

**Stahl**

**11/2018**

November 2018

Zeitschrift für die  
Herstellung und  
Verarbeitung von  
Eisen und Stahl

# stahl und eisen



Jbd Gesellschaft für Medien- und Kommunikation mbH  
Graf-Recke-Straße 82, 40239 Düsseldorf  
PVSt, Deutsche Post AG, Erngelt bezahlt, 6447



# Neuartige Zweistoffdüsen steigern die Energieeffizienz der Sekundärkühlung

*New generation of air-mist nozzles improves energy efficiency in secondary cooling*

Zunehmender Kostendruck und die Energiepolitik erfordern die kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz. Ein Energieeinsparpotenzial bietet das Sekundärkühlsystem von Stranggießanlagen. Die Druckluftversorgung verursacht einen hohen Energieverbrauch und Betriebskosten. Dies war ein Grund für die Entwicklung einer neuen Generation von Zweistoffdüsen für Stranggießanlagen. Das Ergebnis dieser Entwicklung ist eine neue Baureihe, die diese Anforderungen erfüllt und ein Einsparpotenzial des Druckluftverbrauchs von ca. 30 % bietet.

Robert Wolff,  
Jürgen Frick,  
Christian Bernhard  
und Matthias Taferner

*Increasing cost pressure and legal requirements are forcing steel producing companies to improve the energy efficiency of their plants. The secondary cooling system of continuous casting machines provides opportunities for savings. The consumption of compressed air causes significant energy consumption and operating costs. These facts were the basis to develop a new generation of nozzles for slab casting. The result of this development is a new nozzle series which satisfies these demands and provides an air saving potential of about 30 % over a large turndown range.*

**D**ie Energieeffizienz ist einer der Schlüssel, um in der weltweiten Stahlproduktion die globalen Herausforderungen hinsichtlich der Einhaltung der ökologischen und ökonomischen Standards zu meistern. In Stranggießanlagen stellt der Druckluftverbrauch innerhalb des Sekundärkühlsystems einen der wichtigsten Faktoren bei den Betriebs- und Energiekosten dar. In den letzten Jahrzehnten wurde die Leistung der Sekundärkühlsysteme in Stranggießanlagen im Hinblick auf Flexibilität und Kühleffizienz erhöht, um Produktqualität und Produktivität zu optimieren.

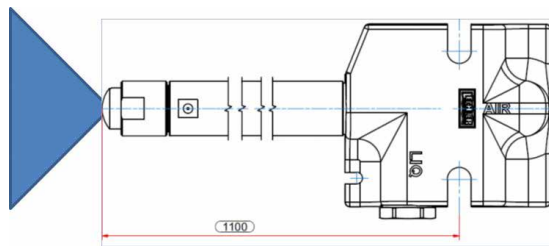
Eine höhere Flexibilität ist häufig direkt mit einem größeren Regelbereich der Zweistoffdüsen verbunden. Der Regelbereich ist nach wie vor der wichtigste Parameter im Zusammenhang mit der Flexibilität in der Sekundärkühlung, da der Wasservolumenstrom ein leicht zu quantifizierender Parameter ist. Andere Parameter wie Düsenanordnung (Strahlwinkel, Düsenabstand und Spritzhöhe), Luftdruckregelbereich, Wasserdruckregelbereich und Luft-/Wasser-Verhältnis müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Zusätzlich haben auch resultierende Parameter wie Strahlkraft oder Tropfengröße und -geschwindigkeit großen Ein-



**Zweistoffdüse**  
*Air-mist nozzle design*

fluss auf die Kühleffizienz. Allerdings ist der Regelbereich nicht standardisiert und steht normalerweise nicht in Korrelation zur Wasserverteilung oder Kühleffizienz selbst. Absolute Werte dieses Parameters sind daher immer im Kontext zu sehen.

Eine höhere Kühleffizienz wird meist durch den Einsatz größerer Wasser- und Luftvolumenströme sowie durch variable Steuerung des Luftdrucks erreicht. Auf diese Weise konnte die Zerstäubung des Sprays über einen größeren Wasservolumenstrombereich verbessert werden. Gleichzeitig wurde die Düsenanordnung modernisiert: Die Anzahl



**1**  
**Design der Zweistoffdüsen vom Typ Mastercooler und Slabcooler Eco mit angedeutetem Spritzwasser**

*Air-mist nozzle design for Mastercooler and Slabcooler Eco Type with indicated spray water*

der Düsen pro Rollenspalt wurde erhöht und die Spritzhöhe und der Strahlwinkel jeder Düse wurden entsprechend der modernen Rollenpläne in Stranggießanlagen verringert.

Allerdings zählen der hohe Druckluftverbrauch sowie die hohen Betriebskosten zu den kritischen Faktoren beim Betrieb von Zweistoff-Sekundärkühlssystemen. Lechler startete daher ein Projekt zur Entwicklung einer neuen Generation von Zweistoffdüsen. Ziel dieses Entwicklungsprojekts war es, die Vorteile der vorhandenen Zweistoffdüsen zu erhalten und gleichzeitig den Druckluftverbrauch und die zugehörigen Betriebskosten zu verringern. Die neue Generation von Düsen sollte zudem in vorhandene Sekundärkühlssysteme passen, ohne dass größere Änderungen an bestehenden Spritzbalken oder der Sekundärkühlsteuerung notwendig waren.

### Neue Generation von Zweistoffdüsen für die Sekundärkühlung

Als Basis für die Entwicklung wurde die bewährte Düsenbaureihe „Mastercooler“ von Lechler verwendet. Die Zweistoffdüsen der Mastercooler-Baureihe sind weltweit in modernen Sekundärkühlssystemen für Stranggießanlagen im Einsatz. Um eine direkte Implementierung der neuen Düsenbaureihe in vorhandenen Sekundärkühlssystemen zu ermöglichen, muss weiterhin eine optimale Leistung hinsichtlich Kühlkapazität, Flüssigkeits-

verteilung und Kühleffizienz gewährleistet sein. Durch Neukonstruktion der kritischsten Elemente der Zweistoffdüsen wurden alternative Methoden zur Optimierung der Düsenleistung angewandt. Das Ergebnis dieses Entwicklungsprojekts ist eine neue Düsenbaureihe mit der Bezeichnung „Slabcooler Eco“, die die genannten Anforderungen erfüllt und gleichzeitig den Luftverbrauch verringert.

Bild 1 zeigt die Außengeometrie der Zweistoffdüsen, die bei allen untersuchten Düsentypen identisch ist. Infolgedessen lässt sich die Düsenbaureihe Slabcooler Eco ohne größere mechanische Umbauten in vorhandene Sekundärkühlssysteme implementieren. Dieses Prinzip ist auf die Geometrien der meisten Zweistoffdüsen übertragbar, die derzeit in modernen Stranggießanlagen verwendet werden.

Um die Sprühleistung des neuen Düsentyps zu bewerten, wurden die verschiedenen Düsengrößen so gewählt, dass sie in Bezug auf Größe, maximalen Wasservolumenstrom, Strahlwinkel und Flüssigkeitsverteilung den vorhandenen Düsen vom Typ Mastercooler entsprechen. Bild 2 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen untersuchten Düsentypen und die wichtigsten Parameter.

Um eine vergleichbare maximale Kühlkapazität zu gewährleisten, wurden der Wasser- und Luftvolumenstrom bei maximalen Betriebsbedingungen (z. B. bei 7 bar Wasserdruck und 2 bar Luftdruck) bei identischen Düsengrößen auf gleichem Niveau belassen. Bei allen weiteren Betriebsbedingungen wird mit dem Slabcooler Eco eine vergleichbare Zerstäubung bei geringeren Luftvolumenströmen erzielt. Bild 3 zeigt ein Beispiel für ein Druck-/Volumenstrom-Diagramm einer Düse der Baureihe Mastercooler (MC3) bzw. Slabcooler Eco (SC3) bei einem Betriebsdruck von 2 bar. Bei Wasserdrücken <7 bar weist der Slabcooler Eco einen deutlich geringeren Luftvolumenstrom bei gleichem Wasservolumenstrom auf. Dies gilt auch für abweichende Luftdrücke und Düsengrößen. Der Regelbereich der Düse der Baureihe Slabcooler Eco konnte im Vergleich zur Baureihe Mastercooler ebenfalls vergrößert werden, da der Wasservolumenstrom im

Düsenbezeichnung	Düsenbaureihe	Düsengröße	Strahlwinkel, °	Düsenlänge, mm	min. $\dot{V}_{\text{Wasser}}^*$ , $\text{dm}^3/\text{min}$	max. $\dot{V}_{\text{Wasser}}^{**}$ , $\text{dm}^3/\text{min}$	max. $\dot{V}_{\text{Luft}}^*$ , $\text{m}^3/\text{h}$	Regelbereich
MC3	Mastercooler	3	90	1 100	0,9	14,5	9,5	16
SC3	Slabcooler Eco				0,3	14,5	7,2	48
MC5	Mastercooler	5			1,1	24	13,3	22
SC5	Slabcooler Eco				0,5	24	12,2	48

\* bei 0,5 bar Wasserdruck und 2 bar Luftdruck, \*\* bei 10 bar Wasserdruck und 3 bar Luftdruck

**2**  
**Übersicht über die verschiedenen untersuchten Düsentypen und die wichtigsten Parameter**

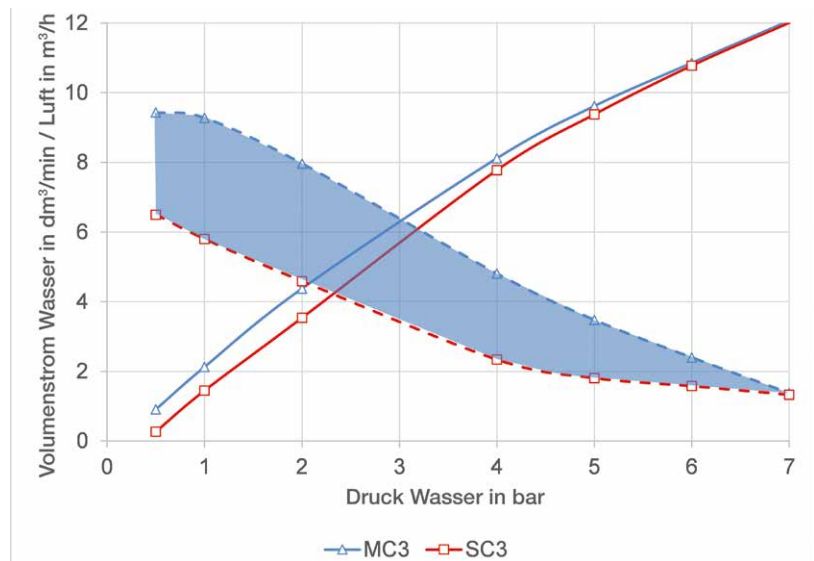
*Overview of nozzle types*

Wasserdruckbereich <7 bar bei gleichem Wasser- und Luftdruck leicht reduziert ist. Die Werte bei den Düsen vom Typ Mastercooler sind typisch für moderne Stranggießanlagen.

Ein weiterer wichtiger Parameter hinsichtlich der Sprühleistung von Zweistoffdüsen ist der Strahlwinkel – genauer gesagt die Flüssigkeitsverteilung auf der Strangoberfläche. Düsen vom Typ Mastercooler werden für jede Stranggießanlage spezifisch ausgelegt, sodass eine optimale Flüssigkeitsverteilung bei der jeweiligen Düsenanordnung gewährleistet ist. Daher muss die neue Düsenbaureihe Slabcooler Eco ein ähnliches, spezifisches Flüssigkeitsverteilungsprofil bieten können. Bild 4 zeigt einen Vergleich der Flüssigkeitsverteilungsprofile bei identischen Betriebsdrücken. Die beiden Profile sind zwar nicht identisch, aber sehr ähnlich. Infolgedessen wird eine vergleichbare Kühlleistung über die Strahlbreite erwartet. Gleiches gilt für den gesamten Regelbereich und andere Düsengrößen bei vergleichbarem Wasservolumenstrom.

## Prüfverfahren

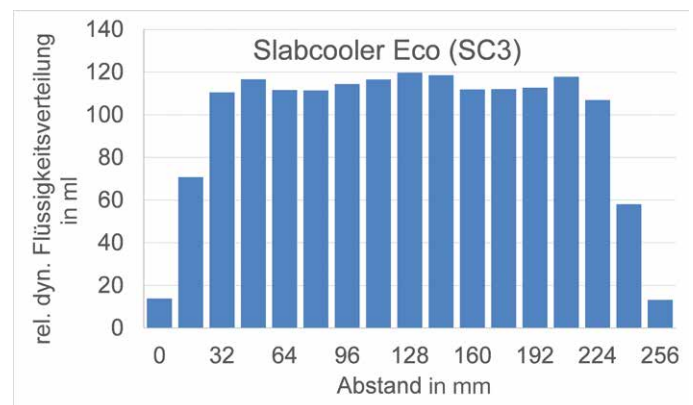
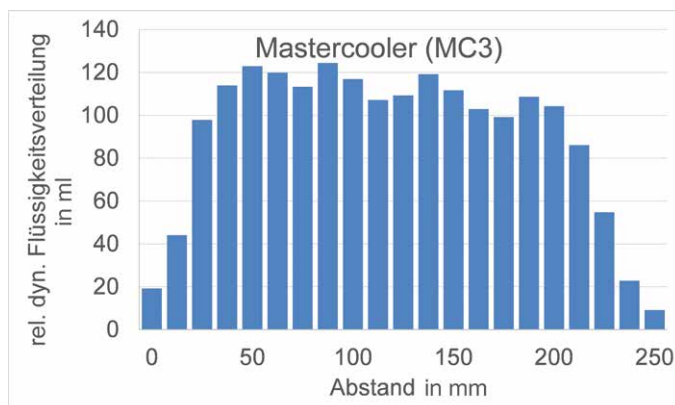
Die oben beschriebenen Düsentypen wurden am Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie an der Montanuniversität Leoben mithilfe des Nozzle Measuring Stand (NMS) charakterisiert. Die Charakterisierung einer Düse umfasst in der Regel die Messung der Wasserverteilung des Düsenstrahls in zwei Dimensionen sowie die Bestimmung des lokalen Wärmeübertragungskoeffizienten (engl. Heat Transfer Coefficient, HTC) bei festgelegten Parametern (z. B. Wasservolumenstrom, Luftdruck, Oberflächentemperatur oder Gießgeschwindigkeit). Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Messung des HTC und die erzielten Ergebnisse im Detail erörtert.



3 Vergleich des Wasser- und Luftverbrauchs der Düsen vom Typ MC3 und SC3 bei 2 bar Luftdruck

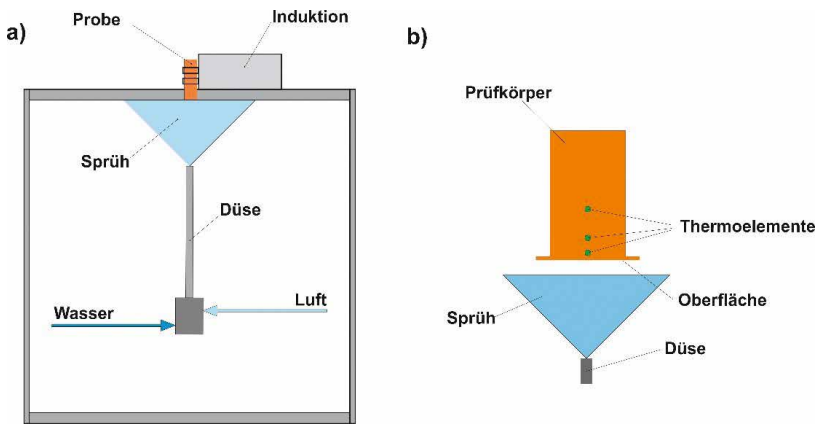
Comparison of water and air consumption of nozzle types MC3 and SC3 at 2 bar air pressure

Der Aufbau des NMS ist aus Bild 5 ersichtlich. Das Düsenstrahl ist direkt nach oben gerichtet und die Tropfen prallen auf die Oberfläche eines Zylinders aus korrosionsbeständigem Stahl (1.4841), der mittels induktiver Erwärmung bis zu einer festgelegten Start-Oberflächentemperatur  $T_{\text{Start}}$  erwärmt wird. Nachdem diese Temperatur über eine bestimmte Zeit gehalten wurde, wird der Zylinder mit einer Geschwindigkeit, die der simulierten Gießgeschwindigkeit entspricht, durch das Spray bewegt. Die somit bewirkte Temperaturänderung wird durch drei Thermolemente, die im Probezylinder angeordnet sind, gemessen. Aus diesem Temperaturprofil wird der lokale HTC durch eine auf inverser Wärmeleitung basierende



4 Vergleich der Flüssigkeitsverteilungsprofile der Düsen MC3 (links) und SC3 (rechts) bei identischen Betriebsbedingungen (7 bar Wasserdruck und 2 bar Luftdruck) bei einer Spritzhöhe von 130 mm

Comparison of liquid distribution profile of MC3 (left) and SC3 (right) at identical operating conditions (7 bar water and 2 bar air pressure) at a spray height of 130 mm



5 a) Anordnung für HTC-Messung, b) Probezylinder  
a) Arrangement for HTC measurement, b) Sample cylinder

Methode berechnet. Bei diesem HTC werden die Konvektionskomponente sowie die durch Strahlung verursachte Komponente berücksichtigt [1].

Die folgenden Prozessbedingungen wurden für alle Versuche eingestellt:

- ▷ Start-Oberflächentemperatur  $T_{\text{Start}} = 950 \text{ °C}$
- ▷ Geschwindigkeit der Probe  $v = 2 \text{ m/min}$
- ▷ Vertikaler Abstand  $N_z = 130 \text{ mm}$ .

Aus Bild 6 sind die Betriebszustände der Düsen bei allen Messungen ersichtlich. Alle Düsentypen wurden bei fünf Zuständen jeweils mit identischem Wasser- und Luftdruck geprüft. Der Wasser- und Luftvolumenstrom ist bei identischen Düsengrößen für Zustand 4 (7 bar Wasserdruck und 2 bar Luftdruck) sehr ähnlich. Die Betriebszustände wurden basierend auf den typischen Sekundärkühlsteuerungsbereichen von Stranggießanlagen festgelegt.

Bei jedem Zustand wurden Messungen an vier Punkten quer zur Strahlbreite in Gießrichtung durchgeführt, Bild 7. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten betrug 40 mm. Die drei Messpositionen in der Mitte des Düsenstrahls entsprechen der typischen, direkten Sekundärkühlungsfläche. Die Messung am Rand des Strahls fällt

typischerweise in den Überlappungsbereich zwischen zwei benachbarten Sprays auf der Strangoberfläche.

### Testergebnisse

Ein Beispiel für die gemessenen HTC-Verteilungen in verschiedenen Abständen von der Spraymitte wird in Bild 8a gezeigt. Jede Kurve entspricht dem berechneten HTC beim Passieren des Strahls. Aus diesen Werten wurde der mittlere HTC ( $HTC_{\text{Mittel}}$ ) bezogen auf die Spraykontaktzeit ( $t_{\text{Strahl}}$ ) berechnet, Bild 8b. Dieser Kennwert wurde für die weitere Erörterung herangezogen.

Wie oben erwähnt wurde der lokale HTC für jede Parameterreihe in vier Abständen von der axialen Mitte des Sprühkegels gemessen. Bild 9 zeigt einen Überblick über den resultierenden mittleren HTC ( $HTC_{\text{mean}}$ ) für die Düsen MC3 und SC3. Der Verlauf des  $HTC_{\text{mean}}$  über die Strahlbreite folgt dem gemessenen Wasserverteilungsprofil; Messungen bei einem höheren Wasser-/Luftdruck führen zu einem höheren  $HTC_{\text{mean}}$ . Vergleichbare Ergebnisse wurden für die Düsen MC5 und SC5 ermittelt, Bild 10.

Um die Gesamtkühlleistung zu vergleichen, wurde ein durchschnittlicher Wert von  $HTC_{\text{mean}}$  aus den Ergebnissen der Positionen C, C+40 und C+80 berechnet. Position C+120 wurde nicht berücksichtigt, da diese in den Überlappungsbereich fällt und der gemessene HTC einer Einzeldüse nicht aussagekräftig ist. Bild 11 zeigt die ermittelte Kühlleistung sowie den Luftverbrauch der Düsen MC3 und SC3. Der Luftverbrauch bei Wasservolumenströmen ab 1 bis 10  $\text{dm}^3/\text{min}$  ist bei Slabcooler Eco um 30 – 40 % geringer im Vergleich zum Mastercooler bei gleicher Kühlleistung. Der Kühlleistungsbereich insgesamt ist bei beiden Typen vergleichbar.

Ein Vergleich zwischen MC5 und SC5, Bild 12, zeigt ebenfalls eine deutliche Reduzierung des Luftverbrauchs für Wasservolumenströme im Bereich von 2 bis 15  $\text{dm}^3/\text{min}$  um bis zu 20 – 25 % bei gleicher Kühlleistung. Der Kühlleistungsbereich

Zustand			MC3		SC3		MC5		SC5	
	$p_{\text{Wasser}}$ bar	$p_{\text{Luft}}$ bar	$\dot{V}_{\text{Wasser}}$ $\text{dm}^3/\text{min}$	$\dot{V}_{\text{Luft}}$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{\text{Wasser}}$ $\text{dm}^3/\text{min}$	$\dot{V}_{\text{Luft}}$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{\text{Wasser}}$ $\text{dm}^3/\text{min}$	$\dot{V}_{\text{Luft}}$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{\text{Wasser}}$ $\text{dm}^3/\text{min}$	$\dot{V}_{\text{Luft}}$ $\text{m}^3/\text{h}$
1	0,5	1	1,7	5,9	1,0	4,1	2,2	8,3	2,3	6,6
2	2	2	4,3	8,1	3,4	5,2	6,8	11,0	6,4	8,6
3	4	2	8,0	5,0	7,9	2,7	13,5	5,3	13,3	3,9
4	7	2	12,3	1,8	12,2	1,5	21,1	1,0	20,7	1,2
5	10	3	14,5	3,0	14,5	3,1	24,6	1,8	24,7	2,1

6 Übersicht über die Düsenprüfbedingungen

Overview of nozzle test conditions

insgesamt der Slabcooler Eco ist gegenüber der Düse vom Typ Mastercooler vergrößert.

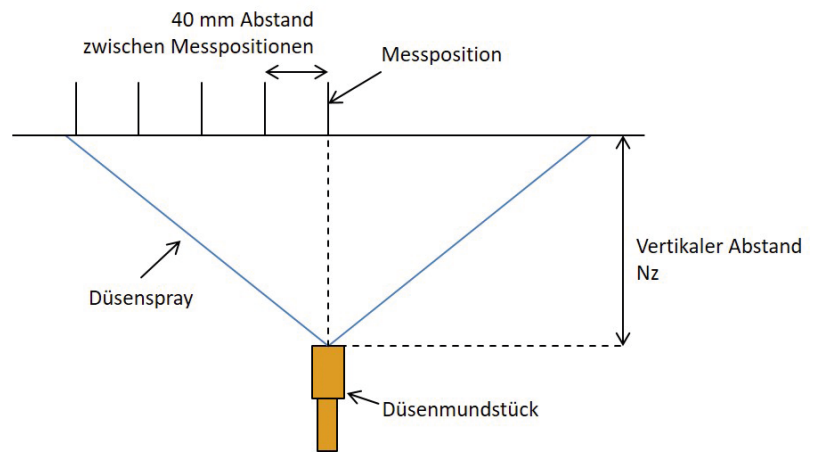
In beiden Fällen ist die maximale Kühlleistung der Düsen vom Typ Slabcooler Eco gleich oder besser als diejenige der Düsen vom Typ Mastercooler. Bei mittleren und niedrigen Wasservolumenströmen werden gleiche Kühlleistungen bei reduziertem Luftverbrauch erzielt.

## Fazit

Die neue Düsenbaureihe Slabcooler Eco wurde entwickelt, um den steigenden Anforderungen im Bereich Energieeffizienz in der Stahlindustrie Rechnung zu tragen. Diese neue Düsenbaureihe liefert nicht nur die geforderte Leistung, sondern bietet auch eine größere Flexibilität bei der Kühlkapazität und ein großes Einsparpotenzial beim Druckluftverbrauch in der Sekundärkühlung. Messungen haben eine vergleichbare Sprühleistung der Düsenbaureihe Slabcooler Eco in Bezug auf Sprühbild und Kühleffizienz im Vergleich zur bewährten Mastercooler-Baureihe gezeigt, die bereits in zahlreichen Sekundärkühlungsanlagen weltweit im Einsatz ist.

Durch HTC-Messungen an der Universität in Leoben wurde die gleichwertige Kühleffizienz bei maximalem Betriebsdruck sowie eine verbesserte Energieeffizienz bei geringerem Betriebsdruck bestätigt. Dies sorgt für zusätzliche Flexibilität in bestehenden Anlagen, ohne dass größere Änderungen am Sekundärkühlungsanlage erforderlich sind.

Eine einfache Möglichkeit zum Vergleich der Energieeffizienz beider Düsentypen ist die Verknüpfung der gemessenen  $HTC_{mean}$ -Werte mit dem jeweiligen Wasser- und Luftvolumenströmen und -drücken. Der Parameter „ $HTC_{mean} / \text{Energieverhältnis}$ “, der durch Division von  $HTC_{mean}$  durch das Produkt von Wasser- und Luftvolumenströmen und -drücken ermittelt



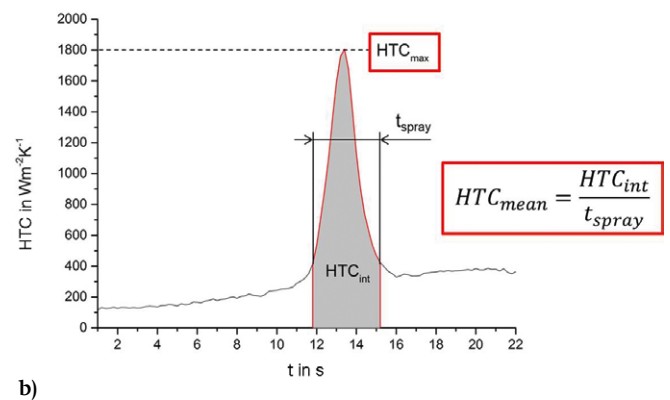
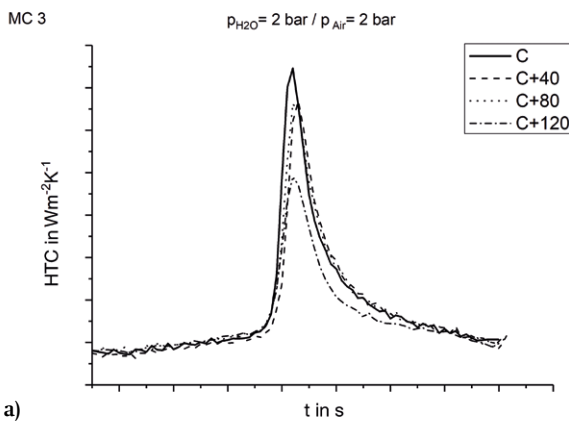
7

### Anordnung der Messpunkte bei den einzelnen Zuständen

*Scheme of measurement positions within each condition*

wird, wurde für alle Testzustände als Maß für die Energieeffizienz berechnet. Bild 13 zeigt die resultierenden relativen Werte für die Düsen vom Typ Slabcooler Eco im Vergleich zu den Ergebnissen der entsprechenden Düsen vom Typ Mastercooler. Die Ergebnisse der Mastercooler-Baureihe entsprechen jeweils 100 %. Die verbesserte Energieeffizienz und das Einsparpotenzial der neuen Düsenbaureihe ist deutlich erkennbar – insbesondere bei Bedingungen mit geringeren Wasservolumenströmen (Bedingungen 1 bis 3).

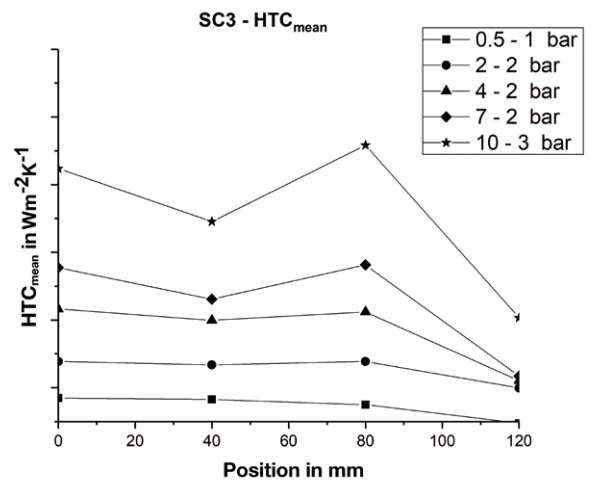
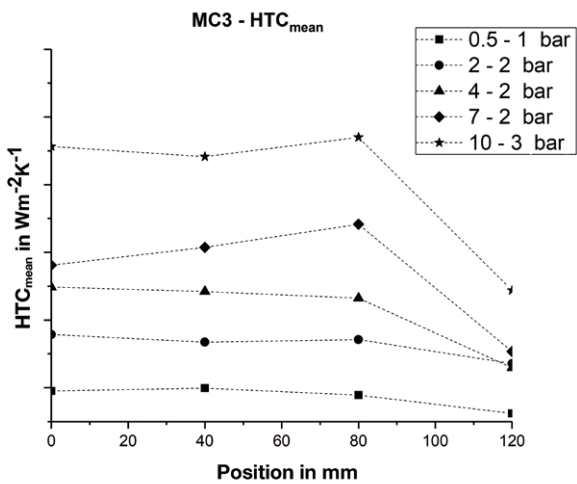
Diese Ergebnisse zeigen, dass sich durch Umstellung der vorhandenen Sekundärkühlungsanlagen auf die Technologie Slabcooler Eco eine Erhöhung der Flexibilität der Kühlung sowie eine Reduzierung des durchschnittlichen Druckluftverbrauchs in der Sekundärkühlung um 30 % realisierbar ist – bei gleichbleibender maximaler Produktivität.



8

a) Typische Ergebnisse der HTC-Messungen (MC3,  $p_{Wasser} = 2 \text{ bar}$ ,  $p_{Luft} = 2 \text{ bar}$ ), b) Beispiel für die Berechnung von  $HTC_{Mittel}$

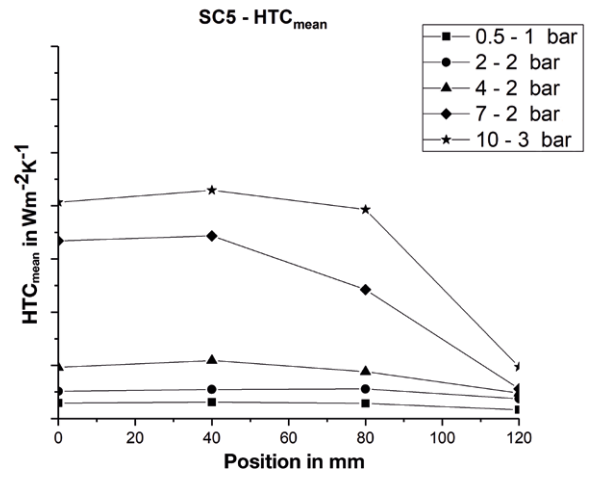
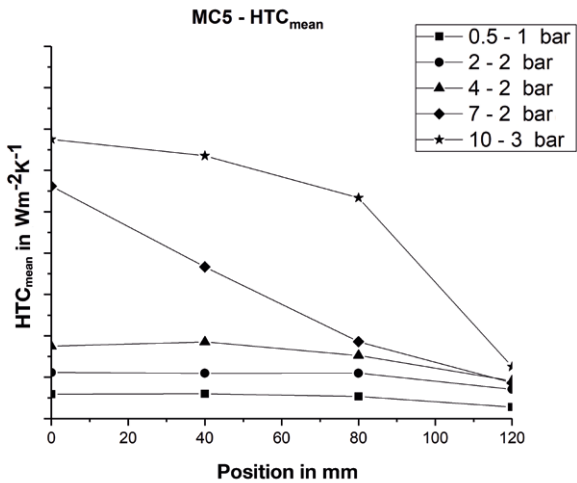
a) Typical results of HTC measurements (MC3,  $p_{water} = 2 \text{ bar}$ ,  $p_{air} = 2 \text{ bar}$ ), b) Example for  $HTC_{mean}$  calculation



9

HTC<sub>mean</sub> für MC3 (links) und SC3 (rechts)

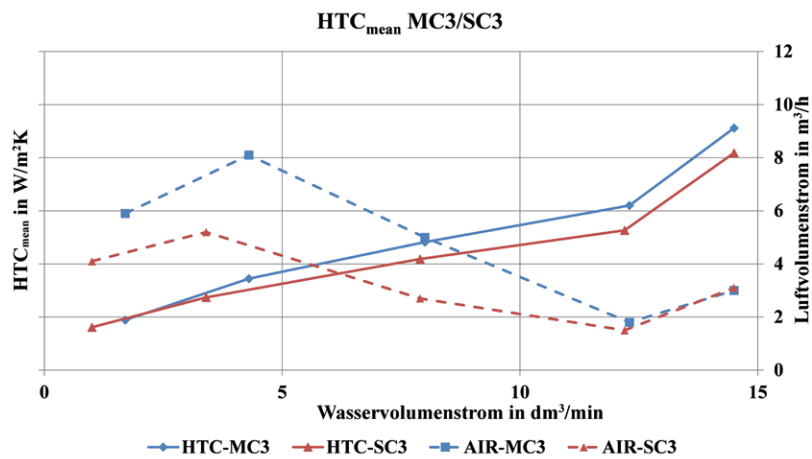
HTC<sub>mean</sub> results for MC3 (left) and SC3 (right)



10

HTC<sub>mean</sub> für MC5 (links) und SC5 (rechts)

HTC<sub>mean</sub> results for MC5 (left) and SC5 (right)



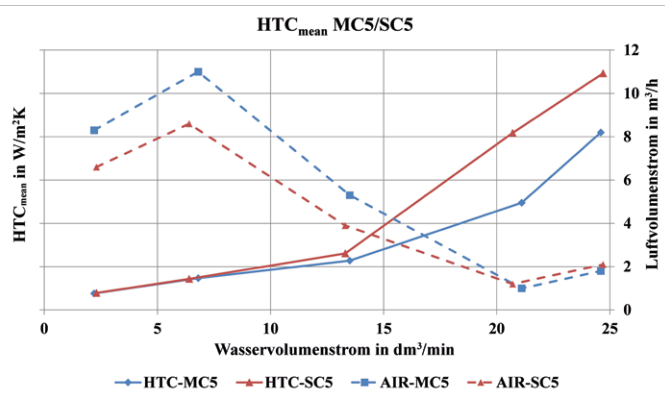
11

Vergleich des durchschnittlichen HTC<sub>mean</sub> und des Luftverbrauchs für MC3 und SC3

Comparison of average HTC<sub>mean</sub> and air consumption for MC3 and SC3

Die erforderlichen Umbauten betreffen lediglich die Spritzbalken für die Düsenmontage in Abhängigkeit vom vorhandenen Düsendesign. Idealerweise müssen nur die Spritzbalken modifiziert werden. Geringfügige Anpassungen der Sekundärkühlsteuerung sind eventuell zur Kompensation der volumenstromspezifisch modifizierten Kühlleistung der Düsen vom Typ Slabcooler Eco im Vergleich zum vorhandenen Düsentyp erforderlich.

Das Energieeinsparpotenzial bei einer Stranggießanlage ist von ihrem jeweiligen Design und hauptsächlich vom bestehenden Luftverbrauch abhängig. Als Beispiel wird eine zweisträngige Brammenstranggießanlage mit einer maximalen Druckluftkapazität von 16 000 m<sup>3</sup>/h (8 000 m<sup>3</sup>/h pro Strang) herangezogen. Als durchschnittlicher Luftverbrauch wird der Verbrauch bei 50 % der maximalen Kühlkapazität angenommen; als Betriebszeit werden 20 Stunden täglich an 300 Tagen pro Jahr angenommen. Bei diesem Beispiel würde sich das jährliche Luftverbrauchsparpotenzial, das 30 % des durchschnittlichen

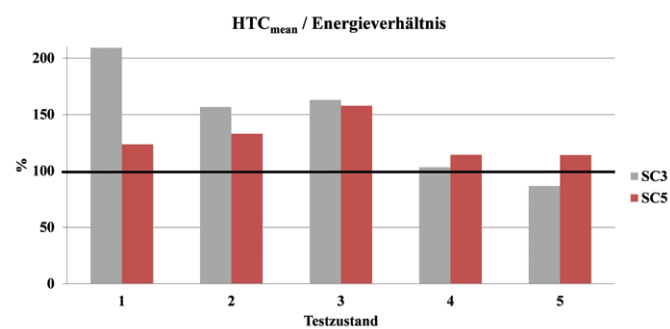


12

Vergleich des durchschnittlichen  $HTC_{mean}$  und des Luftverbrauchs für MC5 und SC5

Comparison of average  $HTC_{mean}$  and air consumption for MC5 and SC5

Druckluftverbrauchs entspricht, auf ca. 14,4 Mio. m<sup>3</sup>/h belaufen. In Abhängigkeit von den jeweiligen Eigenschaften der Stranggießanlage kann das Lufteinsparpotenzial in Bezug auf Druckluftverbrauch, zugehörige Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen beträchtlich sein – insbesondere vor dem Hintergrund der geringen Investitionskosten.



13

Energieeffizienz der Düsen vom Typ Slabcooler Eco im Vergleich zu Mastercooler (100 %)

Energy efficiency comparison for Slabcooler Eco types versus Mastercooler (100 %)

Aktualisierter Vortrag von der AISTech 2018 am 7. Mai 2018 in Pittsburgh, USA.

Robert Wolff, Jürgen Frick, Lechler GmbH, Metzingen, Deutschland; Christian Bernhard, Matthias Taferner, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich. [juergen.frick@lechler.de](mailto:juergen.frick@lechler.de)

## LITERATUR

- [1] Arth, G.; Taferner, M.; Bernhard, C.: Experimental and numerical investigations on cooling efficiency in the secondary cooling zone during continuous casting of steel, Proc. METEC & 2nd ESTAD 2015, 15.-19. Juni 2015, Düsseldorf.