

Forschungsarbeit

Messung von weichen Foulingschichten auf festen und porösen Oberflächen mit dem Fluid Dynamic Gauging

Wolfgang Augustin^{1,*}, Y. M. John Chew², Patrick W. Gordon³, Vincent Y. Lister³, Moriz Mayer¹, Bill R. Paterson³, Juan-Manuel Peralta⁴, Stephan Scholl¹ und D. Ian Wilson³

DOI: 10.1002/cite.201100165

Die experimentelle Bestimmung charakteristischer Parameter von weichen Schichten wie Biofilmen und Proteinablagerungen stellt eine wesentliche Grundlage bei der Erforschung biotechnologischer und verfahrenstechnischer Problemstellungen dar. Die Methode des Fluid Dynamic Gauging ermöglicht die einfache Messung weicher Schichten, hier speziell Foulingschichten, in flüssigen Systemen in situ und in Echtzeit bei unterschiedlichen Prozessbedingungen. Unterschiedliche Messmodi und Düsendesigns ermöglichen eine ablagerungs- und geometriespezifische Untersuchung. Die Arbeit berichtet über neuere Entwicklungen dieser Messtechnik.

Schlagwörter: Adhäsion, Deformation, Fouling, Kohäsion, Reinigung, Schichtdicke

Eingegangen: 05. September 2011; *revidiert:* 08. November 2011; *akzeptiert:* 16. November 2011

Dynamic Gauging of Soft Fouling Layers on Solid and Porous Surfaces

The experimental determination of characteristic parameters of soft coatings such as biofilms and protein deposits is essential for the study of biotechnological and chemical engineering problems. The technique of fluid dynamic gauging allows the thickness and strength of soft fouling layers to be measured in situ and in real-time under different flow conditions. It is possible to monitor the thickness and strength of biofilms and protein deposits. Different operating modes and nozzle designs allow deposit specific investigations. This paper reports some recent developments of the technique.

Keywords: Adhesion, Cleaning, Cohesion, Deformation, Fouling, Layer Thickness

1 Einleitung

Das Fluid Dynamic Gauging (FDG) wurde entwickelt, um in situ und in Echtzeit die Dicke von weichen Foulingschichten zu messen, die ansonsten beim Kontakt mit einem Sensor deformiert werden oder kollabieren, wenn sie aus ihrer flüssigen Umgebung entfernt werden. Dabei ist es nicht erforderlich, dass die Flüssigkeit oder der untersuchte Apparat transparent ist. Auch ist nur eine geringe Kenntnis

der Stoffeigenschaften der Ablagerung notwendig. Seitdem das Konzept zum ersten Mal von Tuladhar et al. [1] für Molekproteinablagerungen in einem ruhenden Fluid auf festen Oberflächen vorgestellt wurde, hat sich FDG zu einer Methode entwickelt, mit der die Dicke verschiedenster Ablagerungen auf einer Reihe unterschiedlicher Oberflächen bei Strömung mit und ohne Beheizung bestimmt werden kann. Parallel dazu ermöglicht die Simulation der Strömung mithilfe von CFD die Verwendung der Messtechnik

¹Dr.-Ing. Wolfgang Augustin (w.augustin@tu-braunschweig.de), Moriz Mayer, Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl, Technische Universität Braunschweig, Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik, Langer Kamp 7, 38106 Braunschweig, Germany; ²Dr. Y. M. John Chew, University of Bath, Department of Chemical Engineering, Building 9 West, Claverton Down, Bath, BA2 7AY, UK; ³Patrick

W. Gordon, Vincent Y. Lister, Dr. Bill R. Paterson, Dr. D. Ian Wilson, University of Cambridge, Department of Chemical Engineering and Biotechnology, New Museums Site, Pembroke Street, Cambridge, CB2 3RA, UK; ⁴Juan-Manuel Peralta, Universidad Nacional del Litoral, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Güemes 3450, S3000GLN, Santa Fe, Argentina.

zur Bestimmung von Festigkeit und Deformation der Foulingsschichten. Eine Übersicht über diese Methoden wurde von Saikhwan et al. [2] vorgestellt.

FDG benötigt eine Flüssigkeit, die normalerweise in Kontakt mit der feuchten Ablagerung steht und mit einer konstanten Druckdifferenz in eine Düse gesaugt wird. Abb. 1 illustriert die Methode. Die Position der Düse relativ zum Substrat, h_0 , wird unabhängig bestimmt. Der Massenstrom m ist im Allgemeinen im Bereich $0 < h/d_t < 0,25$ sensitiv zum Abstand h und ermöglicht somit dessen Berechnung. Die Dicke der Ablagerung δ wird dann bestimmt mit $\delta = h_0 - h$. Eine computerunterstützte Ansteuerung der Düse ermöglicht die automatische Messung nacheinander an mehreren Positionen mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ [3]. Dabei sind die Hauptquellen der Messunsicherheit die Volumenstrommessung ($\pm 1\%$) und die Düsenposition des induktiven Sensors ($\pm 1 \mu\text{m}$). In diesem Beitrag wird über neuere Entwicklungen der Messtechnik berichtet, die eine Erweiterung der Einsatzbereiche ermöglichen.

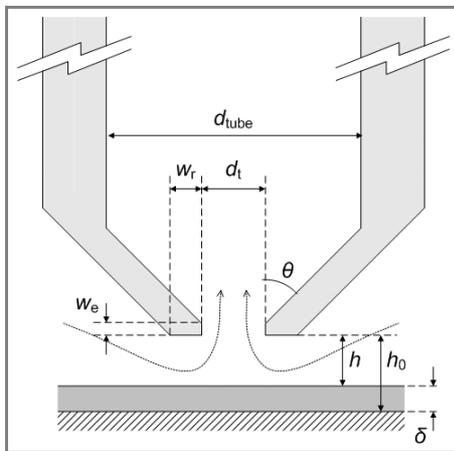


Abbildung 1. Schematische Darstellung einer FDG-Düse. Düsenwinkel θ , hier 45° , d_{tube} , d_t , w_e und w_r sind Designparameter.

2 Messung im Massenstrom- und Druckmodus

FDG-Messungen basieren auf der Kenntnis des Massenstroms in der Düse, des Düsenabstands von der Oberfläche und der wirksamen Druckdifferenz, was Tuladhar et al. [1] dimensionslos darstellen:

$$C_d = f\left(\frac{h}{d_t}, \frac{w_r}{d_t}, Re_t\right) \quad (1)$$

Die Reynolds-Zahl Re_t wird an der Düsenöffnung definiert, C_d ist der dimensionslose Massenstrom mit den Drücken P_1 und P_2 vor und hinter der Düsenöffnung.

$$C_d \equiv \frac{\text{tatsächlicher Massenstrom}}{\text{idealer Massenstrom}} = \frac{4m}{\pi d_t^2} \frac{1}{\sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}} \quad (2)$$

Tuladhar et al. zeigten, dass der Beitrag von h/d_t an C_d in Gl. (1) einen dominierenden Einfluss im interessierenden Bereich hat. Die Messdaten wurden bei einer festen treibenden Druckdifferenz bestimmt, d. h. $P_1 - P_2$ war annähernd konstant. Der gemessene Massenstrom wurde in Gl. (2) eingesetzt und mit einer Kalibrierung der Abstand h bestimmt. Diese Variante der Messmethode wird als *Massenstrommodus* bezeichnet und eignet sich gut, wenn die erforderlichen Druckdifferenzen konstant einstellbar sind und der Massenstrom variiert werden kann. Abb. 2 zeigt mit diesem Modus ermittelte Messergebnisse für Filterpapier in Wasser.

In einem alternativen Modus wird der Massenstrom konstant gehalten und der Druckverlust gemessen, während die Düse in Richtung der Foulingsschicht bewegt wird. Mit abnehmendem dimensionslosem Abstand h/d_t sinkt der Wert für C_d , was bedeutet, dass $P_1 - P_2$ zunehmen muss. Diese Variante wird als *Druckmodus* bezeichnet und bietet verschiedene Vorteile: (i) der Massenstrom und damit die Strömungsbedingungen werden konstant gehalten und die Masse an entnommener Flüssigkeit kann reduziert werden; (ii) die Messungen werden vom Absolutdruck entkoppelt, was Messungen bei hohem (bis zu 30 bar) und niedrigem Druck ermöglicht; und (iii) die abgesaugte Flüssigkeit kann ins System rezykliert werden, was die Menge an benötigter Flüssigkeit reduziert oder Untersuchungen von reagierenden oder biologischen Systemen vereinfacht.

Abb. 3 zeigt Messergebnisse, die mit dem Druckmodus auf einer Metallplatte in einem langen Kanal mit einem Querschnitt von $15 \times 15 \text{ mm}^2$ mit Strömung erzielt wurden. Der in Abb. 3a dargestellte Druckabfall entlang der Absaugung zeigt die Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit der Strömung, die durch die Kanal-Reynolds-Zahl

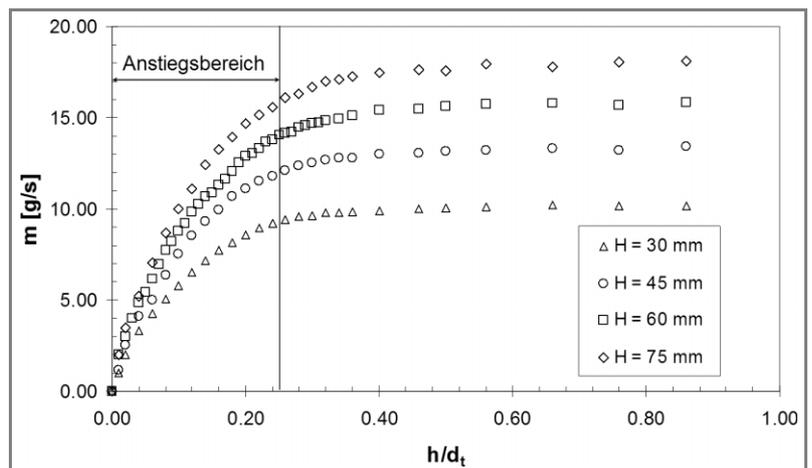


Abbildung 2. Charakteristischer Verlauf des Massenstroms in Abhängigkeit des Düsenabstands auf Filterpapier in Wasser bei 18°C bei unterschiedlichen treibenden hydrostatischen Druckkräften H .

$Re_{duct} = w_m L / \nu$ ausgedrückt wird. Hier ist w_m die mittlere Geschwindigkeit im Kanal, L die Kanallänge und ν die kinematische Viskosität. Die dazugehörigen Verläufe von C_d über h/d_t in Abb. 3b zeigen die gleiche Form wie im Massenstrommodus (Abb. 2) und sind unabhängig von Re_{duct} . Gu et al. [4] berichteten über mit dieser Konfiguration erzielte Ergebnisse, die eine gute Übereinstimmung mit den in Abb. 3b dargestellten aufweisen. Der Druckmodus unterscheidet sich vom Massenstrommodus durch die Notwendigkeit der Verwendung eines Differenzdruckmessers zusätzlich zu einem genauen Durchflussmessers. Die Auflösung der h/d_t -Messungen für beide Modi ist gleich, hier $\pm 10 \mu\text{m}$ für eine Düse mit $d_t = 1 \text{ mm}$ und der in Abb. 1 dargestellten Form.

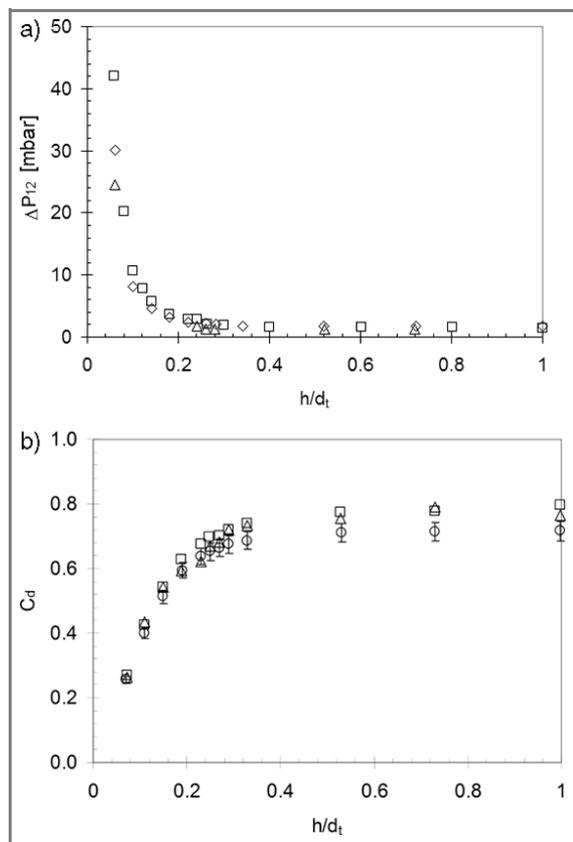


Abbildung 3. Kalibration im Druckmodus der Messung auf einer metallischen Platte bei Kanalströmung. $m \sim 0,37 \text{ g s}^{-1}$, $P_{static} = 125 - 140 \text{ mbar}$, Reynolds-Zahlen in der Kernströmung: Δ $Re_{duct} = 450$; \square $Re_{duct} = 650$; \circ $Re_{duct} = 1090$ (nach [7]).

Der Druckmodus kann auch verwendet werden, um Schichtdickenmessungen in Ringspalten durchzuführen. Diese Geometrie ist wichtig in Foulingversuchsanlagen, wie HTRI-Foulingtests [5] oder Kühlelemente für die Untersuchung von Wachsablagerungen, wobei eine Flüssigkeit über ein gekühltes zentrales Rohr geführt wird. Gu et al. [6] zeigten für zwei Geometrien ($d_a = 35 \text{ mm}$, $d_i = 21 \text{ mm}$, $90 < Re_{duct} < 29\,000$, bzw. $d_a = 30 \text{ mm}$, $d_i = 12 \text{ mm}$, $250 < Re_{duct} <$

$10\,000$), dass beide Modi zur Messung auf der Oberfläche eines Innenrohres bei Strömung eingesetzt werden können. Sie zeigten auch, dass FDG-Messungen mit dem Druckmodus zuverlässige Ergebnisse zur Foulingschichtdicke auf Heizstäben (ähnlich den HTRI-Foulingtests) liefern. Der Vorteil des Druckmodus liegt hier in der Möglichkeit der Kontrolle der entnommenen Flüssigkeit und der Möglichkeit, bei hohen Drücken zu messen.

Lister et al. [7] konnten den Aufbau einer partikulären Foulingschicht auf einer Mikrofiltrationsmembran während der Querstromfiltration einer verdünnten Suspension bei laminarer Strömung messen. Ebenfalls den Druckmodus setzten Jones et al. [8] zur Untersuchung von Foulingschichten auf Membranen zur Ultrafiltration bei der Querstromfiltration von Zuckermelasse bei Membrandrücken bis zu 1 bar und Strömungsgeschwindigkeiten bis zu $2,9 \text{ m s}^{-1}$, d. h. bei turbulenter Strömung, ein. Abb. 4 zeigt einige Ergebnisse ihrer in Echtzeit generierten Daten. Man erkennt, dass bei zunehmendem Transmembrandruck die Belagdicke schneller zunimmt.

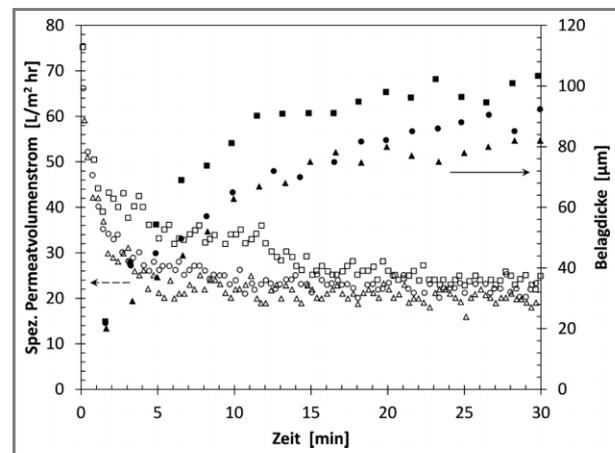


Abbildung 4. Einfluss des Transmembrandrucks TMP auf die Belagbildung und den Permeatvolumenstrom. Gefüllte Symbole: Belagdicke, offene Symbole: Permeatvolumenstrom, TMP-Werte: \blacksquare 1 bar, \bullet 0,55 bar, \blacktriangle 0,35 bar. $Re_{duct} = 9820$; $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (nach [7]).

3 Messung von weichen Materialien

Gordon et al. [9] beschreiben den Aufbau eines Scanning FDG (sFDG), das über eine Oberfläche geführt wird und an verschiedenen Stellen den Abstand h mit einer Messgenauigkeit von $\pm 6 \mu\text{m}$ messen kann. Das sFDG arbeitet computergesteuert im Massenstrommodus. Die Einsatzmöglichkeiten wurden durch die im Folgenden beschriebenen Modifikationen erweitert.

Mithilfe eines externen Vorratsbehälters können die Zusammensetzung und Temperatur der Testflüssigkeit eingestellt werden. Durch eine Variation dieser Größen kann z. B. der Einfluss von pH-Wert, Ionenstärke und Temperatur auf das Ablagerungsverhalten untersucht werden. Ein automatisiertes Screening über einen weiten Parameterbe-

reich ermöglicht die Identifizierung von Bereichen, die eine detailliertere Betrachtung erfordern. Die Möglichkeit verschiedene chemische Bedingungen einzustellen, ist insbesondere für Ablagerungen bei der Lebensmittelproduktion hilfreich, weil hier die Wechselwirkungen mit Reinigungslösungen sehr komplex sein können.

Abb. 5 zeigt exemplarisch Ergebnisse zum Quellen von Gelatine. Der pH-Wert wurde in Schritten von $\sim 0,3$ pH-Einheiten in 10-Minuten-Intervallen durch die Zugabe von 0,1- oder 0,2-molarer NaOH-Lösung erhöht. Anfänglich schrumpft der Film durch die zunehmende Ionenstärke aufgrund der Ladungsabschirmung, was die intermolekulare Abstoßung reduziert. Bei pH 10,5 fängt der Film an zu quellen, da Prolin und Hydroxyprolin, zwei Aminosäuren in Gelatine, deprotonieren. Ihr pK_a -Wert ist durch die gestrichelte Linie markiert. Weitere Experimente mit unterschiedlichen NaOH-Konzentrationen zeigen eine gute Übereinstimmung bis zu pH 11.

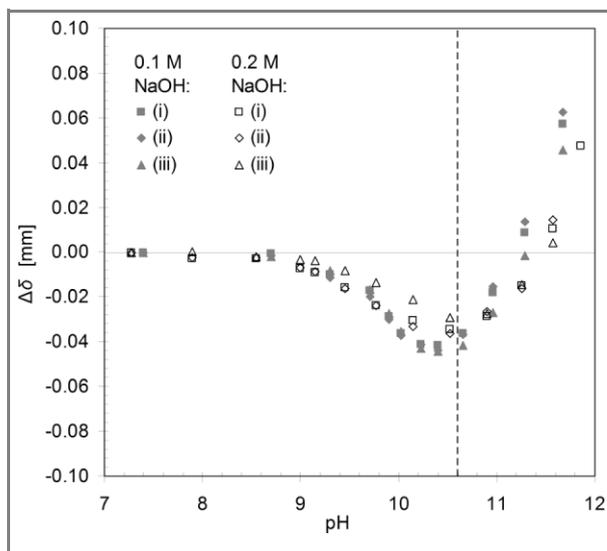


Abbildung 5. Schichtdicke $\Delta\delta$ beim Quellen von Gelatine unter Variation des pH-Wertes. (i) – (iii) bezeichnet drei je 5 mm entfernte Punkte auf der Belagoberfläche. Vorquellen des Belags in entionisiertem Wasser bei 20 °C und pH 6,77 (nach [9]).

Die Erweiterung des sFDG mit einem computergeregelten Ablauf erlaubt eine variable Einstellung der treibenden Druckdifferenz $P_1 - P_2$. Da der abgesaugte Massenstrom und damit die Schubspannung, die auf die Oberfläche bzw. den Film wirkt, direkt von $P_1 - P_2$ abhängt (s. Gln. (1) und (2)), kann so die Deformation der Schicht untersucht werden. Anfänglich wird ein geringer Massenstrom eingestellt, um die Oberfläche zu lokalisieren. Dann wird bei einer festen Position der Düse der Massenstrom für eine definierte Zeit erhöht, anschließend wieder auf den anfänglichen Wert eingestellt und der Abstand h bestimmt. Änderungen von h korrespondieren mit einer Änderung der Schichtdicke. Mit der Scanvorrichtung kann diese Messung an mehreren Stellen einer Probe durchgeführt werden, um

eine statistisch ausreichende Anzahl von Messwerten zu erhalten.

Mit diesem Aufbau können auch weiche Foulingsschichten untersucht werden, z. B. Biofilme wie sie in Bioreaktoren zur Wasseraufbereitung, beim Biofouling in Wärmeübertragern oder als Algenfilme zur Biokraftstoffherstellung auftreten. Möhle et al. [10] kombinierten die FDG-Technik mit der Konfokalen Laser Scanning Mikroskopie (CLSM) zur Untersuchung von Belebtschlamm und bestimmten eine Kohäsionsfestigkeit von $\sim 6 - 8$ Pa. Auf dem Substrat verblieb ein stabiler Biofilm, der mit FDG nicht entfernt werden konnte.

Das sFDG wurde auch eingesetzt, um dünne Biofilme zu untersuchen, wie sie in photovoltaischen Anlagen vorkommen [11]. Abb. 6 zeigt Dickenmessungen von zwei Biofilmen aus unterschiedlichen Mikroorganismen auf dem gleichen Substrat. Für die Messungen wurde die Düse für eine kurze Zeit an den Biofilm herangefahren und dann zu einer anderen Messstelle bewegt. Ein Einfluss der erhöhten Schubspannung konnte festgestellt werden. Beide Darstellungen zeigen eine deutliche Variation der Filmdicke.

In Abb. 7 sind Festigkeitsmessungen eines Algenfilms (*Chlorella*), der auf satiniertem Glas aufgewachsen ist, dargestellt. Die an zwei unterschiedlichen Stellen gemessenen Werte zeigen eine gute Übereinstimmung. Mit zunehmender Schubspannung nimmt die Dicke des Biofilms, beginn-

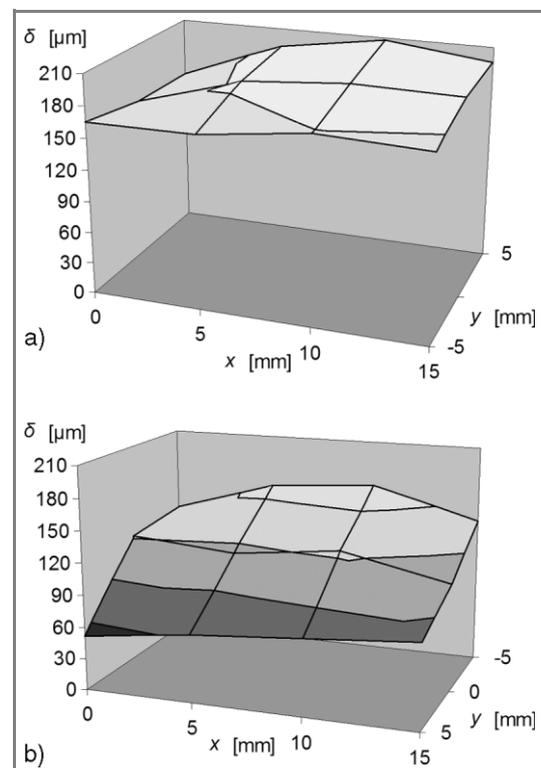


Abbildung 6. Abtastbild der Dicke von Biofilmen für a) *Synechococcus*, ein Cyanobakterium, und b) *Chlorella*, ein Algenstamm; beide gewachsen auf mit Indiumzinnoxid beschichtetem Polyethylenterephthalat (PET).

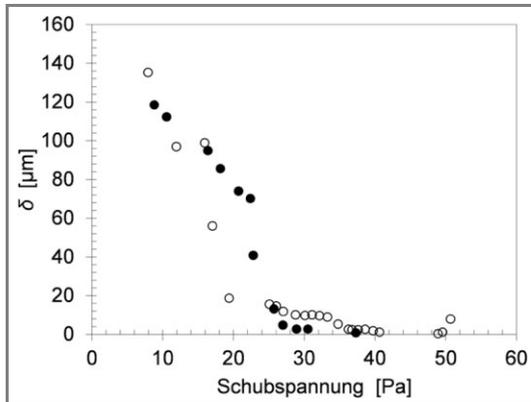


Abbildung 7. Festigkeit eines auf satinierem Glas aufgewachsenen *Chlorella*-Biofilms an zwei Messpositionen. Abstand 5 mm, Zeitintervall zwischen den Messungen 30 s.

nend mit einem Anfangswert von 120–140 μm , kontinuierlich ab, was auf eine kohäsive Schwächung hinweist. Bei einer Schubspannung von 20–25 Pa kommt es zu einer vollständigen Ablösung des Biofilms von der Oberfläche, was auch visuell beobachtet werden konnte. Der unterschiedliche Verlauf der Kurven im Bereich $t_w = 16–22$ Pa deutet auf ein unterschiedliches Kohäsionsverhalten der beiden Positionen hin, während das adhäsive Verhalten sehr ähnlich ist. Der Anwendungsbereich der Untersuchung von Wachstumsbedingungen von Biofilmen, Alterung, Oberflächenstruktur und Biofouling in Kombination mit anderen Ablagerungsmechanismen ist groß.

4 Messung verschiedener Oberflächen

Die Möglichkeit, Messungen an mehreren Orten durchzuführen, kann genutzt werden, um unterschiedliche Oberflächenmodifikationen in einem einzigen Test zu untersuchen. Konventionelle Messmethoden (z. B. [12]) erfordern aufeinanderfolgend Versuche mit unterschiedlichen Oberflächen, was die Gefahr von zufälligen und systematischen Fehlern zwischen den einzelnen Versuchen erhöht. Die sFDG-Methode erlaubt den Vergleich verschiedener Oberflächen auf beschichteten Probeplatten (s. Abb. 8) in einem einzigen Experiment. Das Foulingverhalten von Ablagerungen aus derselben Charge, aber auch das Abreinigungsverhalten mit einer Reinigungslösung oder einem Reinigungsprozedere kann direkt verglichen werden.

Die in Abb. 9 dargestellten Ergebnisse zum Abtrag von Stärkeablagerungen demonstrieren den Wert der parallelen Messung. Edelscheiben, ähnlich der in Abb. 8a dargestellten, wurden mit glatten ($R_a = 0,071 \mu\text{m}$) oder künstlich angerauten Oberflächen versehen. Das Sandstrahlen ergab eine Rauheit von $R_a = 1,584 \mu\text{m}$, das Sandpapier (P120) ein R_a von $0,387 \mu\text{m}$. Der Wasserkontaktwinkel erhöhte sich von 67° für die polierte Oberfläche auf $\sim 90^\circ$ für die aufgerauten Oberflächen. Die Stärkeablagerungen wurden entsprechend der Formulierung von Schöler et al. [13] her-

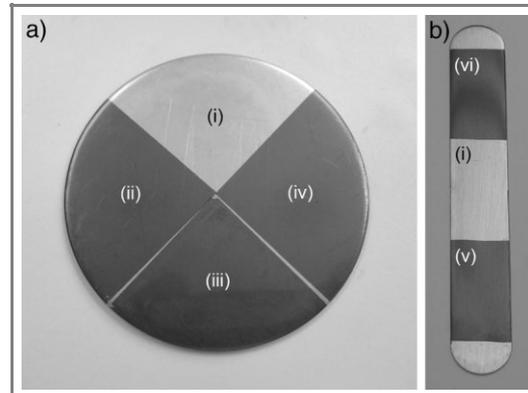


Abbildung 8. Testplatten aus Edelstahl (1.4401). a) Scheibe mit 50 mm Durchmesser; markierte Bereiche: (i) Referenz EN 1.4401, (ii) SiCON®, (iii) SiCAN and (iv) DLC; b) Platte 25 mm \times 150 mm, (v) SiCAN and (vi) SiCON®. Beschichtung durch das Fraunhofer Institut für Schicht und Oberflächentechnik IST, Braunschweig.

gestellt und der Abtrag durch die Absaugung in entionisiertem Wasser bei 20°C untersucht.

Die Reinigungsprofile in Abb. 9 zeigen alle den gleichen generellen Trend eines sehr schnellen Quellens, gefolgt von einer Phase unveränderlicher Dicke, bevor ein schneller Abtrag mit einer verbleibenden Restschicht zu erkennen ist. Die Schichten werden als weitgehend glatt und identisch angenommen. Die Stärke der Quellung und die Dauer der konstanten Phase variiert deutlich. Ohne die sFDG-Technik wäre ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen schwierig und würde eine Vielzahl von Versuchen erforderlich machen, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten.

In den meisten in Abb. 9 dargestellten Fällen sind die Rate und die maximal erreichte Dicke beim Quellen identisch, was zu erwarten war, da dies von den chemischen Vorgängen in der Schicht bestimmt wird. Dagegen erfolgt der Abtrag der Ablagerung bei den rauen Oberflächen immer früher als bei den polierten; bei den sandgestrahlten sogar direkt nach Beendigung des Quellens. Solche Beobachtungen ermöglichen die Aufklärung von Reinigungsmechanismen. So deutet der höhere Kontaktwinkel der rauen Oberflächen darauf hin, dass diese hydrophob sind, was dazu beiträgt, dass die Beläge abgehoben werden, sobald das Wasser beim Quellen die Kontaktfläche zum metallischen Substrat erreicht. Weitere Untersuchungen mit kommerziellen Beschichtungen (s. Abb. 8) und unter Wärmezufuhr erzeugten Ablagerungen, was z. B. angetrockneten Verschmutzungen entspricht, sind geplant.

5 Spezifische Düsenentwicklung

Die einfache konische Geometrie der Düse in den FDG-Untersuchungen (s. Abb. 1) basiert auf der ursprünglichen Verwendung bei der pneumatischen Absaugung. Die innere konische Form ist wichtig für den Betrieb dieser Messein-

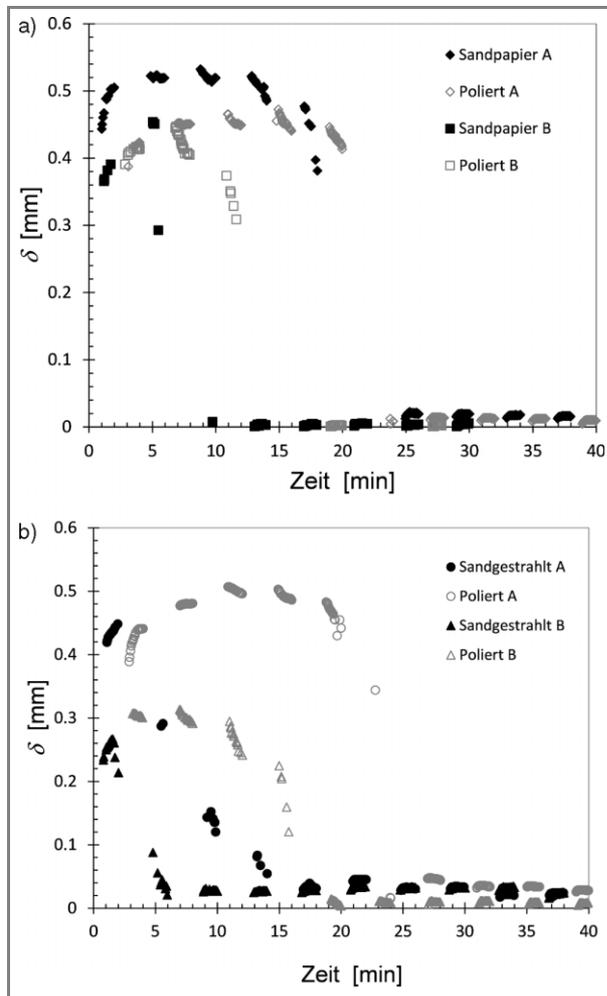


Abbildung 9. Abtrag von Stärkeablagerungen von glatten und angerauten Edelstahloberflächen (1.4401) in entionisiertem Wasser bei 20 °C (Daten zur Verfügung gestellt von P. J. van Uytvanck und A. Kvarngren).

richtung, da sie, in Kombination mit der radialen Strömung der Flüssigkeit in die Düse, den Druckverlust an der Düsen- spitze konzentriert.

Dagegen haben Deshpande und Vaishnav [14] einfache Kapillaren eingesetzt, um die Oberflächendeformation von Gewebetüchern zu untersuchen. Die äußere Düsengeometrie bestimmt das Strömungsprofil zwischen der Düse und der untersuchten Oberfläche und damit der aufgeprägten Schubspannungen. Daraus ergibt sich ein Potenzial zur Verbesserung der Sensitivität der Messmethode, z. B. durch Erweiterung der auswertbaren Anstiegszone über $h/d_t \sim 0,25$ hinaus oder durch die Einstellung einer gleichmäßigeren Schubspannungsverteilung auf dem Substrat.

Da die direkte Messung der Wandschubspannung sehr schwierig ist, basiert deren Bestimmung häufig auf der Messung anderer Größen. Eine direkte Messung der absoluten Druckverteilung ist relativ einfach und kann in quantitative Beziehung mit CFD-Berechnungen des Strömungsfeldes gesetzt werden [15]. CFD-Simulationen ergeben

zuverlässige Vorhersagen für das FDG bei quasi-stagnierender Strömung, d. h. es strömt nur die abgesaugte Flüssigkeit, da die Strömung im Allgemeinen laminar ist. Bei höheren Reynolds-Zahlen und komplexeren Strömungszuständen ist die direkte Verwendung von CFD-Ergebnissen ohne experimentelle Validierung weniger zuverlässig. Gu et al. [4] erzielten eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Drücken beim FDG in einer Kanalströmung mit Reynolds-Zahlen bis 500. Die Abschätzung der Schubspannung bei höheren Reynolds-Zahlen erfordert einen deutlich höheren Rechenaufwand in Kombination mit physikalischen Betrachtungen. Ein spezifisches Design der Düsen zielt daher auf Anwendungen bei quasi-stagnierenden und relativ langsamen Kanalströmungen.

Im Prinzip ist es möglich, das Design einer Düse mit CFD-Simulationen zu testen, wenn man diese mit Messungen validiert hat. Abb. 10a zeigt den Vergleich von lokalen Druckmessungen auf der Symmetrieachse einer konischen Düse (in Abb. 10b skizziert) für verschiedene Abstände h mit einer CFD-Simulation. Eine ähnlich gute Übereinstimmung zeigt sich bei der in Abb. 10b dargestellten radialen Verteilung des Drucks für zwei Werte von h/d_t .

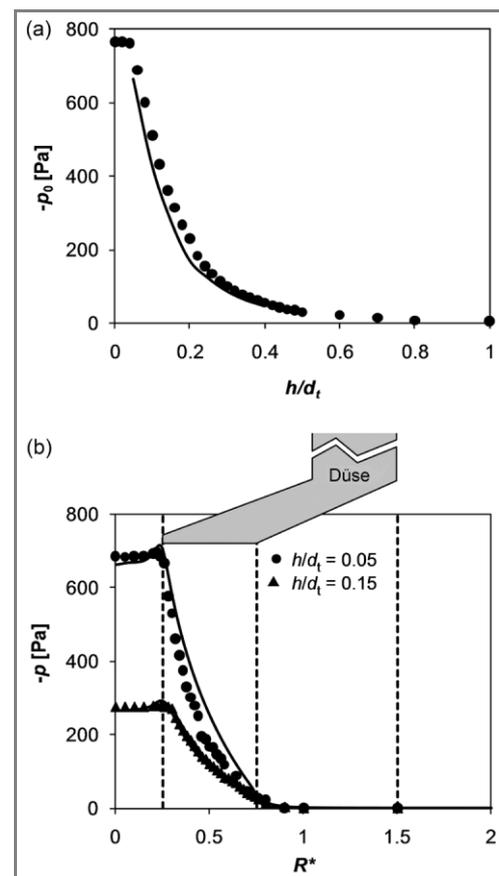


Abbildung 10. Vergleich des gemessenen Drucks unterhalb einer Düse ($d_t = 5$ mm) mit CFD-Simulationen. a) Einfluss des Abstands h/d_t auf den Druck am Staupunkt $-p_0$; b) radiale Verteilung des Drucks in dimensionsloser Darstellung $R^* = 2r/d_{\text{tube}}$ (nach [16]).

Die Verwendung von CFD ist sehr hilfreich bei der Bewertung von möglichen Geometrien. Peralta et al. [16] verglichen die radiale Verteilung der Schubspannung von konvergenten, divergenten und kreisringförmiger äußerer Düsenformen. Dabei zeigte sich, dass eine gleichmäßige Schubspannungsverteilung unter bestimmten Kombinationen von Geometrie und Strömungsbedingungen erreicht werden kann. Sie erweiterten diesen Ansatz durch die Entwicklung eines analytischen Modells zur Beschreibung der Strömung zwischen einer horizontalen Fläche und einer Düse beliebiger Form [17]. Abb. 11 zeigt eines ihrer Ergebnisse, wobei die Wandschubspannung gleichmäßig verteilt ist bei einer dimensionslosen radialen Position zwischen $0,17 \leq R^* \leq 0,58$ und allmählich ($\tau_w \sim R^{*-1}$) zwischen $0,58 < R^* \leq 1,0$ abnimmt. In der Abbildung zeigt die durchgezogene Linie für \tilde{h} die dafür notwendige Form der Düse. Dabei ist $\tilde{h} \equiv h/h_0$ der dimensionslose Abstand mit h_0 als Abstand zwischen dem äußeren Teil der Düse am Außenradius r_0 und der zu untersuchenden Oberfläche; entsprechend ist $R^* = r/r_0$. Für diesen Fall gilt im inneren Bereich $\tilde{h} \propto R^{*-0,5}$ und $\tilde{h} = 1$ im äußeren Bereich. Die aufgeprägte Schubspannung von $\sim 0,3$ Pa ist geeignet für weichere Foulingschichten. Weitere geplante Arbeiten beinhalten die lokale Untersuchung des Strömungsfeldes. Diese Arbeit zeigt, dass es möglich ist, Düsengeometrien für spezifische FDG-Anwendungen zu entwickeln.

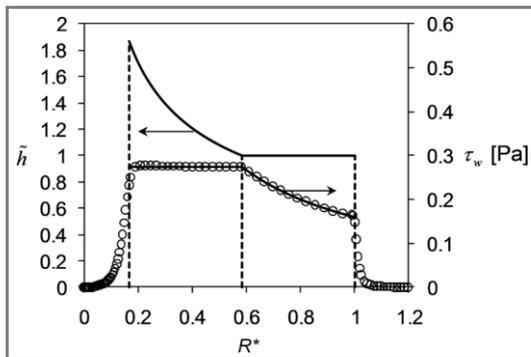


Abbildung 11. Schubspannungsverteilung τ_w und dimensionsloser Abstand \tilde{h} für ein neues Düsendesign nach dem analytischen Ansatz von Peralta [17].

6 Zusammenfassung

Fluid Dynamic Gauging ermöglicht die Bestimmung der Dicke sowie des Kohäsions- und Adhäsionsverhaltens von weichen Schichten in ruhenden oder strömenden Flüssigkeiten. Aktuelle Weiterentwicklungen dieser Messtechnik, die für Untersuchungen auf dem Gebiet Fouling und Reinigung relevant sind, betreffen:

1) Die Entwicklung des Druckmodus macht die Messung unabhängig von Absolutdruck und dem kontrollierten Flüssigkeitsabzug aus dem System. Dies ist insbesondere hilfreich bei Strömungen unter Druck und kann z. B. bei Membranen eingesetzt werden.

- 2) Die Erweiterung der Scanning FDG-Technik (sFDG) erlaubt eine kontinuierliche Variation der Stoffeigenschaften der Flüssigkeit sowie von Zusammensetzung und Temperatur.
- 3) Anwendung des sFDG auf weiche Ablagerungen wie Biofilme, die keine homogene Schichtdickenverteilung aufweisen.
- 4) Gleichzeitige, vergleichende Untersuchung von unterschiedlichen Oberflächen.
- 5) Rigorose mathematische Modellierung der FDG-Eigenschaften, die die Düsengeometrie mit speziellen Strömungsvariablen und/oder optimalen Betriebsweisen in Beziehung setzt. Diese Modelle sind einfach zum Screening spezifischer Düsengeometrien anzuwenden.

Die Autoren danken Lee Pratt, Andy Hubbard, Gary Chapman, Karl Karrenführer und Surinder Sall für ihr Geschick und die kreativen Beiträge bei der Fertigung der verschiedenen FDG-Apparaturen. Die Biofilme wurden von Alistair McCormick bereitgestellt. Große Teile der hier präsentierten Arbeiten sind Teil einer vom DAAD und dem British Council geförderten Kooperation der Forschungsgruppen an der TU Braunschweig und der University of Cambridge. John Chew wird durch ein RAEng Research Fellowship und Juan-Manuel Peralta durch ein CONICET Visiting Fellowship gefördert.

Formelzeichen

| | | |
|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| C_d | [-] | dimensionsloser Massenstrom |
| d_t | [m] | Durchmesser der Düsenöffnung |
| d_{tube} | [m] | Rohrdurchmesser |
| H | [m] | hydrostatische Höhe |
| h, h_0 | [m] | Abstand, Anfangswert |
| \tilde{h} | [-] | dimensionsloser Abstand |
| L | [m] | Kanallänge |
| m | [kg s ⁻¹] | Massenstrom |
| P_i | [Pa] | Druck an der Position i |
| P_{static} | [Pa] | statischer Druck |
| R^* | [-] | dimensionslose radiale Position |
| R_a | [m] | arithmetische mittlere Rautiefe |
| Re_t | [-] | Reynolds-Zahl am Düsendurchmesser |
| Re_{duct} | [-] | Reynolds-Zahl im Kanal |
| TMP | [Pa] | Transmembrandruck |
| u_m | [m s ⁻¹] | mittlere Strömungsgeschwindigkeit |
| w_e | [m] | Höhe des Düsenrandes |
| w_r | [m] | Breite des Düsenrandes |
| x, y | [-] | Koordinaten in horizontaler Richtung |

Griechische Symbole

| | | |
|----------|-----------------------|-------------------|
| δ | [m] | Schichtdicke |
| ρ^* | [kg m ⁻³] | Dichte |
| τ_w | [Pa] | Wandschubspannung |

Literatur

- [1] T. R. Tuladhar, W. R. Paterson, N. Macleod, D. I. Wilson, *Can. J. Chem. Eng.* **2000**, *78*, 935–947. DOI: 10.1002/cjce.5450780511
- [2] P. Saikhwan, Y. M. J. Chew, W. R. Paterson, D. I. Wilson, *Food Manuf. Effic.* **2007**, *1* (2), 35–41.
- [3] P. W. Gordon, A. D. Brooker, Y. M. J. Chew, D. I. Wilson, D. W. York, *Meas. Sci. Technol.* **2010**, *21*, 085103. DOI: 10.1088/0957-0233/21/8/085103
- [4] T. Gu, Y. M. J. Chew, W. R. Paterson, D. I. Wilson, *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 219–227. DOI: 10.1016/j.ces.2008.09.032
- [5] R. W. Morse, J. G. Knudsen, *Can. J. Chem. Eng.* **1977**, *55* (3), 272–278. DOI: 10.1002/cjce.5450550306
- [6] T. Gu, F. Albert, W. Augustin, Y. M. J. Chew, M. Mayer, W. R. Paterson, S. Scholl, I. Sheikh, K. Wang, D. I. Wilson, *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2011**, *3*, 509–520. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.12.002
- [7] V. Y. Lister, C. Lucas, P. W. Gordon, Y. M. J. Chew, D. I. Wilson, *J. Membr. Sci.* **2010**, *366*, 304–313. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.10.017
- [8] S. A. Jones, Y. M. J. Chew, M. R. Bird, D. I. Wilson, *Food Bioprod. Process.* **2010**, *88*, 409–418. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.07.004
- [9] P. W. Gordon, A. D. M. Brooker, Y. M. J. Chew, D. I. Wilson, D. W. York, *Food Bioprod. Process.* **2010**, *88*, 357–364. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.08.012
- [10] R. B. Möhle, T. Langemann, M. Haesner, W. Augustin, S. Scholl, T. R. Neu, D. C. Hempel, H. Horn, *Biotechnol. Bioeng.* **2007**, *98* (4), 747–754. DOI: 10.1002/bit.21444
- [11] A. J. McCormick, P. Bombelli, A. M. Scott, A. J. Philips, A. G. Smith, A. C. Fisher, C. J. Howe, *Energy Environ. Sci.* **2011**, *4*, 4699–4709. DOI: 10.1039/C1EE01965A
- [12] T. Geddert, W. Augustin, S. Scholl, *Heat Transfer Eng.* **2011**, *32* (3–4), 300–306. DOI: 10.1080/01457632.2010.495629
- [13] M. Schöler, P. W. Gordon, H. Föste, M. Mauermann, Y. M. J. Chew, W. Augustin, S. Scholl, D. I. Wilson, J. P. Majschak, in *Proc. of the Conference Heat Exchanger Fouling and Cleaning IX* (Eds: H. Müller-Steinhagen, R. Malageri), Crete, June **2011**.
- [14] M. D. Deshpande, R. N. Vaishnav, *J. Fluid Mechanics* **1982**, *114*, 216–236. DOI: 10.1017/S0022112082000111
- [15] Y. M. J. Chew, W. R. Paterson, D. I. Wilson, *J. Food Eng.* **2004**, *65* (2), 175–187. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.01.013
- [16] J. M. Peralta, Y. M. J. Chew, D. I. Wilson, *Chem. Eng. Res. Des.* **2012**, in press. DOI: 10.1016/j.cherd.2011.06.009
- [17] J. M. Peralta, Y. M. J. Chew, D. I. Wilson, *Chem. Eng. Sci.* **2011**, *66*, 3579–3591. DOI: 10.1016/j.ces.2011.04.020

DOI: 10.1002/cite.201100165

Messung von weichen Foulingschichten auf festen und porösen Oberflächen mit dem Fluid Dynamic Gauging

W. Augustin*, Y. M. J. Chew, P. W. Gordon, V. Y. Lister, M. Mayer, B. R. Paterson, J.-M. Peralta, S. Scholl, D. I. Wilson

Die charakteristischen Eigenschaften weicher Schichten wie Biofilme und Proteinablagerungen in flüssigen Systemen können mittels Fluid Dynamic Gauging bei unterschiedlichen Prozessbedingungen bestimmt werden. Dabei erlauben verschiedenen Messmodi und Düsendesigns eine abgelagerungs- und geometriespezifische Untersuchung. Weiterentwicklungen dieser Methode werden vorgestellt und diskutiert. ■

