



Sprühkühlung: Effizienz durch neue Vorhersagemodelle

Zur Kühlung heißer Oberflächen wird in vielen Prozessen die Technologie der Sprühkühlung eingesetzt. Hierbei wird die Fläche mit einem Spray beaufschlagt, das aus einer Vielzahl von Einzeltropfen besteht. Sind die Temperaturen der Oberfläche hinreichend groß, kommt es durch den Phasenwechsel beim Aufprall jedes einzelnen Tropfens zur Übertragung einer verhältnismäßig großen Wärmemenge. Die erreichte hohe Wärmestromdichte und damit Kühlleistung bei gleichzeitig geringem Bedarf an Kühlmittel sowie die Möglichkeit, diese gleichmäßig auf der Oberfläche zu verteilen, sind der Grund, weshalb Sprühkühlung auch bei der Werkzeugkühlung in der Massivumformung eingesetzt wird. Hinsichtlich einer Verkürzung der Prozesszeiten zeigt sich der Prozessschritt der Kühlung häufig als Flaschenhals, den es zu überwinden gilt, um die Effizienz zu steigern.

AUTOREN



Fabian Tenzer, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet „Strömungslehre und Aerodynamik“ der Technischen Universität Darmstadt



Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea

ist ehemaliger Leiter des Fachgebiets „Strömungslehre und Aerodynamik“ der Technischen Universität Darmstadt



apl. Prof. Dr. Ilia V. Roisman

ist Leiter der Gruppe „Tropfendynamik und Sprays“ am Fachgebiet „Strömungslehre und Aerodynamik“ der Technischen Universität Darmstadt



Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong

ist Leiterin des Fachgebiets „Strömungslehre und Aerodynamik“ der Technischen Universität Darmstadt

Die Wärmeübertragung bei der Sprühkühlung hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab, wie zum Beispiel der Oberflächentemperatur, den Sprayparametern (Tropfengröße, Tropfengeschwindigkeit und Beaufschlagungsdichte), Fluidmaterial, Rauigkeit und Material der Wand. Aufgrund dieser komplexen Abhängigkeiten gibt es aktuell nur wenige Modelle zur Vorhersage der Kühlleistung, die zudem größtenteils empirischer Natur sind. Erschwert wird eine universelle Vorhersage, weil sich Randbedingungen ändern, wie beispielsweise das Material des zu kühlenden Körpers. Eine detaillierte Optimierung des Kühlungsprozesses ist damit basierend auf bestehenden Modellen nicht immer möglich. Aus diesem Grund befasst sich das Forschungsvorhaben „Sprühkühlung extrem heißer Oberflächen“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen von SFB-TRR 75 und dem Industrieverband Massivumformung e. V., mit der Erforschung der Wärmeübertragung bei der Sprüh-

kühlung. Ziel des Vorhabens ist ein besseres Verständnis der physikalischen Zusammenhänge, die Entwicklung universeller, leistungsfähiger Modelle zur Vorhersage der Kühlwirkung sowie deren Überführung in eine für die Praxis leicht anwendbare Form.

AUSGANGSSITUATION

Zur Erfassung des Temperaturniveaus während eines generischen Schmiedevorgangs wurden Vorabversuche durchgeführt. Hierzu wurde Rundmaterial (Durchmesser 60 mm, Höhe 90 mm) mit einer Ausgangstemperatur von 1.230 °C auf einer Stauchbahn zu einer Scheibe (Durchmesser 110 mm, Höhe 30 mm) gestaucht. Bild 1 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf über die Zeit in einem Abstand von 1 mm unterhalb der Oberfläche. Die Temperatur wurde mittels Thermoelement erfasst. Zur Verdeutlichung sind alle Ereignisse während des Stauchvorgangs sowie verschiedene manuelle Kühlaktionen im Kurvenverlauf von Bild 1

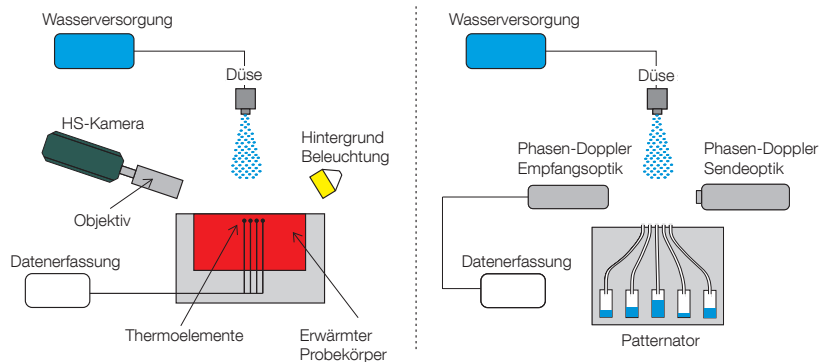
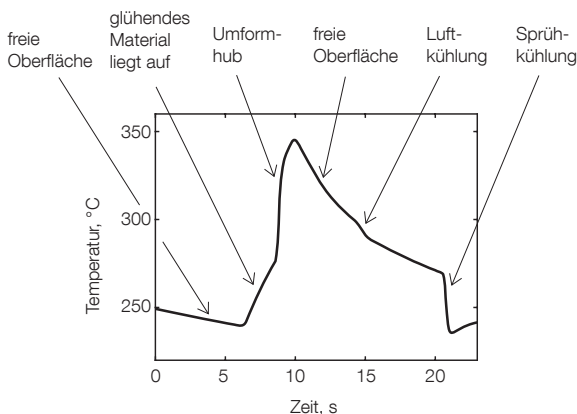


Bild 1: Temperatur 1 mm unterhalb der Oberfläche über der Zeit für einen generischen Schmiedeversuch

Bild 2: Prüfstandsumgebung zur Untersuchung der Sprühkühlung

gekennzeichnet. Der Temperaturverlauf spiegelt jeden Vorgang auf der Oberfläche wider. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich lediglich um einen sehr einfachen generischen Umformprozess handelt. Jedoch konnte dies belegen, dass die gewählte Messtechnik in der Lage ist, die Änderungen zu erfassen. Weiterhin rechtfertigt dies die Beschränkung auf eine maximale Temperatur von 500 °C für die folgenden Prüfstandexperimente.

BESCHREIBUNG DES PRÜFSTANDS

Bild 2 zeigt eine vereinfachte Skizze der Prüfstandumgebung. Die linke Hälfte zeigt das Setup zur Charakterisierung des Sprays. Hierbei werden unterschiedliche Spraydüsen mit verschiedenen Betriebsdrücken und Abständen mittels Phasen-Doppler-Messgerät und Patternator vermessen. Somit ist der Parameterraum hinsichtlich Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit sowie Beaufschlagungsdichte genau bekannt. Diese große Bandbreite verschiedener Sprays wird anschließend für die Kühlungsversuche eingesetzt. Der Prüfstand für diese Kühlungsversuche ist in der rechten Hälfte von Bild 2 dargestellt. Kernstück bildet der beheizte Probekörper, welcher mit einer Vielzahl von Thermoelementen bestückt ist. Mit Hilfe der Temperaturdaten im Innern des Probekörpers lassen sich durch Lösen des sogenannten Inversen Wärmeleitproblems die lokale Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur für verschiedene Positionen auf der Oberfläche bestimmen. Durch Kühlversuche mit verschiedenen Sprays kann somit der Einfluss dieser verschiedenen Sprays auf die Kühlwirkung untersucht werden. Weiterhin kommt ein Visualisierungssystem bestehend aus High-Speed-Kamera und Hintergrundbeleuchtung zum Einsatz, um die Hydrodynamik während des Sprayaufpralls zu erfassen. Ergänzend werden im Rahmen dieser Studie verschiedene Materialien des Probekörpers und deren Einfluss auf die Kühlwirkung untersucht.

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Ein exemplarisches Ergebnis eines Kühlungsversuchs ist in Bild 3 dargestellt. Die Kurve zeigt die Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur. Der Kurvenverlauf zeigt Ähnlichkeit mit der bekannten Nukiyama-Kurve (boiling curve) für das Behältersieden. Die Bilder zeigen exemplarisch die Hydrodynamik an der Oberfläche während der Sprühkühlung zum entsprechenden Zeitpunkt des Experiments. Zu beachten ist: Da der Versuch bei einer hohen Temperatur startet und die Oberfläche fortlaufend abgekühlt wird, ist die Kurve mit zunehmender Abkühlzeit von rechts nach links zu lesen, also von hohen zu niedrigen Temperaturen. Bei hohen Temperaturen, im so genannten „film boiling regime“ zeigt sich eine geringe

Wärmestromdichte, die annähernd linear mit sinkender Temperatur abfällt. Die visuellen Beobachtungen, exemplarisch im rechten Bild zu erkennen, zeigen eine Folge von Einzeltropfenaufprallen auf eine trockene Wand. Durch die hohe Oberflächentemperatur bildet sich ein wärmeisolierender Dampffilm zwischen aufprallendem Tropfen und der Wand und führt so zu einer vergleichsweise geringen Wärmestromdichte. Es bildet sich allerdings kein geschlossener Wasserfilm, der durch einen Dampffilm von der Oberfläche getrennt ist, wie er von etlichen Autoren beschrieben wurde. Stattdessen kann eine Superposition von Einzeltropfenaufprallen benutzt werden, um die Wärmeübertragung in Abhängigkeit von den Sprayparametern vorherzusagen [1]. Mit Erreichen des Leidenfrost-Punkts, gleichbedeutend mit der minimalen Wärmestromdichte, nimmt die Wärmestromdichte im „transition boiling regime“ schlagartig zu, erreicht ihr Maximum am „critical heat flux“ und nimmt anschließend im „nucleate boiling regime“ wieder ab. Hydrodynamisch zeigt sich dies durch eine, zuerst sehr geringe, bleibende Benetzung nach jedem einzelnen Einzeltropfenaufprall (Bild Mitte). Mit abnehmender Oberflächentemperatur nimmt diese bleibende Benetzung kontinuierlich zu, bis letztendlich im Bereich um den „critical heat flux“ ein annähernd geschlossener Flüssigkeitsfilm die Oberfläche benetzt (Bild links) und „splashing“ durch das Auftreffen der Wassertropfen auf einen Wasserfilm entsteht.

Die Auswertung vieler Versuche zeigt, dass unterschiedliche Sprayparameter sich hauptsächlich auf die Wärmestromdichte im „film boiling regime“ auswirken. Der Leidenfrost-Punkt sowie der Verlauf der Wärmestromdichte im „nucleate boiling regime“ sind demgegenüber nahezu unbeeinflusst. Die Erfassung der Wärmestromdichte in Abhängigkeit eines breiten Parameterbereichs verschiedener Einflussgrößen, erlaubt im Folgenden die Entwicklung und Validierung von neuen Modellen zur Vorhersage der Wärmestromdichte.

MODELLIERUNG

Es wurden theoretische Modelle für den Wärme- und Stofftransport im „film boiling regime“ (Bereich sehr hoher Oberflächentemperaturen) und im „nucleate boiling regime“ (Bereich geringerer Oberflächentemperaturen) entwickelt. Diese Modelle berücksichtigen die unterschiedlichen physikalischen Vorgänge in beiden Regimen. Zusätzlich wurde die Leidenfrost-Temperatur erfasst, die beide genannten Regime trennt.

Für das „film boiling regime“ wurde basierend auf experimentellen Untersuchungen in [1] ein Modell zur Wärmeübertragung

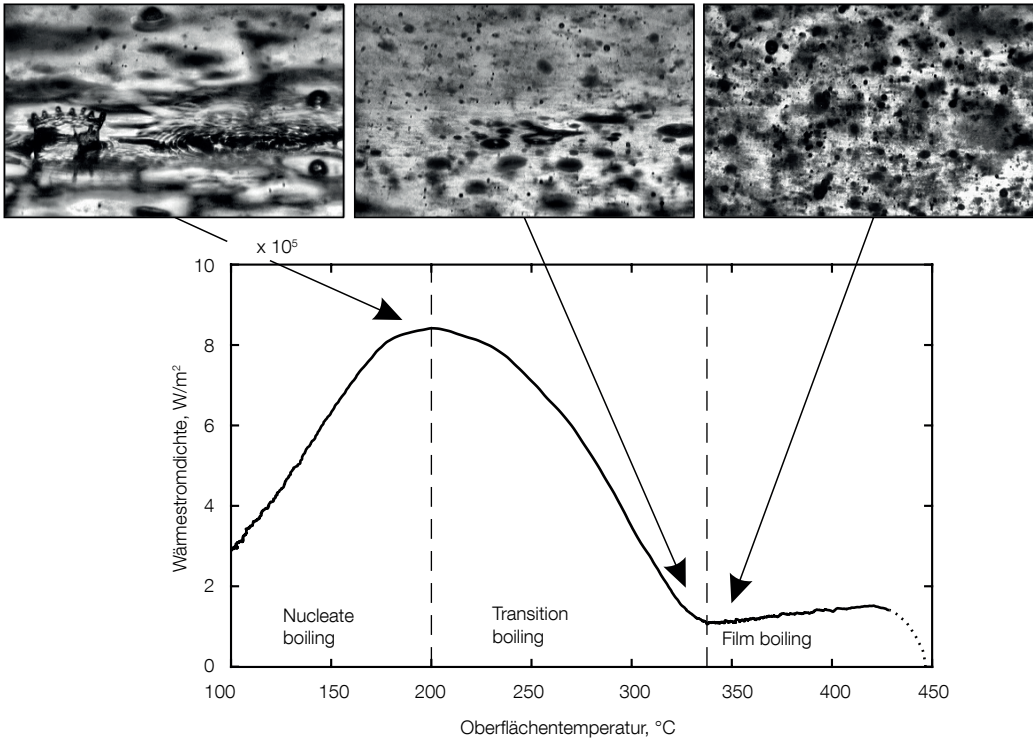


Bild 3: Wärmestromdichte über Zeit für einen exemplarischen Versuch. Die Bilder zeigen repräsentativ die Hydrodynamik an der Oberfläche zu den entsprechenden Zeitpunkten während des Kühlvorgangs.

beim Aufprall von Einzeltropfen auf eine beheizte Oberfläche entwickelt. Dieses analytische Modell basiert auf einer Bilanzierung der Energien unter Berücksichtigung verschiedener Annahmen für zum Beispiel die Kontaktzeit des Aufpralls oder die Temperaturen an den Grenzflächen zwischen den verschiedenen Phasen. Die Superposition mehrerer Einzeltropfenevents unter Berücksichtigung der Interaktionswahrscheinlichkeit zwischen den Tropfen führt letztlich zu einem Modell für die Wärmestromdichte in Sprays. Berücksichtigt man weiterhin die Entwicklung der thermischen Grenzschicht im zu kühlenden Probekörper, folgt schließlich ein Modell zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Oberflächentemperatur und der Wärmestromdichte.

Dieses Modell berücksichtigt den Einfluss der Sprayparameter (Tropfengröße, Tropfengeschwindigkeit, Beaufschlagungsdichte, thermische Eigenschaften und Temperatur des Fluids) und der thermischen Eigenschaften des zu kühlenden Substrats [3].

Mit Erreichen des Leidenfrost-Punkts beginnt das „transition boiling regime“. Die Annäherung an diesen Bereich erfolgt vorerst vereinfacht durch einen Sprung der Wärmestromdichte auf einen sehr hohen Wert. Diese Annahme basiert auf der im Vergleich zum gesamten Kühlvorgang sehr schnell einsetzenden Benetzung.

Im folgenden „nucleate boiling regime“ zeigt die Wärmestromdichte durch die vollständige Benetzung der Oberfläche einen charakteristischen Verlauf. Zur Beschreibung der Kurve dient die sehr grobe Annahme, dass sich mit einsetzender Benetzung und ausreichend großer Zufuhr von frischem Fluid in den Film eine konstante Temperatur an der Oberfläche einstellt. Diese Temperatur wird in erster Näherung als Sättigungstemperatur des Fluids gesetzt. Bei Annahme einer halbunendlichen Wand lässt sich mittels Ähnlichkeitsansatz die Wärmestromdichte für diesen generischen Fall berechnen. Erstaunlicherweise stimmt dieser Ansatz mit den experimentellen Ergebnissen sehr gut überein. Dies bedeutet zugleich, dass die Wärmestromdichte im

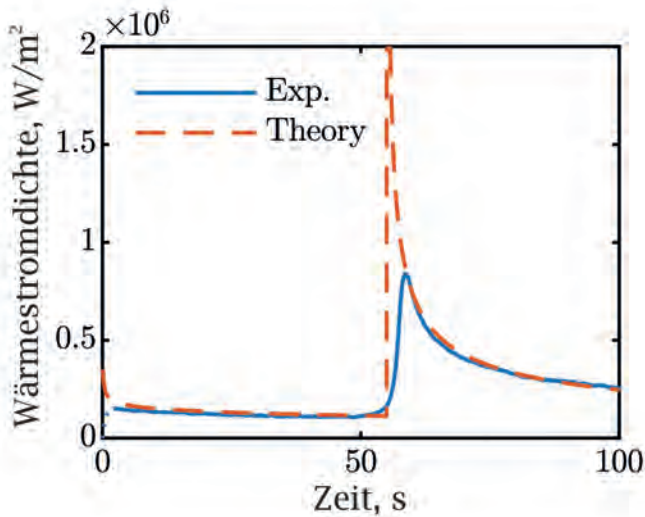


Bild4: Exemplarischer Vergleich zwischen experimentellem Ergebnis und theoretischer Vorhersage mittels neu entwickelter Modelle dieser Studie

Bilder: Autoren

„nucleate boiling regime“ überwiegend vom Substrat und nicht mehr von den Sprayparametern abhängt. Dies gilt nur im Falle einer ausreichend großen Beaufschlagungsdichte, was jedoch für die vorliegenden Experimente mit minimaler Beaufschlagungsdichte von 0,5 kg/m²s der Fall ist.

Werden die zuvor dargestellten Modelle angewandt und exemplarisch mit einem experimentellen Ergebnis verglichen, ergeben sich die beiden in Bild 4 dargestellten Kurven. Obwohl hier exemplarisch nur ein Ergebnis dargestellt ist, erfolgte die Validierung der Modelle selbstverständlich anhand aller Messergebnisse mit unterschiedlichsten Sprays und verschiedenen Substratmaterialien. Aus Bild 4 ist die exzellente Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den durch die neu entwickelten Modelle vorhergesagten Ergebnissen ersichtlich, wobei die Fläche unter der Kurve für die abgegebene Wärme maßgebend ist. Allerdings existieren auch Bereiche mit weniger guter Übereinstimmung (Leidenfrost-Punkt und „transition boiling regime“), die eine weitere Erforschung notwendig machen. Dennoch steht somit ein leistungsstarkes Werkzeug zur Vorhersage der Wärmestromdichte und damit zur Auslegung und Optimierung von Sprühkühlungsprozessen zur Verfügung. Dieses Werkzeug berücksichtigt den Einfluss aller praxisrelevanten Größen wie den Sprayparametern (Art des Fluids, Fluidtemperatur, Tropfengröße, Tropfengeschwindigkeit und Beaufschlagungsdichte) und Eigenschaften des Substrats und kann für eine Vielzahl verschiedener Prozesse verwendet werden.

Zusammenfassend setzt sich der Kühlvorgang im Wesentlichen aus einem Teil bei hohen Temperaturen (oberhalb Leidenfrost) zusammen, in dem eine möglichst hohe Kühlleistung maßgeblich durch eine große Beaufschlagungsdichte erreicht wird, und einem Teil bei niedrigeren Temperaturen (unterhalb der kritischen Wärmestromdichte), in dem die Wärmeübertragung durch das Material limitiert und weitestgehend unabhängig vom Spray ist. Die Forderung nach einer optimierten Kühleffizienz bei gleichzeitiger Einsparung von Ressourcen führt zu einem zweistufigen Kühlvorgang, bei dem zuerst bei hohen Temperaturen ein maximaler Wärmestrom durch eine sehr hohe Beaufschlagungsdichte realisiert wird. Während der zweiten Stufe bei niedrigeren Temperaturen nach Durchlaufen des Leidenfrost-Punkts wird auf eine deutlich geringere Beaufschlagungsdichte umgeschaltet, um Kühlfluid einzusparen, da in diesem Bereich keine höhere Wärmeübertragung möglich ist. Solch eine Umschaltung zwischen hoher und geringer Beaufschlagungsdichte lässt sich leicht und schnell durch Absenken des Fluiddrucks erreichen.

Für eine detailliertere Erklärung der Ergebnisse dieser Studie und Beschreibung der Modelle sei auf die Dissertation [2] und die Publikation [3] verwiesen.



Die Autoren bedanken sich vielmals für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)-Projekt SFB-TRR 75, Projektnummer 84292822 und durch den Industrieverband Massivumformung e. V. (Studie IMU58).



[1] Breitenbach J; Roisman IV; Tropea C: Heat transfer in the film boiling regime: Single drop impact and spray cooling. International Journal of Heat and Mass Transfer 2017,110:34 – 42

[2] Tenzer FM, Heat transfer during transient spray cooling: An experimental and analytical study [Dissertation]. Darmstadt: TU Darmstadt; 2020

[3] Tenzer FM, Roisman IV, Tropea C: Fast transient spray cooling of a hot thick target. Journal of Fluid Mechanics 2019; 881:84 – 103