

In der dänischen Gießerei V. Birn in Holstebro wurden zum Jahreswechsel zwei Chargenkühler mit einem Fassungsvermögen von bis zu 8 t in Betrieb genommen. Bei einer Chargenleistung von 6 t wird diese Menge in 120 s von 120 °C auf 41 °C heruntergekühlt. Diese bemerkenswerte Leistung wird mit einem klassischen Kühlverfahren erreicht, indem wie bei den verbreiteten Altsandkühlern normale Umgebungsluft durchgeblasen wird.

WOLFGANG ERNST, BRAUNSCHWEIG, LARS BIEHL, HOLSTEBRO, DÄNEMARK, UND JÜRGEN RIXEN, EUSKIRCHEN

Chargenkühlung - ein optimiertes Kühlverfahren für Altsand

Ausgangssituation

Vor zwei Jahren wurde von der dänischen Gießerei V. Birn eine neue Altsandkühlung projektiert, weil die bestehenden Fließbettkühler durch den Austausch der sechsten und siebten Formlinie (Disamatic) diesem erhöhten Sandaufkommen nicht mehr gewachsen gewesen wären. Bei der Projektierung wurden folgende Maximalwerte angesetzt: Durchsatz 400 t/h, Kühlung des Sandes von 170 °C auf 40 °C. Für den Tagesbetrieb sind es ca. 300 bis 350 t/h, wobei die Sandtemperatur 120 °C nicht überschreitet.

Grundsätzliches zur Sandkühlung

Bei der Lösungsfindung, welcher Kühler dafür letztendlich zweckmäßig ist, ist es sinnvoll, eine Energiebilanz aufzustellen, aus der ersichtlich wird, welches Wasservolumen und welches Luftvolumen für die Kühlung notwendig sind.

Der prinzipielle physikalische Ansatz wird über die Energiebilanz beschrieben. Die Wärmeenergie beträgt

$$Q = M \times AT \times c$$

Dabei ist

M die Sandmasse

AT die Temperaturdifferenz, um die der Sand heruntergekühlt wird, und

c die spezifische Wärmekapazität: für Sand 0,84 kJ/(kg • K).

Die entsprechenden Zahlen für V. Birn sind folgende:

Bei einer Sandmasse von 400 000 kg soll eine Abkühlung von 130 K erreicht werden - dies entspricht einer Wärmeenergie von 43,6 GJ, die durch Verdunstung von Wasser aus dem Sand abgeführt werden muß.

Für die Verdunstung bzw. Verdampfung von 1 l Wasser mit einer Anfangstemperatur von 15 °C ist ein Energiebedarf von 2613 kJ erforderlich. Dies ergibt für 43,6 GJ einen Wasserbe-

darf von 16 716 l. Allgemein dargestellt ergibt sich für den Wasserbedarf W

$$W = Q/2613 \text{ l}$$

Bei diesem beträchtlichen Wasserbedarf ist es gleichgültig, welcher Kühler mit welchem Verfahren eingesetzt wird. Das bloße Aufwärmen des Wassers ist dabei von geringerer Wirkung. Bedeutsam ist die Verdunstung als Phasenwandlung des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Zustand.

Bedeutsam wird die Antwort auf die Frage, welches Luftvolumen erforderlich wird, um dieses Wasservolumen abzutransportieren.

Im Gegensatz zum formelmäßigen Ansatz der Energiebilanz ist das Wasseraufnahmevermögen der Luft nichtlinear. Je höher die Lufttemperatur ist, um so mehr Wasseranteile kann die Luft aufnehmen (**Bild 1**). Einige Zahlen aus dieser Kurve sollen den Sachverhalt etwas besser illustrieren. Für 1 m³ Luft beträgt die maximale Wasseraufnahmefähigkeit (= 100 % relative Luftfeuchte) bei folgenden Lufttemperaturen:

- 20 °C: 17,30 g/m³
- 40 °C: 51,15 g/m³
- 60 °C: 130,20 g/m³

Ziel ist es, daß die Luft soviel Wasser wie möglich aufnimmt, damit möglichst wenig Luft durch den Sand geschickt werden muß. In diesem Vieleck der technischen Anforderungen entstehen sehr schnell neue Voraussetzungen und evtl. auch gravierende Probleme. Wird z. B. viel Luft durchgeblasen, dann müssen größere Gebläse für Zuluft und für Abluft ausgelegt werden. Weiterhin reißt dieses größere Luftvolumen viel mehr wertvolle Feinanteile aus dem Sand, was sich negativ auf die Sandqualität niederschlägt.

Daraus ergibt sich ein Paradoxon. Es sollen niedrigere Sandtemperaturen angestrebt werden, gleichzeitig aber höhere Lufttemperaturen. Optimal wäre ein Zustand, in dem die Lufttemperatur z. B. 20 K über der der Altsandtemperatur liegt. Um wenig Luft durchschleusen zu müssen, gilt es, eine möglichst hohe Ablufttemperatur zu erzielen, bei der viel Kühlwasser aufgenommen werden kann.

Gängige Kühler wie Fließbettkühler oder auch Mischkühler, die im Durchlauf arbeiten, erreichen in der Regel eine Ablufttemperatur von ca. 40 °C, die meistens etwas unter der Sandaustrittstemperatur liegt. Bei einem Wasservolumen von 16 716 l, das verdunstet werden muß, und einer Ablufttempe-

Vorgetragen auf der Grossen Giessereitechnischen Tagung am 21. und 22. Juni 2001 in Ludwigsburg.

Dipl.-Ing. W. Ernst, Geschäftsführer, datec GmbH, Braunschweig; Ing. L. Biehl, V. Birn, Holstebro, Dänemark; J. Rixen, Geschäftsführer, Webac GmbH, Euskirchen.

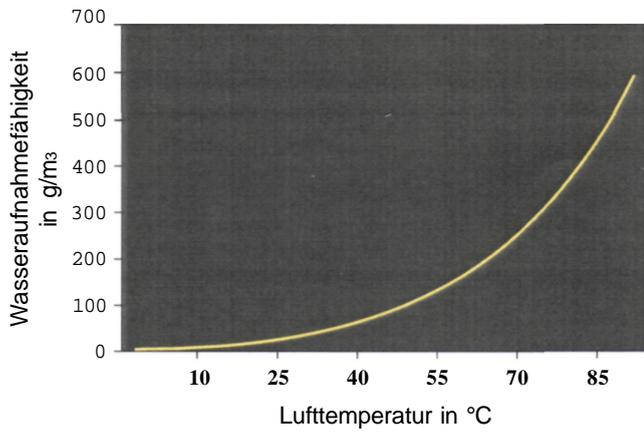


Bild 1. Wasseraufnahmevermögen der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur

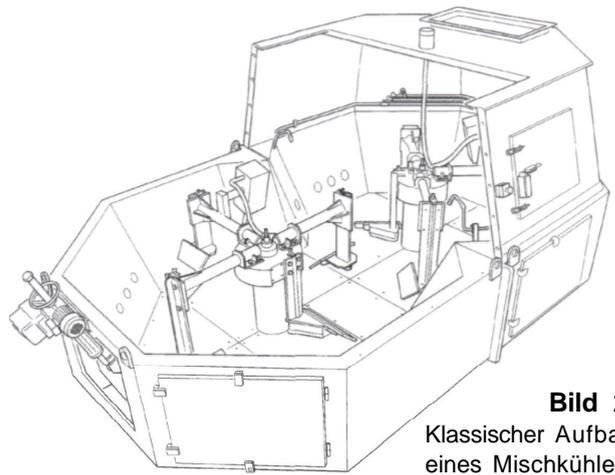


Bild 2. Klassischer Aufbau eines Mischkühlers

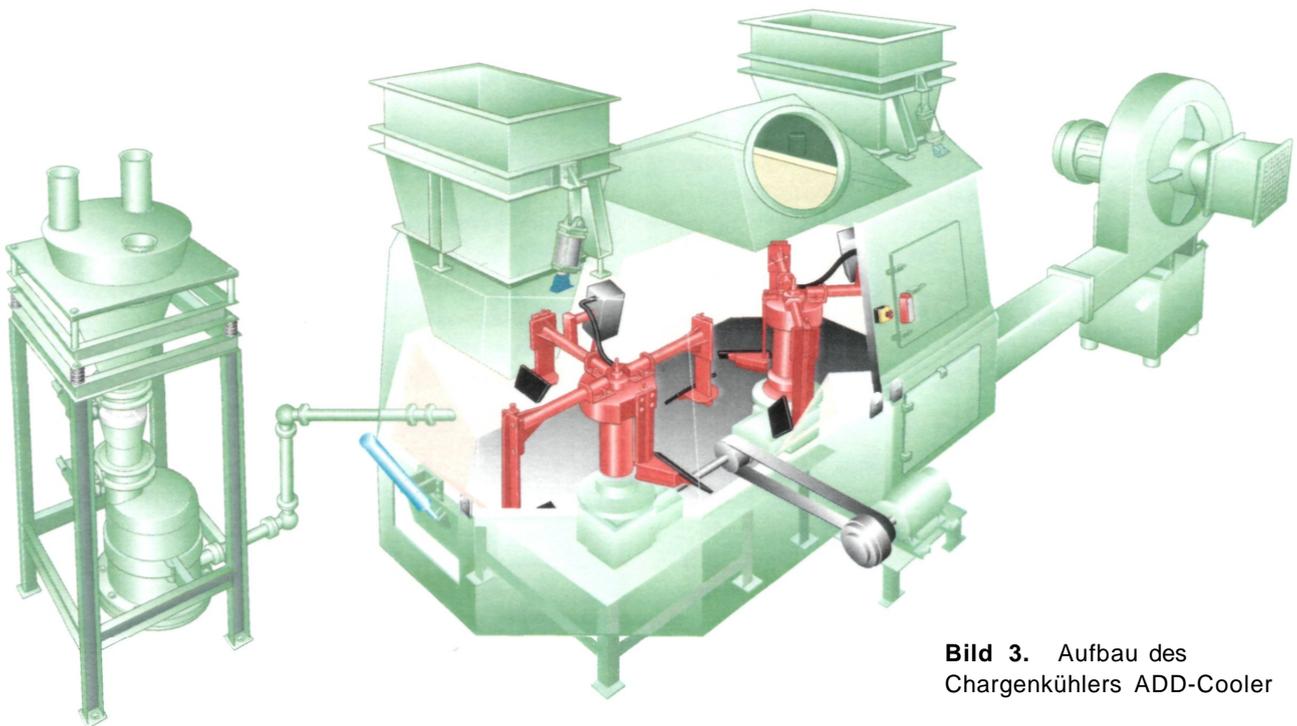


Bild 3. Aufbau des Chargenkühlers ADD-Cooler

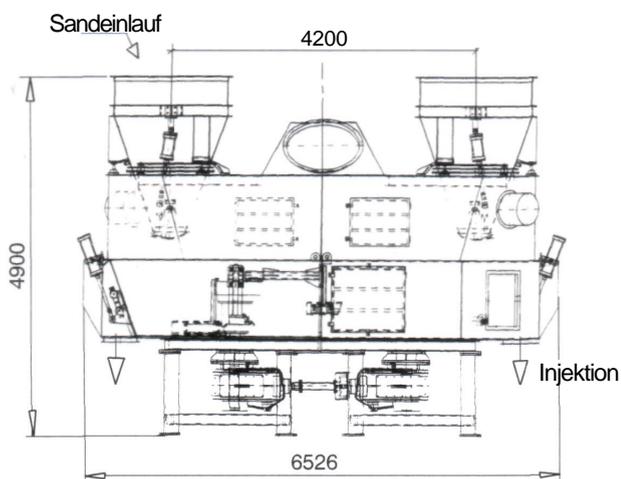


Bild 4. Layout des Chargenkühlers

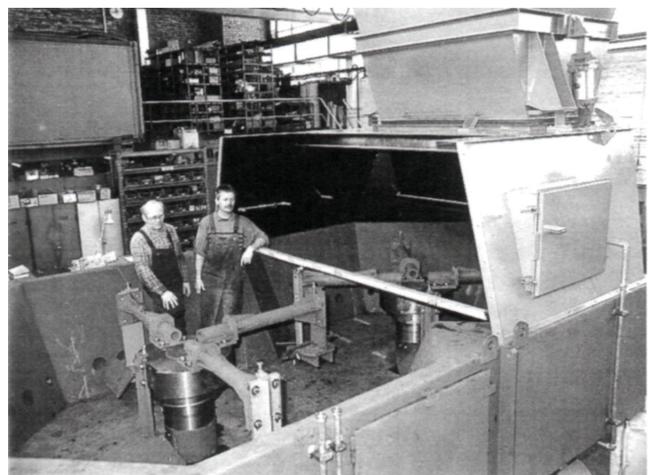


Bild 5. Chargenkühler vor Auslieferung (M. Lang, Kölner Stadtanzeiger)

ratur von 40 °C werden bei einer angenommenen Sättigung 326 803 m³ Kühlluft pro Stunde erforderlich. Dieser hohe Luftvolumenstrom erfordert eine riesige Anlage. Selbst für den Tagesbetrieb mit 300 t/h und einer Abkühlung um 80 K müssen stündlich 7715 l Wasser verdunstet werden, was einem Luftbedarf von 150 830 m³ entspricht.

Der Chargenkühler

Der prinzipielle Aufbau eines Chargenkühlers ist an den eines Mischkühlers angelehnt. Die Form einer Acht mit parallelen Rührwerkzeugen und seitlicher Lufteinführung ist unverändert geblieben. Neu sind die Waagen, um im Chargenbetrieb stets gleiche Sandmassen zu dosieren. Eine Injektion für die Bindemittel kann optional integriert werden (**Bilder 2 bis 5**).

Zur Bewältigung dieser beträchtlichen Sandmassen wurden zwei Chargenkühler mit einem Fassungsvermögen von je 8 t aufgebaut - mit jeweils zwei 4-t-Waagen in der Kühlerhaube. Pro Kühler wurde ein Abluftvolumen von ca. 40 000 m³ und eine Zuluftzufuhr von ca. 30 000 m³ projektiert. Für die Wasserzufuhr wurden zwei 2"-Wasserleitungen vorgesehen, um ca. 500 l für den höchsten Bedarfsfall von 8 t Chargenleistung mit einer Austragsfeuchte von 2 % zudosieren zu können. Mit zwei Zyklonen pro Kühler im Abluftstrang werden die mitgerissenen Feinanteile wieder der Abluft entnommen.

Ungewöhnlich ist die Position der Anlage, weil durch Auflagen nicht in die Höhe gebaut werden konnte. Deshalb wurde für die Anlage ein Schacht mit einer Länge von 55 m, stellenweise bis zu 8 m Tiefe und einer Breite von 10 m gebaut, so daß eine Formanlage ebenerdig darüber steht. Einzig die Zyklone ragen nach oben hinaus (**Bilder 6 und 7**). Die gesamten Bauaktivitäten erfolgten parallel zur Produktion. Der Umschluß zum bestehenden Sandkreislauf wurde zum Jahreswechsel vollzogen.

Steuerung und Meßtechnik

Die Steuerungsaufgaben sind eine Kombination von Misch- und Durchlaufkühlerbetrieb. Dabei werden die parallelen Prozesse im Kühler sequentiell ausgeführt. In der Endausbaustufe - Kühlung mit Bindemitteldosierung - ergeben sich folgende Phasen:

1. Dosierung von Altsand und Bindemittel in die jeweiligen Waagen;
2. Gleichzeitige Beschickung des Kühlers mit Altsand und Wasser;
3. Ein- und Ausschalten der Luftzufuhr;
4. Zugabe der Bindemittel per Injektion;
5. Entleerung des Kühlers.

Die große Unbekannte im Kühlprozeß ist die Luft. Es ist nicht eindeutig vorhersehbar, welche Temperaturen in der Abluft auftreten und welche Kühlwirkung letztendlich beim Sand erreicht wird. Ein entsprechendes Formelwerk gibt es nicht, weil der konstruktive Aufbau eines Kühlers maßgeblich ist. Der Steuerungsablauf sieht eine feste Kühlzeit vor und nicht eine variable, die sich am Erreichen einer Soll-Temperatur orientiert. Dabei wird der Effekt des Staubaustrages beachtet, weil mit unterschiedlicher Zykluszeit unterschiedlich viel Staub und/oder Feinanteile ausgetragen werden und somit der Sandhaushalt mehr und mehr ungleichmäßig wird. Es bleibt also ein kühler Sand genauso lange im Kühler wie ein Sand mit hoher Temperatur.

Die Wasserzugabe setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Diese ermitteln sich zum einen aus der Differenz zwischen Soll- und Ist-Feuchte, weil der Altsand eben nicht nur gekühlt, sondern auch mit einer Grundfeuchte versehen werden muß, zum anderen aus dem Kühlwasserbedarf, der aus der gemessenen Sandtemperatur während der Chargendosierung ermittelt wird. Während des Kühlprozesses wird der Verdunstungsprozeß durch Messung der Ablufttemperatur nachvollzogen.

Erfahrungen

Die beiden in der Gießerei V. Birn aufgebauten Kühler waren die ersten ihrer Art; sie unterlagen in bezug auf Durchsatz und Temperaturprofil extremen Anforderungen. Nach sechs Monaten Betrieb konnten erste Erfahrungen ausgewertet werden.

Bei der technischen Festlegung des Kühleraufbaus interessierten zwei Fragen:

1. Wo ist unter Berücksichtigung
 - der Eingangstemperatur und der gewünschten Ausgangstemperatur,
 - des noch vertretbaren Staubaustrages (Sandhaushalt und Deponiekosten) und
 - des geforderten Sanddurchsatzeseine optimale Fahrweise zu finden?
2. Läßt sich schon bei der Konstruktion des Kühlers deterministisch bestimmen, welche Ausgangswerte näherungsweise erreicht werden können? Bislang ist da nur eine vage Abschätzung möglich, die auf intuitiven Erfahrungen basiert.

Lufteingangstemperatur

In einer Reihe von Versuchen wurde untersucht, wie sich dieser Kühler verhalten wird. Dabei konnte auf Daten aus zwei extrem unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zurückgegriffen werden. Die ersten Daten wurden im Winter bei Zulufttemperaturen von 1 bis 5 °C aufgenommen, die zweiten im Juni bei solchen von 20 bis 25 °C. Beim Vergleich dieser beiden Meßreihen wurde sofort ersichtlich, daß höhere Eingangstemperaturen auch höhere Ausgangstemperaturen bringen. 15 K Unterschied in der Zuluft erbringt eine Anhebung der Sandtemperatur von 3 bis 5 K (**Bild 8a**).

Tatsächlich läßt sich dieser Effekt über die Energiebilanz und das unterschiedliche Volumen des verdunsteten Wassers in der Zuluft berechnen. Bei 2 min Kühlzeit werden bei 1 °C nur 3 l und bei 20 °C knapp 11 l mit eingebracht. Diese 8 l Differenz bewirken dann eine um 4 K verringerte Kühlwirkung.

Kühlzeit

In einem Chargenkühlprozeß ist es einfach, die Kühlzeit zu variieren. Hierbei sollte erfaßt werden, welchen Einfluß das Kühlverhalten auf die Kühlzeit hat. Insbesondere sollte herausgefunden werden, wann sich die Phase der intensivsten Kühlung abspielt.

Bild 8a zeigt auch die Kühlwirkung über die Zeit. Erkennbar ist eine annähernde Absenkung der Austragstemperatur um ca. 2 K bei einer Verlängerung der Kühlzeit um 10 s. Die entscheidende Kühlwirkung findet in den ersten Sekunden statt, wenn der Altsand im Kühler mit Wasser in Berührung kommt. Bereits nach 30 s hat eine Charge mit 95 °C eine Absenkung auf 60 °C erfahren. Danach ist der Kühleffekt deutlich geringer, die restlichen 80 s bewirken dann nur eine Absenkung um ca. 12 bis 15 K. Die Kühlzeit ließ sich jedoch nicht weiter verkürzen, weil alleine die Wasserzugabe 30 s

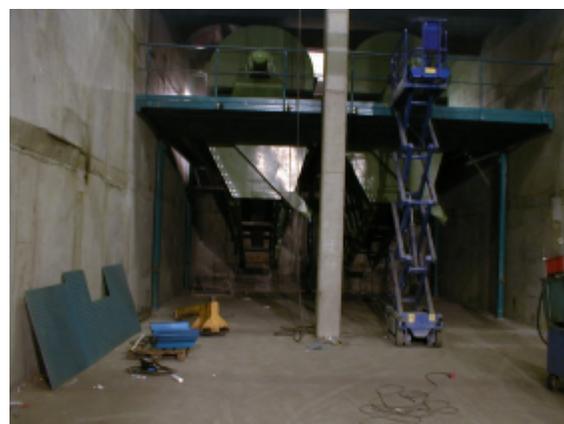


Bild 6. a) Die ersten Grabungen; b) Baustufe 2; c) Baustufe 3; d) der Schacht mit Verschalungen; e) der Schacht vor Vollendung; f) Einbau der beiden Polygonsiebe und Vorbunker; g) Einbau eines Chargenkühlerfg



betrug. **Bild 8b** veranschaulicht diesen Zeiteffekt - auch für verschiedene Chargengrößen und Eingangstemperaturen.

Chargengröße

Eine weitere Untersuchungsreihe wurde durchgeführt, um zu ermitteln, wie die Kühlleistung des für 8 t ausgelegten Chargenkühlers bei unterschiedlichen Chargengrößen variiert. Die Unterschiede waren zwischen 5 t und 8 t nur geringfügig. Bei gleicher Eingangstemperatur und gleicher Kühlzeit erhöhte sich die Ausgangstemperatur um ca. 4 K. Diese Differenz wird auch eingehalten, wenn die Kühlzeit variiert wird. **Bild 8b** zeigt die Ausgangstemperaturen für fünf Chargengrößen bei zwei Kühlzeiten. Auch in **Bild 8c** ist dieser Effekt nachzuvollziehen.

Luftvolumenstrom

Hinsichtlich des Luftdurchsatzes wurde untersucht, inwieweit das Luftvolumen reduziert werden kann und inwieweit sich damit die Kühlleistung verschlechtert. Es war unter Betriebsbedingungen nicht möglich, die Ab- und Zuluftvolumina in fein differenzierten Stufen zu variieren, um einen sicheren Verlauf zwischen zwei Eckpunkten nachzuvollziehen.

Bei einem um 25 % verringerten Luftvolumenstrom erhöhte sich die Ausgangstemperatur um ca. 4 bis 5 K. Eine Verlängerung der Kühlzeit um 25 % führte zu annähernd gleichen Temperaturen.

Gebläseleistung und Feinanteile

Die recht starke Gebläseleistung zur Erzeugung dieses beträchtlichen Luftvolumenstroms führt zu nicht vernachlässigbaren Effekten beim Feinteileentzug, die deutlich den Sandhaushalt verändern. Durch den Einsatz von Zyklonen

kann der Staub wieder in den Sand zurückgeführt werden. Trotz Rückführung verändert sich aber der Sand, weil diese Feinanteile aus der Kornhülle stammen, deren Aufgabe der Zusammenhalt des Gemenges ist. Eine bloße Rückführung führt diese Feinanteile nicht automatisch zur Kornhülle zurück. Es ist daher sinnvoll, Maßnahmen zu überlegen, den Feinteileentzug zu verkleinern. Der vorherige Versuch der Luftvolumenreduktion sollte einen derartigen Effekt bewirken.

Zu diesem Zweck wurden die Austräge am Zyklonauslauf während einer Charge aufgefangen und gewogen. Für diesen recht aufwendigen Versuch wurden 3 Werte ermittelt, die zueinander volumen- und zeitproportional sind. Ausgehend von einer Kühlzeit von 110 s für 7 t Sand, betragen die Feinanteile 190 kg. Bei halber Kühlzeit waren es nur 104 kg. Bei reduziertem Luftvolumenstrom und 140 s Kühlzeit wurden 200 kg entzogen, d. h., der Feinteileentzug ist proportional zur Zeit. Wird das Luftvolumen reduziert, aber die Zeit verlängert, ergibt sich ein ähnlich großer Entzug, d. h., es ergibt sich kein positiver Effekt in bezug auf die Verringerung des Staubausstrages.

Bewertung

Der Chargenkühler hat im Vergleich zum Durchlaufkühler einen höheren Wirkungsgrad. Die erreichbaren Temperaturen

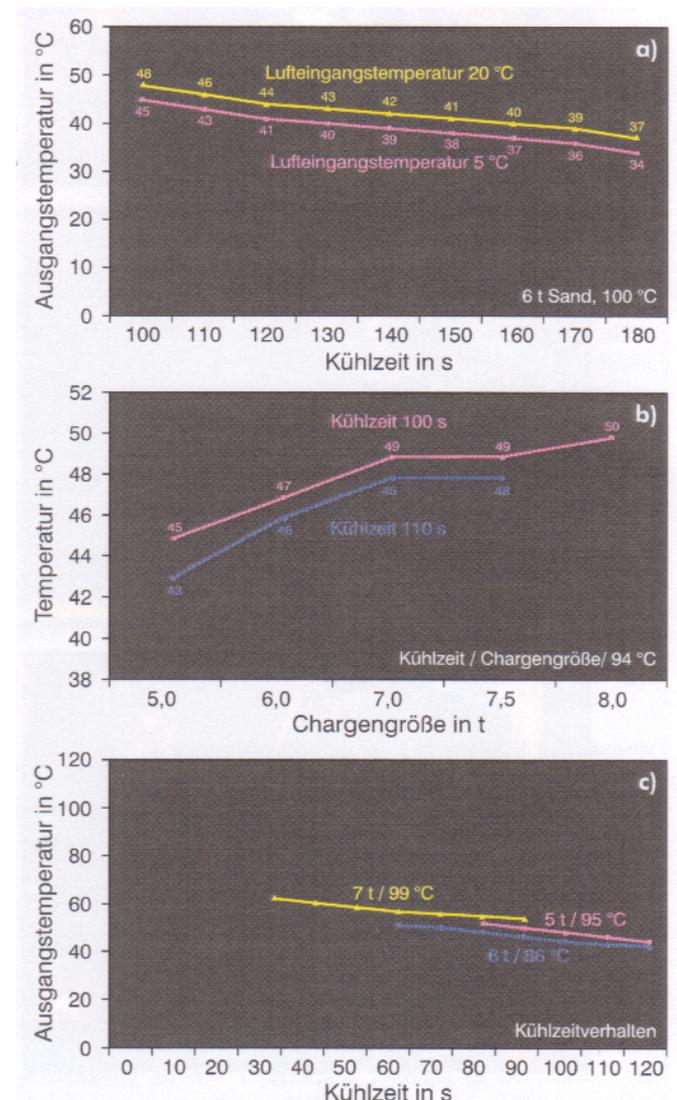


Bild 8. Zusammenhang zwischen Kühlzeit und a) Lufttemperatur, b) Chargengröße; c) Kühleffekt

liegen um mindestens 5 K niedriger; der Luftbedarf ist geringer. Durch die beiden Rührwerke werden zudem bessere Homogenisierungseffekte erzielt.

Die Kühlwirkung ist effektiver als im Durchlaufkühler. Die Verweilzeiten liegen bei rd. 2 min gegenüber 3 min. Damit lassen sich höhere Durchsätze fahren, und es wird weniger Staub aus dem Sand herausgeholt. Versuche haben ergeben, daß pro Minute 1,5 % der Chargenmenge als Staubanteil über die Abluft herausgeholt werden.

Die Kühlleistung ist aus folgenden Gründen effektiver:

- Im ersten Moment kommt der heiße Sand mit Wasser und Luft in Berührung; es wird sofort viel Wasser verdampft, was zu einer beträchtlichen schnellen Abkühlung führt. Beim Chargenkühler ist gleich bei Zyklusbeginn der entscheidende Kühleffekt zu verzeichnen, weil Wasser und Luft gleichzeitig mit dem heißen Sand zusammenkommen.
- Die Ablufttemperatur ist höher, und ein größeres Kühlwasservolumen wird „mitgenommen“ - es wird somit intensi-

ver gekühlt. Diese bessere Wirkung stellt sich ein, weil sich im Durchlaufkühler bereits gekühlte Sande mit ungekühlten Sanden vermischen; die Gesamttemperatur sinkt ab, und die Abluft wird somit weniger aufgewärmt. Die Ablufttemperatur ist beim Chargenkühler ca. 10 K höher, beträgt also 50 °C.

Perspektiven

Neben der verbesserten Kühl Wirkung ist es mit dieser Methode möglich, in diesem Chargenzyklus die Bindemittel zuzugeben, sobald die Luftzufuhr abgeschaltet wird. Damit wird es möglich, einen typischen Effekt bei Kundengießereien aufzufangen, wenn durch häufig wechselnde Programme die Sandeigenschaften stark schwanken. In Kopplung mit einem Kastenverfolgungsprogramm kann über die Formstoffbilanz für jede Charge automatisch ein eigenes Rezept bestimmt werden. (G 8604)

Berechnungsbeispiel

Technische Vorgaben:

	Stundendurchsatz	Abkühlung	
		von	auf
Extrembedarf	400 t/h	170 °C	40 °C
Tagesbedarf 1	350 t/h	120 °C	40 °C
Tagesbedarf 2	300 t/h	120 °C	40 °C

Abzuführende Wärmemenge Q

$$Q = M \times c \times \Delta T$$

M = Sandmasse in kg

c = spezifische Wärmekapazität für Sand: 0,84 kJ/(kg·K)

ΔT = Temperaturdifferenz in K

$$Q_{\text{extrem}} = 400\,000 \text{ kg} \times 0,84 \text{ kJ/(kg·K)} \times 130 \text{ K} = 43\,680\,000 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{Tagesbedarf 1}} = 350\,000 \text{ kg} \times 0,84 \text{ kJ/(kg·K)} \times 80 \text{ K} = 23\,520\,000 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{Tagesbedarf 2}} = 300\,000 \text{ kg} \times 0,84 \text{ kJ/(kg·K)} \times 80 \text{ K} = 20\,160\,000 \text{ kJ}$$

Kühlwasserbedarf

spezifische Wärmekapazität von Wasser: 4,2 kJ/(kg·K)

Verdampfungswärme von Wasser: 2256 kJ/kg

1 l Kühlwasser mit 15 °C benötigt bis zum Verdampfen folgende Energie

$$Q_w = Q(15-100 \text{ °C}) + Q_{\text{Verdampf}} = 357 \text{ kJ/l} + 2256 \text{ kJ/l} = 2613 \text{ kJ/l}$$

Der Kühlwasserbedarf (Wärmeenergie/Verdampfungswärme) ist folgender:

$$\text{Kühlwasserbedarf (extrem)} = 43\,680\,000 / 2613 = 16\,716 \text{ l}$$

$$\text{Kühlwasserbedarf (Tagesbedarf 1)} = 23\,520\,000 / 2613 = 9\,011 \text{ l}$$

$$\text{Kühlwasserbedarf (Tagesbedarf 2)} = 20\,160\,000 / 2613 = 7\,715 \text{ l}$$

Erforderliches Abluftvolumen

Betrachtet werden drei verschiedene Ablufttemperaturen, nämlich 40 °C, 45 °C und 50 °C. Das Wasseraufnahmevermögen (die absolute Luftfeuchte) variiert.

Das Abluftvolumen errechnet sich aus dem Kühlwasserbedarf, geteilt durch die absolute Feuchte. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.1 dargestellt. Gut erkennbar ist der deutlich erhöhte Luftbedarf bei der niedrigen Ablufttemperatur von 40 °C.

Einfluß der Zulufttemperatur

Aufgrund der Luftfeuchte der Zuluft verringert sich das Wasseraufnahmevermögen der Abluft. Das mitgeführte Wasservolumen ist gering, reduziert aber doch die Kühlwirkung; dies läßt sich über die Energiebilanz nachweisen.

Angaben zur Berechnung:

Luftvolumenstrom einer Charge von 120 s: 40 000 m³/h:30

Relative Luftfeuchte: 50 %

Absolute Luftfeuchte bei 1 °C = 0,00521 kg

Absolute Luftfeuchte bei 20 °C = 0,01730 kg

Wasservolumen pro Charge (1 °C) =

$$40\,000 / 30 \times 0,00521 \times 0,5 = 3,47 \text{ l}$$

Wasservolumen pro Charge (20 °C) =

$$40\,000 / 30 \times 0,01730 \times 0,5 = 11,53 \text{ l}$$

Bei 20 °C werden 8,06 l mehr Wasser in der Zuluft geführt.

Die Gleichung der Energiebilanz und für den Kühlwasserbedarf werden ineinander eingesetzt und zur gesuchten Temperatur umgeformt.

$$\Delta T = W \times 2613 / (M \times c)$$

Dabei ist

W = Kühlwasservolumen = 8,06 l

M = Chargenmasse = 6000 kg

c = spezifische Wärmekapazität = 0,84 kJ/(kg·K)

$$\Delta T = 8,06 \times 2613 / (6000 \times 0,84) = 3,36 \text{ K}$$

Die gemessene Temperaturdifferenz von 3 bis 4 K läßt sich also rechnerisch nachvollziehen. Dieser Effekt wird um so größer, je kleiner die Charge wird.

Kühlzeiteffekt

Eine Verlängerung der Kühlzeit erbrachte eine lineare Verringerung der Sandtemperatur.

In der vereinfachenden Annahme, daß die Ablufttemperatur immer unverändert bei 50 °C bleibt, werden in 10 s bei 40 000 m³ Luft/h nun 1 l m durchgeschleust. Das Wasservolumen beträgt 9,33 l (50 °C). Die Temperaturdifferenz bei einer 7000-kg-Charge beträgt dann

$$\Delta T = 9,33 \times 2613 / (7000 \times 0,84) = 4,1 \text{ K}$$

Dieser Wert liegt etwas höher als die gemessenen Temperaturdifferenzen.

Tabelle A.1. Erforderliche Abluftvolumina für verschiedene Ablufttemperaturen

	Abluftvolumen in m³			Kühlwasserbedarf in l
	40 °C	45 °C	50 °C	
Absolute Feuchte in g/m³	51,15	65,40	83,00	
Extrembedarf	326 803	255 569	201 397	16716
Tagesbedarf 1	175 972	137 630	108 445	9 001
Tagesbedarf 2	150 830	117 966	092 951	7 715