

# Prüfung von keramischen Turbinenbauteilen mit Luftultraschall

Matthias GOLDAMMER\*, Werner HEINRICH\*\*

\* Siemens AG CT T DE HW 2, Otto-Hahn-Ring 6, München

Email: matthias.goldammer@siemens.com

\*\* Siemens AG E F PR GT BLN QM, Huttenstraße 12, Berlin

**Kurzfassung.** Die stetig steigenden Anforderungen an die Effizienz von Gasturbinen führen durch die nötigen höheren Gastemperaturen auch zu höheren Ansprüchen an Werkstoffe und Komponenten. Bereits heute ist der Einsatz von Keramik unverzichtbar geworden und ermöglichte erst die hohen Wirkungsgrade moderner Turbinen. Viele traditionelle ZfP-Verfahren lassen sich jedoch aufgrund der porösen Struktur der Materialien nicht einsetzen. Um die Qualitätsanforderungen an die Werkstoffe dennoch zu erreichen, stehen eine Reihe von Verfahren bereit, die ihre volle Stärke auch bei keramischen Verfahren ausspielen können.

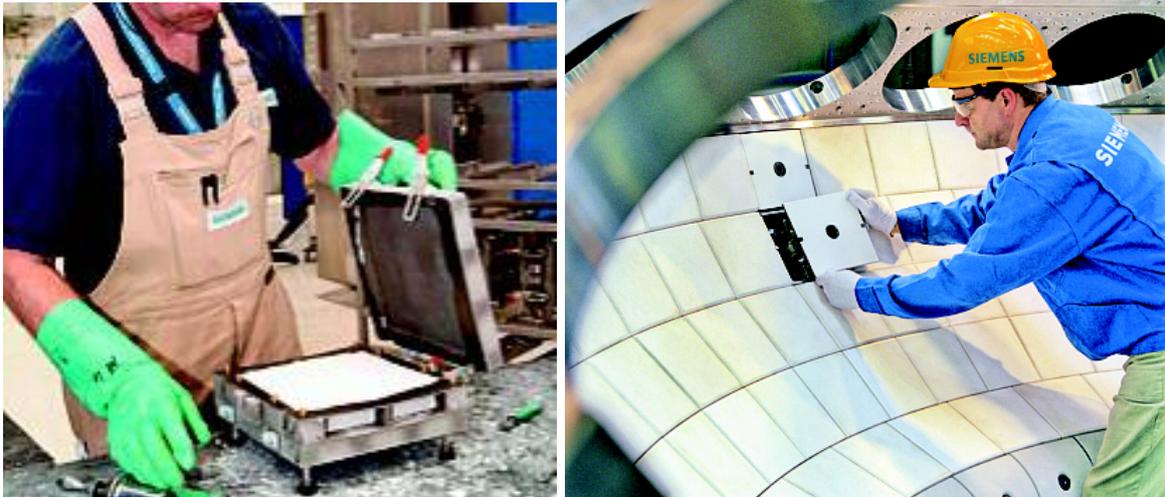
Die Prüfung mit luftangekoppeltem Ultraschall wurde für die Verwendung von keramischen Hitzeschilden evaluiert. Die dabei auftretenden grundlegenden Hindernisse und die Optimierung der Bildaufbereitung werden dargestellt, ergänzt um grundlegende Simulationen und die Aufbereitung als statistisch auswertbare Kenngrößen.

## Einführung

Stationäre Gasturbinen stellen die effizienteste Technik zur Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen dar. Getrieben durch gestiegene Brennstoffpreise und die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses ging und geht die Entwicklung bei Gasturbinen in Richtung höhere Effizienz, die im Wesentlichen durch hohe Gastemperaturen erreicht werden kann. Insbesondere an die Brennkammer der Gasturbinen werden daher höchste Anforderungen gestellt, die nur durch moderne keramische Materialien erreicht werden können. Zum Einsatz kommen dabei sowohl Bauteile aus Metall, die durch keramische Wärmedämmschichten geschützt werden, als auch vollständig keramische Bauelemente. Den höchsten Temperaturen sind dabei die Elemente der Brennkammer ausgesetzt, die den heißen Gasstrom aus dem Brenner auf die erste Reihe der Turbinenschaufeln leiten. Für die Auskleidung der Brennkammer kommen keramische Hitzeschilde zum Einsatz, die aus einer Keramik auf Aluminiumoxid-Basis bestehen. Bild 1 zeigt Herstellung und Montage dieser keramischen Hitzeschilde.

Um den hohen Anforderungen gerecht zu werden, ist eine Prüfung der Bauteile nach der Herstellung unumgänglich: Durch die Position des Bauteils im Gasstrom vor den Turbinenschaufeln kann das Versagen eines Hitzeschilds zu massiven Schäden an den Schaufeln und zu langen Stillstandszeiten der Gasturbine führen. Daher wird eine 100%-Sichtprüfung auf Risse und Poren jenseits einer kritischen Größe aller keramischen Hitzeschilde im Anschluss an die Fertigung durchgeführt. Die Sichtprüfung ist allerdings auf die Prüfung der Oberfläche beschränkt, daher wäre die Ergänzung um andere Prüftechniken sinnvoll.





**Bild 1.** Herstellung und Montage der keramischen Hitzeschilde im Werk Berlin

Durch den vollständigen keramischen Aufbau und die poröse Struktur der Komponente können aber nur wenige der traditionellen Methoden der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt werden. Das nichtleitende Material schließt alle elektrischen oder magnetischen Verfahren aus und durch die poröse Struktur sind auch Eindringverfahren ausgeschlossen. Zweidimensionale Radiografie ist zwar ausreichend in der Lage Poren nachzuweisen und deren Größe zu bestimmen, liefert aber keine Aussage zur Tiefenlage und kann zudem Risse nur unzureichend sichtbar machen. Die Struktur verhindert auch die Prüfung mit Ultraschall in Tauchtechnik oder mit Wasserankopplung, wie Versuche gezeigt haben. In den Voruntersuchungen waren nur zwei Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung überhaupt in der Lage bildgebend die keramischen Hitzeschilde zu prüfen: Zum einen Röntgen-Computertomografie und zum anderen die Durchschallung mit luftgekoppeltem Ultraschall.

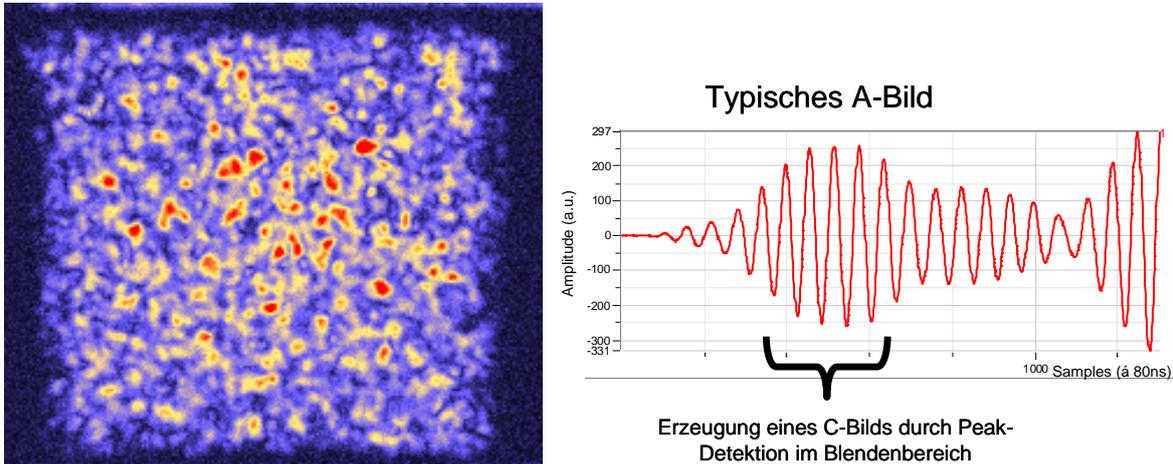
### **Aufbau des Prüfsystems**

Für die Evaluierung von Luftultraschall kam ein Luftultraschall-Prüfsystem Hillger USPC 4000 AirTech zum Einsatz, ausgestattet mit AirTech 200 Prüfköpfen, die bei einer Frequenz von 200 kHz betrieben wurden. Über ein Scansystem konnte die vollständige Oberfläche des Bauteils abgebildet werden. Das System zeichnet den vollständigen Zeitverlauf des Signals auf, wodurch für jeden Aufnahmepunkt ein komplettes A-Bild für die weitere Auswertung zur Verfügung steht.



**Bild 2.** Aufbau des Prüfsystems

Die Prüfköpfe sind auf eine Frequenz von 200 kHz bei einer Bandbreite von 21 kHz ausgelegt bei einem Schwingerdurchmesser von 11 mm. Damit wird ein Schallbündeldurchmesser von minimal 3 mm erreicht. Mit der mitgelieferten Software kann durch Auswertung des maximalen Signals in einem Blendenbereich direkt ein C-Bild dargestellt werden. Die C-Bilder zeigten qualitativ eine gute Reproduzierbarkeit auch über einen längeren Zeitraum der Messung – Bereiche mit hoher Intensität zeigten sich in wiederholten Scans zuverlässig an den gleichen Stellen.

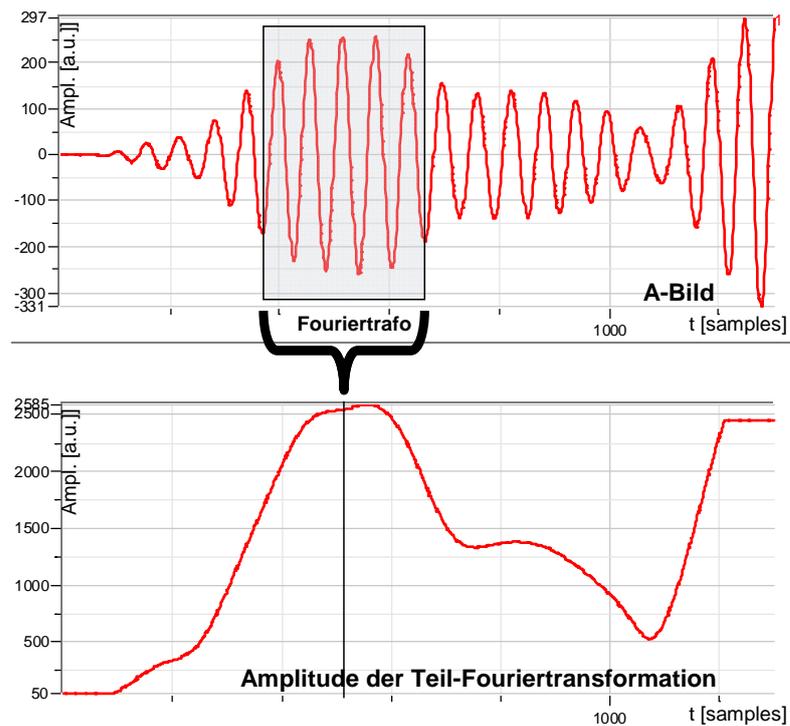


**Bild 3.** Links: C-Bild erstellt mit Software des Prüfsystems. Das C-Bild wird durch Auswertung des Maximums des A-Bilds erzeugt. Rechts: Typisches A-Bild der zugehörigen Messung

Bei der nachfolgenden zerstörenden Prüfung konnte jedoch keine Übereinstimmung der Anzeigen im C-Bild mit Ungängen im Bauteil wie Poren oder Rissen gefunden werden. Um eine bessere Auswertbarkeit des Signal zu erhalten, wurde eine veränderte Auswertetechnik eingesetzt, die an Stelle des Maximalwertes die Hüllkurve des Signals über durchlaufende Fouriertransformationen der A-Bilder erzeugt.

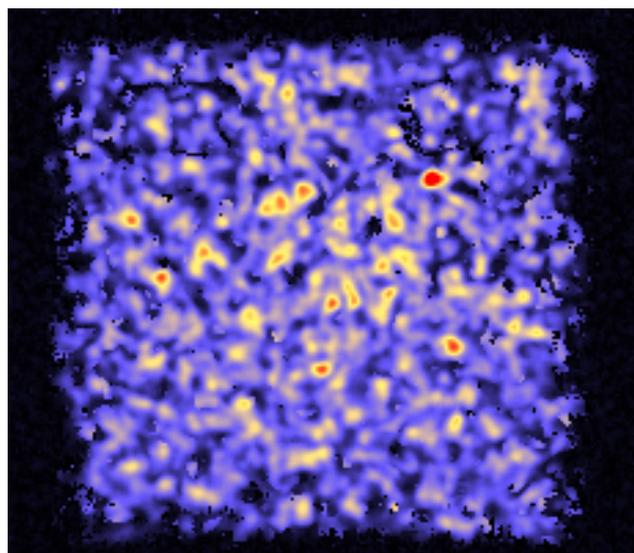
### Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses durch modifizierte Auswertetechnik

Durch die Bandbreite der verwendeten Prüfköpfe von 21 kHz besteht die minimale Pulsbreite aus mehreren Schwingungen – erstreckt sich also über mehrere Wellenlängen. Die Bestimmung des Maximums für die Darstellung des C-Bilds verwendet dagegen nur einen einzelnen Wert aus dem zeitlichen Verlauf des Signals. Eine deutliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses kann also erreicht werden, wenn die Werte über die komplette Pulsbreite in die Auswertung eingehen. Da die Frequenz des Signals bekannt ist, eignet sich für die Auswertung die Nutzung einer gleitenden Fouriertransformation über eine Pulslänge zur Bestimmung der Amplitude. Bild 4 zeigt die Anwendung der Methode auf den zeitlichen Signalverlauf: Die Werte über einen Zeitbereich von einigen Wellenlängen (hier 5) werden dem Zeitbereich entnommen, mit einer Fensterfunktion (Hanning) multipliziert und fouriertransformiert. Ausgewertet wird die Mittenfrequenz des Ultraschalls von 200 kHz, so dass pro Schritt jeweils ein Amplituden- und ein Phasenwert berechnet werden. Durch Verschieben des Auswertebereichs und wiederholte Anwendung der Berechnung kann so der Amplitudenverlauf bestimmt werden. Mit der Bestimmung des Maximums dieses Verlaufs kann ein C-Bild mit deutlich verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis erzeugt werden.



**Bild 4.** Bestimmung der Amplitude über gleitende Fouriertransformation

Im A-Bild (oberer Teil von Bild 4) ist zusätzlich zu dem Maximum, das vom transmittierten Puls herrührt, ein weiteres Maximum des Signals erkennbar, da der Schall auch über die Luftstrecke seitlich am Bauteil vorbei übertragen wird. Durch die geringere Schallgeschwindigkeit in Luft ist dieses Signal aber deutlich verzögert und kann leicht unterschieden werden. Durch Auswertung dieses Maximums ist die Identifikation des Bauteilrandes möglich: Wenn ein Schwellwert des Luftsignals überschritten wird, wird der entsprechende Wert aussortiert. Bild 5 zeigt ein C-Bild, das durch Nutzung der gleitenden Fouriertransformation erzeugt wurde. Bildpunkte, die als Hintergrund erkannt wurden, werden unterdrückt und schwarz dargestellt.

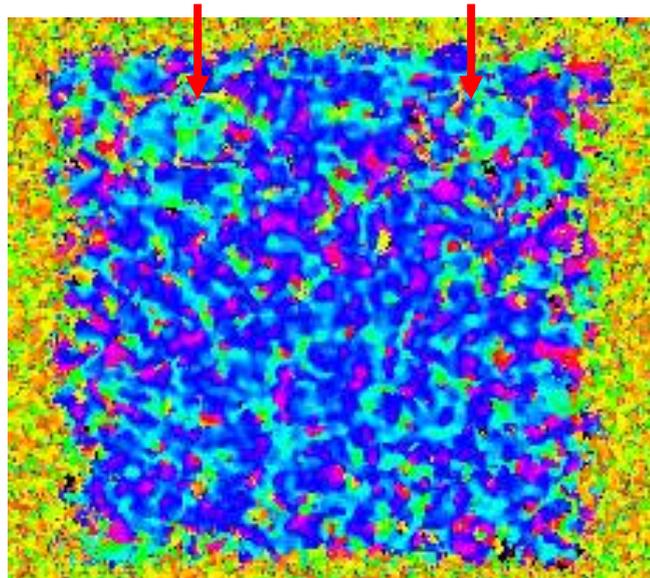


**Bild 5.** C-Bild aus gleitender Fouriertransformation

Deutlich sichtbar ist die klare Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses der neuen Berechnungsmethode. An einzelnen Bildpunkten niedriger Amplitude führt der scharfe

Schwellwert zu einer falschen Einordnung des Bildpunktes als direktes Luftsignal, über weite Teile des Bildes ist die Zuordnung jedoch eindeutig.

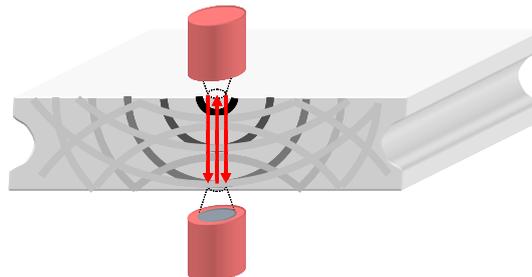
Gegenüber der direkten Auswertung des Maximums ergibt sich noch ein weiterer Vorteil der Auswertung mit gleitender Fouriertransformation: Die Laufzeit des Signals ist ebenfalls leicht bestimmbar. Bild 6 zeigt die Laufzeit bis zum stärksten Maximum als Farbe des jeweiligen Bildpunkts codiert. Im oberen Bereich sind ansatzweise zwei rechteckige Bereiche sichtbar, die eine veränderte Laufzeit zeigen. Dabei handelt es sich um Bereiche, in denen die Geometrie sich deutlich von den übrigen Bereichen der Komponente unterscheidet. Die Dicke des Bauteil ist bis auf diese Bereiche konstant bei ca. 40 mm, in diesen Bereich ist die Dicke um einige Millimeter größer – es sollte also ein deutlicherer Unterschied im Laufzeitbild sichtbar sein.



**Bild 6.** Laufzeit bis zum Maximum aus gleitender Fouriertransformation

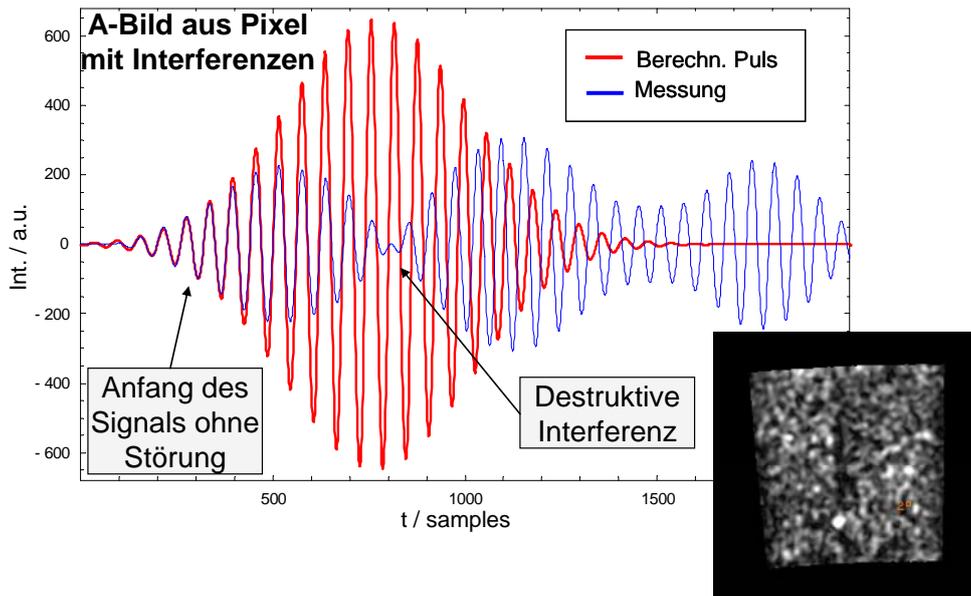
### Interpretation der Bildergebnisse

Mit der neuen Auswertetechnik konnte zwar das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessert werden, aber das entstandene C-Bild entspricht qualitativ der Auswertung nach der Blenden-/Maximumsmethode. Daher bleibt auch die ungenügende Korrelation der Anzeigen mit der zerstörenden Prüfung bestehen. Da die Anzeigen jedoch auch über mehrere Messungen hinweg klar reproduzierbar waren, muss trotzdem eine Material- oder Geometrie-eigenschaft dafür verantwortlich sein. Vergleicht man die typischen A-Bilder aus der Messung mit dem Einzelpuls zeigt sich, dass das empfangene Signal bereits vor dem Erreichen des Maximums wieder abgeschwächt wird.

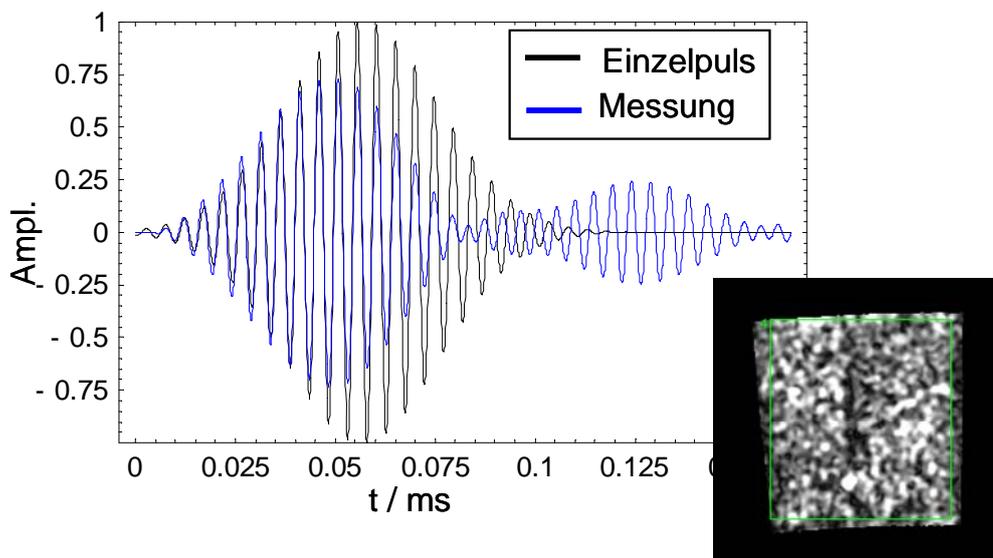


**Bild 7.** Überlagerung des direkten Signals mit Reflexionen an Grenzflächen

In Bild 8 ist der theoretische Verlauf eines ungestörten Pulses mit einem A-Bild gezeigt. Während der Anfangsbereich des Signalverlaufs noch weitestgehend dem Idealverlauf entspricht, wird ein Minimum im A-Bild angezeigt, an einer Stelle, an der der Puls eigentlich maximal sein sollte. Aus der Phasenlage des nachfolgenden Maximums kann man schließen, dass es sich bei dem Minimum um die destruktive Interferenz des transmittierten Pulses mit einem reflektierten Puls handelt. Vergleicht man die Wellenlänge des Schalls innerhalb des Bauteils mit der Dicke des Bauteils, kann man dieses Signal als Reflexion an Rück- und Vorderwand zuordnen, da die Verzögerung nur 5,3 Wellenlängen beträgt (Bild 7).



**Bild 8.** Vergleich eines typischen A-Bilds aus der Messung (Position im kleinen Bild) mit dem theoretischen Verlauf eines ungestörten Pulses

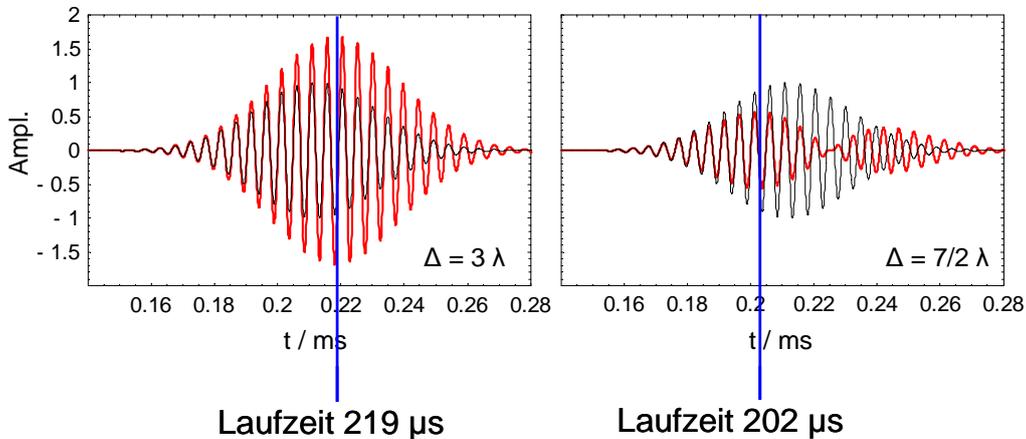


**Bild 9.** Vergleich des mittleren A-Bilds (gemittelt über vollständiges Bauteil) mit dem theoretischen Verlauf eines ungestörten Pulses

Durch leichte Schwankungen in der Laufzeit in der Größenordnung von einer halben Wellenlänge, bedingt durch Variationen des Abstands von Vorder- und Rückwand bzw. der Schallgeschwindigkeit, ergeben sich dadurch starke Variationen der Höhe des Maximums.

Anzeigen im C-Bild sind also nicht direkt einem Fehler zuzuordnen, sondern können nur als lokale Veränderungen gegenüber der Umgebung interpretiert werden.

Bild 9 zeigt, dass der Effekt, der in Bild 8 exemplarisch dargestellt ist, auch insgesamt gilt: Mittelt man den Zeitverlauf über das gesamte Bauteil ergibt sich ein mittleres A-Bild, das im Vergleich zum Einzelpuls deutlich verkürzt ist.

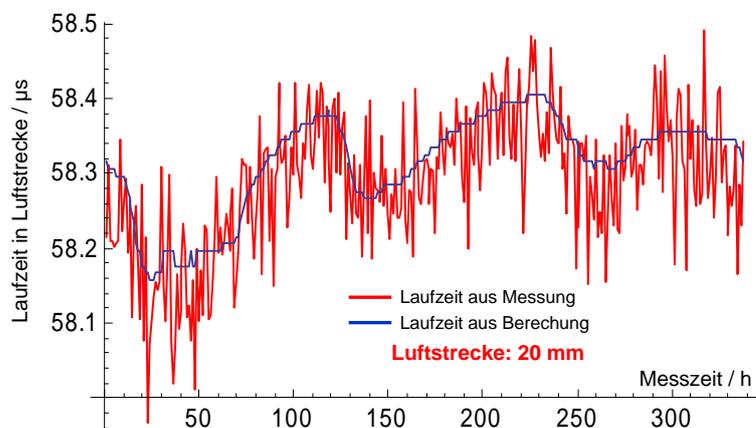


**Bild 10.** Vergleich des mittleren A-Bilds (gemittelt über vollständiges Bauteil) mit dem theoretischen Verlauf eines ungestörten Pulses

Durch die Interferenz variiert nicht nur die Amplitude, auch die Laufzeit kann nicht mehr direkt ausgewertet werden: In Bild 10 ist die rechnerische Überlagerung von direktem und reflektiertem Puls gezeigt – bei Variation der Schalllaufzeit um eine halbe Wellenlänge. Die Laufzeiten variieren in der Größenordnung von fast 10% - eine Dickenänderung in dieser Größenordnung wie in Bild 6 kann daher nicht mehr über die Laufzeit sichtbar gemacht werden.

### Statistische Auswertung zur Materialcharakterisierung

Auch wenn durch die Interferenzen die direkten Bilder nicht mehr auswertbar sind, ist dennoch eine Korrelation mit den Materialeigenschaften vorhanden. Daher könnte eine statistische Auswertung von Amplitude und Laufzeit noch zum Ziel führen. Durch die starken Variationen in diesen Parametern auch bei leichten Schwankungen der Laufzeiten, würden die Werte sogar verstärkt werden.



**Bild 11.** Entwicklung der Laufzeit über einen längeren Messzeitraum im Vergleich mit der Laufzeit des Schalls in der Luftstrecke.

Bei der testweisen statistischen Auswertung von Serienmessungen zeigte sich jedoch eine starke Abhängigkeit von den Umgebungseinflüssen wie z.B. der Lufttemperatur. Betrachtet man die Laufzeit des Signals zeigt sich eine Abhängigkeit von der Temperatur, die sich direkt aus der Veränderung der Schallgeschwindigkeit in Luft erklären lässt (Bild 11). Dadurch wird die statistische Auswertung schwierig, da die Vergleichbarkeit von Datensätzen über einen längeren Zeitraum nicht mehr sichergestellt werden kann.

### **Zusammenfassung**

Von allen Ankoppelungsmethoden für Ultraschall ist allein Luftultraschall in der Lage, keramische Hitzeschild bildgebend zu prüfen. Die Methode erzeugt C-Bilder, die mit geeigneten Auswertungstechniken in hoher Qualität und guter Reproduzierbarkeit aufgenommen werden können. Als ungünstig für die Messung stellte sich die große Wellenlänge im Bauteil heraus, da durch Reflexionen an den Grenzflächen Interferenzen zwischen dem direkten und reflektiertem Puls bereits zu einer Beeinflussung des Primärpulses kommen. Die entstehenden Bilder können daher weder in der Amplitude, noch in der Laufzeit direkt ausgewertet werden. Eine statistische Auswertung ist prinzipiell denkbar, muss aber eine Reihe von Umgebungsparametern wie z.B. Lufttemperatur berücksichtigen, was den Aufbau von Vergleichsdaten für die statistische Auswertung schwierig macht. Insgesamt eignet sich Luftultraschall sehr gut für die Prüfung von keramischen Komponenten, solange sichergestellt werden kann, dass sich der Primärpuls nicht nennenswert mit reflektierten Signalen überlagert.