

Grundlegende Untersuchungen zur Spannungsmessung mittels Ultraschall an Werkstoffen im Triebwerksbau

Sebastian HUBEL^{*}, Martin SPIES^{*}, Hans RIEDER^{*}, Alexander DILLHÖFER^{*},
Joachim BAMBERG^{**}, Roland HESSERT^{**}, Christina PREIKSZAS^{**}

^{*} Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Fraunhofer-Platz 1,
67663 Kaiserslautern, Tel. +49 631 31600-4344, E-Mail

sebastian.hubel@itwm.fraunhofer.de

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

Kurzfassung. Damit moderne Flugtriebwerke ihren hohen Ansprüchen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Gewicht, Leistung, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer gerecht werden können, ist es notwendig, dass das vorhandene Werkstoffpotential ihrer Bauteile optimal ausgenutzt wird. Vor diesem Hintergrund kommt den Eigenspannungen im Bauteilvolumen eine besondere Bedeutung zu, da sie z.B. den Bauteilverzug während des gesamten Fertigungsprozesses steuern und so die Wirtschaftlichkeit der Fertigung deutlich beeinflussen. Die Bestimmung von Volumen-Eigenspannungen mittels Ultraschall ist eine schnelle und zerstörungsfreie Methode und zählt bei Stahlbauteilen zu den etablierten Verfahren. Ziel unserer Untersuchungen war es daher festzustellen, ob sich diese Messmethode auch auf Nickel- und Titan-Werkstoffe des Triebwerksbaus übertragen lässt. Wir berichten in diesem Beitrag über grundlegende Untersuchungen, die wir hinsichtlich der erzielbaren Messeffekte durchgeführt haben. In experimentellen Untersuchungen mit Standard-Prüfköpfen haben wir in einachsigen Zugversuchen die Sensitivität der Laufzeiten verschiedener Ultraschallwellen bezüglich der Spannungsänderungen ermittelt. Daraus lassen sich Wichtungsfaktoren berechnen, die den Zusammenhang zwischen Spannungs- und Geschwindigkeitsänderung von Longitudinalwellen und zur Spannungsrichtung unterschiedlich polarisierter Transversalwellen angeben. Von einem Schmiedeteil aus Inconel 718 wurden an unterschiedlichen Stellen Proben herauspräpariert und zum Teil wärmebehandelt, um auch die Einflüsse des Texturzustandes auf das Messergebnis untersuchen zu können. In unserem Beitrag fassen wir die Grundlagen des Verfahrens zusammen, berichten über die Anpassung und Assemblierung eines Mess-Systems für die hochgenaue Ultraschalllaufzeitmessung und bewerten die an den verschiedenen Proben erzielten Ergebnisse hinsichtlich der weiteren Vorgehensweise.

1. Einführung

Die Entwicklung moderner Flugtriebwerke stellt eine anspruchsvolle, komplexe Aufgabe dar, da eine Vielzahl von Einflussfaktoren in den Prozess mit einbezogen werden müssen [1]. Zur Optimierung der Triebwerke im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Gewicht, Leistung, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer liegt es im Interesse der Hersteller, das Potential der Produktionsverfahren und der eingesetzten Materialien vollständig auszuschöpfen. In diesem Zusammenhang spielen auch Eigenspannungen im Bauteilvolumen eine wichtige Rolle. Zum einen beeinflussen Eigenspannungen im Rohteil den Bauteilverzug während

des Fertigungsprozesses und somit dessen Wirtschaftlichkeit. Zum anderen kann die Kenntnis des Eigenspannungszustands im Fertigteil zu einer verbesserten Berechnung der Belastbarkeit und der Lebensdauer führen.

Von den bekannten zerstörungsfreien Messtechniken, wie Röntgen, Wirbelstrom oder die teilzerstörende Bohrlochmethode, ist keine so gut geeignet wie Ultraschall, um Spannungen im Bauteilvolumen zu detektieren [2]. Die Bestimmung von Volumeneigenspannungen mittels Ultraschall zählt bei Stahlbauteilen zu den etablierten Verfahren [3,4] und wurde auch schon für andere Materialien getestet [4]. Ziel dieser Arbeit war daher, die Anwendbarkeit des Verfahrens für im Triebwerksbau verwendete Werkstoffe zu evaluieren, indem wir den Messeffekt an repräsentativen Testkörpern quantifizieren.

2. Ultraschallverfahren zur Messung von Volumeneigenspannungen

Bei der Messung von Eigenspannungen mittels Ultraschall handelt es sich um eine indirekte Messmethode. Das prinzipielle Vorgehen wurde bereits mehrfach - z.B. [3,4] - ausführlich beschrieben. Die entscheidende Größe der Spannungsmessung ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen im Festkörper. Bei Kenntnis der elastischen Konstanten II. (Second Order Elastic Constants, SOEC) und III. Ordnung (Third Order Elastic Constants, TOEC) ist der Spannungszustand aus Ultraschallgeschwindigkeitsdaten berechenbar. Im isotropen Fall können die SOEC durch die Laméschen Moduln λ und μ bzw. den Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν ausgedrückt werden. Diese Materialparameter werden entweder durch Ultraschallmessungen im spannungsfreien Zustand unter Verwendung der Formeln (1-2) oder mechanisch in Zugversuchen bestimmt. Hierbei beschreiben v_L und v_T die Geschwindigkeiten der Longitudinal- bzw. der Transversalwelle im spannungsfreien Zustand, ρ steht für die Dichte.

$$\rho v_L^2 = \lambda + 2\mu = E(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu) \quad (1)$$

$$\rho v_T^2 = \mu = G = E/2(1+\nu) \quad (2)$$

Die TOEC lassen sich aus den akusto-elastischen Konstanten (Acousto Elastic Constants, AEC) herleiten. Die AEC beschreiben für die verschiedenen Ultraschallwellen den jeweiligen Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dehnung ε . Diese Abhängigkeit wird durch Laufzeitmessungen im Testkörper während eines Zugversuchs ermittelt. Im betrachteten isotropen Fall reduziert sich die Anzahl der unabhängigen TOEC auf drei (l,m,n). Um diese eindeutig zu bestimmen, werden mindestens drei verschiedene Geschwindigkeitswerte benötigt. Die Geometrie der Zugprobe und der Messaufbau bedingen eine Einschallung vertikal zur Zugrichtung. Die eingesetzten Ultraschallwellen breiten sich demnach auch vertikal zur Zugrichtung, welche der Spannungsrichtung gleichzusetzen ist, aus. Es handelt sich dabei um die Longitudinalwelle, sowie die quer und längs zur Zugrichtung polarisierten Transversalwellen. Die Wellen werden durch zwei Indizes charakterisiert, wobei der erste die Ausbreitungs- und der zweite die Polarisationsrichtung repräsentiert. In einem Rechtssystem, mit den Achsen i,j,k, werden die AEC, für eine Ausbreitungsrichtung i, durch die Gleichungen (3-5) ausgedrückt.

$$AEC_{ii} = \frac{(v_{ii} - v_L)}{\varepsilon} / v_L \quad (3)$$

$$AEC_{ij} = \frac{(v_{ij} - v_T)}{\varepsilon} / v_T \quad (4)$$

$$AEC_{ik} = \frac{(v_{ik} - v_T)}{\varepsilon} \quad (5)$$

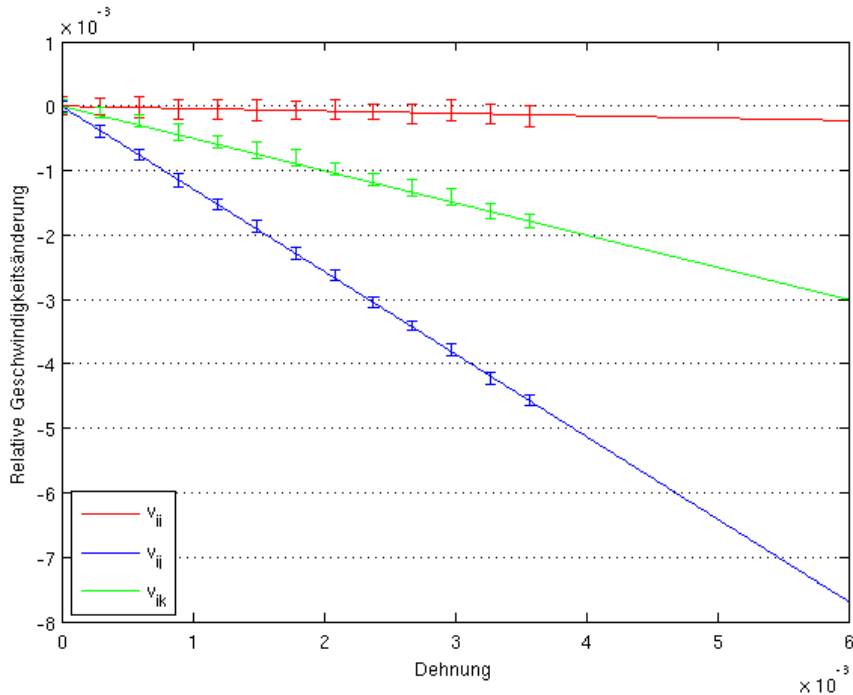


Abbildung 1. Geschwindigkeits-Dehnungs-Abhängigkeit - Messung 3a an Probe 3

Die AEC des untersuchten Inconel 718 entsprechen den Steigungen der in Abbildung 1 dargestellten Geschwindigkeits-Dehnungs-Abhängigkeiten. Durch Umformungen der Gleichungen für die SOEC und TOEC erhält man [4]:

$$\frac{v_{ii} - v_L}{v_L} = \frac{A}{C} \cdot \sigma_i + \frac{B}{C} \cdot (\sigma_j + \sigma_k) \quad (6)$$

$$\frac{v_{ij} - v_T}{v_T} = \frac{D}{K} \cdot \sigma_i + \frac{H}{K} \cdot \sigma_j + \frac{F}{K} \cdot \sigma_k \quad (7)$$

$$\frac{v_{ik} - v_T}{v_T} = \frac{D}{K} \cdot \sigma_i + \frac{F}{K} \cdot \sigma_j + \frac{H}{K} \cdot \sigma_k \quad (8)$$

Mit $\sigma_{i,j,k}$ werden die Spannungskomponenten bezeichnet, während A, B, C, D, H, F, K Kombinationen der elastischen Konstanten sind. Die reziproken Vorfaktoren - z.B. C/A - geben die Spannungsänderung an, welche in der jeweiligen Richtung und für die jeweilige Wellenart wirken muss, um eine Geschwindigkeitsänderung von 1 ‰ zu verursachen.

3. Prüfsystem zur Ultraschalllaufzeitmessung

Die entscheidende Größe bei der Spannungsmessung mittels Ultraschall ist die Geschwindigkeit. Der geringe Messeffekt von wenigen m/s, was einer relativen Änderung im ‰-Bereich entspricht, erfordert ein Messsystem mit hoher zeitlicher Auflösung. Für die Aufzeichnung der Ultraschallsignale wird deshalb ein Transientenrekorder mit einer Abtastfrequenz f_s von 1 GHz eingesetzt. Das aufgenommene HF-Signal umfasst mehrere Rückwändechos, anhand derer die Laufzeit mittels Nulldurchgangsanalyse bestimmt wird, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Die Ultraschallgeschwindigkeit berechnet

sich aus dem ermittelten Abstand der Nulldurchgänge, der bekannten Abtastfrequenz und dem Ultraschalllaufweg nach folgender Beziehung

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Laufweg}}{\text{Abstand der Nulldurchgänge}} \cdot \text{Abtastfrequenz}$$

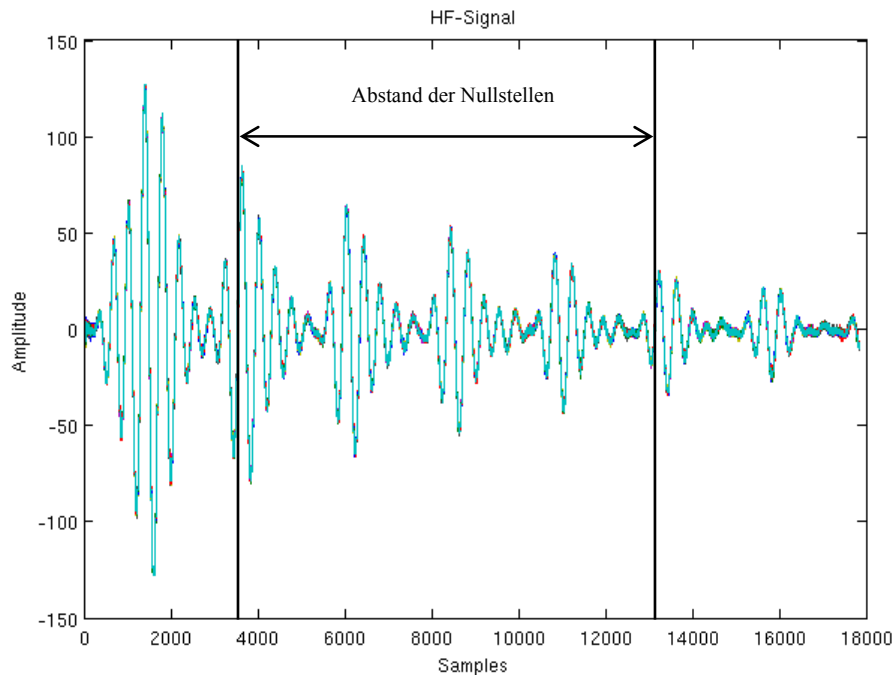


Abbildung 2. Prinzip der Nulldurchgangsanalyse an einem beliebigen HF-Signal

Der Korrekturfaktor $(1 - \nu \cdot \varepsilon)$ berücksichtigt die Laufwegänderung durch die Querdehnung während des Zugversuchs. Eine statistische Mittelung zur Rauschreduzierung erhöht die Messgenauigkeit. Jeder Geschwindigkeitswert stellt den Mittelwert aus 32 Einzelmessungen dar. Die Fehlerbalken in den Abbildungen 1 und 4 geben den statistischen Fehler an.

4. Auswahl geeigneter Testkörper

Eine geeignete Auswahl an Testkörpern sollte möglichst viele potentielle Einflussfaktoren auf entscheidende Materialparameter beinhalten. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die Beurteilung des Einflusses dieser Faktoren auf das Ausbreitungsverhalten der eingesetzten Ultraschallwellen im Hinblick auf Geschwindigkeit und Signalqualität. Der Querschnitt des Schmiederohteils, aus dem alle Testkörper entnommen wurden, ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die Skizze zeigt die verschiedenen Entnahmepositionen sowie Orientierungen der Testkörper im Bauteil.

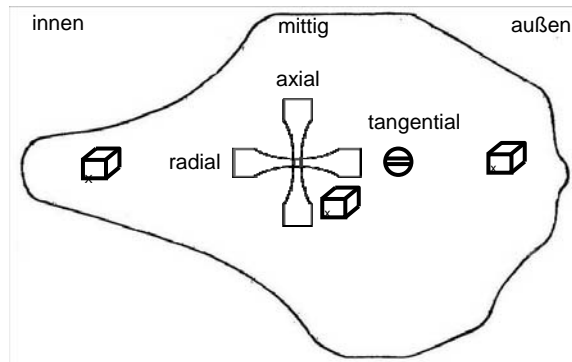


Abbildung 3. Querschnitt des IN718-Schmiederohteils samt Entnahmeposition und Orientierung der Testkörper

Im Folgenden werden die Indizes i,j,k für die Ausbreitungs- und Polarisationsrichtungen der Ultraschallwellen durch $a(xial)$, $r(adial)$ und $t(angential)$ ersetzt, welche die Orientierung relativ zur Symmetrieachse des Schmiederohteils angeben. Ein weiteres untersuchtes Kriterium ist die Wärmebehandlung der Testkörper. Nach der Entnahme wurden sowohl einige Zugproben als auch Quaderproben verschiedenen Wärmehandlungen unterzogen. In Tabelle 1 und 2 sind alle Spezifikationen der Testkörper aufgeführt. Die Wärmebehandlungen werden nach ihrer maximalen Glüh­temperatur von 955°C über 1060°C bis 1150°C als WB1 bis WB3 bezeichnet. Die Erwartung von auftretenden Textureffekten resultiert aus der Berücksichtigung der herstellungsbedingten Flusslinien im Schmiedeteil.

Tabelle 1. Zugproben

Proben-Nr.	Position	Orientierung	Bemerkungen
1	mittig	axial	Textur erwartet
2	mittig	radial	Textur erwartet
3	mittig	tangential	
4	mittig	tangential	WB 1
5	außen	tangential	WB 3, plastische Verformung
6	innen	tangential	Textur erwartet

Tabelle 2. Quaderproben

Proben-Nr.	Position	Bemerkungen
Q1	innen	Textur erwartet
Q2	mittig	Referenzkörper
Q3	außen	WB 1
Q7	mittig	WB 1
Q8	mittig	WB 2
Q9	mittig	WB 3

5. Experimentelle Ergebnisse

5.1 Zugversuche

Das Vorgehen während der Zugversuche ist für jede Probe identisch. Nach einer Messung im spannungsfreien Zustand wird die für den jeweiligen Zyklus definierte maximale Zugkraft aufgebracht und in äquidistanten Schritten wieder auf Null reduziert. Die

Spannung bzw. Dehnung der Zugprobe lässt sich aus der Zugkraft und der Querschnittsfläche der Probe berechnen und mit der Geschwindigkeit in Verbindung bringen. Die spannungsabhängige Geschwindigkeitsänderung ist für jede Probe deutlich detektierbar, wobei sich der Messeffekt für die unterschiedlichen Wellenarten stark unterscheidet. Wie in Abbildung 4 zu erkennen, liegt die Änderung der Transversalwellengeschwindigkeiten eine Größenordnung über der der Longitudinalwelle. Am deutlichsten ist der Effekt erwartungsgemäß bei der in Zugrichtung polarisierten Transversalwelle, da diese als Einzige eine Komponente in Spannungsrichtung besitzt. Die für IN718 ermittelten Werte der AEC (Tabelle 3) sowie die daraus folgenden reziproken Vorfaktoren (Tabelle 4) sind vergleichbar mit denen von Stahl [4]. Durch wiederholte Messungen, mit Ankopplung von beiden Seiten der jeweiligen Probe, wurde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse getestet. Die maximale Abweichung der AEC vom Mittelwert beträgt 8 % und spiegelt die momentane Messgenauigkeit des Verfahrens wieder.

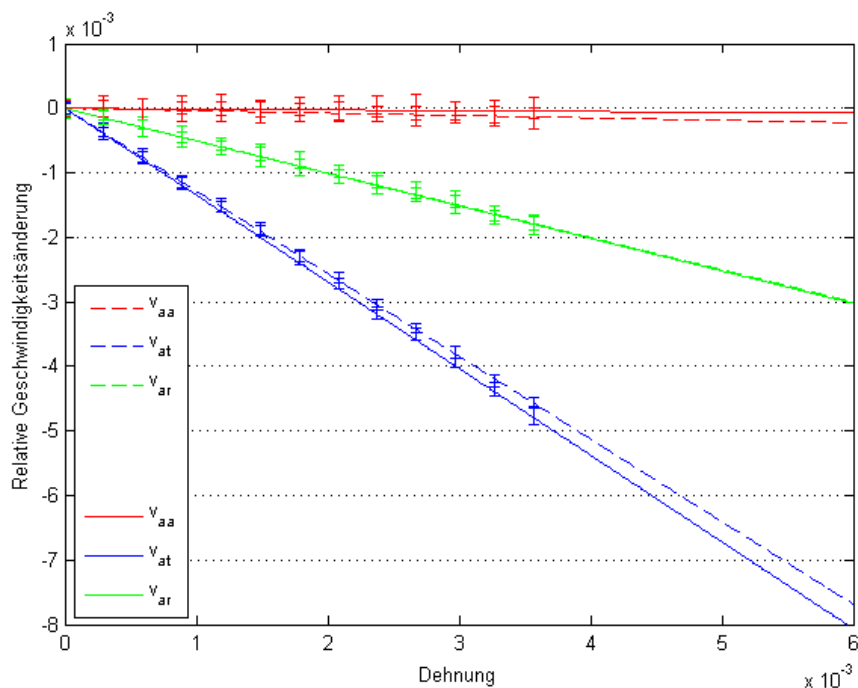


Abbildung 4. Relative Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit von der elastischen Dehnung - Messung von der Vorderseite (3a, gestrichelt) und von der Rückseite (3b, durchgezogen) der Probe 3.

Im Rahmen der Messgenauigkeit sind auch die berechneten TOEC und reziproken Vorfaktoren C/A , K/F und K/H , welche in Tabelle 4 aufgeführt sind, an derselben Probe reproduzierbar. C/A steht für den Einfluss einer in Ausbreitungsrichtung wirkenden Spannung auf die Longitudinalwellengeschwindigkeit. K/F und K/H beschreiben den Einfluss einer vertikal zur Ausbreitungsrichtung wirkenden Spannung auf die Geschwindigkeiten der quer bzw. längs zur Spannungsrichtung polarisierten Transversalwellen.

Tabelle 3. Übersicht der ermittelten AEC

Messung	1	2	3a	3b	4a	4b	4c	5	6a	6b
AEC_{ii} (long)	-0.05	0.04	-0.04	-0.01	-0.10	-0.08	-0.04	0.10	-0.07	-0.02
AEC_{ik} (trans \perp)	-0.60	-0.72	-0.50	-0.50	-0.44	-0.51	-0.46	-0.51	-0.38	-0.42
AEC_{ij} (trans \parallel)	-1.07	-1.32	-1.28	-1.34	-1.11	-1.18	-1.18	-1.54	-1.20	-1.11

Table 4. Übersicht der berechneten reziproken Vorfaktoren

Messung	1	2	3a	3b	4a	4b	4c	5	6a	6b
C/A	-97	-73	-79	-74	-96	-87	-90	-64	-89	-100
K/H	-193	-157	-162	-154	-187	-175	-176	-134	-173	-186
K/F	-343	-287	-414	-411	-467	-408	-446	-406	-541	-498

Aus den Größen C/A und K/H lassen sich keine Aussagen bezüglich des Texturzustandes der Proben herleiten, da die Werte innerhalb der Messgenauigkeit variieren. Der weniger sensitive Parameter K/F hingegen zeigt signifikante Abweichungen der Werte der texturierten Proben 1, 2 und 6 vom materialspezifischen Mittelwert. Betrachtet man die plastisch verformte Probe 5, so ist eine deutliche Verringerung von C/A und K/H erkennbar, nicht jedoch von K/F. Ein Vergleich der - bezüglich Orientierung und Texturzustand - ähnlichen Proben 4 und 5 deutet auf eine Erhöhung der Sensitivität auf Spannungsänderungen im plastisch verformten Material hin, wobei auch die unterschiedliche Wärmebehandlung der Proben nicht unberücksichtigt bleiben darf.

5.2 Ermittlung von Gefügeeinflüssen an Quaderproben

Für zusätzliche Erkenntnisse hinsichtlich des Gefügeeinflusses auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Signalqualität werden Messungen an Quaderproben durchgeführt. Pro Quader erhält man neun Geschwindigkeitswerte, die in Tabelle 5 als relative Abweichung von den Werten des Referenzquaders Q2, angegeben sind. Die im einzigen texturierten Quader Q1 gemessenen Geschwindigkeiten mit axialen Komponenten weichen um mehr als 0.5 % von den Referenzwerten ab. Im Falle einer orthorhombischen Symmetrie sollten die Geschwindigkeiten mit vertauschter Ausbreitungs- und Polarisationsrichtung - z.B. v_{at} und v_{ta} - identisch sein. Die diesbezüglichen Abweichungen in unseren Messdaten sind zum einen der Messgenauigkeit geschuldet, zum anderen stimmen die Texturrichtungen nicht zwangsweise mit denen der Quaderkanten überein.

Table 5. Relative Abweichung der Geschwindigkeiten zu denen von Quader 2

Quader	1	3	7	8	9
v_{ar}	1.65	0.32	-0.07	-1.10	-1.27
v_{ra}	2.20	-0.02	0.06	-1.07	-1.54
v_{at}	-0.65	-0.04	-0.07	-0.90	-0.65
v_{ta}	-0.56	0.01	0.02	-0.54	-5.28
v_{rt}	0.24	-0.02	0.29	-1.34	-1.21
v_{tr}	0.14	-0.21	0.20	-1.42	-6.02

Deutlich ist zudem ein Rückgang aller an den Quadern 8 und 9 gemessenen Geschwindigkeiten erkennbar, der auf die Wärmebehandlungen bei hohen Temperaturen zurückzuführen ist. Der Einfluss auf die Signalqualität bei diesen Quadern wird in Abbildung 5 ersichtlich.

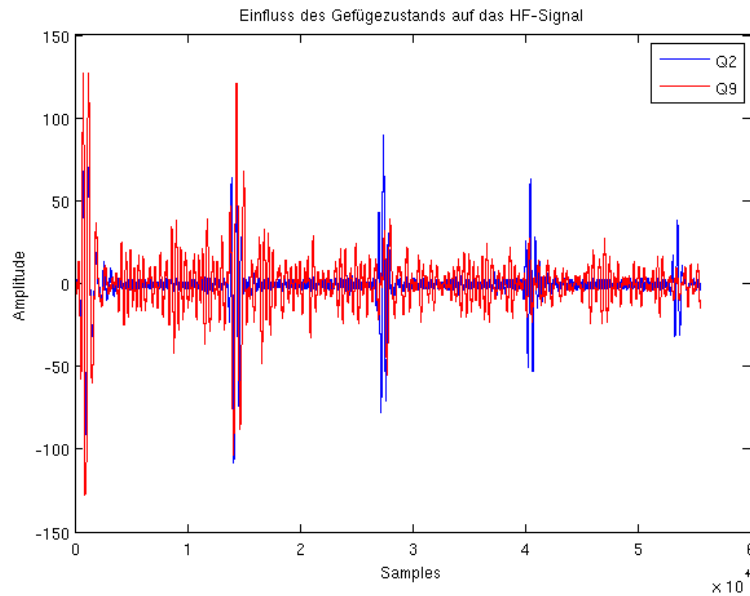


Abbildung 5. Vergleich des HF-Signals von Quader 9 mit dem des Referenzkörpers Quader 2

5.3 Berechnung von Spannungen mittels materialspezifischem Kennwert

Um das Verfahren zur Spannungsmessung mittels Ultraschall an IN718 zu evaluieren, berechnen wir aus den Ultraschalldaten der Zugversuche und einem materialspezifischen Kennwert die Spannungen in den Zugproben. Als repräsentativen Kennwert verwenden wir den Mittelwert des Parameters K/H, unter Ausschluss der Ergebnisse für Probe 5, da K/H sensitiv und texturunabhängig ist. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 6 gegen die aus der Zugkraft ermittelten Spannungen aufgetragen. Die Abweichungen sind, mit Ausnahme der Probe 5, stets kleiner 10 % und somit innerhalb der Messgenauigkeit.

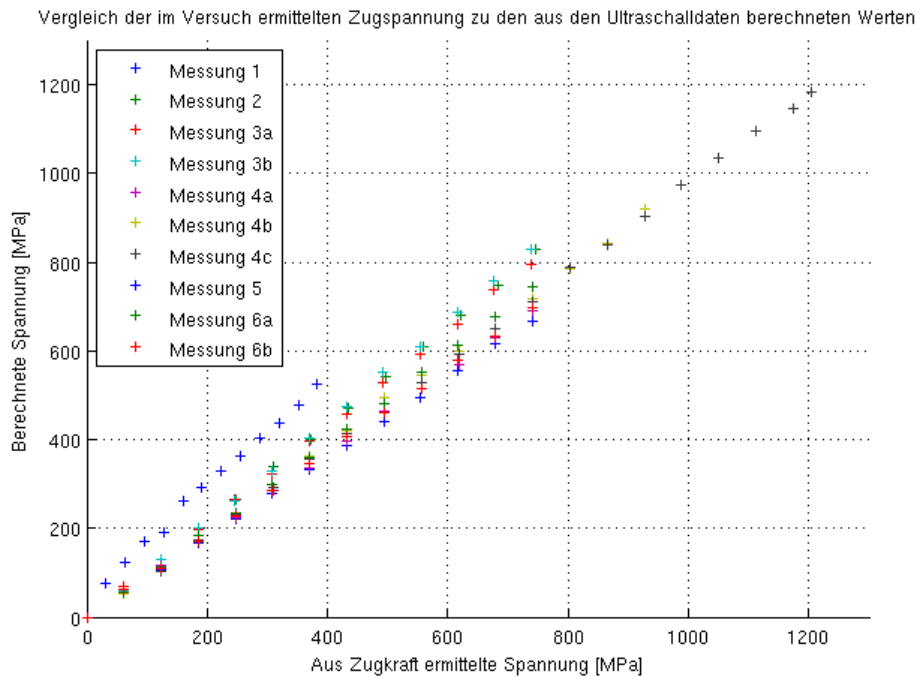


Figure 6. Vergleich der mit einem materialspezifischen Kennwert berechneten Spannungen zu den im Zugversuch ermittelten Spannungen

6. Zusammenfassung

Die an den vorliegenden Proben durchgeführten Messungen belegen den deutlichen Einfluss von Spannungen auf die Ultraschallgeschwindigkeiten im untersuchten Material IN718. Die ermittelten Kennwerte sind mit den Literaturwerten von Stahl vergleichbar [4], woraus das Potential der Spannungsmessung mittels Ultraschall für IN718 ersichtlich wird. Obwohl Textureffekte sowohl an den Zug- als auch Quaderproben festgestellt wurden, konnte ein geeigneter, materialspezifischer Kennwert ermittelt werden. Die mit diesem Kennwert berechneten Spannungen liegen für alle hinsichtlich des Gefügestands vergleichbaren Proben innerhalb der Messgenauigkeit des Verfahrens. Möglichkeiten zur Verbesserung der Messgenauigkeit bieten sowohl die Untersuchung der Ankoppelbedingungen der Ultraschallprüfköpfe, als auch die Betrachtung des Effektes der Querdehnung während der Zugversuche, da beides die Laufzeitmessung beeinflusst. Außerdem sollte untersucht werden, ob Texturinformationen vorteilhaft bei der Spannungsberechnung berücksichtigt werden können.

- [1] J. Esslinger, J. Gabel, W. Smarsly; Zukünftige Anforderungen an Hochtemperaturwerkstoffe im Flugturbinenbau; 27. Vortragsveranstaltung der FVW/FVHT (2004)
- [2] P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia; Residual stress Part 1 - Measurement techniques; Materials Science and Technology, 17, 355-365 (2001)
- [3] F. Längler; Wissensbasierte Automatisierung und kontinuumsmechanische Erweiterung der Ultraschall-Eigenstressanalyse zur Beschreibung des Spannungszustands im gesamten Bauteil; Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken (2007)
- [4] F.E. Schneider; Untersuchung der materialspezifischen Einflüsse und verfahrenstechnische Entwicklungen der Ultraschallverfahren zur Spannungsanalyse an Bauteilen; Dissertation, RWTH Aachen (1999)