

Abbildende Ultraschallprüfung von feuerfesten Erzeugnissen mit verschiedenen Ankoppeltechniken

Martin SCHICKERT*, Gerhard URBANEK**, Christian MANHART**

* Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar,
Coudraystr. 4, 99423 Weimar, Deutschland, martin.schickert@mfpa.de, www.mfpa.de

** RHI AG, Technology Center, Magnesitstraße 2, 8700 Leoben, Austria
gerhard.urbanek@rhi-ag.com, www.rhi-ag.com

Kurzfassung. Feuerfeste Erzeugnisse werden in verschiedenen Geometrien für den Einsatz in industriellen Hochtemperaturanlagen hergestellt. Sie bestehen generell aus grobkeramischem Material unterschiedlicher Materialzusammensetzung.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden für mehrere feuerfeste Produkte Messanordnungen für eine bildgebende Ultraschallprüfung entwickelt. Ziel war die Entwicklung von Prüftechniken und geeigneten Bilddarstellungen zur Detektion von Rissen und anderen Inhomogenitäten im Hinblick auf die jeweils unterschiedlichen Produktanforderungen. Ein wichtiger Punkt waren dabei die Ankoppeltechniken, die auf die Materialien der Produkte und die Einsatzbedingungen bei ihrer Prüfung abgestimmt wurden.

Im Rahmen der Studie wurden Messanordnungen für manuelle und automatisierte Rastermessungen entwickelt und getestet. Im Beitrag werden Messsystem, Messanordnungen sowie ausgewählte Ergebnisse der Messreihen vorgestellt.

1 Einleitung

Feuerfeste Erzeugnisse werden in Hochtemperaturanlagen eingesetzt, zum Beispiel als Auskleidung von Konvertern und Pfannen für die Stahlherstellung, Drehrohröfen für die Zementerzeugung oder Glaswannen (Bild 1). Um den vielfältigen Anforderungen Rechnung zu tragen, werden die Erzeugnisse in unterschiedlichen Geometrien und Materialtypen hergestellt. 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, Resistenz gegen chemischen Angriff, Heißerosion und Temperaturschocks.

Feuerfeste Steine werden teilweise im Rahmen der Qualitätssicherung mit Ultraschall geprüft [1,2]. Um die Möglichkeiten von genauen Riss- und Inhomogenitätsanalysen und einer automatisierten Anwendung zu evaluieren, wurden umfangreiche neue Untersuchungen durchgeführt. Die Proben waren prismatische und keilförmige Steine und zylindrische Produkte, die systematisch mit nieder- und normalfrequenten Ultraschall-Abbildungsverfahren gemessen wurden (Frequenzbereich 50 bis 100 kHz bzw. 1 bis 2 MHz). Aufgabenstellung war, Messanordnungen für die bildgebende Detektion von Rissen und anderen Inhomogenitäten verschiedener Lage und Orientierung zu entwickeln.



Bild 1. Feuerfeste Erzeugnisse als Wandmaterialien in einem Konverter zur Stahlerzeugung (links) und in einem Zement-Drehrohrofen bei der Zementerzeugung (rechts) [Fotos: RHI]

Im Beitrag werden Messsystem, Messanordnungen sowie ausgewählte Ergebnisse der umfangreichen Messreihen vorgestellt. Die Erfahrungen aus den Untersuchungen werden derzeit in Prüfsysteme für die industrielle Anwendung überführt.

2 Prüfaufgabe

Prüfaufgabe war die Ermittlung der Prüfbarkeit von verschiedenen feuerfesten Erzeugnissen mit Ultraschall, dabei vor allem die Konzeption und Erprobung von bildgebenden Prüfanordnungen. RHI stellte Probekörper mit verschiedenen Fehlertypen bereit, vor allem mit Gefügeinhomogenitäten verschiedener Größe sowie Rissen verschiedener Größe und Orientierung. Die genaue Prüfaufgabe wird bei der Besprechung der einzelnen Untersuchungen vorgestellt.

Das heterogene, grobkörnige Material der feuerfesten Erzeugnisse ist mit Ultraschall schwierig zu prüfen. Deshalb kamen nur niedrige Prüffrequenzen in Betracht. Es galt spezielle Messanordnungen zu entwickeln und die Prüftechnik, Signalverarbeitung und Bilddarstellung an die jeweilige Aufgabenstellung anzupassen.

3 Prüftechnik

Als Ultraschallgerät wurde ein USPC 3041 des Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig, verwendet. Das Gerät ist durch einen einstellbaren Rechteckpuls, rauscharme Vorverstärker und Analogfilter speziell für Niederfrequenzuntersuchungen ab 10 kHz geeignet. Als Prüfköpfe wurden verschiedene Longitudinal- und Transversalwellenwandler mit koppelmittelfreiem Punktkontakt, mit Luft- und mit Wasserankopplung eingesetzt. Die Nominalfrequenzen der Wandler lagen im Bereich von 50 kHz bis 2 MHz.

Für die Proben- und Prüfkopfhaltung wurden jeweils spezielle mechanische Messanordnungen angefertigt. Im Hinblick auf die bildhafte Darstellung der Prüfergebnisse wurden die Messungen meist auf einem ein- oder zweidimensionalem Raster durchgeführt. Die Prüfköpfe wurden dabei manuell geführt oder durch einen Scanner bewegt.

Die Empfangssignale wurden für die weitere Auswertung auf einen PC transferiert und dort mit dem Rekonstruktions- und Abbildungsprogramm REKONS der MFPA Weimar und weiteren, speziell entwickelten Programmen unter MATLAB ausgewertet.

4 Prüfdurchführung und Prüfergebnisse

Die Untersuchungen wurden im Auftrag von RHI an der MFPA Weimar durchgeführt. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Feuerfeste Normalformatsteine

Die feuerfesten Normalformatsteine bestehen aus einer kohlenstoffgebundenen Magnesia-matrix und haben die Abmessungen 230 mm × 115 mm × 75 mm (Bild 2, links). Sie werden in Pfannen und Konvertern bei der Stahlerzeugung eingesetzt und dienen als Entwicklungsmuster für neue Materialmischungen.

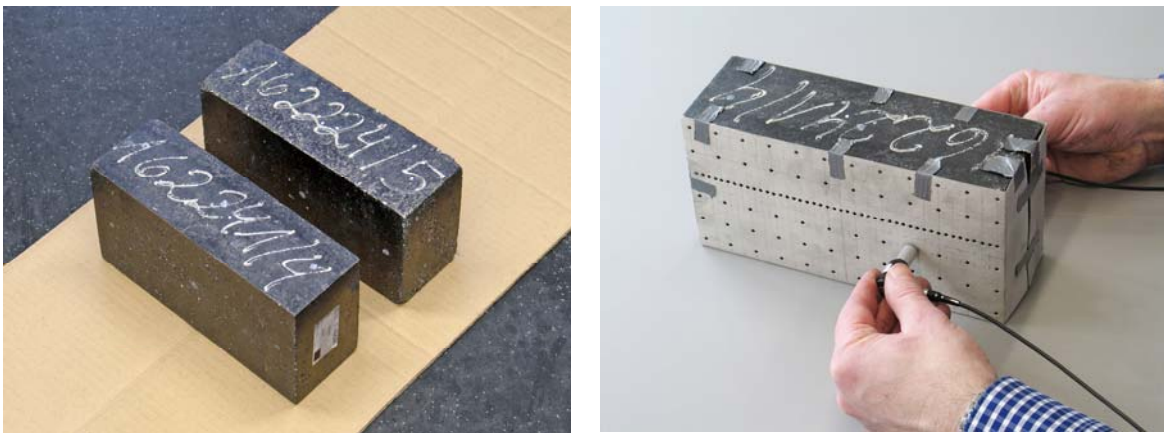


Bild 2. Normalformatsteine (links); flächige Rastermessungen in Durchschallung mit Punktkontaktprüfköpfen bei Trockenankopplung (rechts)

Die Steine sollten auf Inhomogenitäten im Volumen und am Rand geprüft werden. Dazu wurden manuelle 2D-Rastermessungen in Durchschallung durchgeführt. Als Prüfköpfe dienen zunächst 100 kHz-Wandler für Longitudinalwellen in Trockenankopplung (Bild 2, rechts).

Die Messungen wurden nach den Laufzeiten ausgewertet und die Ergebnisse als 3D-Laufzeitbilder dargestellt, indem die Laufzeit t bis zum Erreichen eines Amplitudenschwellenwertes als Fläche über die beiden Abtastkoordinaten x und y aufgetragen wurde. Sind die Signale durch Inhomogenitäten verzögert, wird der Schwellenwert später erreicht, und die 3D-Darstellung zeigt einen Einbruch.

Die Messungen wurden für verschiedene Probekörper an allen drei Flächenpaaren ausgeführt. Bild 3 zeigt die Ergebnisse für die größten Flächen zweier Steine. Im linken Bild sind die Laufzeiten in der Fläche relativ gleich, lediglich am vorderen Rand sind einige Signale verzögert. In Bild 3, rechts, sind dagegen größere Teile des inneren Steinbereichs deutlich verzögert, was auf einen Bereich mit Inhomogenitäten hindeutet.

Zum Vergleich wurden an den Normalformatsteinen auch Messungen mit Luftankopplung aufgenommen. Dazu wurden mit einem Ultraschall-Scanner automatisierte 2D-Scans in einem Raster von 2 mm × 2 mm durchgeführt. Es wurden luftgekoppelte Longitudinalwellenwandler mit einer Nominalfrequenz von 100 kHz eingesetzt.

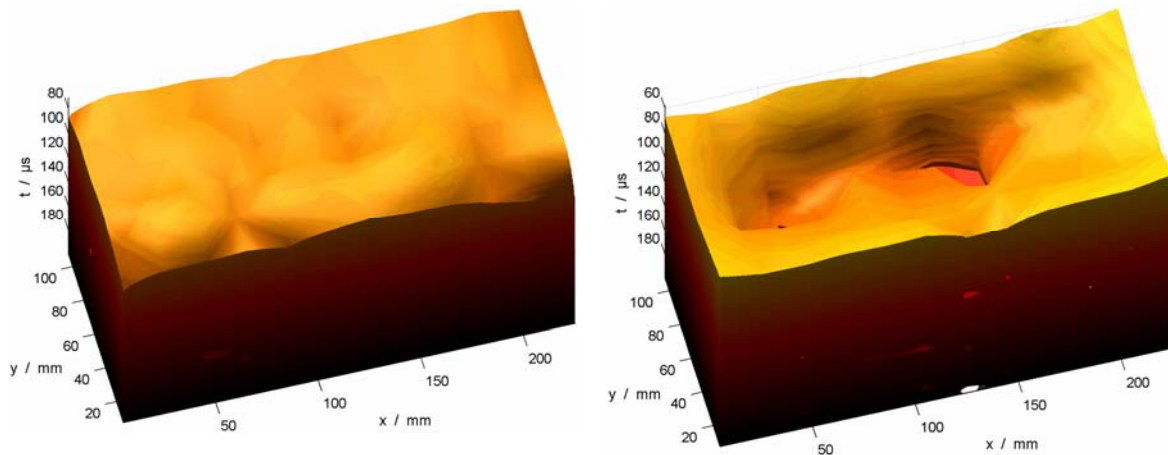


Bild 3. Normalformatsteine, gemessen in Durchschallung mit Trockenankopplung: 3D-Laufzeitbilder von Stein 24/5 (links) und Stein 41/4 (rechts)

In Bild 4 ist eines der Messergebnisse dargestellt. Das Bild zeigt ein C-Bild in Transmission, also die gemessene Signalamplitude bei einer bestimmten Laufzeit über den beiden lateralen Ortskoordinaten, kodiert in einer Farbskala. Der Zeitpunkt der Darstellung liegt in der ersten Halbwelle des Empfangssignals und ist so gewählt, dass helle Bildbereiche eine hohe Signalamplitude anzeigen und dunkle Bildbereiche eine geringe Signalamplitude. Die vier Ecken sind durch Auflager abgeschattet. Im Bild fallen größere dunkle Bereiche im Innenbereich des Steins und an dessen linker unterer Ecke auf, in denen die Empfangssignale durch Inhomogenitäten geschwächt bzw. verzögert sind. Das Ergebnis ist bei anderer Messtechnik und Darstellung ähnlich zu dem in Bild 3, rechts.

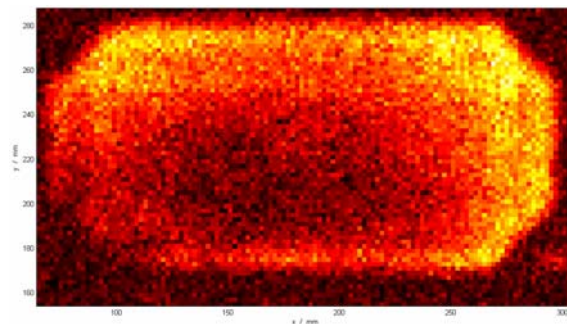


Bild 4. Normalformatsteine, gemessen in Durchschallung mit Luftankopplung: C-Bild (Transmission) von Stein 53/6

4.2 Feuerfeste keilförmige Steine

Feuerfeste keilförmige Steine aus gebrannter Sintermagnesia werden in der Buntmetallindustrie und der Zementindustrie verwendet. Die hier vorliegenden Prüfbjekte mit den Maßen $220 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 70/75 \text{ mm}$ (Bild 5, links) sollten berührungslos auf Inhomogenitäten im Volumen untersucht werden. Dazu wurden Linienmessungen in Durchschallung und in einer modifizierten V-Anordnung durchgeführt.

Für die Linienmessungen in Durchschallung wurde der Messaufbau in Bild 5, rechts, verwendet. Der zu prüfende Stein wurde in halber Höhe manuell zwischen zwei 100 kHz -Longitudinalwellenprüfköpfen geführt, die über Luft angekoppelt waren. Die Steine waren so ausgerichtet, dass die Durchschallung von der größeren zur kleineren rechteckigen Seitenfläche erfolgte (Steinausrichtung 0° ; siehe Bild 5, rechts).

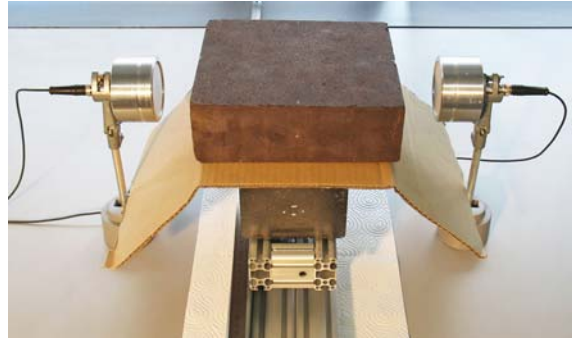


Bild 5. Keilförmige Steine (links): Liniemessung mit luftgekoppeltem Ultraschall in Durchschallung (rechts)

Bild 6 zeigt die Messergebnisse zweier Steine als B-Bilder in Transmission, d. h. die empfangenen Zeitsignale sind nebeneinander über der Ortskoordinate in Längsrichtung aufgetragen. Im Stein S2 zeigte sich eine räumlich begrenzte Abschwächung des ersten Wellenpakets mit sich leicht verändernder Pulsgeschwindigkeit (Bild 6, links), während der Stein S4 einen deutlichen Amplitudeneinbruch in der Steinmitte bei gleichbleibender Schallgeschwindigkeit aufwies (Bild 6, rechts). Ursachen sind wahrscheinlich Gefügeveränderungen bzw. Gefügeinhomogenitäten.

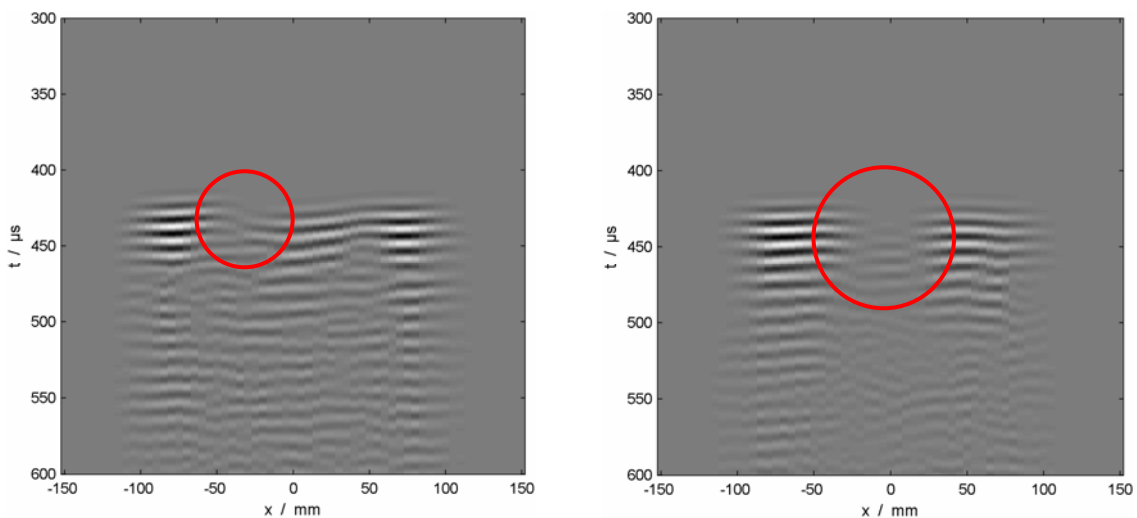


Bild 6. Keilförmige Steine, gemessen in Durchschallung mit Luftankopplung: B-Bilder (Transmission) von Stein S2 (links) und Stein S4 (rechts)

Zur berührungslosen Detektion von oberflächennahen Querrissen wurden Ultraschallwellen direkt unter der Materialoberfläche geführt, wobei die Ankopplung ebenfalls berührungslos erfolgte. Den Messaufbau dazu zeigt Bild 7, links im Foto und rechts als Messprinzip. Die Ultraschallwellen werden unter dem Einfallswinkel α eingeschallt und durch den großen Unterschied der Schallgeschwindigkeiten von Luft und Stein so stark gebrochen, dass sich die Ultraschallwelle direkt unterhalb der Steinoberfläche ausbreitet. Dabei strahlt sie beständig in die Luft ab und kann unter demselben Winkel α wieder empfangen werden. Mit dieser modifizierten V-Anordnung können vor allem oberflächennahe Inhomogenitäten und Querrisse detektiert werden. Wie zuvor wurden die Steine manuell entlang einer Linie in der halben Steinhöhe bei einer Steinausrichtung von 0° geführt, und es wurden dieselben Ultraschallwandler verwendet.

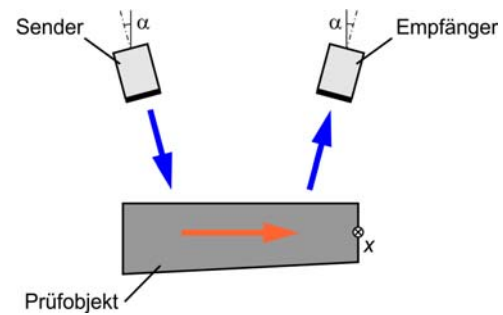
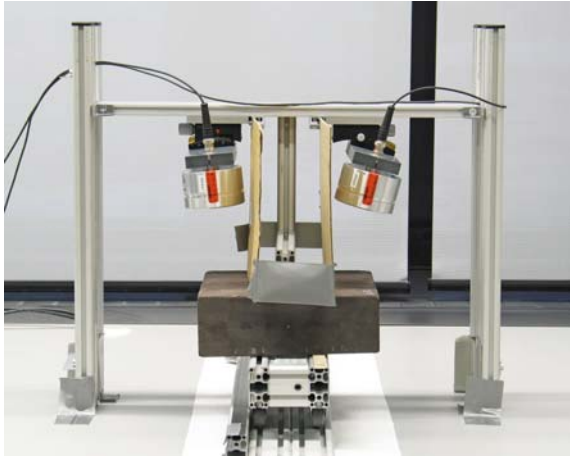


Bild 7. Keilförmige Steine: Messung mit luftgekoppeltem Ultraschall in modifizierter V-Anordnung; Foto des Messaufbaus (links) und Messprinzip (rechts)

In Bild 8 sind die zwei Messergebnisse dieser Anordnung für die Steine S2 (links) und S4 (rechts) als B-Bilder (Transmission) dargestellt. Zur besseren Erkennbarkeit der Details ist der dargestellte Amplitudenbereich bei beiden Bildern auf $\pm 2\%$ der jeweiligen Maximalamplitude beschränkt.

Ausgewertet wurden die ersten Wellenzüge ab etwa $700\ \mu\text{s}$; die Wellen ab $900\ \mu\text{s}$ sind außerhalb der Prüfobjekte zum Empfänger reflektiert worden. Während im linken Bild die Halbwellen im Wesentlichen geschlossen und geradlinig verlaufen, ist im rechten Bild ein Einbruch in der Steinmitte zu verzeichnen, der von einem auch visuell noch sichtbaren Querriss stammt.

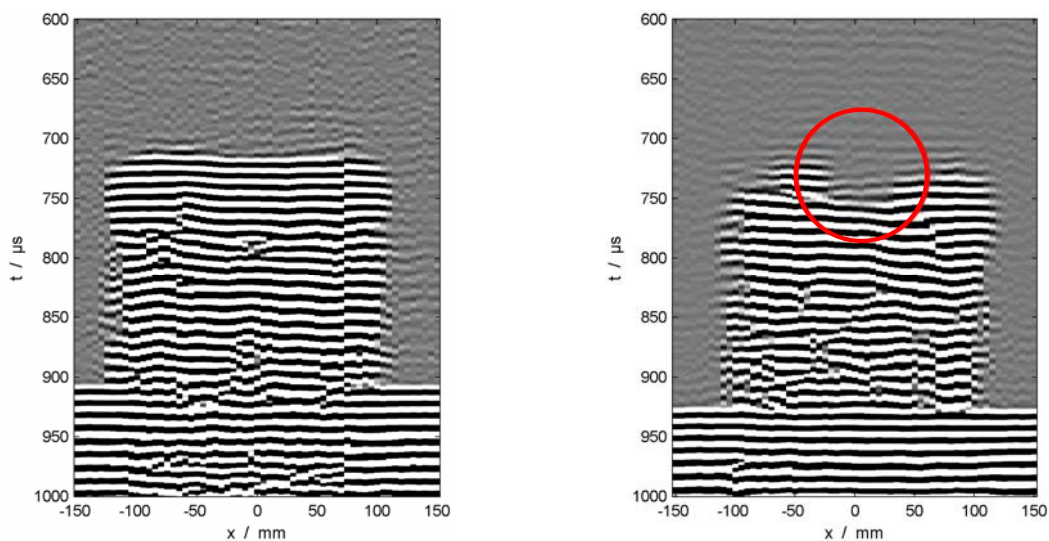


Bild 8. Keilförmige Steine, gemessen in modifizierter V-Anordnung mit Luftankopplung: B-Bilder (Transmission) von Stein S2 (links) und Stein S4 (rechts); Amplitudenbereich jeweils $\pm 2\%$ der Maximalamplitude

4.3 Feuerfeste Stopfen

Feuerfeste Stopfen aus glasiertem, kunstharzgebundenem, isostatisch gepressten Magnesia-Kohlenstoff werden bei der Regulierung der flüssigen Stahlströme in der Stahlerzeugung eingesetzt. Bild 9 zeigt einen ganzen Stopfen mit einer Länge von 1250 mm und einem Durchmesser von 130 bis 170 mm. Die Stopfen sind vom dickeren Ende her mit einer Boh-

ung versehen, die bis in den Nasenbereich reicht. In den Untersuchungen wurden teilweise auch nur die abgetrennten Nasenbereiche verwendet (Bild 10).



Bild 9. Feuerfester Stopfen

An diesen Stopfen wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. In einer prinzipiellen Untersuchung sollte das Volumen des Stopfens S3 im Nasenbereich auf Inhomogenitäten untersucht werden. Dazu wurde der Stopfen drehbar auf einem Messaufbau gelagert, der anschließend in ein Wasserbecken eingesetzt wurde. Auf diese Weise konnten mit einem Prüfkopf unterhalb des Stopfens Impuls-Echo-Messungen mit Longitudinalwellen in Tauchtechnik durchgeführt werden. Durch Drehen des Stopfens und Versatz des Prüfkopfs wurden flächige Rastermessungen manuell aufgenommen. Bild 10 zeigt links den Messaufbau und rechts das Messprinzip.

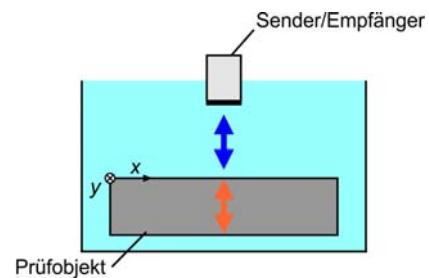
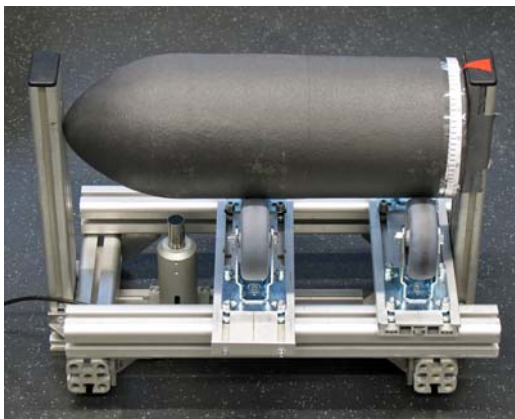


Bild 10. Feuerfester Stopfen S3: Messung mit Wasserankopplung in Impuls-Echo-Technik; Foto des Messaufbaus (links) und Messprinzip (rechts)

Das Messergebnis ist als dreidimensionales Iso-Oberflächenbild in Bild 11 dargestellt. Die Koordinate x ist die Abwicklung der Umfangsrichtung, y die Koordinate der Längsrichtung und z die Tiefe in das Material, wobei die Materialoberfläche bei einem willkürlichen z -Wert beginnt. Man erkennt eine größere Anzahl kleiner Reflektoren, die an den mit Pfeilen gekennzeichneten Stellen des Umfangs gehäuft auftreten.

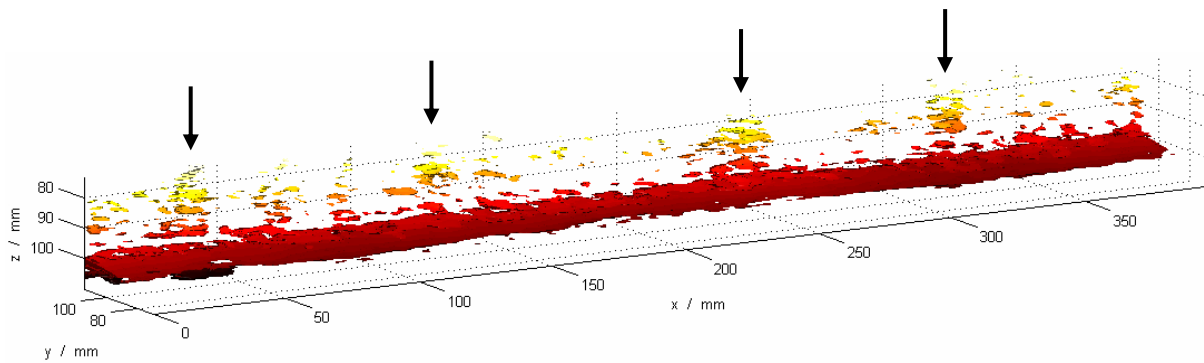


Bild 11. Feuerfester Stopfen S3, gemessen in Impuls-Echo-Technik mit Wasserankopplung: 3D-Iso-Oberflächenbild; die Koordinate x ist die Abwicklung der Umfangsrichtung

4.4 Feuerfeste Schieberplatten

Feuerfeste Schieberplatten dienen der Gießstrahlregulierung bei der Stahlerzeugung. Untersucht wurden Platten aus einem gebrannten, kohlenstoffgebundenen Material mit den Maßen $450 \text{ mm} \times 420 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ (Bild 12, links). Dabei war das Untersuchungsziel die Detektion von Inhomogenitäten und Rissen im Volumen. Dazu wurden mit einem Ultraschall-Scanner automatisiert 2D-Scans mit einem Raster von $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ in Tauchtechnik aufgenommen. Die Messungen erfolgten mit einem 2 MHz -Longitudinalwellenprüfkopf in Impuls-Echo-Technik.

Bild 12 zeigt rechts einen Tiefenschnitt des resultierenden 3D-Volumenbildes, in dem die grobe Materialstruktur der Schieberplatte abgebildet wird. Das Bild enthält außerdem eine Anzahl von punkt- und linienförmigen Anzeigen, die auf Inhomogenitäten und Risse hindeuten. Die auffälligsten Anzeigen sind im Bild markiert.

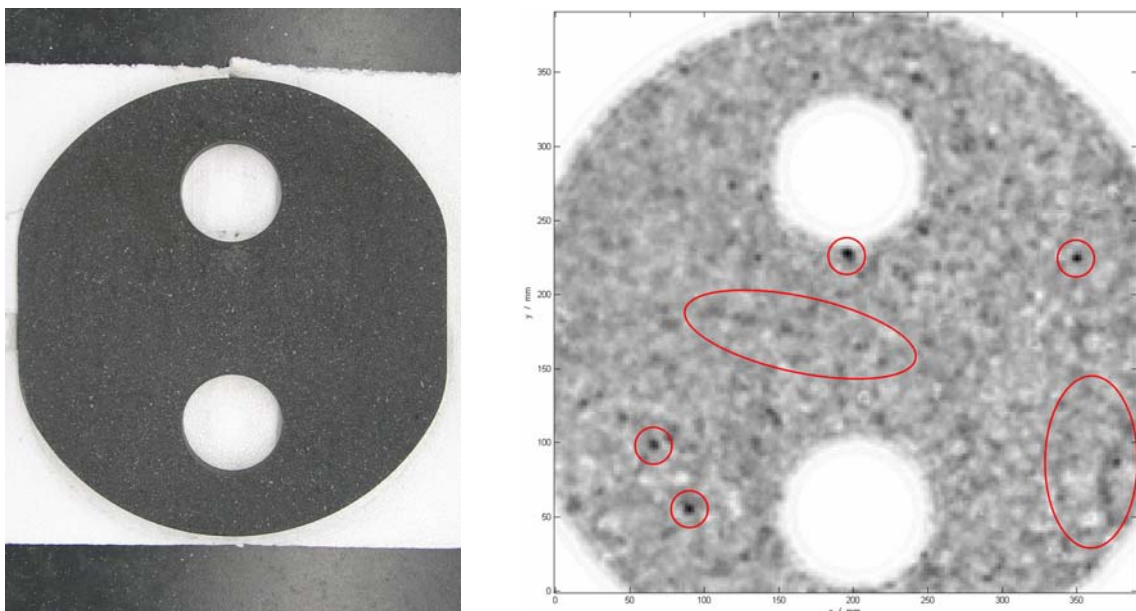


Bild 12. Schieberplatte A2 (links, Grafitschicht entfernt); punkt- und linienförmige Reflektoren im Tiefenschnitt aus 3D-Volumenbild, gemessen in Impuls-Echo-Technik mit Wasserankopplung (rechts)

5 Zusammenfassung

In einer Machbarkeitsstudie waren für verschiedene feuerfeste, grobkeramische Erzeugnisse bildgebende Prüfanordnungen für die Ultraschallprüfung zu entwickeln. Die Erzeugnisse bestanden aus unterschiedlichen Materialien, die durch ihre grobe Struktur mit Ultraschall schwer prüfbar sind, und enthielten verschiedene Arten von Fehlern.

Für die Untersuchungen wurde jeweils eine auf die Prüfaufgabe abgestimmte Prüftechnik entwickelt. Dabei kamen unterschiedliche Prüfköpfe, Prüffrequenzen, Wellenarten und Wandleranordnungen zum Einsatz. Da für eine bildgebende Untersuchung jeweils manuelle oder automatisierte Messungen auf flächigen Rastern durchgeführt wurden, war die Wahl der Wandleranordnung und der Ankopplung entscheidend für den Prüferfolg. Für eine einfache Auswertung wurde die Darstellung der Messergebnisse jeweils angepasst. Je nach Prüfobjekt und Messmethode wurde eine Auflösung von ca. 20 bis 400 mm² Fehlerquerschnitt erreicht.

Gegenwärtig wird geprüft, welche der Messverfahren in die praktische Anwendung überführt werden sollen. Dabei ist in jedem Einzelfall die genaue Definition von Fehlerart, Fehlergröße und Fehlerorientierung notwendig, um eine zuverlässige Prüfaussage bei optimiertem Messaufwand zu erreichen.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn U. Tümmeler (MFPA Weimar) für die Durchführung eines großen Teils der Messungen.

Referenzen

- [1] RHI-interne Prüfanweisungen und Untersuchungsberichte, seit 2000
- [2] 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.