

Prüfung von grüner Sanitärkeramik als Mittel zur Ressourceneffizienz

Günter WALLE, Christoph SKLARCZYK, Thorsten MÜLLER und Udo NETZELMANN
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kurzfassung. Mittels zerstörungsfreier Prüftechniken können Sanitärkeramikbauteile aus Grünkeramik nach dem Trocknungsprozess im Hinblick auf Feuchtenester bzw. Risse geprüft werden. Für die Detektion von Feuchtenestern und deren Feuchtebestimmung dient eine speziell adaptierte Mikrowellenprüftechnik. Zum Nachweis von Oberflächenrissen wie auch zum Nachweis verdeckter Risse findet eine speziell entwickelte thermographische Prüftechnik mit Heißluftanregung in Relativbewegung Verwendung. Mittels dieser zerstörungsfreien Prüftechniken ist es möglich, entsprechende Fehlstellen frühzeitig in der Grünkeramik zu erkennen, so dass die betreffenden Bauteile vor dem aufwändigen Brennprozess ausgeschleust werden können. Ein Recycling des Materials ist dann noch möglich, so dass wertvolle Energie im Sinne der Ressourceneffizienz gespart werden kann.

1. Einführung

Die Keramikindustrie gehört zu den energie- und rohstoffintensiven Branchen. Im Bereich der Sanitärkeramik verlangt der Markt nach anspruchsvollen Produkten, die häufig nicht problemlos zu fertigen sind. Bisher können im Grünzustand der Keramik Feuchtenester und verdeckte Fehler, die aus den vorangegangenen Produktionsschritten stammen, oft nicht erkannt werden. Das Produkt durchläuft dann noch unnötig den sehr energieaufwändigen Brennprozess, bis der Fehler sichtbar wird. Anschließend muss aufwändig entsorgt werden, da nur ein geringer Teil des Materials in die Sanitärproduktion rückgeführt werden kann. Im Rahmen eines mit der Fa. Villeroy & Boch und anderen Partnern durchgeführten Projekts war es eine Teilaufgabe, durch frühzeitigen Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren dazu beizutragen, dass erhebliche Energie- und Materialeinsparungen erzielt werden können. Zur zerstörungsfreien Prüfung von grüner Keramik bestanden bereits Vorerfahrungen [1,2].

An den vorgetrockneten Keramik-Grünlingen können in bestimmten Bereichen Feuchtenester verbleiben, die im weiteren Prozess zur Rissbildung führen können. Diese werden mit einem im Mikrowellenbereich arbeitenden Feuchtesensor auf Basis der Zeitbereichsreflektometrie detektiert. Die Größe des Feuchtesensors war so weit zu verringern, dass mit Hilfe eines Roboters auch an ungünstig gelegenen Messstellen auf Feuchtenester geprüft werden kann. Nur bei Bauteilen mit zu hoher Feuchte wird gezielt an den Feuchtenestern nachgetrocknet. Ergeben sich keine Anzeigen von Feuchtenestern, wird der Grünling per Roboter zur Rissprüfstation transportiert. Ansonsten wird mit einer Mikrowellentrocknungstechnik nachgetrocknet. Alle Produkte durchlaufen die

Rissprüfung, die aus einer automatisierten visuellen Inspektion und einer thermographischen Prüfung auf verdeckte oder kaum sichtbare Risse besteht.

2. Mikrowellenprüftechnik zum Nachweis von Feuchtenestern

Die Prüfung der Bauteile auf Feuchtenester und Risse im Grünzustand war ein zentraler Bestandteil des Vorhabens. Die Detektion von Feuchtenestern wurde im Teilprojekt Prozessprüftechnik mit Hilfe eines im Mikrowellenbereich arbeitenden Feuchtesensors des Projektpartners IMKO realisiert. Die Feuchtesensoren, die mit geringer Leistung arbeiten, wurden weiterentwickelt und miniaturisiert, um sie dann robotergeführt an engen Bereichen der Sanitärkeramik zur Feuchtebestimmung einzusetzen. Dabei bestand die Herausforderung in dem optimalen Kompromiss zwischen kleiner Baugröße einerseits und ausreichender Nachweisempfindlichkeit auch für kleine Feuchtegehalte andererseits.

Der im Projekt realisierte Feuchtesensor basiert auf dem Prinzip der Zeitbereichsreflektometrie im reaktiven Nahfeld und arbeitet im Frequenzbereich von ca. 600 MHz bis 1,2 GHz. Dieser ist für die Feuchtemessung besonders günstig, da die Feuchte hier eng mit der Pulslaufzeit korreliert ist und die Störeinflüsse durch die im untersuchten Material befindlichen Salze (Ionen) minimiert werden. Die Unsicherheiten einer Amplitudenmessung entfallen.

Der Feuchtesensor TRIME GS45 von IMKO Micromodultechnik GmbH ist, z.B. durch Verkleinerung des Messkopfs (Außendurchmesser 6,2 cm) und damit des Messfeldes, gegenüber dem kommerziellen Standardtyp so modifiziert worden, dass er einige Vorteile aufweist:

- Er ist besser angepasst an kleinere Proben und enge Probenbereiche. Weiterhin kann auch an dünnen Keramikschichten gemessen werden. Durch die kleinere Bauform verringert sich auch die Eindringtiefe.
- Das ursprünglich verwendete Gelkissen wurde durch ein Schaumstoffkissen ersetzt. Dadurch kommt es zu einer besseren Anpassung an gekrümmte Proben und enge Probenbereiche sowie zu einer Verringerung des Anpressdrucks.
- Die mechanische Stabilität des Innenleiters wurde verbessert.

Abbildung 1 zeigt den Einsatz des auf einem Roboteradapter montierten Sensors an der Rückseite eines WCs. Hierbei kommt es darauf an, möglichst in den engen Bereichen messen zu können.

Die von diesem Gerät an Referenzproben bestimmten Messwerte wurden vom PC aufgezeichnet und daraus Kalibrierkurven ermittelt (Abb. 2). Es zeigte sich, dass bis zu einer Feuchte von ca. 2 % eine lineare Kalibrierkurve die geringsten Fehler aufweist. Für Feuchten bis zu ca. 3 % sind die Fehler bei Verwendung eines Polynoms 2. Ordnung geringer. Nach der entsprechenden Programmierung der Koeffizienten des Polynoms gibt das Gerät Materialfeuchten direkt in % aus. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die hier verwendete neue Variante des Feuchtemessgeräts geeignet ist, auch geringe Feuchte zwischen 0% und 3% mit hoher Genauigkeit zu messen.



Abb. 1. Miniaturisierter Mikrowellensensor bei der Feuchteprüfung am WC.

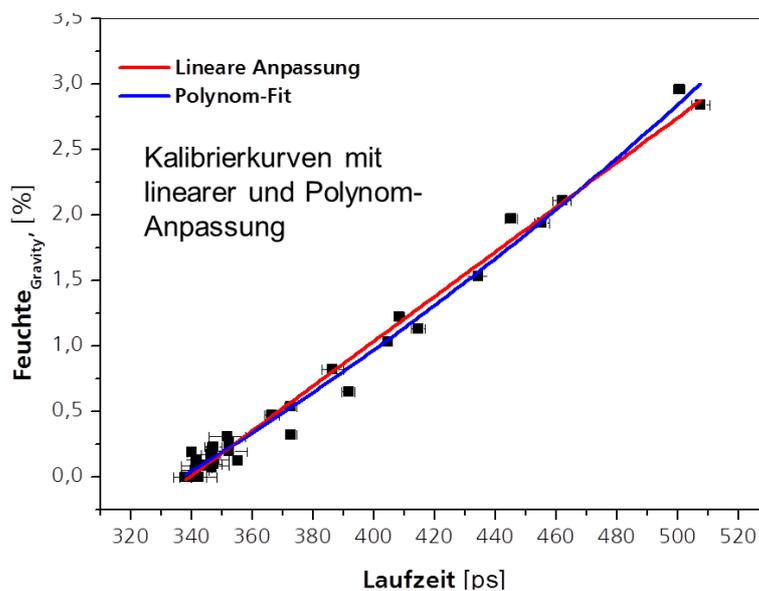


Abb. 2. Gravimetrisch ermittelte Feuchte gegen Puls-Laufzeit des Feuchtesensors.

3. Untersuchungen zum Rissnachweis mittels Laser- und Heissluftanregung

3.1 Modellrechnungen für den Fall dynamischer Anregung

Um Risse, die auch senkrecht ins Material einlaufen können, nachzuweisen, ist eine Anregung erforderlich, bei der auch laterale Wärmeströme erzeugt werden. Dies kann z.B. durch einen Laserstrahl erreicht werden, der über ein Prüfobjekt hinwegbewegt wird (siehe Abb. 3). Die lateralen Wärmeströme, die dadurch entstehen, werden durch einen Riss in ihrer Ausbreitung gestört, was zur Ausbildung eines charakteristischen Temperatursignals führt. Dieses Fehlersignal kann mittels einer Infrarotkamera erfasst und ausgewertet werden. Um die entsprechenden Vorgänge, die zur Ausbildung der Temperatursignale an einem Riss führen, näher untersuchen zu können, wurden numerische Modellrechnungen durchgeführt. Hierbei wird angenommen, dass eine Oberflächenwärmequelle mit endlicher Apertur mit einer bestimmten Relativgeschwindigkeit über die Oberfläche des keramischen Materials geführt wird.

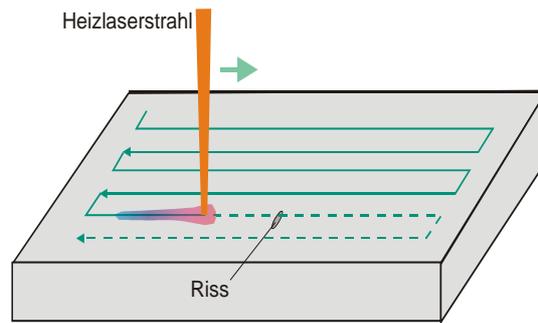


Abb. 3. Schema der laserangeregten Thermographie.

Alternativ zum Laser kann die Anregung auch mit einem geeigneten Heißluftstrahl erfolgen. Diese Methode wurde bei der Prüfung von Sanitärkeramikbauteilen weiterverfolgt, da sie gegenüber der Laseranregung wesentliche Vorteile hinsichtlich der Handhabbarkeit und den Kosten besitzt. Eine Heißluftanregung ist deutlich kostengünstiger zu realisieren und es kann außerdem in diesem Falle auf aufwändige Sicherheitsvorkehrungen, die bei Laseranregung erforderlich sind, verzichtet werden. Es wurden numerische Modellrechnungen durchgeführt, bei denen eine Heißluftanregung mit einer Relativgeschwindigkeit von 10 mm/s angenommen wurde. Der Heißluftstrahl wird von links nach rechts über das Prüfobjekt bewegt. Als Fehlstelle wurde zunächst ein schräg ins Material einlaufender Oberflächenriss moduliert. Das betreffende Ergebnis der Modellrechnung zeigt Abb. 4.

In Abb. 4 ist links das Temperaturfeld im Querschnitt des Prüfobjektes abgebildet, das sich ohne Wechselwirkung mit einer Fehlstelle infolge der Wärmeleitung und der Bewegung des Anregungssystems ergibt. Blaue Farbe stellt die Ausgangstemperatur dar, rote Farbe Bereiche höherer Temperatur. Abbildung 4 zeigt rechts hierzu den Temperaturverlauf an der Oberfläche des Prüfobjektes. Die Wärmequelle ist zu diesem Zeitpunkt noch weit vor der Fehlstelle. In Abb. 5 zeigt sich zu einem späteren Zeitpunkt bereits eine deutliche Veränderung des Temperaturfeldes, da hier der Wärmestrom mit der Fehlstelle in Wechselwirkung tritt und eine erhebliche Störung durch die Fehlstelle erfährt. Dadurch ergibt sich ein sehr deutliches Fehlersignal, das die Fehlstelle gut erkennen lässt.

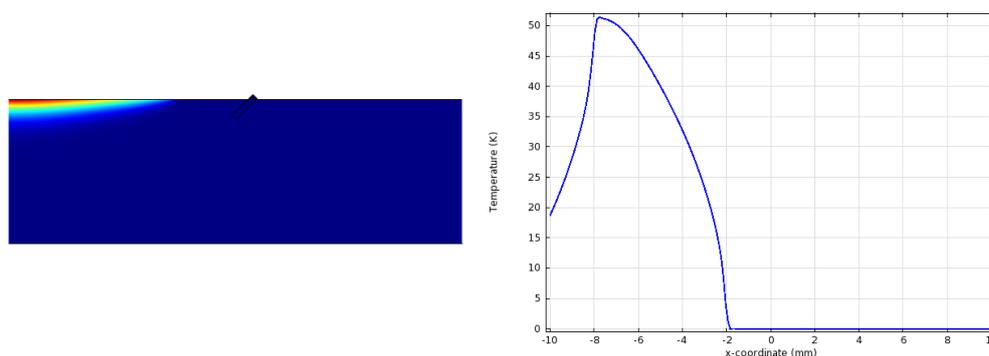


Abb. 4. Links: Modellrechnung des Temperaturfelds noch ohne Wechselwirkung mit dem Riss bei Anregung mit Heißluft und einer Geschwindigkeit von $v = 10$ mm/s. Rechts: Temperaturverlauf an der Oberfläche senkrecht zum Riss.

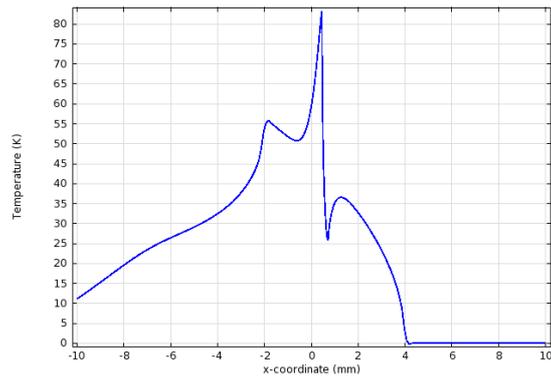
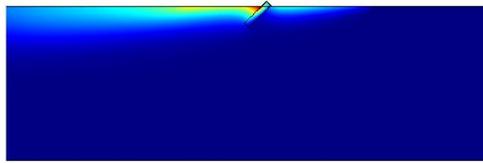


Abb. 5. Modellrechnung des Temperaturfelds in Wechselwirkung mit dem Riss. Rechts: Temperaturverlauf an der Oberfläche senkrecht zum Riss mit charakteristischer Fehleranzeige.

Weitere Modellrechnungen wurden für den Fall verdeckter, schräg zur Oberfläche liegender Risse durchgeführt. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer solchen Rechnung. Dargestellt ist die Temperaturverteilung im Bereich des Fehlers nach Passieren des Anregungssystems. Auch hier wurde eine Geschwindigkeit von 10 mm/s angenommen. Es ergibt sich auch in diesem Falle ein deutlich ausgeprägtes Temperatursignal, so dass die Fehlstelle anhand dieses charakteristischen Signals gut nachgewiesen werden kann.

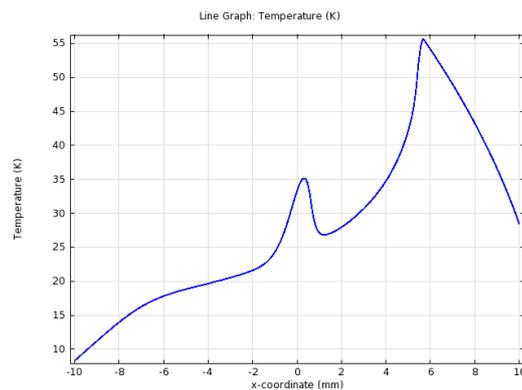
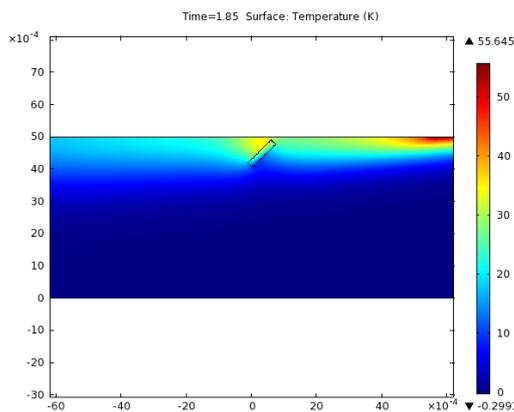


Abb. 6. Modellrechnung des Temperaturfelds nach Passieren der Anregung. Rechts: Temperaturverlauf an der Oberfläche senkrecht zum Riss.

Auch für den Fall senkrecht zur Oberfläche des Prüfobjektes einlaufender Risse wurden Modellrechnungen durchgeführt. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der Rechnung für den Fall eines senkrecht einlaufenden Oberflächenrisses nach Passieren des Anregungsstrahles, wobei auch hier eine Abtastgeschwindigkeit von 10 mm/s zugrunde gelegt wurde. Es zeigt sich auch in diesem Falle ein deutliches Fehlersignal, das eine gute Fehlererkennbarkeit ermöglicht.

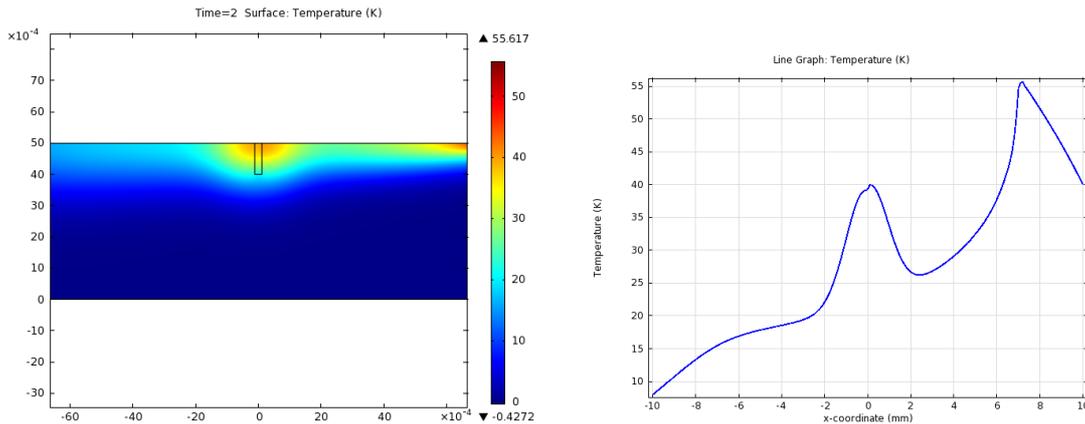


Abb. 7. Links: Temperaturfeld eines Oberflächenrisses nach Passieren der Anregung. Rechts: Temperaturverlauf an der Oberfläche.

Weiterhin wurde der Fall verdeckter, senkrecht zur Oberfläche verlaufender Risse mittels Modellrechnungen untersucht. Ein Ergebnis mit einem oberflächennah liegenden Fehler mit einer Tiefenlage (Überdeckung von 0,2 mm) wird in Abb. 8 präsentiert. Die Fehlstelle kann anhand des charakteristischen Signals auch hier noch erkannt werden, wobei jedoch das Signal im Vergleich zu den oben behandelten Fehlstellen deutlich schwächer ausgebildet ist.

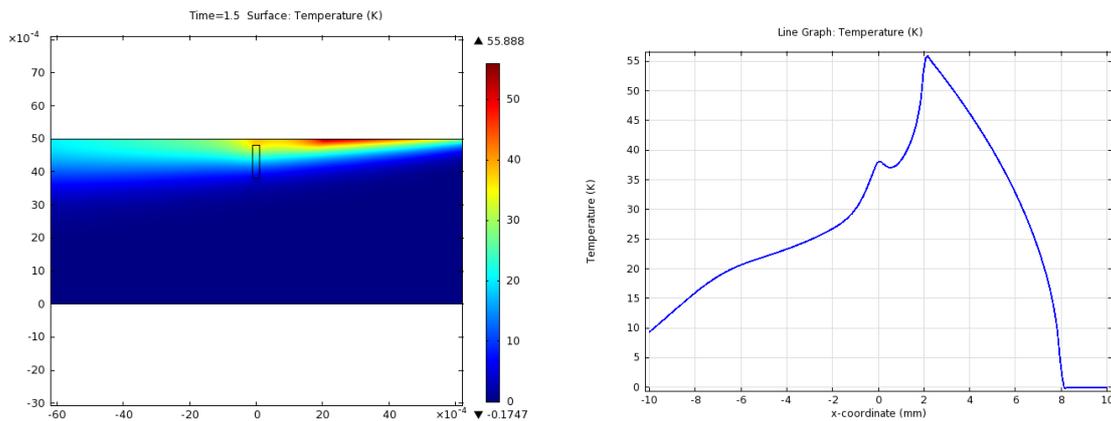


Abb. 8. Links: Temperaturfeld eines Oberflächenrisses in der Nähe der Oberfläche. Rechts: Temperaturverlauf an der Oberfläche.

3.2 Experimentelle Untersuchungen mit bewegter Heißluftquelle

Für die experimentellen Untersuchungen an Sanitärkeramikbauteilen wurde ein thermisches Prüfsystem aufgebaut. Wesentliche Komponenten des Prüfsystems sind eine Infrarotkamera, ein Heißluftgebläse, ein Scansystem sowie ein Rechner und Software zur Steuerung des Prüfsystems, zur Bilddatenverarbeitung und zur Fehlererkennung. Die prinzipielle Anordnung der Prüfsystemkomponenten ist in Abb. 9 wiedergegeben. Entweder wird das Prüfsystem entlang des Prüfobjekts bewegt oder das Prüfobjekt entlang der Prüfanordnung, wie in der Abbildung dargestellt.

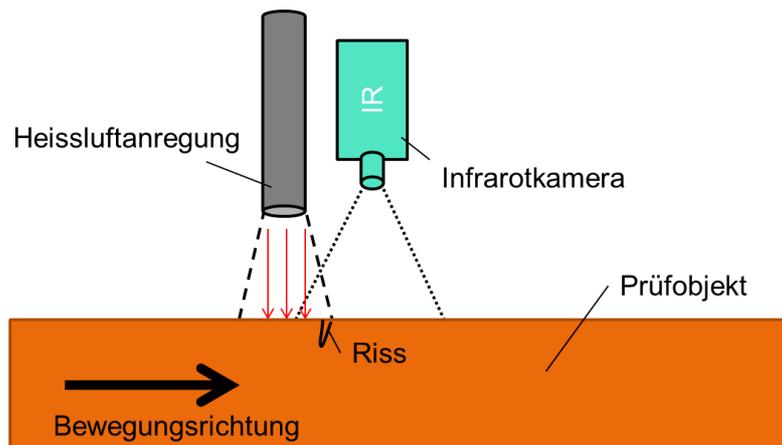


Abb. 9. Schematische Darstellung des Prüfsystems.

Mit der beschriebenen Prüfanordnung wurde zunächst ein Sanitärkeramikbauteil untersucht. Das Prüfobjekt wurde mit einer Geschwindigkeit von ca. 50 mm/s an dem Prüfsystem entlang geführt und zwar im Bereich eines visuell sichtbaren Oberflächenrisses. Das entsprechende Messergebnis ist in Abb. 10 dargestellt. Das Thermografiebild (Abb. 10, links) zeigt farbcodiert die Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Probe (Farbzuordnung: siehe Skala) nachdem der Heißluftstrahl die Fehlstelle passiert hat. Das Rissignal ist deutlich anhand der linienförmig erhöhten Temperatur (hellere Farbtöne) bzw. an dem Fehlersignal in Abb. 10, rechts, zu erkennen.

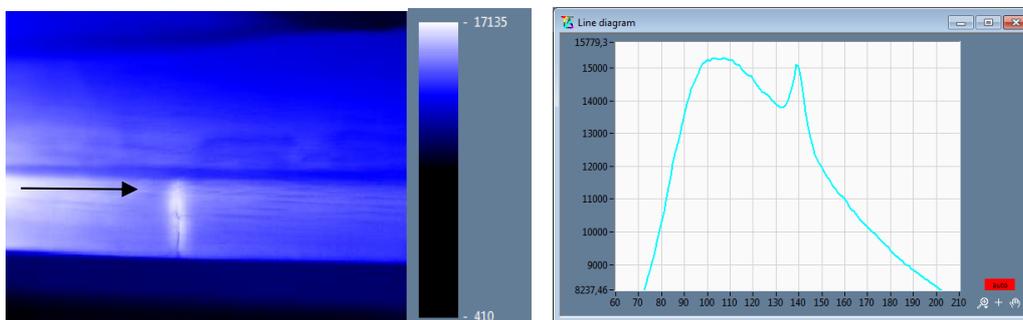


Abb. 10. Links: Anregung mit einer Relativgeschwindigkeit von ca. 50 mm/s. Rechts: Signalverlauf entlang des Pfeils.

3.3 Verdeckte Risse

Abbildung 11 zeigt einen speziell entwickelten Testkörper aus Grünkeramik, der so ausgelegt war, dass er zur Rissbildung neigt. Risse gehen vor allem vom Innern dieses Hohlkörpers aus und können, sofern sie nicht zu tief unter der Oberfläche liegen, von außen detektiert werden. Das Bild rechts zeigt mit einem Endoskop durch ein Loch im Hohlkörper beobachtete Risse, die außen nicht sichtbar sind.

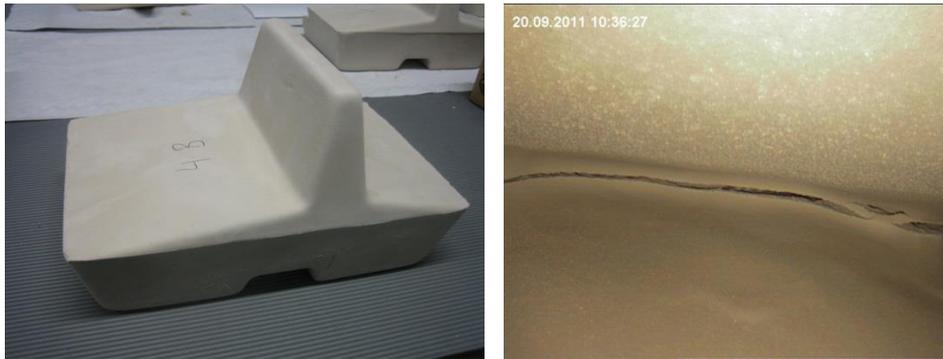


Abb. 11. Foto eines Testkörpers aus Grünkeramik. Endoskopische Aufnahme aus dem Inneren mit innenliegendem Riss.

In Abb. 12 ist das Messergebnis eines unter der Oberfläche liegenden Risses dargestellt. Der verdeckte Riss konnte mit der Technik deutlich nachgewiesen werden. Der Riss liegt hier wenige Zehntel Millimeter unter der Oberfläche und läuft etwa senkrecht ins Material.

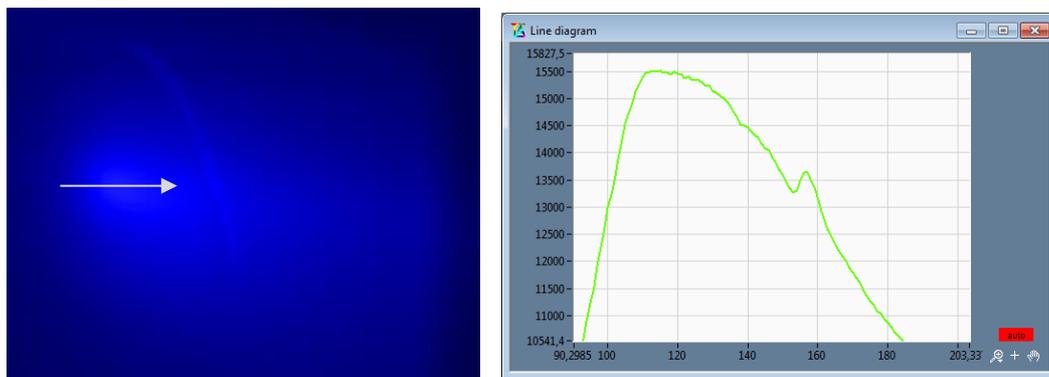


Abb. 12. Links: Messergebnis bei Anregung mit einer Relativgeschwindigkeit von ca. 50 mm/s. Ein verdeckter Riss wird detektiert. Rechts: Signalverlauf entlang des Pfeils.

Ein weiterer verdeckter Riss konnte mit der Prüftechnik in einem anderen Prüfkörper erkannt werden. Ein entsprechendes Untersuchungsergebnis ist in Abb. 13 wiedergegeben. In diesem Falle handelt es sich um einen verdeckten Riss, der wohl schräg zur Oberfläche verläuft und wahrscheinlich tiefer als ein Millimeter unter der Oberfläche beginnt.

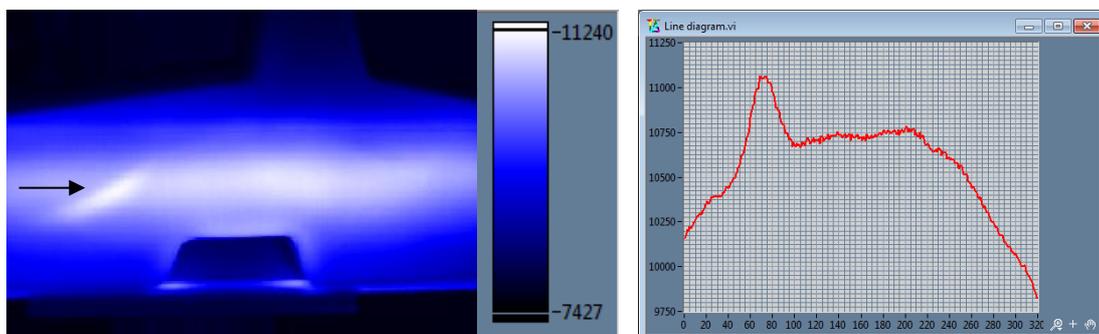


Abb. 13. Links: Nachweis eines verdeckten, schräg liegenden Risses bei Anregung mit einer Relativgeschwindigkeit von ca. 50 mm/s. Rechts: Signalverlauf entlang des Pfeils.

4. Prüfsystem zum Nachweis von offenen und verdeckten Rissen in Sanitärkeramikbauteilen mittels konvektiv angeregter Thermografie

Das thermografische Prüfsystem ist so ausgelegt, dass insbesondere der sogenannte Wasserrand der Sanitärkeramikbauteile (WC-Bauteile), wo bevorzugt Risse auftreten können, geprüft wird. Die Funktionsweise des Prüfsystems ist in Abb. 14 schematisch dargestellt. Zunächst erfolgt die Prüfung eines geraden Abschnitts des Bauteils, indem die Prüfvorrichtung mit Heizsystem und Infrarotkamera mittels eines Linearverstellungssystems an dem Bauteil entlanggeführt wird (siehe Abb. 14, oben). Danach wird die Prüfeinheit geeignet positioniert und das Bauteil so gedreht, dass auch der gekrümmte Bereich des Wasserrandes geprüft werden kann (Abb. 14, unten). In einem dritten Prüfvorgang wird schließlich die gegenüberliegende gerade Seite des Wasserrandes untersucht. Die Prüfergebnisse werden automatisch gespeichert und stehen anschließend für die Auswertung zur Verfügung.

Mit dem thermografischen Prüfsystem, das vollständig berührungslos arbeitet, kann ein Sanitärkeramikbauteil im Bereich des Wasserrandes in ca. 1 Minute geprüft werden. Hiermit ist es möglich, eine solche Prüftechnik auch in die industrielle Produktionslinie zu integrieren. Abbildung 15 zeigt Fotos der produktionsnahen Erprobung in einer Modellprüfanlage.

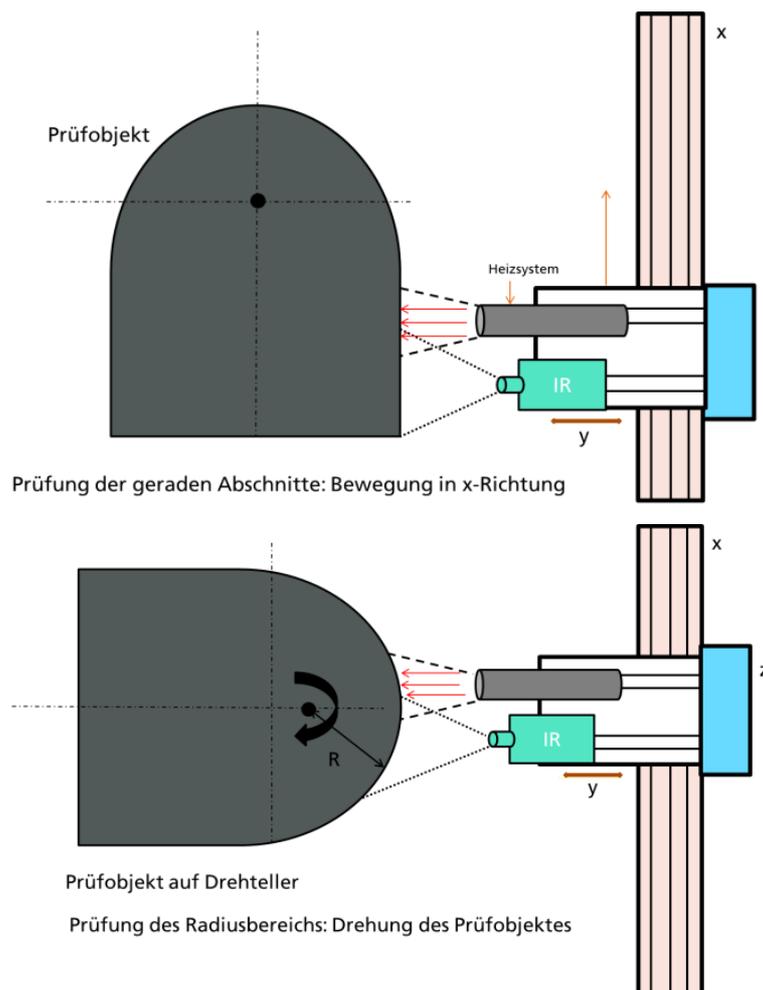


Abb. 14. Prüfsystemanordnung



Abb. 15. Links oben: Bauteilzufuhr mit Roboter. Rechts oben: Prüfung der ersten Längsseite. Links unten: Prüfung des Radiusbereichs. Rechts unten: Prüfung der gegenüberliegenden Längsseite. Heizsystem und Infrarotkamera befinden sich in der grauen Box.

5. Zusammenfassung

Die zerstörungsfreie Mikrowellenprüftechnik auf Basis der Zeitbereichsreflektometrie ermöglicht mit Hilfe von Robotern die Detektion von lokalen Feuchtenestern noch vor dem Brennvorgang. Das Verfahren arbeitet schnell und ist in der Produktionslinie einsetzbar.

Mit einer thermischen Prüftechnik mit dynamischer Heißluftanregung, bei der ein Heißluftstrahl über ein Prüfobjekt bewegt wird, ist es möglich, sowohl offene Risse als auch verdeckte, unter der Oberfläche von Grünkeramikmaterialien liegende Risse nachzuweisen. Die Technik erlaubt es, auch Oberflächenrisse mit geringer Breite und Tiefe zu detektieren. Verdeckte Risse sind nachweisbar, sofern sie nicht zu tief unter der Oberfläche liegen, wobei schräg zur Oberfläche verlaufende Risse auch in einer Tiefenlage von einem Millimeter und mehr noch nachweisbar sein können. Mittels eines Demonstrators wurde gezeigt, dass die Prüftechnik grundsätzlich auch in der Produktionslinie einsetzbar ist, da sie berührungslos und relativ schnell arbeitet und eine vollautomatische Prüfung von Sanitärkeramikbauteilen erlaubt.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Forschungsprojekts im Rahmen des Verbundvorhabens "Dry-Control", FKZ 033R020E.

Referenzen

- [1] H. Reiter, U. Netzelmann und T. Preußner, 'Grünkörpercharakterisierung mit zerstörungsfreien Prüfverfahren'. In: G. Ziegler, W. Hermel, J. Hirsch, H. Kolaska, H. Cherdron, H. (Hrsg.); Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (DGM): Werkstoffwoche '96 Band 6: Werkstoff- und Verfahrenstechnik : Symposium 6. Frankfurt : DGM Informationsgesellschaft, 1997, 643-648.
- [2] E. Schneider, C. Sklarczyk und G. Walle, 'Zerstörungsfreie Prüfung von Sanitär- und Fliesen-Rohlingen'. DGZfP-Jahrestagung 2009, DGZfP-Berichtsband 115-CD (DGZfP Berlin, 2009).