

## STRÖMUNGSUNTERSUCHUNGEN AN EINEM HAZELETT-CASTER FÜR DAS BANDGIEßEN VON KUPFER

H.-J. Odenthal, H. Pfeifer

Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, RWTH Aachen, Kopernikusstraße 16, 52074 Aachen

### Abstract

Kupferschmelzen werden heute u. a. in Bandgießanlagen, sogenannten Hazelett-Castern, kontinuierlich zu Band vergossen. Die dabei auftretenden Strömungsphänomene in der Flüssigphase sind eng gekoppelt mit der Qualität des Kupferbandes. Im vorliegenden Fall werden grundlegende Strömungsphänomene in einem Hazelett-Caster anhand physikalischer Simulationen am Wassermodell (Maßstab 1:1) sowie numerischer Simulationen untersucht. Hierzu wurde die Wasserströmung u. a. mit Hilfe der DPIV-Technik vermessen. Die Ergebnisse zeigen, welche Prozessgrößen am Hazelett-Caster optimiert werden müssen, damit die Qualität des Kupferbandes erhöht werden kann.

### Einleitung

Kupfer ist ein Schwermetall mit einem Siedepunkt von 2560°C und einem Schmelzpunkt von 1083°C. Die Weltproduktion von Kupfer betrug im Jahr 2003 ca. 15.2 Mio. t, in Deutschland wurden ca. 0.7 Mio. t produziert. Wegen seiner guten elektrischen Leitfähigkeit wird Kupfer zu Drähten und Stromschienen verarbeitet. Aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit wird es als Baumaterial für Dachbleche und -rinnen, aber auch im Maschinen- und Apparatebau, verwendet. Die hohe Wärmeleitfähigkeit nutzt man für Heizrohre, Braukessel oder als Material für Stranggießkokillen. Ein großer Anteil dient zur Herstellung von Kupferlegierungen (Rotmessing 80 - 90 % Cu und 10 - 20 % Zn; Gelbmessing 60 - 80 % Cu und 20 - 40 % Zn; Bronzen > 60 % Cu und Zusätze an Zn, Sn).

Ein Beispiel für die Herstellung von Kupferband ist die Conti-M-Produktionslinie der MKM GmbH, Hettstedt, Abb. 1. Die Anlage besteht aus einer Ofenlinie und einer Walzeinheit, wobei der Hazelett-Caster das Kernstück der Anlage darstellt. Zur Ofenlinie gehören ein Asarco-Schachtofen mit 35 Brennern in vier Reihen, in dem Kupferkathoden bei ca. 1100°C eingeschmolzen werden. Die Schmelze fließt dann in einen induktiv beheizten Zwei-Kammer-Abschlackofen, wo die Schlacke in einer Abschlackkammer entfernt und die Temperatur, falls notwendig, leicht angehoben wird. Der Ofen hat eine Kapazität von 6 t. Aus der Abschlackkammer fließt die Schmelze in eine vollständig geschlossene Transferkammer, aus der sie über ein Siphonrohr in den Speicherofen geleitet wird. Der Speicherofen mit einer Kapazität von 60 t dient als Materialpuffer, z. B. beim Anfahren der Anlage oder beim plötzlichen Gießabbruch. Zwei Rinneninduktoren mit je 500 kW Leistung halten die Temperatur auf ca. 1190°C und sorgen für eine homogene Erwärmung. Infolge des großen Puffervolumens ist diese Temperatur äußerst konstant und bildet eine gute Basis für die nachfolgende Temperaturführung im Vergießofen. Aus dem Speicherofen fließt die Schmelze in den druckbeaufschlagten Drei-Kammer-Rinneninduktionsofen mit 18 t Inhalt. Als Schutzgas wird ein Gemisch aus N<sub>2</sub> und CO verwendet. Die Schmelze gelangt über eine Stopfenregelung mit einer

konstanten Temperatur von 1160°C in den Verteiler des Hazelett-Casters. Der Hazelett-Caster erzeugt bis zu 1282 mm breite und 35 mm dicke Kupferbänder bei Gießgeschwindigkeiten bis zu  $u_G = 2.6 \text{ m/min}$ . Dies entspricht einer Gießleistung von  $\dot{m}_{Cu} = 56 \text{ t/h}$ . Die Walzeinheit besteht aus Anwärmen, Warmwalzwerk mit Oberflächenfräse und Aufhaspel. Im Walzwerk wird das Kupfer auf ca. 17 mm gewalzt und anschließend um ca. 50 K abgekühlt. Danach wird das Band an den Kanten sowie ober- und unterseitig gefräst und aufgewickelt. Der Conti-M-Komplex eignet sich für die Verarbeitung von E-, SF- und OF-Kupfer und für niedrig legiertes Kupfer und Messing, vgl. Bebber (1998), Meseha (2001), N.N. (2001).

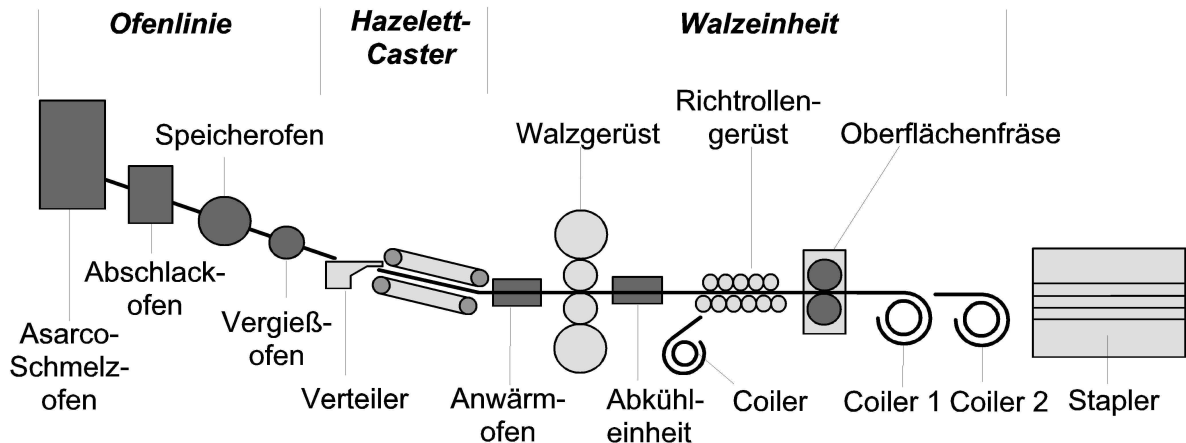


Abb. 1: Produktion von Kupferband in der Conti-M-Produktionslinie der MKM GmbH, Hettstedt

Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen ist der Hazelett-Caster, bestehend aus Verteiler, Gießschnauze und mitlaufender Kokille, Abb. 2. Zur Verteilung der Schmelze über die Gießbreite werden entweder vollständig geschlossene Baugruppen (*closed-submerged tube flow*) oder - wie im vorliegenden Fall - offene, zum Teil unter Schutzgas stehende Baugruppen (*open-channel snout flow*) eingesetzt. Hier fließt die Schmelze mit einer Temperatur von 1160°C aus dem Verteiler über die offene Gießschnauze (Diffusor und Gießlippe) in den Hazelett-Caster bzw. in die Kokille. Der Hazelett-Caster besteht aus zwei mit der Gießgeschwindigkeit  $u_G$  umlaufenden Transportbändern aus Stahl, die auf zylindrischen Rollen aufgespannt sind. Die Stahlbänder werden durch Dämmblockketten seitlich begrenzt und durch Spritzwasser gekühlt. Die Schmelze kühlt bis auf ca. 900°C ab und verlässt den Hazelett-Caster als vollständig erstarrtes Band. Für hohe Bandqualitäten ist die gleichmäßige Verteilung der Kupferschmelze über die Gießbreite des Hazelett-Casters wichtig. Die Geschwindigkeiten der Schmelze und Transportbänder müssen gleich sein, damit eine ungestörte Erstarrung gewährleistet wird. Ebenso dürfen keine Gasblasen in den flüssigen Pool des Hazelett-Casters eingezogen werden.

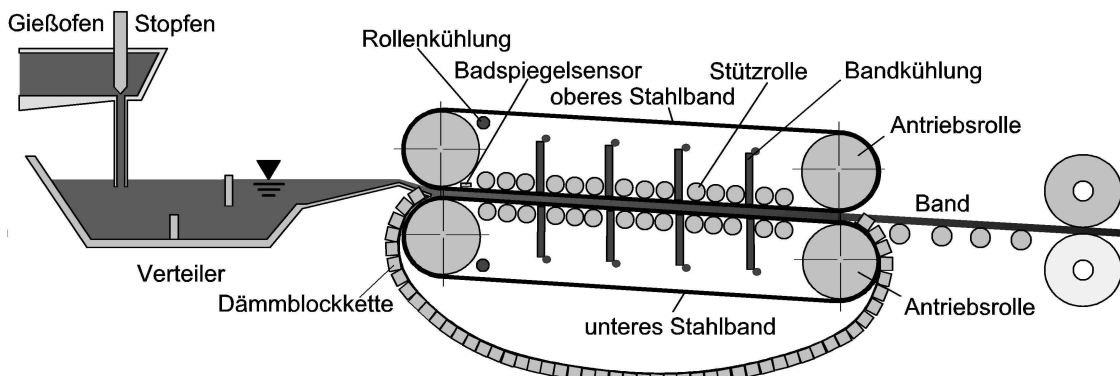


Abb. 2: Prinzip des Hazelett-Casters

## Versuchsgegenstand

Abb. 3 zeigt das am IOB aufgebaute Wassermodell des Hazelett-Casters aus Acrylglas im Maßstab 1:1 sowie die gewählten Bezeichnungen. Infolge der ähnlich großen kinematischen Viskositäten von Wasser und Kupfer ( $\nu_{W,20^\circ\text{C}} = 10.02 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\nu_{\text{Cu},1120^\circ\text{C}} = 5.57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) sind die Fließeigenschaften vergleichbar, vgl. Odenthal 2004. Das Wasser wird im geschlossenen Kreislauf aus dem Vorratsbehälter durch ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät und das Schattenrohr in den Verteiler gefördert. Von dort fließt es als offenes Gerinne in die Gießschnauze, bestehend aus Diffusor und Gießlippe. Die Gießschnauze hat die Aufgabe, das Wasser gleichmäßig vom schmalen Verteilerausritt (Breite  $B_{S0}$ ) auf den Hazelett-Caster (Breite  $B_M$ ) zu leiten. Der Füllstand wird über individuell verschließbare Öffnungen am Austritt der Kokille eingestellt. Das Auffangbecken leitet das Wasser in den Vorratsbehälter zurück.

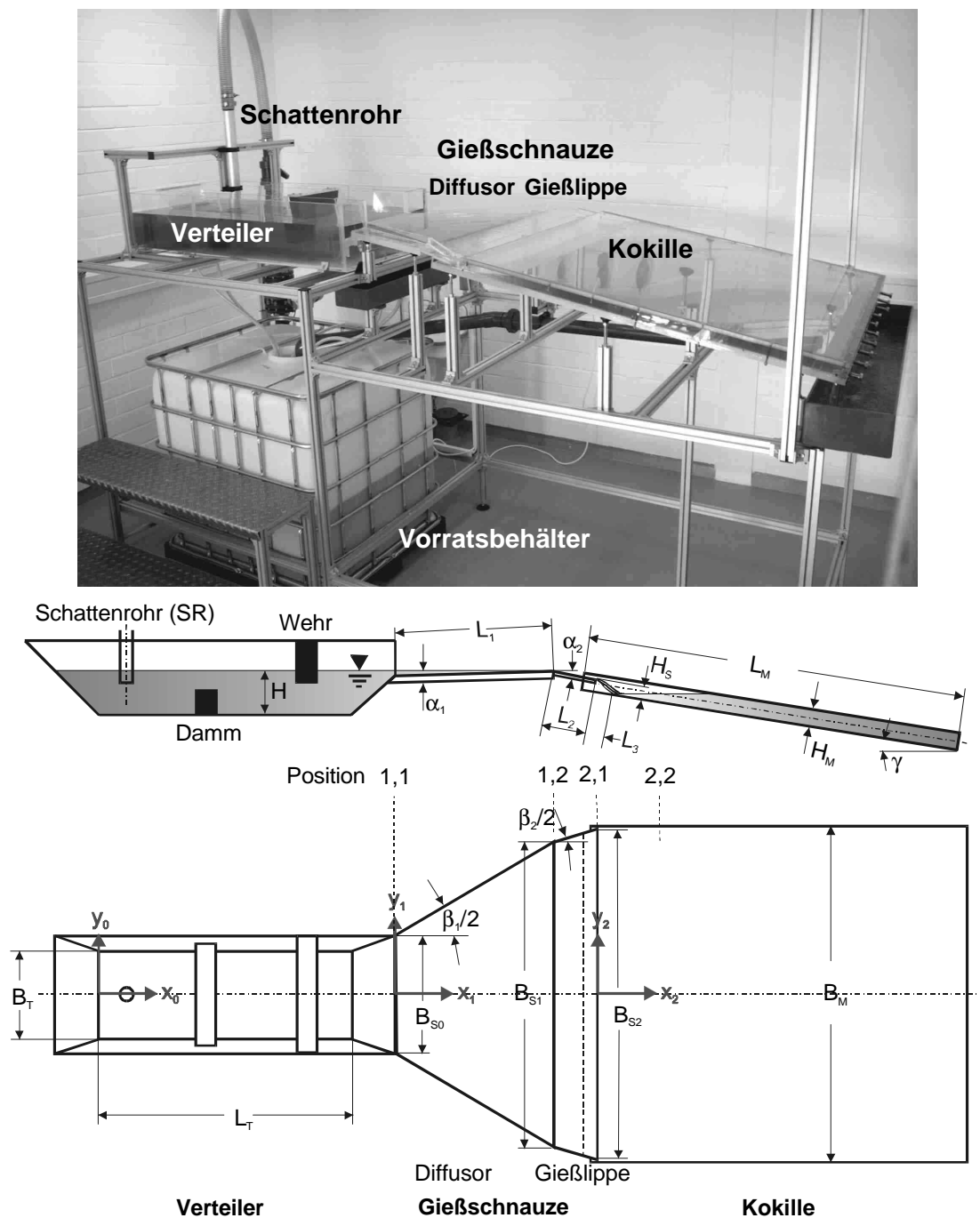


Abb. 3: Wassermodell (Maßstab 1:1) am IOB und gewählte Bezeichnungen des Hazelett-Casters

Die Bewegung der Transportbänder kann im physikalischen Modell nicht berücksichtigt werden. Da drei unterschiedliche Baugruppen (Verteiler, Gießschnauze, Kokille) miteinander gekoppelt sind, werden auch drei Koordinatensysteme verwendet. Im Verteiler wird das  $(x_0, y_0, z_0)$ -Koodinatensystem und im Diffusor das  $(x_1, y_1, z_1)$ -System eingesetzt. Das  $(x_2, y_2, z_2)$ -System ist um den Gießwinkel  $\gamma = 9^\circ$  geneigt und wird für Gießlippe und Kokille verwendet. Die Gießleistung des Hazelett-Casters ist

$$\dot{m}_{Cu} = \rho_{Cu} u_G B_M H_M. \quad (1)$$

Für  $u_G = 2.6 \text{ m/min}$  erhält man mit  $\rho_{Cu} = 7970 \text{ kg/m}^3$ ,  $B_M = 1282 \text{ mm}$  und  $H_M = 35 \text{ mm}$  eine Gießleistung von  $\dot{m}_{Cu} = 56 \text{ t/h}$ .

Grundlage der Untersuchungen ist die Dimensionsanalyse des Gießprozesses. Stellt man die physikalischen Einflussgrößen zusammen und wendet das  $\Pi$ -Theorem an, so erhält man insgesamt 17 dimensionslose Kennzahlen, von denen für isotherme Versuche am Wassermmodell die Re-, Fr- und We-Zahl einzuhalten sind, vgl. Caron 2001, Pfeifer et al. (2001). Tabelle 1 zeigt die daraus abgeleiteten, am Wassermmodell einzustellenden Volumenströme. Da der Hazelett-Caster aus Verteiler, Gießschnauze und Kokille besteht, wurde der Einfluss jeder Kennzahl auf jedes Bauteil untersucht. Im Verteiler spielt die Re-Zahl eine maßgebliche Rolle, da sie das dynamische Strömungs- und Turbulenzverhalten beschreibt. Die Fr-Zahl spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. In der Gießschnauze sind die Fr- und We-Zahlen zu berücksichtigen, da diese die Strömung an der Phasengrenze (Oberflächenwellen, Strömungsablösung, Einschnürung der Schmelze an den Seiten der Gießlippe) beschreiben. In der Kokille werden großräumige Wirbel durch die Re-Zahl und Oberflächenwellen durch die Fr-Zahl beschrieben. Nicht-isotherme Effekte, wie z. B. freie Konvektion, können im physikalischen Modell nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Volumenströme im Wassermmodell (Maßstab 1:1) unter Berücksichtigung der Ähnlichkeit

$u_G$ in m/min	$\dot{V}_{Cu}$ in l/s	$\dot{V}_W$ in l/s	Ähnlichkeit
2.6	1.94	1.32	We-Ähnlichkeit
		1.94	Fr-Ähnlichkeit
		3.75	Re-Ähnlichkeit

Für die Geschwindigkeitsmessungen im Wassermmodell wurde eine Dantec-DPIV-Anlage verwendet, vgl. Odenthal et al. (2001). Als Tracer wurden Polyamidpartikel (Vestosint 1121) mit  $d_p = 100 \mu\text{m}$  und  $\rho_p = 1.016 \text{ g/cm}^3$  eingesetzt. Für die CFD-Simulationen wurde ein kommerzielles CFD-Programm verwendet.

## Ergebnisse

Primäres Ziel der Untersuchungen war es, die kinetische Energie des Fluids beim Eintritt in den Kokillenpool so klein wie möglich zu halten, um den Einzug von Gasblasen zu minimieren. Wichtige Einflussgrößen sind hierbei der Neigungswinkel der Gießlippe  $\alpha_2$ , die Länge der Gießlippe  $L_2$ , die Fallhöhe  $H_S$  zwischen Gießlippe und Unterband sowie der Neigungswinkel  $\gamma$  des Hazelett-Casters bzw. der Kokille. Anhand von CFD-Simulationen wurde zunächst der Einfluss dieser Parameter auf die Strömungsform des Gerinnes in der Kokille und die Strömungsstruktur im Kokillenpool untersucht. Da die Strömung auf der Gießlippe und in der Kokille infolge von  $B_{S2}/H_M = 36$  als eben betrachtet werden konnte, wurden instationäre, zweidimensionale und zweiphasige CFD-Simulationen für Wasser mit dem Volume of Fluid (VoF) Modell durchgeführt und die Größen  $\alpha_2$ ,  $L_2$ ,  $H_S$  und  $\gamma$  systematisch verändert. Zur Interpretation der CFD-Resultate wurden anschließend die Zielgrößen ① bis ⑦ eingeführt, vgl.



dass die Verwirbelungen durch den Damm auf den Verteilereinlauf begrenzt werden und das Wasser ruhig aus dem Verteiler in die Gießschnauze fließt.

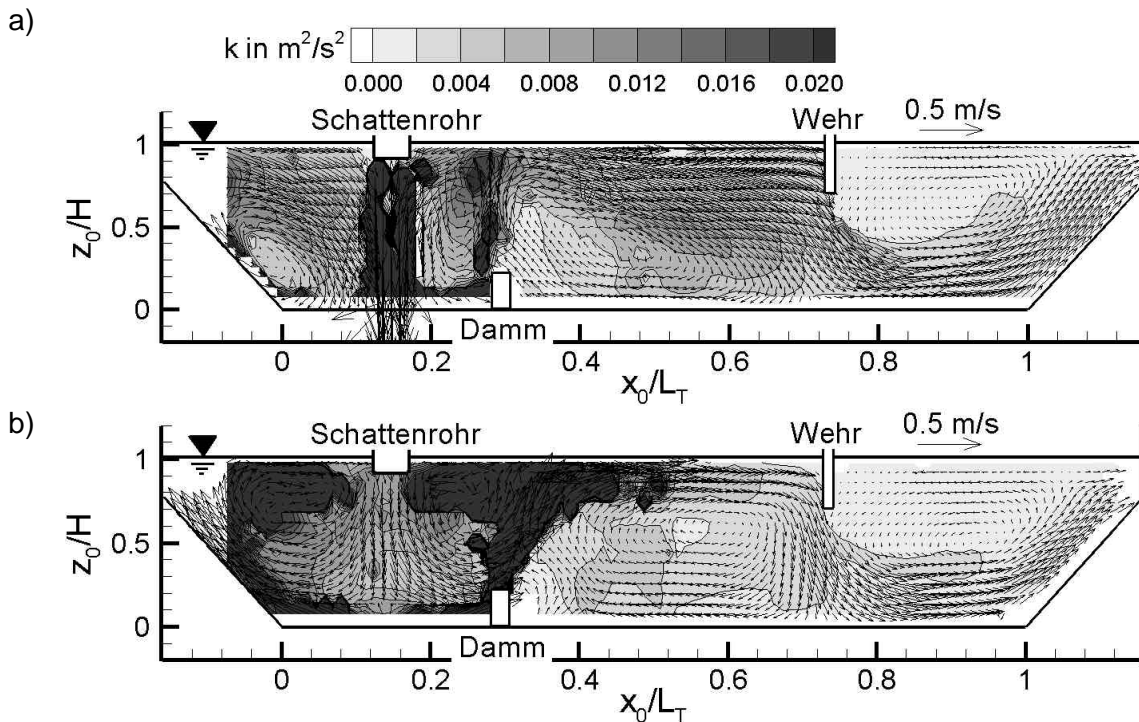


Abb. 5: 2d-DPIV-Geschwindigkeits- und Turbulenzmessung im Verteiler,  $u_G = 2.6 \text{ m/min}$ ,  $\dot{V}_W = 3.75 \text{ l/s}$  (Re-Ähnlichkeit), a)  $y/B_T = 0$ , b)  $y/B_T = -0.5$

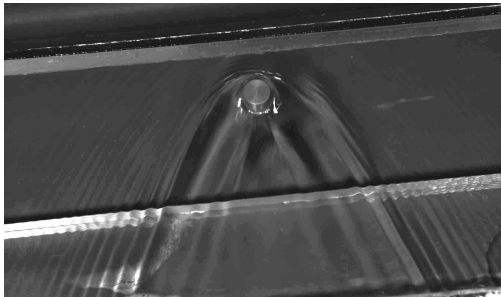
### Strömung in der Gießschnauze

Die Strömung in der Gießschnauze ist ein offenes Gerinne. Dieses ist Folge eines Gefälles und wird durch die Erdbeschleunigung und Reibungskräfte beeinflusst. Unabhängig davon, ob es laminar oder turbulent ist, unterscheidet man zwischen strömender und schießender Bewegung. Bei der strömenden Bewegung wird der gleiche Volumenstrom bei kleiner Fließgeschwindigkeit und großer Gerinnhöhe, bei der schießenden Bewegung bei großer Fließgeschwindigkeit und kleiner Gerinnhöhe erfolgen, vgl. Truckenbrodt (2001). Die für die Abflussart maßgebende Kennzahl ist die Fr-Zahl. Gedeutet wird sie als Verhältnis der lokalen Fließgeschwindigkeit  $u$  zur Ausbreitungsgeschwindigkeit  $u_0 = \sqrt{gh_f}$  der Grundwelle. Bei  $Fr > 1$  bzw.  $u > u_0$  breitet sich eine Störung (Welle) nur stromab aus. Bei  $Fr < 1$  bzw.  $u < u_0$  kann sich eine Störung auch stromauf zur Störstelle ausbreiten. In Abhängigkeit von der Wandrauigkeit und des Gefälles können in jedem Querschnitt beide Abflussarten auftreten. Die Gerinnhöhe strebt stets gegen eine Normhöhe, die vom Gefälle, der Querschnittsform und der Wandrauigkeit abhängt, Truckenbrodt (2001).

Abb. 6 zeigt die Strömung auf der Gießlippe des Wassermodells. Die quer durch das Bild laufende Acrylglasskante ist der Einlauf der unter der Gießlippe befindlichen Kokille. In Abb. 6a ist stromab des Überganges zwischen Diffusor und Gießlippe ein Störkörper in die Gießlippe gesetzt worden. Die sich stromauf ausbreitenden, wellenförmigen Störungen der strömenden Bewegung ( $Fr < 1$ ) sind gut zu erkennen. Verschiebt man den Störkörper stromab, bildet sich eine schießende Bewegung ( $Fr > 1$ ), Abb. 6b. Die kinetische Energie des ablaufenden Wassers vor dem Verlassen der Gießlippe ist so hoch, dass sich Störungen nur noch stromab ausbilden können. Während der Übergang vom strömenden zum schießenden Verhalten stetig ist, erfolgt der Übergang von schießend zu strömend, d. h. von kleinerer zu größerer Gerinnhöhe, immer über einen Wassersprung (*hydraulic jump*). Dieser tritt auf,

wenn die Strömungsbedingungen stromauf und -ab eines lokalen Gebietes nur durch eine diskontinuierliche Anpassung in Einklang zu bringen sind. Wassersprünge sind durch eine hohe Energiedissipation gekennzeichnet. Im vorliegenden Fall tritt ein Wassersprung beim Eintritt des Gießstrahls aus der Gießlippe in den Kokillenpool auf.

a)  $Fr < 1$  (strömende Bewegung)



b)  $Fr > 1$  (schießende Bewegung)

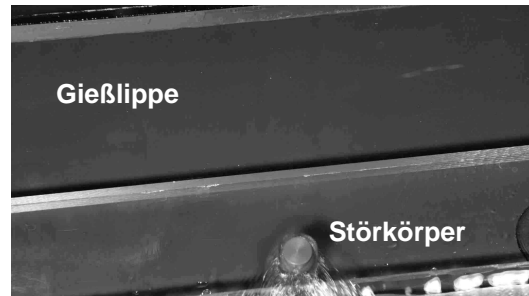


Abb. 6: Strömung auf der Gießlippe des Wassermodells,  $u_G = 2.6$  m/min,  $\dot{V} = 1.94$  l/s (Fr-Ähnlichkeit)

Bei bekannter Gerinnehöhe  $h_{1,1}$  am Diffusoreintritt lässt sich die mittlere Durchströmgeschwindigkeit  $u$  im Diffusor ermitteln. Hier spielen zwei gegenläufige Effekte eine Rolle. Einerseits wird das Wasser im divergenten Diffusor mit dem Öffnungswinkel  $\beta_1$  verzögert. Andererseits wird es durch die Neigung des Diffusors um  $\alpha_1$  beschleunigt. Unter der Annahme, dass der Wasserspiegel im Verteiler und in der Gießschnauze horizontal ist, kann die Geschwindigkeit  $u$  im Diffusor mittels der Größen aus Abb. 3 ermittelt werden. Man erhält

$$u(x_1) = \left( B_{s0} + \frac{2x_1 \tan(\beta_1 / 2)}{\cos \alpha_1} \right) \frac{(h_{1,1} + x_1 \tan \alpha_1)}{\dot{V}_w} \quad (2)$$

Die Position  $x_{1,\min}$ , an der  $u$  minimal ist, sollte möglichst nahe am Eintritt der Gießlippe liegen. Aus einer geometrischen Betrachtung gemäß Abb. 3 erhält man

$$x_{1,\min} = \frac{-h_{1,1}}{2 \tan \alpha_1} - \frac{B_{s0} \cos \alpha_1}{4 \tan(\beta_1 / 2)} \quad (3)$$

Gl. (2) und Gl. (3) besagen, dass die Diffusorströmung für  $\dot{V}_w = 1.94$  l/s von  $u = 0.12$  m/s bei  $x_1/L_1 = 0$  bis auf  $u = 0.08$  m/s bei  $x_1/L_1 = 0.5$  verzögert und anschließend wieder bis auf  $u = 0.13$  m/s bei  $x_1/L_1 = 1$  beschleunigt wird. Für alle Volumenströme liegt das Minimum von  $u$  in etwa bei der halben Diffusorlänge. Dieses Verhalten wird durch DPIV-Messungen im Diffusor generell bestätigt. Abb. 7 zeigt die Diffusorströmung für die Fr- und Re-Ähnlichkeit. Die Absolutgeschwindigkeit ist als Graustufenverteilung gekennzeichnet. Da DPIV-Messungen durch die freie Oberfläche nicht möglich waren, wurden sie von unten durch die transparente Gießschnauze vorgenommen. Die Geschwindigkeiten entsprechen mit guter Näherung den theoretischen Werten nach Gl. (2). Entlang der Symmetrieachse nimmt die Geschwindigkeit zunächst bis  $x_1/L_1 = 0.5$  ab und steigt bis zur Gießlippe bis auf den Maximalwert an. Trotz des großen Diffusor-Öffnungswinkels von  $\beta_1 = 75^\circ$  treten keine Ablösungserscheinungen auf. Allerdings liegen die Absolutgeschwindigkeiten im Randbereich um ca. 40 % unter dem Maximum. Das Wasser wird also nicht gleichmäßig auf die Gießlippe verteilt. Abhilfe kann eine radiale Schnauze (*radial snout*) schaffen, bei der die Gießlippe bogenförmig ausgebildet ist. Die DPIV-Messungen zeigen ferner eine erhöhte Turbulenz im Eintritt des Diffusors, die bis zur Gießlippe fast vollständig abgebaut wird.

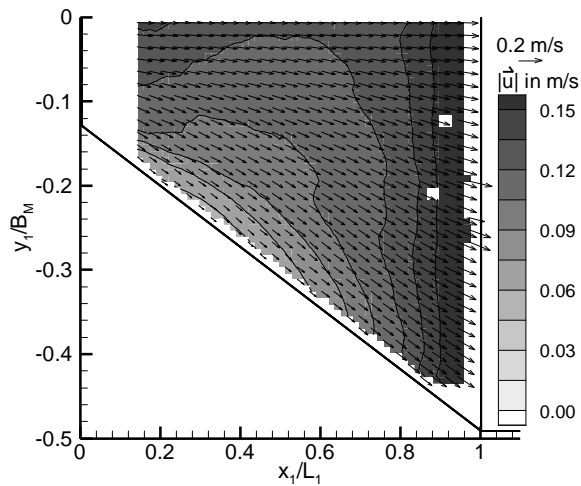
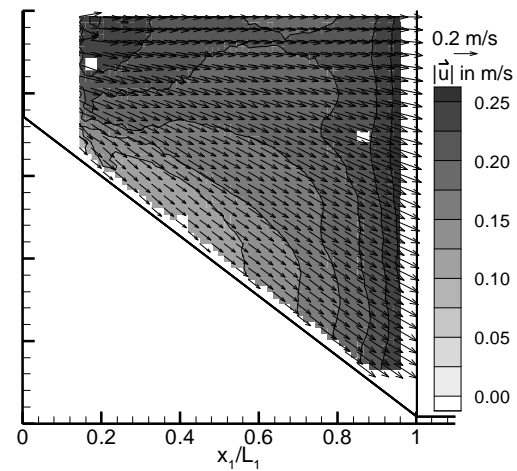
a) Fr-Ähnlichkeit,  $\dot{V}_W = 1.94 \text{ l/s}$ b) Re-Ähnlichkeit,  $\dot{V}_W = 3.75 \text{ l/s}$ 

Abb. 7: 2d-DPIV-Geschwindigkeitsmessung im Diffusor bei  $u_G = 2.6 \text{ m/min}$ , Lage des Lichtschnittes bei  $z_1 = 64 \text{ mm}$ ,  $\alpha_1 = -3.5^\circ$ ,  $\beta_1 = 75^\circ$ ,  $\alpha_2 = 9^\circ$ ,  $\beta_2 = 0^\circ$

Die Geschwindigkeit auf der um  $\alpha_2 = 9^\circ$  geneigten Gießlippe ist deutlich höher als im Diffusor. DPIV-Messungen auf der Gießlippe waren wegen der kleinen Gerinnhöhe nicht möglich. Daher wurden die Gerinnhöhen  $h_{1,2}$  und  $h_{2,1}$  auf der Gießlippe mit einer speziellen Messvorrichtung als Funktion des Volumenstromes gemessen. Hierbei bezeichnet der erste Index das aktuelle Koordinatensystem, der zweite Index die jeweilige Messposition, vgl. Abb. 3. Man erhält folgenden Zusammenhang

$$h_{1,2[\text{mm}]} = 3.81 \dot{V}_W^{0.641} \quad \text{bzw.} \quad h_{2,1[\text{mm}]} = 1.47 \dot{V}_W^{0.646} \quad , \quad (4a, b)$$

$$u_{1,2[\text{m/s}]} = 0.21 \dot{V}_W^{0.359} \quad \text{bzw.} \quad u_{2,1[\text{m/s}]} = 0.54 \dot{V}_W^{0.354} \quad . \quad (5a, b)$$

Die Untersuchungen zeigen, dass die mittlere Gerinnhöhe  $h_{2,1}$  am Austritt der Gießlippe immer über der Normhöhe liegt, d. h. das Wasser wird bis zum Austritt aus der Gießlippe kontinuierlich beschleunigt ( $Fr > 1$ ), vgl. Caron (2001). Dies ist nicht erwünscht, da die kinetische Energie am Austritt der Gießlippe möglichst klein sein sollte. Ansatzpunkte zur Optimierung des Hazelett-Casters sind die Reduzierung der Gießlippenlänge  $L_2$  oder des Neigungswinkels  $\alpha_2$ . Die experimentell ermittelten Gerinnhöhen stimmen gut mit den numerisch berechneten Resultaten überein, vgl. Pfeifer et al. (2001).

### Strömung in der Kokille

Nach dem Austritt aus der Gießlippe fließt die Schmelze als offenes Gerinne in den Kokillenspool. Die kinetische Energie muss beim Eintritt in den Pool klein sein, um den Einzug von Gasblasen zu minimieren. Für das Wassermodell erhält man zwischen der Gerinnhöhe  $h_{2,2}$  bzw. der Geschwindigkeit  $u_{2,2}$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}_W$  den experimentell ermittelten Zusammenhang

$$h_{2,2[\text{mm}]} = 1.58 \dot{V}_W^{0.548} \quad , \quad (6)$$

$$u_{2,2[\text{m/s}]} = 0.493 \dot{V}_W^{0.452} \quad . \quad (7)$$

Auch hier liegt die Gerinnhöhe  $h_{2,2}$  stets über der Normhöhe, d. h. die Bewegung ist schießend. Aus diesem Grund sollte der Abstand  $L_3$  zwischen Gießlippe und Badspiegel möglichst



klein sein, um eine weitere Beschleunigung zu verhindern. Beim Eintritt des Gerinnes in den Kokillenpool bildet sich ein Wassersprung, über den Luftblasen eingezogen werden. Die Resultate der DPIV-Messungen in Abb. 8 mit einem zur Kokille parallelen Lichtschnitt in der  $x_2y_2$ -Ebene belegen den deutlichen Einfluss des Gießstrahls auf die Poolströmung. In Abb. 8a ist zu sehen, dass nahe der Kokillen-Schmalseite ein Wirbel entsteht, dessen Größe und Lage von der Gießleistung abhängen. Das Wirbelzentrum liegt bei  $x_2/L_M = 0.14$  und  $y_2/B_M = -0.45$ . An der Kokillen-Schmalseite bildet sich bei  $x_2/L_M = 0.21$  und  $y_2/B_M = -0.50$  ein Staupunkt. Ein Teil des Wassers fließt an der Kokillen-Schmalseite zurück in Richtung Gießlippe. Mit sinkender Gießleistung schnürt der Gießstrahl stärker ein. Der Kokillenwirbel vergrößert sich und sowohl Wirbelzentrum als auch Staupunkt an der Kokillen-Schmalseite wandern stromab. Zwei gegenläufige, die Bandqualität beeinflussende Effekte, spielen hier eine Rolle. Mit abnehmender Gießleistung wird die Geschwindigkeitsverteilung über die Kokillenbreite zwar gleichmäßiger, jedoch vergrößert sich dann auch der Kokillenwirbel.

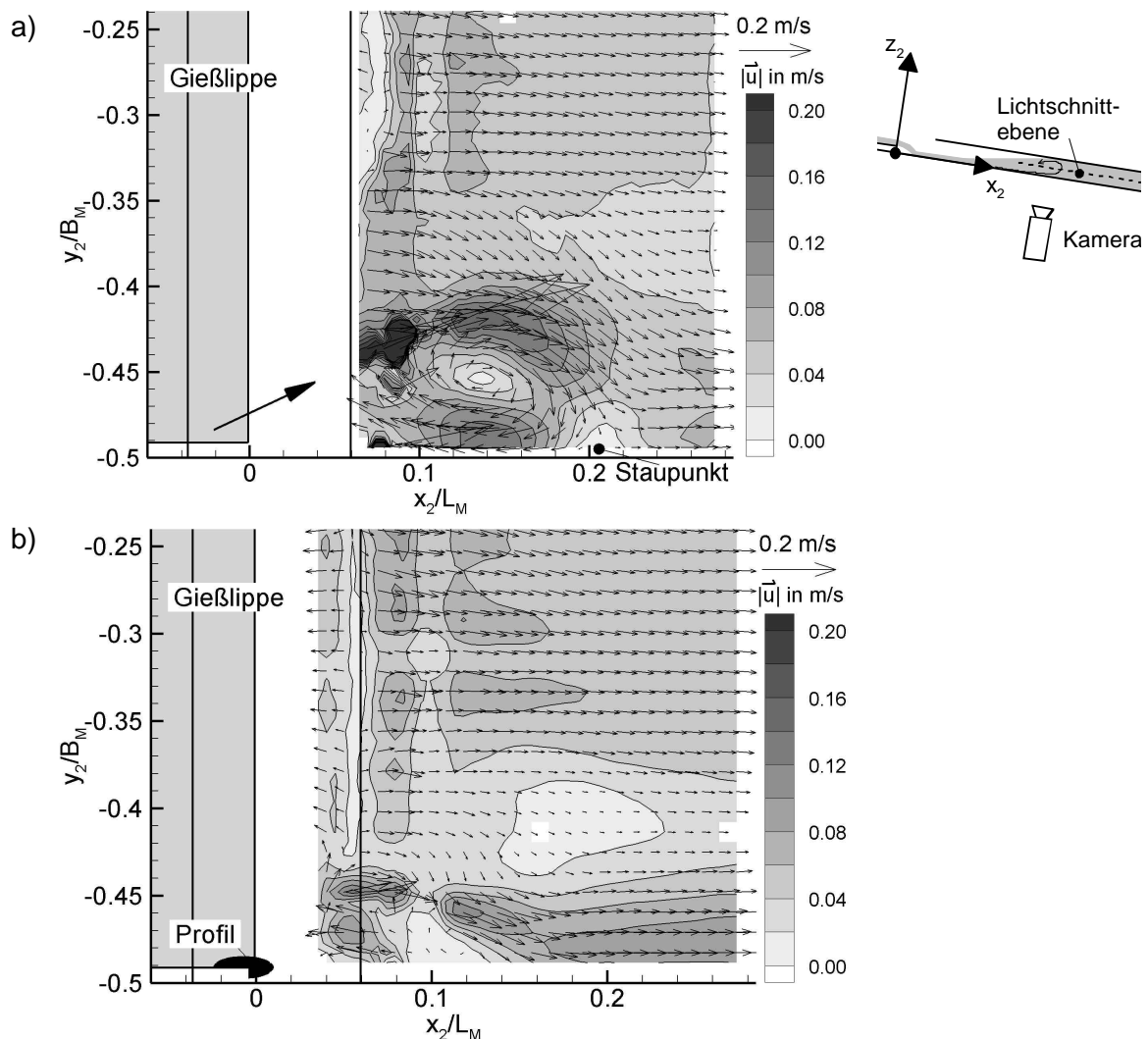


Abb. 8: 2d-DPIV-Geschwindigkeitsmessung in der Wassermodell-Kokille, Lichtschnitt bei  $z_2/B_M = 0.29$ ,  $u_G = 2.6$  m/min,  $\dot{V}_W = 1.94$  l/s (Fr-Ähnlichkeit), a) ohne und b) mit optimierter Gießlippe

Die Einschnürung des Gießstrahls kann durch Ausnutzung des Coanda-Effektes reduziert werden. Der Coanda-Effekt beschreibt die Eigenschaft eines Fluidstrahls, sich an benachbarte, feste Wände anzulegen, diesen entlang zu folgen und seine ursprüngliche Ausbreitungsrichtung zu ändern. Im vorliegenden Fall wurden an den Seitenwänden der Gießlippe

speziell geformte, tragflügelähnliche Konturen angebracht, die so gewölbt sind, dass die Strömung der Kontur vor der Ablösung möglichst lange folgt. Damit wird die Einschnürung des Gießstrahls teilweise kompensiert. Abb. 8b zeigt, dass der Coanda-Effekt die Wirbelbildung im Kokillenpool verringert und gegenüber Abb. 8a für eine homogenere Geschwindigkeitsverteilung im Kokillenpool sorgt. Betriebsversuche mit modifizierten Gießschnauzen bei der MKM GmbH bestätigten die prinzipielle Wirksamkeit dieser Methode, Meseha (2001).

## **Zusammenfassung**

Beim Bandgießen von Kupfer mit einem Hazelett-Caster, bestehend aus Verteiler, offener Gießschnauze und mitlaufender Kokille, können strömungsinduzierte Fehler im Kupferband auftreten. Diese sind auf die ungleichmäßige Aufteilung der Schmelze über die Kokillenbreite, den Einzug von Gasblasen und die Einschnürung des Gießstrahls zurückzuführen. Die Untersuchungen an einem Wassermodell im Maßstab 1:1 zeigen, dass Gerinnhöhe und Abflussgeschwindigkeit in der Gießschnauze und Kokille oberhalb der Normhöhe liegen, d. h. die Strömung wird beschleunigt und ist überkritisch. Zur Reduzierung der Abflussgeschwindigkeit und der damit verbundenen Blasenbildung in der Kokille wurden die Fallhöhe zwischen Gießschnauze und Kokille sowie der Neigungswinkel der Kokille verkleinert. Beim Auslauf aus der Gießschnauze schnürt sich das Fluid seitlich ein. Dadurch werden großräumige Wirbel in der Kokille induziert, die im realen Betrieb zu typischen Strömungsmustern im Kupferband führen. Um dies zu vermeiden, wurden spezielle Coanda-Vorrichtungen am Austritt der Gießschnauze angebracht, wodurch die Wirbelbildung in der Kokille verkleinert wird. Die Wirksamkeit der Coanda-Vorrichtungen konnte im Gießversuch nachgewiesen werden.

## **Dankesworte**

Die Autoren danken der MKM GmbH, Hettstedt, für die finanzielle Unterstützung der durchgeführten Arbeiten.

## **Literatur**

- Bebber, H., Phillips, G., 1998: "Das MKM-Contistrip-Ofenkonzept", Interner Bericht.
- Brandes, E.A., Brook, G.B., 1992: "Smithells metals reference book", 7<sup>th</sup> edition, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.
- Caron, E., 2001: "Physikalische Strömungssimulation mittels Particle Image Velocimetry (PIV) für das Vorbandgießen von Kupfer mit einem Hazelett-Caster", Studienarbeit, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, RWTH Aachen.
- Meseha, J., 2001: Interne Mitteilung, Mansfelder Kupfer und Messing GmbH, Hettstedt.
- N.N., 2001: Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie - Metall: Heft 1-2, Giesel Verlag GmbH.
- N.N., 2001: "Lamitref Industries - Ein Jahrtausend Erfahrung, ein Jahrtausend Zukunft", Firmenprospekt.
- Odenthal, H.-J., Bölling, R., Pfeifer, H., 2001: "Analyse dynamischer Strömungsphänomene im Stranggießverteiler mit Turbostopper mittels LDA-, PIV- und CFD-Methoden", 9. GALA Fachtagung, Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik, Winterthur (CH), 18.-20.09.2001, S. 40.1-8.
- Odenthal, H.-J., 2004: "Physikalische und numerische Strömungssimulation kontinuierlicher Gießprozesse der Hochtemperaturtechnik", eingereichte Habilitationsschrift, Fachbereich Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften RWTH Aachen.
- Pfeifer, H., Odenthal, H.-J., Bölling, R., Caron, E., 2001: "Physikalische und numerische Strömungssimulation des Vorbandgießens von Kupfer mit einem Hazelett-Caster", Forschungsbericht, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, RWTH Aachen.
- Truckenbrodt, E., 2001: "Fluidmechanik", 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.