

# Bildgebende Ultraschallprüfung von feuerfesten Erzeugnissen – Erste Erfahrungen mit einem Mehrkanal-Prüfsystem

Martin SCHICKERT \*, Bernd MÜLLER \*, Ulrich TÜMMLER \*,  
Wolfgang HILLGER \*\*, Detlef ILSE \*\*, Lutz BÜHLING \*\*,  
Gerhard URBANEK \*\*\*, Christian MANHART \*\*\*

\* Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar  
\*\* Ingenieurbüro Dr. Hillger, Braunschweig  
\*\*\* RHI AG, Technology Center, Leoben, Österreich

**Kurzfassung.** Feuerfeste Erzeugnisse aus grobkeramischen Materialien werden in Hochtemperaturanlagen bei der Stahl-, Glas- und Zementherstellung eingesetzt. Neue Materialmischungen und Herstellungsmethoden werden meist an Normalformatsteinen mit den Abmessungen 230 mm x 115 mm x 75 mm getestet.

Zur bildgebenden Prüfung vor allem von Normalformatsteinen wurde das 120-Kanal-Ultraschall-Prüfsystem FLEXUS 120 entwickelt. Das Prüfsystem umfasst die Elektronik und Mechanik zur halbautomatisierten Prüfung der Steine in Durchschallung.

Kernstück sind ein Sende- und ein Empfangsarray aus je 60 Prüfköpfen, die in einer 10 x 6-Rasteranordnung eine Fläche von 180 mm x 100 mm abdecken. Durch elektronisch geschaltete Prüfköpfe sind sowohl eine schnelle direkte Durchschallung als auch eine tomografische Abbildung mit beliebigen Sender-/Empfängerkombinationen möglich. Die Messergebnisse lassen sich als zweidimensionale Durchschallungsbilder bzw. dreidimensionale tomografische Rekonstruktionen darstellen.

Im Beitrag werden das Ultraschall-Prüfsystem und erste Ergebnisse der Anwendung zur Homogenitätsanalyse von Testkörpern und feuerfesten Steinen vorgestellt.

## 1 Einleitung

Feuerfeste Erzeugnisse für Hochtemperaturanlagen werden in unterschiedlichen Geometrien und Materialtypen hergestellt, um den unterschiedlichen Einsatzbedingungen wie der Auskleidung von Konvertern und Pfannen für die Stahl-, Zement- oder Glaserzeugung zu entsprechen. Bei den feuerfesten Materialien handelt es sich um grobkeramische Strukturen, deren Eigenschaften speziell für die jeweilige Anwendung entwickelt werden. Wichtige Eigenschaften sind hohe Anwendungstemperaturen, Festigkeit sowie Resistenz gegen chemischen Angriff, Heißerosion und Temperaturschocks.

Für die Qualitätssicherung der feuerfesten Erzeugnisse ist die Ultraschallprüfung vor allem in Durchschallung ein gängiges Verfahren [1]. Die Charakterisierung der Materialeigenschaften erfolgt durch die Pulsgeschwindigkeit über eine Laufzeitmessung. Verringerte Werte deuten auf Materialfehler wie Inhomogenitäten, Porenanhäufungen oder Risse hin. Eine anschauliche und prägnante Auswertung der Pulsgeschwindigkeiten ist durch die

Durchführung von Rastermessungen auf der Oberfläche und die bildgebende zwei- oder dreidimensionale Darstellung der Ergebnisse möglich [2], [3]. Dafür werden auch elektronisch geschaltete Ultraschall-Arrays eingesetzt [4].

Zur schnellen Charakterisierung von feuerfesten Steinen wurde ein Prüfsystem entwickelt, das elektronisch geschaltete Sende- und Empfangsarrays mit je 60 Prüfköpfen, ein Ultraschallgerät und eine Messmechanik umfasst. Das Prüfsystem ist sowohl für Direktdurchschallung als auch für beliebige Schrägdurchschallungen ausgelegt. So lassen sich tomografische Abbildungen realisieren, mit denen zusätzlich die Tiefenabhängigkeit der Messgröße Pulsgeschwindigkeit, Pulslaufzeit oder Pulsamplitude dargestellt werden kann.

Im Beitrag werden das Ultraschall-Prüfsystem vorgestellt und erste Ergebnisse der Anwendung zur Homogenitätsanalyse von Testkörpern und feuerfesten Steinen präsentiert.

## 2 Ultraschall-Messprinzip

### *Direktdurchschallung*

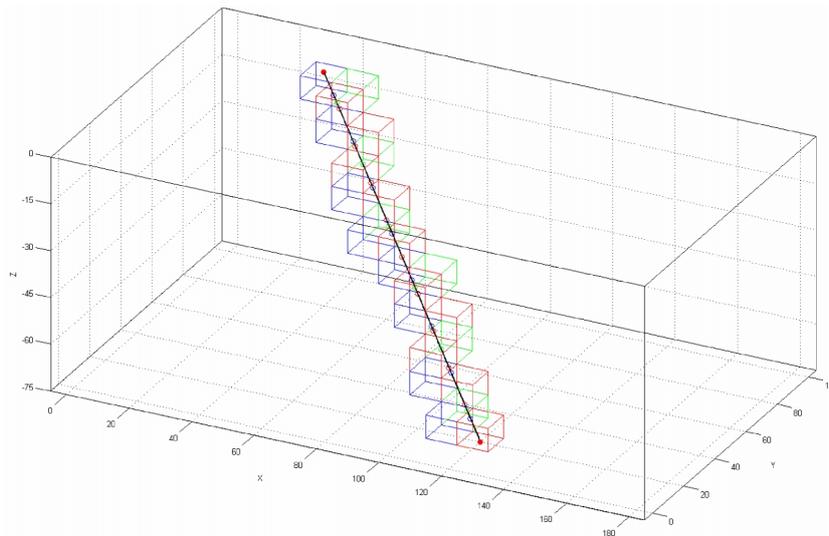
Bei der Direktdurchschallung werden ein Sende- und ein Empfangsprüfkopf auf gegenüberliegenden Oberflächen des Prüfobjekts aufgesetzt. Das eingeschallte Signal wird auf dem Weg durch das Material durch die Streuung an Inhomogenitäten verzögert und geschwächt. Der Laufzeit- oder Amplitudendifferenz des Empfangssignals zum Sendesignal liefert daher ein integrales Maß für die Materialeigenschaften entlang des direkten Schallwegs zwischen den Prüfköpfen. Bei feuerfesten Erzeugnissen wird statt der Laufzeit häufig die Pulsgeschwindigkeit ausgewertet; dabei führen Materialinhomogenitäten zu geringeren Werten.

### *Tomografie*

Die Beugungstomografie im Zeitbereich erweitert das Prinzip der Direktdurchschallung auf eine Vielzahl von Schallwegen in Direkt- und Schrägdurchschallung. Dafür werden eine größere Zahl an Sende- und Empfangspositionen nacheinander mit einem Prüfkopfpaar oder in schneller Folge durch je ein elektronisch gesteuertes Sende- und Empfangsarray abgetastet. Wie bei der Direktdurchschallung wird die Schallausbreitung durch das Modell der geometrischen Optik als Schallstrahlen beschrieben.

Im vorliegenden Fall werden ein Sende- und ein Empfangsarray mit je 10 x 6 Prüfköpfen verwendet, die planparallel angeordnet sind. Bild 1 zeigt die Anordnung mit einem Schallstrahl von einer Sendeposition auf eine Empfangsposition (rote Punkte). Der Bereich zwischen den Arrays ist der Abbildungsbereich und entspricht dem Material. Der Abbildungsbereich ist zu diesem Zweck in quaderförmige Voxel unterteilt, die in x- und y-Richtung eine Unterteilung des Sende- und Empfangsrasters sind und in z-Richtung den Abstand zwischen Sende- und Empfangsarray ganz ausfüllen.

Auf dem Weg durch den Abbildungsbereich schneidet der Schallstrahl eine Reihe von Voxeln, auf die der gemessene Laufzeit- oder Amplitudenwert verteilt wird. Da eine Vielzahl von Schallstrahlen gemessen wird, werden die meisten Voxel von mehreren Schallstrahlen getroffen, deren Messwerte gemittelt werden. Die Anzahl der Treffer hängt von dem maximalen Versatz zwischen Sende- und Empfangsposition und der Lage des Voxels im Abbildungsbereich ab. Nach Abschluss der Messungen enthält der Abbildungsbereich die dreidimensionale Verteilung der Messgröße.



**Bild 1.** Beugungstomografie im Zeitbereich: Beispiel für einen Schallstrahl von einer Sende- zu einer Empfangsposition mit durchquerten Voxeln im Abbildungsbereich

### 3 Prüfsystem

Das bildgebende 120-Kanal-Ultraschall-Prüfsystem FLEXUS 120 umfasst die Elektronik und Mechanik zur halbautomatisierten Prüfung von feuerfesten Steinen in Durchschallung. Es besteht aus einem Niederfrequenz-Ultraschallgerät, je einem Sende- und Empfangsarray (Bild 2) und einer vielseitig verstellbaren Mechanik.

Kernstück sind ein Sende- und ein Empfangsarray aus je 60 Prüfköpfen, die in einer 10 x 6-Anordnung eine Fläche von 180 mm x 100 mm abdecken. In die Ultraschallarrays sind je ein Sende- und ein Empfangsmultiplexer integriert, die die Prüfköpfe in einer programmierbaren Reihenfolge schalten, so dass sowohl eine direkte Durchschallung als auch eine tomografische Abbildung mit beliebigen Sender-/Empfängerkombinationen bei 60 bis 3600 Schallwegen möglich ist. Als Prüfköpfe werden niederfrequente DPC-Punktkontaktprüfköpfe der Fa. ACSYS, Moskau, eingesetzt, die kein Koppelmittel benötigen. Ultraschallgerät und Multiplexer stammen vom Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig; die Arrays wurden von der MFPA Weimar gefertigt.



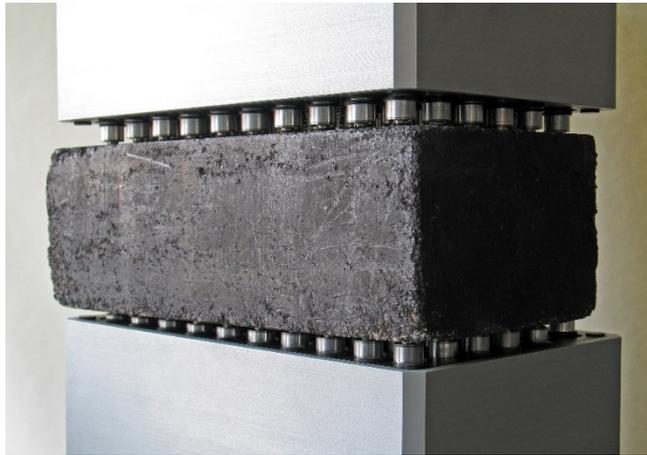
**Bild 2.** Aktive Komponenten des Prüfsystems FLEXUS 120: Ultraschallgerät sowie Ultraschall-Sende- und Empfangsarray mit jeweils 10 x 6 Prüfköpfen

Die Mechanik ist eine Konstruktion der RHI AG und dient zur Aufnahme der Prüfobjekte sowie zur Führung und zum Andruck der Ultraschallarrays. Es können quaderförmige Normalformatsteine (Bild 3) und einachsig keilförmige Steine gemessen werden, wobei auch Aperturen aus Vielfachen der Prüfkopfmatrix erzeugt werden können.

Mit dem Prüfsystem können zweidimensionale Bilder in Direktdurchschallung und dreidimensionale tomografische Bilder generiert werden, wofür die Bildberechnungs- und Abbildungssoftware REKONS der MFPA Weimar verwendet wird. Zur Messung von Puls-geschwindigkeit, Laufzeit oder Amplitude sind verschiedene Messmöglichkeiten innerhalb einer Blende implementiert. Die Ergebnisse werden als zweidimensionale Falschfarbenbilder oder dreidimensionale Iso-Oberflächen-Bilder dargestellt. Die Messwerte stehen für weitergehende quantitative Auswertungen zur Verfügung.

#### 4 Messungen und Messergebnisse

Mit dem Prüfsystem wurde eine Reihe von Messungen durchgeführt, die die prinzipielle Arbeitsweise und die Darstellungsmöglichkeiten der Ergebnisse demonstrieren. Bild 3 zeigt die Messsituation vor dem Anpressen der Ultraschall-Arrays.

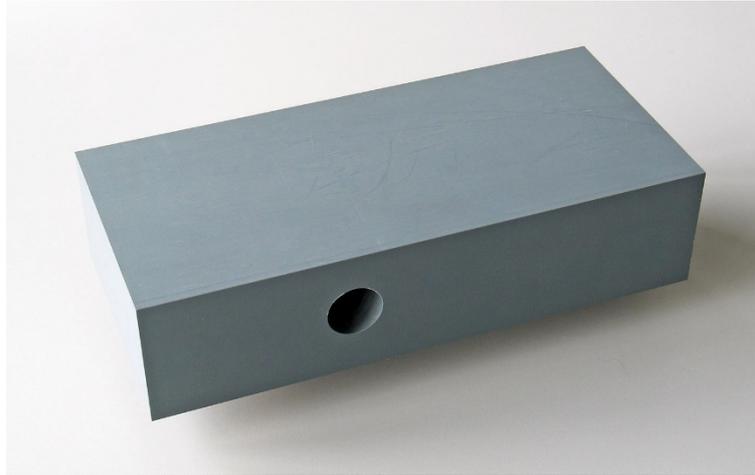


**Bild 3.** Messung eines feuerfesten Normalformatsteins

##### *PVC-Testkörper mit Querbohrung*

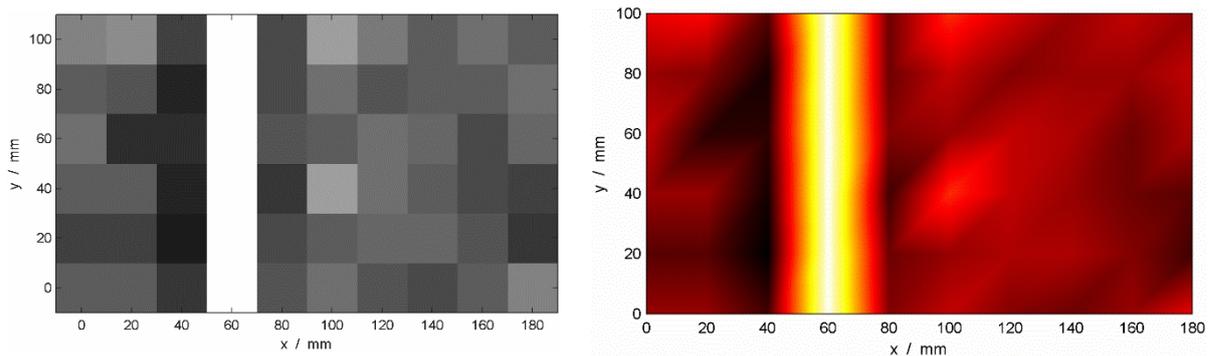
Der Testkörper aus extrudiertem PVC mit einer Querbohrung  $\varnothing$  30 mm in Bild 4 dient der Demonstration der prinzipiellen Wirkungsweise der direkten und der tomografischen Abbildung und der damit erzielbaren Auflösung. Für die Messung wurde der Testkörper mit den Abmessungen 310 mm x 140 mm x 75 mm so zwischen den Arrays platziert, dass die Bohrung bei  $x = 60$  mm liegt.

Als Ergebnis der Direktdurchschallung zwischen den 60 Prüfkopfpaaeren ist in Bild 5 die Pulsgeschwindigkeit dargestellt. In den Bildern erscheinen geringere Pulsgeschwindigkeiten heller. Während Bild 5 im linken Teil die Ergebnisse direkt im 10 x 6-Messraster zeigt, ist das Bild im rechten Teil geglättet.



**Bild 4.** PVC-Testkörper mit Querbohrung  $\varnothing$  30 mm

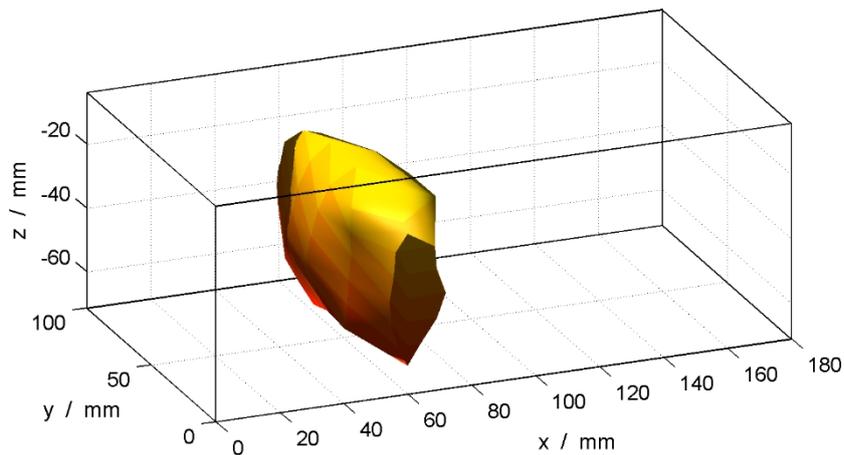
Die Querbohrung als Ziel ist in beiden Bildern deutlich durch die verringerte Pulsgeschwindigkeit als Folge des durch Beugung um die Querbohrung verlängerten Schallwegs erkennbar. Die runde Oberfläche der Querbohrung führt offensichtlich zu einer Pulsverformung, die die Wellen die unmittelbar benachbarten Schallwege scheinbar schneller durchlaufen lässt (dunklere Bereiche bei  $x = 40$  mm und  $x = 60$  mm).



**Bild 5.** Direktdurchschallung des PVC-Testkörpers mit Querbohrung aus 60 Einzelmessungen: Ergebnisbild im 10 x 6-Messraster (links) und geglättet (rechts)

Bild 6 zeigt das Ergebnis der tomografischen Rekonstruktion aus 2844 Einzelmessungen. Darin sind alle schrägen Schallwege bis zu einem maximalen Versatz von 6 Rasterpunkten zwischen Sender und Empfänger enthalten. Dargestellt ist die Pulsgeschwindigkeit als Iso-Oberflächenbild. Die abgebildete Volumenanzeige enthält die geringeren Werte der Pulsgeschwindigkeit.

Wie zu erwarten war, wird nur die Querbohrung im ansonsten homogenen Hintergrundmaterial abgebildet. Die vertikal längliche Form der Anzeige entsteht dadurch, dass die meisten der schräg verlaufenden Schallwege nur geringe horizontale Komponenten haben, da sich an den Seitenflächen keine Prüfköpfe befinden. Die horizontale Auflösung ist daher höher als die vertikale.

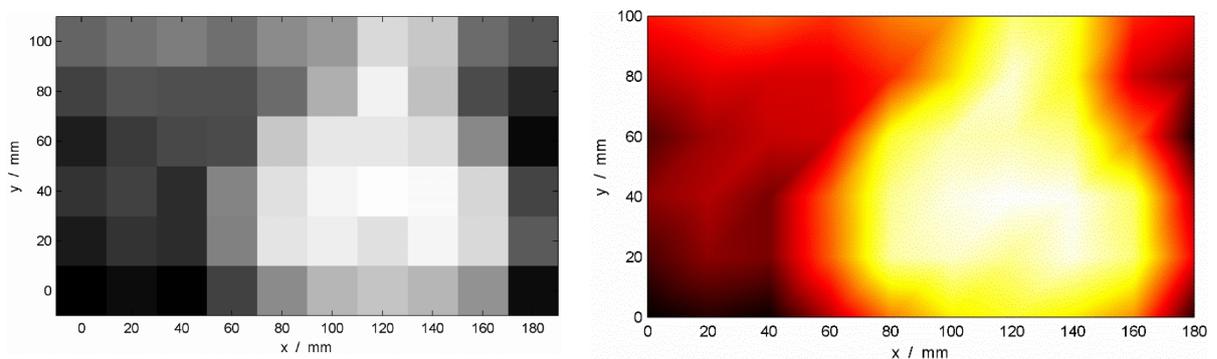


**Bild 6.** Tomografie des PVC-Testkörpers mit Querbohrung aus 2844 Einzelmessungen

### Feuerfestprobe #769

Als Beispiel für fertigungsnahe Proben wurde die Feuerfestprobe #769 mit dem Prüfsystem gemessen. Die Probe besteht aus MgO-C-Grobkeramik und hat die Abmessungen 230 mm x 115 mm x 100 mm.

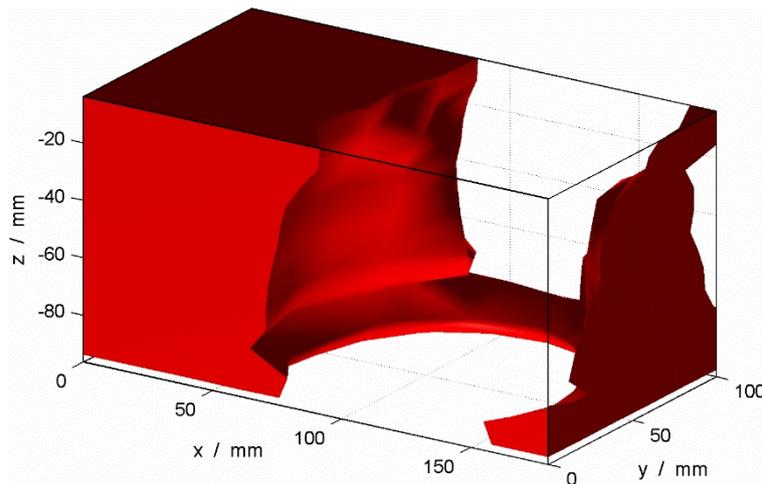
Bild 7 zeigt die Pulslaufzeit in Direktdurchschallung. Größere Laufzeiten, die durch Materialinhomogenitäten verursacht werden, sind in den Bildern dunkler dargestellt. Sowohl aus dem Rasterbild als auch aus dem geglätteten Bild lässt sich ablesen, dass große Volumenanteile vor allem in den Außenbereichen des Steins auffällig sind.



**Bild 7.** Direktdurchschallung der Feuerfestprobe #769 aus 60 Einzelmessungen: Bild der Pulslaufzeit im 10 x 6-Messraster (links) und geglättet (rechts)

Inwieweit die Auffälligkeiten tiefenabhängig sind, soll durch die tomografische Rekonstruktion geklärt werden. In Bild 8 ist das Rekonstruktionsergebnis der Pulslaufzeit dargestellt, das aus 1768 Einzelmessungen berechnet wurde. Der maximale Versatz zwischen Sender und Empfänger betrug 4 Rasterpunkte. Die Oberfläche entspricht der Grenze zu größeren Laufzeiten, die das rote Volumen bilden.

Die Tomografie zeigt in diesem Fall, dass die auffälligen Materialbereiche bis auf den Boden relativ gleichmäßig über die Probenhöhe verteilt sind.



**Bild 8.** Tomografie der Feuerfestprobe #769 aus 1768 Einzelmessungen

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte 120-Kanal-Ultraschall-Prüfsystem FLEXUS 120 eignet sich zur halbautomatischen Homogenitätsprüfung von feuerfesten Steinen in Durchschallung. Es ermöglicht schnelle Messergebnisse aus 60 Einzelmessungen in Direktdurchschallung und tiefenaufgelöste Tomografien aus bis zu 3600 Einzelmessungen, die sich qualitativ leicht erfassen und quantitativ auswerten lassen.

Die ersten Messergebnisse sind vielversprechend. Die Untersuchungen mit dem Prüfsystem bieten zwei- und dreidimensional orts aufgelöste Informationen über die Materialeigenschaften und die Materialstruktur.

Das System soll für gezielte Material- und Probenuntersuchungen in der Produkt- und Prozessentwicklung sowie in der Produktionskontrolle eingesetzt werden, um Rückschlüsse auf das Materialverhalten im internen Fertigungsprozess und beim Kundeneinsatz ziehen zu können. Auffällige Bereiche werden gegebenenfalls weiter zerstörend untersucht. Damit können die Entwicklung und der Test von neuen Materialmischungen und Herstellungsmethoden unterstützt werden.

## Referenzen

- [1] RHI-interne Prüfanweisungen und Untersuchungsberichte, seit 2000
- [2] Schickert, M.; Urbanek, G.; Manhart, Ch.: Abbildende Ultraschallprüfung von feuerfesten Erzeugnissen mit verschiedenen Ankoppeltechniken. In: *DACH-Jahrestagung 2012*, Graz, 17.–19.9.2012. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), CD-ROM, 2012, 1–9
- [3] Manhart, Ch.; Schickert, M.; Urbanek, G.: Ultrasonic Imaging of Refractories Using Different Coupling Techniques. *RHI Bulletin*, Steel Edition, Issue 1 (2013), 67–73
- [4] Samokrutov, A.A.; Shevaldykin, V.G.; Bishko, A.V.; Pluzhnikov, A.I.; Lobachev, A.S.: Testing Technology of Fire-Resistant Objects Using Ultrasonic Low-Frequency Antenna Arrays. In: *9th European Conference on NDT (ECNDT)*, Berlin, 25.–29.9.2006. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), CD-ROM, 2006, 1–5