



Stephan Scholl (Herausgeber)  
**Institut für Chemische und Thermische  
Verfahrenstechnik**  
Institutsbericht 2021 – 2023



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8953>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

## 4 Aktuelle Forschung

### 4.1 Fouling und Reinigung

#### 4.1.1 Strömungsmessungen auf strukturierten wärmeübertragenden Oberflächen

(Lukas Rohwer, M.Sc.)

Eine Möglichkeit, den thermischen Wirkungsgrad von Wärmeübertragern zu erhöhen, besteht darin, die Wärmeübertragungsflächen zu strukturieren, was zu einer vergrößerten Oberfläche und verstärkten Turbulenzen in der Flüssigkeitsströmung führt. Hierzu können beispielsweise Dellenstrukturen genutzt werden. Die lokal erhöhte Turbulenz führt zu einer höheren Wandschubspannung, die unter Umständen die Ablagerung von Partikeln unterdrückt und so eine Selbstreinigung der Oberfläche bewirkt. Um diese Phänomene besser zu verstehen wird im Rahmen dieses Projektes die Strömungsdynamik innerhalb der Vertiefung experimentell mit stereoskopischer Mikro Particle Image Velocimetry (Stereo  $\mu$ PIV) untersucht.

Bereits aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass sich in sphärischen Dellen in Abhängigkeit der Reynoldszahl asymmetrische Wirbelstrukturen entwickeln, die periodisch um einen Winkel von  $\pm 45^\circ$  zur Hauptströmungsrichtung oszillieren. Betrachtet man jedoch die Ablagerungsstrukturen, die sich über einen längeren Zeitraum von mindestens 30 Minuten ausbilden, so zeigt sich, dass diese hinter der Delle symmetrisch zur Hauptströmungsrichtung ist. Diese Beobachtungen, gemeinsam mit den erzielten Simulationsergebnissen, lassen vermuten, dass die kurzfristige Asymmetrie des Wirbels einen langfristig symmetrischen Effekt auf das Ablagerungsverhalten bewirkt.

Die lokalen Strömungsmessungen erfolgen in einem Kanal, der aus einem Gehäuse und einem Deckel mit Fenstern für die optische Zugänglichkeit besteht. Die Strömungsgeschwindigkeit ist von 1 m/s bis 4 m/s einstellbar, was zu Reynoldszahlen von  $Re = 8.200$  bis  $32.700$  führt, die mit dem hydraulischen Durchmesser des Kanals und für Wasser bei  $30^\circ\text{C}$  berechnet wurden. In die Messstrecke können Versuchsplatten mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen eingesetzt werden. Diese Strecke hat einen rechteckigen Querschnitt von  $18\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  über eine Länge von 520 mm. Nach der Einlaufzone von 350 mm ist das Strömungsprofil voll ausgebildet. Bei den überströmten Versuchsplatten handelt es sich um kaltgewalzte Stahlplatten mit gefrästen kugelförmigen Vertiefungen. Neben der hinsichtlich des thermischen Wirkungsgrades besten Geometrie mit einem Verhältnis von Dellentiefe zu Dellendurchmesser  $t/D = 0,26$  werden eine flachere Dellengeometrie mit  $t/D = 0,18$  und eine tiefere mit  $t/D = 0,35$  untersucht und verglichen. Der Durchmesser der Dellen liegt immer bei  $D = 10\text{ mm}$ .

Bei der Particle Image Velocimetry (PIV) werden durch Laserlicht angeregte suspendierte Tracerpartikel mit Hilfe von Kameras aufgezeichnet. Die stereoskopische Mikro-PIV (Stereo  $\mu$ PIV) nutzt zwei Kameras in versetzter, stereoskopischer Anordnung. Damit können alle drei Geschwindigkeitskomponenten in einer zweidimensionalen Ebene gleichzeitig erfasst werden. Für die Berechnung der dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren werden jeweils zwei Bilder von jeder Kamera benötigt, die im Zeitbereich von einigen Mikrosekunden aufgenommen werden. Nach

der Aufnahme wird das Bildpaar digital verarbeitet und die Geschwindigkeit der Tracerpartikel durch den räumlichen Versatz in Bezug zum zeitlichen Versatz der Bildaufnahmen ermittelt. Bei jeder Messung können mehrere Bildpaare in einer vorher festgelegten Frequenz aufgezeichnet werden. Somit ergibt sich mit einer ebenfalls festgelegten Bildpaaranzahl ein Zeitraum, über den die Strömungen gemittelt werden und es lassen sich so unterschiedliche Betrachtungszeiträume realisieren. Durch die Variation der Betrachtungszeiträume sind die kurzfristigen und auch langfristigen Effekte der Dellenstrukturen auf die Strömungseigenschaften erfassbar.

In dem Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass sich innerhalb der Delle ein asymmetrischer Wirbel ausbildet. Darüber hinaus konnte die lokale Fließgeschwindigkeitserhöhung im Nachlauf der Dellen mittels Stereo  $\mu$ PIV gemessen werden. Abb. 4.1 zeigt die Ergebnisse zweier gleich angeordneter Experimente zu den lokalen Strömungseigenschaften im Nachlauf einer Delle mit  $t/D = 0,26$ . Die Bereiche, in denen sich eine schnellere Strömung ausbildet, sind hier asymmetrisch und zeigen sich bei Messung R1 auf der linken Seite und bei R6 auf der rechten Seite in Strömungsrichtung. Dies verdeutlicht die Asymmetrie der Nachlaufströmung bei einem kurzen Betrachtungszeitraum von 1 s.

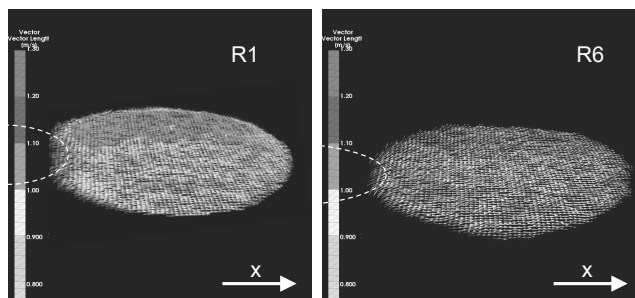


Abb. 4.1:  $t/D = 0,26$  bei mittlerer Strömungsgeschwindigkeit von 1m/s. Asymmetrischer Wirbel in der Kurzzeitmessung für 1 s bei 10 Hz, gemessen auf der linken und rechten Seite bei gleichen Prozessparametern. Die Hauptströmungsrichtung ist von links nach rechts.

Die mittlere freie Strömungsgeschwindigkeit im Strömungskanal lag hier bei 1 m/s und die mittleren gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten im Nachlauf der Delle können Abb. 4.2 entnommen werden. Hierbei wurde der Nachlauf in den linken und rechten Bereich unterteilt, um so eine differenzierte Betrachtung der gemessenen lokalen Fließgeschwindigkeiten zu ermöglichen. Aus den hier dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich, dass die Messungen R1, R2 und R3 eine Asymmetrie mit erhöhter lokaler Fließgeschwindigkeit im linken Nachlaufbereich der Delle aufweisen. R4 und R5 zeigen eine symmetrische Geschwindigkeitsverteilung und R6 weist auf eine erhöhte lokale Fließgeschwindigkeit auf der rechten Seite des Dellenachlaufs hin. Somit zeigt sich die Auswirkung des asymmetrischen Wirbels in der Delle auf die Strömungsverhältnisse im Nachlauf als ebenfalls asymmetrisch bei einem kurzen Betrachtungszeitraum von 1 s.

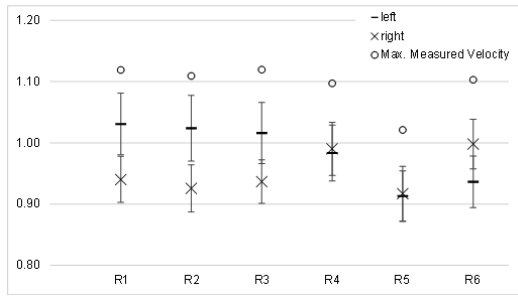


Abb. 4.2: Gemessene mittlere Strömungsgeschwindigkeit im linken und rechten Bereich stromabwärts einer Delle mit  $t/D = 0,26$  bei einer mittleren freien Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s

Untersuchungen über einen längeren Betrachtungszeitraum zeigen ein anderes gemitteltetes Strömungsbild im Nachlauf der Delle, welches sich symmetrisch entlang der Hauptströmungsrichtung ausbildet. Abb. 4.3 zeigt hier den direkten Vergleich zwischen asymmetrischer Nachlaufströmung über einen kurzen Betrachtungszeitraum (1 s, links) und symmetrischer Nachlaufströmung bei längerem Betrachtungszeitraum (10 s, rechts). Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass der durch die Delle induzierte Wirbel periodisch oszilliert und somit kurzfristig zwar asymmetrische Strömungsbedingungen im Nachlauf der Delle erzeugt, jedoch der langfristig gemittelte Effekt, der für die Zeitskalen des Partikelfouling relevant ist, symmetrisch entlang der Hauptströmungsrichtung verläuft. Diese Ergebnisse stimmen mit vorherigen Arbeiten ermittelten Ablagerungsstrukturen überein.

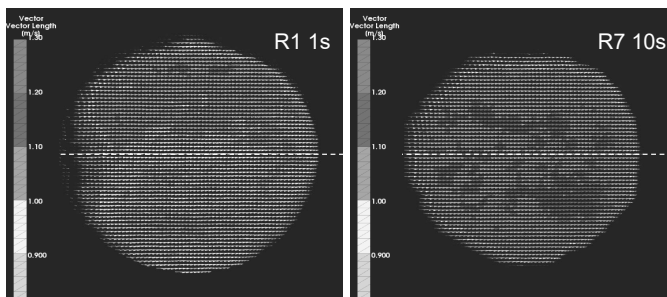


Abb. 4.3: Vergleich für  $t/D = 0,26$ , 1 m/s, 10 Hz links des asymmetrischen Wirbeleffekts in der Kurzzeitmessung R1 1s und rechts des symmetrischen Langzeitwirbeleffekts R7 10s

*Dieses Projekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Modellierung und Simulation (LeMoS) der Universität Rostock durchgeführt.*

#### 4.1.2 Lokale Bestimmung von Foulingvorgängen zur korrekten Beschreibung des integralen Foulingverhaltens

(Lukas Rohwer, M.Sc.)

Besonders bei der Wärmeübertragung ergeben sich durch ungewollte Ablagerungen, sogenanntes Fouling, verfahrenstechnische Herausforderungen, wie die Verringerung der Effizienz des Apparates und der Lebensdauer. Ursprüngliche Modelle zur Beschreibung des Foulingverhaltens und dessen Einfluss auf die Wärmeübertragung verfolgen einen integralen Ansatz über die Gesamtfläche eines Apparates. Dem entgegen steht jedoch die Beobachtung, dass die Ablagerungen innerhalb eines Wärmeübertragers nicht gleichmäßig verteilt vorliegen, wie beim integralen Ansatz vorausgesetzt wird. Um die tatsächliche Ablagerungsstruktur und die somit lokal wirkenden Foulingwiderstände innerhalb eines Wärmeübertragers zu beschreiben und zu verstehen, werden vermehrt Ansätze zur Messung und Modellierung der lokalen Foulingauswirkungen erarbeitet. Eine lokal aufgelöste Beschreibung des Foulings auf wärmeübertragenden Flächen würde das grundlegende Verständnis des Ablagerungsprozesses steigern und so zum besseren Umgang mit den aus Fouling hervorgehenden Herausforderungen beitragen. Im Rahmen dieses Projektes sollen unterschiedliche lokale Bestimmungsansätze genutzt werden, um eine korrekte integrale Beschreibung des Foulingverhaltens innerhalb eines Doppelrohrwärmeübertragers (DPHEX) aufzustellen.

Ein möglicher Ansatz zur Beschreibung des Foulings auf einer wärmeübertragenden Fläche ist der thermische Foulingwiderstand. Dieser beschreibt integral die Differenz des Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen dem sauberen und dem befaulten Zustand. Durch eine Erweiterung des thermischen Foulingwiderstands um die Abhängigkeit der Position im Apparat kann der lokale thermische Foulingwiderstand quantifiziert werden. Hierzu ist eine örtlich aufgelöste Temperaturerfassung notwendig, die jedoch nicht zu stark mit den Prozessparametern wechselwirkt. Die faseroptische Temperaturmessung ermöglicht hier eine exakte Auflösung des Temperaturprofils innerhalb eines Wärmeübertragers. Entlang des innenliegenden Rohres eines der zwei verwendeten baugleichen Doppelrohrwärmeübertrager wurde ein faseroptischer Sensor eingesetzt. In diesen Sensor werden Lichtimpulse eingeleitet, welche durch charakteristische Muster lokaler Brechungszahlen über die Messstrecke zurückgestreut werden und so eine lokal aufgelöste Temperaturmessung ermöglichen. Durch die Verwendung dieser Messtechnik kann der lokale thermische Foulingwiderstand innerhalb des Wärmeübertragers aufgezeichnet werden. Unter Verwendung des Stoffsystems  $\text{CaSO}_4$  konnte die Veränderung des lokalen thermischen Widerstandes, welche durch die anlagernden Kristallschichten bedingt ist, aufgezeichnet und untersucht werden. Die Messergebnisse zeigen, dass der im Gegenstrom betriebene DPHEX ein Ablagerungsprofil ausbildet, welches stark von der vereinfachten integralen Betrachtungsweise abweicht. Wie in Abb. 4.4 exemplarisch für einen Versuchsdurchlauf dargestellt, bildet sich nach der Induktionsphase das Ablagerungsprofil in Abhängigkeit der Position im Rohr aus, wobei sich nahe des Produkteintritts im Verhältnis zum Austritt nur eine langsame Veränderung der aufgezeichneten Temperaturen beobachten lässt. Im Gegensatz hierzu nimmt der lokale thermische Foulingwiderstand zum Produktaustritt hin stark zu. Besonders im Bereich nahe des Produktauslaufes (1,6 m und 1,8 m) zeichnet sich ab ca. 115 h Versuchsdauer eine

asymptotische Phase des Foulingwiderstands ab. Dies lässt sich in weiteren experimentellen Untersuchungen bestätigen.

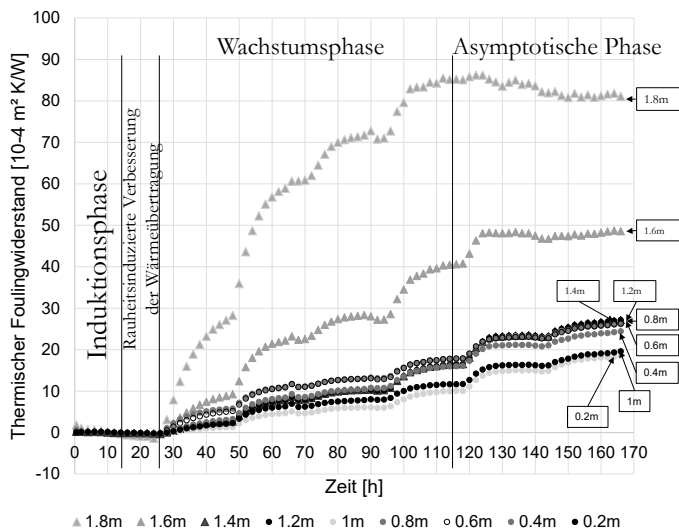


Abb. 4.4: Lokaler thermischer Foulingwiderstand unter Foulingbedingungen an ausgewählten Messstellen innerhalb des DPHEX

Eine Herausforderung bei der Betrachtung der Foulingschichten im DPHEX ist die optische Zugänglichkeit innerhalb des Apparates. Neben dem DPHEX wird daher ein weiterer Versuchsaufbau genutzt, um mittels Stereo Micro Particle Image Velocimetry (Stereo  $\mu$ PIV) die lokalen Strömungen entlang verschiedener Oberflächenstrukturen zu untersuchen. Das Stereo  $\mu$ PIV ermöglicht die kontaktlose Messung der dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren in einer zweidimensionalen Ebene. Somit lässt sich die Interaktion zwischen Oberflächenrauheit oder Kristallstrukturen mit der Strömung untersuchen und bewerten. Im Anschluss an die Untersuchungen an den Kristallstrukturen sollen diese durch einen Vergleich bspw. der lokalen thermischen Foulingwiderstände den lokalen Vergleichspunkten im DPHEX zugeordnet werden.

Um diese Messungen durchzuführen, müssen im ersten Schritt Strukturen erzeugt werden, die in den Strömungskanal des Stereo  $\mu$ PIV eingelegt werden können. Hierzu wurde eine Trägerplatte für 80 x 20 mm Versuchsplatten gefertigt. Auf diesen Versuchsplatten lassen sich sowohl  $\text{CaCO}_3$  als auch  $\text{CaSO}_4$  Strukturen erzeugen. Abb. 4.5 zeigt Aufnahmen der unterschiedlichen Kristalltopographien. Trotz der unterschiedlichen Vergrößerungen ist erkennbar, dass die Stoffsysteme deutliche Unterschiede in ihrer Kristallstruktur aufweisen, was ebenfalls deutliche Unterschiede bei der Wechselwirkung mit der Strömung erwarten lässt. Die erzeugten Strukturen bilden somit statische Kristallstrukturen ab, die einen ebenfalls statischen Zustand innerhalb des DPHEX beschreiben. Um diese statischen Strukturen hinsichtlich ihrer Wechselwirkung mit der Strömung zu untersuchen, werden zusätzlich der Druckverlust und der thermische Foulingwiderstand im Vergleich zur glatten Oberfläche bestimmt.

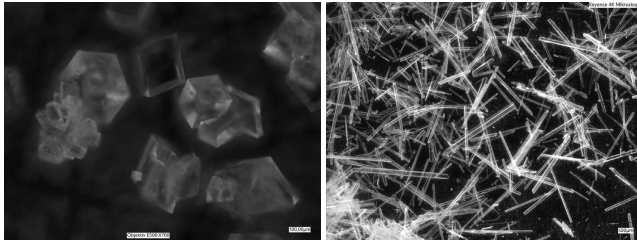


Abb. 4.5: Mikroskopaufnahmen der Kristallstrukturen auf einer 80 x20 mm Versuchsplatte; CaCO<sub>3</sub> (links) und CaSO<sub>4</sub> (rechts)

Neben den erzeugten Kristallstrukturen werden auch additiv gefertigte Strukturen zur Erweiterung der Vergleichspunkte der lokalen Wechselwirkungen mit der Strömung untersucht. Abb. 4.6 zeigt beispielhaft für eine Struktur mit zwei Würfeln mit 1 mm Kantenlänge die Mikroskopaufnahme durch die Optik des Stereo  $\mu$ PIV und die zugehörigen gemessenen Strömungsvektoren bei einer freien Strömungsgeschwindigkeit im Kanal von 1 m/s. Legt man diese übereinander, so ergibt sich eine Deckung der dreidimensionalen Geschwindigkeitsvektoren in einer zweidimensionalen Ebene innerhalb des durchströmten Kanals.

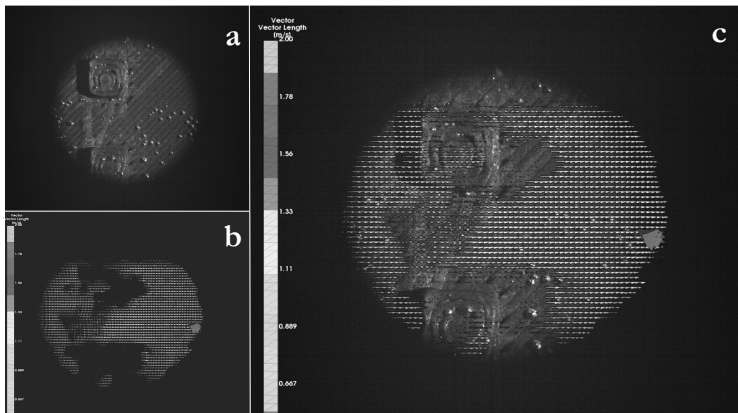


Abb. 4.6: Aufnahmen der Würfelstruktur (a), der zugehörigen Strömungsvektoren bei einer freien Strömungsgeschwindigkeit im Kanal von 1 m/s (b) und die überlagerte Darstellung (c)

Im weiteren Verlauf sollen diese Vorversuche auf systematische Untersuchungen an statischen Strukturen ausgeweitet werden. Darüber hinaus sollen Kristallschichten direkt im Strömungskanal des Stereo  $\mu$ PIV erzeugt werden, um Strömungsmessungen während des Kristallwachstums zu ermöglichen.

*Dieses Projekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.*

### 4.1.3 Fouling during emulsion polymerization

(Dr. Holly Huellemeier)

Emulsion polymerization results in an aqueous dispersion of latex particles which are stabilized by a colloidal stabilizer, such as a surfactant. During emulsion polymerization, the formation of deposits on heated or cooled internal surfaces of a reactor can impede heat transfer. The formation of these unwanted deposits is more commonly known as fouling. The decrease in the rate of heat transfer due to fouling can limit production because the exothermic nature of the reaction requires heat removal at the walls of the reactor. A lack of heat removal results in shut-down of the process and a need for cleaning which results in a negative economic and environmental impact.

The mechanisms of fouling during emulsion polymerization are not yet fully understood due to numerous complexities occurring during the course of the reaction, including the change in the material properties of the dispersion (i.e., density, viscosity, etc.) and the nucleation and growth of latex particles over the course of the reaction. Specifically, reactions occurring within the micelles of the emulsifier and interactions between polymer particles and/or internal reactor surfaces support the hypothesis of this project: *reaction* fouling and *particle* fouling are the dominant fouling pathways during emulsion polymerization that can be quantified separately and mechanistically understood.

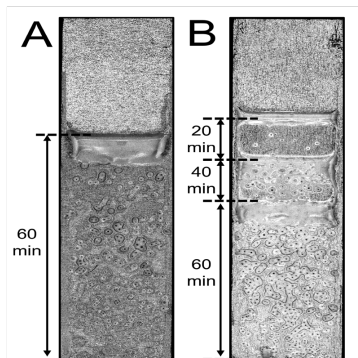


Abb. 4.7: Representative fouling pattern on sample plates from heated finger tests for (A) stationary and (B) retraction (1 cm/20 mins) conditions.

In this project, fouling investigations are conducted using a heated finger which is retracted from the reaction vessel to create ‘snapshots’ of fouling at different reaction times along the length of the finger. Additionally, project partners at TU Clausthal are assisting in the development of a flow channel with an integrated quartz crystal microbalance (QCM) to track fouling during the course of the reaction.

#### *Polymer fouling on an electrically heated finger*

The first tests of fouling on a heated finger were performed with a fully-reacted, commercially-available vinyl ester, ethylene, and acrylic ester copolymer dispersion (VINNAPAS 6999) which was kindly provided by Wacker Chemie AG, Burghausen.



Experiments were conducted in a 2.8 L double-walled stainless-steel vessel with continuous over-head agitation. The bulk temperature of the polymer solution was kept constant at 30 °C. Fouling deposits were collected on 20 x 80 mm stainless steel sample plates clamped to the surface of a heated finger. An imbedded heating rod in the finger supplied constant heating power at 80 W which corresponds to an initial surface temperature of ~68 °C. Fouling was quantified using thermal resistance which was calculated the increase in the surface temperature of the finger during fouling. Tests were conducted while keeping the finger stationary, as well as with retraction at a rate of 1 cm/20 mins. The total fouling time was 60 mins.

The resulting fouling patterns are depicted in Abb. 4.7. For the stationary samples, a homogeneous fouling pattern covers the plate (Abb. 4.7A). But for the retracted sample, distinct layers with different progressions of fouling can be seen for each time step (Abb. 4.7B).

#### *Heated finger design screening modified design*

Several heated finger designs have been tested to develop the best design for emulsion polymerization experiments. Designs include an electrically-heated finger (Abb. 4.8A) and two fluidically-heated fingers (Abb. 4.8B-C). Fouling resistance is calculated with the fluidically-heated fingers by measuring the change in inlet fluid temperature while maintaining a constant outlet fluid temperature or, alternatively, a constant surface temperature. The finger with an electrical heating source was preferred as opposed to the fingers with fluidic heating sources because the use of the fluidically-heated fingers requires an increased sensitivity in thermocouple measurements to detect fouling, improved heat distribution, and more precise fluid temperature control.

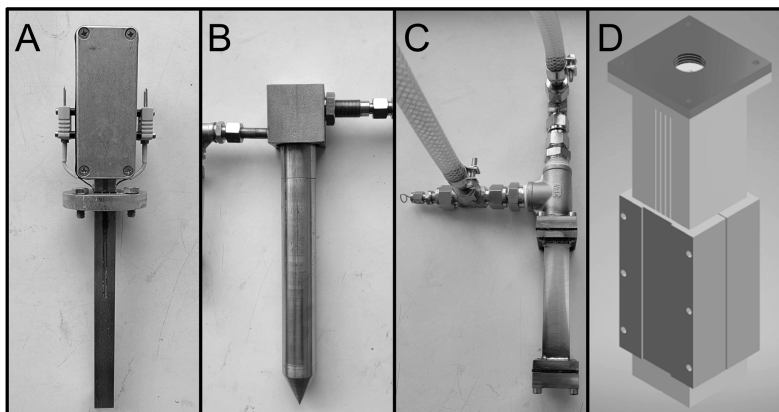


Abb. 4.8. Design screening of heating fingers: (A) electrically-heated finger, (B) fluidically-heated finger with cylindrical body, (C) fluidically-heated finger with rectangular body, (D) modified design of body for electrically-heated finger.

A modified electrically-heated finger design (Abb. 4.8D) was motivated by challenges associated with the use of the electrically-heated finger (Abb. 4.8A), including heat losses and lack of multiple temperature measurement locations along the length of the finger for fouling resistance analysis during retraction experiments. The modified design consists of a heating rod within a copper block embedded in PEEK isolation, all of which is surrounded by a stainless-steel housing. Multiple thermocouples at different heights are positioned on the surface of the housing, just behind the planned location of the sample plate. This will enable four movements or four time-steps during a single polymerization experiment. First, polymer fouling will be analyzed using the modified finger design with the fully-reacted, commercially available polymer dispersion (VINNAPAS 6999) before progressing to the analysis of polymerization fouling with the reacting system.

#### *Formulation of reacting system and construction of emulsion polymerization plant*

After testing the modified heated finger with the fully-reacted polymer solution, the finger will be tested with the reacting polymer system. The reaction system has been formulated to imitate an industrial formulation for a vinyl acetate copolymer. The formulation includes two monomers, vinyl acetate (VAc) and vinyl neodecanoate (Veova10, a vinyl ester of neodecanoic acid). Polyvinyl alcohol (PVOH) will be used as a stabilizer for the VAc latexes. The initiators consist of a reducing agent, ascorbic acid, and an oxidizing agent, *tert*-Butyl hydroperoxide (TBHP).

To conduct the reaction, an emulsion polymerization plant has been constructed. The plant consists of a 5 L double-walled glass reaction vessel with sampling valve, a cryostat for controlling the reaction temperature, nitrogen supply, an evaporative cooler, and two peristaltic pumps. For the experiments, an initial charge of monomer, PVOH, and the reducing initiator (ascorbic acid) are heated to 55 °C. The reaction is initiated with the dosing of the oxidizing agent (TBHP) using one peristaltic pump and an increase of the reaction temperature to 65-70 °C. Additional monomer is dosed using the second peristaltic pump. The course of the reaction is monitored using temperature and gravimetric measurements of solids content, with a final target solids content of ~55% wt/wt.

Future work will focus on the installation of the heated finger within the reaction vessel and the incorporation of a mechanism for retraction during the course of the reaction. Additionally, the flow channel with an integrated QCM sensor will be installed in a by-pass loop. Finally, a deeper understanding of the mechanism of polymerization fouling will be gained by varying the formulation of the reacting system (i.e., solids content, concentration and type of protective colloid) and surface conditions (i.e., coatings, establishment of a passivation layer, and electrical potential of the wall).

*This project is funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in cooperation with the Institut für Physikalische Chemie at TU Clausthal. Reaction materials and polymer dispersions were supplied by Wacker Chemie AG, Burghausen.*

#### 4.1.4 Reinigungsverhalten von weichen Foulingschichten

(Hanna Wiese, M.Sc.)

In der lebensmittelverarbeitenden Industrie kommt es an wärmeübertragenden Oberflächen zu unerwünschten Ablagerungen, welche eine regelmäßige Reinigung für die Produktion sicherer Lebensmittel erfordern. Diese ist ressourcenintensiv und eine Anpassung und Optimierung des Reinigungsprozesses an eine vorliegende Verschmutzung kann nur erfolgen, wenn die zugrundeliegenden Mechanismen hinreichend genau verstanden sind. Als charakteristisches Beispiel für eine Branche der lebensmittelverarbeitenden Industrie mit großem Reinigungsbedarf wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens das Stoffsystem Milch betrachtet. Vereinfacht kann die Reinigung von Milchablagerungen als mehrstufiger Prozess abgebildet werden, bei dem das Reinigungsmedium zunächst in die Verschmutzungsschicht diffundiert (I). Dies kann eine physikalische Quellung bewirken und die Verschmutzungsmatrix wird durch chemische Reaktionen abgebaut (II). In Folge werden Verschmutzungsfragmente freigesetzt und zur Grenzfläche Verschmutzung/Flüssigkeit transportiert (III), so dass sie fluidisch abgetragen werden können (IV). Ausgehend von der komplexen, realen Verschmutzung wird das Modellstoffsystem Molkeproteinisolat (engl. Whey Protein Isolate, WPI) in Form eines Hydrogels untersucht, wobei die Festigkeit einer realen Milchfoulingschicht eingestellt wird (siehe Abb. 4.9).

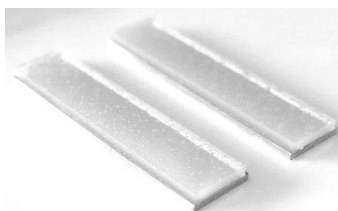


Abb. 4.9: WPI-Gel als Modellverschmutzung

Im Rahmen dieses Projektes werden die genannten Teilschritte der Reinigung umfangreich untersucht und in Zusammenhang mit der Gesamtreinigungskinetik gesetzt. Zielgrößen sind dabei reinigungsrelevante Parameter wie die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit. Die abgeleiteten kinetischen Parameter sollen schließlich in einer dimensionslosen Reinigungskennzahl zusammengefasst werden, um die Übertragung auf eine reale Verschmutzung zu ermöglichen und ausgehend von der Gesamtreinigungskinetik Rückschlüsse auf die limitierenden Teilschritte der Reinigung zu erhalten.

##### *Diffusion des Reinigungsmittels in die Verschmutzung*

Die Diffusion des Reinigungsmittels (hier Natronlauge, NaOH) in die Verschmutzung wird visuell durch die Zugabe des pH-Indikator Thymolphthalein untersucht. Mit fortschreitender Diffusion färbt sich der flüssigkeitsseitige Teil des zunächst weiß-transparenten Gels blau (siehe Abb. 4.10 links). Die Höhe der Farbbande  $\delta_{blue}$  wird durch eine in Matlab® erstellte automatisierte Bildauswertung bestimmt und dient der Berechnung von Diffusionskoeffizienten. Diese wurden bei verschiedenen Temperaturen von 22,6 °C, 42,5 °C und 56,3 °C bestimmt und ergaben Werte von  $6,21 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $7,89 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  und  $1,14 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (siehe Abb. 4.10 rechts). Wie zu