

### Kühlen unter Umgebungsbedingungen – das Kühlerdiagramm zur Luftbedarfsbestimmung [22]

#### Warum kühlen?

Aufbereitete Formstoffe mit Temperaturen deutlich über 40 °C erzeugen eine Reihe von Verarbeitungsproblemen:

- Austrocknung des Formstoffs bis zur Verarbeitung,
- erhöhter Formenausschuss,
- Kondensationen und Klebeneigung an der Modelloberfläche,
- Kondensationen an Kernen und Formhilfsmitteln.

Hohe thermische Belastungen des bentonitgebundenen Formstoffes erfordern in Formstoffaufbereitungsanlagen Verfahrensschritte zur Kühlung des Formstoffs. Diese sind meist kombiniert mit der Homogenisierung und der Vorbefeuchtung des Formstoffs. Die Kühlung wird vordergründig mit der Verdunstung des Wassers erreicht.

Mit dem **Kühlerdiagramm** sind die physikalischen Zusammenhänge der Altsandkühlung als Projektierungswerkzeug für den Praktiker aufbereitet.

#### Die Verdunstungskühlung

Die Verdunstung des Wassers, also der Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand unterhalb der Siedetemperatur unter Normaldruckbedingungen entzieht dem System Energie. Der Wasserdampf muss von der Luft aufgenommen werden. Das Wasseraufnahmevermögen der Luft ist abhängig von der Temperatur und der Luftfeuchte.

#### Die 3 Bestimmungsgleichungen

Die Bestimmung der erforderlichen zu verdunstenden Wasser- und der abzuführenden Luftmenge lässt sich über drei Rechenschritte einer kombinierten Energie-Wasser-Bilanz formalisieren und ist letztendlich durch ein Diagramm darstellbar.

Über **die Energiebilanz** wird in einem ersten Schritt ermittelt, in welchem Umfang Wärmeenergie abzuführen ist. Aus dieser Angabe lässt sich im 2. Schritt **der Wasserbedarf** für die Verdunstung bestimmen. Der 3. Schritt benennt **den Luftbedarf**, um die verdunstete Wassermenge abführen zu können.

### 1. Schritt – die Energiebilanz

Die abzuführende Energiemenge berechnet sich aus der linearen Gleichung

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

mit

Masse  $m$  [kg],

Temperaturdifferenz  $\Delta T$  [K] und

Materialeigenschaft spezifische Wärmekapazität  $c$  [kJ/kg\*K].

Für das Beispiel mit einem Altsanddurchsatz von 80 t/h, einer Abkühlung von 100 °C auf 40 °C ( $\Delta T = 60$  K) und der spezifischen Wärmekapazität (Basis Quarzsand) mit  $c = 0,85$  kJ/kg \* K berechnet sich eine stündlich abzuführende Wärme-Energie von  $Q = 4,08$  GJ.

### 2. Schritt – der Wasserbedarf für die Verdunstungskühlung

Der Energiebedarf für die Verdunstung von einem Liter Wasser bei 15 °C beträgt 2613 kJ. In einem einfachen Dreisatz ergibt sich für den Altsanddurchsatz von 80 t/h ein Wasserbedarf von 1.56 l. Zum Vergleich: näherungsweise gilt die Faustformel: für die Abkühlung um 30 K wird ein Wasserbedarf von 1 % erforderlich. Übertragen auf das obige Beispiel ergibt sich ein Wasserbedarf von 1.600 l.

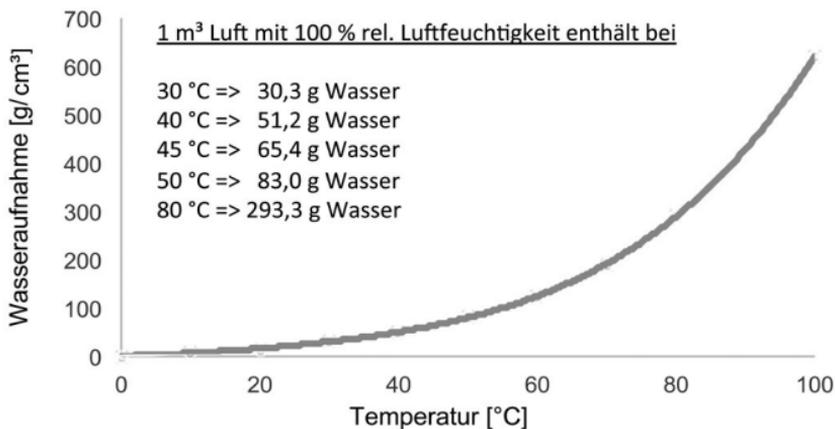


Bild 1: Wasseraufnahme der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur

### 3. Schritt – der Luftbedarf für den Abtransport des verdunsteten Kühlwassers.

Die Luftbedarfsbestimmung unterliegt einer unangenehmen Verlegenheit – sie ist temperaturabhängig. Mit steigender Temperatur erhöht sich nichtlinear das Wasseraufnahmevermögen der Luft (Bild 1). Das Molière-Diagramm gibt Aufschluss, wieviel verdunstetes Wasser die Luft bis zur Sättigungsgrenze also 100 % aufnehmen kann. Dabei kann bei Ablufttemperaturen über 40 °C hinter dem Kühler von einer Sättigung der Luft mit Wasser ausgegangen werden.

In Multiplikation mit der Luftdurchsatzmenge lassen sich die Gesamtmengen des verdunsteten Wasser darstellen. Auch hier ist ein einfacher Dreisatz hilfreich:

$W_w$  = abzuführende Wärmeenergie/Verdunstungswasser  
pro m<sup>3</sup> Abluft

Ausgehend von dem im Beispiel berechneten Wasserbedarf für die Verdunstung von 1561 Liter ergibt sich exemplarisch für die drei Ablufttemperaturen der Luftbedarf (Tabelle 2).

Tabelle 2: Luftbedarf zur vollständigen Aufnahme des verdunsteten Wassers

Ablufttemperatur [°C]	Ansatz: Wasserbedarf zur Verdunstung/Wasseraufnahme von 1 m <sup>3</sup> Luft	Notwendige Luftmenge zur Aufnahme der verdunsteten Wassermenge [m <sup>3</sup> /h]
40	1561 Liter/0,0515 Liter	30.310
45	1561 Liter/0,0640 Liter	24.390
50	1561 Liter/0,0830 Liter	18.800

Die Vorabberechnung, welche Temperatur die Abluft einnimmt, ist nicht möglich. Das Erreichen der Abluft- und Sandaustragstemperaturen ist ausschließlich geprägt durch den konstruktiven Aufbau des Kühlers. Ein messtechnischer Nachweis der erreichten Lufttemperatur und -feuchte ist unter Praxisbedingungen fast unmöglich, weil das hohe Staubaufkommen die empfindlichen Messeinrichtungen sehr schnell zerstören kann. An dieser Stelle können nur praktische Erfahrungswerte zu Grunde gelegt werden. Beispielhaft wurden daher die Berechnungen für drei Ablufttemperaturen: 40 °C, 45 °C und 50 °C vorgenommen (Tabelle 2).

Für die Projektierung stellt sich immer die Frage, wieviel Luft und Wasser erforderlich sind, um eine spezielle Sandmenge von einer gegebenen Temperatur auf eine gewünschte Temperatur durch Verdunstung abzukühlen.

### Kühlerdiagramm des Durchlaufkühlers

Diese drei Berechnungsschritte lassen sich in einem Diagramm (Bild 2) darstellen, indem in jedem Quadranten über eine lineare Beziehung die Berechnung grafisch umgesetzt wurde. Im Quadranten links oben sind drei Temperaturgeraden aufgetragen, die die Abkühlung darstellen. Sie unterscheiden sich durch die zu erreichenden Abkühltemperaturen 40 °C, 45 °C und 50 °C. Der einzutragende Arbeitspunkt ist dann die Eingangstemperatur. In Anlehnung an das obige Beispiel, wird die Gerade gewählt, die bei 40 °C als

## 6 Formstoffe Kühlen von bentonitgebundenem Formstoff

Austragstemperatur endet und bei Eingangstemperatur 100 °C startet. In dem Kühlerdiagramm sind das die Punkte 1 und 2.

Im zweiten Quadranten sind Geraden verschiedener Durchsatzmengen eingetragen. Sie werden mit der waagerechten Geraden zum Schnitt gebracht, wobei der Schnittpunkt auf der y-Achse das

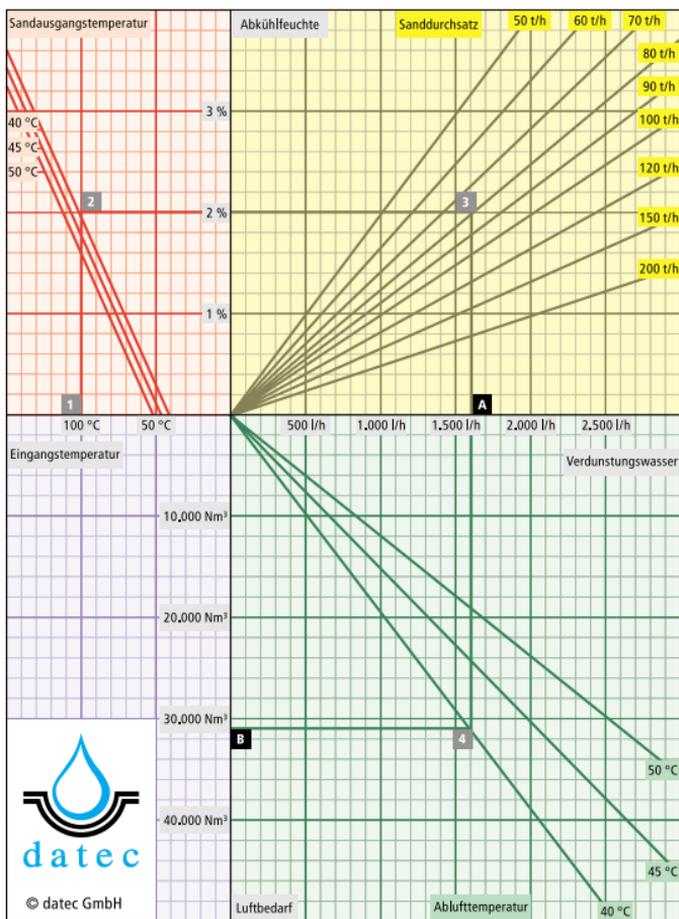


Bild 2: Diagramm zur Wasser- und Luftbedarfsbestimmung (datec)

Ergebnis für den Bedarf der Abkühlfeuchte ist. Diese Gerade endet in der gewählten Sandmenge (Punkt 3).

Im dritten Quadranten sind die Verdunstungsgeraden für die Ablufttemperaturen 40 °C, 45 °C und 50 °C aufgetragen. Über die senkrecht fallende Gerade, die die x-Achse an dem Punkt A schneidet, der den Wasserbedarf für die Verdunstung angibt, werden die drei Verdunstungsgeraden geschnitten. Über die y-Achse lässt sich dann im Punkt B der Luftbedarf ermitteln.

Die im Diagramm eingetragenen Mengenwerte beziehen sich auf Durchlaufkühler im stationären Betrieb, wenn alles eingeschwungen ist. Die Übertragung auf den Chargenkühler mit der konventionellen Kühltechnik ist nur bedingt möglich, da in dem dreiminütigen Zyklus die Ablufttemperatur nicht stabil auf einen eingeschwungenen Wert verharrt, sondern innerhalb der ersten Minute ihr Maximum erlebt und dann mit dem Abkühlen des Sandes ebenfalls proportional absinkt. Hier ergeben sich deutliche Schwierigkeiten für eine einfache Abschätzung. Für eine vage Projektierung kann man trotzdem ähnlich verfahren, indem die zu betrachtende Sandmenge auf die Chargengröße reduziert wird und der Ansatz für die Abluft ca. um 5 °C höher genommen wird. Der ermittelte Luftbedarf bezieht sich dann auf drei Minuten Kühlzeit und muss korrekter Weise bei einer Abkühlung von 100 °C auf 40 °C überschlägig 120 l Verdunstungswasser aufnehmen. Hat die Abluft im niedrigen Mittel 45 °C, dann werden für den Abtransport dieser Wassermenge ca. 1900 m<sup>3</sup> Abluft nötig. Die Absaugung sollte dann für 38.000 m<sup>3</sup>/h ausgelegt sein.

### **Aufgabe und Funktion einer Wasserdosierung**

Die Wasserdosierung ist verantwortlich für die erreichbare Formstoffqualität und hat die richtige Wassermenge für

- 1) die Verdunstung/Kühlung und
- 2) das Prozesswasser zur Sollfeuchte bereitzustellen.

Die Einflussgrößen Formstofftemperatur und -feuchte sowie Lufttemperatur und -feuchte für diesen Prozess sind reproduzierbar zu messen und bilden die Basis der Steuerung.

Es ist zu beachten, dass die Abluft immer vorrangig die Wassermenge aufnimmt, die sie maximal proportional zu ihrer Temperatur aufnehmen kann und den verbleibenden Rest erhält der Formstoff. Die Erfassung der Verdunstungsmenge ist qualitätsbestimmend. Eine Festwasserdosierung ist für diese Aufgabe völlig ungeeignet.

Zur Veranschaulichung folgende Vergleichsrechnung: Eine Wasserzugabe wurde bei einer Durchsatzleistung von 80 t/h Altsand und 20.000 m<sup>3</sup> Abluft mit 45 °C so eingestellt, dass die Luft 1308 l Wasser aufnimmt. Der Altsand wird kälter und die Ablufttemperatur sinkt auf 40 °C ab. Die Abluft kann nicht mehr so viel aufnehmen, maximal nur noch 1022 l. Bleibt die Wasserzugabe unverändert, verbleiben somit zusätzlich 286 l im Altsand. Damit erhöht sich die Feuchte um 0,36 %! Die Verhältnisse werden sogar noch extremer, wenn im Tagesverlauf hohe Temperaturen erreicht werden und am nächsten Arbeitstag der Altsand deutlich abgekühlter in den Kühler gelangt und die Temperatur in der Abluft nur 30 °C erreicht. Sie nimmt dann noch nicht mal 100 % auf sondern sogar nur ca. 70 %, was dann 424 l sind. Wurde vergessen, die Wassermenge umzustellen, dann gelangen 884 l zu viel Wasser in den Sand, was einen zusätzlichen Anteil von 1,1 % Feuchte bedeutet. Bei diesen Betrachtungen wurde die vorhandene Luftfeuchte in der Zuluft zur Vereinfachung vernachlässigt.

### **Verfahrensansätze für die Wasserdosierung**

#### *Messung im Kühler*

Temperatur- und Feuchtigkeitsmesssonden werden in den Arbeitsraum des Kühlers eingefahren oder befinden sich auch an den Mischwerkzeugen.

In Mischkühlern für den Durchlaufbetrieb mit rotierende Feuchtemesssonden an den Rührwerken wird die Wasserdosierung mit den Ergebnissen der Feuchtemessung gesteuert. Auf einen Sollwert eingestellt, wird so viel Wasser dosiert bis der Sollwert erreicht wird (Bild 3).

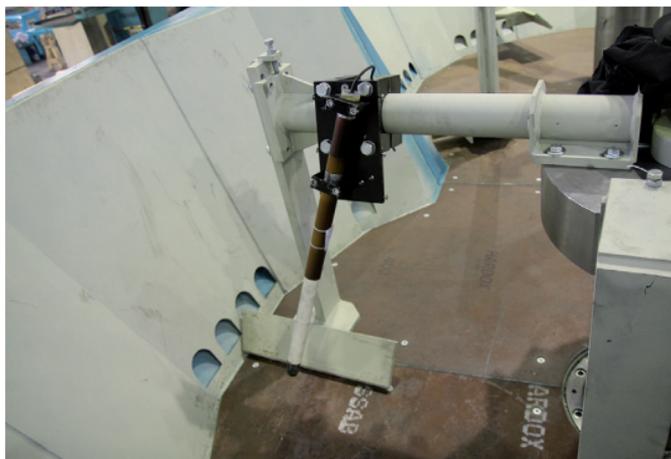


Bild 3: Feuchtemesssonde am Mischarm des Kühlers (datec)

Im Chargenbetrieb der Mischkühler sind vergleichbare Steuerungen möglich.

Für den Fließbettkühler lassen sich im Innern keine Feuchtemesssonden installieren, da das schwebende Sandbett keine sichere Messung zulässt.

#### *Messung außerhalb des Kühlers*

Kontinuierliche Messung der Formstofffeuchte in den zu- und abführenden Masseströmen wie auch die Zu- und Ablufttemperaturen zur Ermittlung der tatsächlichen Wasserverdunstung bietet eine Datenbasis zur Steuerung.

Die Wasserverdunstung kann bewertet werden. Die Wassermengen zur Verdunstung und zur Aufnetzung werden additiv gleichzeitig zugegeben (Bild 4).

Für den Fließbettkühler ist dieser Ansatz unproblematisch verwendbar, da sämtliche Messeinrichtungen außerhalb des Kühlers sind.



Bild 4: Feuchtemesssonde auf Band (datec)

### *Kombinationsmessung*

Bei den einstufigen Wasserdosierungen werden maximale Abweichungen von  $\pm 0,3\%$  vom Sollwert garantiert. Jedoch sind diese Systeme nicht mehr ausreichend wenn höhere Genauigkeiten gefordert werden. In der ersten Stufe wird verzögerungsfrei mit der Feuchtemessung auf dem Dosierband und der Verdunstungserfassung in der Luft die erste Wassermenge dosiert.

Nach der Kontrollmessstelle im Kühler arbeitet eine zweite Wasserdosierung als Regler und gleicht die Abweichungen aus, so dass Feuchtigkeitsstreuungen im gekühlten Formstoff von  $\pm 0,1\%$  erreicht werden können.

### **Wenn der Kühler nicht ausreichend kühlt ...**

Altsandtemperaturen nach dem Kühler von  $40\text{--}45\text{ °C}$  werden nach der Inbetriebnahme erreicht. Nach einiger Zeit reicht die Kühlwirkung nicht aus. Was ist passiert?

Sicherlich ist es sinnvoll, die drei Mengenströme Altsand, Wasser und Luft in ihren Mengengrößen zu überprüfen, um Sicherheit zu

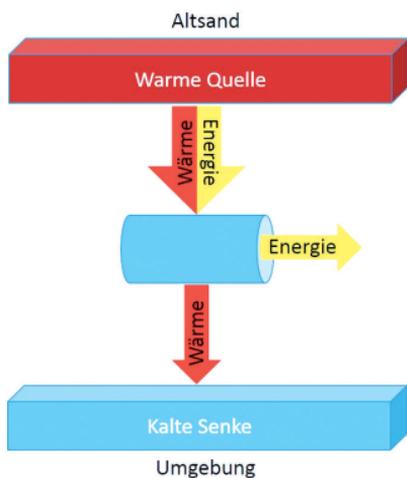
haben, dass der Kühler nicht mit einem höherem Durchsatz überlastet wird, zu wenig Wasser dosiert oder zu wenig Luft abgesogen wird. Völlig vergessen wird der wesentliche Aspekt der Umgebungstemperatur. Im Sommer können sehr schnell in den Formstoffaufbereitungen, wenn der Kühler zudem dicht unter der Decke aufgebaut ist, Umgebungstemperaturen von 45 °C erreicht werden. Die Wärme steigt in den Gebäuden nach oben, es herrscht keine Luftzirkulation. Unter diesen Bedingungen steigen rasch die Altsandtemperaturen auf über 50 °C.

In Zeiten der Dampfmaschine und einer intensiven Reflexion über die Thermodynamik wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen, die auch für die Altsandkühlung von Bedeutung sind. Im 2. Hauptsatz der Thermodynamik wird die Erkenntnis über die fundamentale Asymmetrie der Natur benannt. Ein heißer Körper kühlt sich in kälterer Umgebung von alleine ab, aber kalte Körper werden nicht von alleine (ohne Arbeit) wieder warm. Ein bewegter Körper kommt zur Ruhe aber umgekehrt wird ein ruhender Körper sich nicht von alleine in Bewegung setzen (W. Atkins). Die Verteilung der Energie ändert sich irreversibel. Wärmeleitung und Arbeit sind ein Energietransport, wobei Erwärmen und Abkühlen zwei entgegengesetzte Transportrichtungen darstellen. Einmal geht die Wärme in den Körper und beim Abkühlen wieder heraus.

Mit der Wärme lässt sich Arbeit verrichten, was bei einer Dampfmaschine sehr offensichtlich ist. Jedoch ist eine 100 % Wandlung von Wärme in Arbeit nicht möglich. Auch gibt es keinen Wärmetransport von kalt nach warm. Eine Dampfmaschine benötigt eine warme Quelle und eine kalte Senke, um den Wärmetransport zu bewirken.

Altsandkühler lassen sich wie eine Wärmekraftmaschine betrachten. Es gibt den zu kühlenden Altsand als warme Quelle und von dieser Quelle wird ein Teil durch den energieintensiven Vorgang der Verdunstung verbraucht. Ein Teil der Wärme geht in die kalte Senke, die unmittelbare Umgebung des Kühlers. Ein großes Temperaturdelta zwischen der warmen Quelle und der kalten Senke sorgt für eine höhere Effizienz. In Kraftwerken, deren Turbinen Heißdampf von 300 °C zugeführt wird, spielt die Abwärme eine große Rolle. Kühltürme werden nicht nur aus Umweltschutzgründen zur

## 6 Formstoffe Kühlen von bentonitgebundenem Formstoff



Bei einem Altsandkühler wird der Wärmestrom vom warmen Altsand als Energieverbrauch („Arbeit“) in die Wasserverdunstung gesteckt. Die Abwärme geht in die kalte Senke, die Umgebung. Umgekehrt funktioniert ein Kühlschrank. Aus dem kalten Kühlschrank wird Wärme durch „Arbeit“ entzogen und in die wärmere Umgebung geleitet. Der Wärmestrom geht nur durch Aufbringen von Arbeit in die entgegengesetzte Richtung)

Schema zur Thermodynamik der Verdunstungskühlung (datec)



Altsandkühler in deutlich kühlerer Umgebung von 20 – 25 °C erreichen Altsandtemperaturen von 30 °C. Insofern ist bei der Projektierung eines Altsandkühlers immer auf den Aufstellort zu achten. Zweckmäßig sind Orte im Erdgeschoss mit viel Durchzug frischer und kühler Luft.

Schema zur Thermodynamik eines Kühlschranks (datec)

Vermeidung der Aufwärmung von Gewässern eingesetzt. Sie sollen auch den Wirkungsgrad für die Turbine erhöhen.

Von dem französischen Ingenieur Sadi Carnot (1796–1832) wurde der Wirkungsgrad einer Dampfmaschine definiert, indem das Verhältnis der produzierten Arbeit zur absorbierten Wärme betrachtet wird, was letztendlich über das Verhältnis der absoluten Temperaturen von  $T_{\text{Quelle}}$  und  $T_{\text{Senke}}$  sich darstellen lässt.

$$\text{Wirkungsgrad} = 1 - \frac{T_{\text{senke}}}{T_{\text{quelle}}}$$

Im Vergleich eines „guten“ mit einem „schlechten“ Kühlers ergeben sich folgende Wirkungsgrade, wenn bei einer Altsandtemperatur von  $100^\circ\text{C} = 373\text{ K}$  einmal  $30^\circ\text{C} = 303\text{ K}$  und einmal  $50^\circ\text{C} = 323\text{ K}$  erreicht werden. Der effektive Kühler hat einen Wirkungsgrad von  $1 - 303/373 = 1 - 0,81 = 0,18$  und der zweite nur  $0,13$ . Wirkungsgrade von Kraftwerken werden über  $0,4$  beziffert.

Für die Optimierung eines Kühlers sind zwei Arbeitsrichtungen zu verfolgen:

- Verbesserung der Kühlwirkung durch die Verdunstung
- Verbesserung der Wärmeabführung an die Umgebung

### Abschlußbemerkung

So unscheinbar ein Kühler auch ist und häufig nur als Nebenanlage gesehen wird, so ist der Kühler ein komplexes Gebilde, das bedeutende Effekte wichtiger physikalischer Gesetze ausnutzt.

Zum besseren Verständnis der Wirkungsweise ist das Kühlerdiagramm entwickelt worden, um ganz schnell über eine Abschätzung einige wichtige Dimensionierungszahlen zu haben. Bei diesem Verfahren sei der Hinweis angebracht, dass über das Kühlerdiagramm auf der Basis einer Energie-Wasser-Bilanz keine Aussage gefunden wird, wie gut der Kühler arbeitet. Die Angabe ist hinreichend genau, um die zu verdunstende Wassermenge zu bestimmen. Sie sagt nichts aus, bei welcher Temperatur und mit welcher Luftmenge diese Wassermenge abtransportiert wird. Die drei Temperatur-

angaben für die Ablufttemperatur sind Erfahrungswerte von einer Reihe von Altsandkühlern.

Nach heutigem Erkenntnisstand wird die Effektivität eines Kühlers zusätzlich beeinflusst über das Volumen, die Verweilzeit des zu kühlenden Altsandes und die Umgebungstemperatur zur möglichen Wärmeabgabe.

### Weiterführende Literatur

Ernst, W.: Effektive Kühlleistung von Altsandkühlern in der Sandaufbereitung durch die richtige Dimensionierung des Luftbedarfs. Gießerei-Erfahrungsaustausch, Heft 6/2004 S. 78–79.

W. Ernst: Chargenkühlung – ein optimiertes Kühlverfahren für Altsand. GIESSEREI 88 (2001) Heft 8, S. 49–54.

Gaede, J.: EVACTHERM®-Technik: die technisch zeitgemäße Aufbereitung von bentonitgebundenem Formstoff in Gießereien. GIESSEREI-PRAXIS (2012)6, S. 236–238.

Atkins, P.: Vier Gesetze, die das Universum bewegen; Stuttgart 2014.

Atkins, P.: Wärme und Bewegung; Heidelberg 1986.

Schlünder, E.-U., Martin, H.: Einführung in die Wärmeübertragung; Braunschweig/Wiesbaden 1995.

Hiecke u. Schubert; Verdunstungsvorgänge – Theorie und technische Anwendung; Leipzig 1976

Marek, R., Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung; Leipzig 2010.