

Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Verdampfungskühlung im Sprühnebel

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. R. Jeschar, Dipl.-Ing. L. Maibücher

Zusammenfassung

Mit der Verdampfungskühlung mit Sprühnebel wurde ein neues Kühlverfahren für Metalle untersucht. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß das auf die zu kühlende Oberfläche aufgebrachte Wasser vollständig verdampft und sich so kein geschlossener Dampffilm mit anschließendem undefiniertem Zusammenbruch (Leidenfrostproblematik) ausbilden kann, wie beispielsweise bei der Spritzkühlung. Dadurch erhält man bei gleichzeitig wesentlich geringerem Wassereinsatz eine gleichmäßigere Kühlung als bei der Spritzkühlung und eine stärkere Kühlung als mit Luftdüsen. Der Wärmeübergang wurde mit Hilfe eines stationären Meßverfahrens bestimmt, die Wasserbeaufschlagungsdichte mit Hilfe einer geeigneten Auffangeinrichtung an einer Prallplatte. Bei den Messungen zur Bestimmung des Wärmeübergangs konnte gezeigt werden, daß mit der Verdampfungskühlung im Sprühnebel Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden können, wie sie für die stabile Filmverdampfung nur bei deutlich höheren Wasserbeaufschlagungsdichten erreichbar sind. Weiter konnte gezeigt werden, daß der Wärmeübergang in erster Linie von der Wasserbeaufschlagungsdichte abhängt und daß der Einfluß des Massenstromverhältnisses von Luft zu Wasser für eine konstante Wasserbeaufschlagungsdichte nur einen geringen Einfluß auf die Höhe des Wärmeübergangs hat. Es konnte außerdem festgestellt werden, daß mit abnehmendem Abstand zwischen Düse und Meßfläche der Wärmeübergangskoeffizient im Bereich der Verdampfungskühlung für eine konstante Wasserbeaufschlagungsdichte leicht zunimmt. Mit Düsen, die für kleinere Wasserdurchsätze ausgelegt sind, lassen sich für gleiche Wasserbeaufschlagungsdichten und gleiche Massenstromverhältnisse größere Wärmeübergangskoeffizienten erzielen als mit Düsen, die für größere Durchsätze geeignet sind.

Problemstellung

Metallische Güter müssen bei vielen Wärmebehandlungsprozessen gezielt abgekühlt werden. Ziel dieser Abkühlvorgänge ist es meist, Werkstoffeigenschaften, wie Festigkeit, Härte, Zerspanbarkeit usw., einzustellen. Dabei muß der Kühlvorgang mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden, da

nur dann die notwendige Produktqualität erreicht wird. Weiterhin kann mit einer definierten Abkühlung der Verzug eines Werkstücks vermindert werden. Stähle werden beispielsweise beim Härten von 900°C auf ca. 400°C schnell und definiert abgekühlt, um einen vorbestimmten Härtegrad zu erreichen.

Bei der Kühlung heißer Metalloberflächen mit Flüssigkeiten tritt das sogenannte Leidenfrost-Phänomen auf. Die ablaufenden Vorgänge sind am Beispiel des Behältersiedens in **Abbildung 1** dargestellt. Bei hohen Oberflächentemperaturen bildet sich zwischen dem auf die Oberfläche auftreffenden Wasser und der Oberfläche ein Dampffilm. Das Prinzip ist für den Fall der Spritzkühlung in **Abbildung 2** dargestellt. Der Dampffilm wirkt isolierend und behindert den Wärmeübergang zwischen dem Gut und dem Kühlwasser, was zu einer niedrigen Abkühlgeschwindigkeit führt (Bereich der stabilen Filmverdampfung). Bei Unterschreiten einer bestimmten Temperatur (Leidenfrosttemperatur) bricht der Dampffilm zusammen, dieser Zusammenbruch ist – aufgrund des direkten Kontakts zwischen Kühlflüssigkeit und Oberfläche – durch einen Anstieg der übertragenen Wärmestromdichte und des Wärmeübergangskoeffizienten gekennzeichnet (Abbildung 1). Zur Bestimmung der Abkühlgeschwindigkeit ist die Kenntnis der Lage des Leidenfrostpunktes von entscheidender Bedeutung.

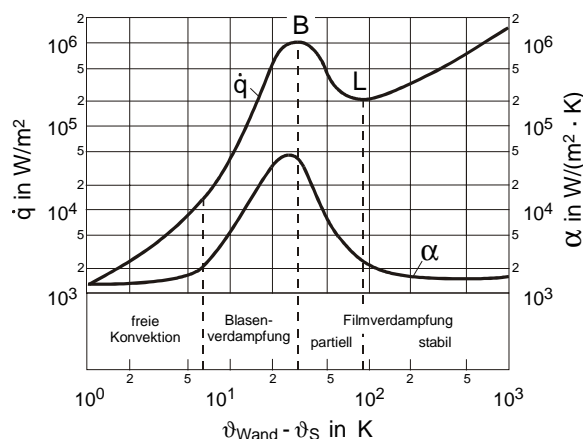


Abbildung 1: Wärmestromdichte und Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Heizflächenüberhitzung

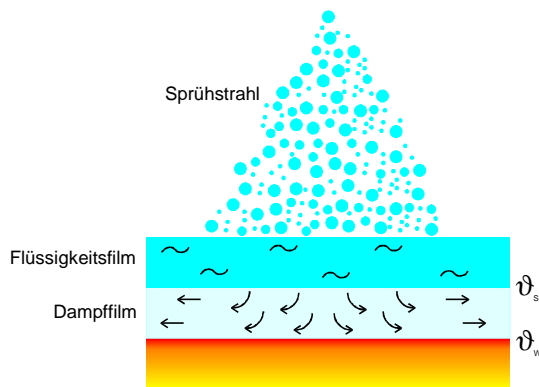


Abbildung 2: Prinzip der Spritzkühlung

Die Leidenfrosttemperatur hängt unter anderem von den Kühlbedingungen wie benutzter Kühlflüssigkeit sowie von der Körpergeometrie, den Oberflächeneigenschaften wie Rauigkeit oder Oxidbelegung, und anderen Größen ab. Der Einfluß dieser Größen auf die Leidenfrosttemperatur ist zwar qualitativ bekannt, kann aber nur selten quantifiziert werden. Problematisch ist hierbei, daß der Dampffilm bevorzugt an Kanten, Ecken, Rauigkeitsspitzen usw. zusammenbricht. Dies führt zu einer örtlich sehr ungleichmäßigen Kühlwirkung. Damit kann die Lage des Leidenfrostpunktes und somit der gesamte Abkühlvorgang durch Flüssigkeiten nicht mit ausreichender Genauigkeit vorausgesagt und damit auch nicht eingestellt werden.

Kühlflüssigkeiten, bei denen die Leidenfrostproblematik auftritt, sind Wasser, Öle sowie Polymerlösungen. Problematisch für die Abkühlung mit Ölen und Polymerlösungen ist, daß die gekühlten Werkstücke zum Teil aufwendig gereinigt werden müssen. Vorteilhaft hierbei ist, daß die Leidenfrosttemperatur gegenüber der Kühlung mit reinem Wasser gezielt verschoben werden kann.

Kühlverfahren, bei denen Gase als Kühlmittel eingesetzt werden, sind dadurch begrenzt, daß sich mit solchen Verfahren keine derart hohen Wärmeübergangskoeffizienten erreichen lassen, wie dies etwa für die Spritzkühlung der Fall ist. Zudem kann es beim Einsatz von Luft als Kühlmittel zur Bildung unerwünschter Oxide an der Oberfläche des Gutes kommen [2].

Verdampfungskühlung

Mit der Verdampfungskühlung im Sprühnebel wurde ein neues Verfahren untersucht, daß eine Verbesserung der Kühlwirkung im Vergleich zu Verfahren, bei denen die Leidenfrostproblematik auftritt, ermöglicht. Bei der Verdampfungskühlung wird die zur Kühlung eingesetzte Menge an Kühlflüssigkeit so dosiert, daß ein auftreffender Wassertropfen vollständig verdampft, bevor der nächste Tropfen die Oberfläche erreicht. Das zugrundeliegende Prinzip ist in **Abbildung 3** dargestellt.

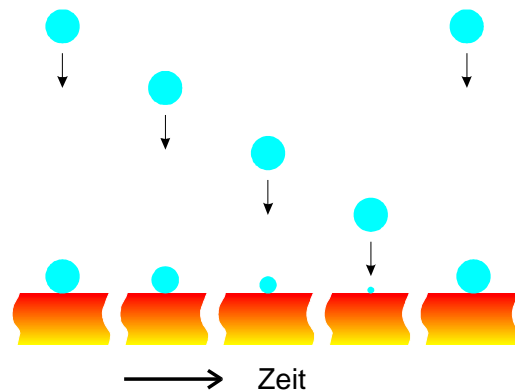


Abbildung 3: Prinzip der Verdampfungskühlung

Die Verdampfungskühlung wurde zuerst von Reiners [1] im Rahmen von Untersuchungen des Wärmeübergangs bei der Spritzkühlung beschrieben. Es wurde festgestellt, daß für niedrige Wasserbeaufschlagungsdichten Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden können, die für die stabile Filmverdampfung sonst nur bei wesentlich höheren Wasserbeaufschlagungsdichten erreichbar sind. Wie in **Abbildung 4** zu erkennen ist, tritt bei einer Steigerung der Wasserbeaufschlagungsdichte ein Übergangsbereich auf, in dem es zu einem Umschlag zwischen Verdampfungskühlung und stabiler Filmverdampfung kommt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Lage des Übergangsbereichs zwischen stabiler Filmverdampfung und Verdampfungskühlung sowie die bei Verdampfungskühlung maximal erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmestromdichten untersucht.

Entscheidende Einflußgrößen für die Höhe des Wärmeübergangs und die Lage des Übergangsbereichs sind neben der Wasserbeaufschlagungsdichte die Tropfencharakteristik der auftreffenden Was-

sertropfen, insbesondere die Tropfengröße und die Tropfengrößenverteilung [2], [3].

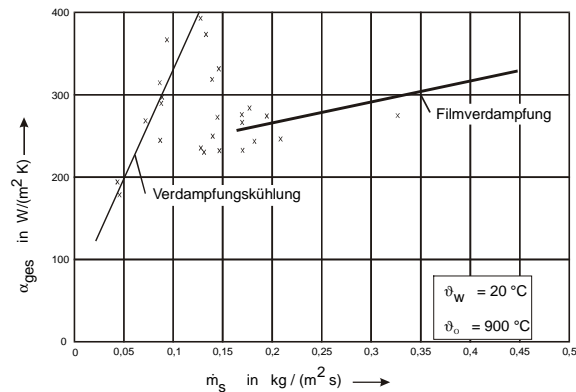


Abbildung 4: Wärmeübergang bei der stabilen Filmverdampfung und der Verdampfungskühlung nach Reiners

Beschreibung des Meßverfahrens

Zur Bestimmung des Wärmeübergangs wurde ein stationäres Meßverfahren verwendet [1]. Dabei wird einer heißen Metallprobe eine veränderbare elektrische Leistung zugeführt, so daß die Proben-temperatur an der Oberfläche konstant gehalten werden kann. Aus der zugeführten elektrischen Leistung läßt sich die durch die einseitige Spritzwasserkühlung an der Oberfläche abgeführte Wärmestromdichte bzw. der zugehörige Wärmeübergangskoeffizient berechnen. Das Meßprinzip ist in **Abbildung 5** dargestellt und wird in [1] näher erläutert.

Die Versuchsanlage zur Messung des Wärmeübergangs ist in **Abbildung 6** schematisch dargestellt. Sie besteht im wesentlichen aus vier Teilen:

- der beheizbaren Probe, mit Stromversorgung und Temperatur- bzw. Leistungsregelung,
- der Düse, mit der zugehörigen Luft- und Wasserzuführung sowie der jeweiligen Durchflußregelung und -meßtechnik,
- der Auffangeinrichtung zur Messung der Wasserbeaufschlagungsdichte (Prallplatte) und
- der Datenerfassungs- und Auswertungseinheit.

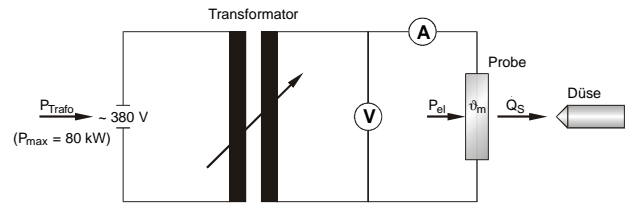


Abbildung 5: Meßprinzip der stationären Versuchsanlage

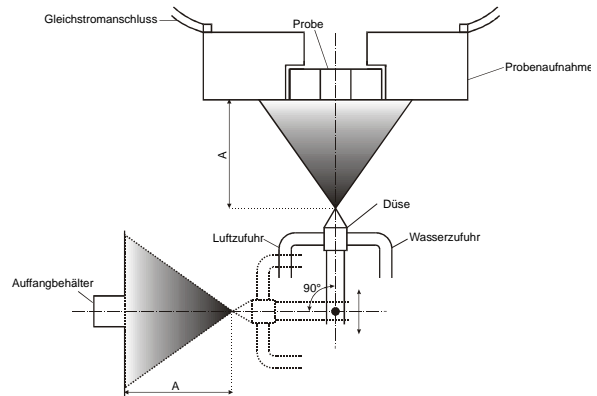


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Auswertung der Ergebnisse der Wärmeübergangsmessungen

Die der Probe zugeführte elektrische Leistung entspricht der Summe der durch Kühlung und durch Verluste an die Umgebung hervorgerufenen Wärmeströme. Die Energiebilanz über die Probe liefert folgendes Ergebnis:

$$P_{el} - \dot{Q}_K - \dot{Q}_V = 0.$$

Nach dem Newtonschen Ansatz ergibt sich der über die Meßfläche A_0 abgegebene Wärmestrom \dot{Q}_K zu:

$$\dot{Q}_K = \alpha \cdot A_0 \cdot (\vartheta_o - \vartheta_w).$$

Der Wärmeübergangskoeffizient berechnet sich somit wie folgt:

$$\alpha = \frac{P_{el} - \dot{Q}_V}{A_0 \cdot (\vartheta_o - \vartheta_w)}.$$

Der Verlustwärmestrom wird durch Messung der zugeführten elektrischen Leistung im ungekühlten Zustand ermittelt. Die unbekannte Oberflächentemperatur ϑ_o wird aus der stationären Gleichung für die stationäre Wärmeleitung (Fouriersche Differentialgleichung) bestimmt, wobei die elektrische Leistung als homogene gleichverteilte Wärmequelle \dot{w}_q angesehen wird:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\dot{w}_q}{\lambda} = 0,$$

mit

$$\dot{w}_q = \frac{P_{el}}{V_p},$$

wobei V_p das Volumen der Probe ist.

Zur Lösung sind in diesem Fall die Randbedingungen:

$$\vartheta(x=0) = \vartheta_m$$

und

$$-\lambda \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=0} = \dot{Q}_K$$

erforderlich. Dabei ist ϑ_m die gemessene Temperatur in der Probe. Der Wärmeübergangskoeffizient bei der Kühlung läßt sich aus dem Temperaturgradienten an der gekühlten Oberfläche berechnen.

Vorteile des Verfahrens liegen in den sehr kurzen Aufheizzeiten und in dem geringen numerischen Aufwand für die Auswertung gegenüber dem von Reiners [1] und Müller [4] beschriebene instationären Meßverfahren. Nachteile des Verfahrens liegen bei schnellen Änderungen des abgeführten Wärmestroms, da die Regelung der zugeführten elektrischen Leistung hier nicht entsprechend schnell erfolgen kann. Aus diesem Grund sind bei der Spritzkühlung Messungen bei Leidenfrosttemperatur und in dem sich an den Leidenfrostpunkt anschließenden Bereich der partiellen Filmverdampfung (Abbildung 1) nicht möglich. Auch bei Messungen im Übergangsbereich zwischen vollständiger Verdampfung und stabiler Filmverdampfung kann es zu Problemen kommen. Da hier bei einer einzigen Wasserbeaufschlagungsdichte Zustände sowohl im Bereich der vollständigen Verdampfung als auch der stabilen Filmverdampfung auftreten können. Hier können insbesondere schon kleine Schwankungen der eingestellten Wasser- oder Luftvolumenströme zur Verschiebung zwischen den beiden Zuständen führen. Die damit verbundene schnelle Änderung der abgeführten Wärmestromdichte kann auch in diesem Fall nicht schnell genug durch eine Änderung der elektrischen Leistung ausgeglichen werden. Die Folge sind starke Temperaturänderungen, die zu einer Notabschaltung des Transformators oder in ungünstigen Fällen zum Einschmelzen der Probe führen können. In weniger ungünstigen Fällen erhöht sich die Zeit

bis zur Einstellung eines stationären Zustandes im Übergangsbereich zwischen den beiden Bereichen der Kühlung um ein Vielfaches.

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Im folgenden werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen dargestellt. Untersucht wurde (für verschiedene Düsen) der Einfluß verschiedener Massenstromverhältnisse von Luft zu Wasser, unterschiedlicher Wasserbeaufschlagungsdichten sowie der Einfluß des Abstandes zwischen Düse und Meßfläche auf den Wärmeübergang bei der Kühlung mit Sprühnebel. Verwendet wurden Zweistoffdüsen, die mit einem Wasser-Luftgemisch arbeiten [2]. An den verwendeten Düsen konnten geringe Wasserdurchflüsse (SU 12) und sehr geringe Wasserdurchflüsse (SU 11) eingestellt werden [2]. Für die Düse SU 11 ließen sich an der verwendeten Versuchsanlage jedoch nur wenige Betriebspunkte einstellen, so daß hier nur beispielhaft einige Ergebnisse dargestellt werden. Soweit nicht anders beschrieben wurden alle Messungen mit einem Abstand von 300 mm zwischen Probe und Düse vorgenommen. Die Temperatur der Kühlmittel Luft und Wasser betrug bei allen Messungen ca. 20 °C.

Einfluß der Wasserbeaufschlagungsdichte und des Massenstromverhältnisses auf den Wärmeübergang

In **Abbildung 7** sind die bei der Verwendung der Düse SU 12 experimentell ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wasserbeaufschlagungsdichte für verschiedene Massenstromverhältnisse \dot{m}_L/\dot{m}_W dargestellt. Die Proben-temperatur beträgt für alle Messungen 900 °C. Zusätzlich ist die nach Reiners [1] ermittelte lineare Funktion zur Berechnung des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten im Bereich der stabilen Filmverdampfung angegeben.

Die jeweiligen Bereiche, in denen die Messungen für die einzelnen Massenstromverhältnisse durchgeführt wurden, ergeben sich durch die an der verwendeten Versuchsanlage einstellbaren stabilen Betriebspunkte.

Für niedrige Wasserbeaufschlagungsdichten bis ca. $\dot{m}_B = 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ verdampft das auftreffende

Kühlwasser vollständig, der Wärmeübergangskoeffizient steigt, wie bereits von Reiners beobachtet, stark auf Werte bis ca. $1300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ an.

Die Meßergebnisse stimmen demnach sowohl mit der nach Wächters [5] zu erwartenden Obergrenze für die Kühlung mit Sprühnebel als auch mit der aus den Messungen von Reiners für diese Grenze extrapolierten Werten [1] gut überein.

Oberhalb einer Wasserbeaufschlagungsdichte von etwa $\dot{m}_B = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ bildet sich ein geschlossener

Dampffilm auf der Probenoberfläche aus. Hier liegen die gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten zum größten Teil etwas oberhalb des angegebenen Verlaufs für den Bereich der stabilen Filmverdampfung.

Für Wasserbeaufschlagungsdichten im Bereich zwischen $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq \dot{m}_B \leq 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ streuen

die gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten stark. Hier können sowohl Zustände im Bereich der Verdampfungskühlung als auch Zustände im Bereich der stabilen Filmverdampfung vorkommen. In diesem Bereich liegen auch die maximal gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten für die Verdampfungskühlung von etwa $1600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bis $1800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Vergleicht man die für die Verdampfungskühlung gemessenen maximalen Wärmeübergangskoeffizienten mit den in **Abbildung 8** [1] für die gleiche Probenoberfläche dargestellten Wärmeübergangskoeffizienten bei der Spritzkühlung, so erkennt man, daß ähnliche Werte erst wieder für Wasserbeaufschlagungsdichten $\dot{m}_B = 15 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ erreicht werden. Das entspricht Wasserbeaufschlagungsdichten, wie sie bei der Spritzkühlung in Stranggußanlagen eingestellt werden.

Zu beachten ist jedoch, daß diese hohen Wärmeübergangskoeffizienten - zumindest für die verwendeten Zweistoffdüsen - nur bei solchen Wasserbeaufschlagungsdichten gemessen werden, für die sowohl Zustände im Bereich der Verdampfungskühlung, als auch im Bereich der stabilen Filmverdampfung vorliegen können.

Ein Vergleich der für die unterschiedlichen Massenstromverhältnisse \dot{m}_L/\dot{m}_W ermittelten Ergebnisse zeigt, daß sich der Umschlagsbereich zwischen vollständiger Verdampfung und stabiler Filmver-

dampfung mit steigendem Wasseranteil (mit abnehmendem Massenverhältnis) leicht zu höheren Wasserbeaufschlagungsdichten hin verschiebt.

Einfluß des Abstandes Düse-Probe auf den Wärmeübergang

Um den Einfluß der sich möglicherweise mit zunehmendem Abstand vom Düsenaustritt ändernden Tropfencharakteristik auf den Wärmeübergang zu

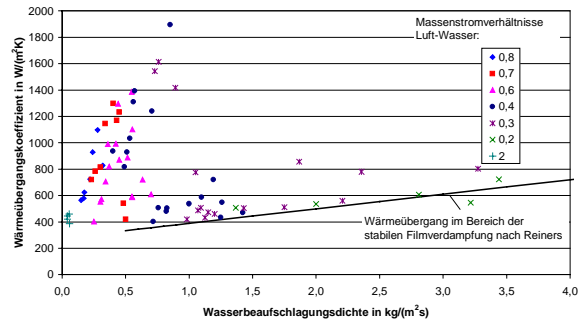


Abbildung 7: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wasserbeaufschlagungsdichte für verschiedene Massenstromverhältnisse, Oberflächentemperatur $900 \text{ }^\circ\text{C}$, Düse SU12

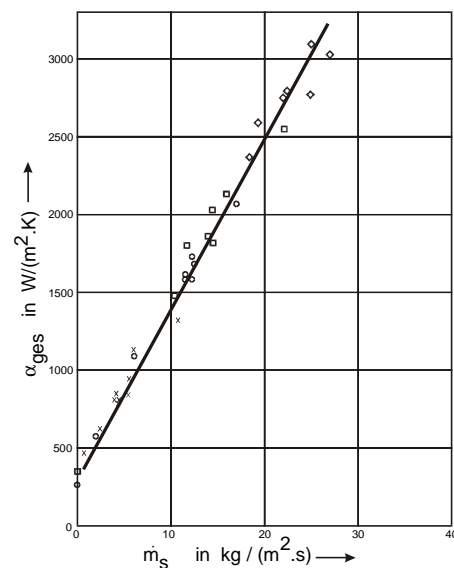


Abbildung 8: Gesamtwärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wasserbeaufschlagungsdichte, Spritzkühlung

ermitteln, wurde für ein konstantes Massenstromverhältnis der Abstand zwischen Düse und Probe variiert. Eine Veränderung des Abstands um jeweils 10 cm führt bei der untersuchten Düse SU 12 für jeden eingestellten Betriebszustand in etwa zu einer Verdopplung der Wasserbeaufschlagungsdichte.

Die gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten sind in **Abbildung 9** über den zugehörigen Wasserbeaufschlagungsdichten aufgetragen. Für die Messungen, die bei einem Abstand von 20 cm durchgeführt wurden, liegen fast alle eingestellten Meßpunkte im Bereich der stabilen Filmverdampfung. Die größten Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten betragen etwa $1400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

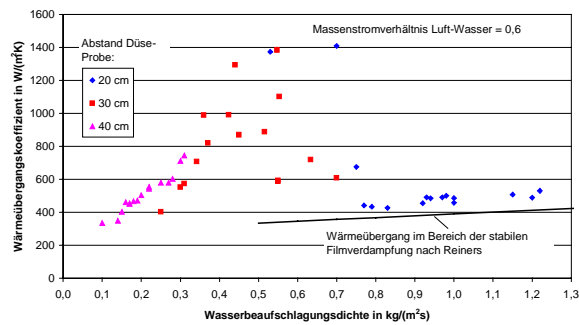


Abbildung 9: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Wasserbeaufschlagungsdichte für verschiedene Düsenabstände

Die Meßwerte, die bei einem Abstand von 30 cm aufgenommen wurden, liegen sowohl im Bereich der Verdampfungskühlung als auch im Bereich der stabilen Filmverdampfung. Der Übergangsbereich zwischen beiden Gebieten befindet sich bei Wasserbeaufschlagungsdichten von $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \leq \dot{m}_B \leq 0,6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Auch hier werden maximale Wärmeübergangskoeffizienten von $1400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreicht.

Die Wärmeübergangskoeffizienten, die bei den Messungen im Abstand von 40 cm ermittelt wurden, zeigen, daß für die sich bei diesen Versuchen ergebenden geringen Wasserbeaufschlagungsdichten unter $\dot{m}_B = 0,35 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ nur Zustände im Bereich der Verdampfungskühlung vorliegen.

Vergleicht man die Ergebnisse der Messungen mit einem Abstand zwischen Düse und Meßfläche von 30 cm und 40 cm miteinander, so ist zu erkennen, daß für den Bereich der Wasserbeaufschlagungsdichte, bei dem in beiden Fällen Messungen durchgeführt werden, konnten die Messungen bei einem Abstand von 40 cm höhere Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten liefern als bei 30 cm. Dies deutet darauf hin, daß sich die Tropfeneigenschaf-

ten im Verlauf des Sprühstrahl mit zunehmendem Abstand vom Düsenaustritt ändern.

Einfluß der Düse auf den Wärmeübergang

In den **Abbildungen 10** und **11** sind jeweils vergleichend die Ergebnisse der Messungen für die Düsen SU 11 und SU 12 dargestellt. In **Abbildung 10** erfolgt eine Gegenüberstellung der Meßergebnisse für ein Massenstromverhältnis von 0,6 und in **Abbildung 11** für ein Massenstromverhältnis von 0,3. In beiden Fällen liegen im Bereich der Verdampfungskühlung die Wärmeübergangskoeffizienten für die Düse SU 12 unterhalb der für geringere Wasserdurchflüsse ausgelegten Düse SU 11.

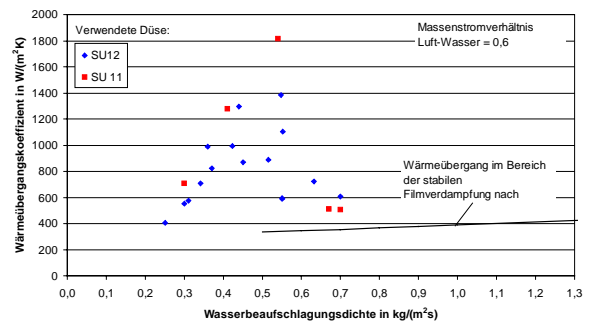


Abbildung 10: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wasserbeaufschlagungsdichte, Oberflächentemperatur $900 \text{ }^\circ\text{C}$, Düsen SU 11, SU 12

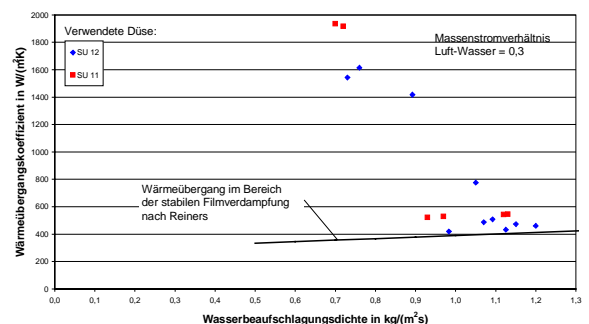


Abbildung 11: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wasserbeaufschlagungsdichte, Oberflächentemperatur $900 \text{ }^\circ\text{C}$, Düsen SU 11, SU 12

Ausblick

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß mit der Verdampfungskühlung ein Verfahren zur Kühlung heißer Metalle zur

Verfügung steht, daß schon beim Einsatz geringer Wassermengen eine Kühlwirkung ermöglicht, wie sie z.B. bei der Spritzkühlung sonst nur bei wesentlich höheren Wasserbeaufschlagungsdichten möglich ist.

Um die Verdampfungskühlung in der Praxis einsetzen zu können, ist allerdings eine sorgfältige Auswahl der in Frage kommenden Düsen nach ihren charakteristischen Eigenschaften (Tropfengröße, Tropfengrößenverteilung, Durchsatz, Art der Verdüsung) notwendig. Mit den einzusetzenden Düsen muß eine klare Trennung der Bereiche der stabilen Filmverdampfung und der Verdampfungskühlung möglich sein, d.h. der Übergangsbereich zwischen beiden Gebieten muß so bemessen sein, daß nur für wenige Betriebszustände der Düse Zustände in beiden Bereichen vorliegen. Gleichzeitig muß im Bereich der Verdampfungskühlung ein möglichst hoher Wärmeübergang zu erzielen sein.

Schrifttum

- [1] Reiners, U.; Wärmeübertragung durch Spritzwasserkühlung heißer Oberflächen im Bereich der stabilen Filmverdampfung; Dissertation TU-Clausthal, 1987,
- [2] Jeschar, R., Specht, E., Puschmann, F., Maibücher, L.; Experimentelle Untersuchung der Verdampfungskühlung von heißen Metallen mit Sprühnebel; Abschlußbericht BMWi, AiF-Nr. B11166, Fogi Nr. 685; Magdeburg/Clausthal, 2000
- [3] Bleiker, G.; Filmverdampfung von Einzeltropfen auf heißen Oberflächen; Dissertation Universität Magdeburg, 2000
- [4] Müller, H.R.; Jeschar, R.; Wärmeübergang bei der Spritzwasserkühlung von Nichteisenmetallen; Metallkunde 74, 1983, S. 257-264
- [5] Wachters, L.H.J.; Bonne, H.; Nouhuism H.J.; The heat transfer from a hot horizontal plate to sessile water drops in the spheroidal state; Chemical Engineering Science 21, 1966, S. 923-936

Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die vom Forschungs-

ratorium Maschinenbau e.V. (FKM, Frankfurt) gestellt und am Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik der TU Clausthal unter der Leitung von Herrn Professor Jeschar bearbeitet wurde. Die Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMW, Bonn) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF, Köln), (AiF-Nr. B11166) finanziell gefördert.