



Beobachtung von Kapillaren und Schmelzbadströmungen in transparenten Materialien

Schweißen ist eine weit verbreitete Anwendung der Materialbearbeitung mit Lasern und die in jüngster Zeit erfolgten Entwicklungen von Lasersystemen mit hoher Strahlqualität und Leistung helfen, weitere Anwendungsfelder zu erschließen. Jedoch setzen immer noch Phänomene, die aus der Kapillar- und Schmelzbadynamik resultieren, der Anwendbarkeit Grenzen. Die Parameterfelder, in denen Imperfektionen wie z.B. Spritzer, Auswürfe und Humping ausgeschlossen sind, sind in einigen Anwendungsfällen für Laser mit hoher Strahlqualität und Wellenlänge um $1\ \mu\text{m}$ sogar stärker eingeschränkt als für Laser mit $10\text{-}\mu\text{m}$ -Strahlung. Daher ist es auch heute noch wichtig, Untersuchungen zur Erforschung der Ursachen solcher Prozessinstabilitäten fortzuführen. Zur orts aufgelösten Untersuchung wurden neben Modellierungen vor allem Hochgeschwindigkeits-Videokameras eingesetzt. Diese Beobachtungstechnik muss sich jedoch damit begnügen, Bilder von der Oberfläche zu liefern. Lediglich mit der Röntgentechnik gelangen ohne störende Eingriffe während der Bearbeitung Einblicke ins Innere der Werkstücke. Eine andere Technik, die allerdings den Schweißprozess beeinflusst, basiert darauf, Schweißungen hinter Glas durchzuführen. Eine weitere Möglichkeit ist es, transparente Modellmaterialien zu verwenden. So findet man in der Literatur Schweißungen in Glas, Kunststoffen und Eis sowie Kapillarerzeugungen in Flüssigkeiten wie Ölen und Wasser.

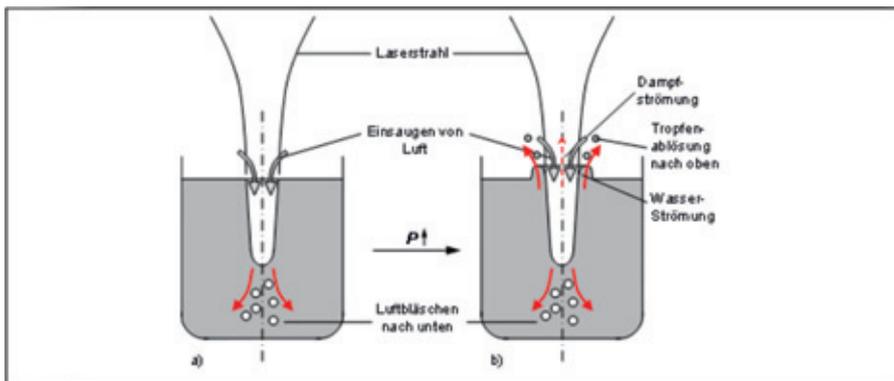


Bild 1: Skizze der bei der Erzeugung einer Kapillare in ruhendem Wasser beobachteten induzierten Strömungen, CO_2 -Laser; Fokussdurchmesser: $0,3\ \text{mm}$, a) bei einer Laserleistung von $500\ \text{W}$: Wirbel im Wasser mit Abwärtsströmungen in Kapillarnähe, b) bei einer Laserleistung von $1000\ \text{W}$: zusätzlich zur Abwärtsströmung wird eine Aufwärtsströmung im oberen Bereich um die Kapillare beobachtet.

Im IFSW wurden in den letzten Jahren einige Versuche mit Wasser und mit Eis als Modellmaterial durchgeführt. Ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass den Strömungskomponenten parallel zur Strahlachse mehr Bedeutung zugemessen werden muss, wenn man die verschiedenen Instabilitäten erklären will. So zeigte ein erstes, äußerst einfaches Experiment (Bild 1), bei dem eine Kapillare in ruhendem Wasser erzeugt wurde, einen starken Wirbel im Wasser mit heftiger Abwärtsbewegung in Kapillarnähe. Gleichzeitig kann es jedoch, je nach Laserleistung, im oberen Bereich um die Kapillare herum zu einer Anhebung der Schmelze kommen, die auf eine Auf-

wärtsströmung der Flüssigkeit hindeutet. Diese ist wohl durch Impulsübertrag vom ausströmenden Dampf auf die Flüssigkeit getrieben.

Bei diesem einfachen Experiment fielen ferner viele Luftblasen auf, die sich in dem oben erwähnten Wirbel bewegten. Diese entstanden im unteren Bereich der Kapillare und überdauerten in dem relativ kalt gebliebenen Wasser über Sekunden bis Minuten. Die einzige Erklärung, die gefunden werden konnte, ist, dass Luft – trotz des aus der Kapillare ausströmenden Wasserdampfes – in die Kapillare einströmt, bis zur Kapillarspitze vordringt und von dort mit großem Impuls in Bläschenform tief in das Wasser nach unten eindringt. Um das

Entstehen dieser Blasen näher zu untersuchen, wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei still stehendem und bewegtem Wasser durchgeführt. Dabei konnten zwei Arten von Blasen festgestellt werden. Die Blasen verschwanden entweder innerhalb einer Millisekunde (Beispiel siehe Bild 2) oder sie existierten sehr lange bis sie aus dem Bildbereich verschwanden oder zur Oberfläche aufgestiegen waren. Daraus kann nur gefolgert werden, dass die Blasen entweder mit Wasserdampf, der sehr schnell kondensiert, oder aber mit Luft gefüllt sind. Mischformen existieren ebenfalls in der Weise, dass eine Blase ihr Volumen sehr schnell (im Bereich einer Millisekunde) reduziert und der Rest dann sehr lange weiterexistiert. Da meistens dieses Verhalten beobachtet wurde, kann man schließen, dass die Kapillaren in den beobachteten Versuchen mit einem Gemisch aus Wasserdampf und Luft gefüllt waren. Die mit Luft gefüllten Blasen können über einen langen Zeitraum beobachtet werden und eignen sich daher gut zur Strömungsbeobachtung, so dass keine weiteren Tracerpartikel beigegeben werden müssen, die die Strömung stören könnten. In Wasser bewegten sich die an der Kapillarspitze erzeugten Blasen immer abwärts (siehe Bild 3), die weiter oben entstehenden Blasen auch in andere Richtungen. Bei Versuchen mit $1000\ \text{W}$ bewegten sich alle Blasen nach unten. Bei Versuchen in Eis ist das Verhalten

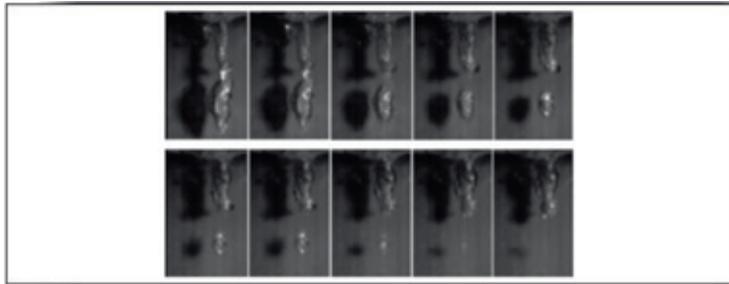


Bild 2: Sequenz aus einer Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahme, die mit 9000 Hz aufgenommen wurde. Sie zeigt die Abschnürung einer in Wasser erzeugten Kapillare und den folgenden Kollaps des unteren Teils, CO₂-Laser mit 500 W, Relativgeschwindigkeit zwischen Wasser und Laser: 7,5 m/min, Kapillartiefe: ungefähr 12 mm, von der vollständig erfolgten Abschnürung im dritten Bild bis zum Verschwinden der von der Kapillare abgetrennten Blase im letzten Bild vergehen 0,77 ms.

sehr ähnlich. Hier müssen die an der Kapillarspitze erzeugten Blasen jedoch nach einer kurzen Abwärtsbewegung nach hinten ausweichen, da sie bei der Abwärtsbewegung auf nicht aufgeschmolzenes Eis stoßen. Das klare Eis lässt es auch zu, die Vorgänge bei der Blasenentstehung detailliert zu analysieren. Die Blasenentstehung scheint immer mit einer Abschnürung der Kapillare und / oder Kondensations-

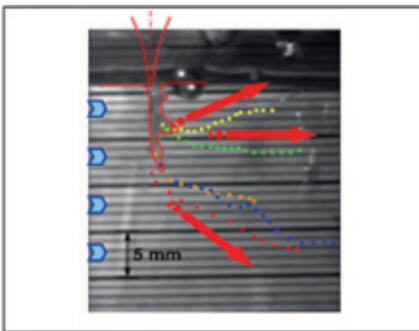


Bild 3: Kapillare in fließendem Wasser (6,7 m/min), erzeugt von einem CO₂-Laser; Fokussdurchmesser: 0,3 mm, Laserleistung: 500 W; die kleinen Pfeile am linken Rand verdeutlichen die Fließrichtung des Wassers, die langen Pfeile die Bewegungsrichtungen der Blasen, die horizontalen Linien im Hintergrund haben einen Abstand von 1 mm.

vorgängen verbunden zu sein. Bei der Kondensation von Kapillarteilen bleiben dann die mit Luft gefüllten Anteile übrig und werden zu Blasen. Durch die schnelle Kondensation entsteht ein Unterdruck, der sowohl umgebende Schmelze als auch Gase ansaugt. Das ist vermutlich der Mechanismus, der selbst Luft von Bereichen oberhalb der Kapillare bis zur Kapillarspitze gelangen

lässt. Die zuströmende Schmelze wird ebenfalls nach unten gesogen, so dass zusammen mit der angesaugten Luft ein kräftiger nach unten gerichteter Impuls auf die Schmelze übertragen wird, der das geschmolzene Material zusammen mit den entstandenen Blasen nach unten katapultiert. Diese Vorgänge dürften wesentlich zur Entstehung des schon seit vielen Jahren bekannten Wirbels im Schmelzbad, der mit Röntgentechnik entdeckt wurde, beitragen. Als ein weiterer Beitrag zur Entstehung dieses Wirbels sei ein Abwärtsströmen der Schmelze an der Kapillarfront genannt, auf das aus den Versuchen mit Wasser und Eis allerdings nur indirekt geschlossen werden kann.

Bei der Analyse waren auch Instabilitäten an der Kapillarrückwand augenfällig, die vor allem bei tiefen Kapillaren und niedrigen Schweißgeschwindigkeiten auftraten (Bild 4). Die zu Spritzern führenden Instabilitäten liefen immer nach ähnlicher Prozesskette ab: Bewegte sich Schmelze auf die Kapillare zu, so dass der ausströmende Metall dampf eingengt wurde, entwickelte sich dort anscheinend ein Unterdruck (entsprechend der Gleichung von Bernoulli), der die Schmelze weiter in Richtung Kapillarfront saugte. Dadurch entstanden „Finger“ aus geschmolzenem Material, die weit in die Kapillare hineinragten. Bei „geeigneter“ Parameterwahl kann sich unterhalb dieser Einengung ein erhöhter Druck aufbauen, der die fingerartige Schmelzeausstülpung nach oben und hinten schleudert. Ist die Schleuderbewegung schnell, werden von solchen Fingern Spritzer abgetrennt.

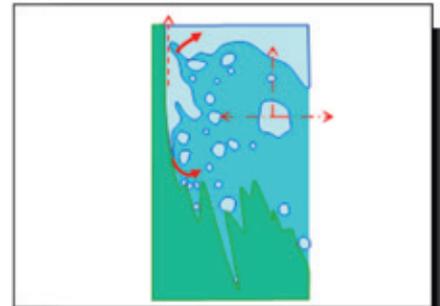


Bild 4: Schweißung in Eis, durchgeführt mit einem CO₂-Laser; Fokussdurchmesser: 0,3 mm, Laserleistung: 500 W, 2 m/min; eingezeichnete Pfeile: gestrichelt: ausströmender Metall dampf; strichpunktiert: Bewegung der Blasen – horizontale Bewegung hin und her, der Volumenänderung der Kapillare folgend, und Aufwärtsbewegung durch Auftrieb; durchgezogen: Wirbel in der Schmelze an der Kapillarspitze und Schleuderbewegung eines „Schmelzefingers“, die Spritzer verursachen kann.

Beim Vergleich dieser einerseits bei Wasser bzw. Eis und andererseits bei Metallen auftretenden Phänomenen müssen selbstverständlich die unterschiedlichen Materialeigenschaften bedacht werden. Wesentliche Eigenschaften sind zwar sehr ähnlich, wie z.B. die Absorptionseigenschaften im Dampf, im kondensierten Nebel und bei streifendem Einfall an flüssigen und festen Oberflächen, aber es gibt auch deutliche Unterschiede, wie z.B. bei der Wärmeleitfähigkeit und der Oberflächenspannung. Dennoch kann angenommen werden, dass die meisten Phänomene – zwar unterschiedlich stark ausgeprägt – bei Metallen ebenso auftreten wie bei Wasser und Eis.

Institutsadresse:

Institut für Strahlwerkzeuge
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 66840
Fax: +49 (0)711 685 66842
<http://www.ifsw.uni-stuttgart.de>

Autor:

Akademischer Oberrat Dipl.-Ing. Peter Berger
E-Mail: peter.berger@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Phys. Jan-Philipp Negel
Tel.: +49 (0)711 685 69721
Fax: +49 (0)711 685 59721
E-Mail: jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de