

Hochauflösendes Ultraschallgoniometer zur Bestimmung von Oberflächen-Verfestigungszuständen an Nickelbasis- und Titan-Legierungen

Martin BARTH*, Bernd KÖHLER*, Joachim BAMBERG**, Hans-Uwe BARON**

* Fraunhofer IZFP, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden

** MTU Aero Engines GmbH, Dachauer Str. 665, 80995 München

Kurzfassung. Randzonenverfestigung ermöglicht es, die Belastbarkeit und Lebensdauer von dynamisch hochbelasteten Bauteilen signifikant zu erhöhen. Um diesen Einfluss bei der Konstruktion von Triebwerksteilen für Flugzeuge berücksichtigen zu können, muss der Verfestigungszustand zerstörungsfrei gemessen werden können. Eine vielversprechende Methode ist die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen (Rayleighwellen). Aus der frequenzabhängigen Änderung der Schallgeschwindigkeit (Dispersion) lässt sich der Grad der Verfestigung ableiten. Mittels des hochauflösenden Ultraschallgoniometers kann die Dispersion der Rayleighwellen in kurzer Zeit an einer relativ kleinen Fläche des Bauteils gemessen werden.

Einführung

Viele Komponenten von Flugzeugtriebwerken sind enormen Belastungen ausgesetzt. Insbesondere Verdichter- und Turbinenschaufeln sowie die Disks und Blisks müssen teilweise hohen Temperaturen, extremen Fliehkräften und starken Vibrationen zuverlässig standhalten. Um dies zu gewährleisten werden diese Teile aus Titan- oder Nickelbasislegierungen gefertigt. Zusätzlich werden an Bauteilbereichen, die unter besonders hoher Zugspannung stehen, die Oberflächen durch Kugelstrahlen randzonenverfestigt. Dadurch erhöhen sich Belastbarkeit und Lebensdauer der Bauteile. Jedoch ist es nicht erlaubt, das dadurch entstehende Optimierungspotential konstruktiv auszunutzen, denn es existiert bisher kein zerstörungsfreies Messverfahren, mit dem sich der Zustand der Verfestigung messen lässt. Die MTU und das IZFP Dresden haben sich die Entwicklung solch eines Messverfahrens zur Aufgabe gemacht.

1. Projekt Randverfestigung

1.1 Kugelstrahlen

Es gibt mehrere Verfahren, um eine Bauteiloberfläche zu verfestigen. Eine häufig genutzte Methode ist das Kugelstrahlen. Dabei werden kleine Metallkugeln (Drahtkörner) z.B. durch

Druckluft beschleunigt und mit hoher Geschwindigkeit auf das Bauteil geschossen. Beim Aufprall wird die oberste Schicht kaltverfestigt und unter der sichtbar raueren Oberfläche bleiben Gefügeveränderungen und laterale Druckeigenspannungen zurück. Diese reichen üblicherweise bis in etwa 100 μm Tiefe und bei hoher Strahlintensität bis 300 μm Tiefe. Der maximale Betrag der Eigenspannungen liegt nahe der Streckgrenzenspannung des Materials.

Die Eigenspannungen bewirken, dass an der Oberfläche stets Druckspannungen vorliegen, auch wenn das Bauteil starken Zugspannungen ausgesetzt ist. Dadurch entstehen an der Oberfläche keine Ermüdungsrisse, die ins Bauteil wachsen und zu dessen Versagen führen können. So erhöht sich die Lebensdauer des Bauteils deutlich. Zu hohe Betriebstemperaturen bewirken allerdings einen Abbau der Eigenspannungen. Deshalb müssen die Eigenspannungen bei der Triebwerkswartung zerstörungsfrei messbar sein.

Im Rahmen des Projekts wurden zunächst zwei Ansätze verfolgt: Wirbelstrommessung und Oberflächenwellenmessung. Das Wirbelstrommessverfahren wurde anfangs verstärkt vorangetrieben, da es positive Resultate von Forschern um Peter Nagy von der University of Cincinnati, USA gab (vgl. [1]). Allerdings zeigten sich an den relevanten Legierungen in dem Härtingzustand, wie sie im Triebwerksbau verwendet werden, gegenläufige Messeffekte von Eigenspannungen und Kaltverfestigung (vgl. [2]). Diese können sich im ungünstigsten Fall gegenseitig aufheben, was zu der Entscheidung führte, den Wirbelstromansatz nicht weiter zu verfolgen. So verblieb der parallel dazu verfolgte Ansatz der Oberflächenwellenmessung, mit dem zu dieser Zeit bereits viele positive Messergebnisse erzielt wurden.

1.2 Messprinzip mit Ultraschall-Oberflächenwellen

Außer den longitudinalen und transversalen Volumenwellen in Festkörpern können sich an Festkörperoberflächen akustische Oberflächenwellen ausbreiten. Dieser Wellentyp wurde erstmals von Lord Rayleigh beschrieben und wird daher auch Rayleighwelle genannt. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist etwas kleiner als die Transversalwellengeschwindigkeit des jeweiligen Materials. Die Amplitude der Rayleighwelle nimmt mit der Tiefe unter der Oberfläche exponentiell ab. Die meiste Energie wird zwischen der Oberfläche und einer Tiefe von etwa einer Wellenlänge transportiert. So haben Rayleighwellen mit hoher Frequenz eine geringere Eindringtiefe als solche mit niedriger Frequenz.

Bei homogenen Materialien, ist die Rayleighwellengeschwindigkeit bei allen Frequenzen gleich. Befindet sich aber an der Oberfläche eine Schicht mit anderen akustischen Eigenschaften, hat diese auf Rayleighwellen mit hoher Frequenz einen stärkeren Einfluss als auf solche mit niedriger Frequenz. Dadurch ist ihre Geschwindigkeit frequenzabhängig, d.h. die Rayleighwelle ist dispersiv.

1.3 Messung der Oberflächenwellen-Geschwindigkeit

Um die Geschwindigkeit der Oberflächenwellen zu messen, müssen diese erzeugt werden und deren Laufzeit über einer bekannten Strecke gemessen werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, Rayleighwellen zu erzeugen. Genutzt wurde eine relativ einfache Methode, bei der ein breitbandiger Miniaturprüfkopf an einem Keilvorlauf mit speziellem Keilwinkel eingeschraubt ist. Die in den Keil eingeschallte Longitudinalwelle streift die Bauteiloberfläche ungefähr mit der Rayleighwellengeschwindigkeit, wodurch nahezu ausschließlich Rayleighwellen erzeugt werden. Die elektrische Anregung kann durch ein kontinuierliches Sinussignal oder mit Pulsen erfolgen, wobei Pulse den Vorteil haben, dass sie ein breites Frequenzband anregen.

Auf umgekehrte Weise lassen sich die Rayleighwellen auch detektieren. Allerdings lässt sich der auf der Probenoberfläche zurückgelegte Weg nur ungenau einstellen bzw. bestimmen. Wesentlich präziser ist die Detektion mit Laser-Doppler-Vibrometer. Hierbei werden die Schwingungen an der Probenoberfläche von einem fokussierten Laserstrahl detektiert. Diese Methode ist rückwirkungsfrei und sehr breitbandig. In Kombination mit einem Scanner-Tisch können die Zeitsignale entlang einer Linie in Ausbreitungsrichtung der Rayleighwellen aufgenommen werden. Dieses Messprinzip ist schematisch in Abbildung 1 zu sehen.

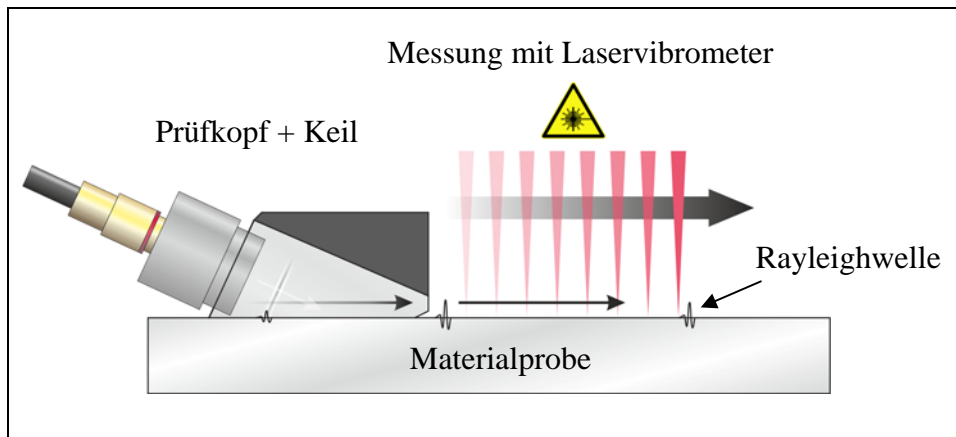


Abbildung 1: Schema der Rayleighwellen-Dispensionsmessung mit Laservibrometer

Mit einem geeigneten Algorithmus lässt sich aus den Zeitsignalen die Schallgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) als Funktion der Frequenz berechnen. Solche Dispersionskurven wurden an Materialproben aus der Nickelbasislegierung Inconel 718 und aus der Titanlegierung Ti6246 aufgenommen. Die Oberfläche der Proben mit einem Format von etwa $130 \times 130 \times 10 \text{ mm}^3$ wurden entlang von je zwei Streifen kugelgestrahlt mit Strahlstärken von 5 Almen und 13 Almen. Die Dispersionskurven der gestrahlten Bereiche und des ungestrahlten Bereichs sind für beide Legierungen in Abbildung 2 und Abbildung 3 gegenübergestellt. Die durchschnittlichen Anstiege der Dispersionskurven unterscheiden sich bei beiden Legierungen deutlich. Je größer die Kugelstrahlintensität, desto stärker fällt die Schallgeschwindigkeit mit steigender Frequenz ab, d.h. die Dispersion nimmt zu.

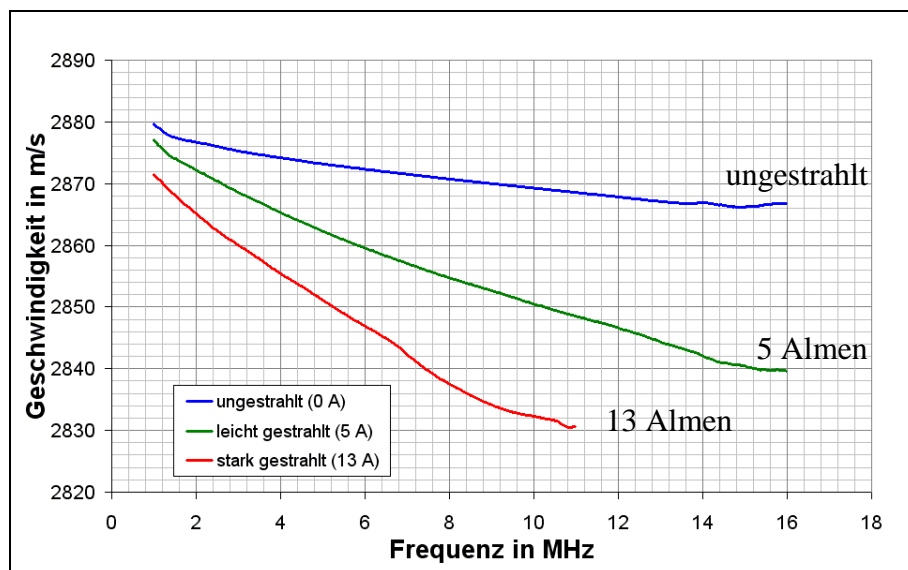


Abbildung 2: Rayleighwellen-Dispensionskurven, Material: Inconel 718, Oberfläche ungestrahlt bzw. mit 5 Almen und 13 Almen kugelgestrahlt

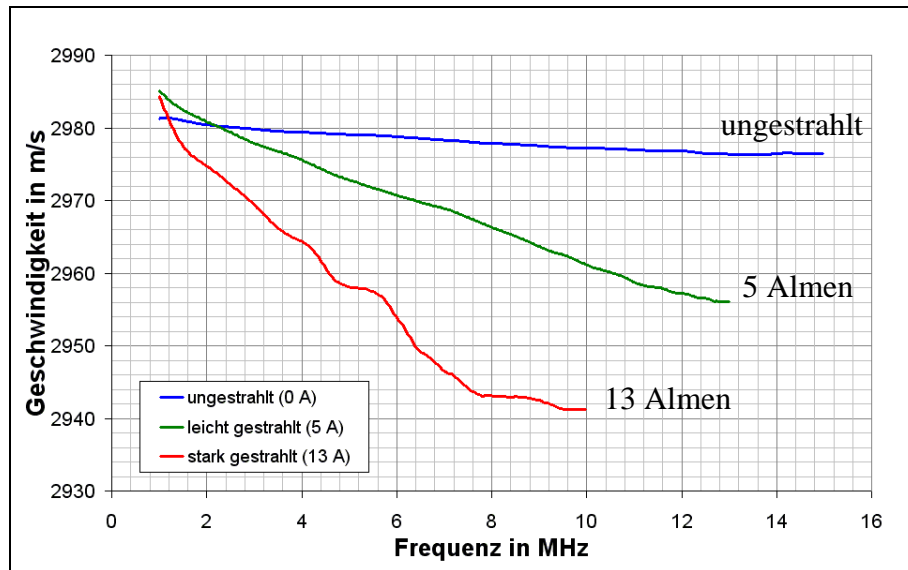


Abbildung 3: Rayleighwellen-Dispersionskurven, Material: Ti6246, Oberfläche ungestrahlt bzw. mit 5 Almen und 13 Almen kugelgestrahlt

2. Hochauflösendes Ultraschallgoniometer „HUGO“

2.1 Aufbau des Goniometers

Mit der Laservibrometer-Messmethode lässt sich die Dispersion mit hoher Genauigkeit messen. Allerdings sind die Investitionskosten für die Technik recht hoch und die Messung recht zeitaufwendig. Daher wurde parallel nach einer alternativen Messmethode gesucht und ein Ultraschallgoniometer entwickelt.

Ein Ultraschallgoniometer richtet zwei Tauchtechnik-Prüfköpfe so auf die zu untersuchende Probenoberfläche aus, dass sie sich im gleichen einstellbaren Winkel zum Lot gegenüberstehen, wie es in Abbildung 4 dargestellt ist. Probekörper und Prüfköpfe befinden sich im Wasser, das als akustisches Koppelmedium dient. Ein Prüfkopf sendet Ultraschallwellen zur Probenoberfläche und der andere Prüfkopf empfängt die reflektierten Schallwellen. Je nach eingestelltem Einschallwinkel können am beschallten Oberflächenbereich Volumen- oder Oberflächenschallwellen angeregt werden. Das wirkt sich auf das reflektierte Schallsignal aus. Ist der Winkel so eingestellt, dass die Rayleighwelle angeregt wird, trägt diese (vereinfacht dargestellt) einen Teil der Schallenergie aus dem beschallten Oberflächenbereich heraus, wodurch die Amplitude des Empfangssignals bei diesem Winkel ein Minimum hat. Ist die Rayleighwelle dispersiv, liegen die Minima für verschiedene Schallfrequenzen bei unterschiedlichen Winkeln.

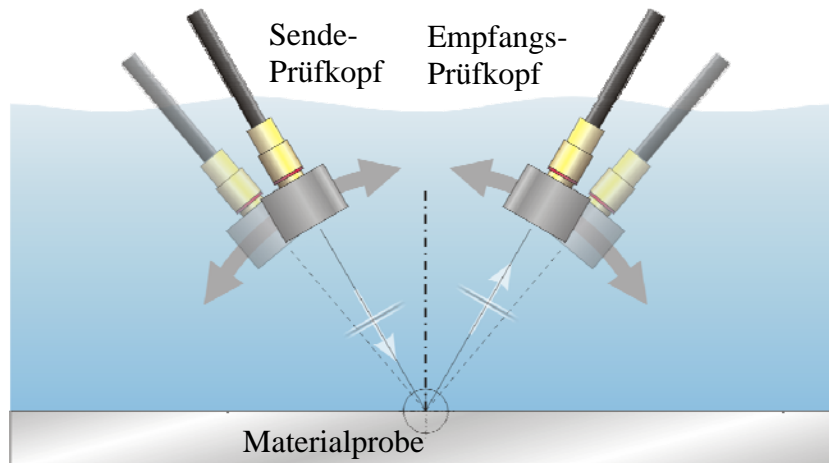


Abbildung 4: Schema eines Ultraschallgoniometers

Das Goniometer „HUGO II“ (s. Abbildung 5) besteht aus zwei gegenläufig bewegten Messingbögen, an denen die Prüfkopfhalterungen befestigt sind. Neben den beiden Tauchtechnikprüfköpfen sind zwei Laserpointer eingebaut, die das Einjustieren und Ausrichten auf die Probenoberfläche erleichtern. Angetrieben wird es von einem Schrittmotor. Die Prüfköpfe sind an ein Ultraschallgerät (Pulser/Receiver) angeschlossen, dessen analoge Ausgangssignale digitalisiert und im PC weiterverarbeitet werden.

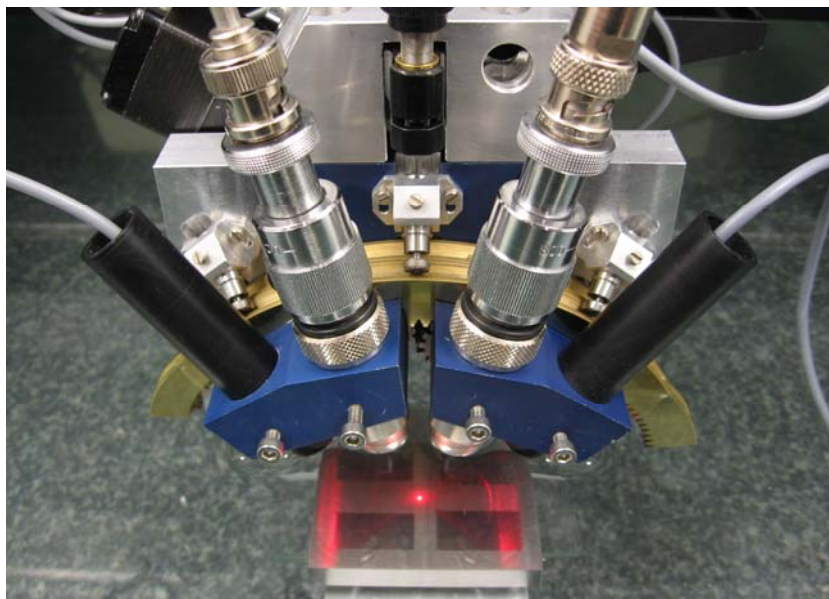


Abbildung 5: Ultraschall-Goniometer „HUGO II“

2.2 Ergebnisse der Goniometer-Messungen

Werden über einen Winkelbereich in kleinen Winkelschritten Zeitsignale aufgenommen, lassen sich diese in einem Winkel-B-Bild, wie in Abbildung 6, darstellen. Auf der waagerechten Diagrammchse ist der Einschallwinkel abzulesen. Die Zeitachse steht senkrecht. Die Spannungswerte sind als Grauwerte abgebildet. Im Winkelbereich zwischen 30° und 33° treten starke Veränderungen des Zeitsignals auf. In der Mitte dieses Bereichs ist die Amplitude minimal.

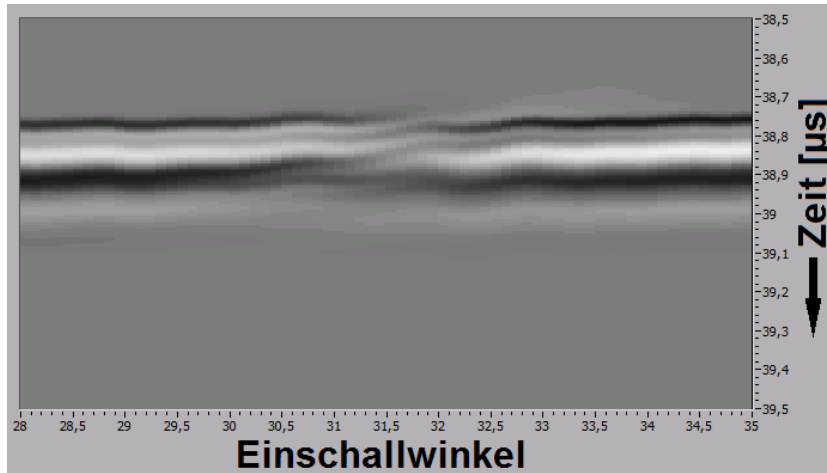


Abbildung 6: Beispiel eines Winkel-B-Bildes

Werden die Zeitsignale Fourier-transformiert und die farbcodierten Amplitudenspektren über dem Einschallwinkel aufgetragen, erhält man eine Darstellung wie in Abbildung 7a, die im Folgenden Goniometer-Spektrum genannt wird. Hier ist erkennbar, dass bei verschiedenen Frequenzen (Zeilen) die Amplitudenminima bei verschiedenen Winkeln liegen. Noch deutlicher wird es, wenn die (logarithmierten) Amplituden normiert, d.h. bei einem Winkel außerhalb des interessanten Bereichs auf das gleiche Niveau gebracht werden. Dieses normierte Goniometer-Spektrum ist in Abbildung 7b zu sehen. Die Amplitudenminima sind darin durch eine Kurve markiert. In den Abbildungen Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die amplitudennormierten Goniometerspektren von Proben aus den Legierungen Inconel 718 und Ti6246, jeweils ungestrahlt und mit 4 und 8 Almen kugelgestrahlt gezeigt.

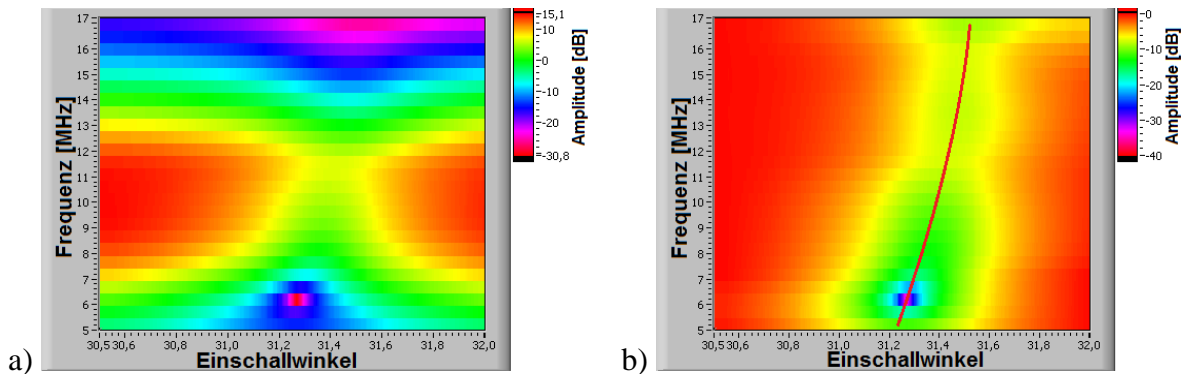


Abbildung 7: Goniometer-Spektren, a) unnormiert, b) Amplituden-normiert

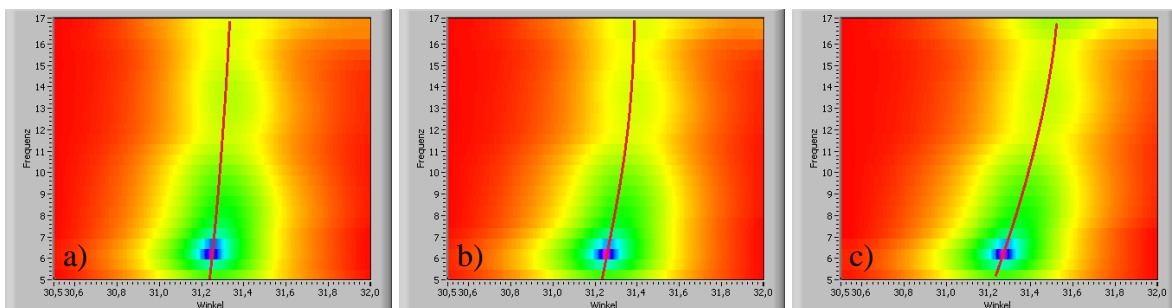


Abbildung 8: Amplituden-normierte Goniometer-Spektren mit Minimum-Kurve, Material: Inconel 718, a) ungestrahlt, b) 4 Almen, c) 8 Almen

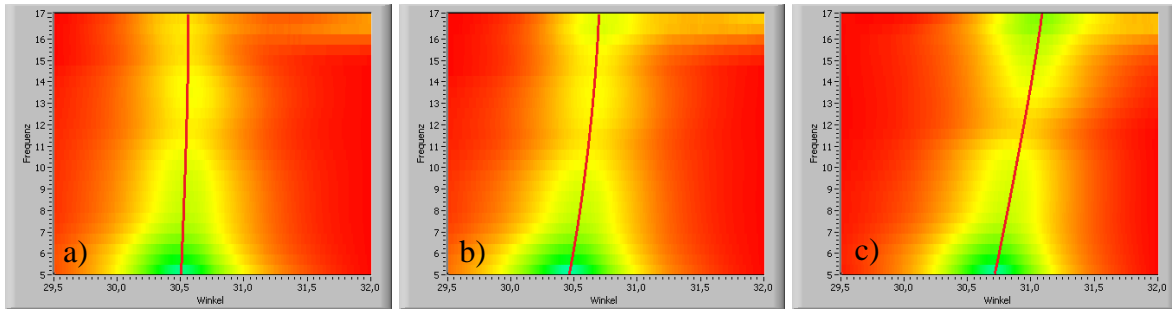


Abbildung 9: Amplituden-normierte Goniometer-Spektren mit Minimum-Kurve, Material: Ti6246, a) ungestrahlt, b) 4 Almen, c) 8 Almen

Über das Snelliussche Brechungsgesetz lassen sich aus den Einschallwinkeln der Amplitudenminima die Rayleighwellengeschwindigkeiten berechnen. Die so erhaltenen Dispersionskurven sind in Abbildung 10 für die Legierung Inconel 718 dargestellt. Auch hier zeigt sich der Zusammenhang zwischen Verfestigungsstärke und dem mittleren Anstieg der Dispersionskurven. Bemerkenswert ist auch, dass zur Messung mit dem Goniometer nur eine Probenfläche von 1 bis 2 cm² benötigt wird.

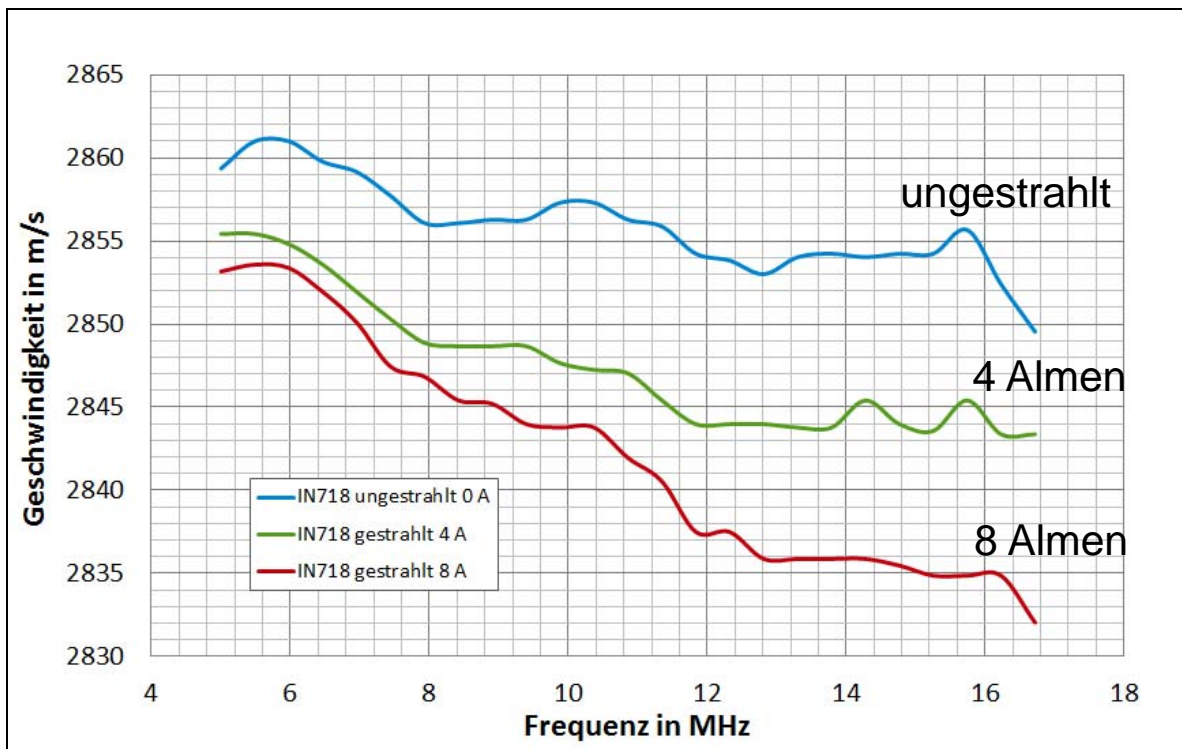


Abbildung 10: Dispersionskurven aus Goniometer-Messungen von verschieden stark kugelgestrahlten Oberflächen an Proben aus Inconel 718

Zusammenfassung

Die vorgestellte Vibrometer-Messmethode ermöglicht das Messen der Rayleighwellen-Dispersion mit hoher Genauigkeit. Die Messergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Verfestigungszustand und der Dispersion auf.

Mit dem Ultraschall-Goniometer wurden ähnlich gute Ergebnisse erzielt. Auch hier zeigt sich die Beziehung zwischen Verfestigung und Rayleighwellen-Dispersion. Die Vorteile des Goniometers liegen dabei vor allem in den geringeren Investitionskosten, einer kürzeren Messzeit und einer kleineren zur Messung nötigen Probenoberfläche.

Ausblick

In den vorgestellten Messergebnissen sind die Einflüsse von Eigenspannung und Kaltverfestigung enthalten. Die nächste Aufgabe ist es nun, die Einflüsse beider Größen zu separieren, um die tatsächlichen Eigenspannungen bestimmen zu können.

Zu diesem Zweck wurde das Ultraschall-Goniometer „HUGO III“ entwickelt. Es verfügt über zwei mechanisch getrennte Goniometerbögen, von denen einer an einer Linearachse aufgehängt ist und somit verfahren werden kann. Dies ermöglicht vielseitigere Verwendung, z. B. auch die Abtastung der Oberflächenwelle entlang der Ausbreitungslinie.

Im Controller-Gehäuse ist die im IZFP Dresden entwickelte Ultraschall-Elektronik PCUS[®] *pro* single integriert. Sie macht das Ultraschallgoniometer „HUGO III“ zu einem „Stand-alone-Gerät“, das via USB-Verbindung von einem Laptop bedient werden kann.

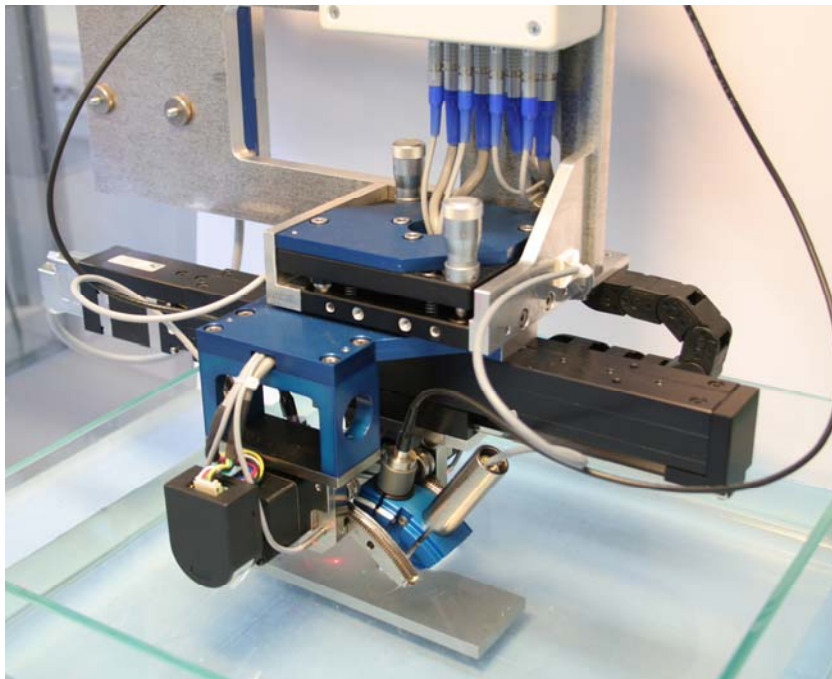


Abbildung 11: hochauflösendes Ultraschall-Goniometer „HUGO III“

Referenzen

- [1] P. Nagy, "Opportunities and Challenges for Nondestructive Residual Stress Assessment", Proceedings of the Rev. of Progress in QNDE 2005, ed. by D.O. Thompson, D. E. Chimenti, Vol. 25, (2006), p.1349 ff.
- [2] S. Hillmann, H. Heuer, H.-U. Baron, J. Bamberg, A. Yashan, and N. Meyendorf, "Near-surface residual stress-profiling with high Frequency eddy current conductivity measurement", Proceedings of the Review of Progress in QNDE 2008, ed. by D.O. Thompson, D.E. Chimenti, Vol 28, p.1349 ff.
- [3] Lester W. Schmerr Jr., Sung-Jin Song "Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems, Models and Measurements", Springer, NY, 2007
- [4] A. Ruiz, P. B. Nagy, "SAW dispersion measurements for ultrasonic characterization of surface treated metals", Instr. Meas. Metrol. 3 (2003) 59.
- [5] B. Koehler, M. Barth, F. Schubert, J. Bamberg, and H.-U. Baron, "Characterization of surface treated aero engine alloys by Rayleigh wave velocity dispersion", Proc. of Rev. of Progress in QNDE, Ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, 29, (2009)