

Bestimmung von Werkstoffkennwerte mit dem Ultraschallverfahren – Anwendung auf weitere Werkstoffgruppen

Lothar SPIESS¹, Rene BÖTTCHER¹, Thomas STÜRZEL¹, Gerd TEICHERT²

¹ TU Ilmenau Institut für Werkstofftechnik, Ilmenau

² MFPA Weimar, Prüfzentrum Schicht- und Materialeigenschaften, Ilmenau

Kurzfassung. Zur Erfüllung neuer Anforderungsprofile werden derzeit viele neue Werkstoffe entwickelt. Das betrifft insbesondere Werkstoffe für die Luftfahrt- und Automobilindustrie.

Zur Sicherung einer gleichbleibenden Qualität ist die Bestimmung von mechanischen Werkstoffkennwerten wie Elastizitätsmodul, Gleitmodul und Querkontraktionszahl notwendig. Weiterhin wird eine schnelle Charakterisierung des Werkstoffgefüges gefordert. Diese Kenngrößen sollen möglichst zerstörungsfrei ermittelt werden.

Mit dem Impuls-Echo-Ultraschallverfahren unter Verwendung von Longitudinal- und Transversalprüfköpfen in Verbindung mit einer speziellen Fourierfilterung der Echosignale lassen sich diese Kennwerte sicher bestimmen [1, 2]. Über die Bestimmung der Schallschwächung lassen sich auch qualitative Aussagen zum Gefüge bestimmen.

Dadurch können zerstörende Messungen mit komplizierteren Anforderungen an die Proben, wie beim Zugversuch notwendig, stark einschränken.

Die Messung der Schallgeschwindigkeit erfolgt an verschiedenen Werkstoffen. Das beinhaltet insbesondere Messungen an Stahlguss-Legierungen und Aluminium-Gusslegierungen. Bei den Al-Gusslegierungen wurden erwartete Veränderung der Kennwerte mit dem Programm JMatPro vorab simuliert. Die dabei erwarteten Veränderungen gehen im Fehlerbereich von mechanischen zerstörenden Verfahren unter. Das Ultraschallverfahren konnte dagegen die erwarteten Veränderungen eindeutig bestätigen.

Ein zfP-Verfahren, hinreichend validiert, liefert somit an einfacheren Proben und viel schneller verlässliche mechanische Kennwerte des Werkstoffs.

1. Einführung

Die Messung der Schallgeschwindigkeit und deren Schwächung erlaubt es, Materialparameter des zu untersuchenden Werkstoffs zu bestimmen [1]. In der Messpraxis werden oftmals Vergleiche zwischen zwei Messwerten, z. B. bei der Messung der Schallschwächung, verwendet. Die Dezibelskala erlaubt es, einen Messwert und einen Referenzwert direkt miteinander zu vergleichen und erspart oftmals hohen Rechenaufwand. Der Schalldruckpegel L und die Intensitäten I bzw. I_0 sind über Gleichung 1 verknüpft.

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} [\text{dB}] = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} [\text{dB}] \quad (1)$$

Die Schallgeschwindigkeit c einer jeden Welle lässt sich mit der Frequenz f und Wellenlänge λ bestimmen, Gleichung 2:

$$c = f \cdot \lambda \quad (2)$$

Die Schallgeschwindigkeit beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Zustandes der Schallwelle [1]. Sowohl Transversal- als auch Longitudinalwellen sind in ihrem Verhalten materialspezifisch, d.h. die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall in einem Werkstoff ausbreitet, ist allein von seinen Materialkonstanten, und die wiederum von der Struktur und dem Gefüge, abhängig. Die Frequenz und die geometrischen Abmessungen spielen keiner Rolle. Daher lassen sich transversale Schallgeschwindigkeit c_T und longitudinale c_L für einen festen Werkstoff aus dem Elastizitätsmodul E (bzw. dem Gleitmodul G), der Massendichte ρ und der Querkontraktionszahl μ (Poissonkonstante) bestimmen und umgekehrt. Es ergibt sich stets die Geschwindigkeit aus dem Verhältnis von elastischen zu trägen Eigenschaften [1, 2, 3].

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{mit} \quad G = E \cdot \frac{1}{2(1+\mu)} \quad (4)$$

Es ergibt sich aus den Gleichungen 3 und 4 ein Verhältnis zwischen Transversal- und Longitudinalgeschwindigkeit zu Gleichung 5.

$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \quad (5)$$

Aus diesem Verhältnis geht somit hervor, dass die Transversalgeschwindigkeit stets geringer als die Longitudinalgeschwindigkeit ist [1, 2]. Nimmt man für metallische Werkstoffe eine durchschnittliche Querkontraktionszahl von $\mu = 0,33$ an, so zeigt sich, dass die Longitudinalgeschwindigkeit etwa doppelt so groß ist wie die Transversalgeschwindigkeit.

2. Anwendung auf Aluminium-Gusslegierungen

Im Zuge des Leichtbaus werden derzeit immer mehr spezielle Aluminium-Legierungen getestet, die verbunden mit speziellen Herstellungstechnologien nach dem Herstellungsprozess eine bestimmte Festigkeit und Umformverhalten aufweisen sollen. Kleine Veränderungen in der Legierungskonzentration bewirken oftmals nur geringe Veränderungen der mechanischen Kennwerte.

Man kann solche Veränderungen der Eigenschaften mit dem Simulationstools JMatPro* der Firma SENTE Software Ltd* vorab simulieren. Dies wurde für verschiedene Siliziumkonzentrationen und Mangankonzentration bezüglich des erwarteten E-Moduls, Bild 1b, des Gleitmoduls, Bild 2b, und der Poissonkonstante, Bild 3b, getan [4]. Mittels der oben beschriebenen Ultraschallanalyse wurden an hergestellten Flach-Al-Gussproben die Materialparameter experimentell bestimmt, Bilder 1a - 3a. Aus den Flachproben wurden Zugfestigkeitsproben herausgeschnitten und der E-Modul zerstörend gemessen, Bild 1c.

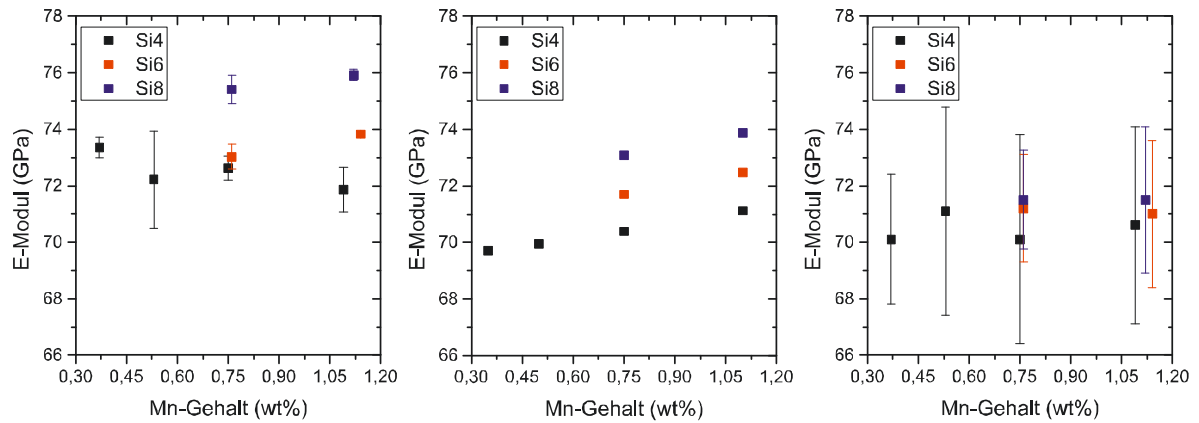


Bild 1: Messung und Simulation des E-Moduls als Funktion des Si-Gehaltes und der Mn-Konzentration
 a) Gemessene Werte aus Ultraschallmessung b) Simulation mit JMatPro
 c) Werte E-Modul gemessen mit Zugversuch

Es wird sehr deutlich, dass die Ultraschallmessungen die Simulationenwerte und die dabei erwarteten, wenn auch kleinen Unterschiede, eindeutig wiedergeben. Der Fehlerbalken beim Zugversuch überdeckt die erwarteten Veränderungen. ZfP-Methoden sind hier wesentlich genauer, flexibler und schneller einsetzbar.

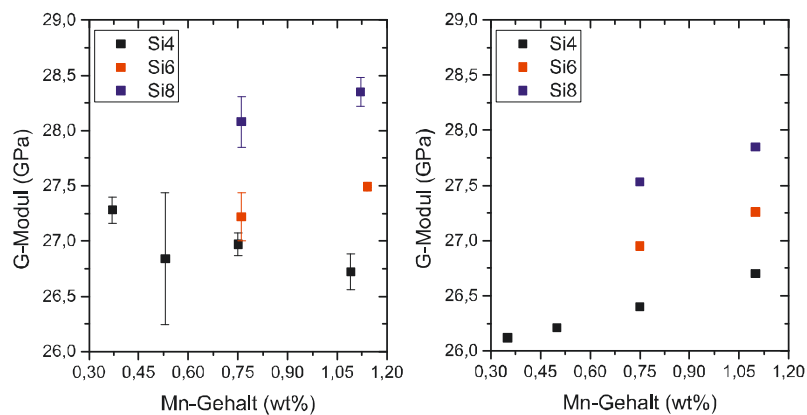


Bild 2: Messung und Simulation des Gleit-Moduls als Funktion des Si-Gehaltes und der Mn-Konzentration
 a) Gemessene Werte aus Ultraschallmessung b) Simulation mit JMatPro

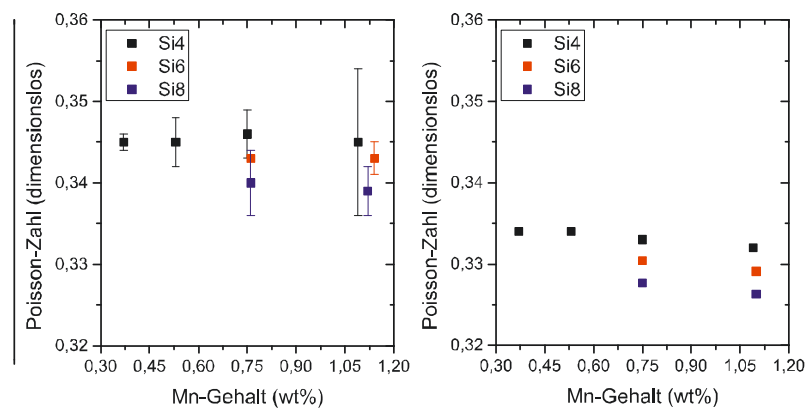


Bild 3: Messung und Simulation der Poissonkonstante als Funktion des Si-Gehaltes und der Mn-Konzentration
 a) Gemessene Werte aus Ultraschallmessung b) Simulation mit JMatPro

3. Anwendung auf Stahl-Gusslegierungen

Stahlgussproben lassen sich allgemein schlecht im Zugversuch prüfen. An einfachen planparallelen Probenabschnitten verschiedener Stahlgußproben wurden die Messungen durchgeführt. Entsprechend den Gleichungen 1-5 wurden die sehr unterschiedlichen Kennwerte, Bild 4, mit wiederum einer sehr hohen Genauigkeit bestimmt.

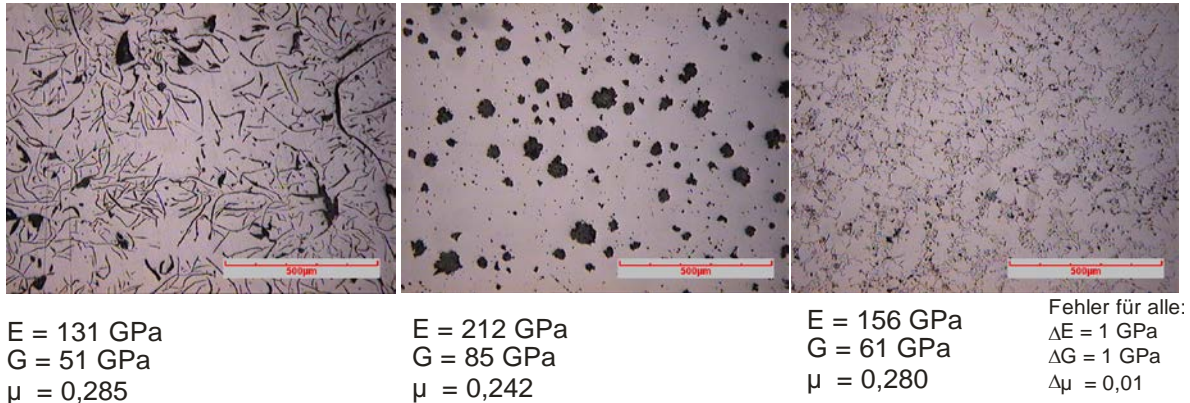


Bild 4: Stahlgussproben mit unterschiedlichem Gefüge und mit Ultraschall ermittelte mechanische Kennwerte a) lamellarer Graphit b) kugelig globularer Graphit c) fein verteilter Graphit

Bestimmt man an diesen Proben bei unterschiedlichen Frequenzen und Wellenarten die Ultraschalldämpfung zwischen 1. und 2. Rückwandecho, dann lassen sich bei Kenntnis von den Metallographiebildern für Serienuntersuchungen sehr schnell und zerstörungsfrei Gussorten unterscheiden. Graphit mit der schlechten Bindung innerhalb der c-Achse, von der Waal Bindung, dämpft Longitudinalwellen sehr stark. Lediglich die Transversalwelle lieferte bei dem Testkörper Rückwandechos, die zur Bestimmung der Dämpfung herangezogen werden können.

Der lamellare Graphit im Stahl dämpft die Durchschallung entsprechend. Ist die Graphitverteilung fein verteilter, können die Wellen den Graphit umlaufen, die Dämpfung wird kleiner. Hier ist der erwartete Dämpfungsverlauf mit größerer Frequenz, die Dämpfung wird größer, ersichtlich. Bei dem grob lamellaren Stahl-Guß und beim globularen Stahl-Guß ist beim Maximum der Dämpfung auf Grund von „Resonanzerscheinungen“ zwischen der Ultraschallwelle und der Größe der Dämpfungsbestandteile eine Abschätzung der Graphitverteilung ableitbar.

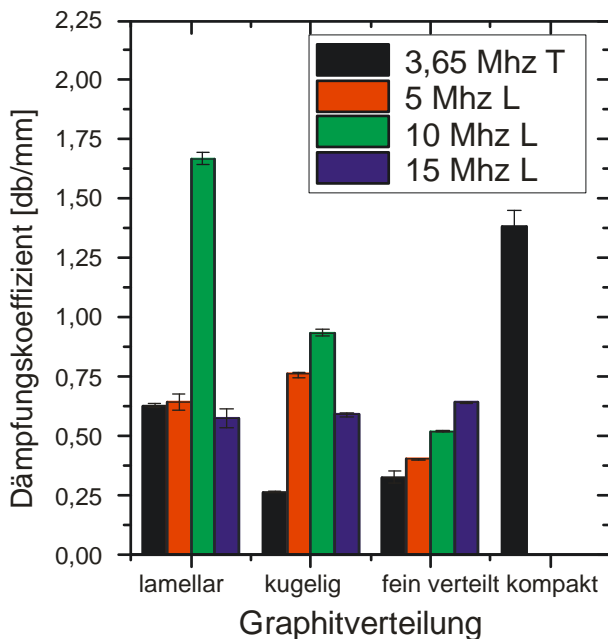


Bild 5: Ermittelte Dämpfung bei unterschiedlichen Frequenzen

4. Zusammenfassung

Mittels zFP-Verfahren lassen, hier Ultraschallmessungen, lassen sich mechanische Materialkennwerte schneller, genauer bei geringen Probenanforderungen, planparallele Stelle bekannter Dicke, bestimmen. Einzige Einschränkung, das Material muss homogen aufgebaut sein. So versagt das Verfahren bei Glasfaserverstärkten Kunststoffen oder bei Schäumen oder auch Holzverstärkten Kunststoffen. Ist eine Durchschallbarkeit gegeben, dann lassen sich die mechanischen Kennwerte sehr schnell und genau bestimmen.

Verwechslungsprüfungen beim Einsatz verschiedener Gußsorten lassen sich über die Dämpfungsmessung relativ einfach gestalten.

Referenzen

- [1] Steeb, S.: Zerstörungsfreie Werkstück- und Werkstoffprüfung: Die gebräuchlichsten Verfahren im Überblick. Renningen: Expert-Verlag, 2011 ISBN 3-8169-2852-8
- [2] Böttcher, R.: Untersuchungen von Dickschichtsystemen mittels Ultraschall (Impuls-Echo-Verfahren) im Wasserbad und Signalverarbeitung mit der Fourieranalyse, Bachelorarbeit TU Ilmenau 2013
- [3] Böttcher, R.; Spieß, L.: Bestimmung von Werkstoffkennwerten mit Ultraschallverfahren ist der „Goldbarren“ echt? DGzFP-Jahrestagung 2014 Potsdam; Tagungsband
- [4] Stürzel, Th.: Einfluss von Silizium und Übergangsmetallen auf Gießbarkeit und mechanische Eigenschaften von Aluminium-Druckgusslegierungen, Masterarbeit TU Ilmenau 2015



Bestimmung von Werkstoffkennwerten mit dem Ultraschallverfahren - Anwendung auf weitere Werkstoffgruppen

R. Böttcher^(*), L. Spieß^(†)

[†] Technische Universität Ilmenau – Institut für Werkstofftechnik, FG Werkstoffe der Elektrotechnik, Postfach 100565, 98684 Ilmenau, Germany
*rene.boettcher@tu-ilmenau.de

Motivation

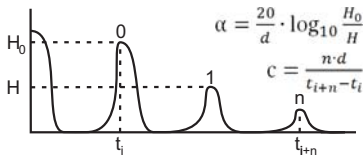
- Bestimmung von mechanischen Materialkennwerten (E, G, μ) mit zerstörenden Verfahren (z.B. Zugversuch) sehr aufwändig
- bei bestimmter Probengeometrie nicht immer möglich
- per Ultraschall (Impuls-Echo-Verfahren) schnell, gut reproduzierbar und an dicken / dünnen Proben Materialkennwertbestimmung durchführbar
- Voraussetzung: eine ebene Fläche ist zugänglich
- Bestimmung der Kennwerte aus der longitudinalen / transversalen Schallgeschwindigkeit: zusätzliche Steigerung der Genauigkeit durch Rauschfilterung mittels Fouriertransformation
 - Steigerung der Genauigkeit der Peaklokalisierung
 - sehr vorteilhaft für Fehlerprüfung und Materialkennwertberechnung

Experimente und Ergebnisse / Schlussfolgerungen

- Messungen der Schallgeschwindigkeit an Vollmaterialproben
- Berechnung der mechanischen Kennwerte verschiedener Materialien aus der gemessenen (longitudinalen bzw. transversalen) Schallgeschwindigkeit
- Gute Übereinstimmung der Messwerte E-Modul, G-Modul und Querkontraktionszahl an Aluminiumlegierungen mit Simulationsprogramm JMatPro und Zugversuch
- Deutlich größere Unsicherheit beim Zugversuch (Standardabweichung etwa doppelt so groß)

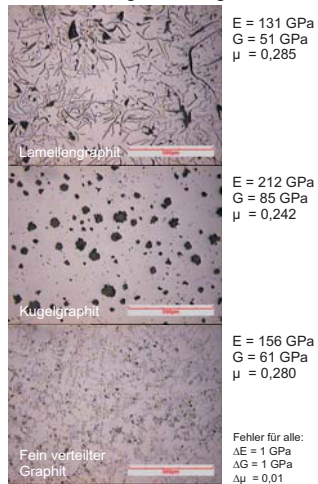
$$E = \rho c_T^2 \cdot \frac{3-4\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2}{1-\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2} \quad G = \rho c_T^2 \quad \mu = \frac{0,5-\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2}{1-\left(\frac{c_T}{c_L}\right)^2}$$

Schallgeschwindigkeit und -schwächung



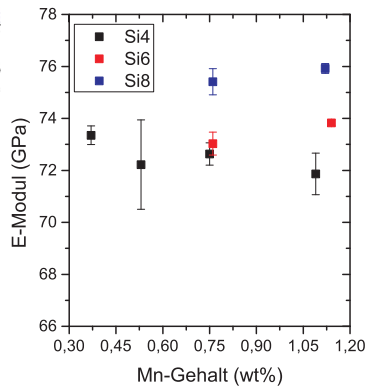
Schallschwächung in Abhängigkeit vom Gefüge

Dämpfung abhängig vom Gefüge und der Verteilung der Gefügebestandteile

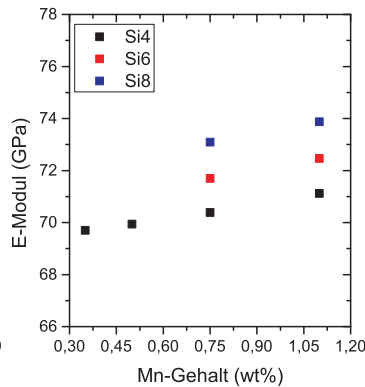


Ermittlung mechanischer Materialkennwerte durch

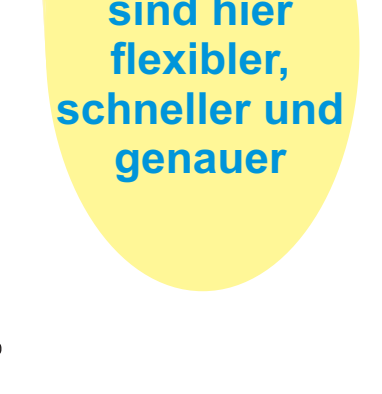
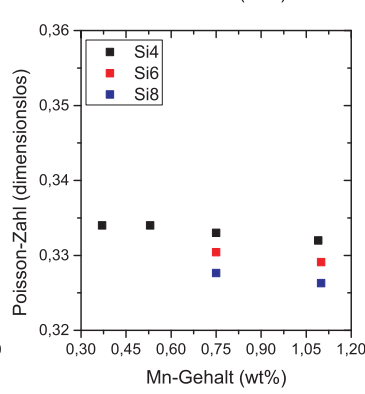
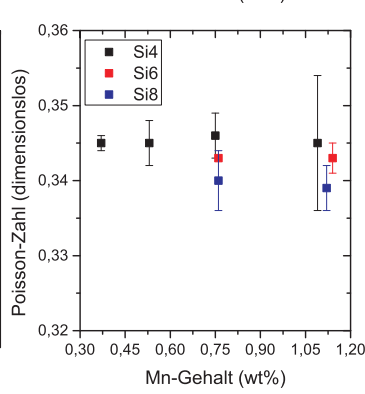
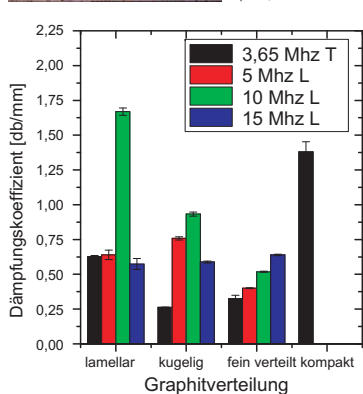
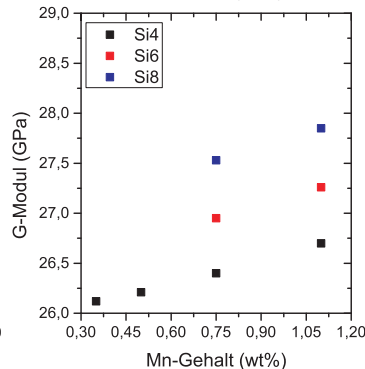
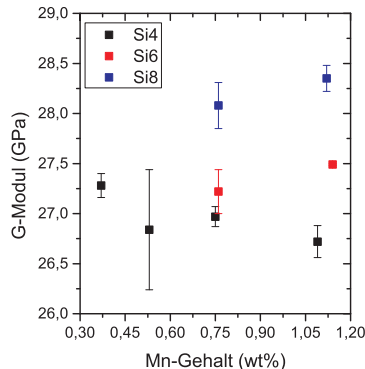
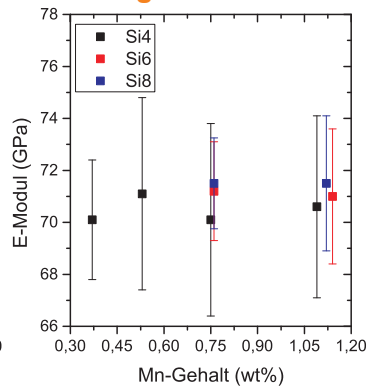
Ultraschall



JMatPro-Simulation



Zugversuch



zFP-Methoden sind hier flexibler, schneller und genauer

Fachgebiet Werkstoffe der Elektrotechnik

Institut für Werkstofftechnik
Institut für Mikro- und Nanotechnologien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Kontakt:
B.Sc. R. Böttcher Mobil: 0151 58755588
Prof. Dr.-Ing. habil. L. Spieß Tel.: 03677 693134
www.tu-ilmenau.de/wt



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
ILMENAU