

Matz, Alexander Martin; Jost, Norbert

Research Report

Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen

Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 143

Provided in Cooperation with:

Hochschule Pforzheim

Suggested Citation: Matz, Alexander Martin; Jost, Norbert (2012) : Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen, Beiträge der Hochschule Pforzheim, No. 143, Hochschule Pforzheim, Pforzheim, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:951-opus-396>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/97587>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

"Focus Werkstoffe"

(Herausgegeben von Norbert Jost)

Alexander Martin Matz, Norbert Jost

**Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf
Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen**

Nr. 143

Herausgeber: Prof. Dr. Ansgar Häfner, Prof. Dr. Norbert Jost, Prof. Dr. Karl-Heinz Rau, Prof. Dr. Roland Scherr, Prof. Dr. Christa Wehner, Prof. Dr. Hanno Beck (geschäftsführend; Hanno.beck@hs-pforzheim.de)

Ausgabe:143 **Datum: Mai 2012**

Alexander Martin Matz, Norbert Jost

**Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf
Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen**

**Band 2
der Publikationsserie
"Focus Werkstoffe"**

Norbert Jost (Hrsg.)

Die Autoren:**Dipl.-Ing. (FH) Alexander Martin Matz**

Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor
Offenporige Zelluläre Strukturen
Hochschule Pforzheim, Tiefenbronner Straße 65, 75175 Pforzheim
e-Mail: alexander.matz@hs-pforzheim.de

Alexander Martin Matz absolvierte sein Maschinenbaustudium an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft in Karlsruhe und an der University of Ontario – Institute of Technology in Oshawa, ON (Kanada). Begleitend dazu sammelte er umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Wärmeübertragung, Messtechnik und Berechnungsmethodenentwicklung bei der Volkswagen AG in Wolfsburg. Seit 2010 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Laborbereich Werkstoffkunde an der Hochschule Pforzheim und promoviert am Lehrstuhl Werkstoffwissenschaft an der Ruhr-Universität Bochum in Bochum. Im Rahmen seiner wissenschaftlichen Tätigkeit beschäftigt er sich mit den morphologischen und physikalischen Eigenschaften von offenporigen zellulären Werkstoffen auf Metallbasis.

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor
Hochschule Pforzheim, Tiefenbronner Straße 65, 75175 Pforzheim
e-Mail: norbert.jost@hs-pforzheim.de

Norbert Jost studierte Maschinenbau mit der Vertiefungsrichtung Werkstoffe an der Ruhr-Universität Bochum. Hier erfolgte auch die Promotion mit dem Thema "Fe-Ni-Basis Formgedächtnislegierungen". Parallel zur Promotion absolvierte er ein Abendstudium zum Dipl.-Wirt.-Ing (FH). Danach war er Oberingenieur an der Fakultät für Werkstoffwissenschaften der Ruhr-Universität Bochum, bevor er zur DEKRA AG nach Stuttgart wechselte und dort eine Stabsabteilung leitete sowie zum Assistent des Vorstandsvorsitzenden berufen wurde. Bei der DEKRA-ETS mbH in Saarbücken war er Direktor der Material-Prüfanstalt und stellvertretender Geschäftsführer.

Im Jahr 1996 wurde Norbert Jost an der Hochschule zum Professor für den Bereich Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung sowie Festigkeitslehre ernannt. Parallel dazu leitet er das von ihm gegründete Steinbeis-Transferzentrum für Werkstoffentwicklung und Prüfung. Seine augenblicklichen Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der hochfesten Cu-Basis-Legierungen sowie der metallischen Schäume.

Vorwort des Herausgebers

Ein an der Hochschule Pforzheim im Bereich Werkstoffe mit großem Interesse verfolgtes und aktiv bearbeitetes Gebiet stellen die metallischen Schäume und hier insbesondere die **offenzelligen** metallischen Schäume dar. Dieses im Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor (WEP) eher langfristig ausgelegte Forschungsgebiet stellt nach Ansicht der Pforzheimer Arbeitsgruppe im Augenblick ein Riesenpotenzial an Forschung und Entwicklung bereit.

Die Aktivitäten des WEP konzentrieren sich dabei im Augenblick auf zwei Themenschwerpunkte. Zu allererst gilt es, die den Schäumen ganz eigene Struktur zu definieren und zu beschreiben. Hier existiert beim aktuellen Stand der Forschung ein auffälliges und die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet eher hemmendes Defizit. Wertvolle erste Ansätze konnten durch die Arbeiten im WEP bereits erarbeitet werden und werden weiterhin sukzessive ergänzt. Neben diesen mikrostrukturellen Betrachtungen der Schaummorphologien stehen gänzlich neue Anwendungen, insbesondere im Bereich von Wärmetauscheranlagen, im Brennpunkt der Pforzheimer Forschungsaktivitäten. Hier wird ein Konzept verfolgt, die Schäume als aktive Bauelemente in Wärmetauschern zu integrieren, was bei Erfolg zu einem ganz neuen und durchaus patentträchtigen Konzept für Wärmeanlagen führen könnte. Zu diesem Themenkomplex wird auch seit Juli 2011 im WEP ein Forschungsprojekt bearbeitet, in dem die Möglichkeiten zu einer im Vergleich zu konventionellen Anlagen äußerst bedarfsgerechten und weitaus effektiveren Nutzung aufgezeigt werden. Um dies zu ermöglichen und einen zielgerichteten und möglichst optimalen Einsatz von offenporigen metallischen Schäumen in thermischen Systemen zu gewährleisten, ist es allerdings notwendig, viele Einzelfragen und –probleme zu klären. Eines davon ist das in diesem Aufsatz diskutierte und experimentell ausführlich dargestellte Fouling-Problem.

Norbert Jost, im April 2012

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung/Motivation	6
Abstract/Motivation	6
1 Einleitung	7
1.1 Offenporige metallische Schäume	8
1.2 Foulingerscheinungen	8
2 Experimentelle Methoden	10
2.1 Prüfstandsuntersuchung.....	10
2.2 Lichtmikroskopische Messung.....	10
2.3 Digitalmikroskopische Messung	11
3 Ergebnisse	12
3.1 Lichtmikroskopische Charakterisierung	12
3.2 Digitalmikroskopische Charakterisierung.....	14
4 Zusammenfassung und Diskussion.....	17
5 Literatur.....	18
Bildverzeichnis.....	19
Nomenklatur	20
Danksagung.....	21

Kurzfassung/Motivation

Fluidspeichernde und -durchströmte Apparaturen und Anlagen neigen z. B. bei Einsatz von Wasser zu einer Kalksedimentations- bzw. Foulinganfälligkeit durch Verunreinigungen im Fluid. Dies birgt gravierende Einschränkungen der Funktionalität der Anlagen im Langzeitbetrieb in sich, was sich bspw. insbesondere in einer abnehmenden Wärmeübertragung auswirkt.

Bei Bauteilen mit filigraner geometrischer Ausprägung und gleichzeitig großer Oberfläche — wie sie vorrangig in o. g. Apparaturen und Anlagen eingesetzt werden — kommt es ohne entsprechende Gegenmaßnahmen zu raschen Funktionalitätseinbußen. Die entsprechende Schadensanfälligkeit offenporiger zellulärer Werkstoffe, die im Fokus dieser Arbeit stehen, verhält sich gegenüber bereits eingesetzten Bauteilen, wie z. B. Rohrbündeln oder Platten, aufgrund ihrer Geometrie, abweichend. Zur Beurteilung der Einsetzbarkeit offenporiger zellulärer Werkstoffe auf Metallbasis in fluidspeichernden und -durchströmten Apparaturen und Anlagen, ist es elementar die Verschmutzungs- und Korrosionsneigung zu kennen. Da dieses Verhalten für offenporige metallische zelluläre Strukturen bisher noch nicht näher untersucht wurde, dient diese Arbeit dazu, erstmalig die geometrieabhängige Anfälligkeit für Foulingscheinungen an offenporigen Aluminiumbasisschäumen in wärmetechnischen Systemen unter experimentellen Worst-Case-Bedingungen aufzuzeigen sowie die dabei wirksamen werkstoffkundlichen Vorgänge zu diskutieren und zu bewerten.

Abstract/Motivation

Fluid storage and flow systems are prone to fouling due to impurities in the fluid. This poses serious limitations to the functionality of the systems in long term operation and consequently leads to a decreasing heat transfer.

Components with intricate geometric shapes, as used in the above mentioned systems, tend to a rapid loss of functionality if no counteractive measures are taken. The corresponding vulnerability of open-pore cellular materials, which are the focus of this work, behaves different in comparison to conventional components. For evaluation of the applicability of open-pore cellular metals in a fluid storage and flow systems it is elementary to know about the propensity of fouling and corrosion. This behavior has been not been studied in detail for open-pore cellular metals. Hence, this work is carried out to evaluate the geometry-dependent susceptibility for fouling of open-pore Al-foams in thermal systems under experimental worst-case conditions.

Stichwörter: Metallschaum, offenporige zelluläre Strukturen; Aluminium; Fouling; Kalksedimentation; Wärmetauscher; Wärmeübertrager; Wärmespeicher

GBV-Klassifikation: 51.24

1 Einleitung

Korrosion und Ablagerungsbildung (Fouling) an Wasserwärmetauschern sind, bedingt durch das umgebende Medium, kaum zu vermeiden. Dies führt dazu, dass das wärmeübertragende Bauteil, welches eine hohe Wärmeleitfähigkeit λ aufweist, nach einer gewissen Betriebszeit an seiner Oberfläche mit einer Korrosions- oder Foulingschicht überzogen ist. Eine negative Folge davon ist eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit, wodurch sich bei der Wärmeübertragung wiederum ein zusätzlicher Wärmedurchgangswiderstand ergibt. Die unmittelbaren Auswirkungen können schematisch **Bild 1** entnommen werden. Hier sind qualitativ Wärmestrom und Temperaturverlauf durch eine saubere und eine verschmutzte Wand gegenüber gestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass das Temperaturniveau bei der verschmutzten Wand deutlich geringer ausfällt und dadurch der Wirkungsgrad der Anlage drastisch beeinträchtigt wird. Zudem führt das Fouling, und teils auch die Korrosion, zu einem Anstieg des Druckverlustes bedingt durch den verengten Strömungsquerschnitt [3].

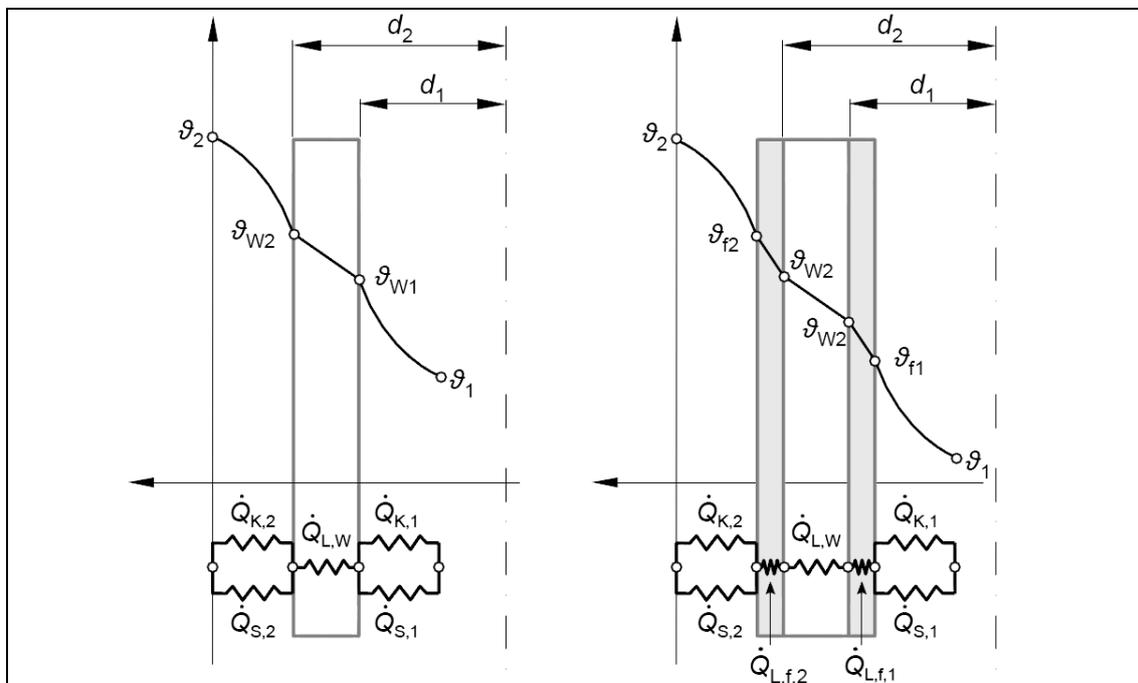


Bild 1: Wärmeübertragung durch eine saubere (li.) und verschmutzte Heizfläche (re.) (nach [8])

Aus diesem Grunde ist es häufig erforderlich, Wärmeübertrager gezielt größer zu dimensionieren um die eigentlich benötigte Leistungsfähigkeit zu erreichen. Da neben dem Wärmedurchgangswiderstand auch die Wärmeübertragungsfläche die Eigenschaften eines Wärmetauschers charakterisieren, wird in der vorliegenden Arbeit zur Verringerung der Anlagengröße bei gleichzeitig sehr dynamischer Wärmeübertragung der Einsatz von offenporigen metallischen Schäumen (s. Abschn. 1.1) betrachtet und das dabei entstehende Foulingverhalten für diese neue Werkstoffgruppe ermittelt.

1.1 Offenporige metallische Schäume

Offenporige metallische Schäume zählen zu einer der jüngsten Generation zellulärer Strukturen. Sie weisen eine sehr geringe Dichte und eine große Anzahl physikalischer Eigenschaften auf, die als neuartig anzusehen sind. Auf Grund der Kombination des metallischen Basismaterials in Verbindung mit ihrer Struktur bieten sie teilweise sogar eine einzigartige Funktionalität, die insbesondere ein hohes Potential für thermische Systeme, katalytische Filterträger, Dampferzeugung und Energieabsorption, sowie Kombinationen der zuvor genannten Anwendungen in sich trägt [4]. So wird dieser Werkstoff in wärmetechnischen Anwendungen gerade durch die Kombination aus der hohen Porosität des Materials in Verbindung mit der sehr großen Oberfläche und der sehr guten Wärmeleitfähigkeit des Basismaterials Aluminium in höchstem Maße interessant für den Einsatz als wärmeübertragendes Element. In solchen Anlagen stellt die Wärmeübertragerfläche das Hauptkriterium für einen guten Wärmeübergang dar [1].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden offenporige AlSi7Mg-Schäume mit einer Porendichte von $\rho_p = 10 \text{ ppi}^1$, wie in **Bild 2** dargestellt, als wärmeübertragendes Element in einem Wärmeübertragungsprüfstand implementiert (vgl. Kap. 2). Mit diesem idealisierten experimentellen Aufbau wird das Verhalten eines Wärmeübertragers im Heizungsbetrieb realitätsnah simuliert. Bei Langzeitversuchen mit diesem Aufbau wird besonderes Augenmerk auf die Anfälligkeit des offenporigen Metallschaums für Foulingscheinungen gelegt.

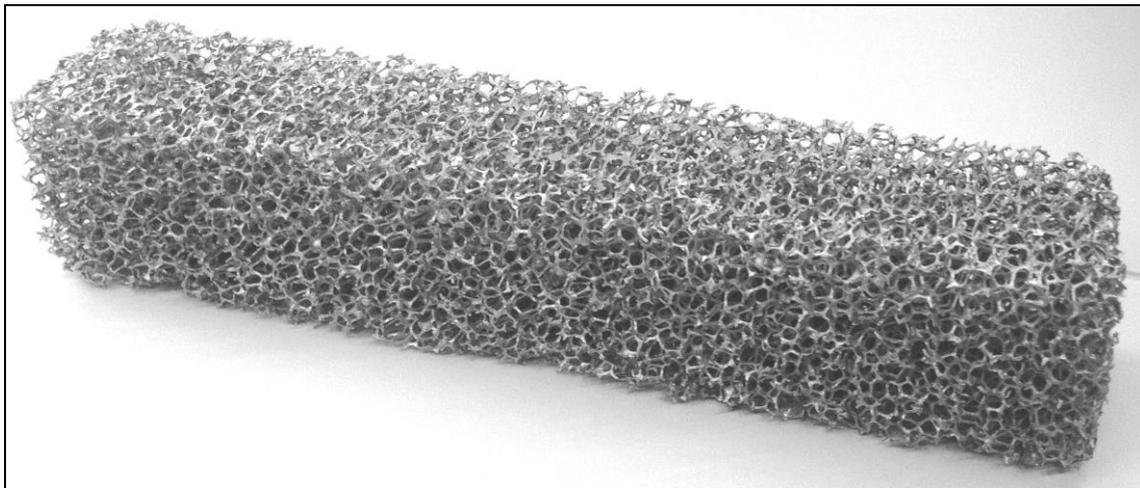


Bild 2: Offenporiger 10 ppi Metallschaum aus einer AlSi7Mg-Legierung

1.2 Foulingscheinungen

Foulingschichten bilden sich an wärmeübertragenden Bauteilen hauptsächlich durch die Kristallisation von Salzen aus. Dieser Vorgang ist vorrangig darauf zurückzuführen, dass die sog. Härtebildner

- Calcium- und
- Magnesiumsalze,

¹ Poren je Zoll (engl.: pores per inch)

deren Summe im Übrigen die Gesamthärte eines Wassers bildet, im Wärmetransportmedium eine inverse Löslichkeit aufweisen [5]. Bestärkt durch die erhöhten Temperaturen im System, erfolgen i. d. R. eine Übersättigung und dadurch ein Auskristallisieren der Salze [6].

Das eigentliche Kristallwachstum findet nach der Keimbildung am Bauteil statt und ist in die Teilschritte

- Transport der Ionen aus der Kernströmung durch Konvektion,
- Adsorption der Ionen an der umgebenden Grenzschicht der Kristalloberfläche,
- Transport der Ionen auf der Kristalloberfläche zur Wachstumsfront und
- Einbau der Ionen in das Kristallgitter

zu untergliedern [7]. In Abhängigkeit der Parameter Temperatur, Druck, Viskosität, Übersättigung und pH-Wert des Fluides erfolgt die entsprechende Ausprägung der Kristalle [2]. In der vorliegenden Arbeit liegt jedoch der Fokus lediglich auf der quantitativen Analyse der Foulingschichtdickenzunahme mittels mikroskopischer Methoden. Hier werden die direkte Schichtdickenmessung mit einem Lichtmikroskop sowie die Stegdickenmessung mit einem Digitalmikroskop angewendet.

2 Experimentelle Methoden

2.1 Prüfstandsuntersuchung

Die hier dokumentierten Untersuchungen zur Bildung von Foulingschichten an offenporigen Metallschäumen auf AlSi7Mg-Basis erfolgen in einem Wärmeübertragungsprüfstand, dessen schematischer Aufbau in **Bild 3** dargestellt ist. Als Wärmetransportmedium wird Trinkwasser aus dem Wasserleitungsnetz entnommen, welches einen mittleren Härtebereich von $8,4 \text{ }^\circ\text{dH} \geq \delta_{\text{FI}} \geq 14 \text{ }^\circ\text{dH}$ aufweist. Die Temperatur des Wärmetransportmediums Wasser beträgt auf der Heizseite des in Gleichstromrichtung betriebenen Prüfstands $\vartheta_{\text{FI}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ und der Förderdruck im Heiz- und im kalten Kreislauf jeweils $p_{\text{FL}} = 1 \text{ bar}$. Die Metallschaumproben in den Abmessungen $40 \cdot 40 \cdot 25 \text{ mm}^3$ sind in der Wärmeübertragungseinheit des Prüfstandes platziert (Pos. 1 in **Bild 3**), und werden Langzeitversuchen von bis zu $t_{\text{max}} = 1.008 \text{ h}$ unterzogen. Hierbei findet jeweils eine Probenentnahme nach den Zeiträumen $\Delta t = 168 \text{ h}$ statt.

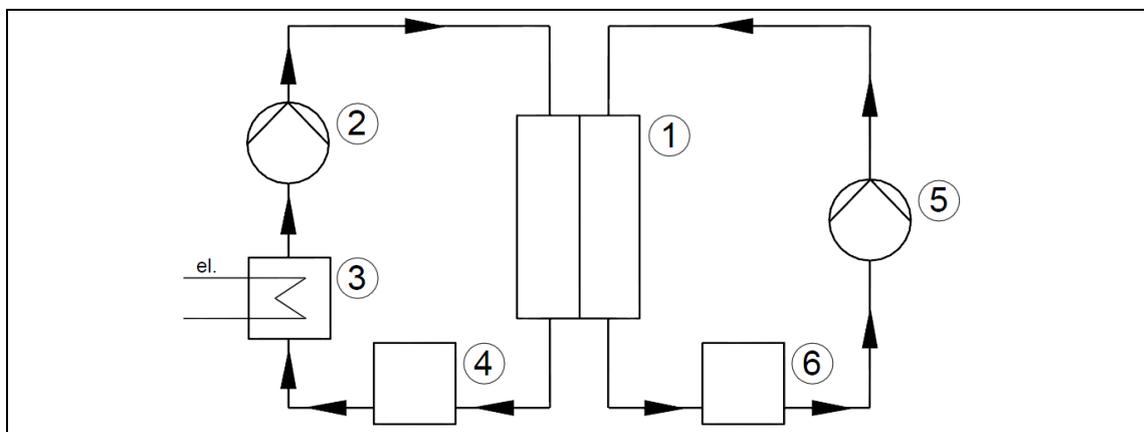


Bild 3: Wärmeübertragungsprüfstand; vereinfachtes Schaltbild (1: Metallschaum-Wärmeübertragungseinheit; 2: Pumpe, 3: Einschraubheizkörper und 4: Behälter des Heizkreislaufs; 5: Pumpe; 6: Behälter des kalten Kreislaufs)

2.2 Lichtmikroskopische Messung

Zur Quantifizierung der sich während des Prüfstandsbetriebes bildenden Foulingschicht in der Mitte der jeweiligen Stege, werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten Proben entnommen und lichtmikroskopisch erfasst. Hierzu werden die Proben nach entsprechendem Ablängen in einer automatischen Warmeinbettpresse unter Verwendung von Bakelit eingebettet. Anschließend werden diese eingebetteten Proben mittels einer automatischen Schleif-Poliermaschine mit automatischem Dosierungssystem für Diamant- und Endsuspension abgetragen bis die einzelnen ausgewählten Stegflächen normal zum Stegprofil visuell erkennbar sind. Im Folgenden werden von den präparierten Proben einzelne ausgewählte Stege mit Hilfe eines Lichtmikroskops der Fa. Leica (Typ DMRM), unterstützt durch die Bildbearbeitungssoftware Stream der Fa. Olympus digitalisiert und vermessen. Um den Einfluss der Strömung auf die Foulingschichtbildung erfassen zu können, wird bei den Messungen an allen betrachteten Stegen zwischen den beiden Fällen

- strömungszugewandt und
- strömungsabgewandt

unterschieden. In **Bild 4** ist hierzu die geometrische Definition dieser beiden Fälle anhand einer schematischen Darstellung des Stegquerschnitts mit der Foulingschicht dargestellt.

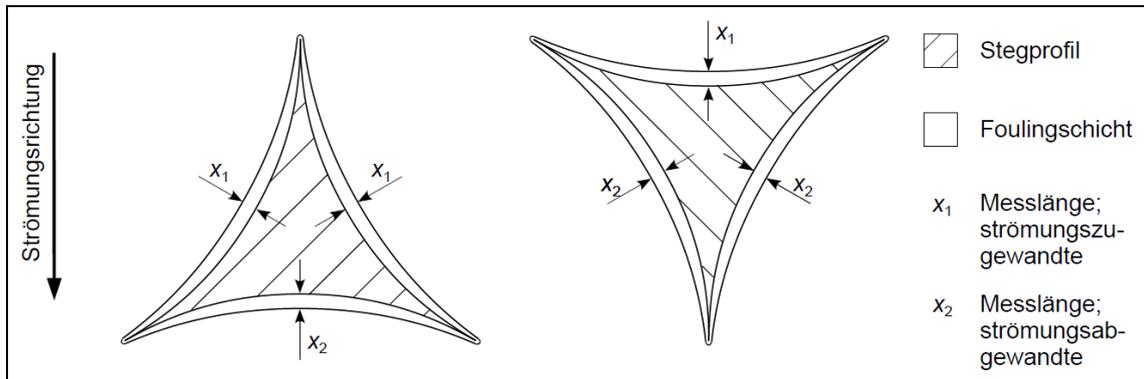


Bild 4: Definition der strömungszu- und strömungsabgewandten Seite mit zugehörigen Messstellen an zwei unterschiedlich ausgerichteten Stegprofilen bei der lichtmikroskopischen Analyse

2.3 Digitalmikroskopische Messung

Als weitere Methode zur Quantifizierung der Foulingscheinungen an den Kanten der jeweiligen Stege wird eine Analysemethode mit einem Digitalmikroskop der Fa. Keyence (Typ VHX-500F) mit integrierter Bildbearbeitungssoftware gewählt. Die digitalmikroskopische Methode erfordert nicht die o. g. Probenvorbereitung; es entfallen somit die Arbeitsschritte Einbetten, Schleifen und Polieren, was eine Zeitersparnis darstellt. Jedoch kann hiermit nicht oder nur äußerst bedingt die Foulingschicht direkt bestimmt werden. Es zeigt sich lediglich als möglich, die Stegbreite, wie in **Bild 5** dargestellt, zu ermitteln. Aus diesem Grunde werden bei dieser Methode alle Proben an relevanten Stegen einer Referenzmessung unterzogen. Relativ dazu wird nach jeder Probenentnahme die Foulingschichtdicke s_F ermittelt.

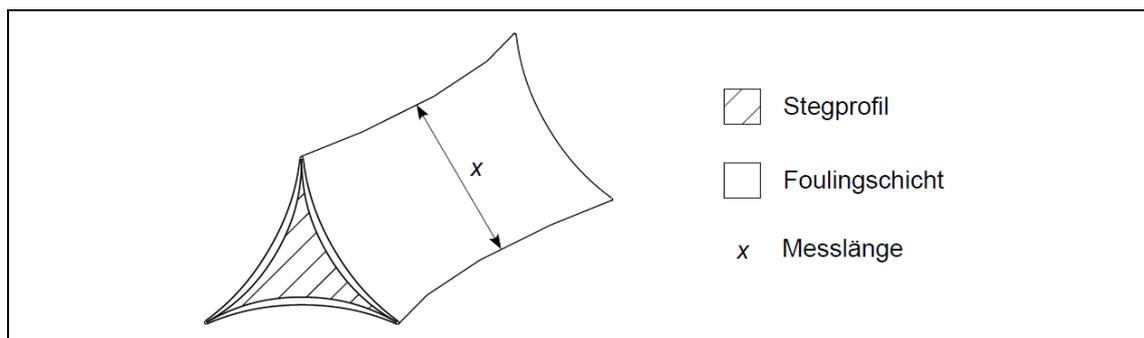


Bild 5: Messstelle an einem Steg bei der digitalmikroskopischen Analyse

3 Ergebnisse

3.1 Lichtmikroskopische Charakterisierung

Während des Betriebes der Wärmeübertragungsprüfstandes werden in den zeitlichen Abständen von $\Delta t = 168$ h einzelne Proben entnommen und gemäß der in Abschn. 2.2 beschriebenen Arbeitsschritte präpariert. Je Probe werden mehrere Stege an den jeweiligen drei Seiten gemäß den Angaben in **Bild 4** vermessen. Die qualitative Entwicklung der Foulingschichtdicke ist exemplarisch **Bild 6** zu entnehmen, wobei die Ausprägung der Foulingschicht jeweils zum Zeitpunkt $t = 168$ h und Zeitpunkt $t = 1.008$ h gegenübergestellt und so die stark zeitabhängige Ausprägung hin zu längeren Zeiträumen deutlich wird.

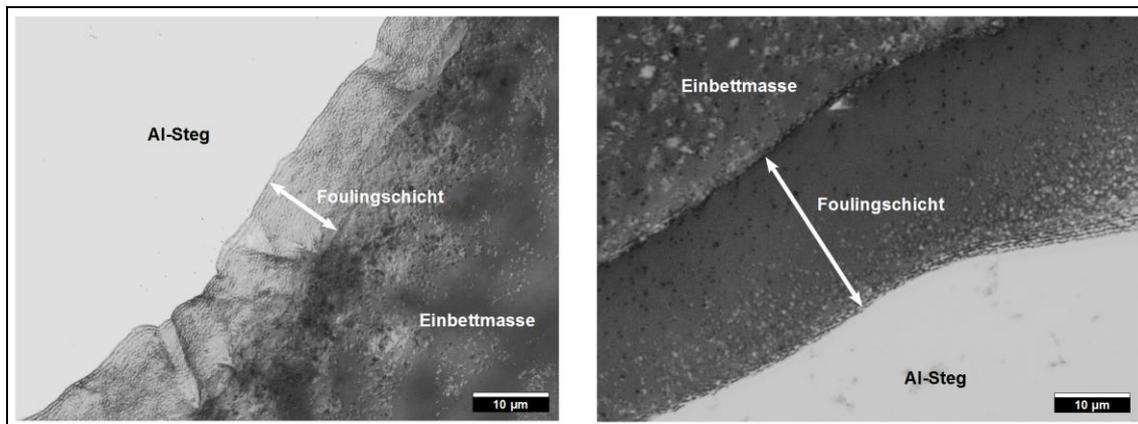


Bild 6: Lichtmikroskopisch erfasster Ausschnitt eines Metallschaumsteiges mit Foulingschicht; li: nach 168-stündiger Verweildauer im Prüfstand und re: nach 1.008-stündiger Verweildauer im Prüfstand

Die zeit- und strömungsrichtungsabhängige Foulingschichtdickenbildung ist für die lichtmikroskopische Anlysemethode **Bild 7** und **Bild 8** zu entnehmen. Alle hierbei eingezeichneten Messpunkte basieren auf Mittelwerten mehrerer Proben zu einem jeweils identischen Zeitpunkt. Zur Veranschaulichung der Streuung sind hierbei zu jedem Mittelwert die Fehlerindikatoren dargestellt. Unter Betrachtung des zeitlichen Verlaufs wird deutlich, dass zu Beginn der Prüfstandsexperimente eine rasche Foulingschichtdickenbildung stattfindet, die mit fortschreitender Zeit abnimmt und bereits zum Zeitpunkt $t = 840$ h an der strömungszugewandten Seite zu einer Sättigung konvergiert. Dieses Verhalten zeichnet sich bei der strömungsabgewandten Seite bereits zum Zeitpunkt $t = 504$ h ab. Der Verlauf der Kurve lässt sich für den betrachteten Zeitbereich anhand einer natürlichen Logarithmusfunktion gemäß

$$s_F(t) = c \cdot \ln(t)^4 \quad (1)$$

abbilden (mit t in h). Für die strömungszugewandte Seite ergibt sich somit die Konstante $c = 0,01882 \mu\text{m}$ und für die strömungsabgewandte Seite $c = 0,02458 \mu\text{m}$. Somit folgt für die strömungsabgewandte Seite ein um den Faktor 1,3 höhere Ausprägung der Foulingschicht.

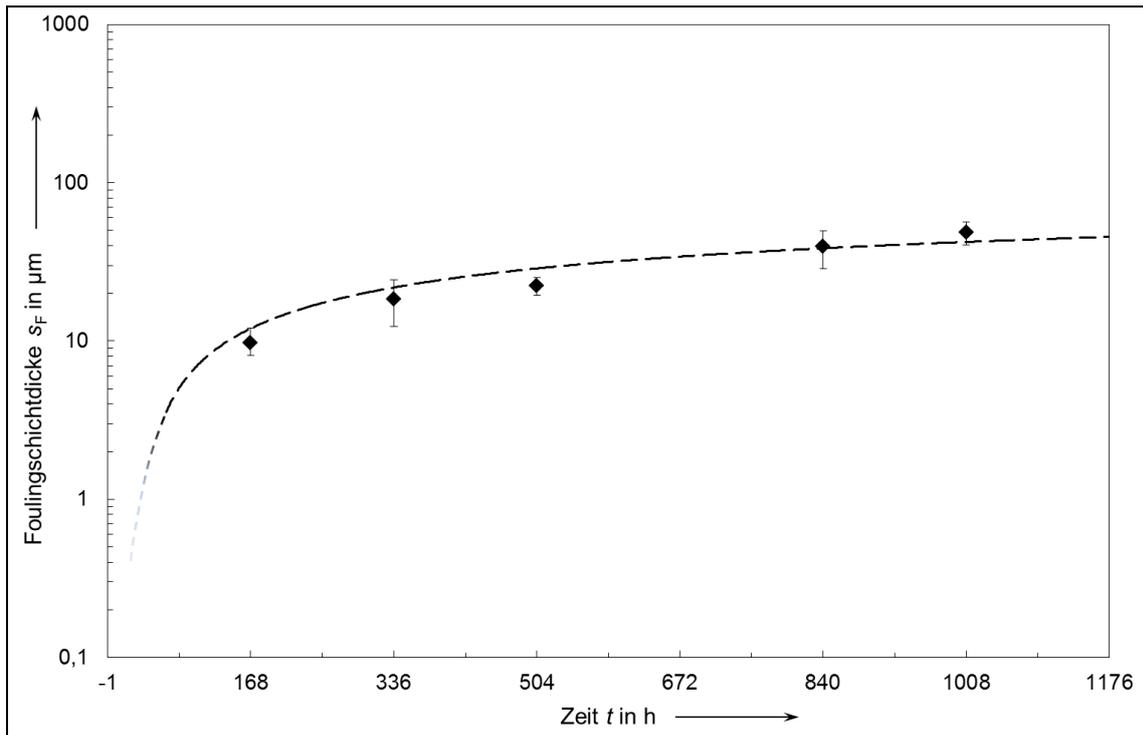


Bild 7: Zeitabhängige Entwicklung der Foulingsschichtdicke auf der strömungzugewandten Seite basierend auf Foulingsschichtdickenmessungen mittels Lichtmikroskopie

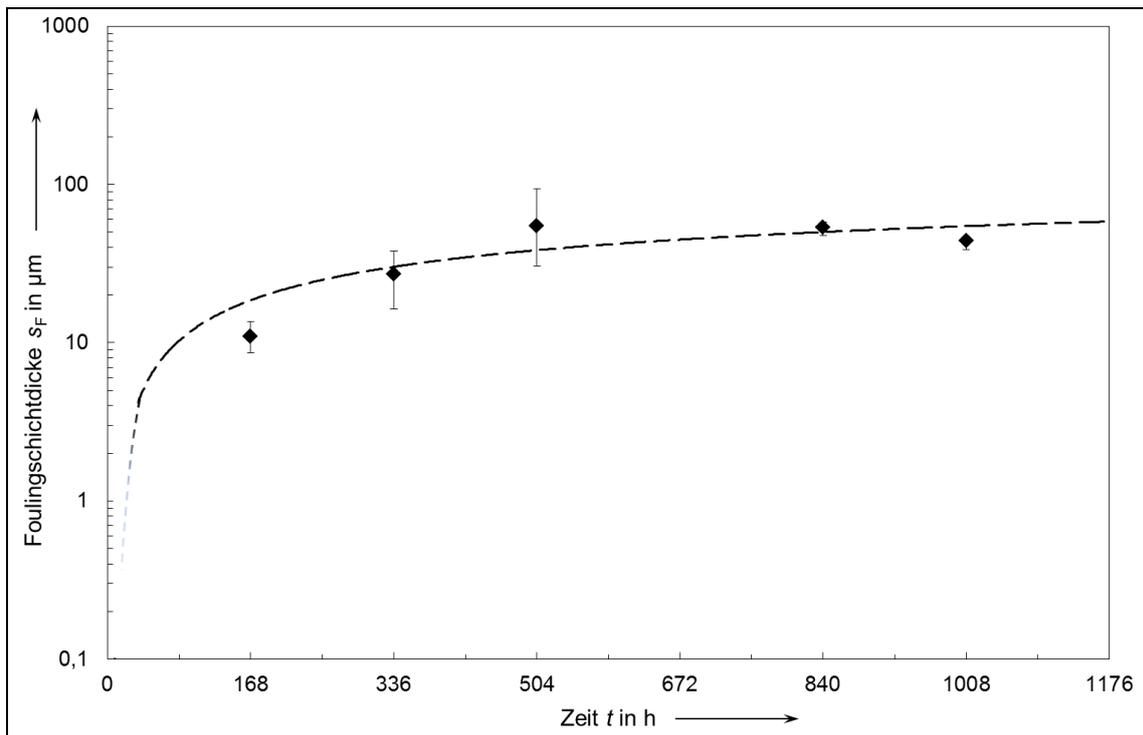


Bild 8: Zeitabhängige Entwicklung der Foulingsschichtdicke auf der strömungzugewandten Seite basierend auf Foulingsschichtdickenmessungen mittels Lichtmikroskopie

Im Mittel resultiert für die strömungszu- und strömungsabgewandte Seite die in **Bild 9** dargestellte Entwicklung der Foulingsschichtdicke. Die dabei zugehörige Funktion nach Gl. (1) mit der entsprechenden Konstante $c = 0,02211 \mu\text{m}$ erweist sich im betrachteten Zeitbereich als repräsentativ für die Auswirkungen auf das Wärmeübergangsverhalten, wie in **Bild 1** dargestellt. Es ist zudem zu

erkennen, dass die maximal erreichbare Foulingschicht unter den im Prüfstand gegebenen Bedingungen eine Dicke von ca. 50 μm annimmt.

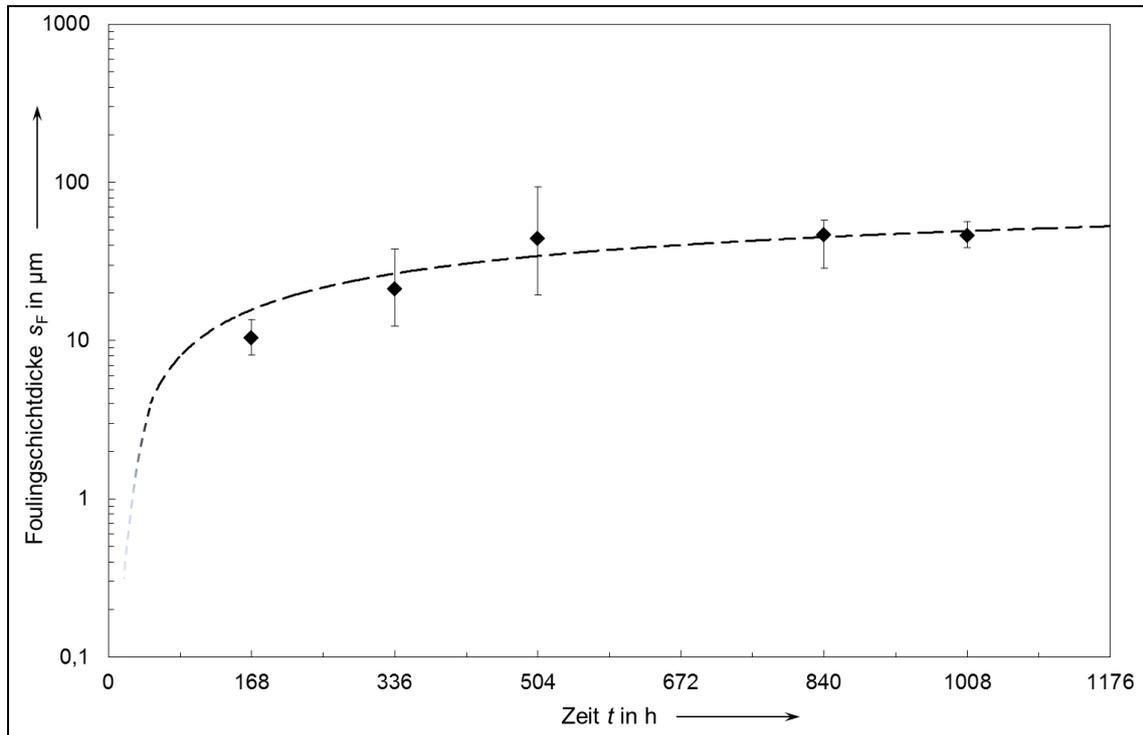


Bild 9: Gemittelte zeitabhängige Entwicklung der Foulingschichtdicke basierend auf Foulingschichtdickenmessungen mittels Lichtmikroskopie

3.2 Digitalmikroskopische Charakterisierung

Vor Beginn der Experimente werden an allen offenporigen Metallschaumproben Teilbereiche der Oberfläche mit einem Digitalmikroskop grafisch erfasst und so Referenzmessungen an einzelnen Metallstegen durchgeführt. Nach jeder Probenentnahme wird derselbe Teilbereich erneut betrachtet und weitere Messungen an den identischen Metallstegen durchgeführt. Exemplarisch sind in **Bild 10** und **Bild 11** zwei solcher Auswertestellen nach zwei unterschiedlichen Einwirkzeiten dargestellt. Es ist hierbei ein Ausschnitt der Metallschaumprobe in Referenzzustand im Vergleich zum strömungstechnisch belasteten Zustand nach $t = 336$ h im Wärmetauscher dargestellt (**Bild 10**). Demgegenüber ist **Bild 11** eine Gegenüberstellung des Referenzzustandes zum Zustand nach $t = 1.008$ h zu entnehmen. Ein direkter Vergleich der beiden belasteten Zustände zeigt visuell bereits eine deutlich stärker ausgeprägte Foulingschichtdicke s_F nach längerer Beanspruchung im Prüfstand.

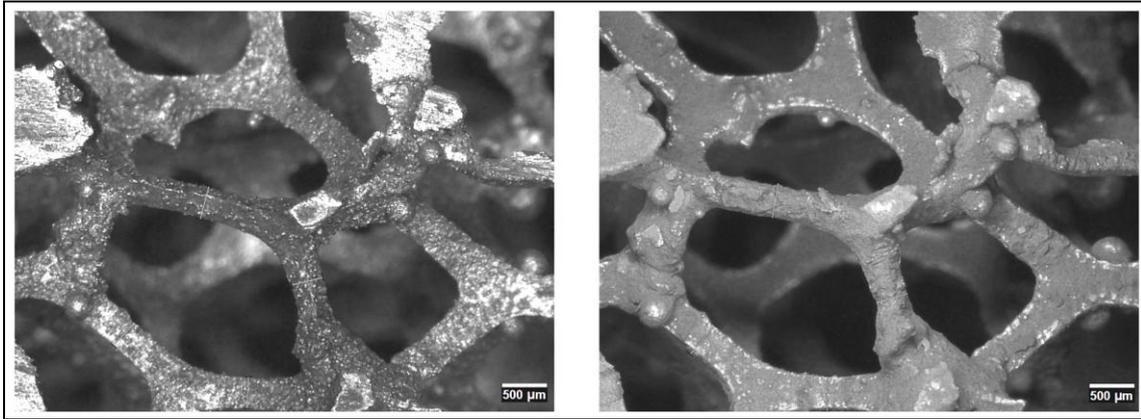


Bild 10: Digitalmikroskopisch erfasste Metallschaumprobe mit 336-stündiger Verweildauer im Prüfstand; li: Referenzbild und re: Aufnahme nach $t = 336$ h im Wärmetauscher

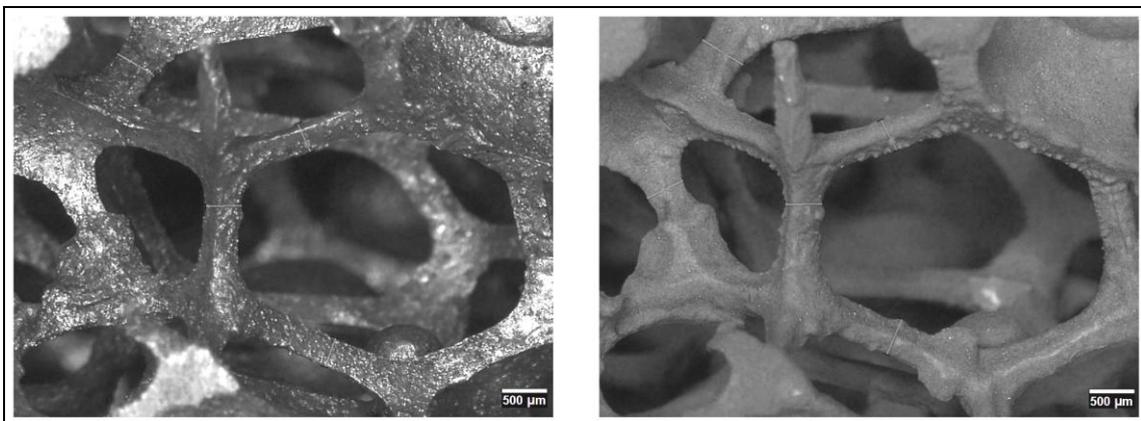


Bild 11: Digitalmikroskopisch erfasste Metallschaumprobe mit 1.008-stündiger Verweildauer im Prüfstand; li: Referenzbild und re: Aufnahme nach $t = 1.008$ h im Wärmetauscher

Bei den Messungen wird die Differenz der Stegbreiten s_{strut} beider Zustände gebildet, woraus die Summe der Foulingschichtdicke an zwei Stegkanten resultiert (vgl. **Bild 5**). Je Probe werden hierbei fünf einzelne Stege vermessen und aus diesen Messreihen der Mittelwert gebildet, der für die zuvor genannte Differenzbildung verwendet wird. Die zeitabhängige Foulingschichtdickenentwicklung ist in **Bild 12** dargestellt und zeigt auch hier das in Gl. (1) dargelegte Verhalten für den Zusammenhang der Parameter s_F und t . der hierbei ermittelte Faktor beträgt $c_1 = 0,03825 \mu\text{m}$ für den betrachteten Zeitbereich. Da bei dieser Methode die ermittelte Foulingschichtdicke mit dem Faktor zwei eingeht (Foulingschicht an zwei Kanten des betrachteten Steges), folgt eine Foulingschichtdickenausprägung an den Stegkanten von 86,5% der Foulingschichtdicke in der Mitte einer einzelnen Stegseite, die auf der lichtmikroskopischen Methode beruht.

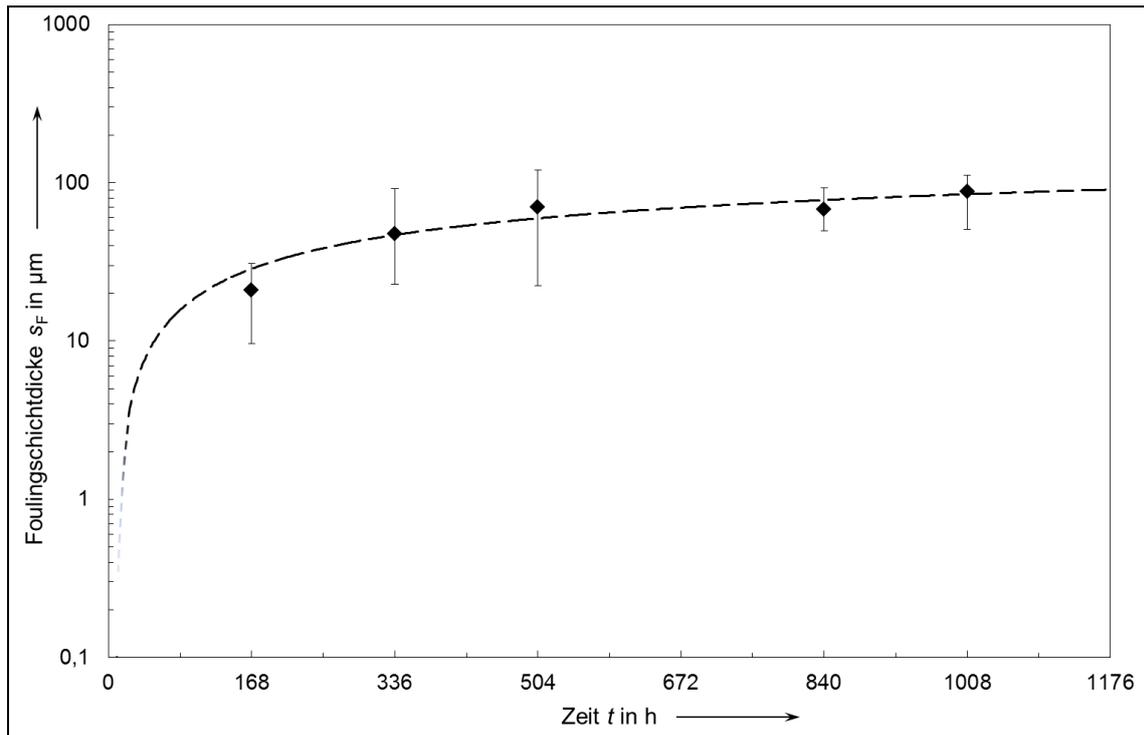


Bild 12: Zeitabhängige Entwicklung der Foulingsschichtdicke basierend auf Stegbreitenmessungen mittels Digitalmikroskop

4 Zusammenfassung und Diskussion

Bei dem Einsatz von offenporigen zellulären Strukturen auf Aluminiumbasis in beheizten wasser-durchströmten Systemen werden Foulingschichten, die das Wärmeübertragungspotential beeinträchtigen, induziert. Diese Foulingschichten bilden sich nach Inbetriebnahme des Systems sehr rasch aus, konvergieren aber bereits nach drei bis fünf Wochen gegen einen Endwert bzw. eine maximale Foulingschichtdickenausprägung und folgen für den betrachteten Zeitraum einer Logarithmusfunktion (s. Gl. (1)). Darüber hinaus sind bei der Foulingschichtbildung Unterschiede in deren Ausprägung in Abhängigkeit der Steganordnung zur Strömungsrichtung, sowie in Abhängigkeit Steggeometrie zu erkennen. So findet die stärkste Foulingschichtbildung im Zentrum der jeweiligen Stegseite statt (vgl. Messstellen in **Bild 4**), wobei die Stegkanten eine geringere Anfälligkeit aufweisen. Darüber hinaus sind stärkere Ausprägungen an den strömungsabgewandten gegenüber den strömungszugewandten Seiten erkennbar. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der konzeptionellen Auslegung von wärmetechnischen Anlagen unter Verwendung von offenporigen metallischen Schäumen auf Al-Basis eine Foulingschichtdicke von im Mittel $s_F = 50 \mu\text{m}$ zu berücksichtigen und die Anlagengröße gemäß der sich daraus ergebenden Einschränkungen der Wärmedurchgangszahl dimensioniert werden muss.

5 Literatur

- [1] ATAER, O. E.: Storage of Thermal Energy. In: *Encyclopedia of Life Support Systems*. Oxford : EOLSS Publishers, 2006.
- [2] Augustin, W.: Einfluss des pH-Wertes auf die Verschmutzung von Wärmetauschern. In: *Heat Mass Transfer* 30 (1994), Nr. 1, S. 33-39
- [3] BOHNET, M.: Wärmeübertragungsprobleme bei Belagbildung in verfahrenstechnischen Apparaten. In: Jahrbuch 1988 (Braunschweigische wissenschaftliche Gesellschaft). Göttingen : Verlag E. Goltze, 1988, S. 155-173.
- [4] EVANS, A. G. ; HUTCHINSON, J. W. ; ASHBY, M. F.: Cellular Metalls. In: *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 3 (1998), Nr. 3, S. 288-303
- [5] GORENFLO, A.: *Rückhalt und Fouling von natürlichen organischen Substanzen bei der Nano- und Ultrafiltration* / FRIMMEL, F. H. (Hrsg.). Kralruhe : DVGW-Forschungsstelle, 2003. Diss.
- [6] HÖFLING, V.: *Kristallisationsfouling auf Wärmeübertragenden Flächen durch Mehrkomponentensysteme*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2004. Diss.
- [7] MATZ, G.: *Kristallisation*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1969.
- [8] MÜLLER-STEINHAGEN, H.: Methoden zur Verminderung der Ablagerungsbildung in Wärmeübertragern. In: *Chem.-Ing. Techn.* 65 (1993), Nr. 5, S. 523-532

Bildverzeichnis

Bild 1: Wärmeübertragung durch eine saubere und verschmutzte Heizfläche	7
Bild 2: Offenporiger 10 ppi Metallschaum aus einer AlSi7Mg-Legierung.....	8
Bild 3: Wärmeübertragungsprüfstand.....	10
Bild 4: Definition der strömungszu- und strömungsabgewandten Seite mit zugehörigen Messstellen an zwei unterschiedlich ausgerichteten Stegprofilen bei der lichtmikroskopischen Analyse	11
Bild 5: Messstelle an einem Steg bei der digitalmikroskopischen Analyse	11
Bild 6: Lichtmikroskopisch erfasster Ausschnitt eines Metallschaumsteges mit Foulingschicht.....	12
Bild 7: Zeitabhängige Entwicklung der Foulingschichtdicke auf der strömungszugewandten Seite basierend auf Foulingschichtdickenmessungen mittels Lichtmikroskopie	13
Bild 8: Zeitabhängige Entwicklung der Foulingschichtdicke auf der strömungszugewandten Seite basierend auf Foulingschichtdickenmessungen mittels Lichtmikroskopie	13
Bild 9: Gemittelte zeitabhängige Entwicklung der Foulingschichtdicke basierend auf Foulingschichtdickenmessungen mittels Lichtmikroskopie	14
Bild 10: Digitalmikroskopisch erfasste Metallschaumprobe mit 336-stündiger Verweildauer im Prüfstand	15
Bild 11: Digitalmikroskopisch erfasste Metallschaumprobe mit 1.008-stündiger Verweildauer im Prüfstand	15
Bild 12: Zeitabhängige Entwicklung der Foulingschichtdicke basierend auf Stegbreitenmessungen mittels Digitalmikroskop.....	16

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

d	m	Abstand
p	N/m^2	Druck
$Q_{\dot{}}$	W	Wärmestrom
s	m	Dicke
t	s	Zeit
x	m	Länge

Griechische Formelzeichen

δ	$^{\circ}\text{dH}$	Wasserhärte
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
ρ_p	1/m	Porendichte

Indices

1, 2...	Zustände 1, 2...
f	Foulingschicht
Fl	Fluid
K	Konvektion
L	Leitung
max	Maximum
S	Strahlung
strut	Steg
W	Wand

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das Land Baden-Württemberg im Rahmen des Förderprogramms Innovative Projekte / Kooperationsprojekte finanziell unterstützt, wofür wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken.

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

- | | |
|--|---|
| <p>52. Werner Pepels Aug. 1990
Integrierte Kommunikation</p> <p>53. Martin Dettinger-Klemm Aug. 1990
Grenzen der Wissenschaftsfreiheit. Überlegungen zum Thema: Freiheit und Verantwortung des Wissenschaftlers</p> <p>54. Werner Pepels Sept. 1990
Mediaplanung – Über den Einsatz von Werbegeldern in Medien</p> <p>55. Dieter Pflaum Sept. 1990
Werbeausbildung und Werbemöglichkeiten in der DDR</p> <p>56. Rudi Kurz (Hrsg.) Nov. 1990
Ökologische Unternehmensführung – Herausforderung und Chance</p> <p>57. Werner Pepels Jan. 1991
Verkaufsförderung – Versuch einer Systematisierung</p> <p>58. Rupert Huth, Ulrich Wagner (Hrsg.) Aug. 1991
Volks- und betriebswirtschaftliche Abhandlungen. Prof. Dr. Dr. h.c. Tibor Karpati (Universität Osijek in Kroatien) zum siebzigsten Geburtstag. Mit einem Vorwort von R. Huth und Beiträgen von H.-J. Hof, H. Löffler, D. Pflaum, B. Runzheimer und U. Wagner</p> <p>59. Hartmut Eisenmann Okt. 1991
Dokumentation über die Tätigkeit einer Industrie- und Handelskammer – Dargestellt am Beispiel der IHK Nordschwarzwald</p> <p>60. Ursula Hoffmann-Lange Dez. 1991
Eliten und Demokratie: Unvereinbarkeit oder notwendiges Spannungsverhältnis?</p> <p>61. Werner Pepels Dez. 1991
Elemente der Verkaufsgesprächsführung</p> <p>62. Wolfgang Berger Dez. 1991
Qualifikationen und Kompetenzen eines Europa-managers</p> <p>63. Günter Staub Jan. 1992
Der Begriff „Made in Germany“ – Seine Beurteilungskriterien</p> <p>64. Martin W. Knöll, Hieronymus M. Lorenz Mai 1992
Gegenstandsbereich und Instrumente der Organisationsdiagnose im Rahmen von Organisationsentwicklungs (OE)-Maßnahmen</p> <p>65. Werner Lachmann Juni 1992
Ethikversagen – Marktversagen</p> <p>66. Paul Banfield Juni 1993
Observations On The Use Of Science As A Source Of Legitimation In Personnel Management</p> <p>67. Bernd Noll Aug. 1993
Gemeinwohl und Eigennutz. Wirtschaftliches Handeln in Verantwortung für die Zukunft – Anmerkungen zur gleichnamigen Denkschrift der Evangelischen Kirche in Deutschland aus dem Jahre 1991</p> <p>68. Siegfried Kreutzer, Regina Moczadlo Aug. 1993
Die Entdeckung der Wirklichkeit – Integrierte Projektstudien in der Hochschulausbildung</p> | <p>69. Sybil Gräfin Schönfeldt Aug. 1993
Von Menschen und Manieren. Über den Wandel des sozialen Verhaltens in unserer Zeit. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1992/93</p> <p>70. Hartmut Löffler Dez. 1993
Geld- und währungspolitische Grundsatzüberlegungen für ein Land auf dem Weg zur Marktwirtschaft – Das Beispiel Kroatien</p> <p>71. Hans-Georg Köglmayr, Kurt H. Porkert Nov. 1994
Festlegen und ausführen von Geschäftsprozessen mit Hilfe von SAP-Software</p> <p>72. Alexa Mohl Febr. 1995
NLP-Methode zwischen Zauberei und Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1994/95</p> <p>73. Bernd Noll Mai 1995
Marktwirtschaft und Gerechtigkeit: Anmerkungen zu einer langen Debatte</p> <p>74. Rudi Kurz, Rolf-Werner Weber Nov. 1995
Ökobilanz der Hochschule Pforzheim. 2. geänderte Auflage, Jan. 1996</p> <p>75. Hans Lenk Mai 1996
Fairneß in Sport und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1995/96</p> <p>76. Barbara Burkhardt-Reich, Hans-Joachim Hof, Bernd Noll Juni 1996
Herausforderungen an die Sozialstaatlichkeit der Bundesrepublik</p> <p>77. Helmut Wienert März 1997
Perspektiven der Weltstahlindustrie und einige Konsequenzen für den Anlagenbau</p> <p>78. Norbert Jost Mai 1997
Innovative Ingenieur-Werkstoffe</p> <p>79. Rudi Kurz, Christoph Hubig, Ortwin Renn, Hans Diefenbacher Sept. 1997
Ansprüche in der Gegenwart zu Lasten der Lebenschancen zukünftiger Generationen</p> <p>80. Björn Engholm Okt. 1997
Ökonomie und Ästhetik. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97. 2. geänderte Auflage. Jan. 1998</p> <p>81. Lutz Goertz Sept. 1998
Multimedia quo vadis? – Wirkungen, Chancen, Gefahren. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Fachhochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97</p> <p>82. Eckhard Keßler Nov. 1998
Der Humanismus und die Entstehung der modernen Wissenschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 1996/97</p> <p>83. Heinrich Hornef Febr. 1998
Aufbau Ost – Eine Herausforderung für Politik und Wirtschaft. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Fachhochschule Pforzheim, Wintersemester 1997/98</p> |
|--|---|

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

84. **Helmut Wienert** Juli 1998
50 Jahre Soziale Marktwirtschaft – Auslaufmodell oder Zukunftskonzept? Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 1998
Peter Kern, Wilhelm Bauer, Rolf Ilg; Heiko Dreyer; Johannes Wößner und Rainer Menge
85. **Bernd Noll** Sept. 1998
Die Gesetzliche Rentenversicherung in der Krise
86. **Hartmut Löffler** Jan. 1999
Geldpolitische Konzeptionen - Alternativen für die Europäische Zentralbank und für die Kroatische Nationalbank
87. **Erich Hoppmann** Juni 1999
Globalisierung. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 1999
88. **Helmut Wienert (Hrsg.)** Dez. 1999
Wettbewerbspolitische und strukturpolitische Konsequenzen der Globalisierung. Mit Beiträgen von Hartmut Löffler und Bernd Noll
89. **Ansgar Häfner u.a. (Hrsg.)** Jan. 2000
Konsequenzen der Globalisierung für das internationale Marketing. Mit Beiträgen von Dieter Pflaum und Klaus-Peter Reuthal
90. **Ulrich Wagner** Febr. 2000
Reform des Tarifvertragsrechts und Änderung der Verhaltensweisen der Tarifpartner als Voraussetzungen für eine wirksame Bekämpfung der Arbeitslosigkeit
91. **Helmut Wienert** April 2000
Probleme des sektoralen und regionalen Wandels am Beispiel des Ruhrgebiets
92. **Barbara Burkhardt-Reich** Nov. 2000
Der Blick über den Tellerrand – Zur Konzeption und Durchführung eines „Studium Generale“ an Fachhochschulen
93. **Helmut Wienert** Dez. 2000
Konjunktur in Deutschland - Zur Einschätzung der Lage durch den Sachverständigenrat im Jahresgutachten 2000/2001
94. **Jürgen Wertheimer** Febr. 2001
Geklonte Dummheit: Der infantile Menschenpark. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Wintersemester 2000/01
95. **Konrad Zerr** März 2001
Erscheinungsformen des Online-Research – Klassifikation und kritische Betrachtung
96. **Daniela Kirchner** April 2001
Theorie und praktische Umsetzung eines Risikomanagementsystems nach KontraG am Beispiel einer mittelständischen Versicherung
97. **Bernd Noll** Mai 2001
Die EU-Kommission als Hüterin des Wettbewerbs und Kontrolleur von sektoralen und regionalen Beihilfen
Peter Frankenfeld
EU Regionalpolitik und Konsequenzen der Osterweiterung
98. **Hans Joachim Grupp** Juni 2001
Prozessurale Probleme bei Beschlussmängelstreitigkeiten in Personengesellschaften
99. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juli 2001
Technik Forum 2000: Prozessinnovationen bei der Herstellung kaltgewalzter Drähte. Mit Beiträgen von
100. **Urban Bacher, Mikolaj Specht** Dez. 2001
Optionen – Grundlagen, Funktionsweisen und deren professioneller Einsatz im Bankgeschäft
101. **Constanze Oberle** Okt. 2001
Chancen, Risiken und Grenzen des M-Commerce
102. **Ulrich Wagner** Jan. 2002
Beschäftigungshemmende Reformstaus und wie man sie auflösen könnte
Jürgen Volkert
Flexibilisierung durch Kombi-Einkommen? Die Perspektive der Neuen Politischen Ökonomie
103. **Mario Schmidt, René Keil** März 2002
Stoffstromnetze und ihre Nutzung für mehr Kostentransparenz sowie die Analyse der Umweltwirkung betrieblicher Stoffströme
104. **Kurt Porkert** Mai 2002
Web-Services – mehr als eine neue Illusion?
105. **Helmut Wienert** Juni 2002
Der internationale Warenhandel im Spiegel von Handelsmatrizen
106. **Robert Wessolly, Helmut Wienert** Aug. 2002
Die argentinische Währungskrise
107. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2002
Technik-Forum 2001: Weiterentwicklungen an Umformwerkzeugen und Walzdrähten. Mit Beiträgen von Roland Wahl, Thomas Dolny u.a., Heiko Pinkawa, Rainer Menge und Helmut Wienert
108. **Thomas Gulden** April 2003
Risikoberichterstattung in den Geschäftsberichten der deutschen Automobilindustrie
109. **Günter Altner** Mai 2003
Lasset uns Menschen machen – Der biotechnische Fortschritt zwischen Manipulation und Therapie. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003
110. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2003
Technik-Forum 2002: Innovative Verfahren zur Materialoptimierung. Mit Beiträgen von Norbert Jost, Sascha Kunz, Rainer Menge/Ursula Christian und Berthold Leibinger
111. **Christoph Wüterich** Februar 2004
Professionalisierung und Doping im Sport. Vortrag gehalten im Rahmen des Studium Generale der Hochschule Pforzheim, Sommersemester 2003
112. **Sabine Schmidt** Mai 2004
Korruption in Unternehmen – Typologie und Prävention
113. **Helmut Wienert** August 2004
Lohn, Zins, Preise und Beschäftigung – Eine empirische Analyse gesamtwirtschaftlicher Zusammenhänge in Deutschland
114. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2004
Technik-Forum 2003: Materialentwicklung für die Kaltumformtechnik. Mit Beiträgen von Andreas Baum, Ursula Christian, Steffen Nowotny, Norbert Jost, Rainer Menge und Hans-Eberhard Koch
115. **Dirk Wenzel** Nov. 2004
The European Legislation on the New Media: An Appropriate Framework for the Information Economy?

Verzeichnis der bisher erschienenen Beiträge

116. **Frank Morelli, Alexander Mekyska, Stefan Mühlberger** Dez. 2004
Produkt- und prozessorientiertes Controlling als Instrument eines erfolgreichen Informationstechnologie-Managements
117. **Stephan Thesmann, Martin Frick, Dominik Konrad** Dez. 2004
E-Learning an der Hochschule Pforzheim
118. **Norbert Jost (Hrsg.)** Juni 2005
Technik-Forum 2004: Innovative Werkstoffaspekte und Laserbehandlungstechnologien für Werkzeuge der Umformtechnik
119. **Rainer Gildeggen** Juni 2005
Internationale Produkthaftung
120. **Helmut Wienert** Oktober 2005
Qualifikationsspezifische Einkommensunterschiede in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Universitäts- und Fachhochschulabsolventen
121. **Andreas Beisswenger, Bernd Noll** Nov. 2005
Ethik in der Unternehmensberatung – ein vermintes Gelände?
122. **Helmut Wienert** Juli 2006
Wie lohnend ist Lernen? Ertragsraten und Kapitalendwerte von unterschiedlichen Bildungswegen
123. **Roland Wahl (Hrsg.)** Sept. 2006
Technik-Forum 2005: Umformwerkzeuge - Anforderungen und neue Anwendungen. Mit Beiträgen von Edmund Böhm, Eckhard Meiners, Andreas Baum, Ursula Christian und Jörg Menno Harms
124. **Mario Schmidt** Dez. 2006
Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement
125. **Norbert Jost (Hrsg.)** Okt. 2007
Technik-Forum 2006: Innovative neue Techniken für Werkzeuge der Kaltverformung. Mit Beiträgen von Franz Wendl, Horst Bürkle, Rainer Menge, Michael Schiller, Andreas Baum, Ursula Christian, Manfred Moik und Erwin Staudt.
126. **Roland Wahl (Hrsg.)** Okt. 2008
Technik-Forum 2007: Fortschrittsberichte und Umfeldbetrachtungen zur Entwicklung verschleißreduzierter Umformwerkzeuge. Mit Beiträgen von Klaus Löffler, Andreas Zilly, Andreas Baum und Paul Kirchhoff.
127. **Julia Tokai, Christa Wehner** Okt. 2008
Konzept und Resultate einer Online-Befragung von Marketing-Professoren an deutschen Fachhochschulen zum Bologna-Prozess
128. **Thomas Cleff, Lisa Luppold, Gabriele Naderer, Jürgen Volkert** Dez. 2008
Tätermotivation in der Wirtschaftskriminalität
129. **Frank Thuselt** Juni 2009
Das Arbeiten mit Numerik-Programmen. MATLAB, Scilab und Octave in der Anwendung.
130. **Helmut Wienert** August 2009
Wachstumsmotor Industrie? Zur Bedeutung des verarbeitenden Gewerbes für die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts
131. **Sebastian Schulz** Sept. 2009
Nutzung thermodynamischer Datensätze zur Simulation von Werkstoffgefügen (aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg. Norbert Jost).
132. **Hanno Beck; Kirsten Wüst** Sept. 2009
Gescheiterte Diäten, Wucherzinsen und Warteprämien: Die neue ökonomische Theorie der Zeit.
133. **Helmut Wienert** Sept. 2009
Was riet der Rat? Eine kommentierte Zusammenstellung von Aussagen des Sachverständigenrats zur Regulierung der Finanzmärkte und zugleich eine Chronik der Entstehung der Krise
134. **Norbert Jost (Hrsg.): Technik-Forum 2008** Nov. 2010
Werkstoffe und Technologien zur Kaltverformung
135. **Frank Morelli** Januar 2010
Geschäftsprozessmodellierung ist tot – lang lebe die Geschäftsprozessmodellierung!
136. **T. Cleff, L. Fischer, C. Sepúlveda, N. Walter** Januar 2010
How global are global brands? An empirical brand equity analysis
137. **Kim Neuer** Juni 2010
Achieving Lisbon – The EU's R&D Challenge The role of the public sector and implications of US best practice on regional policymaking in Europe
138. **Bernd Noll** Sept. 2010
Zehn Thesen zur Corporate Governance
139. **Pforzheim University** März 2011
Communication on progress. PRME Report 2008
140. **Rainer Maurer** März 2011
Unternehmensverantwortung für soziale und ökologische Nachhaltigkeit – darf man auch anderer Meinung sein? Einige kritische Anmerkungen zum PRME-Report der Hochschule
141. **Barbara Reeb; Malte Krome** Oktober 2011
Arm trotz Arbeit? Zum Für und Wider von Mindestlöhnen
142. **B. Eng. Daniel Wyn Müller** Mai 2012
Titanschäume als Knochenimplantat. Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost
143. **Alexander Martin Matz, Norbert Jost** Mai 2012
Fouling an offenporigen zellulären Werkstoffen auf Al-Basis unter beheizten wässrigen Bedingungen; Aus der Reihe „Focus Werkstoffe“, Hrsg.: N. Jost