Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 91 (1999)
Heft: 7-8

Artikel: Hydraulische Strömungsmodellierung für einen Stahlverteilbehälter (Tundisch)
Autor: Hollenstein, Roland / Kühnemund, Martin / Hermann, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940071

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Hydraulische Strömungsmodellierung für einen Stahlverteilbehälter (Tundish)

Roland Hollenstein, Martin Kühnemund, Christian Herrmann

Zusammenfassung

Mittels hydraulischer Modellversuche wird der Einfluss von verschiedenen Einbauten auf das Strömungsverhalten in einem T-förmigen, dreiadrigen Stahlverteilbehälter (Tundish) aufgezeigt.

Die ähnliche kinematische Viskosität ν zwischen flüssigem Stahl ($\nu_{St} = 0{,}65 \cdot 10^{-6}\,m^2/s$, $T = 1550\,°C$) und Wasser ($\nu_W = 1{,}055 \cdot 10^{-6}\,m^2/s$, $T = 20\,°C$) erlaubt eine hydraulische Modellierung nach Froude, im Massstab 1:1.

Gemessene Konzentrationsverteilungsfunktionen mit NaCl (Kochsalz) als Tracer geben Aufschluss über die Leistungsfähigkeit des Tundish betreffend der Ausscheidung von unerwünschten Einschlüssen.

Die Einbauten im Tundish haben die vordergründige Aufgabe, die eintauchende Strömung aus der Giesspfanne an die Oberfläche der Schmelze zu lenken. Diese Umlenkung kann passiv mit Dämmen und Wänden erfolgen oder aktiv mit Spülbalken. Bei den passiven Massnahmen sind je nach Dammhöhe und Intensität der umgelenkten Strömung unterschiedliche Leistungsfähigkeiten festzustellen. Die aktive Massnahme mit Spülbalken zeigt sowohl bei unterschiedlichen Gasmengen als auch bei verschiedenen Spülbalkenlagen eine genügende bis gute Leistungsfähigkeit.

1. Einleitung

Die Herstellung von Rohstahl erfolgt heute entweder im Konverter aus Roheisen oder im Elektrolichtbogenofen auf Schrottbasis. Nach Legieren, Heizen und Homogenisieren des Stahls in der nachgestellten Sekundärmetallurgie wird in der darauffolgenden Prozessstufe der Stahl in eine Stranggussanlage vergossen. Dabei fliesst der Stahl aus der Giesspfanne in den Stahlverteilbehälter (Tundish) und anschliessend in die Kokillen, wo der flüssige Stahl erstarrt. Als sogenannte Knüppel wird der Stahl kontinuierlich aus den Kokillen gezogen. Zur weiteren Verarbeitung gelangen die Knüppel als Halbfabrikate ins Walzwerk.

Der Tundish dient in erster Linie zur Zuführung des Stahls in die Kokillen und zur Abscheidung von unerwünschten, nichtmetallischen Einschlüssen an der Schmelzoberfläche. Im Sommer 1998 ersetzte die Firma von Moos Stahl AG die alte Stranggussanlage durch eine neue mit drei Strängen und einem T-förmigen Tundish (Bild 1). Hydraulische Modellversuche zur Leistungssteigerung des alten Tundish, an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETHZ), zeigten eine gute Übertragbarkeit für die Strömung im Stahltundish.

Der Bereich mit der Pfropfenströmung und das gut durchmischte Volumen bilden den aktiven Bereich des Tundish (Bild 2). Das gut durchmischte Volumen beschränkt sich vorwiegend auf den stark turbulenten Einlaufbereich (Bild 1). Der Bereich der Pfropfenströmung befindet sich auf dem Weg, den die Strömung zwischen dem gut durchmischten Volumen und den Auslässen des Tundish zurücklegt. Bei einer reinen Pfropfenströmung strömt der Stahl wie durch ein Rohr durch das umgebende Medium, ohne seitliche Mischvorgänge. Das Totvolumen ist der Bereich des Tundish, welcher nur schwach oder gar nicht durchströmt wird.

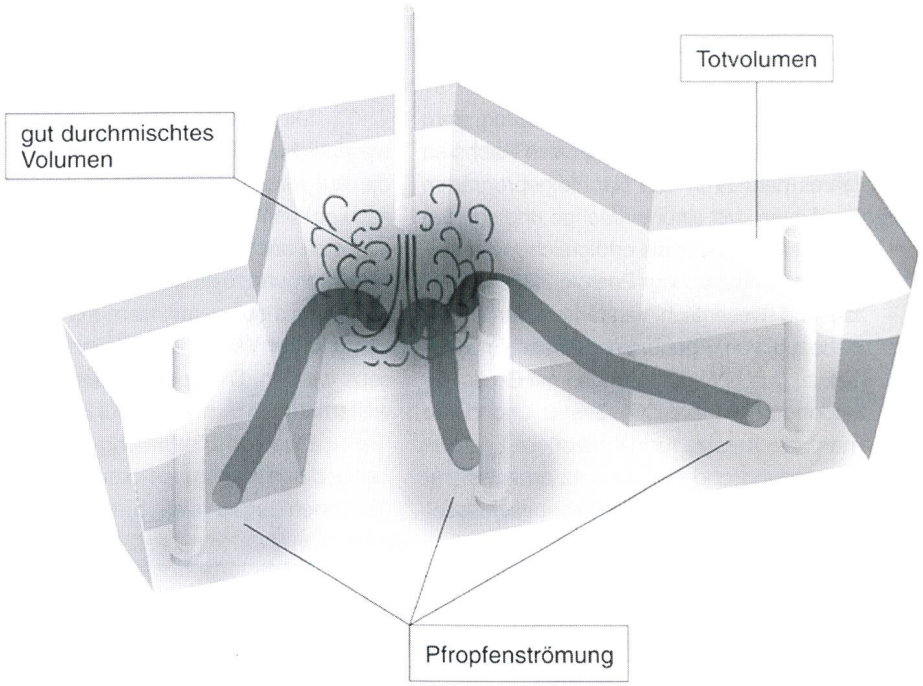


Bild 1. T-förmiger Tundish mit drei Auslässen (Strängen) und den verschiedenen Strömungsbereichen.

2. Beurteilung der Strömung im Tundish

2.1 Theoretisches Strömungsmodell

Das Strömungsverhalten im Tundish kann durch drei verschiedene Strömungsbereiche charakterisiert werden (Bild 1).

Es sind dies ein Bereich mit Totvolumen ν_t, ein Bereich, welcher von einer Pfropfenströmung ν_{pf} (engl.: plug flow) eingenommen wird, und ein gut durchmischtes Volumen ν_{gd}.

Im allgemeinen ist eine genaue Abgrenzung der einzelnen Strömungsbereiche nicht möglich.

2.2 Aufenthaltsdauerverteilung der Schmelze

Die Quantifizierung der Strömungsbereiche erfolgt über die Messung der Durchströmungsdauer bzw. Aufenthaltsdauer von markierten Volumenelementen des Wassers, für den Weg vom Einlauf zu den Auslässen. Mit NaCl (Kochsalz) als Tracer wird der zeitliche Verlauf der NaCl-Konzentrationsverteilung

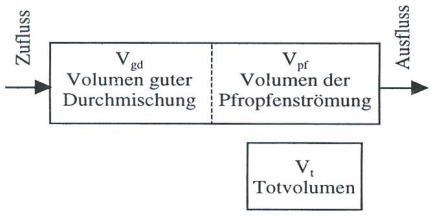


Bild 2. Schematische Darstellung der Strömungsbereiche in einem Tundish.

bei den Auslässen gemessen. Die NaCl-Zugabe erfolgt in den Zulaufstrahl während 5 bis 6 Sekunden. Die bei den Auslässen gemessene NaCl-Konzentrationsverteilung charakterisiert die Aufenthaltsdauerverteilung der Stahlschmelze.

Bild 3 zeigt den Verlauf von typischen Aufenthaltsdauerverteilungen mit einer Messdauer von 30 Minuten.

- t_i: Initialzeit. Zeit vom Beginn der NaCl-Zugabe im Schattenrohr bis zur ersten Reaktion bei den Auslässen.
- t_p: Zeit vom Beginn der NaCl-Zugabe im Schattenrohr, bis die maximale Konzentration c_p erreicht ist.
- t_m: Mittlere Aufenthaltsdauer. Zeit vom Beginn der NaCl-Zugabe im Schattenrohr bis zum Schwerpunkt der Funktion der Aufenthaltsdauerverteilung.

  $t_m = \Sigma[c_i \cdot t_i] / \Sigma c_i$.
- t_{th}: Theoretische Aufenthaltsdauer. Charakteristische Zeit für den mittleren Stofffluss im Tundish.

  $t_{th} = V_{Tundish} / Q_Z$.

  $V_{Tundish}$ = Tundishvolumen (1).

  Q_Z = Zuflussmenge in den Tundish (l/s).
- c_p: Maximale Konzentration der Aufenthaltsdauerverteilung bei den Auslässen.

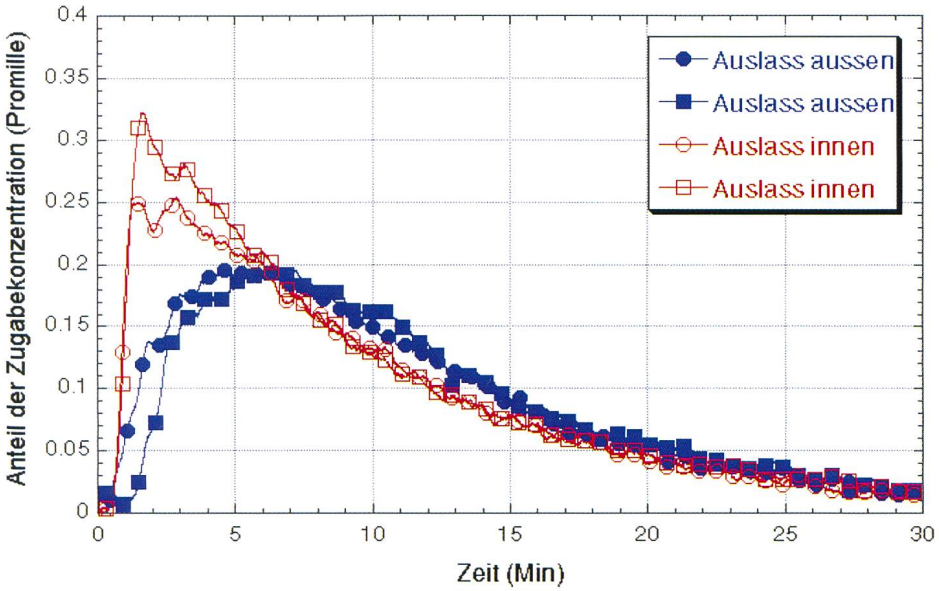


Bild 3. Typische NaCl-Aufenthaltsdauerverteilungen bei den verschiedenen Auslässen.

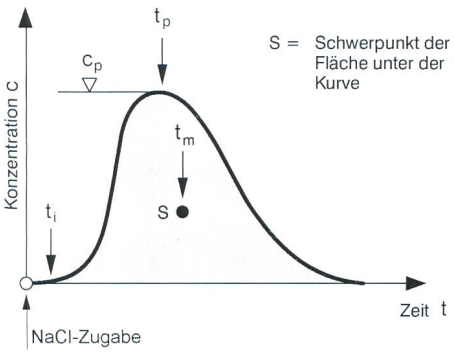


Bild 4. Schema der Aufenthaltsdauerverteilung mit den Zeiten t_i, t_p und t_m und der maximalen Konzentration c_p.

2.3 Strömungsbereiche im Tundish

Für die Berechnung der Strömungsbereiche werden verschiedene anordnungstypische Zeiten t_i, t_p, t_m und t_{th} und die maximale Konzentration c_p aus der Aufenthaltsdauerverteilung herangezogen (Bild 4).

Die theoretische Aufenthaltsdauer t_{th} entspricht der Zeit, welche ein Teilchen theoretisch benötigt, um das gesamte Tundishvolumen einmal zu durchströmen. Ist die gemessene mittlere Aufenthaltsdauer t_m eines Teilchens im Tundish kleiner als die theoretische Aufenthaltsdauer t_{th}, so wird ein gewisser Bereich des Tundish vom Teilchen nicht oder nur langsam durchströmt, d. h. der Tundish hat einen Anteil an Totvolumen V_t.

Die Aufenthaltsdauer der Pfropfenströmung V_{pf} im Tundish ist durch die Zeit t_p bis zur Erreichung der maximalen Konzentration c_p bestimmt. Bei einer reinen Pfropfenströmung (ohne seitlichen Mischprozess) erfolgt kein kontinuierlicher Anstieg der Aufenthaltsdauerverteilung (c_p bei t_i und damit $t_i = t_p$). In Wirklichkeit findet aber immer eine seitliche Durchmischung der Pfropfenströmung statt. Dies wird bei den Aufenthaltsdauerverteilungen deutlich ersichtlich, wenn die maximale Konzentration c_p verzögert zu den ersten Teilchen am Messort eintrifft (Bild 4). Eine mittlere Aufenthaltsdauer der Pfropfenströmung resultiert aus dem Mittel der Zeiten t_i und t_p.

Mit Hilfe der dimensionslosen Zeiten:

$\Theta_i = t_i / t_{th}$, $\Theta_p = t_p / t_{th}$ und $\Theta_m = t_m / t_{th}$

lassen sich nun die Bereiche V_t, V_{pf} und V_{gd} für die verschiedenen Tundishanordnungen ermitteln (*Mazumdar* et al., 1997, *Knoepke* und *Mastervich*, 1990).

Anteil des Totvolumens vom Gesamtvolumen des Tundish:

$$V_t = 1 - \Theta_m \qquad \text{(Gl. 1)}$$

Anteil des Volumens der Pfropfenströmung vom Gesamtvolumen des Tundish:

$$V_{pf} = [\Theta_i + \Theta_p] \cdot {}^1/_2 \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Anteil des gut durchmischten Volumens vom Gesamtvolumen des Tundish:

$$V_{gd} = 1 - V_t - V_{pf} \qquad \text{(Gl. 3)}$$

3. Designkriterien für einen Tundish

3.1 Anforderungen an die Strömung in einem Tundish

Die wichtigste Anforderung an das Strömungsverhalten für den Tundish ist eine maximale Ausscheidung der unerwünschten Einschlüsse. Eine effiziente Ausscheidung unerwünschter Einschlüsse verlangt eine beruhigte Strömung und eine zeitlich und mengenmässig gleiche Zuströmung zu allen Auslässen.

3.2 Bedingungen an einen Tundish

Erfahrungen (*Mazumdar* et al., 1997, VAW I, 1998, VAW II, 1999) haben gezeigt, dass für eine maximale Ausscheidung der unerwünschten Einschlüsse folgende Bedingungen zu erfüllen sind:

- Einschränkung des turbulenten Einlaufbereiches durch eine Trennwand (Einlaufkammer) für die Bildung einer beruhigten Strömung im Bereich der Auslässe (Auslasskammer).
- Umlenkung der Strömung aus den Öffnungen in der Trennwand an die Oberfläche der Schmelze in der Auslasskammer. Die Umlenkung kann passiv (Dämme) oder aktiv (Spülbalken) erfolgen.
- Gleiche Zuströmung zu allen Auslässen durch gleiche Aufenthaltsdauerverteilungen beim inneren Auslass und bei den äusseren Auslässen.
- Eine maximale Ausscheidung der unerwünschten Einschlüsse ist bei maximalem Pfropfenvolumen V_{pf} zu erwarten.

Eine optimale Nutzung des vorhandenen Tundishvolumens erfolgt durch eine Minimierung des Totvolumens V_t. Im Idealfall ist $V_t = 0$.

Eine gleiche Zuströmung zu allen Auslässen bewirkt in der Regel auch ein grosses Pfropfenvolumen V_{pf}.

4. Hydraulische Modellversuche

4.1 Allgemeines

Unter Berücksichtigung der Modellgesetze nach Froude und Reynolds erlaubt die ähnliche kinematische Viskosität ν zwischen flüssigem Stahl ($\nu_{St} = 0{,}65 \cdot 10^{-6}$ m²/s, T = 1550 °C) und Wasser ($\nu_w = 1{,}055 \cdot 10^{-6}$ m²/s, T = 20 °C) eine hydraulische Modellierung im Massstab 1:1.

4.2 Modellgesetze

Die Strömung im Tundish ist eine Freispiegelströmung und wird von der Schwerkraft angetrieben. Ein Vergleich zwischen Modell und Prototyp ist dann möglich, wenn das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Schwerkräften im Modell und im Prototyp gleich ist. Dieses Verhältnis wird durch die sogenannte Froudezahl Fr charakterisiert.

Gemäss dem Froudegesetz gilt:

$$Fr = U / (g \cdot L)^{1/2} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

U: charakteristische Geschwindigkeit; L: charakteristische Länge; g: Erdbeschleunigung

Neben den grossskaligen Strömungen, welche von der Schwerkraft angetrieben werden, finden im Tundish jedoch auch Wirbelbildung und Vermischungsprozesse statt, welche stark von den Reibungskräften beeinflusst werden.

Diese Vorgänge sind im Modell und im Prototyp ähnlich, falls das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften im Modell und im Prototyp gleich ist. Dieses Verhältnis wird durch die sogenannte Reynoldszahl Re charakterisiert.

Gemäss dem Reynoldsgesetz gilt:

$$Re = U \cdot L / \nu \qquad \text{(Gl. 5)}$$

U: charakteristische Geschwindigkeit; L: charakteristische Länge; ν: kinematische Viskosität

Obschon durch die ähnlichen kinematischen Viskositäten das Reynoldsgesetz mit einem Modellmassstabsfaktor λ = 1,6 problemlos erfüllt werden kann, wird ein Modellmassstab von 1:1 gewählt. Dadurch sind Untersuchungen von realen Einbauten möglich.

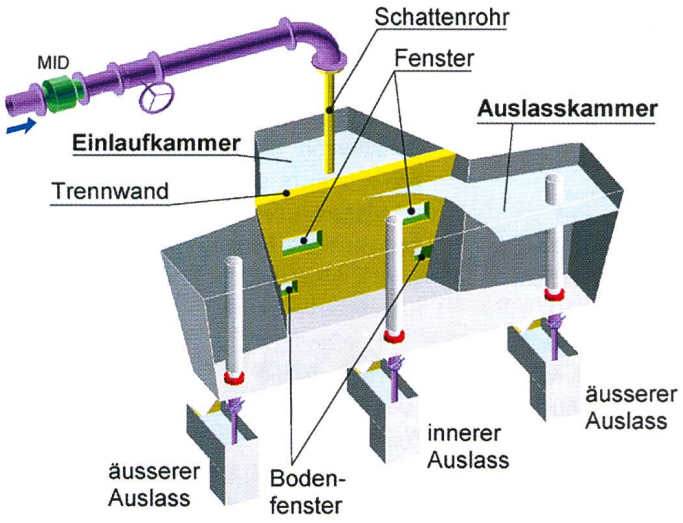


Bild 5. Tundish mit Trennwand zwischen Einlauf- und Auslasskammer (Standardanordnung ST). Tundishlänge = 2,8 – 3,4 m, Breite in Mitte = 1,45 – 1,75 m, Füllhöhe = 0,80 m.

Bei einem Modellmassstab von 1:1 ändert sich die Reynoldszahl, bezogen auf die Eintrittsgeschwindigkeit und den Durchmesser des Strahles beim Eintauchen von Re = 236000 für den Stahltundish auf Re = 145400 für das hydraulische Modell. Der relativ kleine Modellfehler bezüglich des Reynoldsgesetzes und die grossen Reynoldszahlen erlauben bei Verwendung des Froudegesetzes einen Vergleich der Strömungsvorgänge zwischen Prototyp und hydraulischem Modell. Thermodynamische Vorgänge werden im hydraulischen Modell nicht nachgebildet.

Verschiedene Untersuchungen von wasserbetriebenen Tundishmodellen (*Sahai* und *Ahuja,* 1990, *Knoepke* und *Mastervich,* 1990, *Dorricott* et al., 1991) zeigen, dass bei einer Anwendung des Froudegesetzes eine gute Übereinstimmung der Strömungszustände zwischen hydraulischem Modell und Stahltundish erreicht wird. Werden im hydraulischen Modell im Massstab 1:1 die gleichen Volumenströme und damit die gleichen Geschwindigkeiten wie im Prototyp erzeugt, ist das Froudegesetz erfüllt.

4.3 Hydraulisches Modell

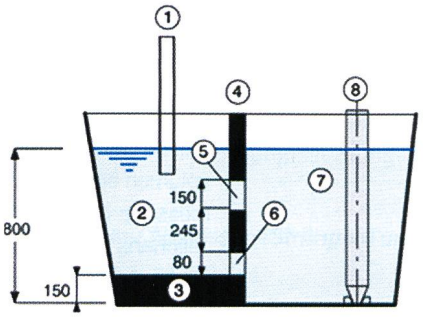
4.3.1 Modellkonstruktion

Durch Öffnungen in der Trennwand (Bild 5, Bild 6) fliesst die Stahlschmelze aus der Einlaufkammer in die strömungsberuhigte Auslasskammer.

Der Tundish mit eingebauter Trennwand (Bild 5) wird als Standardanordnung ST betrachtet. Die Zugabe der Tracer in den Zuflussstrahl erfolgt über eine Öffnung im Schattenrohr.

4.3.2 Betriebszustände

Die für die Modellierung massgebenden Faktoren sind die Zuflussmenge Q_Z und die Füll-



① Schattenrohr
② **Einlaufkammer**
③ Podest
④ Trennwand
⑤ Fenster
⑥ Bodenfenster
⑦ **Auslasskammer**
⑧ Monobloc Stopper

Bild 6. Querschnitt durch den Tundish mit Trennwand zwischen Einlauf- und Auslasskammer (Standardanordnung ST).

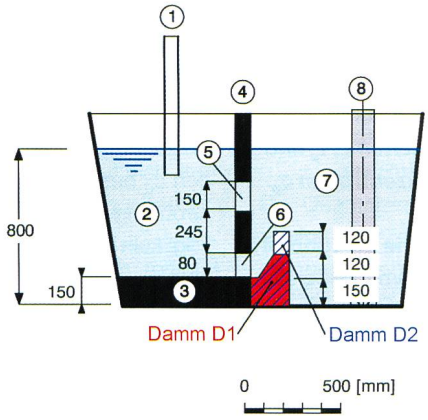


Bild 7. Querschnitt durch den Tundish mit Dämmen (Anordnungen D1 und D2).

höhe h während des regulären Betriebs. Die Füllhöhe beträgt h = 0,8 m und die Zuflussmenge Q_Z = 2,96 l/s.

4.4 Tundisheinbauten

4.4.1 Dämme

Als einfache passive Massnahme sollen die Strahlen aus den Bodenfenstern über einen Damm an die Oberfläche in der Auslasskammer gelenkt werden.

Es werden zwei verschiedene Dämme D1 und D2 untersucht. Der Damm D2 ist um 12 cm höher als D1 (Bild 7).

4.4.2 Spülbalken

Als aktive Massnahme zur Strahlumlenkung werden bei den Bodenfenstern Spülbalken in verschiedenen Lagen angeordnet. Als Grundpositionen gelten die Anordnungen parallel (Anordnung BP) und senkrecht zur Trennwand (Anordnung BS).

Für die Bestimmung des Einflusses der Spülbalkenlage werden zusätzlich weitere Positionen untersucht (Bild 8).

Neben den verschiedenen Einbauten (Dämme, Spülbalken) wird auch der Einfluss der Fenster und die Gasmenge aus den Spülbalken untersucht. Dabei wird variiert zwischen offenen (Index F) und geschlossenen Fenstern (Index **F**). Die Gasmenge aus den Spülbalken wird entsprechend der Modellähnlichkeit variiert zwischen 0,5 l/s (Index 05) und 1,0 l/s (Index 10).

4.5 Modellierung der Begasung

Die Beeinflussung der Strömung durch eine Begasung mit Spülbalken ist abhängig von der Grösse und der Auftriebsgeschwindigkeit der Gasblasen.

Unterschiedliche Druck und Temperaturzustände im Stahltundish verlangen für die Modellierung in einem hydraulischen Modell die Berücksichtigung der thermischen Prozesse. Die Verknüpfung des Druckes p und der Temperatur T mit dem Gasvolumen V wird in der thermischen Zustandsgleichung beschrieben.

$$p = p\,(V, T) \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Als grobe Näherung wird die thermische Zustandsgleichung für reale Gase (*Wegener,* 1989) verwendet, die auch als Van der Waalssche Zustandsgleichung bekannt ist:

$$(p + a / V_m^2) \cdot (V_m - b) = R_m \cdot T \qquad \text{(Gl. 7)}$$

Die Zahl R_m ist die universelle Gaskonstante, welche unabhängig von der Art der Gasmoleküle ist. Das molare Volumen V_m ändert je nach Druck- oder Temperaturverschiebung. Unter der Annahme einer konstanten Stoffmenge resultiert aus der Änderung des molaren Volumens V_m die Volumenänderung des Stickstoffvolumens. Die Parameter a und b sind stoffspezifische Konstanten. Die Beantwortung der vorliegenden Fragestellung über die Modellierung der aufsteigenden Stickstoffblasen im flüssigen Stahl wird durch einen örtlich und zeitlich variablen Zustand der Gasblasen erschwert. Zur Bestimmung der Volumenänderung des Stickstoffes werden folgende Annahmen getroffen:

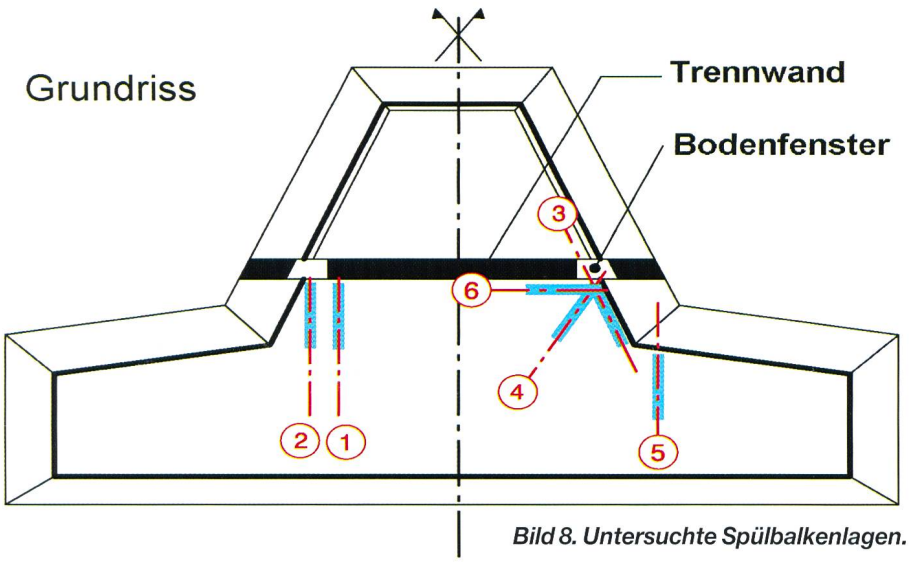


Bild 8. Untersuchte Spülbalkenlagen.

Spülbalken senkrecht zur Trennwand, am Rand des Bodenfensters	Spülbalken parallel zur seitlichen Wand der Mischkammer	Spülbalken weiter in Auslasskammer eingerückt
Anordnung BS Spülbalken senkrecht zur Trennwand, in der Mitte des Bodenfensters	Spülbalken in Winkelhalbierenden zwischen Trennwand und Pos. 3	**Anordnung BP** Spülbalken parallel zur Trennwand

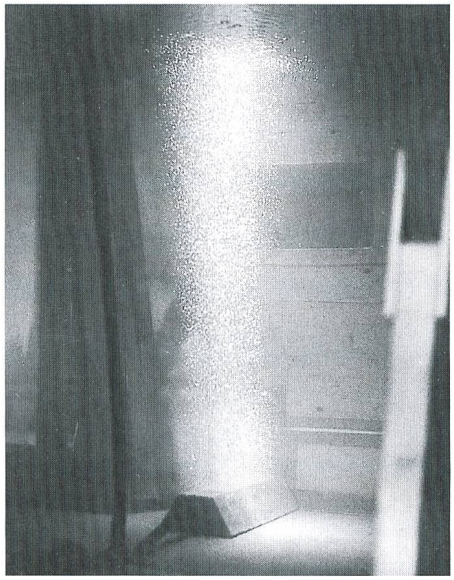


Bild 9. Begasung im hydraulischen Modell. Die Begasung ist abhängig von der Grösse und der Auftriebsgeschwindigkeit der Gasblasen.

1. Verhalten der Gasblasen am Tundishboden:
   Der eingepresste Stickstoff erhitzt sich plötzlich, was eine Volumenexpansion entsprechend einer Temperaturausdehnung bei konstantem Druck p zur Folge hat.
2. Verhalten der Gasblasen an der Oberfläche der Schmelze:
   Nach dem Erhitzen des Stickstoffes steigt die Gasblase bei konstanter Temperatur T unter ständig abnehmendem ferrostatischem Druck p_f an die Oberfläche der Schmelze, wo nur noch der Atmosphärendruck p_o vorhanden ist.

Wegen der fehlenden Temperaturausdehnung und der sehr kleinen Druckdifferenz im hydraulischen Modell gilt die berechnete Volumenausdehnung des Stickstoffes in der Stahlschmelze näherungsweise für die zu verwendende Luftmenge im hydraulischen Modell. Im vorliegenden Fall ergibt sich aus den oben erwähnten Annahmen für eine Stickstoffmenge von 0,08 l/s beim Stahltundish eine Luftmenge von 0,5 l/s bis 1,0 l/s beim hydraulischen Modell.

5. Resultate und Diskussion

5.1 Allgemeines

Entsprechend den geforderten Bedingungen (Abschnitt 3.2) werden die Aufenthaltsdauerverteilungen der verschiedenen Einbauten bewertet.

Die Bedingung für die Bildung einer strömungsberuhigten Kammer ist durch den Einbau der Trennwand erfüllt. Ebenso führen alle verwendeten Einbauten zu einer Umlenkung der Strömung an die Oberfläche der Schmelze.

5.2 Gleiche Stahlqualität bei allen Auslässen

Mit einer gleichen Aufenthaltsdauerverteilung für alle Auslässe resultiert für alle Stränge eine gleiche Stahlqualität betreffend der unerwünschten Einschlüsse. Charakteristisch für eine gleiche Stahlqualität bei allen Auslässen sind gleiche anordnungstypische Zeiten t_p und t_m beim inneren Auslass und bei den äusseren Auslässen. Der Quotient r der anordnungstypischen Zeiten zwischen dem inneren Auslass und den äusseren Auslässen sollte deshalb bei 1,0 liegen. Analog werden auch die maximalen Konzentrationen c_p miteinander verglichen:

$r_p = t_{p,innen} / t_{p,aussen}$,
$r_m = t_{m,innen} / t_{m,aussen}$,
$r_c = c_{p,innen} / c_{p,aussen}$.

In Bild 10 sind die Verhältnisse r_p, r_m und r_c für ausgewählte Tundishanordnungen grafisch dargestellt.

Es wird deutlich ersichtlich, dass vor allem bei den Anordnungen mit Spülbalken (Anordnungen BP und BS) eine annähernd gleiche Zuströmung zu den verschiedenen Auslässen erfolgt. Die Anordnungen mit geschlossenen Fenstern (**F**) haben eine deutlich bessere Zuströmung zu den verschiedenen Auslässen, als die Anordnungen mit offenen Fenstern (F). Die Luftmenge aus den Spülbalken (05 oder 10) und auch die Spülbalkenlage haben keinen oder nur einen geringfügigen Einfluss auf die Aufenthaltsdauerverteilung.

5.3 Maximale Ausscheidung von unerwünschten Einschlüssen

Die Berechnung der Strömungsbereiche beziehungsweise Volumenanteile V_t (Totvolumen), V_{pf} (Pfropfenströmungsvolumen) und V_{gd} (gut durchmischtes Volumen) für die verschiedenen Anordnungen im Tundish erfolgt gemäss den Gleichungen 1 bis 3.

Durch eine Umlenkung der Strömung an die Oberfläche der Schmelze nimmt das Pfropfenvolumen V_{pf} zu (Bild 11). Dabei ist wie beim Vergleich der Aufenthaltsdauerverteilungen eine deutliche Verbesserung bei den Versuchen mit geschlossenen Fenstern (**F**) zu beobachten. Die Luftmenge aus den Spülbalken (05 oder 10) und die Spülbalkenlage führen nur zu geringfügigen Unterschieden.

5.4 Minimales Totvolumen

Für die Anordnungen mit Spülbalken wird kein oder nur ein sehr kleines Totvolumen V_t festgestellt (Bild 12). Das teilweise grosse Totvolumen V_t bei der Standardanordnung ST resultiert hauptsächlich aus der fehlenden Umlenkung der Strömung an die Oberfläche. Bei der Anordnung D2 wird die Strömung zum inneren Auslass gelenkt, womit die äusseren Auslässe vernachlässigt werden.

6. Folgerungen und Empfehlungen

Die Abtrennung des Einlaufbereiches (Einlaufkammer) vom Auslassbereich (Auslasskammer) durch die Trennwand ist eine zwingende Massnahme, um eine beruhigte Strömung für die Ausscheidung der unerwünschten Einschlüsse zu erhalten.

Die Strömung aus der Einlaufkammer ist zu schwach, um selbständig eine breite Verteilung der Stahlschmelze in der Auslasskammer zu bewirken. Mit der Einpressung von Gas über die Spülbalken wird Energie eingetragen, welche durch eine breite Verteilung in der Auslasskammer eine maximale Nutzung des Tundishvolumens bewirkt und eine Vergleichmässigung der Stahlschmelze unterstützt. Zusätzlich bewirkt der Einsatz von Spülbalken eine lange mittlere Aufenthaltsdauer der Schmelze, was für die Ausscheidung von unerwünschten Einschlüssen vorteilhaft ist. Eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit aus den Bodenfenstern bei geschlossenen Fenstern (Index **F**) bewirkt in der Regel eine positive Beeinflussung der Aufenthaltsdauerverteilung.

Die Variation der Gasmenge aus den Spülbalken mit 0,5 l/s (Index 05) und 1,0 l/s (Index 10) führt zu keinen nennenswerten Unterschieden bei den Aufenthaltsdauerverteilungen. Als Bestvariante der untersuchten Möglichkeiten wird die Verwendung von Spülbalken empfohlen. Ohne Fenster in der Trennwand und nur mit den Bodenfenstern für die Zuströmung in die Auslasskammer wird neben einer kontrollierteren Strömung auch eine höhere Stabilität der Trennwand erreicht.

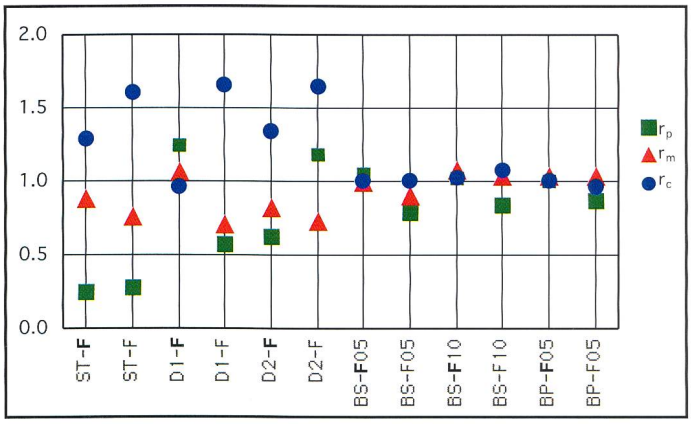


Bild 10. Quotienten der anordnungstypischen Zeiten und der maximalen Konzentrationen zwischen dem inneren Auslass und den äusseren Auslässen.
$r_p = t_{p,innen} / t_{p,aussen}$,
$r_m = t_{m,innen} / t_{m,aussen}$,
$r_c = c_{p,innen} / c_{p,aussen}$.

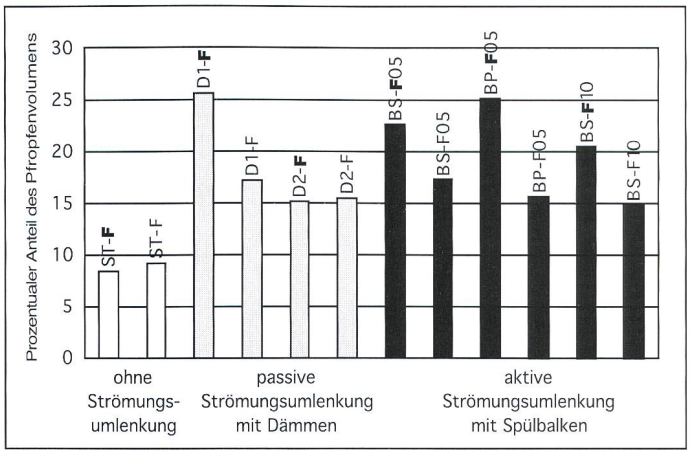


Bild 11. Volumenanteile des Pfropfenvolumens V_{pf} beim inneren Auslass für verschiedene Anordnungen.

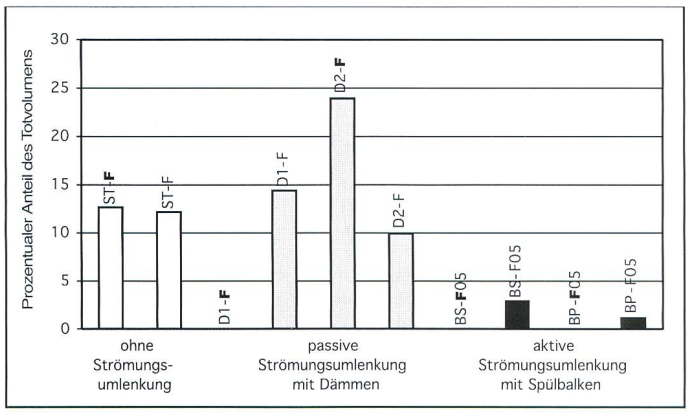


Bild 12. Volumenanteile des Totvolumens V_t beim inneren Auslass für verschiedene Anordnungen.

Die Lage der Spülbalken ist für die Aufenthaltsdauerverteilung von untergeordneter Bedeutung. Die Lage ist jedoch wichtig für eine geeignete Handhabung des Spülbalkeneinbaus und sollte den Ablauf des Tundishbetriebes möglichst wenig behindern.

Dank

Die Wahl der zu untersuchenden Tundishanordnungen erfolgte gemeinsam mit der Firma von Moos Stahl AG, Luzern. Für die konstruktive Zusammenarbeit und für das Vertrauen sei der Firma von Moos deshalb herzlich gedankt.

Literaturverzeichnis

Mazumdar, D., et al. (1997): Hydrodynamic Performance of Steelmaking Tundish Systems: a comparative Study of three different Tundish Designs, steel research 68 No. 7.

Sahai, Y., Ahuja, R., (1990): Fluid Dynamics of continuous Casting Tundishes – Physical Modeling, Iron and Steel Society, Inc., Tundish Metallurgy Vol. 1.

Knoepke, J., Mastervich, J., (1990): Water Modeling Inland Steel's No. 3 Combination Caster Tundish, Iron and Steel Society, Inc., Tundish Metallurgy Vol. 1.

Dorricott, J. D., et al., (1991): Asymmetric Tundish Design and Flow Control Principles in Multistrand Billet and Bloom Casters, Iron and Steel Society, Inc., Tundish Metallurgy Vol. 2.

VAW I (1998): Tundish I, Strömungsuntersuchung in einem Stahlverteilbehälter, VAW-Bericht Nr. 4123, unveröffentlicht.

VAW II (1999): Tundish II, Strömungsuntersuchung in einem Stahlverteilbehälter, VAW-Bericht Nr. 4127 unveröffentlicht.

Wegener, H., (1989): Physik für Hochschulanfänger, Teubner Studienbücher.

Adressen der Verfasser:

Roland Hollenstein, dipl. Ing. ETH, VAW ETH Zürich, Gloriastrasse 37–39, CH-8092 Zürich, Telefon 01/632 41 76,

E-Mail: hollen@vaw.baum.ethz.ch

Christian Herrmann, Dipl.-Ing. (TU), von Moos Stahl AG, Postfach 2044, CH-6021 Emmenbrücke, Telefon 041/209 53 55

Martin Kühnemund, Dipl.-Ing. von Moos Stahl AG, CH-6021 Emmenbrücke, Telefon 041/209 53 14

Porträt

Antoine de Chézy
(1718–1798)

Wer kennt die Chézy-Formel nicht? Sie beschreibt den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen mittlerer Fliessgeschwindigkeit, hydraulischem Gefälle und Wassertiefe und beinhaltet des weiteren den Beiwert C nach Chézy. Heute wissen wir über die Mängel dieser ersten Fliessformel, sie begleitet uns trotz besseren Beziehungen etwa nach Gauckler-Manning-Strickler aber dennoch, etwa bei analytischen Berechnungen infolge des einfachen Aufbaus oder zur Abschätzung von komplexen Fliessverhältnissen.

Geboren am 1. September 1718 in Châlons-sur-Marne wurde er 1751 Ingénieur des Ponts et Chaussées. Diese 1747 von *J.-R. Perronnet* (1708–1794) gegründete wichtigste Ingenieurschule Frankreichs war Ausgangspunkt für das spätere Wirken Chézys, vorerst als Assistent von Perronnet, dann als Partner beim Bau einer Vielzahl von Ingenieurprojekten und schliesslich als Mitarbeiter an der Schule. Beim Tod Perronnets nach den Revolutionswirren wurde Chézy aus der Schuldirektion entlassen und erst kurz vor seinem Tod rehabilitiert.

Nach *de Prony* (1755–1839), dem Nachfolger de Chézys an der Ecole, welcher ebenfalls eine Fliessformel entwickelte, kann de Chézys Wirken folgendermassen kurz gefasst werden: «Als einer der begabtesten Ingenieure war er viel besser als sein Ruf.»

De Chézy hat die 1775 am Canal de l'Yvette entwickelte Fliessformel ausführlich anhand von Originalzitaten kommentiert. Über das Lebenswerk von de Chézy liegen ausführliche Angaben vor, so etwa von Herschel (1897) oder insbesondere von Mouret (1921).

Literatur

Herschel, C. (1897). On the origin of the Chézy formula. Journal of Engineering Sciences 18: 363–369.

Mouret, G. (1921). Antoine Chézy, Histoire d'une formule d'hydraulique. Annales des Ponts et Chaussées 91: 165–269.

WHH

Hochwasserschutz

Projekt Hochwasserschutz und Auenlandschaft Thurmündung

Mit der Genehmigung des Staatsvoranschlages 1999 durch den Kantonsrat wurde die Grundlage geschaffen, um mit den Arbeiten für das Projekt Hochwasserschutz und Auenlandschaft Thurmündung beginnen zu können. Die Projektierungsarbeiten für das umfassende Vorhaben werden von einer Kommission begleitet, in der die betroffenen Gemeinden, die interessierten Organisationen und die zuständigen Amtsstellen vertreten sind. Der Regierungsrat hat Professor *Walter Meier* als Delegierten und Vorsitzenden dieser Begleitkommission gewählt.

Die Fachstellen der Baudirektion und der Volkswirtschaftsdirektion haben die Arbeiten für das Projekt in Angriff genommen. Die organisatorischen Vorarbeiten sind in vollem Gange. Mit der Projektleitung wurde *Robert Bänziger,* Ingenieurbüro Kundert und Bänziger, Niederhasli, beauftragt. Es ist vorgesehen, dass das Vorlagenprojekt bis Mitte 2001 fertiggestellt ist. Dieses ist anschliessend durch den Kantonsrat zu genehmigen. Die Realisierung ist zudem von der Erledigung der Einsprachen im Rahmen der Konzessionserteilung für das Kraftwerk Eglisau abhängig.

Das Projekt an der Thurmündung hat den Hochwasserschutz der anliegenden Siedlungen und Landwirtschaftsgebiete und die Erhaltung und Revitalisierung des Thur-Auenwaldes zum Ziel. Beim Hochwasserereignis von 1978 sind unterhalb von Frauenfeld die Dämme der Thur an verschiedenen Stellen gebrochen. In der Folge ist ein grosser Teil des Thurhochwassers in die thurgauisch-zürcherische Thurebene geflossen und hat eine grossflächige Überschwemmung verursacht. Diese ungewollte Hochwasserspeicherung hat höhere Abflussspitzen im Unterlauf bei Andelfingen, Flaach und Ellikon am Rhein verhindert. Mit der Fertigstellung der Verstärkung und Erhöhung der Thurdämme zwischen Frauenfeld und Thalheim (voraussichtlich bis im Jahr 2000) ist nun aber im unterliegenden Bereich in Zukunft mit häufigeren und grösseren Hochwasserspitzen zu rechnen. Bei der Projektierung und Ausführung des Projektes ist dem Grundwasser besonders Beachtung zu schenken. Die Konzessionsbehörden haben den Nordostschweizerischen Kraftwerken AG (NOK) eine neue Konzession für das Kraftwerk Eglisau erteilt. Damit sind die Rahmenbedingungen für die Projektierungsarbeiten vorgegeben. Gegen die Konzessionserteilung ist allerdings noch eine Beschwerde hängig. Die Aufnahme der Projektierungsarbeiten für das Projekt Hochwasserschutz und Auenlandschaft Thurmündung ist dringlich. Der Gemeinderat von Flaach und der Verein «Rettet das Thurtal vor Überschwemmungen» haben immer wieder auf die Sicherstellung des Hochwasserschutzes hingewiesen. Die Hochwasserereignisse vom 12./13. und 22./23. Mai dieses Jahres haben die Notwendigkeit eindrücklich bestätigt. Mit dem Projekt Hochwasserschutz und Auenlandschaft Thurmündung befassen sich mehrere Fachstellen der Baudirektion und der Volkswirtschaftsdirektion. Miteinbezogen werden die Gemeinden Andelfingen, Flaach, Kleinandelfingen und Marthalen, die Kantone Schaffhausen und Zürich, das Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) und das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal) sowie die Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK). In den Projektierungsprozess sollen auch die Vereine «Rettet das Thurtal vor Überschwemmungen» (Vertreter der Gemeinden) und «Pro Thur» (Vertreter der Umweltschutzorganisationen) einbezogen werden.

Kantonale Informationsstelle, Zürich