

# RELIABLE FLOW AND TEMPERATURE MEASUREMENT

## WITH **GASTEMP**

### ACOUSTIC MEASUREMENT OF FLOW AND TEMPERATURE

- short response times
- flexible areas of application
- high accuracy
- ensured new process stability

THAT'S WHAT WE CALL THE KIMA PROCESS.

## SUMMARY

The current efforts to reduce CO<sub>2</sub> require the constant optimization of all production processes in the cement industry. The pyro-process is of central importance here. Improved control of the rotary kiln is a first and quick step to be implemented in order to reduce the total emissions of greenhouse gas. Effective control requires, among other things, a fast and precise measurement of gas temperatures and volume flow in the kiln. This contribution presents an acoustic system for measuring the temperature and flow velocity of hot gases by determining the transit time of acoustic pulses. The measurement is carried out transversely to the flow through the entire gas channel and thus provides the mean value for both variables over the cross-section of the flow in contrast to punctual measurement by using conventional thermocouples. It thus provides a more realistic picture of the gas flow. The acoustic measurement is also not influenced by thermal radiation, has reaction times in the range of seconds and does not have to position probes in the abrasive gas flow. A system for temperature measurement of the secondary air was successfully used in the kiln hood of the Dotternhausen cement plant of Holcim Süddeutschland GmbH. The measurement results were compared with those of the conventional thermocouple measurement. ◀

## ZUSAMMENFASSUNG

Die aktuellen Anstrengungen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion erfordern die ständige Optimierung aller Produktionsprozesse in der Zementindustrie. Dem Brennprozess kommt dabei die zentrale Bedeutung zu. Eine verbesserte Regelung des Drehrohrofens ist ein erster und schnell umzusetzender Schritt, um in der Summe den Ausstoß von Klimagas zu verringern. Eine effektive Regelung benötigt u.a. eine schnelle und präzise Messung von Gastemperatur und Volumenstrom in der Ofenanlage. In diesem Beitrag wird ein akustisches System zur Messung der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit heißer Gase mittels Bestimmung der Laufzeit von Schallimpulsen vorgestellt. Die Messung erfolgt quer zur Strömung durch den gesamten Gaskanal und liefert damit für beide Größen den Mittelwert über den Querschnitt der Gasströmung im Gegensatz zu der punktuellen Messung mittels Thermoelementen. Die akustische Temperaturmessung liefert damit ein realistischeres Bild von der Gasströmung. Die akustische Messung wird zudem nicht durch Wärmestrahlung beeinflusst, zeichnet sich durch Reaktionszeiten im Bereich von Sekunden aus und verzichtet auf die Installation von Sonden im abrasiven Gasstrom. Ein System zur Temperaturmessung der Sekundärluft am Ofenkopf eines Drehofens im Zementwerk Dotternhausen der Holcim Süddeutschland GmbH erwies sich als sehr erfolgreich. Die dabei gewonnenen Messergebnisse wurden mit denen aus einer konventionellen Thermoelementmessung verglichen. ◀

# Acoustic measurement of temperature and velocity of hot gases in the rotary kiln of the cement production; Part 1: Measurement of temperature

## Akustische Messung von Temperatur und Strömung heißer Gase beim Klinkerbrennen im Zementdrehofen; Teil 1: Temperaturmessung

### 1 Introduction

In view of rising energy costs and ongoing climate change, the pressure on cement manufacturers to optimize the production of cement is increasing strongly. As the cement industry has been identified as a major emitter of greenhouse gases, various ways are currently being pursued to reduce the emission of CO<sub>2</sub>.

The measures taken in this context range from the reduction or partial substitution of clinker use to modified production methods such as the application of the so-called oxyfuel process, in which CO<sub>2</sub> is captured, stored or reused. Proposals and initial pilot plants already exist for this. Due to the great technical challenges and the necessary investments, it will certainly be some time before significant results have been achieved.

Along the way, it seems sensible to further improve current production processes as far as possible in order to achieve verifiable results as quickly as possible. In particular, effective control of the cement rotary kiln also promises to have a significant effect on reducing CO<sub>2</sub> emissions. For this purpose, the most comprehensive information possible must be obtained about the condition of the burning process in order to then be able to react with suitable measures. Two important measured variables are the temperatures and volume flows of the various gas streams (in the end their enthalpy) at the rotary kiln. In the following, an acoustic temperature measurement is described which measures all gas temperatures in the rotary cement kiln with high speed and accuracy.

### 2 Basics

The widely used measurement of gas temperatures by means of thermocouples, in which the thermocouple must be positioned in the gas flow in order to then reach thermal equilibrium with the surrounding gas flow, has several disadvantages:

- ▶ Many gas flows in the cement manufacturing process are mostly loaded with abrasive dusts, which can destroy thermocouples in a very short time. Thermocouples must therefore be packed in thick-walled protective tubes made of steel or ceramic.
- ▶ This fact slows down the measurement of the gas temperature considerably.
- ▶ Although the protective tubes extend the service life of the thermocouples, they are usually destroyed after some time anyway.
- ▶ If there is a source of radiation in the vicinity, such as a flame or glowing material, then the thermocouple is

### 1 Einleitung

Angesichts von steigenden Energiekosten und des fortschreitenden Klimawandels, nimmt der Druck auf die Zementhersteller stark zu, die Produktion von Zement zu optimieren. Da die Zementindustrie als ein großer Emittent von Treibhausgasen erkannt wurde, werden gegenwärtig verschiedene Wege verfolgt, um die Emission von CO<sub>2</sub> zu reduzieren.

Die dabei ergriffenen Maßnahmen reichen von der Reduktion oder teilweisen Substitution des Klinkereinsatzes bis hin zu veränderten Produktionsweisen wie z.B. der Anwendung des so genannten Oxyfuel-Prozesses, bei denen CO<sub>2</sub> abgeschieden, gespeichert oder weiterverwendet wird. Hierzu gibt es bereits Vorschläge und erste Pilotanlagen. Aufgrund der großen technischen Herausforderungen und der erforderlichen Investitionen wird sicherlich noch einige Zeit vergehen, bis signifikante Ergebnisse erreicht worden sind.

Auf dem Weg erscheint es sinnvoll, die aktuellen Produktionsprozesse soweit wie möglich weiter zu verbessern, um so schnell als möglich nachweisbare Ergebnisse zu erzielen. Insbesondere verspricht auch eine effektive Regelung des Zementdrehofens einen deutlichen Effekt zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Dazu müssen möglichst umfassende Informationen über den Zustand des Brennprozesses gewonnen werden, um dann mit geeigneten Maßnahmen reagieren zu können. Zwei wichtige Messgrößen sind dabei die Temperaturen und Volumenströme der verschiedenen Gasströme (letztlich deren Enthalpie) am Drehrohrföfen. Im Folgenden wird eine akustische Temperaturmessung beschrieben, die alle Gastemperaturen im Zementdrehofen mit hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit misst.

### 2 Grundlagen

Die weitverbreitete Messung von Gastemperaturen mittels Thermoelementen, bei der das Thermoelement im Gasstrom positioniert werden muss, um dann ins thermische Gleichgewicht mit der umgebenden Gasströmung zu gelangen, besitzt mehrere Nachteile:

- ▶ Viele Gasströme im Zementherstellungsprozess sind zumeist durch abrasive Stäube belastet, wodurch Thermoelemente in sehr kurzer Zeit zerstört werden können. Thermoelemente müssen deshalb in dickwandige Schutzrohre aus Stahl oder Keramik gepackt werden.
- ▶ Durch diesen Sachbestand wird die Messung der Gastemperatur stark verlangsamt.
- ▶ Durch die Schutzrohre wird zwar die Lebensdauer der Thermoelemente verlängert, in der Regel werden diese jedoch nach einiger Zeit trotzdem zerstört.

heated up by thermal radiation with the consequence that in the end only a weighted average of gas and radiation temperature is measured.

- ▮ The measurement by means of a thermocouple is only carried out selectively in a large cross-section, so that the measurement result cannot generally be regarded as representative [1].

These disadvantages can be avoided by the acoustic measurement of the gas temperature, which is based on the temperature dependence of the sound velocity [1].

For an ideal gas, the speed of sound is given by [2]:

$$c = \sqrt{\frac{\psi \cdot p}{\rho}} \quad (1)$$

c: Speed of sound

ρ: Density of the gas

p: Pressure

ψ: isentropic exponent =  $c_p/c_v$ ,  
ratio of heat capacities at constant pressure ( $c_p$ )  
and at constant volume ( $c_v$ )

In the simplification of ideal gases, the density ρ can also be expressed by the thermal equation of state given in [2, 3]:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \rightarrow p = \frac{m}{V} \cdot R_i \cdot T \rightarrow p = \rho \cdot R_i \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{R_i \cdot T} \quad (2)$$

ρ: Density of the gas

$R_i$ : specific gas constant

T: Temperature

p: Pressure

m: Mass

V: Volume

Substituting equation 2 into equation 1 gives:

$$c = \sqrt{\psi \cdot R_i \cdot T} \quad (3)$$

The speed of sound in a gas is thus a direct measure of its temperature and, in the approximation considered here, depends neither on the pressure nor on the density of the gas. The temperature is obtained from equation 3:

$$T = \frac{c^2}{\psi \cdot R_i} \quad (4)$$

For a given gas calculated,  $R_i$  is a constant, the isentropic exponent ψ is also specific for the gas composition and additionally shows a weak temperature dependence. This dependence is dominated by nitrogen for all gases relevant in cement production (▮ Fig. 1). Since the temperature dependence is well known according to [4], this influence can be easily determined.

- ▮ Fig. 2 shows the calculated dependence of the sound velocity on the temperature (equation 3) for dry air. For a more accurate assessment and balancing of gas flows in process plants, it is useful to determine the temperature averaged over the cross-section. The speed of sound in a gas flow is determined by sending a short, loud acoustic pulse across the flow channel and determining its transit time. The basic design and measuring principle of such an arrangement are relatively simple (▮ Fig. 3). The diameter D of the gas-carrying channel (pipe) is usually known exactly. Once the transit time Δt of the acoustic pulse has been determined, the average sound velocity is calculated according to:

- ▮ Befindet sich in der Nähe eine Strahlungsquelle wie z.B. eine Flamme oder glühendes Material, dann wird durch thermische Strahlung das Thermoelement aufgeheizt mit der Konsequenz, dass am Ende nur ein gewichtetes Mittel aus Gas- und Strahlungstemperatur gemessen wird.

- ▮ Die Messung mittels eines Thermoelements erfolgt nur punktuell in einem großen Querschnitt, sodass das Messergebnis im Allgemeinen nicht als repräsentativ angesehen werden kann [1].

Diese Nachteile lassen sich durch die akustische Messung der Gastemperatur vermeiden, die auf der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit basiert [1].

Für ein ideales Gas ist die Schallgeschwindigkeit gegeben durch [2]:

$$c = \sqrt{\frac{\psi \cdot p}{\rho}} \quad (1)$$

c: Schallgeschwindigkeit

ρ: Dichte des Gases

p: Druck

ψ: Isentropenexponent =  $c_p/c_v$ ,  
Verhältnis der Wärmekapazitäten bei konstantem  
Druck ( $c_p$ ) und bei konstantem Volumen ( $c_v$ )

In der Vereinfachung idealer Gase kann die Dichte ρ auch durch die thermische Zustandsgleichung nach [2, 3] ausgedrückt werden:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \rightarrow p = \frac{m}{V} \cdot R_i \cdot T \rightarrow p = \rho \cdot R_i \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{R_i \cdot T} \quad (2)$$

ρ: Dichte des Gases

$R_i$ : spezifische Gaskonstante

T: Temperatur

p: Druck

m: Masse

V: Volumen

Durch Einsetzen von Gleichung 2 in Gleichung 1 erhält man:

$$c = \sqrt{\psi \cdot R_i \cdot T} \quad (3)$$

Die Schallgeschwindigkeit in einem Gas ist also ein direktes Maß für dessen Temperatur und hängt in der hier betrachteten Näherung weder vom Druck, noch von der Dichte des Gases ab. Die Temperatur erhält man aus Gleichung 3 nach:

$$T = \frac{c^2}{\psi \cdot R_i} \quad (4)$$

- ▮ Für eine gegebene Gaszusammensetzung ist  $R_i$  eine Konstante, der Isentropenexponent ψ ist ebenfalls spezifisch für die Gaszusammensetzung und zeigt zusätzlich eine schwache Temperaturabhängigkeit. Diese Abhängigkeit wird für alle bei der Zementherstellung relevanten Gase vom Stickstoff dominiert (▮ Bild 1). Da die Temperaturabhängigkeit nach [4] gut bekannt ist, lässt sich dieser Einfluss einfach ermitteln.

- ▮ Bild 2 zeigt die berechnete Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur (Gleichung 3) für trockene Luft. Für eine genauere Beurteilung und Bilanzierung von Gasströmungen in verfahrenstechnischen Anlagen ist es sinnvoll, die über den Querschnitt gemittelte Temperatur zu bestimmen. Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einer Gasströmung erfolgt, indem ein kurzer, lauter akustischer Puls quer durch den Strömungskanal gesendet und

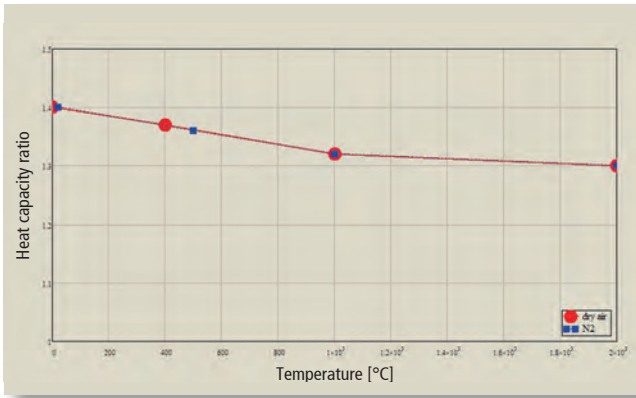


Figure 1: Heat capacity ratio for dry air and pure N<sub>2</sub>  
 Bild 1: Wärmekapazitätsverhältnis für trockene Luft und reinen N<sub>2</sub>

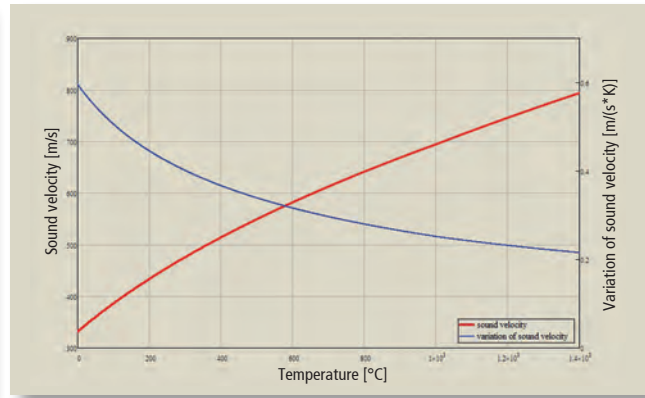


Figure 2: Sound velocity of dry air as a function of temperature  
 Bild 2: Schallgeschwindigkeit von trockener Luft in Abhängigkeit von der Temperatur

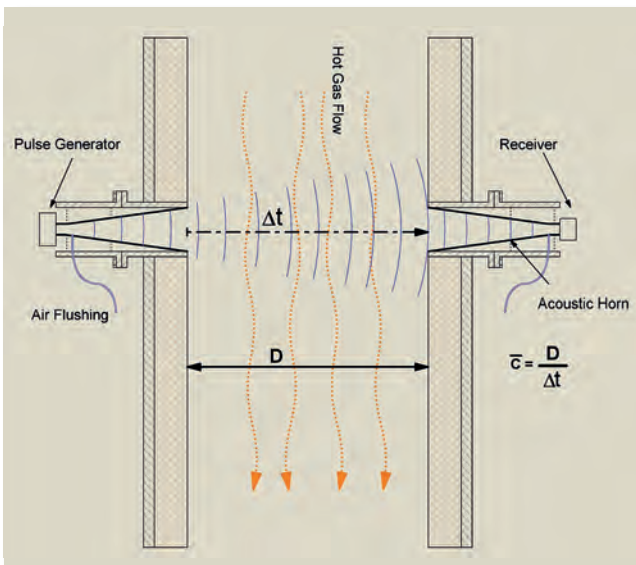


Figure 3: Schematic setup of acoustic temperature measurement  
 Bild 3: Schematischer Aufbau der akustischen Temperaturmessung

$$c = \frac{D}{\Delta t} \quad (5)$$

In practice, acoustic horns are used on the transmitting and receiving sides to concentrate the sound, increase the signal strength and prevent direct contact of the transmitter and receiver with the hot gas. The sound transit time in the horns is determined separately and subtracted from the total transit

seine Laufzeit bestimmt wird. Der grundlegende Aufbau und das Messprinzip einer solchen Anordnung sind relativ einfach (Bild 3). Der Durchmesser  $D$  des gasführenden Kanals (Rohr) ist in der Regel genau bekannt. Ist die Laufzeit  $\Delta t$  des akustischen Pulses bestimmt, berechnet sich die mittlere Schallgeschwindigkeit nach:

$$c = \frac{D}{\Delta t} \quad (5)$$

In der Praxis werden auf der Sende- und der Empfangsseite akustische Hörner eingesetzt, die den Schall bündeln, die Signalstärke erhöhen und den direkten Kontakt von Sender und Empfänger mit dem heißen Gas verhindern. Die Schalllaufzeit in den Hörnern wird separat ermittelt und von der Gesamtlaufzeit abgezogen.  $\Delta t$  ist dann nur die Laufzeit durch den Kanal und liefert damit die über den Querschnitt gemittelte Temperatur im Strömungskanal.

Für eine Abschätzung, welche Auflösung eine solche Anordnung in der Praxis erreichen muss, liefert Bild 4 einen Anhaltspunkt. Berechnet wurde die Laufzeit eines akustischen Pulses, der einen Gaskanal von 5 m Durchmesser für den Temperaturbereich 0 bis 1400°C durchläuft.

Die absoluten Laufzeiten mit 15 bis 6 ms und die zeitliche Auflösung von 25 bis 2,5  $\mu$ s, die notwendig sind, um eine theoretische Auflösung der Temperatur bis auf ein K zu erreichen, stellen für die moderne Elektronik grundsätzlich kein Problem dar.

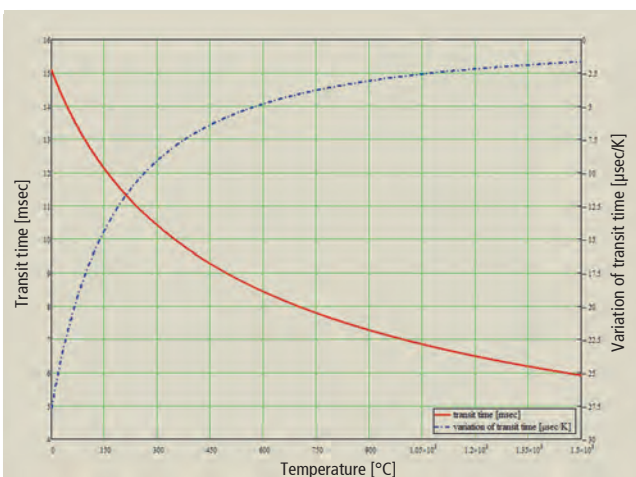


Figure 4: Acoustic transit time for a path length of 5 m  
 Bild 4: Akustische Laufzeit für eine Weglänge von 5 m

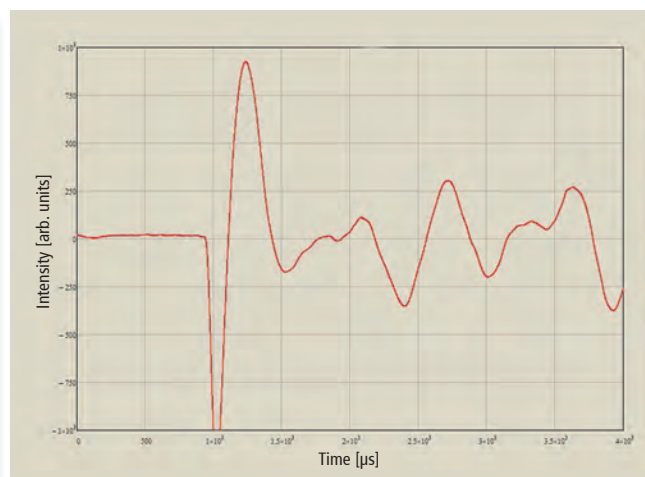


Figure 5: Transmitted acoustic pulse  
 Bild 5: Gesendeter Schallimpuls

time.  $\Delta t$  is then only the transit time through the channel and thus provides the temperature in the flow channel averaged over the cross-section.

► Fig. 4 provides an indication of the resolution that such an arrangement must achieve in practice. The travel time of an acoustic pulse passing through a gas channel of 5 m diameter for the temperature range 0 to 1400 °C was calculated.

The absolute transit times of 15 to 6 ms and the required temporal resolution of 25 to 2.5  $\mu\text{s}$ , which are necessary to achieve a theoretical resolution of the temperature down to one K, are basically no problem for modern electronics.

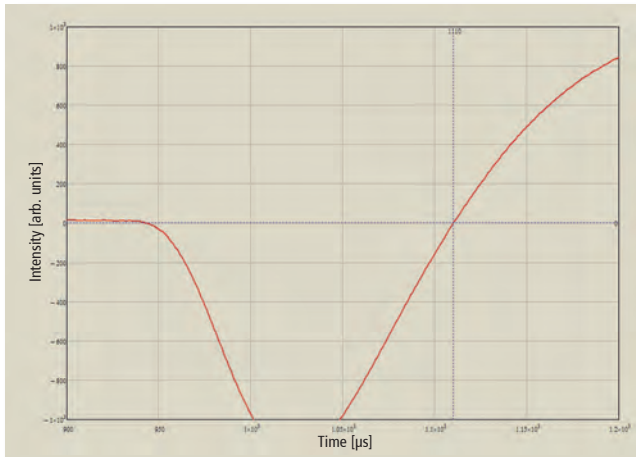


Figure 6: Transmitted acoustic pulse (enlarged section: zero crossing)

Bild 6: Durchgelassener Schallimpuls (vergrößerter Ausschnitt: Nulldurchgang)

In practice, however, this means that the acoustic signal, which is recorded by a microphone at the transmitter and receiver respectively, must reach a signal quality and signal steepness that makes such a measurement possible at all.

With a newly developed, very robust, pneumatic pulse generator, pulses can be generated that achieve a very high volume with a high steepness of the edges. At the same time, the generator is insensitive to the thermal stress caused by the hot gases and requires only very small amounts of compressed air for its operation. Therefore, the

In der Praxis bedeutet das allerdings, dass das akustische Signal, welches beim Sender und Empfänger jeweils mit einem Mikrofon aufgenommen wird, eine Signalqualität und Signalsteilheit erreicht, die eine solche Messung überhaupt ermöglicht.

Mit einem neu entwickelten, sehr robusten, pneumatischen Pulsgenerator können Pulse erzeugt werden, die bei hoher Steilheit der Flanken eine sehr hohe Lautstärke erreichen. Gleichzeitig ist der Generator unempfindlich gegenüber der thermischen Belastung durch die heißen Gase und benötigt für seinen Betrieb nur sehr geringe Mengen an Druckluft. Der Generator beeinflusst daher die Gasströmung nicht, die er misst. ► Bild 5 zeigt einen im Betrieb gemessenen Sendepuls.

Als Referenz für die Bestimmung des Zeitpunkts wird der Nulldurchgang benutzt. ► Bild 6 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Sendepulses um den Nulldurchgang und den „Referenzzeitpunkt“. Die zeitliche Auflösung beträgt ca.  $\pm 3 \mu\text{s}$  ohne Interpolation.

Zur effektiveren Transmission der Pulse werden diese über akustische Hörner abgestrahlt und empfangen. ► Bild 7 zeigt ein solches Horn. Es besteht in diesem Fall aus temperaturbeständiger Keramik, die Temperaturen von mehr als 1500 °C dauerhaft aushält. Für Anwendungen bei Temperaturen bis ca. 600 °C gelangen Hörner aus Stahl zum Einsatz.

Empfangssignale sind wesentlich schwächer als Sendesignale und müssen entsprechend elektronisch verstärkt werden. Dadurch ist notwendigerweise das Signal-Rauschverhältnis schlechter, was vom Durchmesser des Gaskanals, der Strömung und vielen weiteren externen Faktoren abhängt. ► Bild 8 zeigt das Beispiel eines Sende- und des zugehörigen Empfangspulses, die an einem Kanal von ca. 3,5 m Durchmesser gemessen wurden. Das Signal-Rauschverhältnis war auch auf der Empfangsseite gut genug, um den Nulldurchgang pro „Schuss“ mit einer Unsicherheit von  $\pm 3 \mu\text{s}$  bestimmen zu können. Das sagt allerdings noch nichts über die Schwankungen der Laufzeiten im Betrieb aus, die aufgrund vielfältiger, äußerer Einflüsse erheblich größer sein können.

### 3 Beispielhafter Einsatz der akustischen Gastemperaturmessung am Drehrohrföfen des Zementwerks Dotternhausen

Ein akustisches Temperatur-Messgerät, welches für den Messbereich von 0 bis 1500 °C ausgelegt ist, wurde im Zementwerk Dotternhausen der Holcim Süddeutschland GmbH am Ofenkopf installiert, um die Sekundärlufttemperatur zu messen. Die Gasstrecke hat eine Breite von 6 m (► Bilder 9–11).

► Bild 12 zeigt die Temperaturmessung der Sekundärluft mit dem akustischen Messgerät (rot) im Vergleich zur Messung mit einem Thermoelement (grün). Das Thermoelement zeigt eine höhere Temperatur an als das akustische Messgerät. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß das Thermoelement neben der Gastemperatur auch die Wärmestrahlung misst und nur eine punktuelle Messung darstellt, während die akustische Messung den Mittelwert über die gesamte Messstrecke wiedergibt. Die Kurvenverläufe sehen sich sehr ähnlich, wobei die akustische Messung schneller ist und eine höhere Dynamik zeigt.

Eine detailliertere Betrachtung der beiden Temperaturverläufe über längere Zeiträume zeigt, dass die akustische Messung



Figure 7: Acoustic horn, consisting of ceramic for up to 1600 °C

Bild 7: Akustisches Horn (Keramik für bis zu 1600 °C)



Figure 8: Transmitted and received pulse

Bild 8: Gesendeter und empfangener Impuls

generator does not affect the gas flow that it measures. Fig. 5 shows a transmission pulse measured during operation.

The zero crossing is used as a reference for determining the time. Fig. 6 shows an enlarged section of the transmit pulse around the zero crossing and the "reference time." The temporal resolution is approx.  $\pm 3 \mu\text{s}$  without interpolation.

For more effective transmission of the pulses, they are emitted and received via acoustic horns. Fig. 7 shows such a horn. In this case, it is made of temperature-resistant ceramic, which can permanently withstand temperatures of more than 1500 °C. For applications at temperatures up to 600 °C, horns made of steel are used.

Received signals are much weaker than transmitted signals and must be electronically amplified accordingly. This necessarily results in a poorer signal-to-noise ratio, which depends on the diameter of the gas duct, the flow and many other external factors. Fig. 8 shows the example of a transmit pulse and the corresponding receive pulse measured on a channel of about 3.5 m diameter. The signal-to-noise ratio was also good enough on the receive side to be able to determine the zero crossing per "shot" with an uncertainty of  $\pm 3 \mu\text{s}$ . However, this does not say anything about the fluctuations of the transit times during operation, which can be considerably larger due to a variety of external influences.

### 3 Exemplary application of acoustic gas temperature measurement at the rotary kiln of the Dotternhausen cement plant

An acoustic temperature measuring device, which is designed for the measuring range from 0 to 1500 °C, was installed at the kiln head in the Dotternhausen cement plant of Holcim Süddeutschland GmbH in order to measure the secondary air temperature. The gas section has a width of 6 m (Figs. 9–11).

Fig. 12 shows the temperature measurement of the secondary air with the acoustic measuring device (red) compared to the measurement with a thermocouple (green). The thermocouple indicates a higher temperature than the acoustic measuring device. This is mainly due to the fact that the thermocouple measures not only the gas temperature but also the thermal radiation and represents only a punctual measurement, whereas the acoustic measurement represents the average value over the entire measurement



Figure 9: View of the receiver at the kiln hood

Bild 9: Empfänger am Ofenkopf

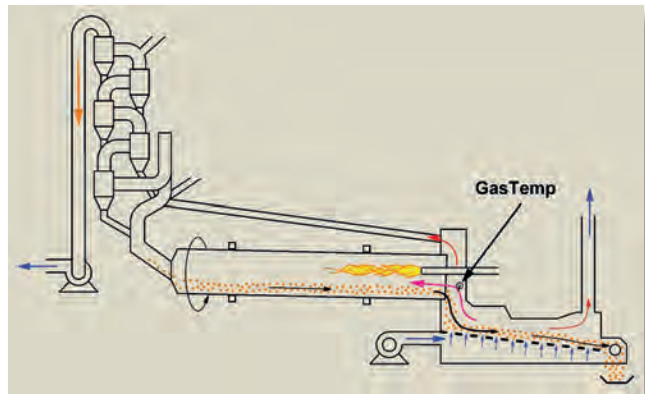


Figure 10: Schematic presentation of the kiln line with the gas temperature position at the kiln hood

Bild 10: Skizze GasTemp-Position an dem Ofenkopf

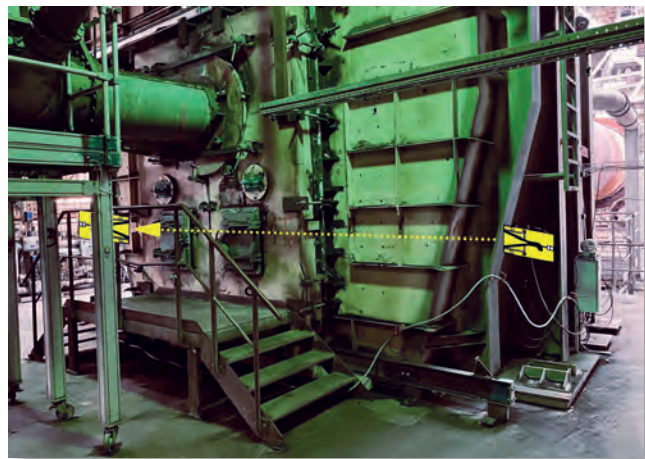


Figure 11: Measuring track through kiln hood

Bild 11: Messstrecke durch den Ofenkopf

in dieser Konfiguration vorwiegend bei fallenden Temperaturen einen „Vorlauf“, hat, bei steigenden Temperaturen jedoch sogar nachlaufen kann (Bild 13).

Dieser Befund erklärt sich aus dem generellen Unterschied der Temperaturmessmethoden und dem Verlauf der Gasströmung im Ofenkopf: Temperaturerhöhungen ergeben sich primär aus erhöhtem Energieeintrag, der aus der Flamme (Strahlung) kommt. Da die akustische Temperaturmessung ausschließlich die Gastemperatur wiedergibt, folgt sie dieser Erhöhung erst etwas später, wenn durch Rekuperation aus dem heißeren Klinker im Klinkerkühler das Gas eine erhöhte Temperatur angenommen hat.

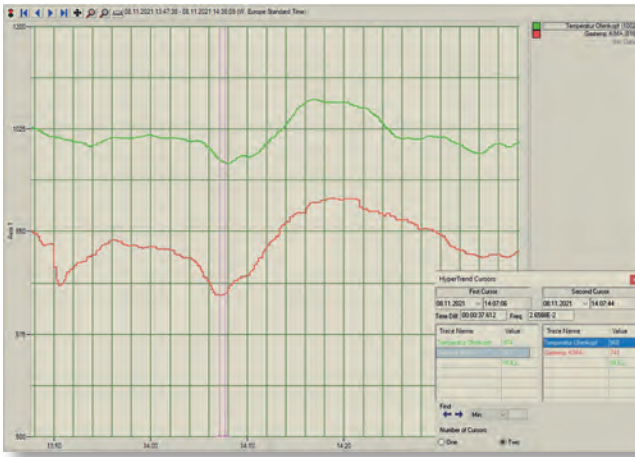


Figure 12: Time delay of thermocouple vs. acoustic measurement

Bild 12: Zeitverzögerung des Thermoelements gegenüber der akustischen Messung

distance. The curves look very similar, whereby the acoustic measurement is faster and shows a higher dynamic.

A more detailed examination of the two temperature curves over longer periods of time shows that the acoustic measurement in this configuration has a “lead” predominantly with falling temperatures, but can even lag behind with rising temperatures (► Fig. 13).

This finding can be explained by the general difference between the temperature measurement methods and the course of the gas flow in the kiln head: Temperature increases result primarily from increased energy input coming from the flame (radiation). Since the acoustic temperature measurement exclusively reflects the gas temperature, it follows this increase only somewhat later, when the gas has reached an increased temperature due to recuperation from the hotter clinker in the clinker cooler.

Occasionally, the acoustic measurement shows short temperature dips that are not found in the thermocouple measurement signal (► Fig. 14). These dips correlate with cycles of the air cannons, which are intended to keep the front area of the clinker cooler free. Since the air cannons only emit very short pulses, these are not detected by the comparatively “slow” thermocouple measurement.

#### 4 Findings from the temperature measurements

The following experiences were made during the temperature measurements at the kiln plant in the Dotternhausen cement works:

- The acoustic temperature measurement provides measured values exclusively for gas temperatures that are not superimposed by thermal radiation.
- The measurement yields the average value of the gas temperature over the measuring section through which the acoustic signal passes, thus providing a more realistic picture than a punctual measurement.
- The reaction time of the measurement is in the range of a few seconds.
- This allows control loops based on gas temperature to be set faster and more accurately, and reduces the tendency to oscillate.
- Temperature set points can be better maintained, reducing fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions.

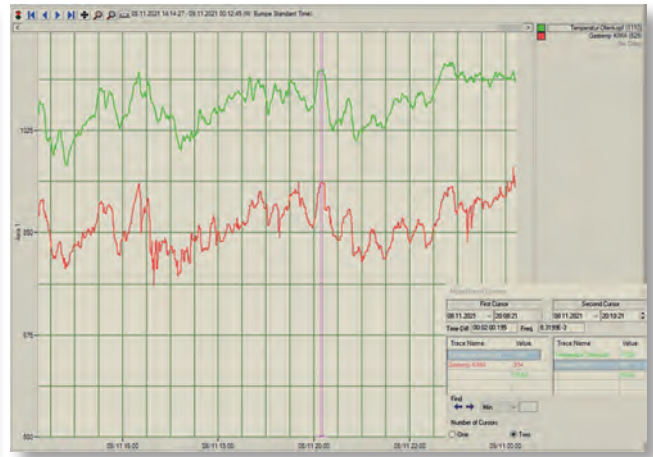


Figure 13: Time delay of acoustic measurement vs. thermocouple

Bild 13: Zeitverzögerung der akustischen Messung gegenüber dem Thermoelement



Figure 14: Average temperature – fast, short drop due to air blaster

Bild 14: Durchschnittstemperatur – schnelles, kurzes Absinken durch den Airblaster

Gelegentlich zeigt die akustische Messung kurze Temperatureinbrüche, die im Signal der Thermoelementmessung nicht zu finden sind (► Bild 14). Diese Einbrüche korrelieren mit Zyklen der Luftkanonen, die den vorderen Bereich des Klinkerkühlers freihalten sollen. Da die Luftkanonen nur sehr kurze Pulse abgeben, werden diese von der vergleichsweise „trägen“ Thermoelementmessung nicht erfasst.

#### 4 Erkenntnisse aus den Temperaturmessungen

Bei den Temperaturmessungen an der Ofenanlage im Zementwerk Dotternhausen wurden die nachstehenden Erfahrungen gemacht:

- Die akustische Temperaturmessung liefert Messwerte ausschließlich für Gastemperaturen, die nicht durch Wärmestrahlung überlagert sind.
- Die Messung ergibt den Mittelwert der Gastemperatur über der Messstrecke, die das akustische Signal durchläuft und damit ein realistischeres Bild als eine punktuelle Messung liefert.
- Die Reaktionsgeschwindigkeit der Messung liegt im Bereich einiger Sekunden.
- Dadurch können Regelkreise, die auf der Gastemperatur basieren, schneller und genauer eingestellt- und die Schwingneigung reduziert werden.
- Temperatursollwerte können besser eingehalten werden, wodurch der Brennstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesenkt werden können.

- › The acoustic horns are embedded in the brick lining and are not exposed to the abrasive gas flow.
- › With the measurement results obtained from acoustic temperature measurement, thermal balances of kiln systems in the cement industry can be carried out more precisely than before.

However, temperature measurement alone is not sufficient to establish a reliable heat balance; the respective gas volume flows must also be known.

By expanding to two receivers offset in the direction of flow, the acoustic measuring principle can be used to simultaneously determine the mean value of the velocity of the gas over the measuring section. The construction and results of such a measuring device are to be published in one of the next issues of the technical journal CEMENT INTERNATIONAL. ◀

- › Die akustischen Hörner sind in der Ausmauerung eingelassen und sind nicht dem abrasiven Gasstrom ausgesetzt.
- › Mit den aus der akustischen Temperaturmessung gewonnenen Messergebnissen können Wärmebilanzen von Ofenanlagen der Zementindustrie präziser als bisher durchgeführt werden.

Für die Aufstellung einer zuverlässigen Wärmebilanz reicht allerdings die Temperaturmessung allein nicht aus, auch die jeweiligen Gasvolumenströme müssen bekannt sein.

Durch die Erweiterung auf zwei in Strömungsrichtung versetzte Empfänger kann das akustische Messprinzip dazu benutzt werden, um gleichzeitig auch noch den Mittelwert der Geschwindigkeit des Gases über der Messstrecke zu bestimmen. Aufbau und Ergebnisse eines derartigen Messgeräts sollen in einer der nächsten Ausgaben der Fachzeitschrift CEMENT INTERNATIONAL veröffentlicht werden. ◀

#### LITERATURE / LITERATUR

- [1] Edelkott, D. : Regelung des Energiestroms zur Drehofenfeuerung bei der Herstellung von Portlandzementklinker. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 57, Beton-Verlag, Düsseldorf 1995.
- [2] Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 2014.
- [3] Levy, M.; Bass, H.E.; Stern, R.: Modern Acoustic Techniques for the Measurement of Mechanical Properties. Academic Press, London Series: "Experimental Methods in the Physical Sciences", Vol. 39, Academic Press 2001.
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Isentropenexponent> (abgerufen am 25. 10. 2021).

## ADVANCED PROCESS CONTROL INNOVATIVE MEASUREMENTS



**WE MEASURE  
PRECISELY**

**AND CONTROL  
INTELLIGENT**

### ADVANCED PROCESS CONTROL

- Elements of Artificial Intelligence
- Model Predictions, Soft Sensors
- Fuzzy Logics
- Rule-Based Expert Knowledge
- Classical Control Elements

### INNOVATIVE MEASUREMENTS

- **Flow** acoustic
- **Temperature** acoustic
- **Fill-Level** structure-borne sound
- **Torque** magnetic
- **Vibration** velocity

