

Einsatz moderner Messtechniken zur Beurteilung der Erstarrungsvorgänge beim Stranggießen

M. Forsthuber, E. Doring, W. Rauter, C. Bernhard und C. Chimani

Das Kompetenznetzwerk für metallurgische und umwelttechnische Verfahrensentwicklung (KnetMET) bietet für die beteiligten Unternehmen (Voestalpine Stahl GmbH, VAI, RHI und Voestalpine Stahl Donawitz GmbH) die Möglichkeit, gemeinsame F & E-Projekte abzuwickeln. Zur besseren Beschreibung von Erstarrungsvorgängen beim Stranggießen wurden im Rahmen eines KnetMET-Projektes neue Messtechniken (instrumentierte Kokille, Reibkraftmessung, Messung der Oberflächentemperatur) betrieblich getestet. Die aufgezeichneten Messdaten weisen eindeutige Zusammenhänge zu Anlagenparametern, Prozessparametern und Produktqualität auf. Mit den ermittelten Daten können die Randbedingungen des numerischen Modells für die Stranggießanlage CC3 in Donawitz verbessert werden; das Modell selbst lässt sich bewerten.

Use of Modern Measuring Techniques to the Assessment of the Solidification Processes in Continuous Casting. The competence network for metallurgical and environment process development (KnetMET) offers the chance to carry out common R & D projects to the involved companies (Voestalpine Stahl GmbH, VAI, RHI and Voestalpine Stahl Donawitz GmbH). In the context of the KnetMET project, new measuring techniques are used in the plant (instrumented mould, friction force measurement, measurement of the surface temperature at the bloom) for detailed description of solidification processes in continuous casting. The recorded data show clear correlations to plant parameter, process parameter and product quality. With the data acquired the boundary conditions of the numerical model for the continuous casting unit CC3 in Donawitz can be improved; the model itself can be evaluated.

1. Einleitung

Das Kompetenznetzwerk für metallurgische und umwelttechnische Verfahrensentwicklung (KnetMET) bietet für die beteiligten Unternehmen (Voestalpine Stahl GmbH, VAI, RHI und Voestalpine Stahl Donawitz GmbH) die Möglichkeit, in den Arbeitsgebieten

- „Zero Waste“
- Einsatzstoffbewertung
- Modellierung/Simulation
- Feuerfestmaterialien
- neue Stahlherstellung und
- Verfahrenstechnik

gemeinsame F & E-Projekte abzuwickeln. Das KnetMET wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), des Landes Oberösterreich, des Landes Steiermark und der Steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft m. b. H. gefördert.

Gemeinsam mit dem Partner VAI und dem Institut für Eisenhüttenkunde an der Montanuniversität Leoben

Dipl.-Ing. Markus Forsthuber, Dipl.-Ing. Wolfgang Rauter, Dipl.-Ing. Erich Doring, Voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Kerpeleystraße 199, A-8700 Leoben/Österreich; Dipl.-Ing. Christian Chimani, VAI GmbH & Co, Turmstraße 44, A-4031 Linz/Österreich; Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Bernhard, CD-Labor für Metallurgische Grundlagen von Stranggießprozessen, Institut für Eisenhüttenkunde, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 15 bzw. 18, A-8700 Leoben/Österreich.

Vortrag, gehalten bei der ersten wissenschaftlichen Evaluierung des CDL am 30. Oktober 2003.

wurde im Rahmen des Arbeitsgebietes „Modellierung/Simulation“ ein Projekt gestartet, welches sich mit den Erstarrungsvorgängen (Gleichmäßigkeit, Erstarrungsgeschwindigkeit) bei Stranggießanlagen beschäftigt.

2. Ziele

Neben der Erstarrungsgeschwindigkeit hat vor allem die Gleichmäßigkeit des Erstarrungsfortschritts einen großen Einfluss auf die Produktqualität (Risse, Seigerungen).

Ziel dieses Projektes ist es, moderne betriebliche Messtechniken und Simulations- und Modellierungsmethoden zu kombinieren, um die Erstarrungsvorgänge besser beschreiben zu können. Mit den ermittelten Daten sollen die Randbedingungen des numerischen Modells für die Stranggießanlage CC3 in Donawitz verbessert und gleichzeitig Möglichkeiten geschaffen werden, die Ergebnisse der numerischen Simulation zu bewerten.

3. Anlagenbeschreibung

Die Messungen für dieses F & E-Projekt erfolgten an der im Mai 2000 in Betrieb genommenen CC3-Anlage (Abb. 1).

Alle Messungen wurden am Gießformat \varnothing 230 mm durchgeführt. Nachstehend sind die wichtigsten Kenndaten der 5-strängigen Stranggießanlage angeführt:

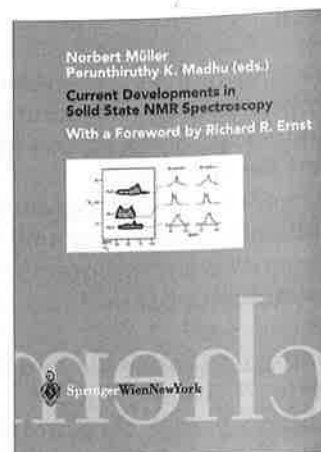
- Gebogene Kokille (Gießbogenradius 12 m)
- Hydraulischer Oszillierer
- „Air-mist“-Sekundärkühlung

SpringerChemistry

**Norbert Müller,
Perunthiruthy K. Madhu (eds.)**

**Current Developments in
Solid State NMR Spectroscopy**

With a Foreword by Richard R. Ernst.
2003. VIII, 132 pages.
Hardcover **EUR 128,-**
Recommended retail price. Net-price subject to local VAT.
(Special Edition of "Monatshefte für Chemie/
Chemical Monthly", Vol. 133, No. 12)
ISBN 3-211-83894-5



This book presents some of the latest developments in solid state NMR with potential applications in both materials and biological science. The main emphasis is on a strong link between theory and experiment via numerical simulation of NMR spectra which play a pivotal role in the design and development of pulse schemes in solid state NMR. The papers focus on non-biological topics of solid state NMR spectroscopy making the book useful for scientists and advanced students in chemistry, physics, and materials science striving for deeper understanding of this topic and its application potential. Three invited reviews focus on developments in solid state NMR of quadrupolar nuclei, which are of high interest in areas like materials science and heterogeneous catalysis.

Please visit our website: www.springer.at



SpringerWienNewYork

P.O. Box 89, Sachsenplatz 4-6, 1201 Vienna, Austria, Fax +43.1.330 24 26, e-mail: books@springer.at, Internet: springer.at
Haberstraße 7, 69126 Heidelberg, Germany, Fax +49.6221.345-4229, e-mail: orders@springer.de, springeronline.com
P.O. Box 2485, Secaucus, NJ 07096-2485, USA, Fax +1.201.348-4505, e-mail: orders@springer-ny.com
Eastern Book Service, 3-13, Hongo 3-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan, Fax +81.3.38 18 08 64, e-mail: orders@svt-obs.co.jp

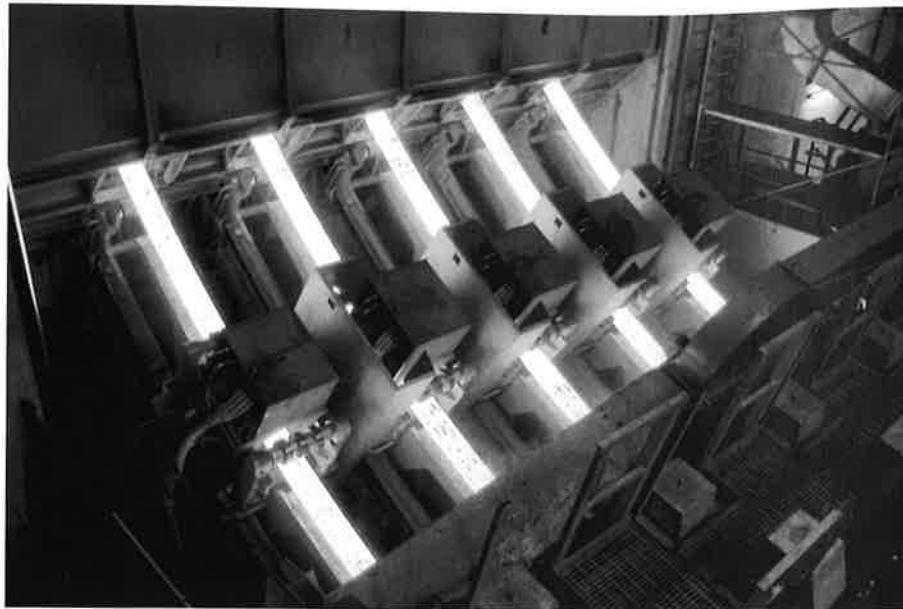


Abb. 1. Stranggießanlage CC3 der Voestalpine Stahl Donawitz.

- Elektromagnetische Rührer (Kokille und Sumpf/verfahrbar)
- Gießformate 390 × 283 mm und Ø 230 mm

Das an dieser Stranggießanlage erzeugte Stahlmarkenprogramm weist große Analysenspannen auf (Tabelle 1).

Tabelle 1. Analysenspannen des Stahlmarkenprogramms der Voestalpine Stahl Donawitz

C	0,02–1,2	%	Mo	0,01–1,1	%
Si	0,02–2,2	%	V	0,01–0,35	%
Mn	0,25–2,1	%	Sn	max. 0,01	%
P	0,01–0,1	%	B	0,0001–0,006	%
S	0,008–0,4	%	W	0,0001–0,6	%
Cr	0,05–2,5	%	As	max. 0,005	%
Ni	0,04–4,0	%	Nb	max. 0,02	%
Cu	0,03–0,6	%	Zr	max. 0,005	%
Al	0,002–0,07	%	O _{tot}	15–25	ppm
Ti	0,0015–0,12	%	H _{min}	1,3	ppm

Die großen Unterschiede in der Stahlzusammensetzung bedingen unterschiedliches Erstarrungsverhalten (Schrumpfung, Wärmeleitfähigkeit in der Strangschale, unterschiedlich stark ausgeprägte 2-Phasengebiete) und damit eine exakte Abstimmung der entscheidenden Anlagen- und Prozessparameter (Kokillenkonzentration, Gießpulver, Gießgeschwindigkeit, Rührintensität in der Kokille, Sekundärkühlwassermenge und Pressluftdruck in der Sekundärkühlung) auf die jeweilige Stahlsorte.

4. Eingesetzte Messtechniken

Für die Beurteilung der Erstarrungsvorgänge wurden drei unterschiedliche Messsysteme ausgewählt.

Instrumentierte Kokille (Abb. 2)

Zur Beurteilung der lokalen Wärmestromdichte wurde eine Kokille (800 mm, Konizität: 1,40 %) mit 32 Thermoelementen bestückt.

Der Abstand der Thermoelemente von der Innenoberfläche („Hot face“) beträgt – um möglichst schnelle

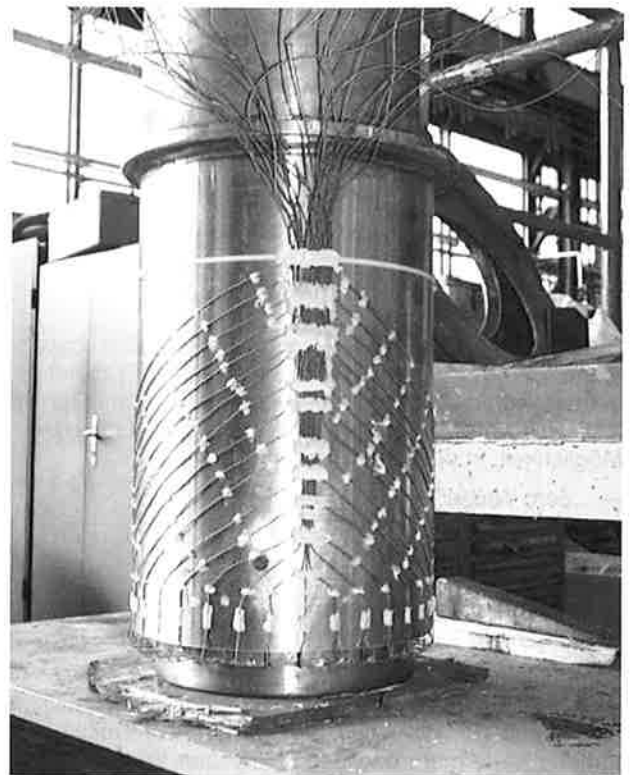


Abb. 2. Instrumentierte Kokille

Reaktionszeiten zu erhalten – 2 mm. Mögliche den Messwert beeinflussende Fehlerquellen sind:

- Störsignale durch das in der Kokille befindliche Magnetfeld
- Position der Thermoelemente (Verschleiß der Kokille im unteren Kokillenbereich während des Einsatzes)
- Genauigkeit der Gießspiegelmessung (Abstand zwischen Meniskus und Thermoelement)

Optische Temperaturmessung

Zur Ermittlung der Oberflächentemperatur wird in der Sekundärkühlung ein Pyrometer auf Basis Lichtleiter eingesetzt. Der Sensor wird dabei möglichst nahe an die Strangoberfläche herangebracht und die emittierte Wärmestrahlung über Lichtleiter zu einem geeigneten Pyrometer geleitet.

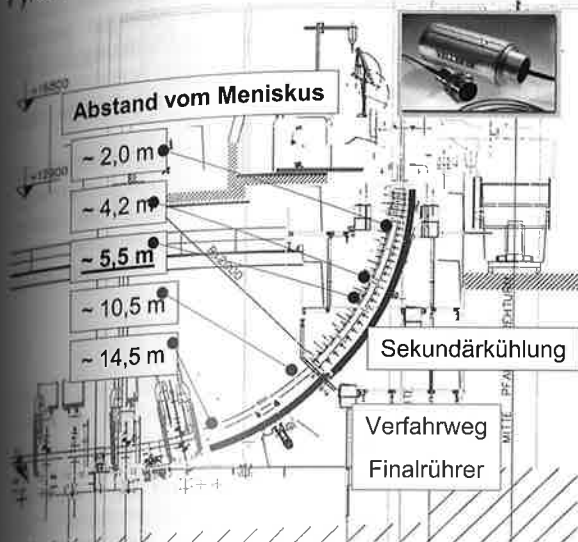


Abb. 3. Messorte in der Stranggießanlage (Foto: Pyrometer mit Sensor und Lichtwellenleiter)

Um einerseits den Wasserdampf zwischen Sensor und Strangoberfläche zu reduzieren und andererseits den Sensor zu kühlen, werden die für den Sensor notwendigen Führungsrohre mit trockener Pressluft gespült.

Unter der Sekundärkühlung wird ein herkömmliches Strahlungspyrometer eingesetzt. Mögliche den Messwert beeinflussende Fehlerquellen sind:

- Pressluftmenge zur Kühlung der Sensoren (gleichzeitig kann auch eine Kühlung der Strangoberfläche erfolgen)
- Unterschiedliche Signaldämpfung durch Verschmutzungen im Linsensystem bzw. Länge und Materialqualität des eingesetzten Lichtwellenleiters

- Verzunderungsverhalten des Stahls
- Fokuseinstellung des Sensors versus Abstand zur Strangoberfläche

Die einzelnen Messorte wurden den betrieblichen Rahmenbedingungen (Rollenführung, Position der Spritzeebenen) angepasst (Abb. 3).

Reibkraftmessung

Zur besseren Beurteilung der Erstarrungsvorgänge in der Kokille (Auswirkung auf Spannungszustände in der Strangschale, Schmierwirkung der Gießpulverschlacke, Schrumpfungsverhalten) wurde an einem hydraulischen Oszillierer eine Reibkraftmessung installiert. Mit einer Abtastrate von 500 Hz werden Hydraulikdruck und Position des Oszillierers aufgezeichnet und online die Reibarbeit ermittelt.

Eine mögliche Fehlerquelle ist hier die Filterung der Messsignale mittels RC-Glied (Tiefpassfilter), welches eine frequenzabhängige Phasenverschiebung verursacht.

5. Ergebnisse

Neben der Abhängigkeit der Messwerte von der Stahlzusammensetzung und den Prozess- und Anlagenparametern (Gießgeschwindigkeit, Gießpulver, Sekundärkühlung, Fußrollenanstellung) konnten auch Vorgänge bei instationären Bedingungen (z. B. Verteilerwechsel, Neuanguss, Änderung der Gießgeschwindigkeit ...) beobachtet und aufgezeichnet werden. Parallel dazu wurden bis dato unbekannte zyklische Phänomene beobachtet.

Instrumentierte Kokille

In Abb. 4 ist der Einfluss der Stahlzusammensetzung auf die Temperaturverteilung in der Kokille zu erkennen. Beim Übergang von Stahl mit 0,07 % C (unterperitektisch) auf Stahl mit 0,12 % C (peritektisch) ändert sich die Art der Wärmeabfuhr (Höhe und Schwankungsbreite) bei sonst konstanten Prozessparametern (Gießgeschwindigkeit = 1,6 m/min, gleiches Gießpulver) erheblich.

Die hohe Bedeutung einer exakten Anlagengeometrie auf die Gleichmäßigkeit der Erstarrung kann aus den ermittelten lokalen Wärmestromdichten eindeutig nach-

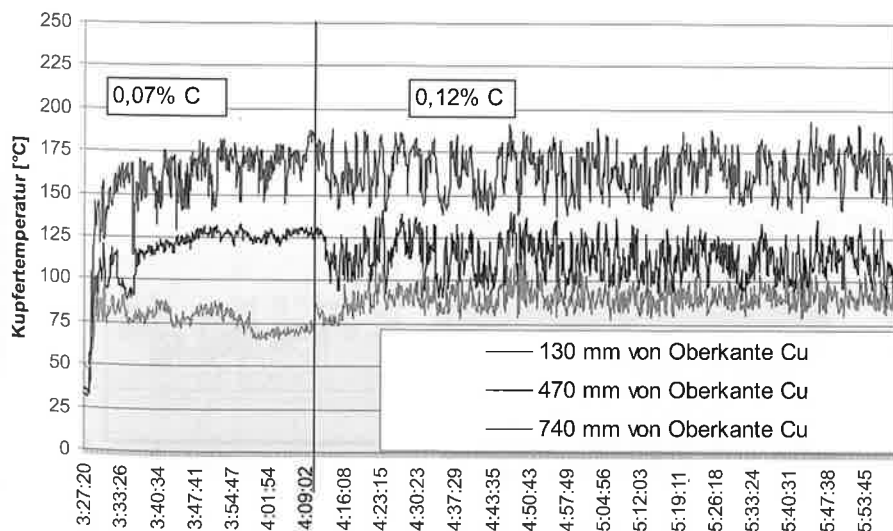


Abb. 4. Einfluss der Stahlzusammensetzung auf die Temperaturverteilung in der Kokille

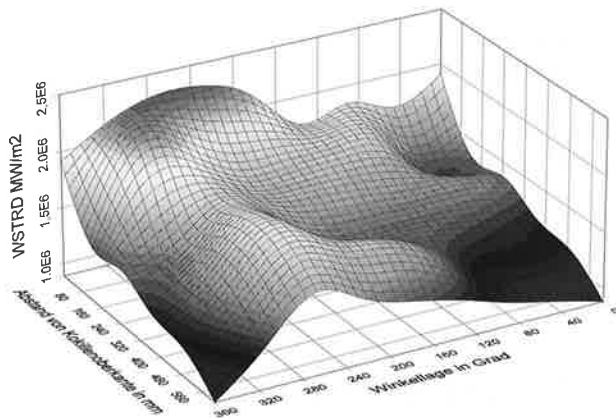


Abb. 5. Einfluss der Fußrollenanstellung auf die Verteilung der Wärmestromdichte

gewiesen werden¹. Die ermittelten lokalen Wärmestromdichten in der Kokille zeigen, dass speziell Ungenauigkeiten in der Strangführung (Fußrollenanstellung bei Einsatz des Rundformats) zu erheblichen Unterschieden (Abb. 5) in der Wärmeabfuhr um den Kokillenumfang führen können.

Oberflächentemperaturmessung

Bei der Einstellung niedriger Gießgeschwindigkeiten (1,2 m/min) treten starke periodische Schwankungen in der Oberflächentemperatur auf (Abb. 6). Der Zyklus ist sehr kurz und mit einer Periodendauer von ungefähr

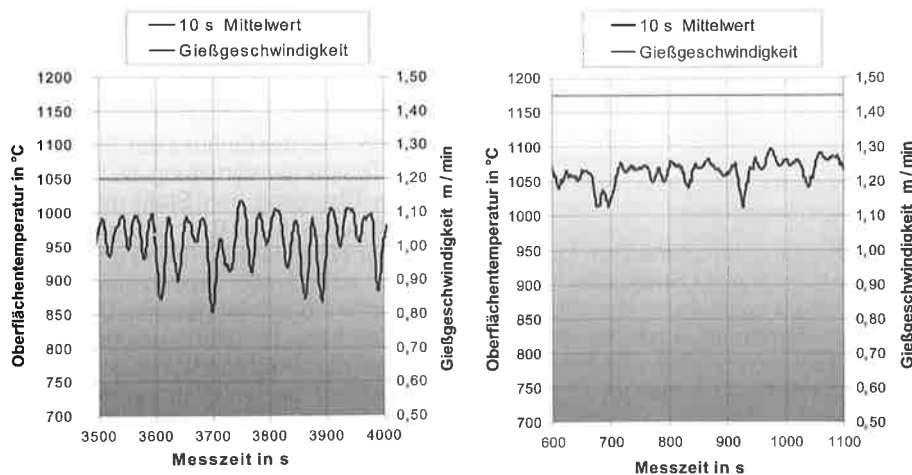


Abb. 6. Periodische Schwankungen der Oberflächentemperatur

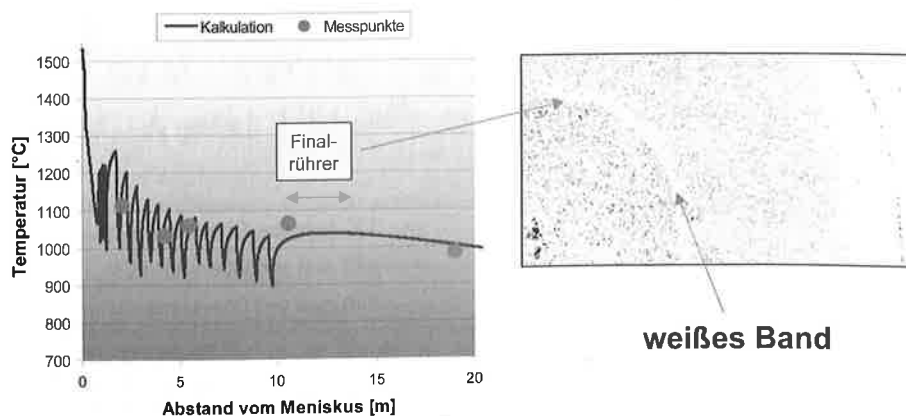


Abb. 7. Ermittlung des Erstarrungsfortschritts

28 Sekunden sehr konstant. Aus den Anlagendaten kann ermittelt werden, dass bei den gewählten Prozessparametern der Spritzebenenabstand dem Produkt aus Gießgeschwindigkeit und Zykluszeit entspricht. Diese zyklischen Schwankungen verschwinden, wenn der oben genannte „kritische“ Gießgeschwindigkeitsbereich verlassen wird (Abb. 6).

Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen sind eigenfrequente Überlagerungen von geringen periodischen Schwankungen in der Sekundärkühlung ($\pm 0,5$ l/min, $\pm 0,1$ bar Pressluft). Eine negative Auswirkung auf die Gleichmäßigkeit der Durcherstarrung konnte nicht nachgewiesen werden.

Diese Messungen der Oberflächentemperatur dienen neben der direkten Erfassung des Erstarrungsfortschritts mittels weißer Bändern (Abb. 7) der Bewertung des bestehenden numerischen Simulationsmodells.

Die Haupteinflussgrößen auf den Erstarrungsfortschritt sind demnach:

- Gießgeschwindigkeit
- Wärmeabfuhr Kokille
- Sekundärkühlung und
- Überhitzung

Reibkraftmessung

Die Auswahl geeigneter Gießpulver und die richtige Einstellung der Gießparameter (Gießgeschwindigkeit, Hubhöhe usw.) sind von entscheidendem Einfluss auf die Qualität des Produktes. Eine der wenigen Möglichkeiten, den Stranggießprozess online zu beurteilen ist, neben der

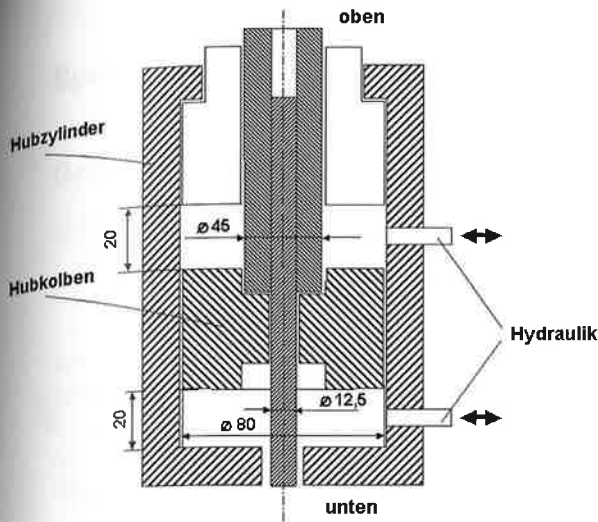


Abb. 8. Hubkolben und Hubzylinder

Bestimmung der lokalen und integralen Wärmestromdichte, die Aufzeichnung der Kräfte, die zur Oszillation der Kokille erforderlich sind. Bei einer hydraulischen Oszillereinrichtung, wie sie bei Voestalpine Stahl Donawitz eingesetzt wird, werden dazu mittels Drucksensoren (je zwei Sensoren pro Oszillierer, je vier Sensoren pro Linie) die auf den Hubkolben wirkenden Kräfte gemessen (Abb. 8).

Die Messergebnisse werden über einen A/D-Wandler eingelesen und von der Messsoftware DasyLab ausgewertet und aufgezeichnet.

Die resultierende Kraft im Kolben F_{Kolben} ergibt sich aus (1).

$$F_{\text{Kolben}} = p_{\text{Kolben unten}} \cdot A_{\text{Kolben unten}} - p_{\text{Kolben oben}} \cdot A_{\text{Kolben oben}} \quad (1)$$

p ... Druck
 A ... Fläche

Damit folgt mit y für den Weg die Reibarbeit W je Hubzyklus (2).

$$W = \int_{\text{Zyklus}} F_{\text{Kolben}} \cdot dy \quad (2)$$

Die Reibarbeit wird zusammen mit der Gießspiegelhöhe und der Gießgeschwindigkeit im Steuerstand der Stranggießanlage visualisiert. Darüber hinaus werden der Bewegungsablauf des Außen- und Innenbogens einer Linie sowie detaillierte Zusammenhänge zwischen Bewegung und Kräften im System Strang-Kokille dargestellt.

Die Verfolgung der wirkenden Kräfte während der Kokillenbewegung ermöglicht wertvolle Aussagen über den Anlagenzustand.

Die verrichtete Oszillierarbeit einer leeren Kokille ist in Abb. 9 dargestellt. Der ideale Zustand im Leerlauf ist eine weitgehend von der Oszillierfrequenz unabhängige Reibarbeit, die mit der Hubhöhe zunimmt (Abb. 9 links).

Eine deutliche Abweichung vom Idealzustand ist in Abb. 9 rechts dargestellt, indem hier eine Abhängigkeit

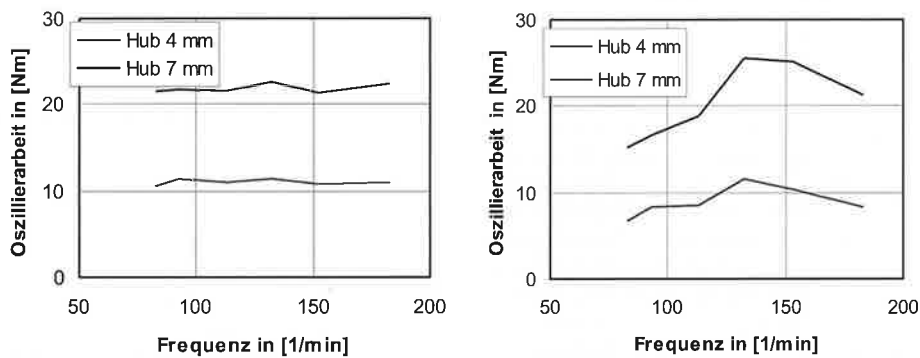


Abb. 9. Oszillierarbeit der leeren Kokille: Außenbogen (linkes Bild), Innenbogen (rechtes Bild)

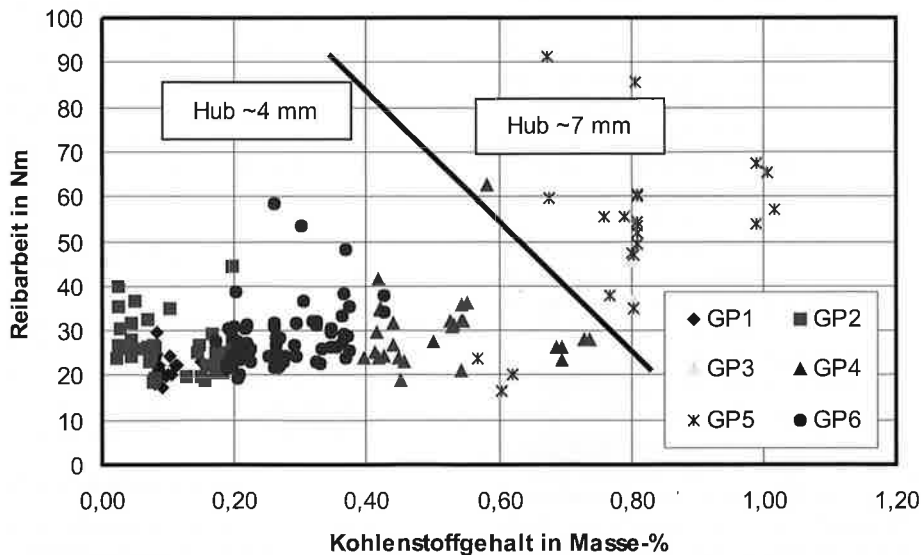


Abb. 10. Gemessene mittlere Reibarbeit je Gießsequenz über Kohlenstoffgehalt

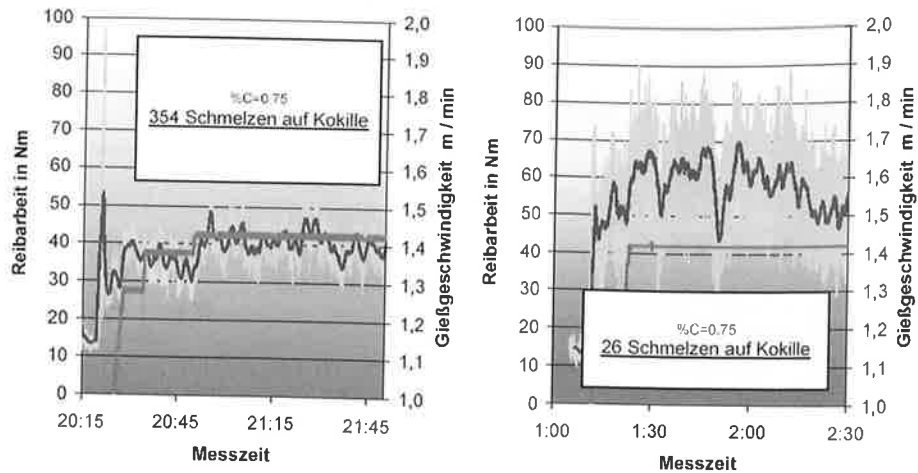


Abb. 12. Messung der Reibarbeit an Kokillen mit unterschiedlicher Abgusszahl

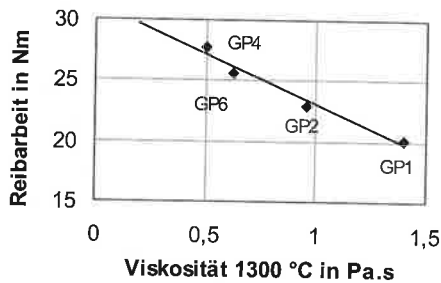


Abb. 11. Reibarbeit gegen ausgewählte Parameter für unterschiedliche Gießpulver

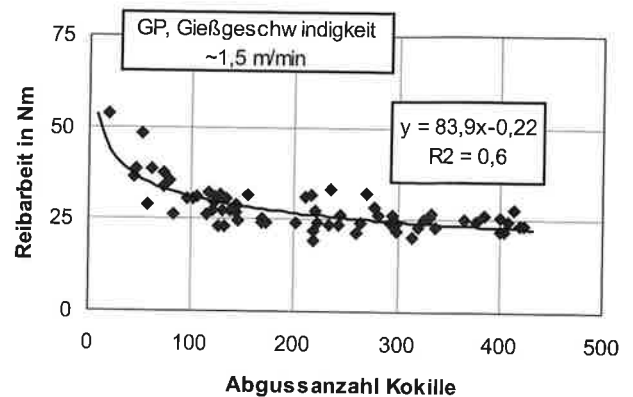


Abb. 13. Entwicklung der gemessenen Reibarbeit über der Einsatzzeit der Kokille

der Oszillierarbeit auch von der Oszillierfrequenz erkennbar ist. Die Auswirkung dieser Frequenzabhängigkeit auf die im Gießbetrieb gemessenen Reibarbeitswerte sind deutlich und drücken sich, entsprechend den eingestellten Gießparametern, als einfache Schwingung sowie auch als Schwabung des Reibkraftverlaufs aus. Da diese Schwingungen nicht immer auftreten, konnte die Ursache noch nicht eindeutig ermittelt werden. Ein von der Messfrequenz abhängiger Messfehler („Aliasing“) wird nach durchgeführter Frequenzanalyse als Ursache ausgeschlossen.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Reibarbeit neben den Oszillierbedingungen vom eingesetzten Gießpulvertyp abhängt. Viskosität, Oberflächenspannung und der Fließbereich beeinflussen die Schmierwirkung der Kokillenschlacke stark (Abb. 10).

Zum derzeitigen Stand der Auswertungen sind nachstehende Zusammenhänge zu erkennen:

Mit zunehmender Viskosität nimmt die Reibarbeit und die abgeführte Wärme (Abb. 11) pro m² Strang zu.

Vom Messsystem wird neben der Reibarbeit auch die maximale Kraft im Oszillierer aufgenommen. Aus dieser Kraft kann über den Erstarrungsfortschritt am Ende der Kokille der Spannungszustand in der Strangschale ermittelt werden. Mit den Ergebnissen der berechneten Spannungen soll künftig für risskritische Stahlmarken eine Optimierung der Gießgeschwindigkeit und im Besonderen der für den Wärmeübergang wesentlichen Zusammensetzung der Gießpulver vorgenommen werden. Alle in Donawitz eingesetzten Kokillen haben die gleiche Konizität. Somit ist die Kokillenform nur für einen engen Kohlenstoffbereich optimal geeignet. Von diesem Kohlenstoffbereich abweichende Stahlanalysen stellen hinsicht-

lich der Kokillenkonzität einen Kompromiss dar, der besonders in der Reibarbeit deutlich wird.

In Abb. 12 ist die Reibarbeit einer neuen Kokille mit 26 Schmelzen und einer älteren Kokille mit einer Schmelzenanzahl von 354 dargestellt. Die ältere Kokille weist einen deutlich niedrigeren und gleichmäßigeren Verlauf der Reibarbeit auf.

Aus Abb. 13 wird deutlich, dass neue Kokillen zu wesentlich höherer Reibkraft führen. Erst bei Schmelzenzahlen > 50 kann von annähernd gleichbleibenden Reibungsbedingungen zwischen Strang und Kokille gesprochen werden. Daraus ergibt sich für risskritische Stahlmarken die Forderung, diese mit älteren („eingefahrenen“) Kokillen zu vergießen.

6. Zusammenfassung

Alle Messtechniken konnten erfolgreich eingesetzt und unter betrieblichen Bedingungen getestet werden. Gleichzeitig konnten durch diese Messtechniken bekannte Phänomene erklärt bzw. neue Phänomene entdeckt und daraus teilweise Maßnahmen abgeleitet werden.

Instrumentierte Kokille

Durch die instrumentierte Kokille konnte der Nachweis über Auswirkung der Anlagengeometrie auf Erstarrungsfortschritt und Produktqualität (Risse) erkannt und erklärt