



## Arbeitsblatt

### Prozesssimulation zur Beschreibung fluider Abschreckvorgänge

AiF-Nr.:  
16371

Obmann:  
Dipl.-Ing. T. Beitz, Petrofer Chemie GmbH

beteiligte Unternehmen  
Hanomag, LOI, HEESS, Ipsen, Petrofer, Burgdorf, Bodycote, Deutsche Edelstahlwerk, DHCAE, BK Werkstofftechnik, TANDLER, Aichelin

Laufzeit:  
01.02.2010 – 31.03.2013

Erstelldatum:  
03.12.13

Forschungsstelle:  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:  
Prof. Dr.-Ing. U. Fritsching

Sachbearbeiter:  
Dipl.-Ing. P. Stark

Forschungsvereinigung:  
AWT e. V.

Projektbegleitender Fachausschuss  
FA 11 (Abschrecken)

#### Zielsetzung und Lösungsweg

Es wird ein Prozesssimulationsansatz zur Berechnung der Strömungsstruktur und des Wärmeübergangs sowie des Materialverhaltens während des Abschreckprozesses metallischer Bauteile in Flüssigkeiten anhand eines siedephasenübergreifenden Modells entwickelt. Dabei werden, basierend auf thermischen und mechanischen Gleichgewichtszusammenhängen Kriterien abgeleitet, anhand derer lokal überprüft wird, ob und in welchem Maße Verdampfung oder Kondensation auftritt. Auf diese Weise stellen sich zeitabhängig charakteristische Verteilungen der Dampfphase ein, so dass die Siedephasen des Filmsiedens, Blasensiedens sowie der Konvektionsphase abgegrenzt werden können. Innerhalb der einzelnen Siedephasen können die lokalen Wärmeübergänge abgebildet werden.

Für parallel umströmte zylindrische Bauteile wird der aus dem instationären Strömungsfeld resultierende Abkühlverlauf im Bauteil für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten ermittelt. Der Vergleich zwischen Abschreckexperiment und Strömungssimulation zeigt, dass die zeit- und ortsabhängige Abfolge der Siedephasen und die lokalen Abkühlverläufe im

Körper in guter Übereinstimmung wiedergegeben werden.

In einem weiteren Auswertungsschritt ermöglicht das siedephasenübergreifende Simulationsmodell die Analyse zusätzlicher Größen, die experimentell nicht oder nur sehr aufwändig erfassbar sind. So können der Verlauf der Leidenfrosttemperatur sowie zeitabhängige, lokale und flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizienten an der Bauteiloberfläche während des instationären Abschreckprozesses bestimmt werden.

Die aus der Simulation erhaltenen Wärmeübergangskoeffizienten werden als zeit- und ortsabhängige Randbedingungen verwendet, um die im Werkstück resultierenden Temperaturverteilungen sowie die sich daraus ergebenden Härteverläufe zu berechnen, die den experimentell bestimmten Werten gegenübergestellt werden.

#### Ergebnisse

##### Einphasiges Flüssigkeitsströmungsfeld im Strömungsrohr

Die Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung im Leerrohr in Abhängigkeit von der Austritts-

geschwindigkeit  $v_{\text{Jet}}$  an der Jetdüse erfolgt mittels numerischer Strömungssimulation (stationäre, isotherme, einphasige Simulation,  $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell,  $Tu_{\text{Düse}} = 5\%$ ,  $T_{\text{liq}} = 60\text{ °C}$ ,  $r_{\text{Düse}} =$

5 mm, zunächst ohne Verwendung des Siedemodells).

Die Strömungsstrukturen im Strömungsrohr unterscheiden sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Probengeometrie (Bild 1) erheblich. Trotz möglicherweise übereinstimmender Reynoldszahlen liegen signifikante Unterschiede in der Strömungsstruktur im Ringspalt vor, so dass die Anströmgeschwindigkeit im Leerrohr  $v_0$  als direkt kontrollierbare Größe zur Einstellung der Flüssigkeitsströmungsstruktur im Leerrohr in der weiteren Auswertung herangezogen wird.

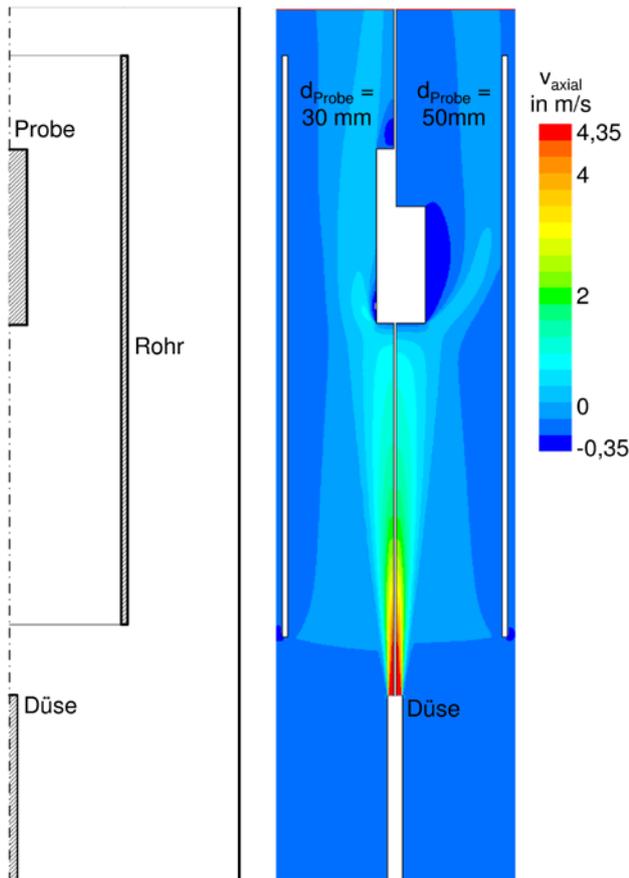


Bild 1: Simulierte Strömungsstruktur (Liquidphase) im Tauchrohr ( $v_0 = 1,0$  m/s)

**Siedeverlauf aus Simulation und Experiment im Vergleich**

Basierend auf der zeitabhängigen Verteilung des Dampfanteils auf der Bauteiloberfläche werden ausgewertet:

- Wiederbenetzungsstart (Zeitpunkt des Ablösens der Siedefronten) an der oberen und an der unteren Kante der Probe,
- Geschwindigkeiten der oberen und der unteren Siedefront,
- Position des vollständigen Filmzusammenbruchs,
- Dauer bis zum vollständigen Siedefilmzusammenbruch.

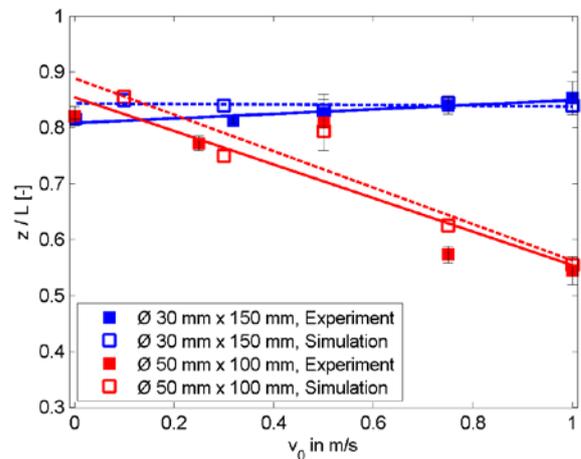


Bild 2: Position des vollständigen Siedefilmzusammenbruchs auf der Mantelfläche des Zylinders für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten  $v_0$

Die nachfolgenden Größen werden aus Thermoelementmessungen ermittelt und mit den Temperaturverläufen aus der numerischen Simulation verglichen:

- lokale Abkühlraten im Bauteil,
- lokale Leidenfrosttemperatur.

**Lokale Leidenfrosttemperaturen**

Für die gesamte Mantelfläche des Körpers werden die zeitabhängigen Abkühlverläufe ausgewertet und daraus mittels der 2. zeitlichen Ableitung des Temperaturverlaufs die Leidenfrosttemperatur direkt an der Körperoberfläche bestimmt. Den Vergleich der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit  $v_0$  zeigt Bild 3.

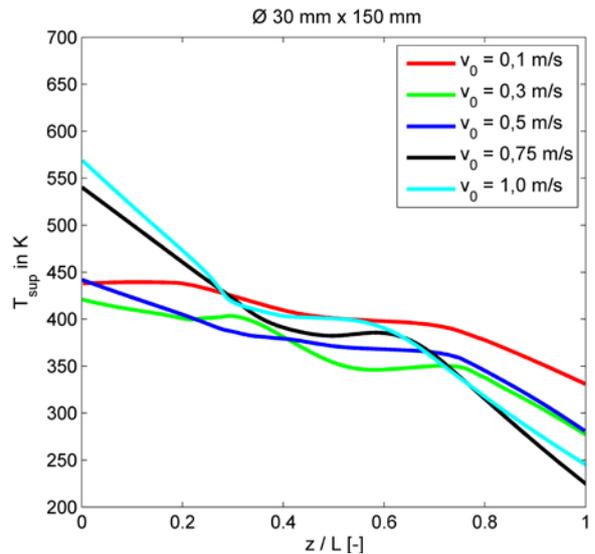


Bild 3: Leidenfrosttemperatur auf der Mantelfläche der Probenkörper

Um die Leidenfrosttemperatur sowie die Temperatur an der Körperoberfläche beim Vorliegen des maximalen Wärmeübergangskoeffizienten ( $T_{WÜK, max}$ ) an der Mantelfläche in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit  $v_0$  bewerten zu können, werden die lokalen Werte über die gesamte Höhe der Proben gemittelt.

**Lokaler Wärmeübergang**

Die lokale Wärmestromdichte  $\dot{q}$  [W/m<sup>2</sup>] auf der Mantelfläche des zylindrischen Körpers aus der Simulation (Probe  $\varnothing$  30 mm x 150 mm) wird mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Während der Phasen des Film- und Blasensiedens bzw. der einphasigen konvektiven Wärmeübergänge im Bereich  $z \rightarrow 0$  mm können die Verläufe der Wärmestromdichte dabei vom Simulationsmodell wiedergegeben werden. Die Höhe des Peak-Wertes der Wärmestromdichte im Bereich des Dampfﬁlmzusammenbruchs wird dabei zusätzlich durch die gemessenen Werten aus der Literatur bestätigt. Die Verteilung des Wärmeübergangs-koeffizienten ist in Bild 4 beispielhaft gezeigt.

Die lokalen Wärmeübergangskoeffizienten können aus der Simulation zeitabhängig für die drei einzelnen Teilflächen (die obere sowie untere Stirnfläche und die Mantelfläche) sowie für die gesamte Zylinderoberfläche verglichen werden. Hierfür werden die lokalen Werte über die jeweilige Teilfläche am Zylinder flächengemittelt und zum Vergleich einerseits über der Zeit sowie in Abhängigkeit von der über die jeweils betrachtete Teilfläche gemittelten Wandüberhitzung  $T_{sup}$  dargestellt.

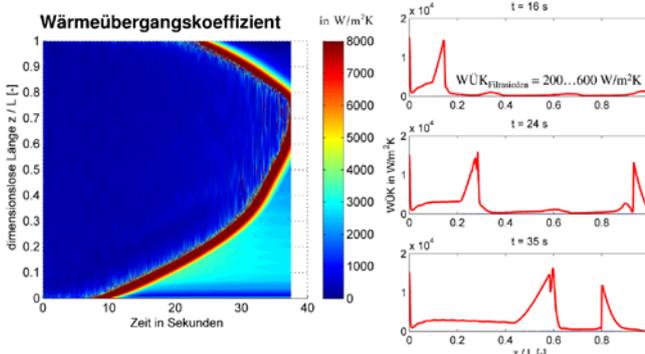


Bild 4: Wärmeübergangskoeffizient an der Bauteilmantelfläche ( $v_0 = 0,5$  m/s und  $T_{liq,0} = 60$  °C, die Farbskala ist auf Werte bis 8000 W/(m<sup>2</sup>K) begrenzt)

**Variation der Liquidtemperatur**

Bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_0 = 0,1$  m/s am dünnen Zylinder ( $\varnothing$  30 mm x 150 mm) wurde die Fluidunterkühlung am Strömungsinlet  $T_{sub} = T_{siede} - T_{liq}$  variiert. Eine Zunahme der Fluidunterkühlung  $T_{sub}$  bewirkt einen (zeitlich) früheren eintretenden Siedefilmzusammenbruch (verdeutlicht durch den Anstieg des lokalen Wärmeübergangskoeffizienten), der bei umso höherer Wandüberhitzung  $T_{sup}$  eintritt. Ebenfalls steigt bei einer Zunahme von  $T_{sub}$  die Wandüberhitzung beim Erreichen des maximalen lokalen Wärmeübergangskoeffizienten an. Jedoch bewirkt hier eine höhere Fluidunterkühlung  $T_{sub}$  einen betragsmäßig geringfügig niedrigeren maximalen WÜK.

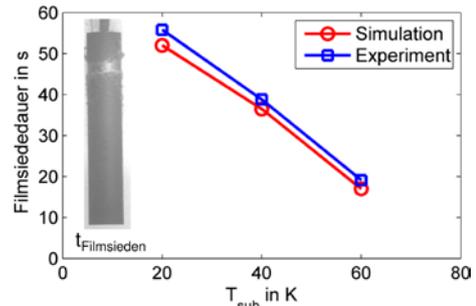


Bild 5: Auswirkung der Fluidunterkühlung  $T_{sub}$  auf die Dauer der Filmsiedevorgänge an der Mantelfläche (Probe  $\varnothing$  30 mm x 150 mm,  $v_0 = 0,1$  m/s)

**Siedeverlauf am abgesetzten Zylinder**

Der Zylinder mit der Länge  $L = 150$  mm weist auf halber Länge eine Querschnittsänderung auf ( $d_1 = 30$  mm,  $d_2 = 30$  mm). Die zeitabhängige Position der Wiederbenetzungsfronten auf den Bauteilen wird aus Simulation und Experiment im Vergleich für drei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten  $0,1$  m/s  $\leq v_0 \leq 0,75$  m/s analysiert. Dabei wird auf den Einfluss der Orientierung der Probe zur Strömung eingegangen, indem jeweils das Ende mit dem dünneren bzw. dem dickeren Querschnitt der von unten eintreffenden Liquidströmung zugewendet wird.

**Anwendbarkeit des Siedemodells auf die Abschreckung in Ölen**

Am dünnen Zylinder ( $\varnothing$  30 mm x 150 mm) wurde der Verlauf des lokalen Wärmeübergangskoeffizienten bei  $z / L = 0,5$  für zwei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten  $v_0$  für Wasser und Öl gegenübergestellt.

Bei der Abschreckung in Wasser ist ein scharfer Übergang zwischen der Filmsiedephase und dem anschließenden Blasensieden zu erkennen, der hinsichtlich des Zeitpunkts bzw. der Oberflächentemperatur  $T_{sup}$  im Moment des starken Anstiegs des lokalen Wärmeübergangskoeffizienten bzw. im Moment des lokalen Dampfﬁlmzusammenbruchs deutlich erkennbar ist. Dagegen ist bei der Abschreckung in Öl der erwartete, weniger scharfe Übergang zwischen den Siedephasen zu erkennen, der sich durch die stärkere Schwankung der lokalen Wärmeübergänge zeigt.

Der lokale Dampfﬁlmzusammenbruch tritt bei der Wasserabschreckung zusätzlich früher als im Vergleich zur Ölabschreckung ein, wobei jeweils durch die Anströmgeschwindigkeit  $v_0$  ein gewisser Gestaltungsspielraum hinsichtlich der lokalen Filmsiededauer möglich ist. Bei der Abschreckung in Öl ist der Wärmeübergang ( $\alpha_{max, \text{Öl}} \approx 2700$  W/(m<sup>2</sup>K)), insbesondere nach dem lokalen Dampfﬁlmzusammenbruch deutlich niedriger im Vergleich zum Abschrecken im Wasser ( $\alpha_{max, \text{Wasser}} \approx 10000$  W/(m<sup>2</sup>K)).

## Härteverläufe

Zu Verifikationszwecken erfolgt zunächst der Vergleich von gemessenen sowie mittels Materialsimulation bestimmten lokalen Abkühlverläufen im Bauteil. Darauf folgend werden die lokalen und flächengemittelten Härteverläufe an den Oberflächen der Probenkörper aus Simulation und Experiment verglichen.

## Gestaltungsrichtlinien für den Abschreckprozess zylindrischer Bauteile in Flüssigkeiten

Aus dem **Wiederbenetzungsverhalten** an der Oberfläche der Proben konnten aus den im Projekt gewonnenen Ergebnissen Richtlinien zur praktischen Gestaltung der vom Anwender einstellbaren Parameter im Abschreckaufbau abgeleitet werden.

Hinsichtlich des **Härteverlaufs** (an der Probenoberfläche) konnten Gestaltungsrichtlinien erarbeitet werden.

## Zusammenfassung

Das vorgestellte, experimentell verifizierte Prozesssimulationsmodell lässt die Vorhersage des Abschreckverlaufs von umströmten metallischen Bauteilen in Abhängigkeit von einstellbaren Anströmbedingungen beim Abschrecken in Flüssigkeiten zu. Hieraus lassen sich für zukünftige Entwicklungen das Materialverhalten von Bauteilen bei der Abschreckung in Flüssigkeiten vorhersagen und damit Abschreckprozesse zur gezielten Einstellung von Bauteileigenschaften auslegen.

Die Ziele des Vorhabens wurden in vollem Umfang erreicht.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16371 der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 11 (Abschrecken) der AWT betreut.

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Udo Fritsching  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik  
Badgasteiner Str. 3  
28359 Bremen  
Tel. +49 421 218 3663  
Fax 49 421 218-5378  
u.fritsching@awt-online.org

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages