

# Horizontales Stranggießen von CuZn37 – Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Beeinflussung der Wärmeabfuhr aus der Kokille

Nerl, C.; Riedel, S.; Wimmer, M. (1)

**Aufgrund intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben die heute eingesetzten horizontalen Stranggießverfahren ein hohes technologisches Niveau erreicht. Dennoch besteht gerade im Hinblick auf die erzielbare Homogenität des Gussgefüges weiterhin Optimierungspotential. Im vorliegenden Beitrag werden aktuelle Forschungsergebnisse präsentiert und Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeabfuhrbedingungen aus dem Urformwerkzeug diskutiert.**

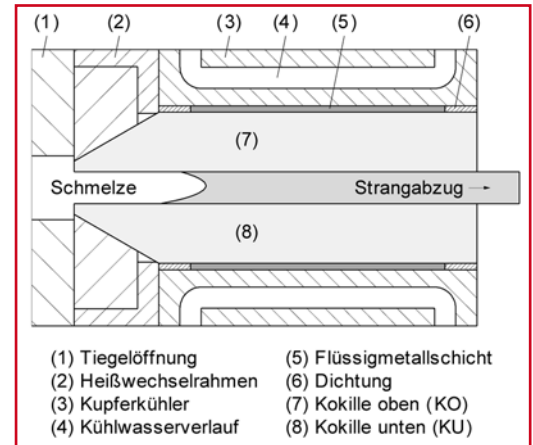
Das horizontale Stranggießen hat insbesondere zur Herstellung von endabmessungsnahen metallischen Halbzeugen weltweit einen hohen Stellenwert erlangt. Die Vorteile dieser Gießverfahren liegen vor allem in der geringen Bauhöhe und einfachen Wartung der Anlagen, den geringen Investitionskosten sowie in der Tatsache, dass selbst kleine Chargen wirtschaftlich produziert werden können [1]. Als gravierender Nachteil sind jedoch die während des Gießprozesses ungleichen Abkühlungsbedingungen zu nennen. Unter dem Einfluss der Schwerkraft liegen an der Strangunterseite bessere Wärmeübergangsbedingungen zur Kokille vor als an der Oberseite des Strangs, wodurch das Gussprodukt ein über dem Querschnitt unsymmetrisches Gefüge aufweist. Die thermische Mitte als Ort der letzten Erstarrung ist deutlich außermittig nach oben verschoben, was bei nachfolgenden umformenden Fertigungsschritten wie dem Strangpressen zu Problemen führen kann.

Üblicherweise kommen beim Vergießen von Kupferwerkstoffen Grafitkokillen zum Einsatz, die von wasserdurchströmten Kühlkörpern umgeben sind. Bei der Verwendung eines konventionellen Kokillen-Kühler-Aufbaus tritt insbesondere bei der Herstellung von flachen Bandformaten das Phänomen des Kokillenatmens auf,

das während des Gießprozesses zu unerwünschten instationären Wärmeübergangsbedingungen zwischen der Grafitkokille und dem Kühlkörper führt.

## Aufgabenstellung und Lösungsansatz

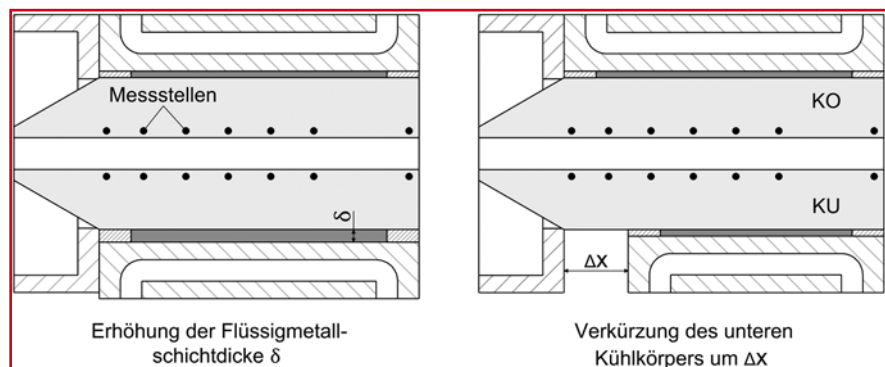
Mit dem Ziel, die Problematik des Kokillenatmens zu eliminieren, wurde in [2] das Potenzial einer bereits bei Raumtemperatur flüssigen Ga-In-Sn-Legierung als Wärmekopplung zwischen Kokille und Kühler am Beispiel eines Bandformates (Querschnitt: 150 x 15 mm<sup>2</sup>) untersucht. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau des entsprechenden Urformwerkzeugs, das durch eine jeweils 3 mm dicke Flüssigmetallschicht als Wärmeübertragungsmedium zwischen den Grafitplatten und den Kupferkühlkörpern gekennzeichnet ist. Die Kokillen-Kühler-



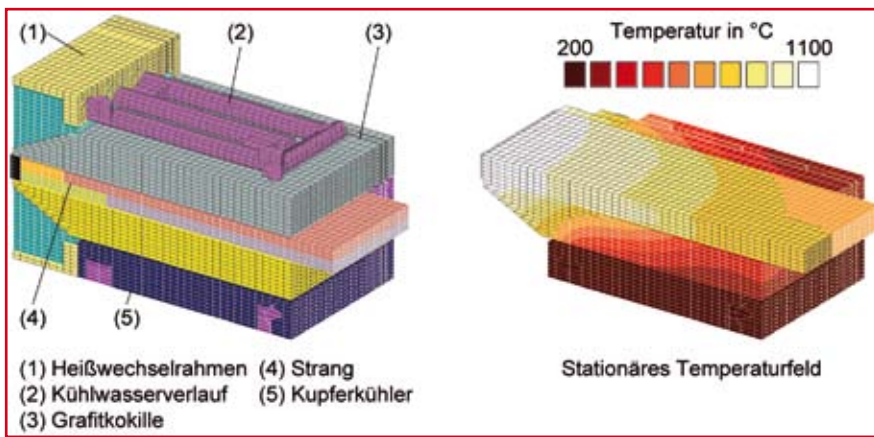
**Bild 1: Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetall als Wärmeübertragungsmedium (nach [2])**

Einheit ist in ofenabhängiger Anordnung über einen Heißwechselrahmen mit dem Schmelztiegel verspannt.

Durch den Einsatz des Flüssigmetalls konnte am Beispiel einer Bronzelegierung im Vergleich zu einem konventionellen geklemmten Aufbau die Problematik des Kokillenatmens umgangen und die maximal erreichbare Gießgeschwindigkeit erheblich gesteigert werden. Hinsichtlich der Homogenität des Gussgefüges und der Lage der thermischen Mitte besteht aber weiterhin Optimierungspotential. Die in diesem Beitrag beschriebene Vorgehensweise zielt darauf ab, den vorhandenen Kokillen-Kühler-Aufbau mit Flüssigmetall als Wärmeübertragungsmedium (Referenzaufbau) mit Hilfe von konstruktiven Veränderungen an den Kühlzonen derart weiterzuentwickeln, dass die Kühlwirkung an der Unterseite des Strangs bewusst herabgesetzt wird. Dadurch sollen am Beispiel der Legierung CuZn37 die zuvor beschriebenen verfahrenstypischen Nachteile des horizontalen Stranggießens behoben und die Entstehung eines über dem Bandquerschnitt homogenen Gussgefüges ermöglicht werden. Folgende Ansätze waren Gegenstand der Untersuchungen:



**Bild 2: Schematische Darstellung konstruktiver Veränderungen am Urformwerkzeug**



**Bild 3: Vernetzte Geometrie der Kokillen-Kühler-Anordnung (links) sowie Ergebnis der FE-Simulation (rechts)**

- Verminderung der Wärmeabfuhr durch Erhöhung der Dicke  $\delta$  der unteren Flüssigmetallschicht
  - Verzögerung des Erstarrungsbeginns an der unteren Kokillenplatte durch Verkürzung des Kühlers um die Länge  $\Delta x$
- Die konstruktiven Umsetzungen dieser Maßnahmen sind in Bild 2 verdeutlicht. Oberflächennahe Temperaturmessstellen in der Mitte der Kokillenplatten erlauben die Erfassung der thermischen Verhältnisse während des Gießprozesses. Die Messwerte dienten zudem als Referenz für den Abgleich mit Simulationsergebnissen.

### Numerische Untersuchungen

Um den Einfluss der beschriebenen konstruktiven Maßnahmen auf die thermischen Verhältnisse beziehungsweise auf die Erstarrungsbedingungen im Urformwerkzeug abschätzen zu können, wurden vorab systematische Variationsrechnungen mit Hilfe der Gießprozesssimulation durchgeführt. Für die Berechnungen kam die Simulationssoftware WinCast® zum Einsatz, die die Berechnung des Stranggießprozesses auf Basis der Finite-Elemente-Methode erlaubt. Die Berechnungen erfolgten rein thermisch, ohne Berücksichtigung von Strömungsphänomenen, die Strangabzugsbewegung wurde durch eine Verschiebung des Temperaturfeldes innerhalb des Stranges in Gießrichtung bei jedem Zeitschritt modelliert. Die Software bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Strangabzugsgeschwindigkeiten und -bewegungen entsprechend der realen Gießbedingungen zu berücksichtigen, wobei im vorliegenden Fall eine Go-Stop-Back-Bewegung modelliert wurde. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus wurde lediglich die Hälfte der Kokillen-

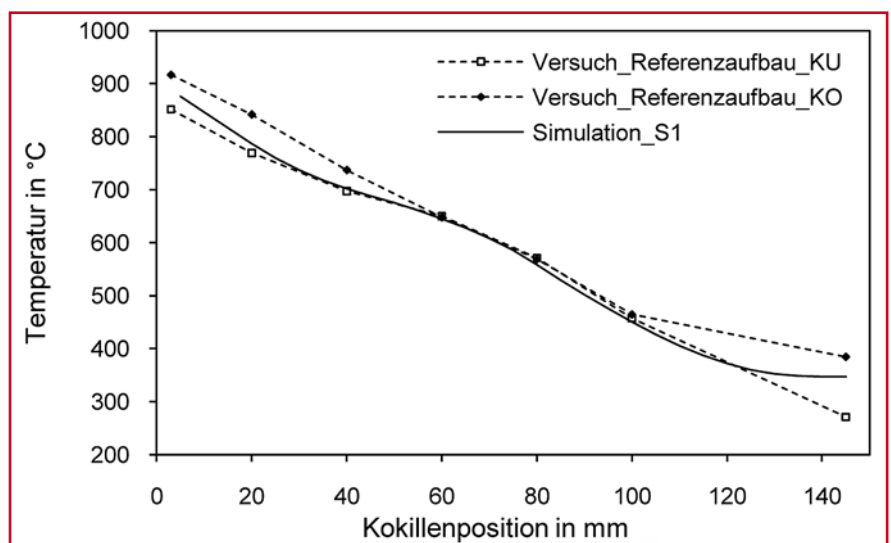
Kühler-Einheit geometrisch modelliert, wobei an der Symmetrieebene, die dem Längsschnitt durch die Kokille entspricht, eine adiabatische Randbedingung vorlag. Die Wärmeübertragungsverhältnisse zwischen den einzelnen Stoffgruppen wurden im Simulationsmodell durch Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) definiert. Maßgeblich hierbei sind die Wärmeübergangsbedingungen zwischen Strang und Kokille, die in Form eines temperaturabhängigen Koeffizienten definiert wurden, um das Phänomen des Strangabhebens infolge der Erstarrungs- und Festkörperkontraktion berücksichtigen zu können. Im Rahmen dieser Simulationsstudie wurde vereinfachend von identischen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Grafitkokillenplatten und der Strangober- bzw. -unterseite ausgegangen. Die in der realen Versuchsanordnung verwendete Flüssigmetallschicht wurde nicht geometrisch modelliert, sondern mittels

eines konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten berücksichtigt, der im Kontaktbereich zwischen Kokille und Kühler wirksam ist. Auch für die übrigen Wärmeübergangskoeffizienten wurden konstante Werte definiert. Die für die Berechnungen benötigten thermophysikalischen Daten des Gusswerkstoffes CuZn37 lagen als temperaturabhängige Werte vor, die Temperatur der Schmelze am Kokilleneintritt betrug bei allen Berechnungen konstant 1.080 °C.

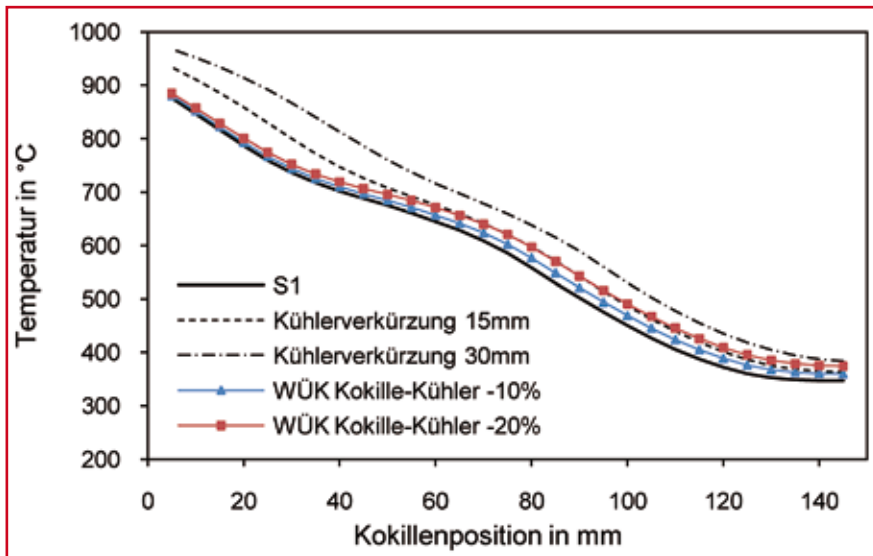
Ausgehend von diesen Anfangs- und Randbedingungen erfolgte die Temperaturfeldberechnung bis zum Erreichen des stationären Zustandes. Bild 3 veranschaulicht die vernetzte Geometrie sowie ein stationäres Temperaturfeld als exemplarisches Simulationsergebnis.

Um die Validität des Simulationsmodells zu gewährleisten, wurden die Wärmeübergangskoeffizienten iterativ angepasst, so dass die an den Vergleichspositionen (siehe Bild 2) berechneten stationären Temperaturwerte die im Referenzaufbau mit Flüssigmetall gemessenen Verhältnisse hinreichend genau abbildeten. Als Ergebnis sind in Bild 4 die berechneten stationären Temperaturen in der unteren Kokillenplatte den entsprechenden Messwerten für beide Kokillenplatten gegenübergestellt. Die über der Kokillenlänge aufgetragenen Messwerte entsprechen den zeitlich gemittelten Werten, die während des stationären Gießbetriebs aufgezeichnet wurden.

Dieses validierte Simulationsmodell (S1) war Ausgangsbasis für die Variationsrechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen der zuvor beschriebenen konstruktiven Veränderungen auf die thermischen



**Bild 4: Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen stationären Kokillentemperaturwerten**



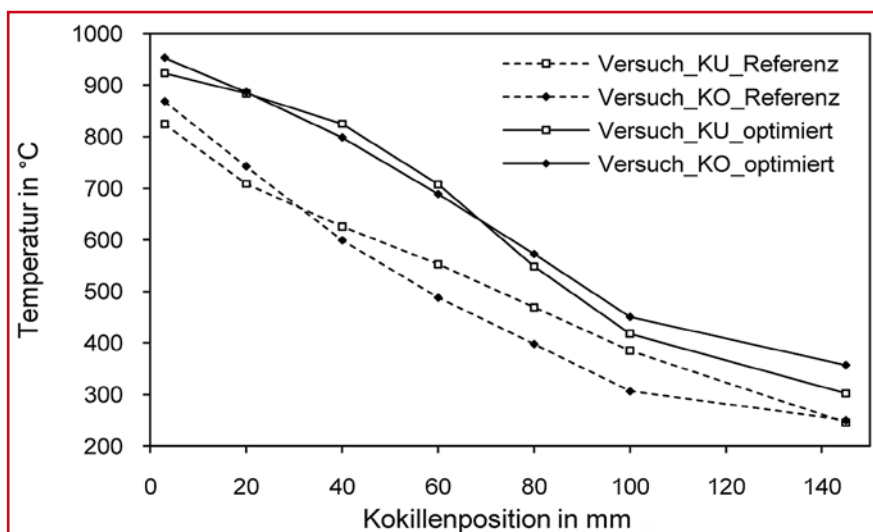
**Bild 5: Berechnete Temperaturverläufe in der unteren Kokille bei Variation verschiedener Parameter**

Verhältnisse im Urformwerkzeug. Während die Verkürzung der unteren Kühlerplatte im Simulationsmodell geometrisch nachgebildet wurde, wurde die Erhöhung der Dicke der unteren Flüssigmetallschicht durch eine Verminderung des Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen Kokille und Kühler um 10 bzw. 20 % im Vergleich zum Referenzsimulationsmodell S1 modelliert. Die in Bild 5 dargestellten Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass die Veränderung der Flüssigmetallschichtdicke nur geringfügig Einfluss auf den Temperaturverlauf im mittleren Bereich der unteren Kokillenplatte nimmt. Demgegenüber führt eine verspätet einsetzende Kühlwirkung zu einem deutlichen Anstieg der Kokillentemperaturen im Einlaufbereich. Folglich empfiehlt sich die Verkürzung

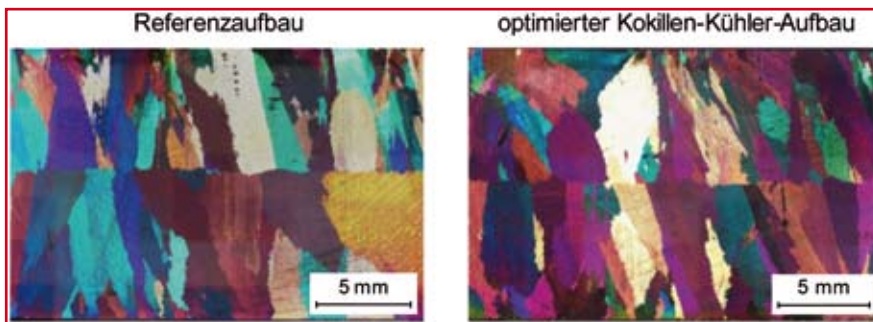
des unteren Kühlers als geeignetes Mittel zur Beeinflussung der Keimbildungs- und -wachstumsbedingungen an der Strangunterseite. Die Möglichkeiten zur Einflussnahme auf den Erstarrungsverlauf durch eine Veränderung der Flüssigmetallschichtdicke erscheinen begrenzt.

**Experimentelle Untersuchungen**

Die mittels der Gießprozesssimulation gewonnenen Erkenntnisse stellten die Ausgangsbasis für anschließende experimentelle Untersuchungen dar. Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen wurden sowohl der Einfluss einer erhöhten Flüssigmetallschichtdicke als auch einer Verkürzung des unteren Kühlers auf den thermischen Haushalt der Kokille



**Bild 6: Vergleich der Temperaturverläufe im Referenzaufbau und im optimierten Kokillen-Kühler-Aufbau**



**Bild 7: Vergleich makroskopischer Gefügestrukturen im Längsschliff**

und das entstehende Gussgefüge betrachtet. Insgesamt bestätigen die Versuchsergebnisse die Beobachtungen aus den Simulationsrechnungen.

Im Vergleich zum Referenzaufbau führte die Erhöhung der Flüssigmetallschichtdicke an der Kokillenunterseite von 3 auf 6 mm zu größeren Kornstrukturen in der unteren Stranghälfte. Die Lage der thermischen Mitte konnte hingegen nicht beeinflusst werden. Die Ergebnisse der Gießversuche, die im Vergleich zum Referenzaufbau mit einem um  $\Delta x = 40$  mm verkürzten Kühler an der Unterseite der Kokille durchgeführt wurden, verdeutlichen, dass die verspätet einsetzende Kühlwirkung einen deutlichen Anstieg des Temperaturniveaus im Einlaufbereich der unteren Kokillenplatte hervorruft. Die lichtmikroskopische Untersuchung von Schliffproben zeigte, dass die thermische Mitte des Strangs auf diese Weise in die geometrische Mitte verschoben werden kann. Jedoch wies das Gussgefüge in der unteren Stranghälfte eine gröbere Struktur als im oberen Strangbereich auf [3, 4]. Als Schlussfolgerung aus diesen Erkenntnissen wurde schließlich ein optimierter Versuchsaufbau realisiert, der eine Verkürzung des unteren Kühlkörpers mit einer Erhöhung der Flüssigmetallschichtdicke an der oberen Kokillenplatte kombiniert. Bild 6 zeigt die gemessenen stationä-

ren Kokillentemperaturen des optimierten Aufbaus im Vergleich zum Referenzaufbau bei identischer Gießgeschwindigkeit.

Im Falle des optimierten Aufbaus lassen sich hinsichtlich des Temperaturverlaufs nur geringe Abweichungen zwischen der oberen und unteren Kokillenplatte erkennen. Zudem erreichen die Kokillentemperaturen aufgrund der im Vergleich zum Referenzaufbau verschlechterten Wärmeabfuhrbedingungen insgesamt ein deutlich höheres Niveau. Unter Verwendung des optimierten Aufbaus konnte schließlich ein Gussprodukt gefertigt werden, das sich durch ein vergleichsweise grobes, jedoch über dem Strangquerschnitt homogenes Gefüge auszeichnet. Überdies liegen die thermische und die geometrische Mitte des Bandes auf gleicher Höhe. Die mit dem optimierten Aufbau maximal erreichbare Gießleistung ist vergleichbar mit jener des Referenzaufbaus. Bild 7 verdeutlicht die makroskopischen Gefügestrukturen im Längsschliff von Bändern, die mit Hilfe des Referenzaufbaus und des optimierten Kokillen-Kühler-Aufbaus gegossen wurden [4].

### Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der systematischen Untersuchung des Einflusses verschiedener konstruktiver

Veränderungen an den Kühlzonen eines Urformwerkzeugs auf die Erstarrungsbedingungen beim horizontalen Stranggießen von CuZn37. Durch eine gezielte Steuerung der Wärmeabfuhrbedingungen aus der Kokille sollte die Entstehung eines homogenen und symmetrischen Gussgefüges über dem Querschnitt ermöglicht werden. Die Ergebnisse der vorgestellten numerischen und experimentellen Arbeiten zeigen, dass diese Zielsetzung durch das Ergreifen zweier unterschiedlicher konstruktiver Maßnahmen im Bereich der oberen und unteren Kokillenplatte erreicht werden konnte.

### Förderung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen eines von der Bayerischen Forschungsförderung geförderten Projektes (Aktenzeichen AZ-731-06) durchgeführt.

### Literatur

- [1] Stadler, P.: Horizontalstranggießen. In: Schwerdtfeger, K. (Hrsg.): Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1992, S. 571.
- [2] Ricken, H.: Stranggießen mit Flüssigmetall als Wärmekopplung zwischen Kokille und Kühler. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [3] Riedel, S.; Ricken, H.: Erstarrungsdesign beim horizontalen Stranggießen. In: MET-ALL10, 2008, S. 652-655.
- [4] Hoffmann, H.; Riedel, S.; Nerl, C.; Wimmer, M.: Stranggießen mit gesteuerter Flüssigmetall-Umlaufkühlung. In: Müller, H. R. (Hrsg.): Vortragstexte des Symposiums Stranggießen. Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 2010, S. 27-32.

(1) *Dipl.-Ing. Christoph Nerl, Dipl.-Ing. Stefan Riedel, Dipl.-Ing. Martin Wimmer, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg), Technische Universität München*