweigungsstruktur zu untersuchen, wurden für die Probegeometrie zwei verschiedene Konturen entworfen (Abbildung 9) und die Ausformung in Grenzformänderungsdiagrammen (FLD)[1] miteinander verglichen (Abbildung 10). Die FLD zeigen kritische Punkte für die spitze Kontur (Verformungspunkte liegen teilweise oberhalb der Grenzformänderungskurve), die flachere Kontur weist bessere Umform-Eigenschaften auf, da hier der Bereich des Streckziehens (Biaxiale Umformung im rechten Bereich des FLD) besser ausgenutzt werden kann.

[1] Ein Grenzformänderungsdiagramm ist ein Werkzeug zur Bestimmung kritischer Umformbereiche sowohl für die Praxis als auch für die FEM.

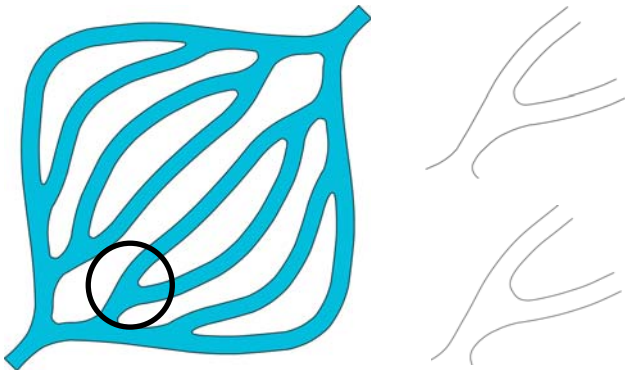

Abbildung 9: Untersuchung des Einflusses der Verzweigungskontur, rechts oben: spitze Kontur, rechts unten: flache Ausführung

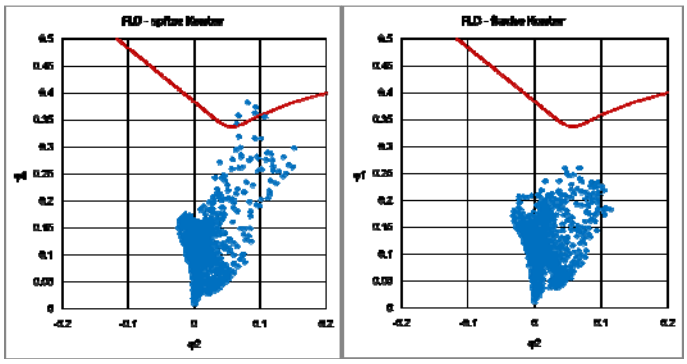

Abbildung 10: Grenzformänderungsdiagramme (FLD) zweier Verzweigungskonturen (links: spitze Kontur, rechts: flache Kontur)., φ_1 stellt hierbei die 1. Hauptumformungrichtung, φ_2 die 2. Hauptfomungrichtung dar. Die auftretenden Dehnungswerte sollen unterhalb derGrenzformänderungskurve liegen (rote Linie).

Voruntersuchung zur Trennmittelapplikation

Bei der Erprobung der verschiedenen Trennmittelapplikationsmethoden kristallisierte sich die Methode des Aufspritzens der Geometrie mit Hilfe einer Schablone als am besten geeignet heraus. Als günstig im Sinne einer geringen Trocknungszeit und einer hohen Konturgenauigkeit der aufgesprühten Geometrie zeichneten sich sowohl eine MoS_2-Lösung als auch ein Graphit-Gleitlack-Spray aus. Die durch das Walzen entstehende Längung der Geometrie kann durch den Walzgrad im Vorfeld berechnet werden wie in Abbildung 11 schrittweise dargestellt ist. In Schritt 4 der Abbildung 11

sieht man eine sehr gute Übereinstimmung von der Sollform und der tatsächlichen Längung. Die Sollform wurde hier um die bei der Laborwalze entstehende Krümmung im Kupferband korrigiert.

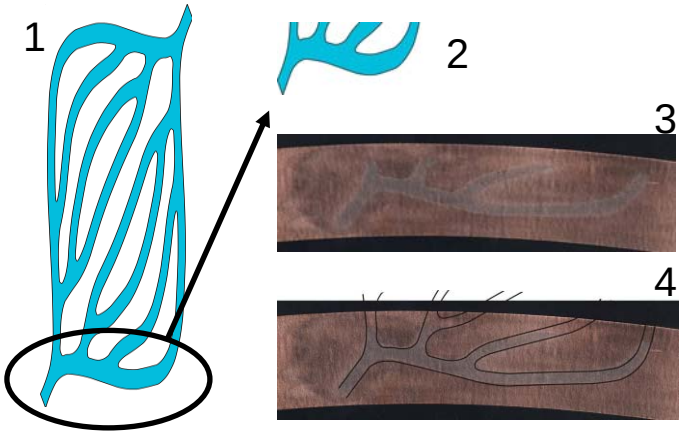

Abbildung 11: 1 Mit dem Walzgrad 52,5 % gestauchte Probegeometrie, 2 Ausschnitt der Probegeometrie passend zur Plattierbreite der Labor- Plattierwalze, 3 Trennmittelkontur auf Kupferblech nach dem Plattieren, 4 Sollendform korrigiert um die Bandkrümmung über 3

Einfluss des Absorberquerschnitts auf die thermische Effizienz und den Druckverlust

Um den Einfluss des Absorberquerschnitts auf die thermische Effizienz und den Druckverlust theoretisch abzuschätzen wurde eine Parameterstudie in zwei Teilen durchgeführt. Die Formeln für den Kollektorwirkungsgradfaktor F' nach [Duffie/Beckman] wurden an Rechteckkanäle in Stahlbauweise angepasst.

Die Parameterstudien 1 und 2 basieren auf folgenden Annahmen:

- 1 m x 1 m Kollektorfläche mit geraden durchströmten Kanälen
- Laminare Strömungsbedingungen
- Effektive Wärmeleitfähigkeit des Plattierverbunds λ = 50 W/(mK)
- Plattendicke d = 1 mm

Im Falle der Parameterstudie 1 wurde die Summe der durchströmten Flächen konstant gehalten.

$A=A_1+A_2+\ldots+A_n$ = 3,8 cm² (Standard-Harfenabsorber) ➔ Fluidinhalt konstant.

Die Fläche wurde aufgeteilt in 10, 15, 20 oder 30 Steigröhrchen. Außerdem wurde eine Formvariation von kreisrund über quadratisch hin zu flachen Rechtecken durchgeführt (Abbildung 12). Es wurde der Einfluss von Temperatur, Massenstrom und Querschnittsgeometrie auf F' und Δp untersucht.

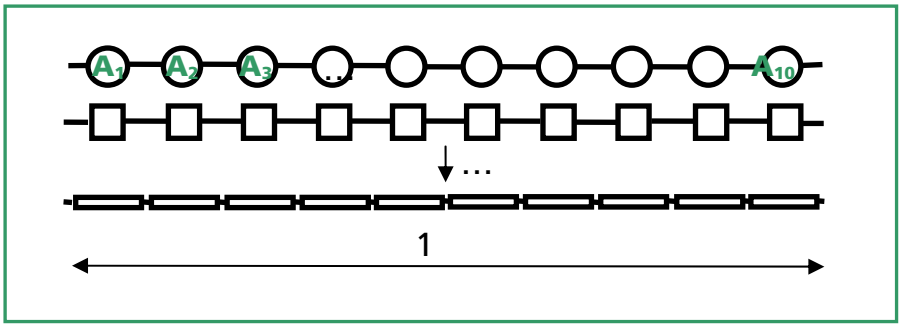

Abbildung 12: Formvariation der Kanalquerschnitte über 1 m Absorberbreite in der Parameterstudie 1

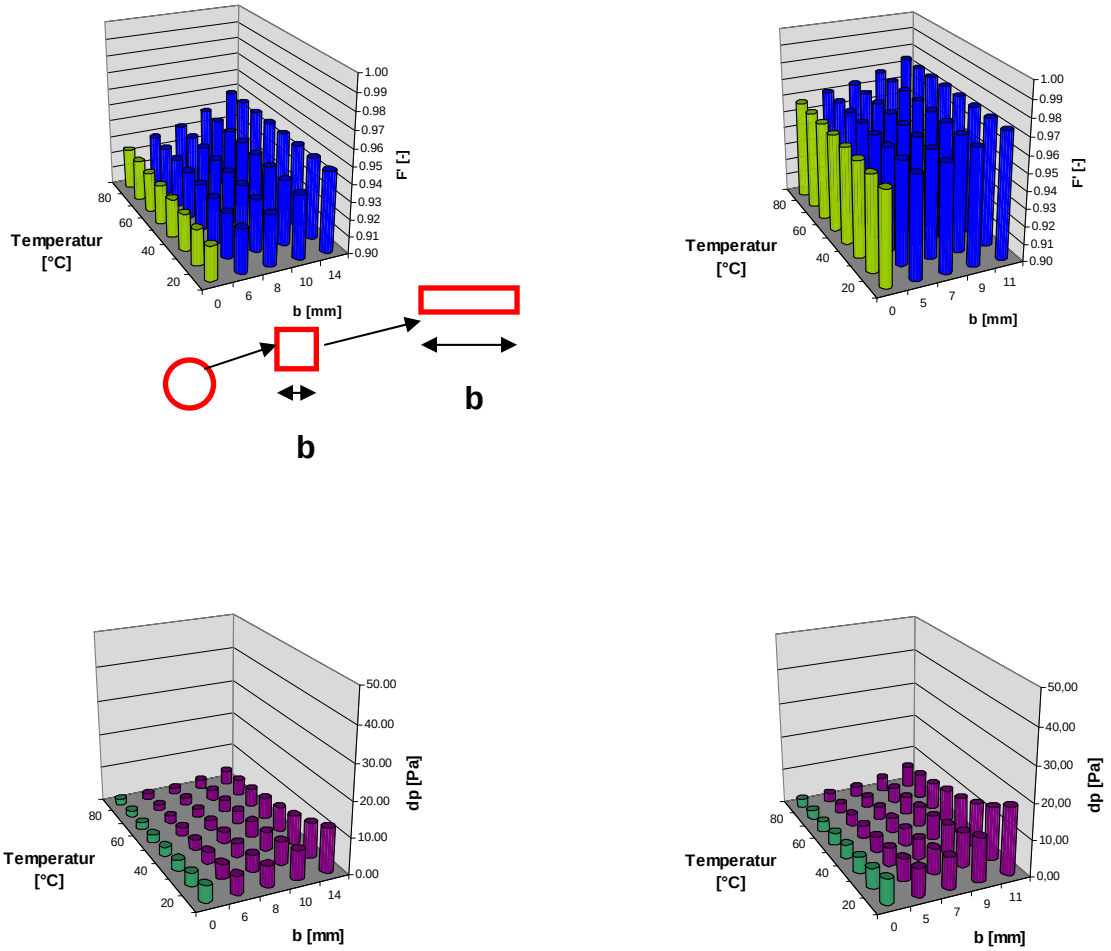

Abbildung 13: Einfluss der Absorberquerschnittsform und der Temperatur auf F' (oben) und Δp (unten) für 10 Kanäle (links) und 15 Kanäle (rechts) bei einem Massenstrom von 10 kg/h in Parameterstudie 1.

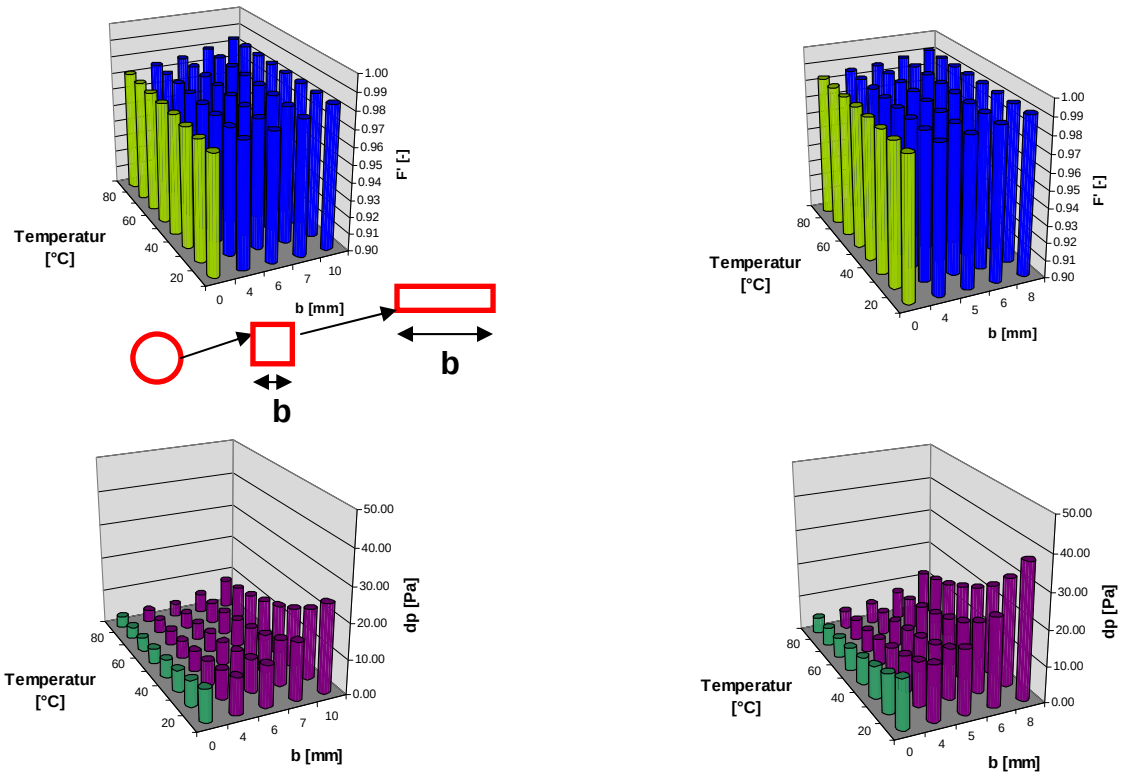

Abbildung 14: Einfluss der Absorberquerschnittsform und der Temperatur auf F' (oben) und Δp (unten) für 20 Kanäle (links) und 30 Kanäle (rechts) bei einem Massenstrom von 10 kg/h in Parameterstudie 1.

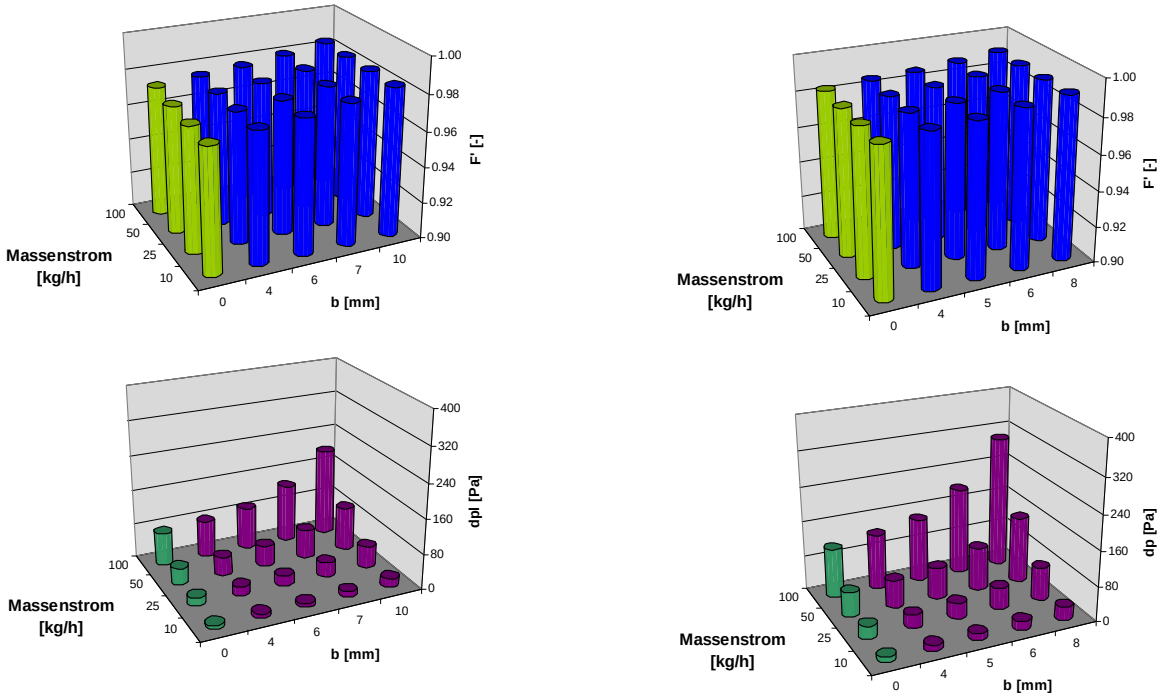

Abbildung 15: Einfluss der Absorberquerschnittsform und des Massenstroms auf F' (oben) und Δp (unten) für 20 Kanäle (links) und 30 Kanäle (rechts) bei einer Temperatur von 20 °C in Parameterstudie 1.

In einer Parameterstudie 2 wurde die Summe der durchströmten Fläche variiert, der Kanalabstand wurde konstant gehalten (h variabel, b konstant). Die Fläche wurde wiederum in 10, 15, 20 oder 30 Steigröhrchen aufgeteilt. Es wurde der Einfluss von Temperatur, Massenstrom und Querschnittsgeometrie auf F‘ und Δp untersucht.

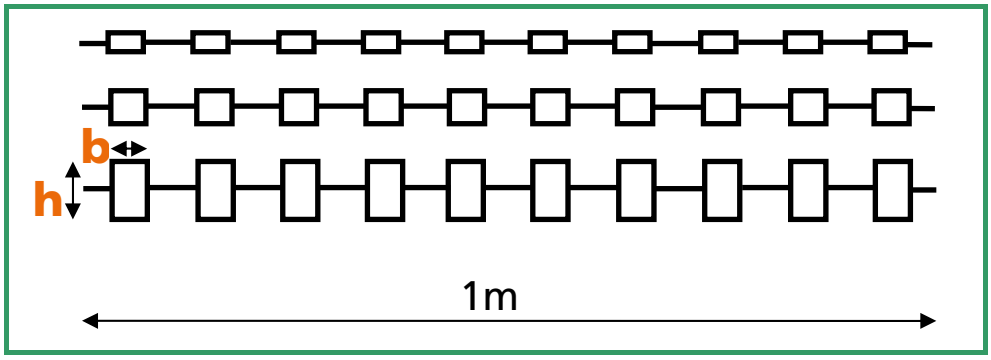

Abbildung 16: Formvariation der Kanalquerschnitte über 1 m Absorberbreite in der Parameterstudie 2

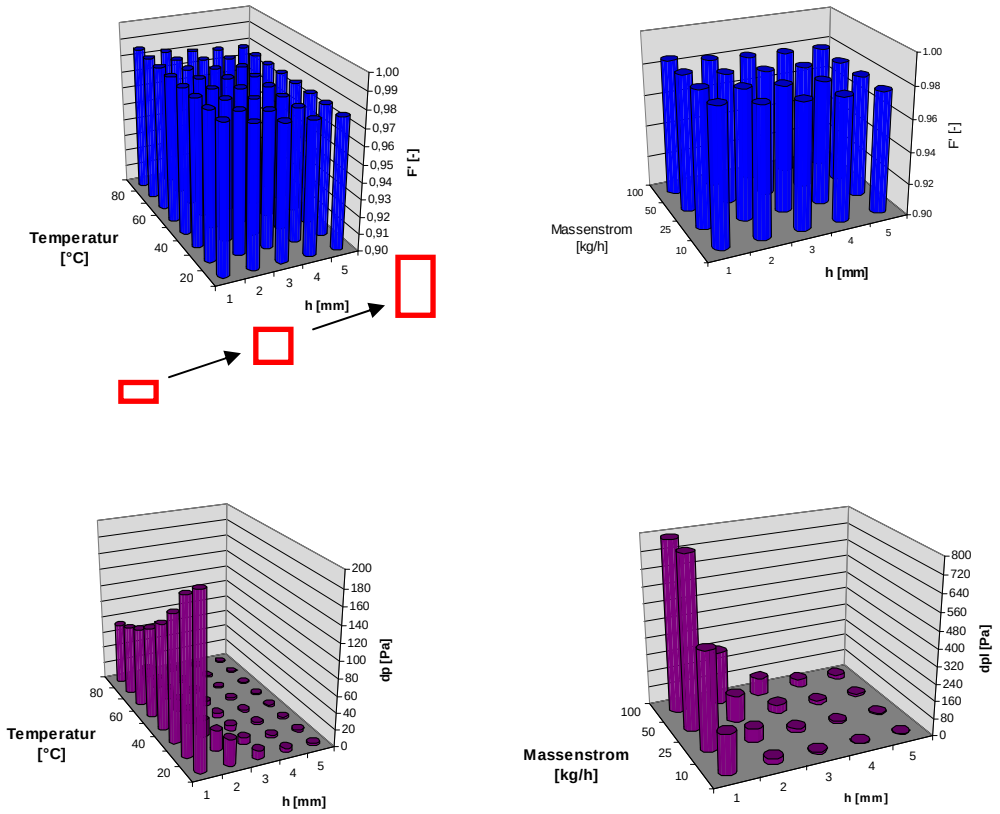

Abbildung 17: Einfluss der Höhe des Absorberquerschnitts, der Temperatur bei einem Massenstrom von 10 kg/h (links) und des Massenstroms bei einer Temperatur von 20 °C (rechts) auf F’ (oben) und Δp (unten) für 20 Kanäle in Parameterstudie 2.

Die Ergebnisse der Parameterstudie 1 sind in Abbildung 13 bis Abbildung 15 dargestellt. Hier sind die Werte für den Kreisquerschnitt farbig abgesetzt, da hier die Formeln leicht verschieden zu denen in Rechteckkanälen sind. Die Ergebnisse von Parameterstudie 2 für 20 Kanäle sind in Abbildung 17 dargestellt.
Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung der Kanalanzahl bei konstanter durchströmter Fläche und einem festen Verhältnis von Höhe zu Breite im Kanal zu einer deutlichen Erhöhung der thermischen Effizienz bei gleichzeitig geringer Erhöhung des Druckverlustes führt. Eine Formvariation von kreisförmig zu abgeflacht bringt nur eine geringe Erhöhung der thermischen Effizienz bei deutlicher Erhöhung des Druckverlustes. Wählt man die durchströmte Fläche variabel und die Kanalabstand konstant, so erhöht sich die thermische Effizienz bei geringen Kanalhöhen, der Druckverlust steigt aber sehr schnell an. Zusammenfassend sind diese Ergebnisse in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnis Parameterstudie

Durchströmte Gesamtfläche A	Höhe/ Breite h/b	Anzahl Kanäle n	Thermische Effizienz F’	Druckverlust Δp
Const.	Const.	↑	↑↑	↑
Const.	↓	Const.	↑	↑↑
↓	↓	Const.	↑	↑↑

Fazit und Ausblick

Insgesamt dienen die Voruntersuchungen dazu, die Möglichkeiten und Grenzen des neuen Fertigungsverfahrens in Abhängigkeit der gewählten Materialverbunde aufzuzeigen, um damit die Randbedingungen für FracTherm®-Absorberentwürfe zu ermitteln. Aus der Parameterstudie heraus ist unsere Empfehlung für eine Kanalstruktur im Sinne einer Erhöhung der Gesamteffizienz nahezu runde Kreisquerschnitte mit geringen Kanalabständen. Ein weiterer wichtiger Aspekt für eine endgültige Entscheidung für eine Absorbergeometrie ist die Qualität der selektiven Beschichtung, die ebenfalls stark von der deren Oberfläche abhängt.
Nach Fertigung erster Muster können diese am Fraunhofer ISE mit Hilfe eines Fluiddynamiktestdstands hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften untersucht werden.

Im Rahmen dieses Projektes soll ein Musterabsorber nach den Empfehlungen der Parameterstudie unter den untersuchten Randbedingungen gefertigt werden und in einem Standard-Kollektorgehäuse vermessen werden. Auf Grund vorhandener, geringer Plattierwalzbreiten wird der Absorber modular aufgebaut. Hier bietet sich die Möglichkeit, ein geeignetes Verbindungskonzept zu entwickeln, um modulare Größen z.B. für solare Dächer leicht zu ermöglichen.

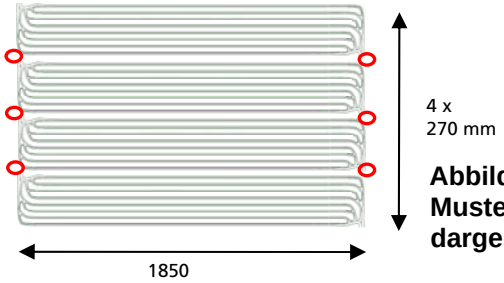

Abbildung 18: Schematische Skizze eines möglichern Musterabsorbers aus 4 Streifen mit 270 mm Länge, dargestellt ohne Sammelkanal, Anschlusskonzept noch offen

Literatur:

[1] Kleiner, M., et al. (2007): Fertigung innovativer IHU-Stahlbauteile auf Basis neuartiger,partiell plattierter Blechhalbzeuge. Abschlussbericht zum FOSTA-Projekt P565, Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf

[2] Hermann, M., (2005) Bionische Ansätze zur Entwicklung energieeffizienter Fluidsysteme für den Wärmetransport, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation

[3] Köhler, M.: Plattiertes Stahlblech. In: Technical bulletin SIZ. WickederWestfalenstahl, 2004

[4] Duffie/Beckman (2006), Solar Engineering of Thermal Processes, 3. Edition, John Wiley & Sons, Inc.