

Schnelle tomographische Bestimmung der Temperaturverteilung im Gas von Hochöfen und Großfeuerungsanlagen mit Hilfe der interleaved sweep methode

Gottfried Behler¹, Jan-Gerrit Richter², Sebastian Buzga³

^{1,2} Inst. f. Technische Akustik, RWTH Aachen, 52056 Aachen, E-Mail: (gkb¹|jri²)@akustik.rwth-aachen.de
³ Z&J, IMI critical engineering, 52355Düren, E-Mail: buzga@t-online.de

Einleitung

Die Vermessung der Temperaturverteilung in Großfeuerungsanlagen sowie Hochöfen zur Eisengewinnung kann wichtige Betriebsparameter liefern, die dazu beitragen, dass der Abbrand sowohl ökonomisch wie auch technisch vorteilhaft gesteuert werden kann. Allerdings reicht die Messung am Rand der Anlage in der Regel nicht aus, um Parameter im inneren der Schüttung zu erkennen. Daher ist es das Ziel der schallpyrometrischen Tomographie, das Temperaturprofil im Rauchgas oberhalb der Schüttung in einer Schicht möglichst genau zu bestimmen. [1][2]

Zu diesem Zweck werden am Umfang des Hochofens oberhalb der Schüttung Sende-/Empfangseinheiten platziert, die aus einer Art Hornlautsprecher mit integriertem Mikrofon bestehen, so dass die Sendesignale bei der Abstrahlung aufgezeichnet werden können und mit den empfangenen Signalen an den nicht sendenden Systemen per Korrelation verrechnet werden können. Im Prinzip lässt sich so die Laufzeit von Sendestelle zu Empfangsstelle über die Lage des Korrelationsmaximums bestimmen. Aus den genauen Positionen der Mikrofone und den damit bekannten Abständen lassen sich die Laufzeiten in Schallgeschwindigkeiten umrechnen und so über die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit die mittlere Temperatur des Gases zwischen Sendestelle und Empfangsstelle ermitteln. Die Kenntnis aller Laufzeiten zwischen allen Sende und Empfangspositionen kann dann zur tomographischen Berechnung der Temperaturverteilung genutzt werden.

Grundlagen

Für die Berechnung der Temperatur aus der Schallgeschwindigkeit eignet sich die aus der Gaskinetik bekannte Formel:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

-	c	Schallgeschwindigkeit	[m/s]
-	R	Allgemeine Gaskonstante	[J/mol K]
-	κ	Adiabatenkoeffizient	[-]
-	M	Molgewicht	[kg/mol]
-	T	Temperatur des Gases	[K]

Der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur ist für trockene Luft in Abbildung 1 dargestellt. Eine direkte Übertragung dieser Grafik ist sicherlich nicht möglich, da die Zusammensetzung des Gases oberhalb der Schüttung zu anderen Abhängigkeiten führen kann.

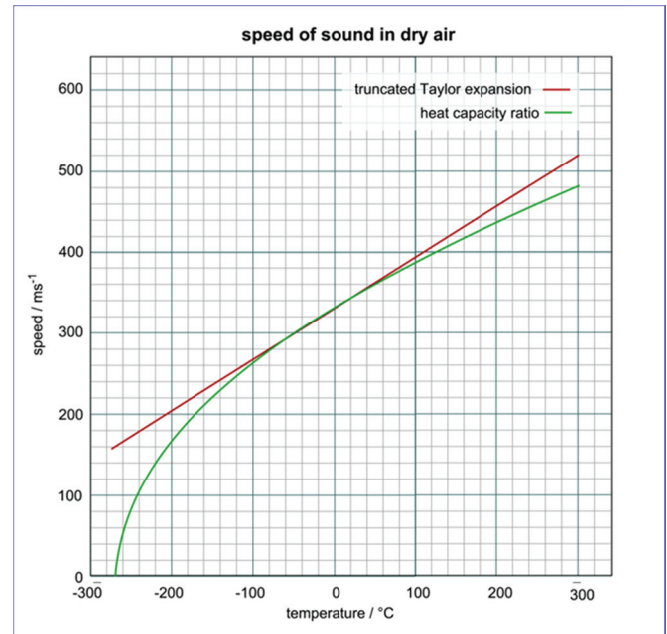


Abbildung 1: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur für trockene Luft. [wikipedia]

Implementierung in Hochofenanlagen

Eine typische Anwendung ist in der folgenden Abbildung 2 zu sehen. In einem Hochofen sind insgesamt 8 Sende/Empfangseinheiten im Umfang eingebaut. Die hierdurch zur Verfügung stehenden Messstrecken sind als Linien eingezeichnet.

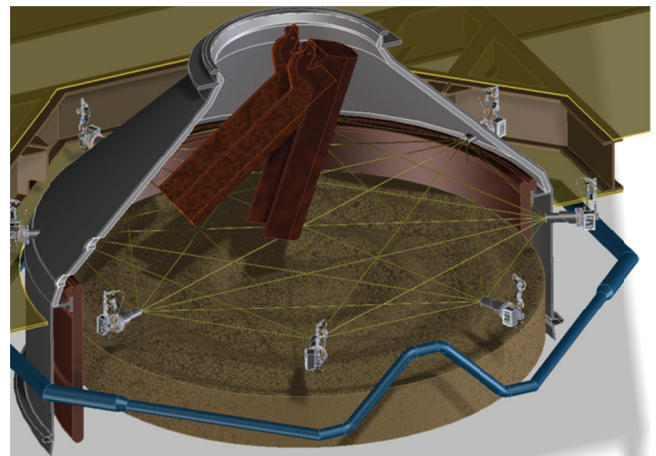


Abbildung 2: Typische Anordnung einer 8-kanaligen Anlage eines akustischen Pyrometers zur tomographischen Darstellung der Temperaturverteilung in einem Hochofen

Es ergibt sich eine recht vollständige Abdeckung, so dass eine tomografische Auswertung der Temperaturverteilung im Gas oberhalb der Schüttung möglich ist. Ein typisches Bild einer derartigen tomografischen Auswertung ist in Abbildung 3 dargestellt. Deutlich erkennbar ist hier die

typische Überhöhung der Temperaturverteilung in der Mitte des Ofens.

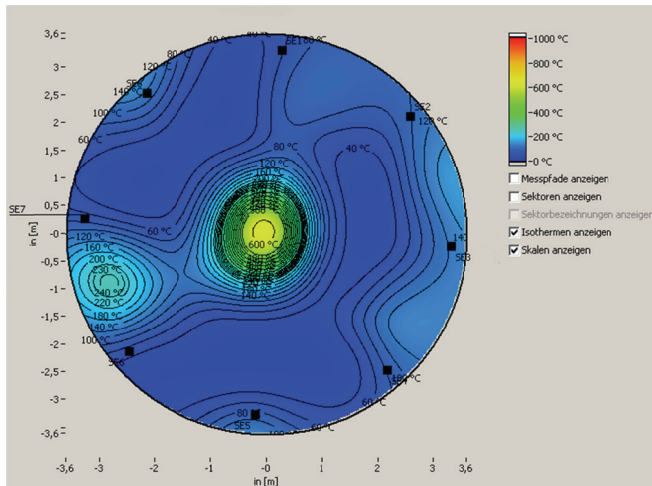


Abbildung 3: Tomographische Auswertung der Temperaturverteilung in einem Hochofen, basierend auf 8 Messpositionen entsprechend 56 Messpfaden (inkl. doppelt genutzter Pfade)

In den aktuellen Anlagen wird das Signal mit Hilfe eines Pressluftornes erzeugt, das mit Stickstoff bei 8 bar Druck ein extrem lautes (ca. 170-180 dB im Hornhals) und breitbandiges Rauschen liefert. Das an der Sendestelle generierte Signal wird durch das unmittelbar vor der Quelle im Horn befindliche ‚Mikrofon‘ aufgenommen und mit den an den fernen Mikrofonen empfangenen Signalen kreuzkorreliert. Die Dauer eines Sendevorgangs beträgt ca. 2 s, so dass bei konsequenter Weiterschaltung von Horn zu Horn eine Messdauer von ca. 16 Sekunden für die vollständige Erfassung aller Strecken erforderlich ist. Es darf angenommen werden (ohne Beweis), dass die erste und die letzte Messung nicht notwendiger Weise das gleiche Temperaturfeld erfasst haben müssen. Die Bestimmung der Laufzeit erfolgt dann nach zunächst umfangreicher Signalverarbeitung (Filterung, Segmentierung, Hüllkurvenbildung) durch eine Suche nach dem Maximum in der KKF.

Elektroakustisches System

Motivation für die Änderung der Anregung

Aufgrund diverser Probleme bei der Signalverarbeitung der Rauschsignale, aber auch motiviert durch die Tatsache, dass bei der aktuellen Technik sehr teure Drucksensoren für die Signalerfassung zum Einsatz kommen sowie der Idee, die Signalerfassung deutlich schneller zu erledigen, wurde eine elektroakustische Variante des Systems konzipiert.

Realisierung des ELA-Systems

Die hier vorgeschlagene Signalverarbeitung macht Gebrauch von der Methode der Impulsantwortmessung mittels Korrelationssignal. Als Signal kommt ein kurzer Sweep (< 2 s) zum Einsatz, der in einem beschränkten Frequenzbereich erzeugt wird. In Abbildung 4 sind Frequenzbereich und AKF des Anregungssignals dargestellt. Die Konstruktion des Anregungssystems ist in Abbildung 5 dargestellt.

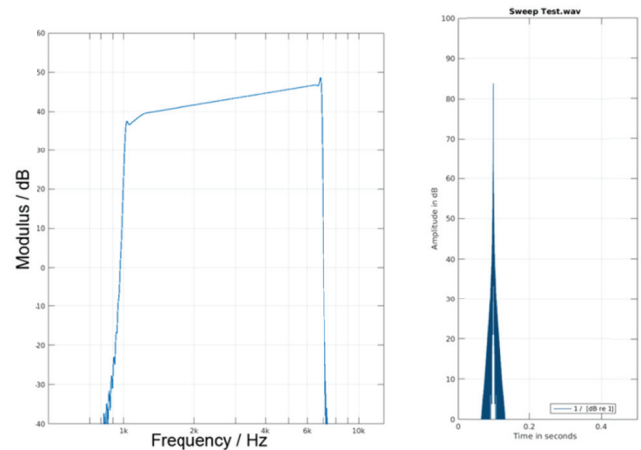


Abbildung 4: Anregungssignal für die elektroakustische Anlage. Links das Frequenzspektrum des Sweeps (1 kHz – 7 kHz), rechts die Autokorrelationsfunktion AKF

Das komplette elektroakustische System ist durch eine Kapton-Membran (C) vom Ofenraum getrennt. Hierdurch ist sichergestellt, dass eine Verschmutzung der sensiblen Wandler (A und B) ausgeschlossen werden kann. Zusätzlich wird der hermetisch abgeschlossenen Raum der ELA durch Stickstoff (D) aufgeladen, so dass ein Überdruck gegenüber dem Ofendruck (ca. 2 bar) von ca. 150 mbar auf der Membran lastet. Der relative Überdruck von 150 mbar wird über ein Differenzdruckventil stabilisiert, das kontinuierlich eine bestimmte Menge Stickstoff in den Ofen abfließen lässt. Hierdurch wird erreicht, dass bei schwankendem Druck im Ofen die Membran immer eine relativ konstante Vorspannung aufweist und bei der Anregung durch das Wechseldrucksignal des Druckkammertreibers nicht umklappt.

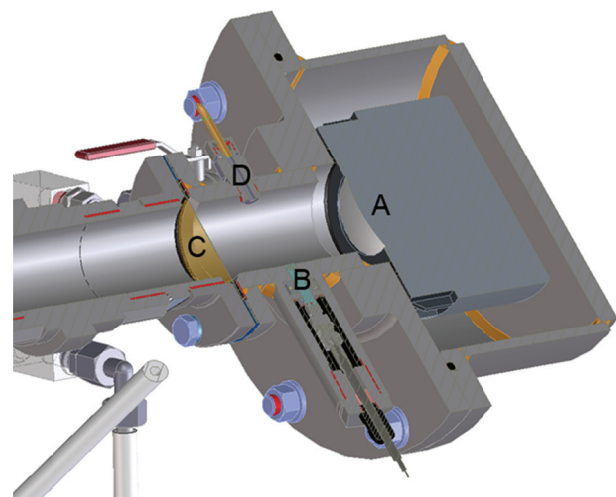


Abbildung 5: Aufbau des Elektroakustischen Messsystems. A: 2“ Druckkammertreiber, B: 1/4“_Mikrofon, C: Kapton-Membran, D: Stickstoffeinlass

Bei dem Druckkammertreiber handelt es sich um ein leistungsfähiges System mit 2“ Hornhalsanschluss, das in der Lage ist Schalldrücke bis ca. 170 dB im Hornhals zu erzeugen. Der am Ausgang des umgerüsteten Horns gemessene Schalldruckfrequenzgang ist in Abbildung 6 dargestellt. Durch die Kapton-Membran wird eine Dämpfung gegenüber dem frei abstrahlenden Horn von ca.

10 dB ab ca. 1 kHz verursacht. Bei hohen Frequenzen ist kaum noch Dämpfung erkennbar. Der sehr deutliche Einbruch bei 6 kHz ist nicht durch die Membran verursacht sondern dürfte von den im Rohr vorhandenen Querschnittsprüngen und Unstetigkeiten verursacht sein.

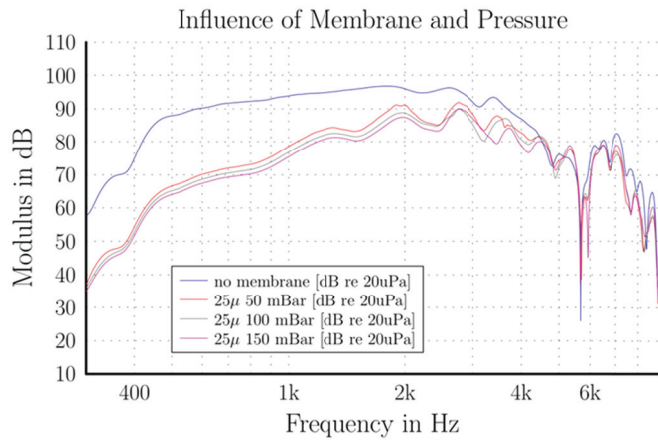


Abbildung 6: Übertragungsfunktion des ELA-Systems für unterschiedliche Randbedingungen, gemessen vor dem Hornmund des Hochofensystems. Die obere Kurve zeigt die Übertragungsfunktion ohne Kaptonmembran, die unteren 3 Kurven zeigen den Einfluss einer 25 µm Membran bei unterschiedlichen Drücken gegenüber der Umgebung. Messbedingungen: reflexionsarmer Raum unter Normalbedingungen.

Richtcharakteristik der Hornsysteme

Das ursprünglich verwendete Horn hatte bei einer Länge von ca. 60 cm einen Munddurchmesser von 14 cm und einen Halsdurchmesser von 2“. Ein Konisches Horn dieser Länge hat bei den hier eingesetzten Frequenzen eine beträchtliche Richtwirkung wie in Abbildung 7 erkennbar ist.

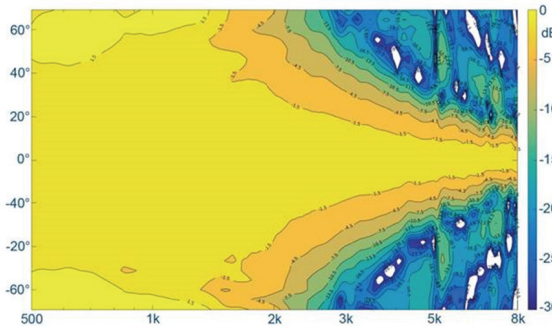


Abbildung 7: Richtverhalten des konischen Horns

Da für die Messstrecken zu den Nachbarhörnern eine deutlich breitere Abstrahlung benötigt wird, wurde das konische Horn durch ein System mit rechteckigem Mund von ca. 14 * 4 cm ersetzt (Abbildung 8).

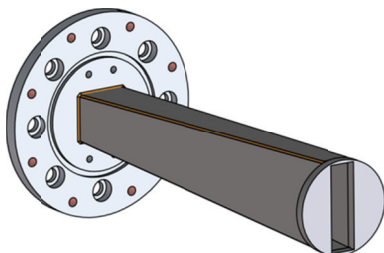


Abbildung 8: ‚Horn‘ mit rechteckigem Mund

Die hierdurch erzielte breitere Abstrahlung ist deutlich in Abbildung 9 erkennbar.

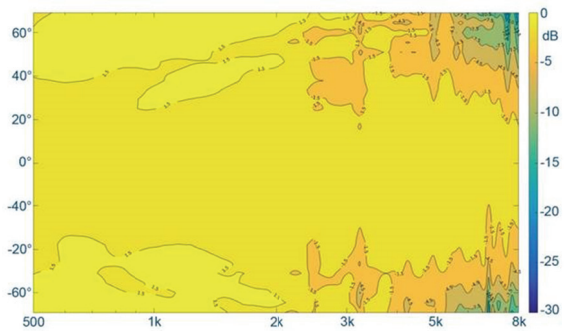


Abbildung 9: Horizontales Richtverhalten des Horns mit rechteckigem Mund

Beschleunigung der Messung

Bei der Verwendung exponentieller Sweeps ergeben sich einige signaltechnische Vorteile, die bei der Nachbearbeitung genutzt werden können. Nach der KKF sind die nichtlinearen Komponenten der Impulsantwort zeitlich gegenüber der linearen Impulsantwort (IR) verschoben. Die IR des hier verwendeten Druckkammersystems bei sehr hohen Schalldrücken ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wiedergegeben. Deutlich erkennbar sind die ab ca. 0,35 s auftretenden IRs der nichtlinearen Komponenten bis etwa der 12-fachen Frequenz.

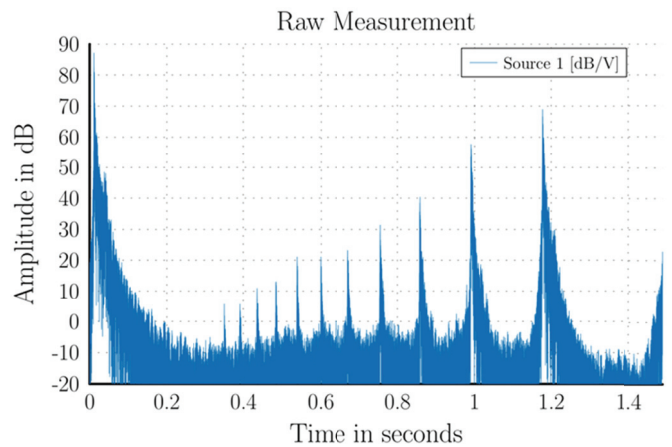


Abbildung 10: Nichtlineare IR des ELA-Systems

Eine Beschleunigung des Messablaufs kann erreicht werden, wenn nicht abgewartet wird, bis die Messdauer eines einzelnen Systems abgelaufen ist (jeweils nach ca. 2 s), sondern nach einer viel kürzeren Pause der Sweep des nächsten Horns gestartet wird. Die Pause hängt im Wesentlichen von der Abklingzeit der IR ab und sollte so kurz wie möglich gewählt werden, damit alle IR der N Systeme im Zeitbereich zwischen der linearen IR und der höchsten Harmonischen liegen. Eine derartige Vorgehensweise liefert dann eine IR wie sie in exemplarisch Abbildung 11 dargestellt ist. Die hier gewählte Pause beträgt 50 ms. Diese als Interleaved Sweep Methode [3][4] beschriebene Technik beschleunigt den Messvorgang eines Umlaufs um etwa den Faktor 10. Die Separation der

einzelnen IR erfolgt sodann mittels eines für den erwarteten Temperaturbereich gewählten Zeitfensters.

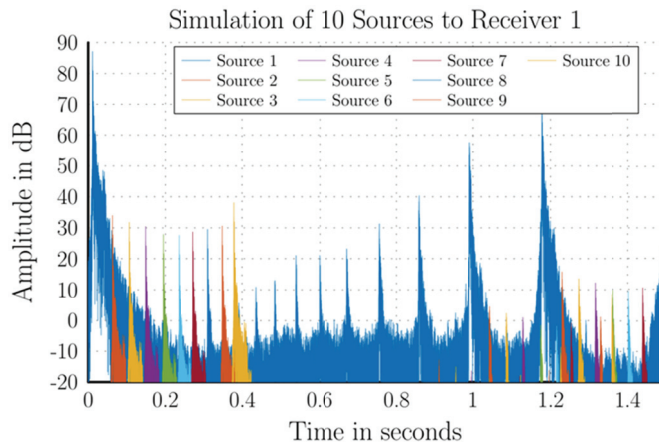


Abbildung 11: Gesamt-IR bei Verwendung der interleaved sweep Methode

Pilotanlage bei HKM Duisburg

Eine erste Installation mit 10 Sende/Empfangeinheiten wurde bei den Hüttenwerken Krupp Mannesmann (HKM) in Duisburg Ende Februar 2017 realisiert. Als Besonderheit wurden die Hornsysteme sowohl mit der herkömmlichen Pressluft-Signalerzeuger wie auch mit der elektroakustischen Signalerzeugung ausgestattet.

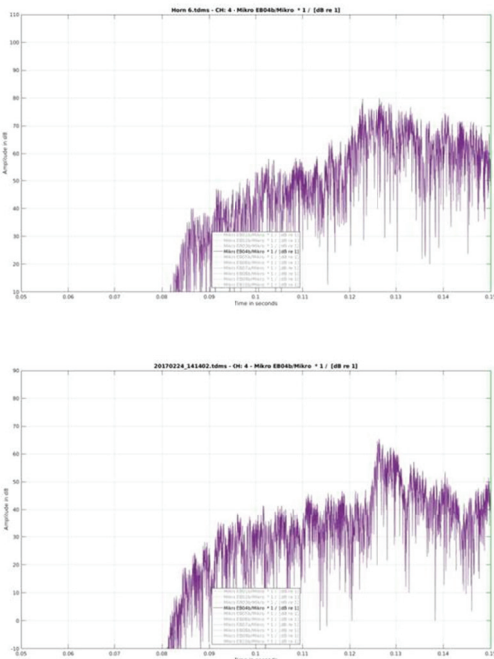


Abbildung 12: Vergleich der IR für einen langen (oben mit 1,9 s) und eine kurzen Sweep (unten mit 0,25 s)

Erste Messungen konnten mit der Anlage im ruhenden Betrieb des Hochofens gemacht werden, die zu guten Ergebnissen bezüglich der Laufzeitmessung kamen. Im Vergleich zu der elektroakustischen Anregung lagen deutlich bessere S/N Verhältnisse vor und die Reproduzierbarkeit der Laufzeiten war gut. Leider konnten die guten Ergebnisse der Messung in Ruhe während des nachfolgenden Regelbetriebs nicht erzielt werden, wenn auch die ELA-Technik deutlich erkennbare IRs an den Empfangsmikrofonen lieferte,

wohingegen mittels der Pressluftmethode keine verwertbaren Resultate erzielbar waren.

Der für die Auswertung der Laufzeit benötigte deutliche Anstieg der KKF-Hüllkurve, die mittels Hilbert-Transformation gewonnen wird, ließ keine hinreichend genaue Bestimmung zu. Vorläufige Analysen deuten darauf hin, dass starke Turbulenzen im Ofen zu erheblichen Zeitvarianzen führen, so dass die KKF stark verbreitert ist und ein deutliches Maximum der KKF nicht vorliegt. Erste Versuche mit verkürzten Sweeps lassen erkennen, dass die Steilheit der IR-Flanke besser wird (vgl. Abbildung 12). Allerdings sind die bislang vorliegenden Ergebnisse noch nicht ausreichend validiert.

Zusammenfassung

Für die Messung der Temperaturverteilung in Hochofensystemen wurde die bekannte Pressluft-Fanfaren-Technik der Akustischen Pyrometrie mit elektroakustischen Systemen umgesetzt. Vorteile der Verwendung von Elektroakustik ist einerseits die Reproduzierbarkeit der Signale, so dass eine gute Kreuzkorrelation mit dem Sendesignal ohne Messung des abgestrahlten Schalls möglich wird. Dies erlaubt, das Messsignal am Sender synchron zu verwenden, so dass zusätzlich die Beschleunigung des Messablauf durch die Interleaved Sweep Methode erfolgen kann. Die elektroakustischen Systeme wurden zum Schutz vor der Ofenatmosphäre mit einer Membran abgetrennt, so dass die Gefahr der Zerstörung deutlich herabgesetzt wurde.

Erste Ergebnisse aus einer Pilotanlage in einem Hochofen der HKM in Duisburg waren bedingt erfolgreich. Eine Verbesserung der Erkennung der IR-Maxima an den Empfangsstellen ist noch erforderlich.

Literatur

- [1] Mayer, Alfred M.: On an acoustic pyrometer, Philosophical Magazine Series 4, anno 1873, 45:297, 18-22
- [2] SYSTEM FOR TEMPERATURE PROFILE MEASUREMENT IN LARGE FURNANCES AND KILNS AND METHOD THEREFOR, United States Patent No. 4,762,425, Aug. 9, 1988
- [3] Majdak, P., Balazs, P., Laback, B: Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions, JAES Volume 55 Issue 7/8 pp. 623-637; July 2007
- [4] Dietrich, P., Masiero, B., Vorländer, M.: On the Optimization of the Multiple Exponential Sweep Method, JAES Volume 61 Issue 3 pp. 113-124; March 2013