

## Kurzfassung

Partikelfouling ist neben dem kristallinen Fouling die häufigste Ursache von Belagbildungsproblemen. In dieser Arbeit werden die Grundlagen zur experimentellen Ermittlung von Partikelfouling auf strukturierten Oberflächen aufgezeigt und physikalische Mechanismen bzgl. Ablagerung, Abtrag, Turbulenz und Wärmeübergang identifiziert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann die Neigung zum Fouling von strukturierten wärmeübertragenden Oberflächen mittels Effizienzkriterien bewertet werden.

Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass sich in sphärischen Dellen, abhängig von der Reynolds-Zahl, asymmetrische Wirbelstrukturen bilden, die periodisch schwanken. Das aufgeheizte Fluid wird ständig aus der Delle transportiert, sodass sich der Wärmeübergang, bei nur im geringen Ausmaß höheren Strömungsdruckverlusten steigern lässt. Durch die unerwünschte Ablagerung von im Fluid transportierten Partikel vermindert sich hingegen der Wärmedurchgang und somit die Effizienz des Wärmeübertragers. Neben der Ablagerung beeinflusst die Turbulenz auch den Abtrag der Foulingschicht. Ist die Abtragsrate größer als die Ablagerungsrate tritt eine Selbstreinigung der Oberfläche auf.

In dieser Forschungsarbeit konnte gezeigt werden, dass einerseits die Partikel durch die Wirbelstrukturen direkt aus der Delle transportiert werden, wodurch das Fouling in der Delle reduziert oder verhindert wird. Andererseits resultieren aus den schwankenden Wirbelstrukturen höhere Wandschubspannungen in und hinter der Delle, welche durch erhöhte Abtragsraten für eine Verminderung des Foulings in diesen Bereichen sorgen. Der Selbstreinigungseffekt für die hier untersuchten Bedingungen konnte experimentell bestätigt werden und der Einsatz von Dellenstrukturen kann somit neben der Steigerung der Wärmeübertragung auch unter Foulingbedingungen vorteilhaft sein. Zudem zeigt der Vergleich der ermittelten Foulingschichten eine hohe Übereinstimmung zwischen Experiment und vorheriger numerischer Simulation.

Die Dellenoberflächen werden bezüglich ihrer thermohydraulischen Effizienz bewertet, indem ihre Wärmeübertragungsfähigkeit und ihr Druckverlust mit und ohne Auftreten von partikulärem Fouling aus wässrigen Suspensionen gemessen und verglichen wurden. Der Foulingwiderstand wird verwendet, um die Verringerung der Wärmeübertragungseffizienz aufgrund von Partikelablagerungen sowohl örtlich als auch zeitlich aufgelöst zu bewerten. Dazu wurde die Methode der Phosphoreszent Fouling Quantification entwickelt, die Rückschlüsse auf den lokalen massebezogenen Foulingwiderstand erlaubt.

Mit der stereoskopischen micro Particle Image Velocimetry wird das Strömungsfeld innerhalb der Dellen visualisiert und die Bildung eines oszillierenden Wirbels im Inneren der Dellen experimentell nachgewiesen. Das charakteristische Ablagerungsmuster der Dellenoberflächen wird durch die lokal gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und den daraus resultierenden Adhäsions- und Abtragskräften beschrieben. Die Wechselwirkungen von turbulenten Strömungsstrukturen, Wärmeübertragung und partikulärem Fouling in wässriger Suspension wurden für Oberflächen mit Dellen bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeübertragung durch Oberflächenstrukturierung im Falle der Dellen auch zu einer verringerten Foulingneigung führen.

Mit dem Verständnis der Mechanismen des Partikelfoulings auf Dellenoberflächen wurde ein ganzheitliches Effizienzkriterium modelliert, das zur Bewertung von Dellenoberflächen herangezogen werden kann. Dieses Kriterium berücksichtigt sowohl die thermohydraulische Effizienz als auch die Belagbildung durch Partikel.

## Abstract

Besides crystalline fouling, particle fouling is the most common cause of fouling problems. In this thesis the basics for the experimental determination of particle fouling on structured surfaces are presented and physical mechanisms regarding turbulence, heat transfer, deposition, and removal are identified. With the gained knowledge, the tendency to fouling on structured heat transfer surfaces can be evaluated by means of efficiency criteria.

It is known from previous investigations that in spherical dimples, depending on the Reynolds number, asymmetric vortex structures are formed which oscillate periodically. The heated fluid is constantly transported out of the dimple, so that the heat transfer can be increased with only a small increase in pressure losses of the flow. On the other hand, an undesirable deposition of particles transported in the fluid reduces the heat transfer and thus the efficiency of the heat exchanger. Besides the deposition, the turbulence also influences the removal of the fouling layer. If the removal rate is higher than the deposition rate, self-cleaning of the surface occurs.

This study shows that on the one hand the particles are transported directly out of the dimple by the vortex structures, which reduces or prevents fouling in the dimple, and on the other hand higher wall shear stresses in and behind the dimple result from the fluctuating vortex structures, which reduce fouling in these areas by increased removal rates. The self-cleaning effect could be confirmed experimentally for the conditions investigated here and it is shown that the use of dimpled structures can thus be advantageous even under fouling conditions. Furthermore, the comparison of the fouling layers determined shows a high conformity between experiment and previous numerical simulation.

The dimpled surfaces are evaluated with respect to their thermohydraulic efficiency by measuring and comparing their heat transfer capacity and pressure drop with and without the occurrence of particulate fouling from aqueous suspensions. The fouling resistance is used to evaluate the reduction of heat transfer efficiency due to particulate fouling both locally and temporally resolved. For this purpose, the method of Phosphorescent Fouling Quantification was developed, which allows local conclusions on the mass related fouling resistance.

With the stereoscopic micro Particle Image Velocimetry, the flow field within the dimple is visualized and the existence of an oscillating vortex inside the dimple is experimentally confirmed. The characteristic deposition pattern of the dimples' surfaces is described by the locally measured flow velocities and the resulting effective adhesion and removal forces. The interactions of turbulent flow structures, heat transfer and particulate fouling in aqueous suspension were determined for surfaces with dimples. It could be shown that strategies to improve heat transfer by surface structuring also lead to a reduced fouling tendency in case of dimpled surfaces.

With the understanding of the mechanisms of particle fouling on dimpled surfaces, a holistic efficiency criterion was developed which can be used to evaluate dimples surfaces. This criterion considers both the thermohydraulic efficiency and the particle fouling.



## Symbolverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

$a$	$\text{m s}^{-2}$	Erdbeschleunigung
$a_0$	$\text{m}$	Adhäsionsabstand
$A_i$	$\text{m}^2$	Fläche
$c$	$\text{g L}^{-1}$	Konzentration
$c_{p,i}$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
$C_f$	-	Fanning-Reibungsfaktor
$d$	$\text{m}$	Durchmesser
$D$	$\text{m}$	Dellendurchmesser
$e$	-	Rauschen, Messfehler
$E$	-	Steigerung des Wärmedurchgangs
$f(x_i)$	-	Regressionsgleichung
$F$	$\text{N}$	Kraft
$H_{12}$	$\text{J}$	Hamakerkonstante
$I$	-	Turbulenzgrad
$k$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Wärmedurchgangskoeffizient
$k_{Ad}$	-	Adhäsionsfaktor
$l$	$\text{m}$	Länge
$m$	$\text{kg m}^{-2}$	spezifische Masse
$\dot{m}_i$	$\text{kg s}^{-1}$	Massenstrom
$MS_{pe}$	-	Variation des Messwertes
$MS_{tot}$	-	Gesamtvariation der Antwort
$n$	-	Exponent
$N$	-	Anzahl
$Nu$	-	Nußelt-Zahl
$Nu_m$	-	Nußelt-Zahl im Übergangsbereich
$Nu_{m,L,2300}$	-	Laminare Nußelt-Zahl bei $Re = 2.300$
$Nu_{m,T}$	-	Turbulente Nußelt-Zahl
$Nu_{m,T,10^4}$	-	Turbulente Nußelt-Zahl bei $Re = 10.000$
$p$	-	Signifikanzwert ( $p$ -Wert)
$Pr$	-	Prandtl-Zahl
$PRESS$	-	vorhergesagte Residuenquadratsumme
$q_3$	$\text{m}^{-1}$	Dichteverteilung
$Q^2$	-	angepasstes Bestimmtheitsmaß
$Q_3$	-	Summenverteilung
$\dot{Q}_i$	$\text{W}$	Wärmestrom
$R$	-	Reproduzierbarkeit
$R^2$	-	empirisches Bestimmtheitsmaß
$R_f$	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$	Foulingwiderstand
$R_z$	$\text{m}$	Rautiefe
$Re$	-	Reynolds-Zahl
$s$	$\text{m}$	Schicht-/Wanddicke
$SC$	-	Selbstreinigung
$SS_{res}$	-	Residuenquadratsumme
$SS_{tot}$	-	gesamte Abweichungsquadratsumme
$St$	-	Stokes-Zahl



## Symbolverzeichnis

---

$t$	m, s	Dellentiefe, Zeit
$T$	K	Temperatur
$\Delta T_m$	K	mittlere logarithmische Temperaturdifferenz
$TKE$	$\text{J kg}^{-1}$	Kinetische Turbulenzenergie
$u$	$\text{m s}^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit
$\bar{u}$	$\text{m s}^{-1}$	gemittelte Strömungsgeschwindigkeit
$V$	$\text{m}^3, -$	Volumen, Validität
$x_i$	-	Einflussgröße
$x_f$	m	Schichthöhe der Foulingschicht
$x, y, z$	-	Raumrichtungen
$y$	-	Antwortsignal
$\bar{y}$	-	Mittelwerte des Antwortsignals
$\hat{y}$	-	vom Modell vorhergesagter Wert
$y_i$	-	Antwortsignal

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	Wärmeübertragungskoeffizient
$\alpha_i$	-	Einflussfaktor
$\beta_i$	-	Regressionskoeffizient
$\gamma$	-	Intermittenzfaktor
$\Delta$	-	Differenz
$\varepsilon$	-	Hohlraumanteil
$\zeta$	-	Rohrreibungszahl
$\eta$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	Dynamische Viskosität
$\Theta$	-	Belegungsgrad
$\lambda_i$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$	Dichte
$\sigma$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeitsschwankung
$\tau$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	Wandschubspannung
$\tau_F$	s	Charakteristische Zeit der Strömung
$\tau_p$	s	Partikelrelaxationszeit
$\Phi$	-	Volumenanteil
$\Psi$	-	Sphärizität

### Indizes

*	asymptotisch
$0$	bezogen auf die unstrukturierte oder saubere Oberfläche
$\infty$	bezogen auf die Kernströmung
<i>avg.</i>	durchschnittlich
<i>cell</i>	betrachtete Zelle
<i>char.</i>	charakteristisch
<i>crit.</i>	kritisch
<i>d</i>	deposition (Ablagerung)
<i>Delle</i>	bezogen auf die Delle
<i>down</i>	stromabwärts
<i>f</i>	Fouling
<i>gesamt</i>	auf Gesamtheit bezogen
<i>h</i>	hydraulisch



<i>i</i>	Zählvariable
<i>LoF</i>	Lack-of-Fit (nicht zufällige Abweichung)
<i>m</i>	massebezogen
<i>p</i>	Partikel
<i>pfq</i>	Phosphorescent Fouling Quantification
<i>r</i>	removal (Abtrag)
<i>th</i>	thermisch
<i>Tracer</i>	bezogen auf die Tracer
<i>up</i>	stromaufwärts
<i>w</i>	Wand
<i>Wasser</i>	Wasser

### Abkürzungen

2D-3C	Drei Geschwindigkeitskomponenten in einer zweidimensionalen Ebene
3D- $\mu$ PIV	Stereoskopische micro Particle Image Velocimetry
CIP	Cleaning in Place
DLVO-Theorie	Theorie nach Derjaguin, Landau, Verwey und Overbeek
FNU	Formazin Nephelometric Unit
LED	Light Emitting Diode
LPD	Local Phosphorescence Detection
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
OFAT	One Factor at a Time
P0	Unstrukturierte Testplatte
PFA	Partikelfoulinganlage
PFQ	Phosphorescent Fouling Quantification
PMMA	Polymethylmethacrylat
R18	Testplatte mit der Dellenreihe $t/D = 0,18$
R26	Testplatte mit der Dellenreihe $t/D = 0,26$
R35	Testplatte mit der Dellenreihe $t/D = 0,35$
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGB	Rot, Grün, Blau
S18	Testplatte mit der einzelnen Delle $t/D = 0,18$
S26	Testplatte mit der einzelnen Delle $t/D = 0,26$
S35	Testplatte mit der einzelnen Delle $t/D = 0,35$
SC	Selbstreinigung, self cleaning
THE	Thermohydraulische Effizienz
vdW	Van-der-Waals

### Dimensionslose Kennzahlen

Nußelt-Zahl	$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda}$
Prandtl-Zahl	$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$
Reynolds-Zahl	$Re = \frac{u \cdot d_{char} \cdot \rho}{\eta}$
Stokes-Zahl	$St = \frac{\tau_p}{\tau_F} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\eta} \cdot \frac{u}{d_h}$





# 1

# Einleitung

Mit Dellen strukturierte wärmeübertragende Oberflächen führen zu einer Erhöhung des Wärmeübergangs bei gleichzeitig verhältnismäßig gering höheren Druckverlust. Die Bewertung strukturierter Oberflächen in Wärmeübertragern basiert in der Regel auf der thermohydraulischen Effizienz, die sowohl den Wärmeübergang als auch den Druckverlust berücksichtigt. Wenn partikelbeladene Fluide in Wärmeübertragern vorliegen, kann es zu einer unerwünschten Belagbildung kommen, hervorgerufen durch die an der wärmeübertragenden Oberfläche haftenden Partikel, was durch die strukturierte Oberfläche noch verstärkt werden kann. Es gibt noch kein umfassendes Kriterium für strukturierte Oberflächen, welches neben der thermohydraulischen Effizienz auch die Foulingwahrscheinlichkeit bewertet.

In diesem Forschungsvorhaben werden die Grundlagen zur experimentellen Ermittlung von Partikelfouling auf strukturierten Oberflächen und die physikalischen Wirkmechanismen bzgl. Ablagerung/Abtrag und Wärmeübergang dargestellt. Zentrales Ziel ist die Entwicklung von Methoden zur Vorhersage des Partikelfoulings. Mit den gewonnenen Erkenntnissen soll die Bewertung von strukturierten wärmeübertragenden Oberflächen neben der Wärmeübertragungsleistung und dem Druckverlust um Kriterien erweitert werden, welche die Neigung zum Fouling beschreiben.