



## **„Ermittlung des Elastizitätsmoduls an dünnen keramischen und polymeren Leiterplatten“**

erstellt am

**Institut für Struktur- und Funktionskeramik der Montanuniversität  
Leoben**

**Vorgelegt von:**

Lisa Schnur  
m1035007

**Betreuer/Gutachter:**

Priv.-Doz. Dr. Raul Bermejo

Leoben, März 2017

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig und nur unter Verwendung der angeführten Literatur erstellt wurde.

---

Datum

---

Unterschrift

## **DANKSAGUNG**

Ich möchte mich herzlich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik für das freundliche Arbeitsklima bedanken. Besonderer Dank gilt o. Univ. Prof. Dr. Robert Danzer für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Priv.-Doz. Dr. Raul Bermejo, der mir in jeder Situation zur Seite stand, und mich mit seinem umfangreichen Fachwissen stets unterstützte.

Mein Dank gilt auch Herrn ao. Univ. Prof. Dr. Peter Supancic für die anregenden technischen Ideen zur Optimierung der Probenaufhängung für den Zugversuch.

Bei Frau Prof. Dr. Tanja Lube bedanke ich mich für die tollen Ratschläge und Diskussionen zur Thematik dieser Diplomarbeit. Ebenfalls danke ich Dr. Harrer für seine täglichen aufmunternden Worte.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Mag. Dr. Josef Kreith für die „boxtechnischen“ Erläuterungen in jeglicher Hinsicht als auch bei der technischen Umsetzung der Diplomarbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Ing. Roland Binder für die Probenherstellung als auch für die technischen Tüfteleien und der späteren Anfertigung der kardanischen Probenaufhängung.

Weiters danke ich Frau Dipl.-Ing. Irina Kraleva, die mir als Sitznachbarin stets mit motivierenden Worten und tollen Gesprächen den Arbeitsalltag fröhlicher gestaltete.

Der österreichischen Bundesregierung (insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft) vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), und den Ländern Steiermark und Tirol, vertreten durch die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH (SFG) sowie die Standortagentur Tirol, wird für die Förderung im Rahmen des COMET Förderprogramms herzlich gedankt.

Mein größter Dank gilt natürlich meinen Eltern, die mir stets den Rücken stärkten und mir das Studium an der Montanuniversität ermöglicht haben.

## **Kurzfassung**

### **„Ermittlung des Elastizitätsmoduls an dünnen keramischen und polymeren Leiterplatten“**

Leiterplatten sind Bauteilträger für elektronische Systeme, die aus mehreren verschiedenen Werkstoffen aufgebaut sind. Sie dienen der mechanischen Befestigung elektronischer Komponenten und deren elektrischen Verbindung. Bei der Herstellung und/oder Anwendung können generell, aufgrund der Werkstoffkombinationen und deren unterschiedlichen Eigenschaften, elastische Dehnungen (und zufolge mechanische Spannungen) auftreten. Infolgedessen ist die Kenntnis der elastischen Eigenschaften (des Elastizitätsmoduls) dieser Werkstoffe essentiell wichtig, um Vorstellungen über das mechanische Verhalten der Leiterplatte im System zu bekommen.

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die Ermittlung des Elastizitätsmoduls an (realitätsnahen) dünnen keramischen und polymeren Leiterplatten. Zu Beginn wurden unterschiedliche Messmethoden (z.B. 3 Punkt- und 4 Punkt-Biegeversuche) an dünnen und dicken (standardisierten) Referenzproben verglichen. Referenzmaterialien waren Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP) und Aluminium (Al). Anschließend wurden die Versuchsaufbauten für dünne keramische und polymere Leiterplatten adaptiert, wobei die Polymerproben in verschiedenen Richtungen geprüft wurden.

Zusätzlich erfolgten erste Zugversuche an dünnen Proben, die einen reproduzierbaren Versuchsaufbau zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls für komplexe keramische- und polymere Leiterplatte ermöglichen sollten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden als Inputdaten für ein (thermo-mechanisches) FE-Modell im Rahmen eines Industrieprojektes herangezogen.

## **Abstract**

### **"Determination of elastic modulus on thin ceramic and polymer printed circuit boards"**

Printed circuit boards (PCB) are multilayer architectures that are used as substrates for the connection of electronic components. They usually consist of different materials (e.g. polymers, glass fibers, ceramics, metal electrodes) combined in a 3D complex structure. Due to the combination of materials with different properties (e.g. thermal expansion coefficient, elastic constants) significant elastic strains (and consequently mechanical stresses) may occur during the fabrication process and/or in service conditions. Therefore it is essential to know the elastic modulus of the materials involved, in order to assess the mechanical behavior of the PCB within the system.

The aim of this diploma thesis was to determine the elastic modulus on thin ceramic and polymer printed circuit boards. Different methods (i.e. 3 Point-, and 4 Point Bending) were first compared on thin and thick (standard) reference samples. The reference materials employed were Silicon Nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilized Zirconia (Y-TZP) and Aluminium (Al). The testing methodologies were then adapted for thin ceramic and polymer PCB samples; the latter being tested in different orientations.

In addition, preliminary tensile tests were attempted on thin ceramic specimens in order to establish testing protocols that should enable the evaluation of the elastic modulus in complex ceramic and polymer PCBs.

The outcomes of this work shall serve as input data for the Finite Element simulation of thermo-mechanical loading of a microelectronic system, within the framework of an industrial project.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>2 ELASTISCHE EIGENSCHAFTEN VON WERKSTOFFEN .....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Grundlagen der Elastizität .....</i>	<i>5</i>
2.1.1 Spannung .....	5
2.1.2 Dehnung .....	6
2.1.3 Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung: Der Elastizitätsmodul .....	7
2.1.3.1 Kristallographische Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls: isotrop und anisotrop .....	8
2.1.4 Wertebereich des Elastizitätsmoduls .....	9
2.1.5 Unterschied zwischen monolithischen Werkstoffen und Verbundwerkstoffen hinsichtlich des Elastizitätsmoduls .....	10
2.1.5.1 Faserverbundwerkstoffe .....	10
2.1.5.2 Schichtverbundwerkstoffe .....	13
2.2 <i>Erklärungsmodell im atomaren Maßstab .....</i>	<i>14</i>
2.3 <i>Physikalische Grundlage des Elastizitätsmoduls .....</i>	<i>18</i>
2.3.1 Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls .....	19
2.3.2 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Porosität .....	21
2.3.3 Messmethoden zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls (statisch/dynamisch) .....	22
<b>3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>24</b>
3.1 <i>Statische Methoden zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls .....</i>	<i>24</i>
3.1.1 Biegeversuch .....	24
3.1.1.1 3 Punkt-Biegeversuch .....	25
3.1.1.2 4 Punkt-Biegeversuch .....	26
3.1.2 Zugversuch .....	27
3.1.3 Theoretischer Vergleich zwischen den Methoden: 3 Punkt-, 4 Punkt- Biegeversuch und Zugversuch .....	29
3.2 <i>Untersuchte Werkstoffe und Systeme .....</i>	<i>30</i>
3.2.1 Aluminium (Al) .....	31
3.2.2 Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) .....	31
3.2.3 $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP) .....	32
3.2.4 Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) .....	32
3.2.5 Printed Circuit Board (PCB) .....	33
3.3 <i>Probenpräparation und Durchführung der Experimente .....</i>	<i>34</i>
3.3.1 Probenpräparation der zu untersuchenden Werkstoffe .....	34

---

---

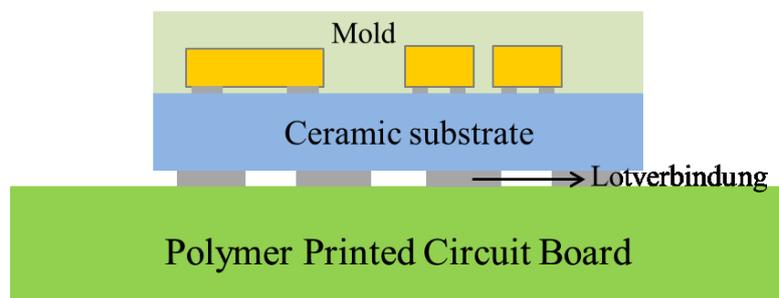
3.3.2	Auswahl der Dehnmessstreifen für 4 Punkt-Biegeversuch und Zugversuch	38
3.3.3	Durchführung des 3 Punkt-Biegeversuches.....	38
3.3.4	Durchführung des 4 Punkt-Biegeversuches.....	41
3.3.5	Durchführung des Zugversuches.....	44
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>49</b>
4.1	<i>Ergebnisse der Durchbiegung (Wegaufnehmer) .....</i>	<i>49</i>
4.1.1	Vergleich der dünnen und dicken Bulkproben mittels 3 Punkt-Biegung.....	49
4.1.2	Vergleich der dünnen quer/ längs geschnittenen Komposite mittels 3 Punkt-Biegung .....	52
4.2	<i>Ergebnisse der relativen Längenänderung (DMS).....</i>	<i>56</i>
4.2.1	Vergleich der dünnen und dicken Bulkproben mittels 4 Punkt-Biegung.....	56
4.2.2	Vergleich der dünnen quer/-längs geschnittenen Komposite mittels 4 Punkt-Biegung .....	60
4.3	<i>Ergebnisse des Zugversuchs .....</i>	<i>66</i>
4.3.1	Zugversuch mit Prüfaufbau 1: Schweißdrähte .....	66
4.3.2	Zugversuch mit Prüfaufbau 2: Schweißdraht und Schnur .....	67
4.3.3	Zugversuch mit Prüfaufbau 3: Schnüre .....	68
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>72</b>
6.1	<i>Abkürzungsverzeichnis .....</i>	<i>75</i>
<b>ANHANG A</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>

---

# 1 Einleitung

In der heutigen Zeit ist nahezu jedes elektronische Gerät mit einer oder mehreren Leiterplatten versehen. Von Mobiltelefonen, WLAN-, Bluetooth- oder RADAR-Antennen bis hin zur biomedizinischen Sensoren und Geräten kommen Leiterplatten im alltäglichen Leben zum Einsatz. Leiterplatten (englisch: [printed circuit board, PCB]) sind sogenannte Schaltungsträger für elektronische Bauteile. Sie dienen der mechanischen Befestigung der elektronischen Komponenten und deren elektrischen Verbindung. Einfache Leitplatten sind aus einem elektrisch isolierenden Trägermaterial (Basismaterial) mit daran haftenden, leitenden Verbindungen (Leiterbahnen) aufgebaut. Früher bestand das Basismaterial meist aus Pertinax, wobei es sich um Phenolharz mit Papierfasern, sog. Hartpapier (Materialkennung FR2) handelte. Heutzutage werden üblicherweise mit Epoxidharz getränkte Glasfasermatten (Materialkennung FR4) verwendet. Die bessere Kriechstromfestigkeit und günstigeren Hochfrequenzeigenschaften sowie eine geringere Wasseraufnahme als Hartpapier sind dabei vorteilhaft. Für Spezialanwendungen werden auch andere Materialien, wie beispielsweise Teflon, Aluminium oder sogar Keramik in LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) und HTCC (High Temperature Co-fired Ceramic) für Hochfrequenzanwendungen eingesetzt [1],[2],[3],[4].

In manchen Fällen bestehen elektronische Systeme aus mehreren Leiterplatten, die miteinander durch Lotverbindungen verbunden sind (Abbildung 1). Bei der Herstellung und/oder Anwendung solcher Systeme können, aufgrund von Werkstoffkombinationen und deren unterschiedlichen Eigenschaften, elastischen Dehnungen bzw. mechanische Spannungen auftreten. Infolgedessen ist es wichtig die elastischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul) dieser Werkstoffe zu kennen, um Vorstellungen über das mechanische Verhalten der Leiterplatte im System zu bekommen.



**Abbildung 1:** Skizze eines elektronischen Systems auf Basis von der Kombination eines dünnen Polymerleiterplatte und eines keramischen Substrat.

Die Anforderungen des zukünftigen Marktes nach immer kleineren elektronischen Bauteilsystemen und komplexeren Systemen haben zur Entwicklung von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen, die auch im Inneren integriert werden können, bzw. zur Miniaturisierung der Leiterplatten mit immer kleiner werdenden Dicken

geführt [2]. Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Ermittlung des Elastizitätsmoduls mittels statischer Messmethoden, um das elastische Verhalten von dünnen keramischen und polymeren Leiterplatten zu charakterisieren.

Die Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und experimentellen Teil.

Der theoretische Teil befasst sich mit der Beschreibung des Elastizitätsmoduls in unterschiedlichen Werkstoffen. Wegen der Tatsache, dass in dieser Diplomarbeit nicht nur isotrope (monolithische) Werkstoffe sondern auch anisotrope Verbundwerkstoffe experimentell untersucht wurden, werden auch die Begriffe Isotropie und Anisotropie erläutert. Ein kurzer Einblick wird ebenso in Hinsicht auf Faser- und Schichtverbundwerkstoffe ermöglicht. Abschließend werden die verwendeten statischen Messmethoden, als auch, die zur Vervollständigung der Thematik, dynamische Messmethoden zur möglichen Ermittlung des Elastizitätsmoduls angeführt.

Beim experimentellen Teil handelt es sich um die Beschreibung und Entwicklung der angewendeten statischen Methoden, wie des 3 Punkt-, 4 Punkt-Biegeversuches und des Zugversuches. Die dabei untersuchten Werkstoffe Aluminium (Al), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP) und die keramischen Kompositen, sogenannte LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) und die polymeren PCB (Printed Circuits Board) werden ebenfalls einzeln erläutert. Abschließend wird die praktische Durchführung der zuvor erklärten Messmethoden detailliert beschrieben, wie die Herangehensweise zur Beseitigung etwaiger Fehlerquellen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die dünnen Referenzproben ähnliche Elastizitätsmodule ergeben wie die E-Module der standardisierten dicken Referenzproben. Die Messergebnisse werden innerhalb einer Messmethode verglichen. Die Gegenüberstellung der Methoden untereinander weisen geringfügige Abweichungen auf. Bei den experimentellen Versuchen konnte bei den polymeren Leiterplatten die Vorzugsrichtung der Fasern im Material gemessen werden. Diese hat Auswirkungen auf die Steifigkeit des Materialsystems, wie auch die Applikation der Dehnmessstreifen in den 4 Punkt-Biegeversuchen. Dieses Verhalten tritt bei den keramischen Leiterplatten und Referenzproben nicht auf.

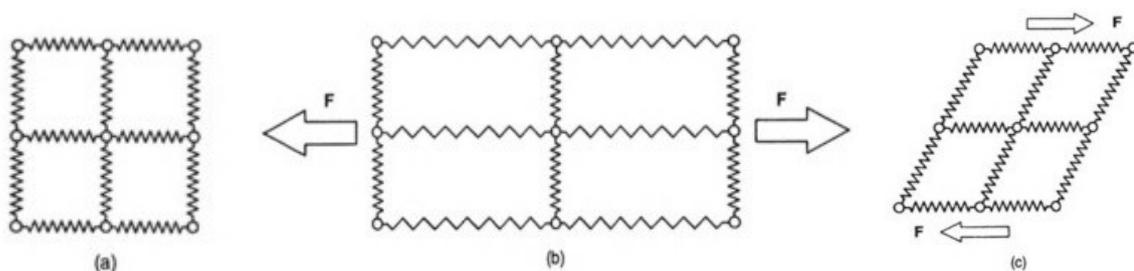
Die Ergebnisse dieser Arbeit werden als Inputdaten für ein (thermo-mechanisches) FE-Modell im Rahmen eines Industrieprojektes herangezogen.

---

## 2 Elastische Eigenschaften von Werkstoffen

### 2.1 Grundlagen der Elastizität

Elastizität ist das Vermögen eines Körpers, nach einer durch eine äußere Kraft verursachten Verformung in seinen ursprünglichen Zustand zurückzukehren. Die Verformung und die anschließende Einnahme der ursprünglichen Form werden dann als reversibel bezeichnet [5]. Modelmäßig kann man sich einen Festkörper aus Kugeln (Atome) aufgebaut vorstellen, die durch Federn (Bindungen) miteinander verbunden sind. Greifen äußere Kräfte am Festkörper an, dehnen sich die Federn und es entstehen im Körperinnern Reaktionskräfte, die den äußeren Kräften entgegenwirken. Infolgedessen stellt sich ein Gleichgewicht ein. Diese auf die Oberfläche angreifenden Kräfte führen somit zu *inneren Spannungen*. Die Reaktion eines Festkörpers auf eine äußere Kraft ist jedoch unterschiedlich - je nachdem, ob die Kraft senkrecht (Zug, Druck) oder parallel (Scherung) zur Oberfläche angreift (Abbildung 2). Dabei unterscheidet man zwischen Normalspannungen und Schubspannungen [6],[7].



**Abbildung 2:** Federmodell des elastischen Festkörpers. (a) Gleichgewichtszustand; (b) Dehnung unter Angriff einer Zugspannung; (c) Scherung unter Angriff einer Schubspannung [6].

#### 2.1.1 Spannung

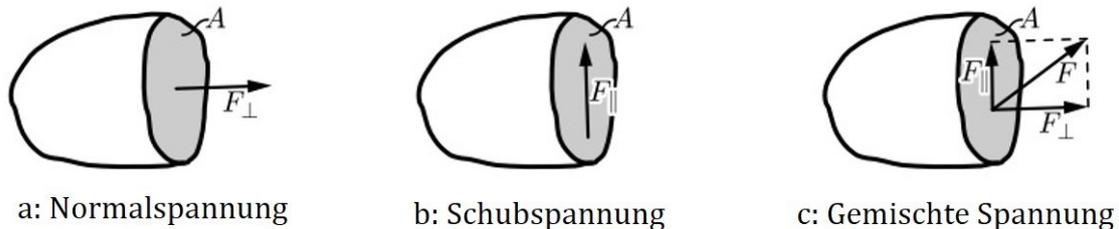
Die Spannung wird als normierte Größe eingeführt. Sie ist definiert als Kraft dividiert durch die Fläche, auf die die Kraft wirkt. Die Spannungen werden wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, nach der Orientierung der Kraft und der Fläche zueinander unterschieden. Steht die Kraft senkrecht zu einer betrachteten Fläche A wird die auftretende Spannung

$$\sigma = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (1)$$

als Normalspannung bezeichnet (Abbildung 3a). Wirkt die Kraft parallel auf die betrachtete Fläche A (Abbildung 3b) spricht man von einer Schubspannung

$$\tau = \frac{F_{\parallel}}{A}. \quad (2)$$

Bei allen anderen Fällen wird die Kraft in einen normal und einen parallel wirkenden Anteil aufgeteilt, so dass gleichzeitig eine Normal- und eine Schubspannung wirken (Abbildung 3c) [8].



**Abbildung 3:** Spannungsmodelle, die je nach Kraftangriffspunkt unterschiedliche Spannungen hervorrufen; (a) Normalspannungen – Kraft steht senkrecht zur Fläche; (b) Schubspannungen – Kraft wirkt parallel zur Fläche; (c) Gemischte Spannungen – Kräfte werden in einen normal und parallel wirkenden Anteil aufgeteilt [8].

### 2.1.2 Dehnung

Die Dehnung ist ein Maß für die relative Längenänderung eines Körpers unter Belastung. Diese Belastung kann durch eine Kraft oder durch eine Temperaturänderung (Wärmeausdehnung) hervorgerufen werden [9]. Möchte man die Verformung eines Bauteils beschreiben, spricht man also von Längenänderungen oder Winkelverzerrungen innerhalb eines Bauteils.

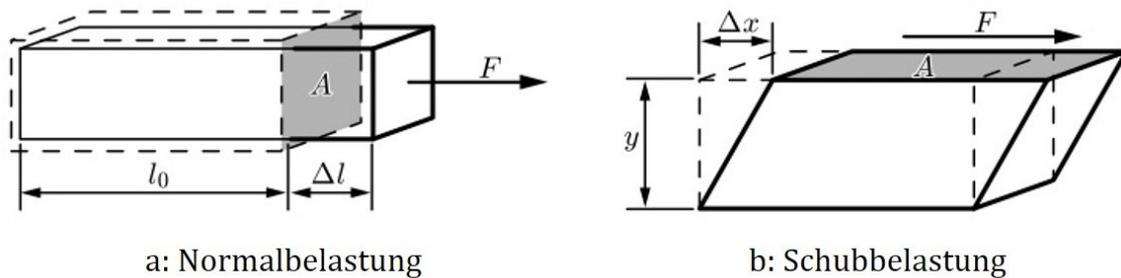
Für Längenänderungen ist die Normaldehnung  $\varepsilon$  definiert als die Differenz  $\Delta l$  bezogen auf die Ausgangslänge  $l_0$  (Abbildung 4a). Die Differenz  $\Delta l$  setzt sich aus der Länge  $l_1$  nach der Verformung und der Ausgangslänge  $l_0$  zusammen.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (3)$$

Für Winkelverzerrungen entspricht die Scherung  $\gamma$ , einer Winkelveränderung eines anfänglich rechten Winkels (Abbildung 4b). Sie ist bei kleine  $\Delta x$  definiert als

$$\gamma = \frac{\Delta x}{y}, \quad (4)$$

wobei  $\Delta x$  und  $y$  senkrecht aufeinander stehen [8].



**Abbildung 4:** Verformung bei der Einwirkung von Normal- und Schubspannungen; (a) Normalbelastung mit Längenänderung  $\Delta l$ ; (b) Schubbelastung mit Verschiebung  $\Delta x$  [8].

### 2.1.3 Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung: Der Elastizitätsmodul

Nach den obigen Erläuterungen können wir nun den Elastizitätsmodul definieren. Dies erfolgt über das Hooke'sche Gesetz, das allerdings nur für kleine Verformungen, die nahezu proportional zur Spannung sind, gültig ist.

Für eine einachsige Beanspruchung (Abbildung 4a) lautet der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung, der durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben werden kann:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (5)$$

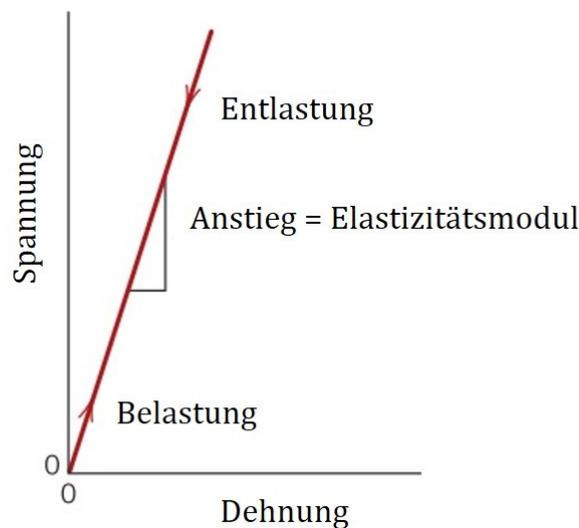
bzw.

$$\frac{F_{\perp}}{A} = E * \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (6)$$

wobei  $\sigma$  für die Spannung,  $\varepsilon$  für die Dehnung und  $E$  für den Elastizitätsmodul steht.

Der Elastizitätsmodul (abgekürzt auch E-Modul genannt) entspricht dabei der Steigung der sogenannten Hooke'schen Gerade in der Spannungs-Dehnungs-Kurve (Abbildung 5) [10]. Dieser Zusammenhang besteht jedoch nur bei elastischer Verformung des Werkstoffes. Unter elastische Verformungen (auch als reversible Verformungen bezeichnet) versteht man die Verformungen, bei denen der Werkstoff beim Entlasten wieder seine ursprüngliche Form annimmt [8]. Der Elastizitätsmodul gilt daher auch als Maß für die Steifigkeit bzw. den Widerstand eines Werkstoffes gegen elastische Verformung [10].

Je größer der E-Modul ist, desto steifer verhält sich der Werkstoff, d.h. desto geringer ist die reversible Verformung bei gleichbleibender Belastungshöhe [8]. Bei der Konstruktion von Bauteilen ist der Elastizitätsmodul eine wichtige Größe zur Berechnung von elastischen Durchbiegungen [10].



**Abbildung 5:** Darstellung der Hooke'schen Gerade zur Erklärung der Linearität der elastischen Verformung während Be- und Entlasten [10].

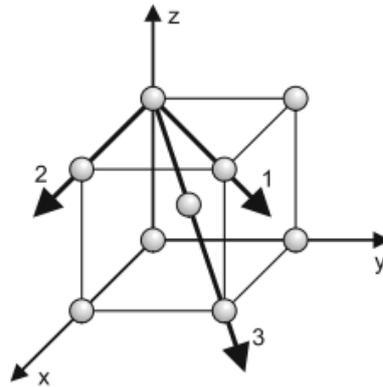
### 2.1.3.1 Kristallographische Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls: isotrop und anisotrop

Die hier verwendete Formulierung des Hooke'schen Gesetzes ist allerdings nur für isotrope Werkstoffe gültig [7]. Als *isotrop* bezeichnet man Werkstoffe, deren physikalische Eigenschaften richtungsunabhängig, d.h. in allen Raumrichtungen gleich sind, während *anisotrop* eine Richtungsabhängigkeit bedeutet [8].

Die Anisotropie wird durch die Symmetrie der Kristallstruktur bestimmt und steigt mit abnehmender Symmetrie an [10]. Die bei Kristallen üblich vorliegende Anisotropie äußert sich im mechanischen Verhalten dadurch, dass bei Einwirken einer Spannung die Verformung in verschiedenen kristallographischen Richtungen unterschiedlich groß ist. Infolgedessen kommt es zu einer Abhängigkeit der elastischen Konstanten von der kristallographischen Orientierung, welche anhand eines Beispiels in Tabelle 1 und Abbildung 6 dargestellt ist [7].

**Tabelle 1:** Abhängigkeit des E-Moduls von der kristallographischen Orientierung für Eiseneinkristalle [7].

Beanspruchung in Kristallrichtung	Elastizitätsmodul E [GPa]
(1)Flächendiagonale <110>	200
(2)Würfelkante <100>	130
(3)Raumdiagonale <111>	280



**Abbildung 6:** Darstellung der Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der kristallographischen Orientierung z.B. für Eisen; wobei (1) für die Flächendiagonale, (2) für die Würfelkante und (3) für die Raumdiagonale steht [11].

Bei polykristallinen Werkstoffen tritt die Orientierungsabhängigkeit der elastischen Konstanten makroskopisch nicht in Erscheinung. Der Grund dafür liegt in der regellosen Anordnung der Kristallite im makroskopischen Gefüge/Bauteil, die dazu führt, dass sich die Anisotropie der Kristallite herausmittelt. Dementsprechend kann das elastische Verhalten durch einen mittleren Elastizitätsmodul beschrieben werden (Tabelle 2). Dabei ist jedoch zu bedenken, dass das Ausgleichen der Anisotropie der einzelnen Kristallite im makroskopischen Bereich über die Korngrenzen erfolgt, aber eine ungleichmäßige Spannungsverteilung in mikroskopischen Bereichen vorliegt [7]. Um den Elastizitätsmodul zu erhöhen können Verbundwerkstoffe verwendet werden, bei denen z.B. Fasern mit einem hohen Elastizitätsmodul in eine Matrix aus einem anderen Material eingebracht werden. Dementsprechend kann es auch hier zu einer Anisotropie kommen, da die verschieden angeordneten Fasern in Belastungsrichtung unterschiedliche Elastizitätsmodule ergeben [8]. Die Verbundwerkstoffe werden in Kapitel 2.1.5 genauer diskutiert.

### 2.1.4 Wertebereich des Elastizitätsmoduls

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Bandbreite der Elastizitätsmodule wichtiger Werkstoffe (Tabelle 2). Die Elastizitätsmodule von Keramiken liegen geringfügig oberhalb jener von Metallen, aber in der gleichen Größenordnung. Die Elastizitätsmodule von Kunststoffen sind deutlich niedriger [8]. Der Diamant führt mit einem Elastizitätsmodul von 1000 GPa die Liste der E-Module an. Die elastische Steifigkeit der meisten Keramiken und Metalle liegen eng beieinander im Bereich von 30–300 GPa. Beton und Zementit schließen diese Gruppe mit ungefähr 45 GPa ab. Im unteren Bereich befinden sich die Kunststoffe mit mehreren Größenordnungen niedrigeren Werten [12].

**Tabelle 2:** Übersicht über den Elastizitätsmodul einiger Werkstoffe [12].

<b>Werkstoff</b>	<b>Zusammensetzung</b>	<b>Elastizitätsmodul E [GPa]</b>
Diamant	C	1000
Wolframcarbid	C	450 - 650
Siliziumcarbid	SiC	430 - 445
Aluminiumoxid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	385 - 392
Siliziumnitrid	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	280 - 310
Zirkonoxid	ZrO <sub>2</sub>	160 - 241
Baustahl	Fe	200
Kupfer	Cu	124
Quarzglas	SiO <sub>2</sub>	94
Aluminium	Al	69
Beton, Zement		30 - 50
Glasfaser (glasfaserverstärktes Epoxidharz)		30 - 45
Epoxidharz	EP	2,6 - 3
Gummi		0,01 – 0,03

### 2.1.5 Unterschied zwischen monolithischen Werkstoffen und Verbundwerkstoffen hinsichtlich des Elastizitätsmoduls

Verbundwerkstoffe zeichnen sich gegenüber den monolithischen Werkstoffen dahingehend aus, dass ihre Eigenschaften auf spezielle Einsatzgebiete maßgeschneidert werden können. Diese Eigenschaften, wie beispielsweise der Elastizitätsmodul können gezielt für die jeweiligen Anforderungen optimiert werden [13]. Verbundwerkstoffe bestehen aus Kombinationen mehrerer Materialien, die eine Vielzahl von möglichen Werkstoffpaarungen ergeben. Metallische, keramische oder Polymermatrixwerkstoffe können jeweils mit unterschiedlichen Fasern, Teilchen oder durch Schichten verstärkt werden. Es werden hier jedoch nur die Faser- und die Schichtverbundwerkstoffe betrachtet [8].

#### 2.1.5.1 Faserverbundwerkstoffe

Die Fasern können ihrerseits, basierend auf ihrer Geometrie, in Kurz-, Lang- und Endlosfasern unterteilt werden. Als Kurzfasern werden Fasern mit einer Länge von weniger als 1 mm bezeichnet, während für Langfasern Längen mit 1 - 50 mm definiert sind. Fasern mit einer noch größeren Länge werden Endlosfasern genannt [8].

### Elastizität von Faserverbundwerkstoffen:

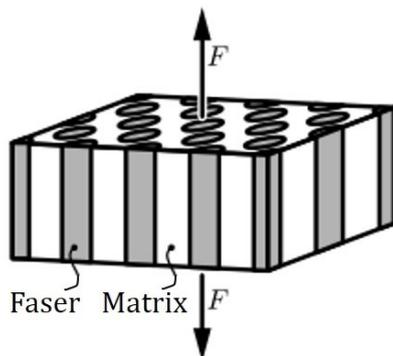
Bei Faserverbundwerkstoffen wird die Steifigkeit durch die Art und den Volumenanteil der eingelagerten Fasern, als auch von der Faserorientierung bestimmt [13]. Der Elastizitätsmodul eines Faserverbundes ergibt sich aus den elastischen Eigenschaften der beteiligten Materialien und hängt dabei auch von der Belastungsrichtung ab. Da die Fasern im Vergleich zur Matrix generell steifer sind, ist der Elastizitätsmodul des Verbundes in Faserrichtung deutlich höher als quer dazu.

Im nächsten Abschnitt wird der Fall von kontinuierlichen uniaxial ausgerichteten Fasern, die exakt parallel oder quer zur Faserrichtung belastet werden, beschrieben [8].

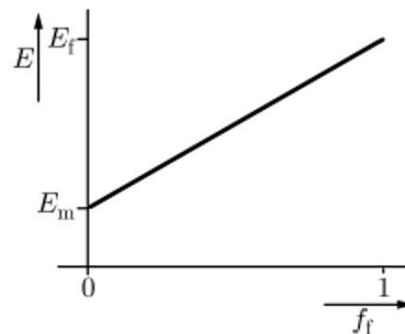
---

Belastung „parallel“ zur Faserrichtung:

Sind die Fasern parallel zur Belastungsrichtung orientiert, so erfahren die Fasern und die Matrix die gleiche Dehnung, jedoch nicht die gleiche Spannung (Abbildung 7a) [8].



a: Anordnung von Faser und Matrix

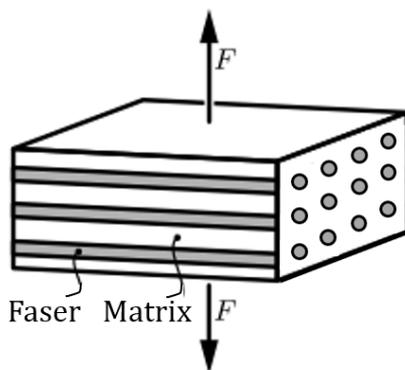


b: Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Faseranteil

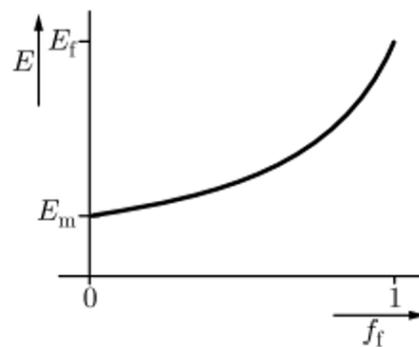
**Abbildung 7:** Darstellung der Abhängigkeiten des Elastizitätsmoduls von (a) der parallelen Anordnung der Fasern in Belastungsrichtung und (b) dem Volumenanteil der Fasern [8].

Belastung „quer“ zur Faserrichtung:

Werden die Fasern quer zu ihrer Ausrichtung belastet, so erfahren die Fasern und die Matrix die gleiche Spannung, jedoch nicht die gleiche Dehnung (Abbildung 8a) [8].



a: Anordnung von Faser und Matrix



b: Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Faseranteil

**Abbildung 8:** Darstellung der Abhängigkeiten des Elastizitätsmoduls von (a) quer angeordneten Fasern in Belastungsrichtung und (b) dem Volumenanteil der Fasern [8].

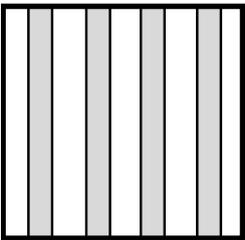
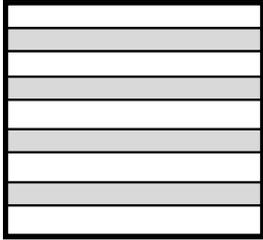
Abbildung 7b und Abbildung 8b zeigen die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Volumenanteil der Fasern in „parallel“ bzw. in „quer“ Ausrichtung. Der Elastizitätsmodul des Verbundes quer zur Faserrichtung ist immer kleiner als parallel dazu. Somit ist die Verstärkung eines Werkstoffes mit langen Fasern, die in Richtung der größten Hauptspannung (uniaxial) ausgerichtet sind, mechanisch besonders vorteilhaft. Aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von Faser und Matrix kommt es nämlich zu Spannungskonzentrationen an den Enden der Faser, da

Spannung von der Matrix auf die Faser übertragen werden muss. Diese Lastübertragung ist umso effizienter, je länger die Fasern sind und je kleiner damit der Einfluss der Spannungskonzentration ist. Deswegen sind die Langfasern den Kurzfasern mechanisch überlegen [8].

**2.1.5.2 Schichtverbundwerkstoffe**

Ein Schichtverbundwerkstoff, auch Laminat genannt, wird aus mehreren Schichten aus mindestens zwei verschiedenen Materialien aufgebaut. Die Schichtverbundwerkstoffe können anhand ihrer Matrixmaterialien, ihrer Verstärkung und den Grenzflächen zwischen Matrix und Verstärkungsphase unterteilt werden. Je nachdem welche Anforderungen an den Schichtverbundwerkstoff gestellt werden, kann man zwischen schwachen und starken Grenzflächen unterscheiden. Die Schichtdicke liegt im Bereich von einigen Mikrometern. Bei der Verstärkungsphase kann es sich um Partikeln, verschieden angeordnete oxidische- und nichtoxidische Fasern und um Whisker (Einkristall) handeln. Als Vorbild dient die Natur, bei der man in Perlmutter oder Muschelschalen einen Schichtaufbau finden kann. In Tabelle 3 sind die Mischungsregeln zu Ermittlung des Elastizitätsmoduls für Verbundwerkstoffe angegeben [14],[15].

**Tabelle 3:** Mischungsregeln für parallelen und seriellen Verbund [14].

<b>MISCHUNGSREGELN</b>	
Paralleler Verbund Iso-strain, longitudinal	Serieller Verbund iso-stress, transverse
$\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_c$ $E_{cl} = E_f * V_f + E_m * V_m$	$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_c$ $E_{ct} = \frac{E_f * E_m}{E_f * V_m + E_m * V_f}$
	

**Abbildung 9:** Darstellung des parallelen und seriellen Verbundes von Schichtverbundwerkstoffen [14].

## 2.2 Erklärungsmodell im atomaren Maßstab

Um Werkstoffeigenschaften wie den Elastizitätsmodul zu verstehen müssen wir die Werkstoffe auf atomarer Ebene betrachten [12]. Diese Betrachtung basiert auf Gedankenmodellen, die experimentell mehrfach bestätigt wurden und die Grundlage für die Vorhersage des Werkstoffverhaltens sind [16]. Von besonderer Bedeutung hinsichtlich der Auswirkungen auf den Elastizitätsmodul sind die Kräfte, die die Atome zusammenhalten (die interatomaren Bindungen).

Diese interatomaren Bindungen gliedern sich in 2 Hauptarten von Bindungen:

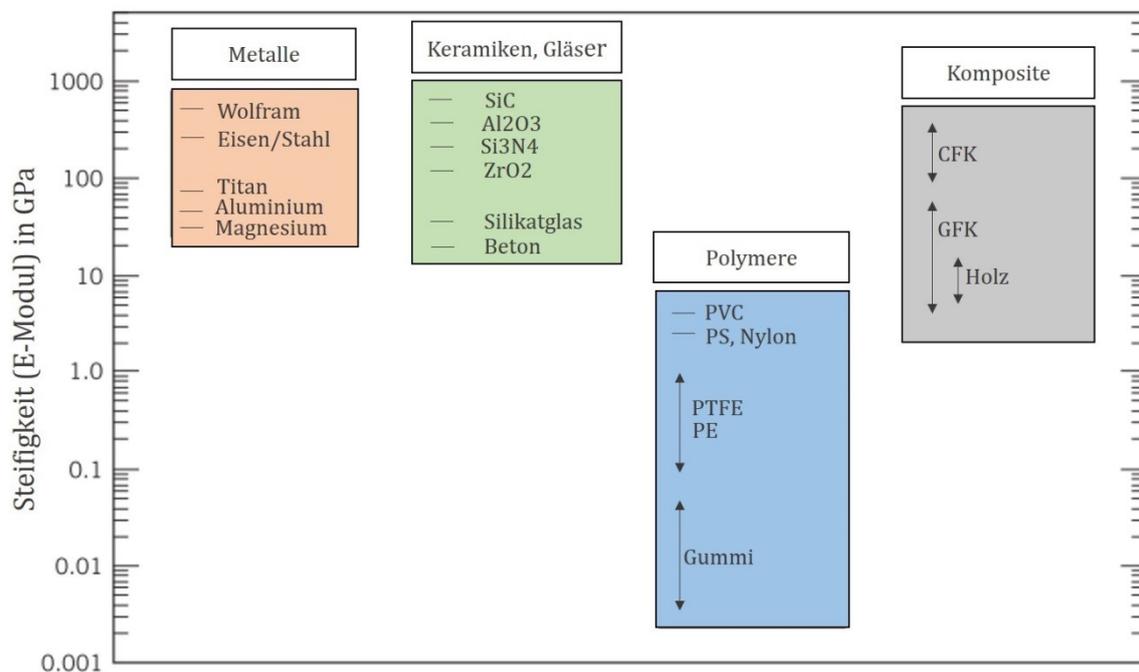
- a) *Primärbindungen*: Ionen-, kovalente oder Metallbindungen
- b) *Sekundärbindungen*: Van-der-Waals-, Wasserstoffbrückenbindungen
- c) *Gemischte Bindungen*: Bindungen, die ein Hybrid dieser einfachen Typen sind

In Tabelle 4 sind die verschiedenen Bindungsenergien aufgelistet, die für die Stärke/Steifigkeit dieser Bindungen verantwortlich sind. Die Primärbindungen zeichnen sich somit durch ihre festen und steifen Bindungen aus (siehe Tabelle 4) und führen zu hohen Elastizitätsmodulen. Sie kommen hauptsächlich in Keramiken und Metallen vor. Bei Keramiken handelt es sich vorwiegend um die Ionenbindung und die kovalente Bindung und die entsprechenden Mischungen davon, während bei Metallen bevorzugt die Metallbindung und die kovalente Bindung auftreten. Die Sekundärbindungen sind im Vergleich zu Primärbindungen wesentlich schwächer (Tabelle 4). Bei Kunststoffen ist die kovalente Bindung verantwortlich für den direkten Zusammenhalt der Atome in der Polymerkette. Die Sekundärbindungen wiederum verbinden die Polymerketten untereinander und beeinflussen die Eigenschaften wesentlich. Diesbezüglich haben Kunststoffe normalerweise nur kleine Elastizitätsmodule (Abbildung 10) [12].

**Tabelle 4:** Gliederung der verschiedenen Bindungsarten anhand ihrer Bindungsenergien [12].

<b>Bindungsart</b>	<b>Bindungsenergie [kJ/mol]</b>
Ionische Bindung (ungerichtet)	600 – 1500
Kovalente Bindung (stark gerichtet)	500 – 1250
Metallische Bindung (ungerichtet)	100 – 800
Van-der-Waals-Bindung	< 50
Wasserstoffbrückenbindung	< 50

Abbildung 10 zeigt den Wertebereich der verschiedenen Werkstoffgruppen bezüglich ihres Elastizitätsmoduls.



**Abbildung 10:** Wertebereich für Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur für verschiedene Werkstoffe (Metalle, Keramiken, Gläser, Polymere und Komposite) [10].

Die verschiedenen Werkstoffgruppen weisen unterschiedliche interatomare Bindungen auf. Die Atome ziehen sich gegenseitig wegen verschiedener physikalischer Mechanismen an. In der Natur wird stets der energetisch günstigste Zustand angestrebt, was zur Folge hätte, dass der Atomabstand zwischen zwei isolierten Atomen gegen null ginge. Dies ist jedoch nicht möglich, da es neben der anziehenden Wechselwirkung noch eine abstoßende Wechselwirkung gibt. Diese beruht – vereinfacht betrachtet – auf der Abstoßung der Elektronenwolken der verschiedenen Atome, die einander nicht durchdringen können. Die abstoßende Wechselwirkung ist aufgrund ihrer geringen Reichweite erst für kleine Atomabstände von Bedeutung. Diese steigt mit abnehmenden Abständen an und ist infolgedessen gegenüber der anziehenden Wechselwirkung dominierend. Dementsprechend stellt sich der Atomabstand  $r$  in einem Atomverbund (z.B. Festkörper) so ein, dass sich ein relativ kleines Potential der Wechselwirkungen zwischen den Atomen ermöglichen lässt [8].

Das Gesamtpotential  $U_N$  ergibt sich durch die gegenseitige Überlappung des abstoßenden Potentials  $U_R$  mit dem anziehenden Potentials  $U_A$ :

$$U_N = U_R + U_A. \quad (7)$$

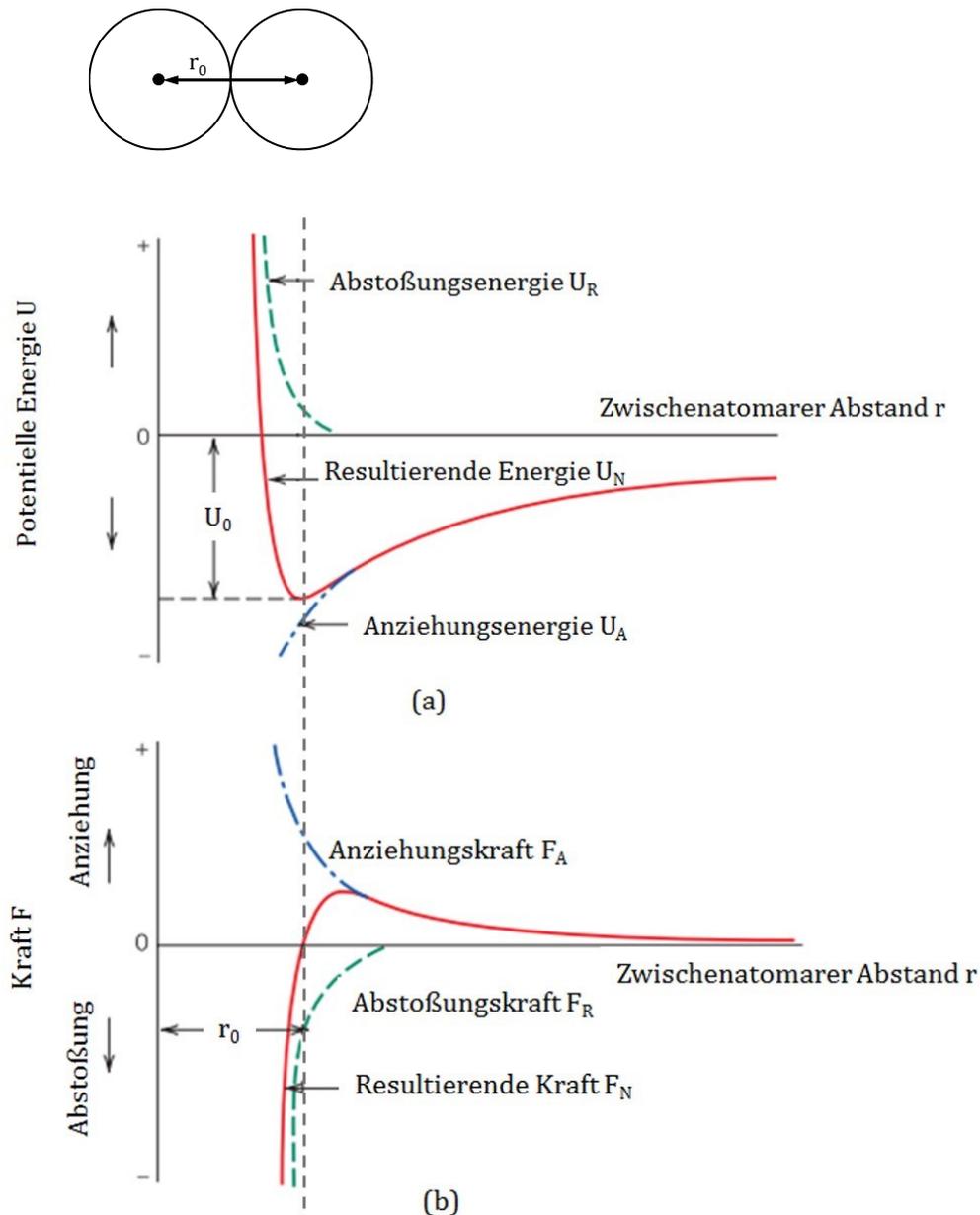
Diese resultierende Kurve (Abbildung 11a) entsprechend der Gleichung (7) setzt sich aus der Summe der Anziehungs- und Abstoßungskurve zusammen, welche ein Minimum im Gleichgewichtsabstand  $r_0$  aufweist [10]. Der Gleichgewichtsabstand  $r_0$  ist der Abstand, bei dem sich die abstoßenden und die anziehenden Potentiale gegenseitig aufheben [6]. Er liegt typischerweise im Bereich von 0,1 nm bis 0,5 nm. Die Potentiale werden aufgrund ihrer Form oft auch als „Potentialtopf“ bezeichnet, in dem sich die Atome befinden [8]. Die Bindungsenergie  $E_0$  der beiden betrachteten Atome ist analog der Energie am Minimum (Abbildung 11a). Sie entspricht der Energie, die zur Trennung der beiden Atome bis ins Unendliche benötigt wird [10].

Ebenfalls können auch die Kräfte zwischen den Atomen angegeben werden, jedoch ist die Betrachtung der Potentiale meist zweckmäßiger (Abbildung 11b). Die Bindungskraft  $F_i$  zwischen den Atomen ergibt sich durch Differenzieren der Potentiale über den interatomaren Abstand  $r$ :

$$F_i = \frac{dU}{dr}. \quad (8)$$

Am Potentialminimum verschwindet die Bindungskraft  $F_i$ , also die erste Ableitung der Energie. Im Fall einer äußeren Beanspruchung kommt zusätzlich zu den vorhandenen inneren Bindungskräften eine weitere Kraft dazu, wodurch sich der Gleichgewichtsabstand  $r_0$  verändert und sich der Werkstoff verformt [8].

---



**Abbildung 11:** (a) Abhängigkeit der abstoßenden, anziehenden und resultierenden potentiellen Bindungsenergie vom Abstand zwischen zwei Atomen (b) Abhängigkeit der abstoßenden, anziehenden und resultierenden Bindungskraft vom Abstand zwischen zwei Atomen [10].

Diese Erläuterungen beschreiben im Wesentlichen nur ein ideales System aus zwei Atomen. Für Festkörper in denen Kräfte und Energien vieler Atome zu berücksichtigen sind, gelten ähnliche komplexere Annahmen. Trotzdem kann jedem eine Bindungsenergie analog  $U_0$  (vgl. Abbildung 11a) zugeordnet werden. Eine große Anzahl an Werkstoffeigenschaften hängen mit der Bindungsenergie  $E_0$ , der Kurvenform und dem Bindungstyp zusammen [10].

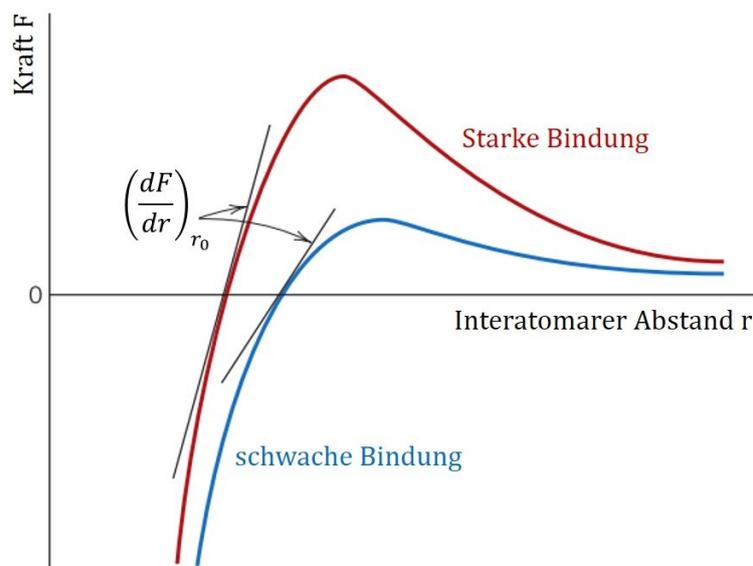
## 2.3 Physikalische Grundlage des Elastizitätsmoduls

Der Elastizitätsmodul hängt von der Form der Potentialkurve ab (Abbildung 12). Makroskopische elastische Dehnungen führen auf atomarer Ebene zu geringfügigen Veränderungen der interatomaren Abstände und somit zu einer Dehnung zwischen den Atomen. Deswegen kann der Elastizitätsmodul als ein Maß für den Widerstand gegen die Trennung benachbarter Atome, d.h. für die interatomaren Bindungskräfte, beschrieben werden.

Der proportionale Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und der Steigung der Kurve, welche die Abhängigkeit der interatomaren Bindungskräfte vom Atomabstand beschreibt, ist in Gleichgewichtslage gegeben als:

$$E \propto \left( \frac{dF}{dr} \right)_{r_0} . \quad (9)$$

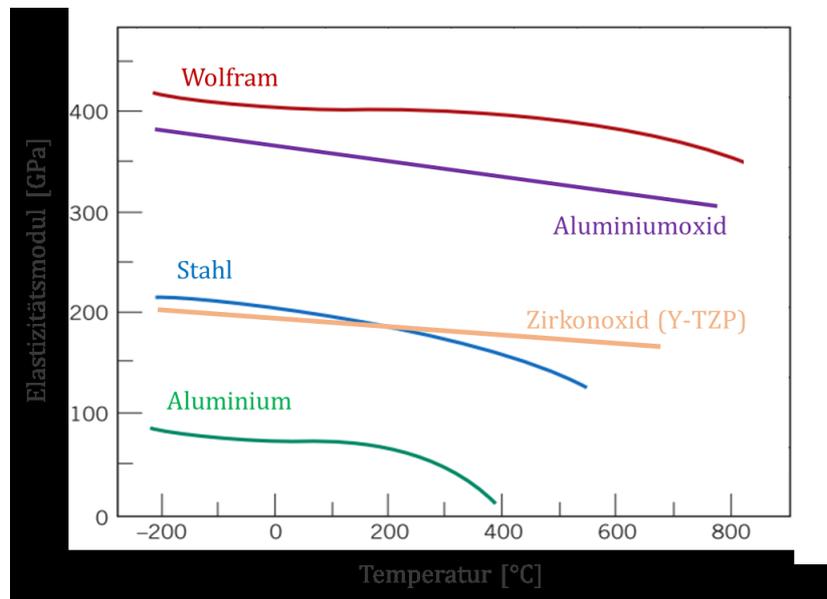
Abbildung 12 zeigt die Bindungskraft als Funktion des interatomaren Abstandes für Werkstoffe mit starken und schwachen Bindungen. Der Anstieg der jeweiligen Kurve wird in der Gleichgewichtslage  $r_0$  angegeben. Bei steifen Werkstoffen ist der Anstieg im Punkt  $r_0$  wesentlich steiler als bei flexiblen Werkstoffen. Infolgedessen lassen sich somit die hohen Elastizitätsmodule von keramischen Werkstoffen und Metallen, wie auch die niedrigen Beträge bei Polymeren erklären (Abbildung 10). In den vorherigen Abschnitten bereits erwähnt, liegt die Ursache dieser Unterschiede in den verschiedenen Bindungsarten dieser drei Werkstoffgruppen [10].



**Abbildung 12:** Abhängigkeit der Bindungskraft vom interatomaren Abstand für schwach und stark gebundene Atome. Der Anstieg der jeweiligen Kurve in der Gleichgewichtslage  $r_0$  gibt den Elastizitätsmodul an [10].

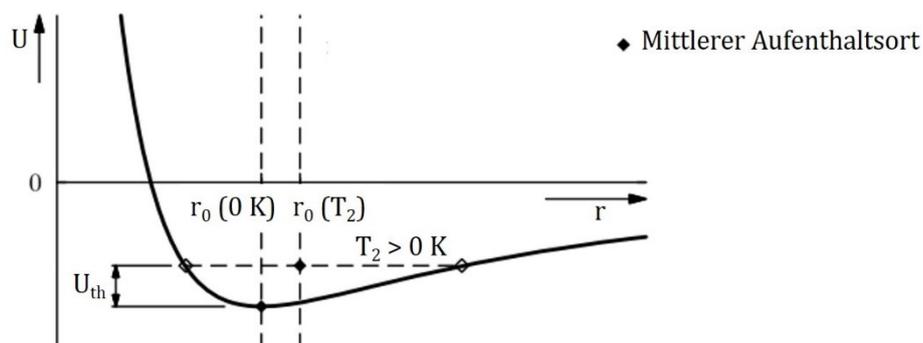
### 2.3.1 Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls

In Abbildung 13 wird die Temperaturabhängigkeit von einigen Metallen und Keramiken wie z.B. Wolfram, Aluminiumoxid, Stahl,  $Y_2O_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP) und Aluminium dargestellt. Der Elastizitätsmodul ist üblicherweise temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur ab (Abbildung 13) [10].



**Abbildung 13:** Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur für die verschiedenen Metalle und Keramiken [10].

Anhand des Bindungsmodells in Abbildung 11 lässt sich die Temperaturabhängigkeit erklären. Eine Erhöhung der Temperatur bewirkt, dass die Atome um ihre Gleichgewichtslage zu schwingen beginnen. Zusätzlich kommt es zu einer Erhöhung der Energie der Atome um den thermischen Betrag  $U_{th}$ . Die Schwingbreite ergibt sich durch die Addition der thermischen Energie mit der Bindungsenergie  $E_0$  im Potentialminimum, wie in Abbildung 14 skizziert [8].



**Abbildung 14:** Darstellung des Wechselwirkungspotentials zweier Atome. Bei Temperaturerhöhung wird die thermische Energie  $U_{th}$  zusätzlich zur Bindungsenergie  $E_0$  am Potentialminimum hinzu addiert. Durch die Asymmetrie der Potentialkurve erhöht sich der mittlere Abstand der Atome [8].

Aufgrund der Tatsache, dass die abstoßende Wechselwirkung im Vergleich zur anziehenden eine kürzere Reichweite aufweist, besitzt die linke Seite des Potentialtopfes eine größere Steigung als die rechte Seite. Die mittlere Entfernung der Atome vergrößert sich also bei der Temperaturerhöhung. Somit erklärt sich der Effekt der thermischen Ausdehnung von Materialien. Infolgedessen befindet sich die mittlere Gleichgewichtslage des Atoms an einer Stelle im Potentialtopf, an der die Steigung der Kurve geringer und somit die Steifigkeit kleiner ist. Dieses einfache Modell stellt einen Zusammenhang zwischen der thermischen Ausdehnung und der Abnahme des Elastizitätsmoduls mit der Temperatur her. Die Gültigkeit dieses Modells wird dadurch bestätigt, dass Metalle, die eine stärkere Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls als Keramiken aufweisen, auch einen größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Die Ursache hierfür ist die größere Bindungslänge der metallischen Bindung im Vergleich zu einer kovalenten Bindung. Der Grund ist, dass bei einer metallischen Bindung die Elektronen an eine Elektronenwolke abgegeben werden und die Energie der Wechselwirkung nicht so stark mit der Entfernung abnimmt, wie bei einer kovalenten Bindung. Diese besteht im Wesentlichen nur aus zwei Atomen. Ebenfalls eine geringe Reichweite besitzt die Ionenbindung, da das elektrische Feld eines Atoms durch die benachbarten, entgegengesetzten geladenen Atome abgeschirmt wird [8].

In diesem Abschnitt wird kurz auf die Temperaturabhängigkeit für *Metalle* und *Keramiken* eingegangen [8]. Bei Polymeren kann es beispielweise zu einer Abnahme des Elastizitätsmoduls um eine Größenordnung kommen [17]. Für typische Einsatztemperaturen  $T$ , die unterhalb der halben Schmelztemperatur  $T_M$  in Kelvin liegen ( $T < 0,5 * T_M$ ), können für Metalle und Keramiken Faustregeln für die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls angegeben werden.

Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von *Metallen* bei einer Temperatur von 0 K, ist:

$$E_M(T) \approx E_M(0 \text{ K}) * \left(1 - 0,5 * \frac{T}{T_m}\right). \quad (10)$$

$E_M(0 \text{ K})$  ist der Elastizitätsmodul des Metalls bei einer Temperatur von 0 K.

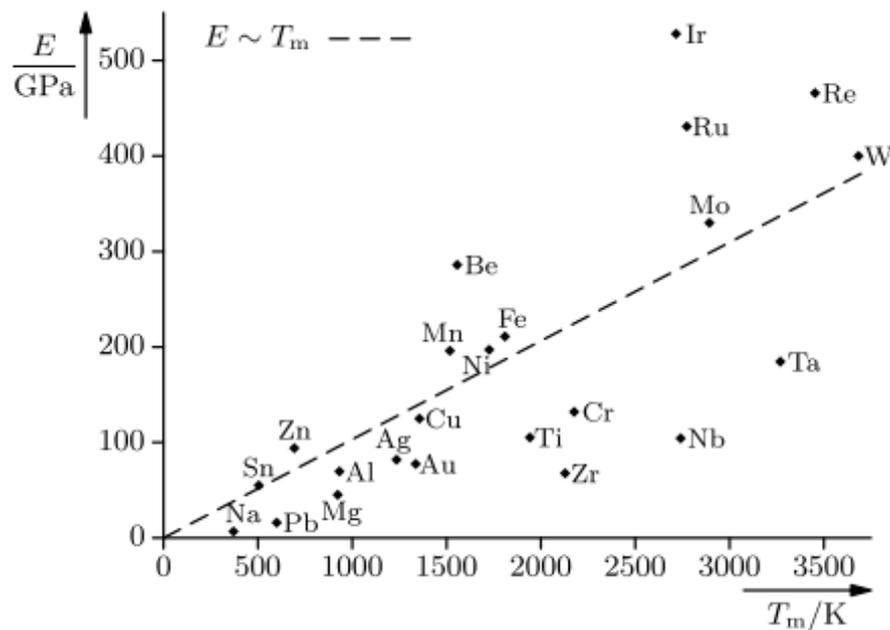
Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von *Keramiken* ist geringer:

$$E_K(T) \approx E_K(0 \text{ K}) * \left(1 - 0,3 * \frac{T}{T_m}\right). \quad (11)$$

$E_K(0 \text{ K})$  ist der Elastizitätsmodul der Keramik bei einer Temperatur von 0 K [8].

---

In Abbildung 15 ist der Elastizitätsmodul als Funktion der Schmelztemperatur aufgetragen.



**Abbildung 15:** Auftragung der Elastizitätsmoduln einiger Metalle über ihre Schmelztemperaturen [8].

Als Faustregel kann angegeben werden, dass innerhalb einer Werkstoffklasse der Elastizitätsmodul grob proportional zur Schmelztemperatur ist [8]:

$$E \sim T_m . \quad (12)$$

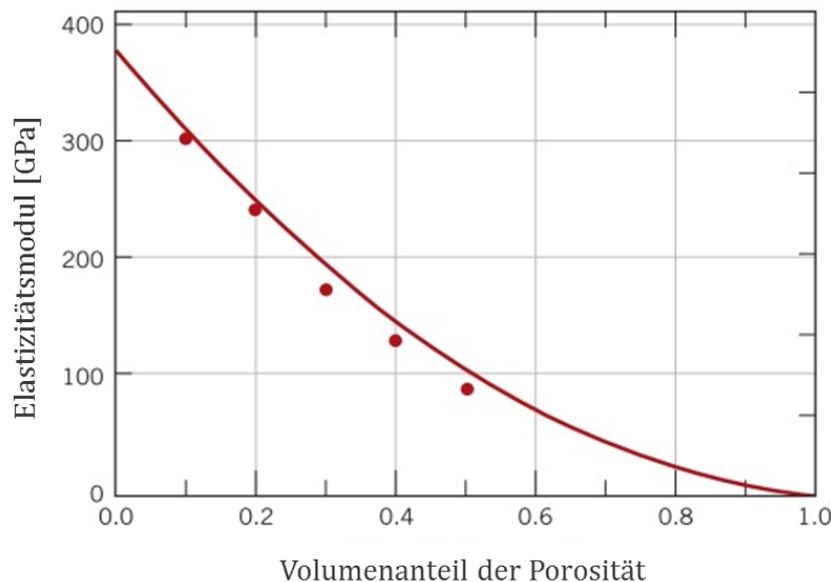
### 2.3.2 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Porosität

Der Einfluss der Porosität auf den Elastizitätsmodul ist bei keramischen Werkstoffen, besonders relevant. Während der Formgebung entstehen zwischen den Pulverpartikeln Poren oder Zwischenräume, die größtenteils bei der darauffolgenden Wärmebehandlung (Sintern) eliminiert werden. Eine geringe Restporosität kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Die Porosität verschlechtert die elastischen Eigenschaften und Festigkeiten des Werkstoffes zusehends. Der Elastizitätsmodul von Keramiken verringert sich mit steigender Porosität entsprechend der folgenden Beziehung [10],[18]:

$$E = E_0 * (1 - 1,9P + 0,9P^2) , \quad (13)$$

wobei  $E$  der Elastizitätsmodul [GPa] des porösen Materials ist,  $E_0$  der Elastizitätsmodul [GPa] des dichten Werkstoffes und  $P$  für die Porosität [-] steht.

In Abbildung 16 ist die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Porosität des Werkstoffes Aluminiumoxid bei Raumtemperatur entsprechend der Gleichung (13) dargestellt.



**Abbildung 16:** Einfluss der Porosität auf den Elastizitätsmodul des Werkstoffes Aluminiumoxid bei Raumtemperatur [10].

### 2.3.3 Messmethoden zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls (statisch/dynamisch)

Bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls wird grundsätzlich zwischen statischen und dynamischen Messmethoden unterschieden. Zu den statischen Methoden zählen der Biege-, Zug-, Druckversuch und das Eindruckverfahren. Der Biegeversuch und Zugversuch werden in Kapitel 3 genauer erläutert. Der *Druckversuch* ist die Umkehrung des Zugversuches mit entgegengesetzter Krafrichtung. Beim Druckversuch werden zylindrische Druckproben mit dem Anfangsquerschnitt  $S_0$  und Anfangslänge  $L_0$  durch eine einachsige, homogene Druckbeanspruchung gestaucht und die dabei erforderliche Druckkraft gemessen [19]. Die während des Versuches aufgenommene geometrieabhängige Kraft-Weg-Kurve wird durch den Bezug der Kraft auf den Anfangsquerschnitt  $S_0$  und der Stauchung auf die Anfangslänge  $L_0$  geometrieunabhängig. Entsprechend dieser Umrechnung erhält man eine Druckspannungs-Stauchungs-Kurve aus dieser man über die Steigung den Elastizitätsmodul (Hooke'sche Gesetz) errechnen kann [20]. Beim *Eindruckverfahren* wiederum wird mit Hilfe von Mikroindrücken der Elastizitätsmodul bestimmt. Dabei wird die auf die Probe einwirkende Kraft und die daraus ergebende Eindringtiefe bei Belastung und Entlastung kontinuierlich registriert. Es entsteht eine Last-Eindring-Kurve, bei der am Beginn der Entlastung aus der Steigung der Elastizitätsmodul ermittelt werden kann.

Bei den dynamischen Messmethoden wird der Elastizitätsmodul durch Resonanzfrequenzmessungen (stehende Wellen) oder Laufzeitmessungen von Ultraschallimpulsen (laufende Wellen) ermittelt. Dabei handelt es sich beim *Resonanzverfahren* um ein Messverfahren, bei dem die zu prüfende Probe zu Eigenschwingungen angeregt wird und aus den dazugehörigen Frequenzen der Elastizitätsmodul bestimmt wird. Zum Vergleich werden beim *Ultraschallverfahren* zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls die Geschwindigkeiten, mit denen sich Longitudinal- und Scherwellen in dem zu untersuchenden Werkstoff fortpflanzen, berechnet.

Die dynamischen Verfahren messen im Gegensatz zu den statischen keine Spannungen und Dehnungen, sondern sie nutzen die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von den elastische Eigenschaften und der Dichte aus. Die Dichte des Werkstoffes muss dafür bekannt sein. Bei den aufgezählten Prüfverfahren werden homogene Werkstoffe mit linearelastischem Verhalten vorausgesetzt. Beim Ultraschallverfahren müssen die Werkstoffe zusätzlich dazu isotrope elastische Eigenschaften besitzen [21].

## 3 Experimentelle Untersuchungen

In dieser Diplomarbeit liegt der Fokus auf der Ermittlung des Elastizitätsmoduls mit Hilfe von statischen Methoden. In Kapitel 4 werden außerdem die Ergebnisse der statischen Methoden mit bereits vorhandenen dynamischen Messmethoden verglichen.

### 3.1 Statische Methoden zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls

Die nachfolgenden Methoden gliedern sich in Biegeversuch und Zugversuch. Der Biegeversuch wird zusätzlich in 3 Punkt- und 4 Punkt-Biegeversuch unterteilt.

#### 3.1.1 Biegeversuch

Der Biegeversuch ist ein einachsiger Verformungsversuch mit inhomogener Spannungs- und Dehnungsverteilung über den Probenquerschnitt [22]. Er gibt Auskunft über das Verhalten eines Werkstoffes bei Biegebeanspruchung. Dabei wird ein Probestab mit rechteckigem oder rundem Querschnitt auf zwei Auflager gelegt und in der Mitte durch eine Einzelkraft oder durch zwei gleiche Einzelkräfte auf Biegung beansprucht (vgl. 3 Punkt- und 4 Punkt-Biegeversuch). Wird ein Probestab wie zuvor beschrieben belastet, kommt es zu einer Durchbiegung  $f$ , die an der Oberseite der Probe Druckspannungen und an der Unterseite Zugspannungen erzeugt (Abbildung 17) [20].

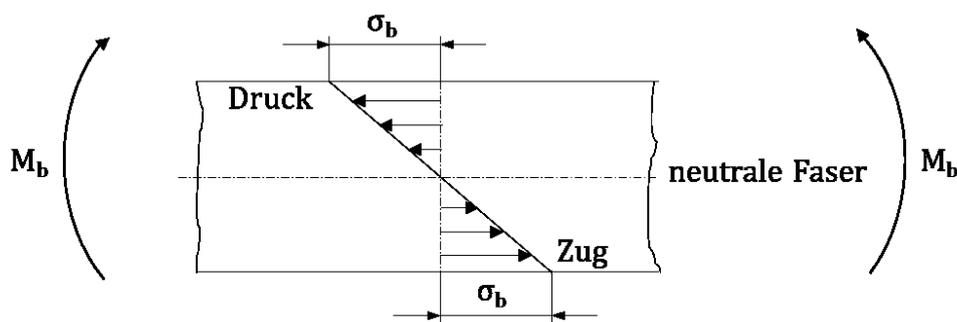


Abbildung 17: Elastische lineare Spannungsverteilung beim Biegeversuch [20].

Im elastischen Fall erfolgt eine lineare Spannungsverteilung zwischen Oberseite und Unterseite der Probe (Abbildung 17). Bei symmetrischem Querschnitt tritt in der Mitte der Probe ein Bereich auf, in dem keine Spannungen wirken, dieser wird als neutrale Faser bezeichnet. Die Spannungsverteilung in der Probe ist abhängig davon, ob die Biegung rein elastisch ist, oder ob plastische Verformungen auftreten. Bei rein elastischer Biegung sind die Spannungen proportional zu den auftretenden Dehnungen (Streckungen) und Stauchungen (Hooke'sches Gesetz). Die erzeugten Spannungen sind ebenfalls proportional zum Abstand der neutralen Faser.

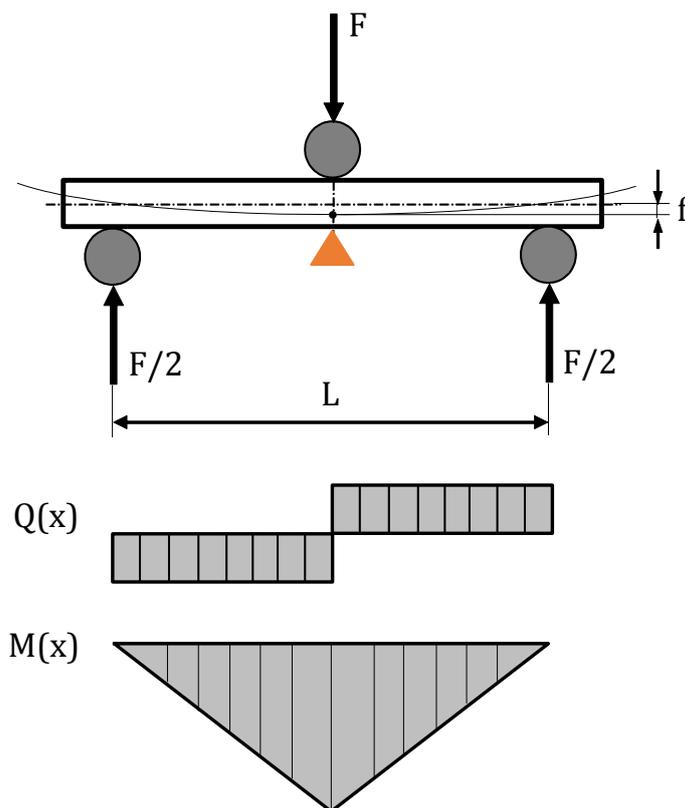
Entsprechend dieser Korrelation treten die stärksten Spannungen dort auf, wo die Entfernung von der neutralen Faser am größten ist. Diese maximalen Spannungen werden auch Randfaserspannungen bezeichnet und werden mit folgender Gleichung ausgedrückt:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W}, \quad (14)$$

wobei  $\sigma_b$  die maximale Biegespannung,  $M_b$  das Biegemoment und  $W$  das Widerstandsmoment der verwendeten Probe ist [20].

### 3.1.1.1 3 Punkt-Biegeversuch

Bei dem **3 Punkt-Biegeversuch** wird die zu prüfende rechteckige Probe, welche auf zwei Auflagern liegt, in der Mitte durch eine Einzelkraft  $F$  belastet und somit auf Biegung beansprucht (Abbildung 18). Es kommt zur Durchbiegung  $f$ , die mit Hilfe eines differentiellen Wegaufnehmers bestimmt wird [23].



Biegemoment:

$$M_b = \frac{F * L}{4}$$

F Kraft [N]

L Stützweite [m]

Widerstandsmoment:

$$W_{\text{Rechteck}} = \frac{b * h^2}{6}$$

b Probenbreite [m]

h Probendicke [m]

Biegespannung:

$$\sigma_b = \frac{3 * F * L}{2 * b * h^2}$$

Durchbiegung:

$$f = \frac{F * L^3}{48 * E * I}$$

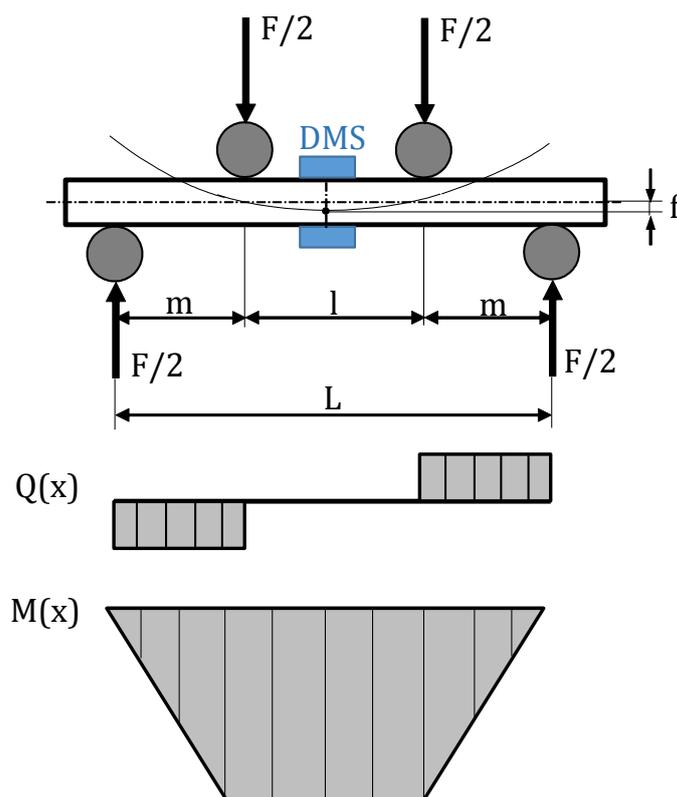
I axiale Trägheitsmoment

E E-Modul [MPa]

**Abbildung 18:** 3 Punkt-Biegeversuch mit angegebenen äußeren Kräften, Querkraften  $Q(x)$ , Momenten  $M(x)$  und Durchbiegung  $f$  am Balken auf zwei Auflagern mit einer Einzelkraft in der Mitte [23].

### 3.1.1.2 4 Punkt-Biegeversuch

Bei dem **4 Punkt-Biegeversuch** wird die auf zwei Auflagern liegende rechteckige Probe an zwei Punkten mit jeweils gleich großen Kräften auf Biegung beansprucht (Abbildung 19). Die Messung der Randfaserdehnung erfolgt über zwei sogenannte Dehnmessstreifen (DMS), die jeweils auf der Ober- und Unterseite der Probe aufklebt werden. Um Stauchung an der Oberseite und Dehnung an der Unterseite unabhängig beurteilen zu können, werden die Dehnmessstreifen jeweils als Halbbrücke mit Temperaturkompensation verschaltet. Für die Temperaturkompensation wird zusätzlich eine zweite identische Probe verwendet, die ebenfalls mit dem gleichen DMS-Typ beklebt ist. Bei der Versuchsdurchführung kommt es zur Durchbiegung  $f$ , die einen Anstieg des Widerstandes des einen DMS an der Unterseite (Dehnung) und einen Abfall des anderen an der Oberseite (Stauchung) hervorruft. Entsprechend dieser Widerstandsänderungen wird die Wheatstone-Brückenschaltung „verstimmt“ und kann als elektrische Ausgangsspannung gemessen werden. Diese entstandene elektrische Spannung muss verstärkt werden und wird dann zur Anzeige gebracht [23],[24].



#### Biegemoment:

$$M_b = F * m$$

F Kraft [N]

m Auflagerabstand [m]

$$m = (L - l)/2$$

#### Widerstandsmoment:

$$W_{\text{Rechteck}} = \frac{b * h^2}{6}$$

b Probenbreite [m]

h Probendicke [m]

#### Biegespannung:

$$\sigma_b = \frac{3 * F * (L - l)}{2 * b * h^2}$$

L Stützweite [m]

l Auflagerabstand [m]

**Abbildung 19:** 4 Punkt-Biegeversuch mit angegebenen äußeren Kräften, Querkraften  $Q(x)$ , Momenten  $M(x)$  und Durchbiegung  $f$  am Balken auf zwei Auflagern mit Belastung durch zwei gleichen Einzelkräften [23].

### 3.1.2 Zugversuch

Der **Zugversuch** ist ein genormtes Standardverfahren, um das Verhalten eines Werkstoffes bei Verformung zu untersuchen [25]. Er dient zur Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften, wie z.B. des Elastizitätsmoduls unter homogener, einachsiger Zugbeanspruchung [26].

Bei der Durchführung des Zugversuches werden die genormten Versuchsproben (Abbildung 21b) mit Anfangslänge  $L_0$  und Anfangsquerschnitt  $S_0$  in die Spannbacken der Zugprüfmaschine momentenfrei eingespannt und bei konstanter Traversengeschwindigkeit bis zum Bruch verformt. Während des Versuches werden die Zugkraft über das Kraftmesssystem und die Probendehnung mittels Dehnungsaufnehmer oder Dehnmessstreifen aufgezeichnet. Man erhält somit ein Kraft-Verlängerung-Diagramm, das jedoch von der Geometrie der Probe abhängig ist. Um eine geometrieunabhängige Messkurve, welche nur vom Werkstoff abhängt zu erhalten, müssen bezogene Größen eingeführt werden.

Die auf den Anfangsquerschnitt  $S_0$  der Probe bezogene Zugkraft wird als Nennspannung

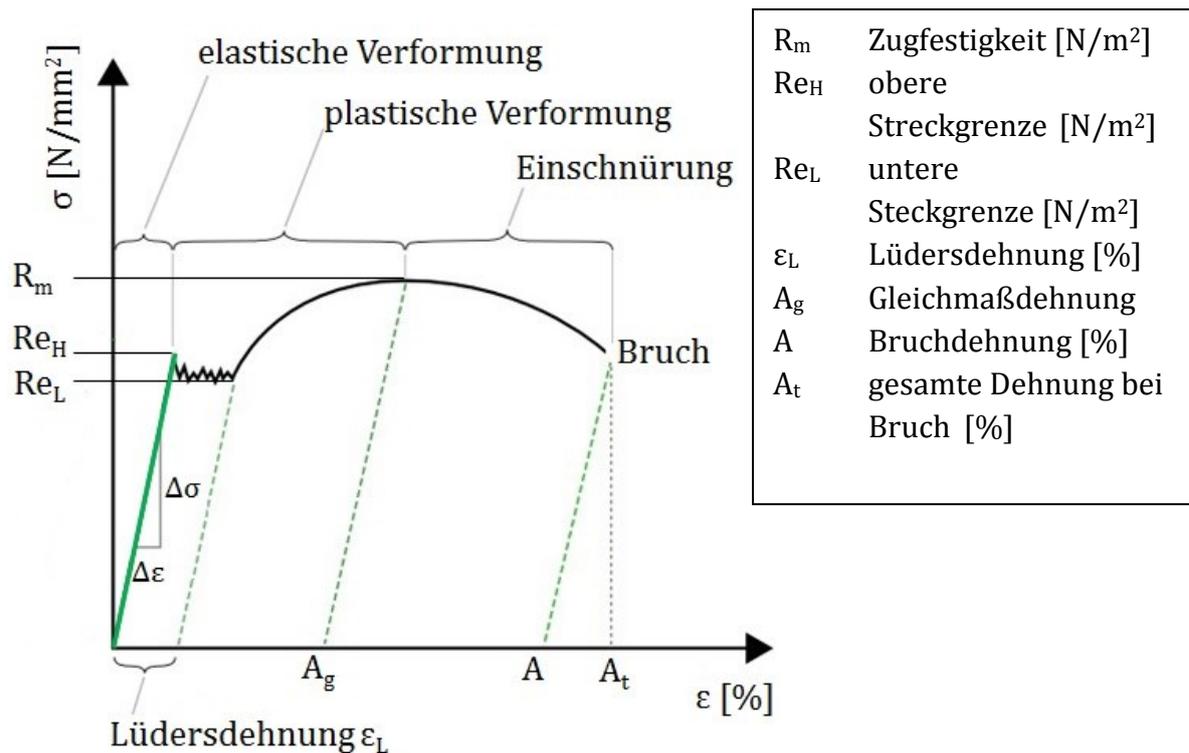
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (15)$$

bezeichnet. Die auf die Anfangslänge  $L_0$  bezogene Längenänderung wird als totale Dehnung

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (16)$$

bezeichnet und setzt sich aus  $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$  zusammen, wobei  $\varepsilon_{el}$  die elastische und  $\varepsilon_{pl}$  die plastische Verformung beschreibt. Entsprechend der Gleichungen (15) und (16) kann nun eine Messkurve unabhängig von der Geometrie, die sogenannte „Spannungs-Dehnungs-Kurve“ aufgetragen werden (siehe Abbildung 20) [25].

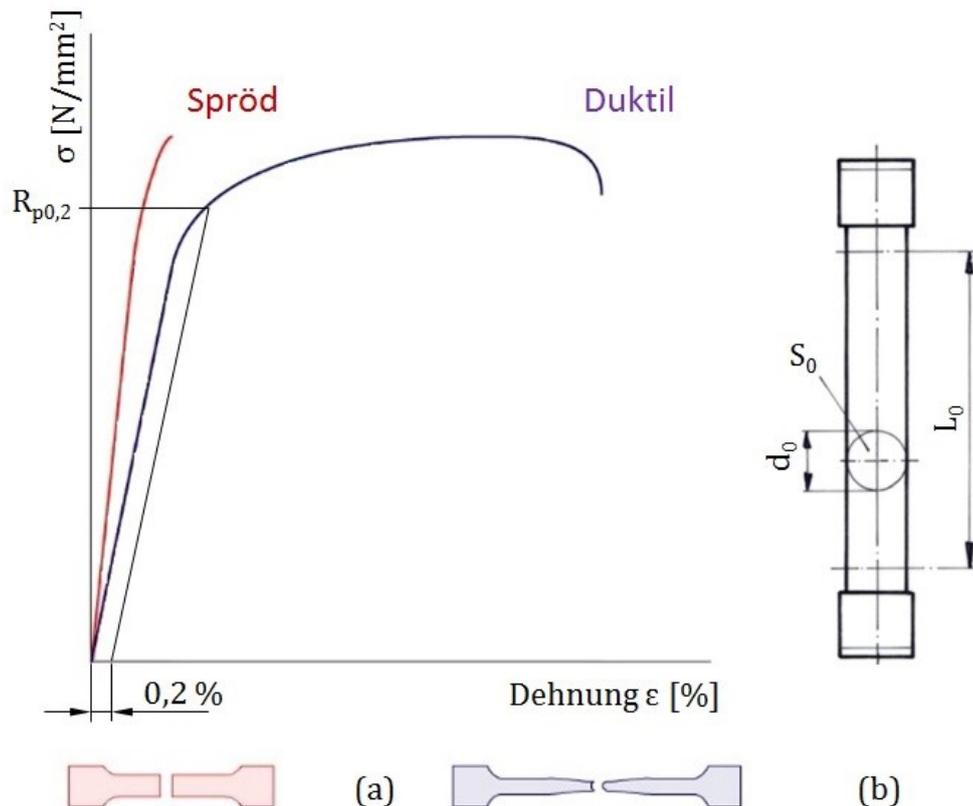
---



**Abbildung 20:** Darstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit oberer und unterer Streckgrenze. Diese Art von Verfestigungskurven treten bei unlegierten Stählen mit geringem Kohlenstoffgehalt auf [27].

Zu Beginn der Zugbelastung findet zuerst eine elastische Verformung des Materials statt, welche durch die Hooke'sche Gerade charakterisiert ist (siehe grüne Linie in Abbildung 20). Die Steigung dieser Geraden gibt den Elastizitätsmodul an, welcher den Widerstand des Werkstoffes gegen Verformung beschreibt. Die Abbildung 20 weist einen ausgeprägten Fließbereich zwischen elastischer und plastischer Verformung auf. Dieser Bereich kennzeichnet sich dadurch, dass es bei Erreichen der oberen Streckgrenze  $Re_H$  zu einem abrupten Spannungsabfall auf  $Re_L$  kommt und sich danach unter konstanter Nennspannung ein Lüdersdehnungsbereich  $\epsilon_L$  ausbildet. Diese Lüdersdehnung ist auf das plötzliche Bewegen von Versetzungen im Gitter zurückzuführen [28]. Bei anderen Werkstoffen wie z.B. austenitischen Stählen, die einen stetigen Anstieg der Spannung mit der Verformung aufweisen, wird als Übergang von elastischer auf plastischer Dehnung, die 0,2%-Dehngrenze eingeführt (siehe Abbildung 21a). Die 0,2%-Dehngrenze legt die Spannung, bei der eine bleibende Dehnung von 0.2% erreicht wird, fest [23]. Nach Beendigung der inhomogenen Lüdersdehnung nimmt die Nennspannung mit wachsender Verformung wieder zu, bis die Zugfestigkeit  $R_m$  erreicht wird und es zur Einschnürung der Probe kommt (siehe Abbildung 21a bei duktilen Werkstoffen). Dementsprechend nimmt mit der Einschnürung die Kraft zum Ziehen der Probe ab. Bei der Bruchdehnung  $A$  (in Abbildung 20) kommt es dann zum Bruch der Probe [28].

In Abbildung 21a sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven von typischen spröden und duktilen Werkstoffen skizziert. Die Kurve der spröden Werkstoffe, wie z.B. von Keramiken, kennzeichnet sich dadurch, dass es zu keiner plastischen Verformung kommt, sondern der Bruch schlagartig bei Erreichen der Zugfestigkeit  $R_m$  auftritt. Die Kurve der duktilen Werkstoffe, wie im oberen Abschnitt bereits erwähnt, weist gegenüber den spröden Werkstoffen eine plastische Verformung mit daraus folgender Einschnürung der Probe, die zum Bruch führt, auf. Je nach Art des Werkstoffes besitzen die Kurven einen ausgeprägten Fließbereich oder eine 0,2%-Dehngrenze [28].



**Abbildung 21:** (a) Spannungs-Dehnungs-Diagramme von spröden und duktilen Werkstoffen, wobei mit duktilen Werkstoffen kfz-reine Metalle, austenitische Stähle und hoch angelassene Vergütungsstähle gemeint sind [29]. (b) Probengeometrie für Zugversuch [30].

### 3.1.3 Theoretischer Vergleich zwischen den Methoden: 3 Punkt-, 4 Punkt-Biegeversuch und Zugversuch

Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls kommen Biegeversuch und Zugversuch zum Einsatz, allerdings bestimmt meist der Werkstofftyp, welche Methode herangezogen wird.

Bei Keramiken werden in der Praxis hauptsächlich Biegeversuche durchgeführt. Der Grund liegt in der schwierigen Umsetzung des Zugversuches hinsichtlich der folgenden Ursachen. Erstens lassen sich Keramiken wegen ihres spröden Verhaltens erschwert mit der geforderten Probengeometrie für den Zugversuch herstellen.

Zweitens ist die Fixierung der Proben problematisch, da diese eine mögliche Zerstörung der Probe zur Folge haben kann. Drittens können geringe Abweichungen von der idealen Ausrichtung zu überlagerten Biegespannungen führen, welche ebenfalls eine Zerstörung der Probe oder Fehlinterpretationen verursachen können. Prinzipiell können solche Ausrichtungsfehler durch aufwändige Methoden und Vorrichtungen, wie z.B. Dehnmessstreifen auf allen Seitenflächen der Zugprobe, eliminiert bzw. kompensiert werden.

Bei Metallen und Kunststoffen werden hauptsächlich Zugversuche durchgeführt, um das Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu untersuchen [10],[31].

## 3.2 Untersuchte Werkstoffe und Systeme

In diesem Unterkapitel werden die einzelnen untersuchten Werkstoffe aufgelistet und kurz in Bezug auf ihre Eigenschaften, insbesondere des elastischen Verhaltens erläutert. Infolgedessen werden die Werte der Elastizitätsmodule für die jeweiligen Werkstoffe, die der Literatur entnommen wurden, zusammengefasst (Tabelle 5).

Für diese Diplomarbeit wurden als untersuchte Werkstoffe:

- Aluminium (Al),
- Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),
- $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP),
- Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC),
- und Polymer Printed Circuit Board (PCB)

herangezogen, umso zu gewährleisten, dass eine möglichst große Bandbreite an Elastizitätsmoduln bestimmt wird.

**Tabelle 5:** Übersicht über die Elastizitätsmoduln der untersuchten Werkstoffe.

Werkstoff	Elastizitätsmodul E [GPa]
Aluminium (Al) <sup>3</sup>	70
Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) <sup>1</sup>	305
$\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP) <sup>1</sup>	200
Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) <sup>2</sup>	150
Polymer Printed Circuit Board (PCB) <sup>2</sup>	27-29

<sup>1</sup>dynamisch bestimmter Wert (H. Peterlik, Institut für Materialphysik, TU Wien)

<sup>2</sup>am ISFK statisch bestimmter Wert

<sup>3</sup>Literaturwert

### 3.2.1 Aluminium (Al)

Reinaluminium ist das Basismetall für Al-Legierungen, die durch ihre hervorragenden Eigenschaften einen hohen Stellenwert besitzen. Al-Legierungen stehen in ihrer Bedeutsamkeit an zweiter Stelle nach den Eisenwerkstoffen. Aluminium findet hauptsächlich dort Anwendung, wo eine geringe Dichte, eine gute Gieß- und Formbarkeit, eine Deckschichtbildung und eine gute Leitfähigkeit technisch relevant sind. Das Anwendungsgebiet von Aluminium ist sehr vielfältig und erstreckt sich vom Bauwesen bis hin zur Verpackungsindustrie (Folien). Bei mechanischer Belastung, wie z.B. der 3 Punkt-Biegung tritt bei Reinaluminium die dreifache elastische Formänderung im Vergleich zu Stahl auf [32].

### 3.2.2 Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) weist eine Reihe von herausragenden Materialeigenschaften auf, die nahezu von keinem anderen keramischen Werkstoff erreicht werden. Diesbezüglich wird Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) oftmals auch als „Stahl unter den Hochleistungskeramiken“ bezeichnet. Generell kennzeichnet sich die Nichtoxidkeramik durch ihren hohen kovalenten Bindungsanteil aus, welcher verantwortlich für viele hervorragende Eigenschaften, wie z.B. hoher Schmelzpunkt, hohe Härte und hohem E-Modul ist. Das Material verdankt seine Eigenschaften auch dem Gefüge, in dem stängelförmige Kristallite in einer glasig erstarrten Matrix eingebettet sind (Abbildung 22). Diese wiederum verzahnen sich wie Mikadostäbchen und ergeben damit eine gute Zähigkeit. Die Eigenschaften lassen sich durch Modifikationen im Herstellungsprozess optimieren, wie z.B. durch feine, rundliche Kristallite [33],[34].

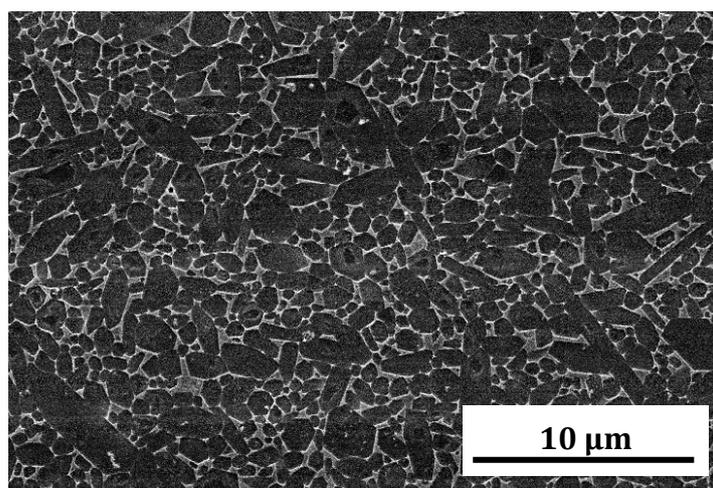
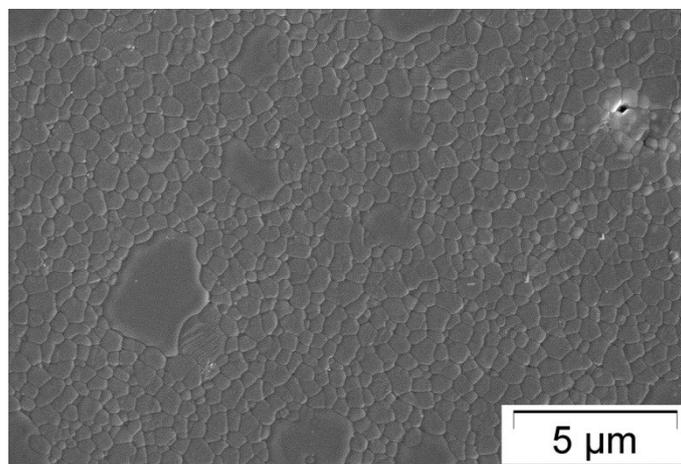


Abbildung 22: REM-Aufnahme eines Siliziumnitrids ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

### 3.2.3 $Y_2O_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP)

Der Werkstoff Y-TZP wird als polykristallines, tetragonales Zirkonoxid (TZP) bezeichnet, welcher mit  $Y_2O_3$  stabilisiert ist. Die Zugabe von  $Y_2O_3$  führt dazu, dass ein  $ZrO_2$ -Mischkristall bis zur Raumtemperatur in seiner tetragonalen Phase stabilisiert wird und sich bei mechanischer Beanspruchung in die monokline Modifikation umwandeln kann. Durch die  $Y_2O_3$ -Stabilisierung werden Festigkeiten im Bereich von mehr als 1000 MPa und Risszähigkeiten von  $8 \text{ MPa m}^{1/2}$  erreicht. Typische Stabilisationsgehalte und Korngrößen für Y-TZP-Keramiken liegen im Bereich von 2,3 - 3,5 mol % und 0,3 - 0,5  $\mu\text{m}$ . Bei der Herstellung von Y-TZP-Keramiken wird ein sehr feines Gefüge, bestehend aus sehr kleinen tetragonalen Kristalliten, durch druckloses Sintern von hochreinen und feinen Pulvern (Partikelgröße  $< 100 \text{ nm}$ ) erreicht (Abbildung 23). Die Sintertemperaturen betragen 1400 bis 1500  $^\circ\text{C}$  [31],[35],[36].



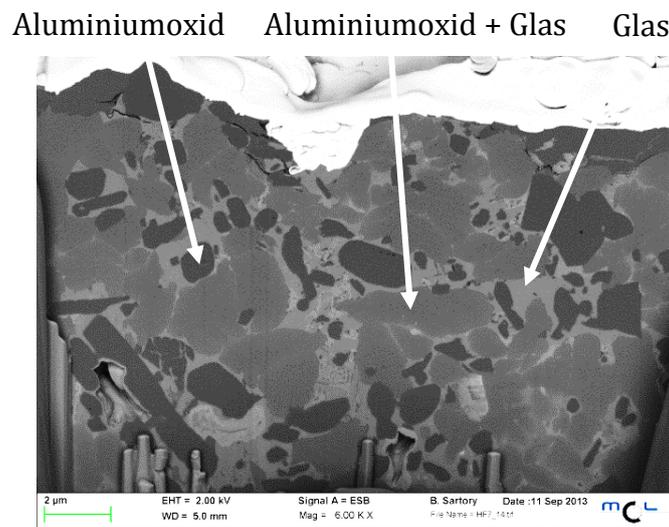
**Abbildung 23:** REM-Aufnahme eines  $Y_2O_3$ -stabilisierten Zirkonoxids (Y-TZP) mit einer 5000x Vergrößerung.

### 3.2.4 Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC)

Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) sind ein wichtiges Substratmaterial für die Herstellung von Mehrschichten, welche für elektronische Schaltungen in der Medizin, in der Automobilindustrie und als Kommunikationsgeräte Anwendung finden. Die sogenannten keramischen Leiterplatten (LTCC) sind aus verschiedenen Schichten aufgebaut und bestehen aus einer Pulvermischung, die hauptsächlich Aluminiumoxid und Glas beinhaltet (siehe Abbildung 24).

Die LTCC-Folie wird durch Foliengießen mittels einer Aufschlämmung, die aus niedrigschmelzenden Glas- und keramischen Partikeln, einem Lösungsmittel, einem Dispergiermittel und einem organischen Bindemittel besteht, hergestellt. Die homogene Masse wird auf ein Folienband gegossen und geformt. Die hergestellten LTCC-Folien können geschnitten, aufgerollt und zur Weiterverarbeitung transportiert werden. Danach werden die Metallisierungen mit Hilfe des Siebdruckverfahrens Lage

für Lage auf die Folien gedruckt. Anschließend werden die Folien gestapelt, gepresst und in eine Mehrschicht laminiert und zuletzt bei einer Temperatur von 900°C gesintert. [37],[38].



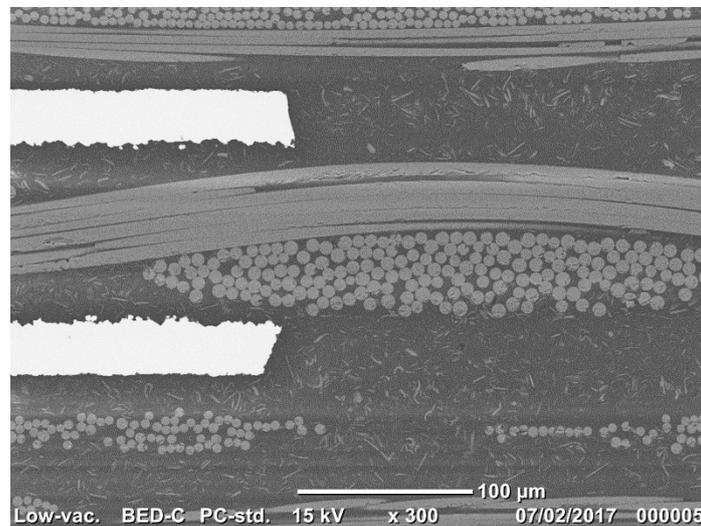
**Abbildung 24:** Aufnahme eines FIB-Schnittes einer LTCC; (a) mit einer 3000x Vergrößerung und (b) mit einer 6000x Vergrößerung. Die hellen Bereiche bestehen aus Glas, die grauen Bereiche aus eine Mischung von Aluminiumoxid + Glas und die dunklen Bereiche sind ausschließlich aus Aluminiumoxid aufgebaut.

### 3.2.5 Printed Circuit Board (PCB)

Die sogenannten polymeren Leiterplatten (PCB) sind gegenüber den LTCCs aus alternierenden Kupferschichten und Kunstharzschichten aufgebaut. Die Kupferschichten bedecken nur die Flächen auf denen Leiterbahnen benötigt werden. Die PCB werden zusätzlich mit Glasfasermatten (auch „Prepregs“ bezeichnet) verstärkt, um die Steifigkeit zu erhöhen und die Wärmedehnung zu mindern. Diese Prepregs können unterschiedliche Glasanteile, Dicken und Winkel aufweisen. Die Schichten der PCBs werden ebenfalls wie die der LTCC metallisiert (Abbildung 25). Dabei werden die verschiedenen Schichten mit sogenannten „Vias“ verbunden. Diese Vias sind Löcher in der Leiterplatte, die mit metallischen Leitern (generell Kupfer) gefüllt werden.

Zur Herstellung der PCB werden die Glasgewebe (Prepregs) mit Epoxydharz getränkt und mit den Kupferschichten über ein bestimmtes Druck- und Temperaturprofil verpresst und dabei ausgehärtet. Das Harz wird zur Vermeidung möglicher Lufteinschlüsse unter Druck (~ 3 MPa) bei einer Temperatur von ungefähr 200 °C ausgehärtet. Das Harz fließt aufgrund des Druckes in Bereiche, die generell kein Harz aufweisen würden. Die Leiterplattenherstellung erfolgt Schicht für Schicht, wobei die als erstes hergestellte dickere Mittelschicht („core“) mit gleicher Schichtenanzahl auf beiden Seiten laminiert wird. Dieser symmetrische Schichtaufbau wirkt sich vorteilhaft bezüglich mechanischer Belastung und Temperatureinflüsse aus. Anschließend werden die überflüssigen Bereiche (die Nicht-Leiterbahnen) weggeätzt.

Als letzter Schritt werden die Bohrungen für die Vias angebracht, in denen durch einen galvanischen Prozess ein metallischer Leiter abgeschieden wird. Diese Prozedur wird für jede Schicht analog angewendet [39].



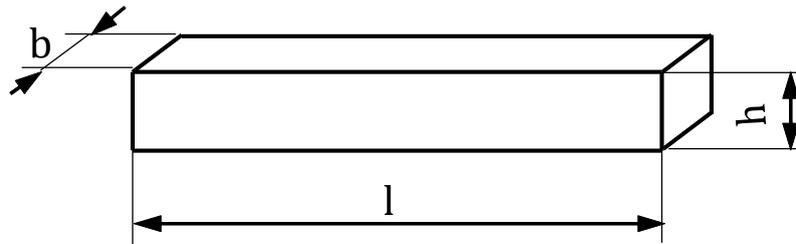
**Abbildung 25:** REM-Aufnahme eines PCBs des Materials 2 in Querrichtung mit einer 300x Vergrößerung. In dieser Aufnahme sind die einzelnen Fasern, die runden porösen Bereiche als auch die Metallisierung aus Kupfer erkennbar.

### 3.3 Probenpräparation und Durchführung der Experimente

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch die unten beschriebenen experimentellen Versuche und deren Aufbau im Detail erklärt.

#### 3.3.1 Probenpräparation der zu untersuchenden Werkstoffe

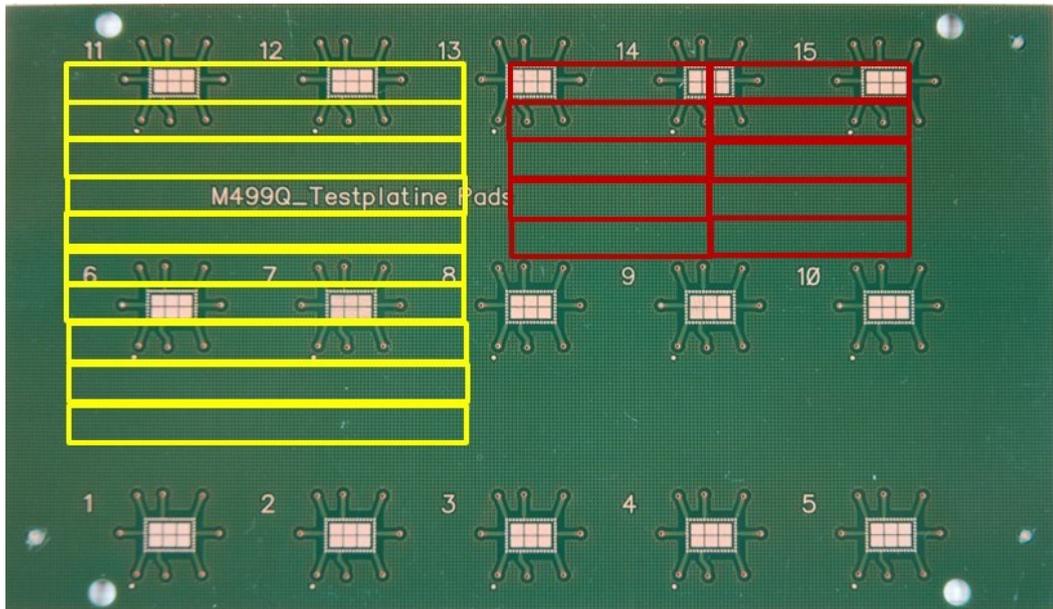
Zur Durchführung der Biege- und Zugversuche wurden von den zuvor beschriebenen Werkstoffen, Proben angefertigt. Die Abmessungen für die Referenzproben betragen  $h \times b \times l = 3 \times 4 \times 50 \text{ mm}^3$  für die Werkstoffe Aluminium (Al), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP). Es handelt sich dabei um die standardisierte Probengeometrie für den Biegeversuch. Um neue Erkenntnisse über den möglichen Einfluss der Probengeometrien in Bezug auf den Elastizitätsmodul zu gewinnen, wurden ebenfalls Proben für die Werkstoffe Al,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  und Y-TZP mit den Abmessungen  $1 \times 4 \times 50 \text{ mm}^3$  hergestellt (siehe Abbildung 26).



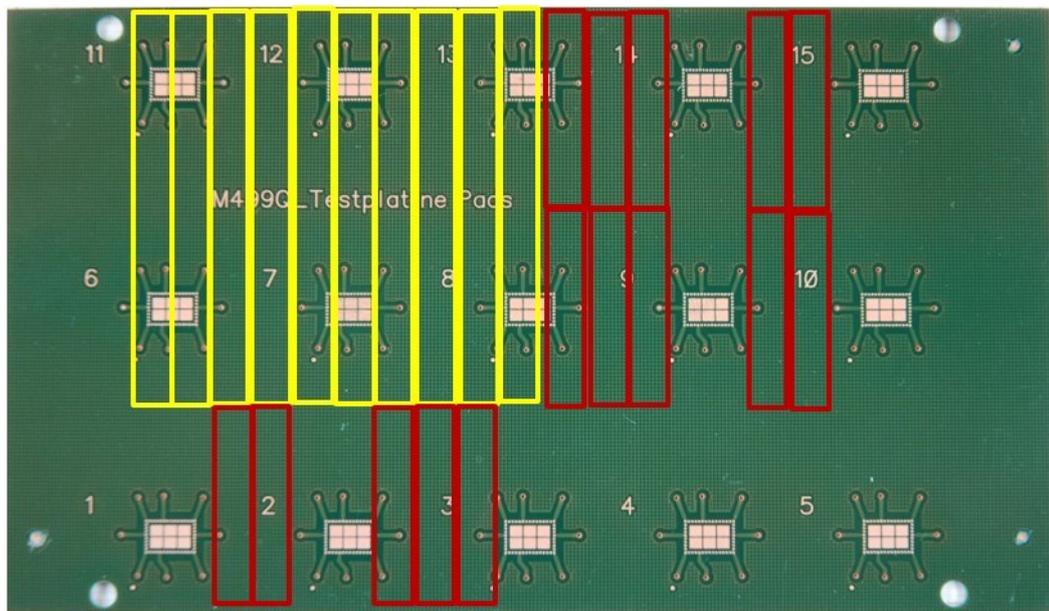
**Abbildung 26:** Angabe der Probenabmessungen ( $h \times b \times l$ ).

Bei den LTCCs und PCBs konnten keine Normproben angefertigt werden, da diese Materialien direkt auf kommerziellen Fertigungslinien der Firma EPCOS OHG Deutschlandsberg, in Österreich erzeugt wurden. Die Abmessungen der LTCCs und der PCBs betragen  $1 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ . Bei den PCBs handelt es sich um zwei verschiedene Systeme desselben Werkstoffes. Diese Proben bestehen ganz allgemein aus einem Gemisch aus faserverstärkten Kunststoffharz und Kupfer. Die unterschiedlich angeordneten Fasern können Auswirkungen auf die Ergebnisse verursachen, wodurch die Proben einmal in Längsrichtung und einmal in Querrichtung aus den erhaltenen Leiterplatten herausgeschnitten wurden (siehe Abbildung 27). Zu beachten ist, dass die Metallmodule, in der Abbildung 27 als „goldenen Kästchen“ ersichtlich, nicht in der Mitte der Probenlänge liegen. Es könnte zur Verfälschung der Messergebnisse beitragen, da bei den 3 Punkt-Biegeversuchen der Messaufnehmer dort angreift bzw. beim 4 Punkt-Biegeversuch und Zugversuch die Dehnmessstreifen in der Mitte aufklebt werden.

Für den Zugversuch wurde eine Siliziumnitrid-Probe ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) mit den Abmessungen von  $1 \times 5 \times 25 \text{ mm}^3$  angefertigt.



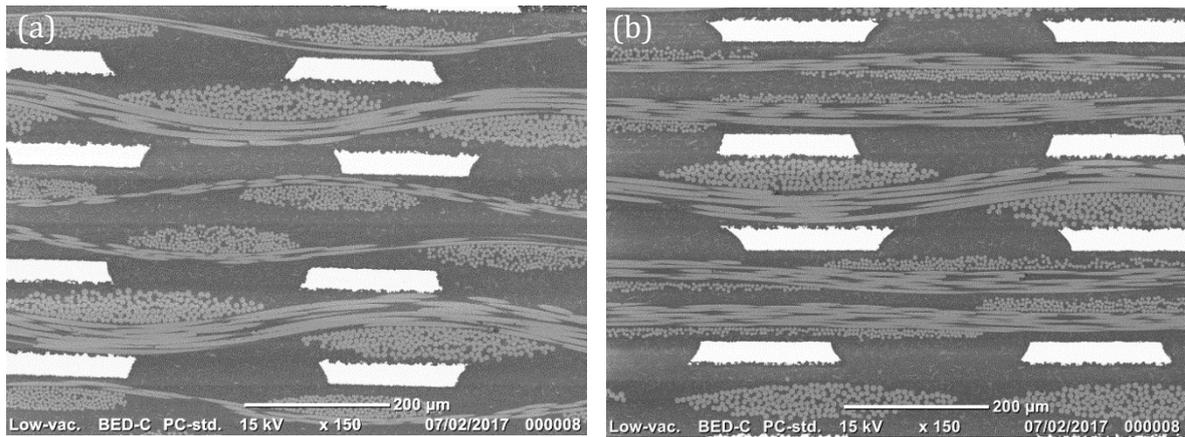
(a)



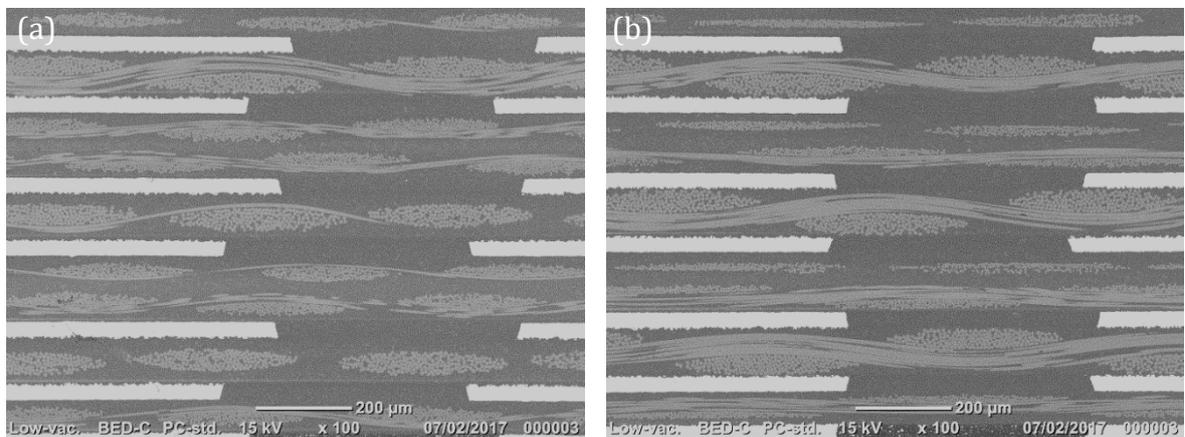
(b)

**Abbildung 27:** Schneidplan der PCB Leiterplatte des Materials 1 zur Fertigung der Biege- und Zugproben in (a) Querrichtung und (b) Längsrichtung.

In den Abbildung 28 und Abbildung 29 sind REM-Aufnahmen der polymeren Komposite (PCB) des Materials 1 & Materials 2 dargestellt. Anhand der Aufnahmen können Unterschiede bezüglich der Metallisierung (weiße „Rechtecke“) und des Faseranteils beobachtet werden.



**Abbildung 28:** REM-Aufnahmen eines PCBs des Materials 1 (a) in einer 150x Vergrößerung in Längsrichtung geschnitten und (b) ebenfalls in einer 150x Vergrößerung in Querrichtung geschnitten.



**Abbildung 29:** REM-Aufnahmen eines PCBs des Materials 2 (a) in einer 100x Vergrößerung in Längsrichtung geschnitten und (b) ebenfalls in einer 100x Vergrößerung in Querrichtung geschnitten.

### 3.3.2 Auswahl der Dehnmessstreifen für 4 Punkt-Biegeversuch und Zugversuch

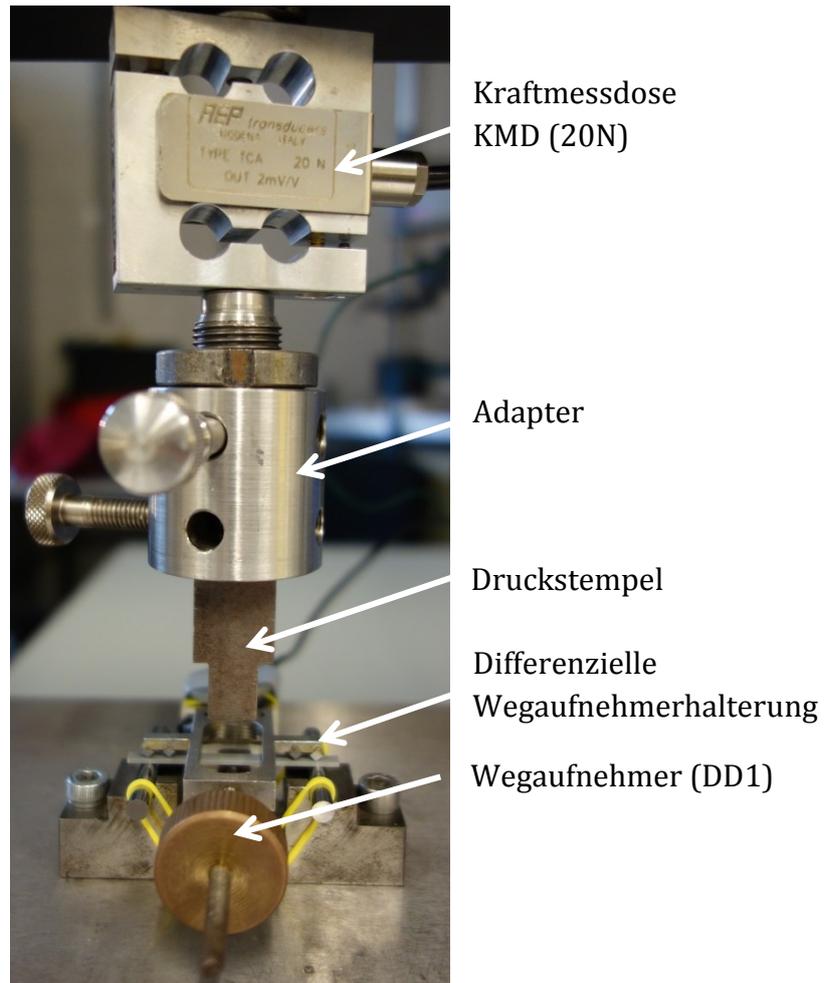
Um zuverlässige Messergebnisse bei den praktischen Versuchsdurchführungen zu gewährleisten wurden Dehnmessstreifen des Typs 1.5/120 LY81 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) gewählt. Diese Dehnmessstreifen (DMS) sind nicht mit Anschlussbändchen versehen, wodurch Kupferdrähte an die Anschlüsse gelötet werden mussten. In Tabelle 6 sind alle wesentlichen Kennwerte dieses DMS-Typs aufgelistet.

**Tabelle 6:** Kennwerte des ausgewählten Dehnmessstreifens der Fa. HBM

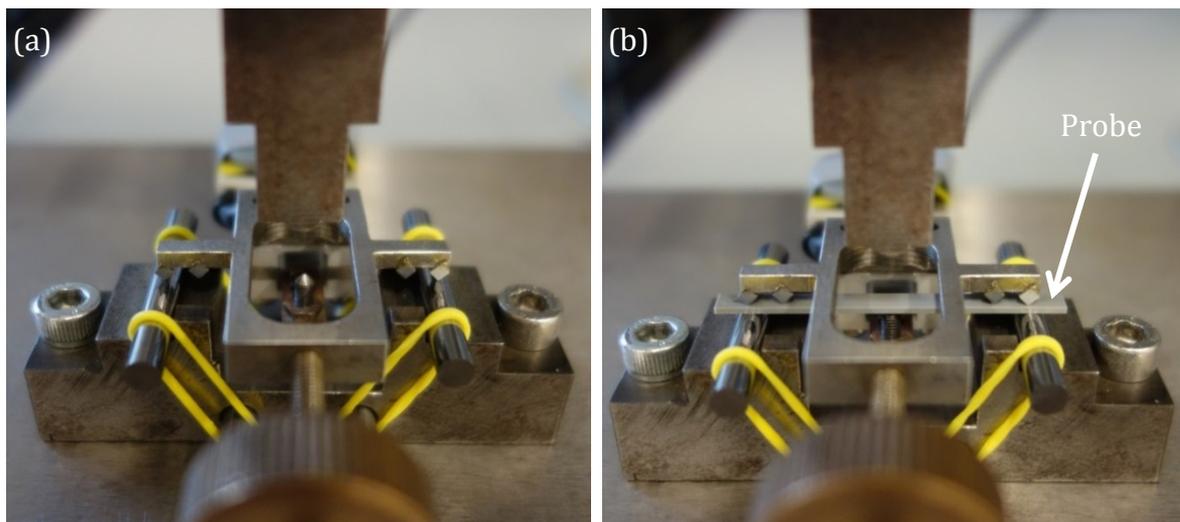
Typ	1,5/120 LY81
Messgitterwiderstand [ $\Omega$ ]	$120 \Omega \pm 0,30 \%$
k-Faktor	$1,94 \pm 1,5 \%$
Temperaturkompensation angepasst an ferritischen Stahl	$10,8 [10^{-6} / K]$
Temperaturkoeffizient [ $1/K$ ]	$93 \pm 10 [10^{-6} / K]$
Querempfindlichkeit	0,60%
<i>Messgitter</i>	
aktive Länge	1,5 mm
Breite	1,5 mm
<i>Messgitterträger</i>	
Länge	7,5 mm
Breite	3,4 mm

### 3.3.3 Durchführung des 3 Punkt-Biegeversuches

Bei den **3 Punkt-Biegeversuchen** wurden zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls von jedem Werkstoff jeweils 5 Proben geprüft. Die Versuchsproben wurden anhand ihrer Abmessungen in dicke und dünne Proben gegliedert. Als dicke Proben werden die Proben mit den Abmessungen 3 x 4 x 50 mm bezeichnet. Die dünnen Proben wiesen die Abmessungen 1 x 4 x 50 mm auf. Für die Versuche wurden beide Arten von Biegeproben herangezogen. Die Abbildung 30 gibt einen Überblick über den gesamten Prüfaufbau und die verwendeten Messgeräte. Zusätzlich dazu zeigen die Abbildung 31a und Abbildung 31b eine detaillierte Darstellung der Probeneinspannung mit Hilfe des Wegaufnehmers.



**Abbildung 30:** Darstellung des Prüfaufbaus für die 3 Punkt-Biegeversuche mit eingespannter dünner Siliziumnitrid-Biegeprobe in der Universalprüfmaschine Mystrain unter Verwendung des 40 Auflagers und der KMD 20N.



**Abbildung 31:** Detaillierte Darstellung der Probeneinspannung in den hier dargestellten Wegaufnehmer (DD1); (a) 3 Punkt-Biegeaufbau ohne Biegeprobe mit in der Mitte ersichtlichem Messfühler des Wegaufnehmers und (b) mit eingespannter dünner  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Biegeprobe.

Das Ausrichten des Auflagers mit dem Druckstempel wurde optisch durch Absenken des Stempels nahe des Auflagers bewerkstelligt. Die Ausrichtung des Wegaufnehmers mit dem Druckstempel wurde ebenfalls optisch angeglichen, wobei hier zu beachten ist, dass der Stempel durch die ovale Ausnehmung des DD1 ohne Berührung passt. Bei der Positionierung der Biegeprobe auf dem Wegaufnehmer muss der Balken mit den trapezförmigen Auflagerspitzen mittig hinsichtlich der Probenbreite aufliegen. Zusätzlich muss gewährleistet sein, dass die Biegeprobe gerade und mittig auf den Rollen des Auflagers ausgerichtet ist, wobei hier die seitlichen Schrauben als Hilfestellung dienen.

Nach dem Kontrollieren der Positionen auf Geradheit/Richtigkeit wurde die Biegeprobe in den Messaufnehmer eingespannt und mit einer Vorkraft belastet. Nach nochmaliger Kontrolle wurde das Prüfprogramm der Software der Firma Messphysik gestartet, welches drei Belastungsrampen bis zu einer eingestellten Maximalkraft  $F_{\max}$  ausführt. Anhand der damit gemessenen Durchbiegung  $f$ , die im linearen Zusammenhang mit der Kraft  $F$  steht, wurde mit Hilfe eines Mathematica Programmes der  $k$ -Wert einer Ausgleichsgeraden im Kraft-Weg-Diagramm ermittelt und über diesen mit folgender Formel

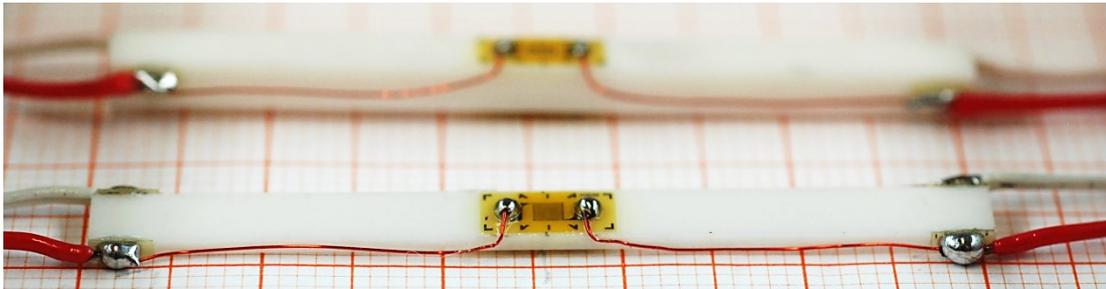
$$E = \frac{k * L^3}{4 * b * h^3} \quad (17)$$

der Elastizitätsmodul berechnet.  $k$  steht für die Steigung der Ausgleichsgeraden,  $L$  für den Auflagerabstand (hier 40 mm),  $b$  für die Probenbreite und  $h$  für die Probenhöhe.

---

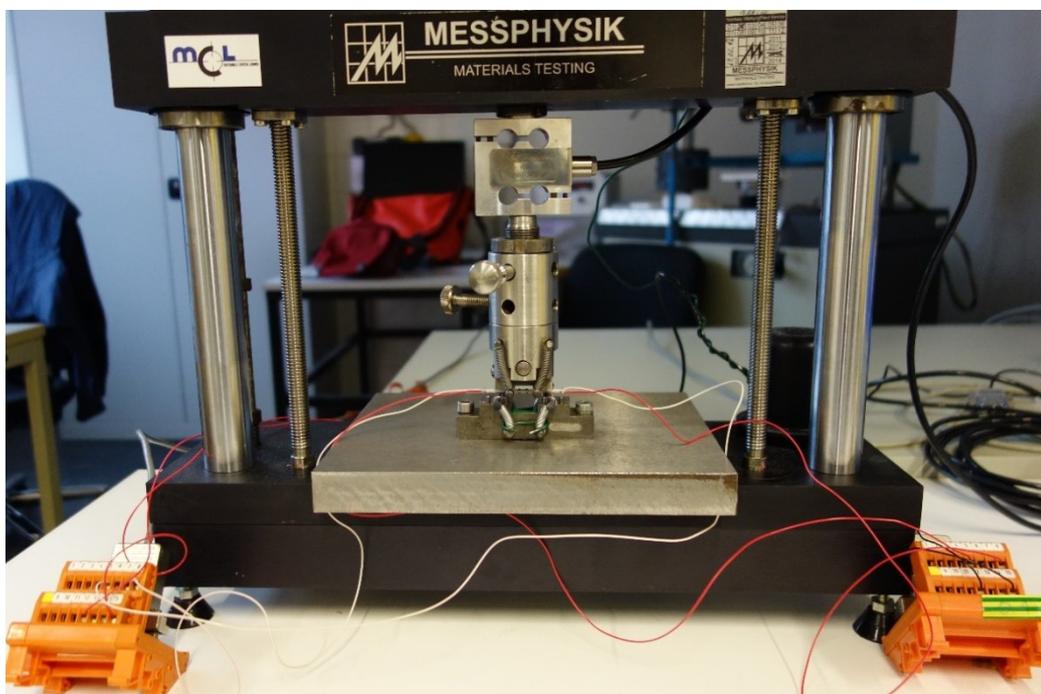
### 3.3.4 Durchführung des 4 Punkt-Biegeversuches

Für die 4 Punkt-Biegeversuche wurden die dünnen und dicken Biegeproben mit den Abmessungen, 1 x 4 x 50 mm und 3 x 4 x 50 mm herangezogen. Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden die Biegeproben mit Dehnmessstreifen auf jeder Seite der Probe beklebt (siehe Abbildung 32). Zur Temperaturkompensation wurde eine Biegeprobe mit derselben Geometrie (aber nicht vom gleichen Material) verwendet.

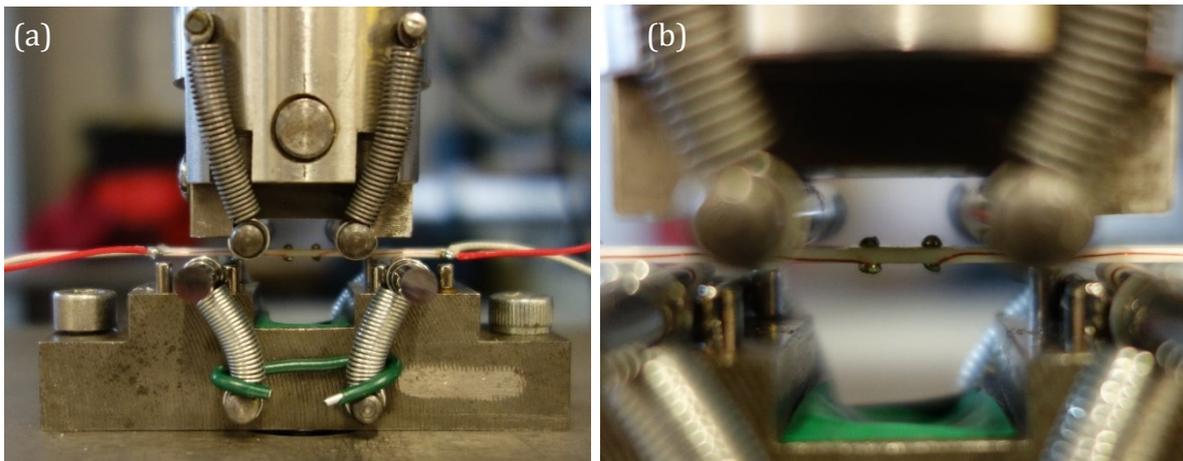


**Abbildung 32:** Detailaufnahme der dünnen und dicken Biegeproben, welche jeweils auf beiden Seitenflächen Dehnmessstreifen aufweisen.

In Abbildung 33 ist der gesamte Messaufbau für die 4 Punkt-Biegeversuche mit den verwendeten Geräten dargestellt. In Abbildung 34a und Abbildung 34b werden die Detailaufnahmen für die Einspannung der Biegeprobe in das 30/15 Auflager gezeigt, wobei der äußere Abstand der Rollen 30mm und der innere Abstand 15 mm beträgt.



**Abbildung 33:** Darstellung des Prüfaufbaus für die 4 Punkt-Biegeversuche mit eingespannter dünner Biegeprobe in der Universalprüfmaschine Mystrain unter Verwendung des 30/15 Auflagers und der KMD 20N. Die Biegeprobe wird mit der Temperaturkompensations-Probe über Klemmleisten (orange Klötze) verschaltet.



**Abbildung 34:** Detailaufnahme der dünnen  $Y_2O_3$ -stabilisierten Zirkonoxid-Biegeprobe im Prüfaufbau; in (a) ist die gesamte eingespannte Biegeprobe zwischen den Auflagerrollen ersichtlich, in (b) nur der DMS-Bereich.

Die Ausrichtung des oberen Stempels (mit Gelenk) mit dem unteren Stempel erfolgte, wie schon beim 3 Punkt-Biegeversuch erklärt, optisch durch Absenken des Stempels nahe zum Auflager. Die Seitenflächen des oberen Stempels, die zum Prüfer hinzeigen, wurden mit dem Stempel des unteren Auflagers verglichen und korrekt justiert. Die Biegeprobe und die Temperaturkompensations-Probe waren zuvor als Halbbrücke an die Klemmleisten, welche mit dem Messverstärker-System in Verbindung stehen, angeschlossen. Das Anschließen der Biegeprobe erfolgte durch Anschrauben der gelöteten Kabel an die Kontakte 5 & 8. Die Temperaturkompensations-Probe wurden an die Kontakte 12 & 15 angeschlossen. Die weiteren Einstellungen des Messverstärker-Systems werden im Anhang erläutert.

Nach dem Angleichen der Positionen vom oberen mit unterem Stempel wurde die Probe in das Auflager eingelegt und mit Hilfe der seitlichen Schrauben mittig und gerade entlang des Auflagers positioniert. Damit die Biegeprobe aufgrund der angeschlossenen Lötkekabel nicht verrutschen kann, wurde die Probe mit einer Vorkraft belastet. Vor der Krafteinleitung muss immer ein Nullabgleich von jedem aktiven Dehnmessstreifen betätigt werden.

Das Prüfprogramm der Firma Messphysik wurde gestartet. Es besteht aus drei Kraft-Rampen. Die gemessenen elektrischen Spannungen von DMS 1 und DMS 2 wurden anhand der vorher angenommenen Maximaldehnung für das geprüfte Material und der damit bekannten maximalen elektrischen Spannung auf die aktuelle Dehnung umgerechnet. Mit Hilfe der folgenden Formel wurden dann die Werte der Prüfkraft auf die mechanische Randfaserspannung überführt:

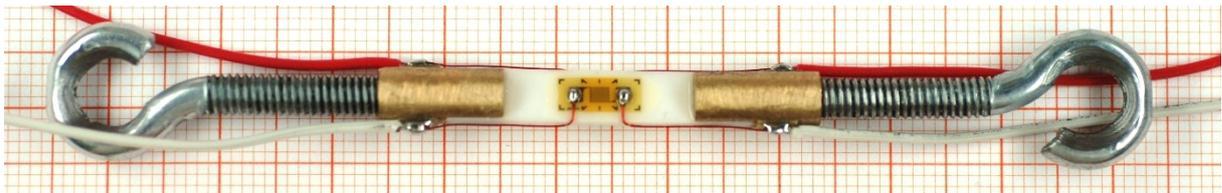
$$\sigma_b = \frac{3 * F * (L - l)}{2 * b * h^2}, \quad (18)$$

wobei  $F$  für die Kraft,  $L$  für den äußeren Auflagerabstand,  $l$  für den innere Auflagerabstand,  $b$  für die Probenbreite und  $h$  für die Probenhöhe steht. Entsprechend dieser Umrechnungen konnte dann mittels Spannungs-Dehnungs-Diagramm die Steigung und somit der Elastizitätsmodul berechnet werden.

---

### 3.3.5 Durchführung des Zugversuches

Für die Zugversuche erfolgte die Messung an dünnen Proben mit Dehnmessstreifen an den beiden Stirnflächen. Es wurden mehrere Versionen von Probenaufhängungen konzipiert. Eine davon bestand darin, die Zugprobe mit aufgeklebten, geschlitzten Gewindehülsen über einem Metallhaken zu ziehen. Für die Klebung wurde eine eigens angefertigte Klebeschablone aus Teflon hergestellt, über die man die Hülsen einlegen und mit einem Zwei-Komponenten-Epoxidkleber ankleben konnte. Zum Aushärten des Klebers wurden die Zugproben anschließend bei einer Temperatur von 80°C für 30 Minuten in den Ofen gelegt. Die Zugprobe wurde vorab mit Dehnmessstreifen (DMS) auf allen Seitenflächen beklebt. Nach dem Abkühlen des Klebers wurden die DMS über einen roten Kupferlackdraht mit den an den Hülsen befestigten Lötstützpunkten verbunden. Abschließend wurden zwei verschieden farbige Kabel an die Stützpunkte gelötet, die als Verbindung mit den späteren Klemmleisten (Abbildung 35 und Abbildung 36) dienen.



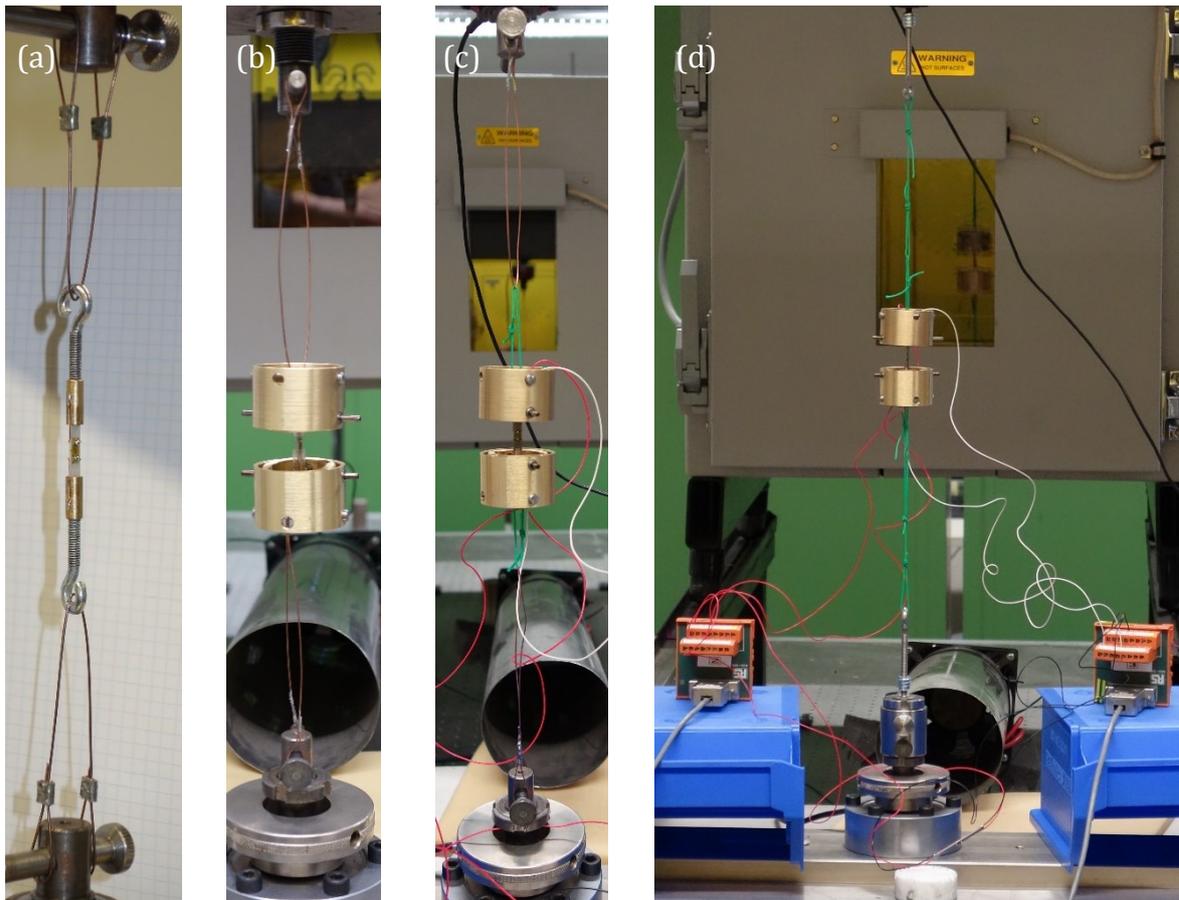
**Abbildung 35:** Vorderansicht einer  $Y_2O_3$ -stabilisierten Zirkonoxid-Probe mit der Probenaufhängung, bestehend aus den aufgeklebten, geschlitzten Gewindehülsen mit den verschraubten Metallhaken für die Zugbeanspruchung.



**Abbildung 36:** Seitenansicht einer  $Y_2O_3$ -stabilisierten Zirkonoxid-Probe mit den seitlich an den Gewindehülsen befestigten Lötstützpunkten, welche mit einem roten Kupferlackdraht verbunden wurden.

Die Abbildung 37 a, b, c und d zeigen die verschiedenen genutzten Prüfstände für den Zugversuch.

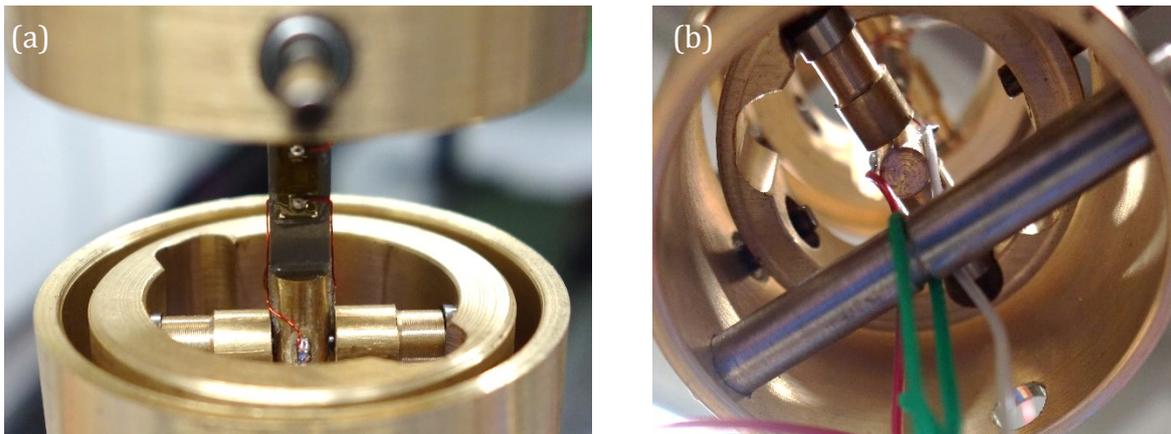
Der Prüfaufbau 1 bestand aus der zuvor beschriebenen Zugprobe mit Gewindehülsen und Metallhaken, welche über Schweißdrähte auf Zug beansprucht wurde. Während der Zugbelastung kam es zu einer Biegebeanspruchung der Probe, wobei ein DMS gezogen und der andere DMS gedrückt wurde. Die Ursache lag beim Gewinde der aufgeklebten Hülsen. Die Metallhaken verschraubten sich bei zunehmender Zugbeanspruchung auf unterschiedlichen Gewindepositionen, wodurch eine Schrägstellung der Probe erzeugt wurde. Die Schrägstellung konnte auch nicht durch lockeres Anschrauben der Metallhaken behoben werden.



**Abbildung 37:** Darstellung aller verschiedenen verwendeten Prüfstände für den Zugversuch auf der Prüfmaschine Messphysik MIDI; (a) Zugversuch über aufgeklebte Gewindehülsen mit Metallhaken und Schweißdraht; (b) Zugversuch über kardanische Aufhängung mit Schweißdraht; (c) Zugversuch über kardanische Aufhängung mit Kombination Schnur (grün) und Schweißdraht; (d) Zugversuch über kardanische Aufhängung mit 2 Schnüren (grün).

Infolgedessen wurde eine neue Version an Probenaufhängung konstruiert, welche in Abbildung 37 b, c, und d als auch detailliert in Abbildung 38 a und b dargestellt ist.

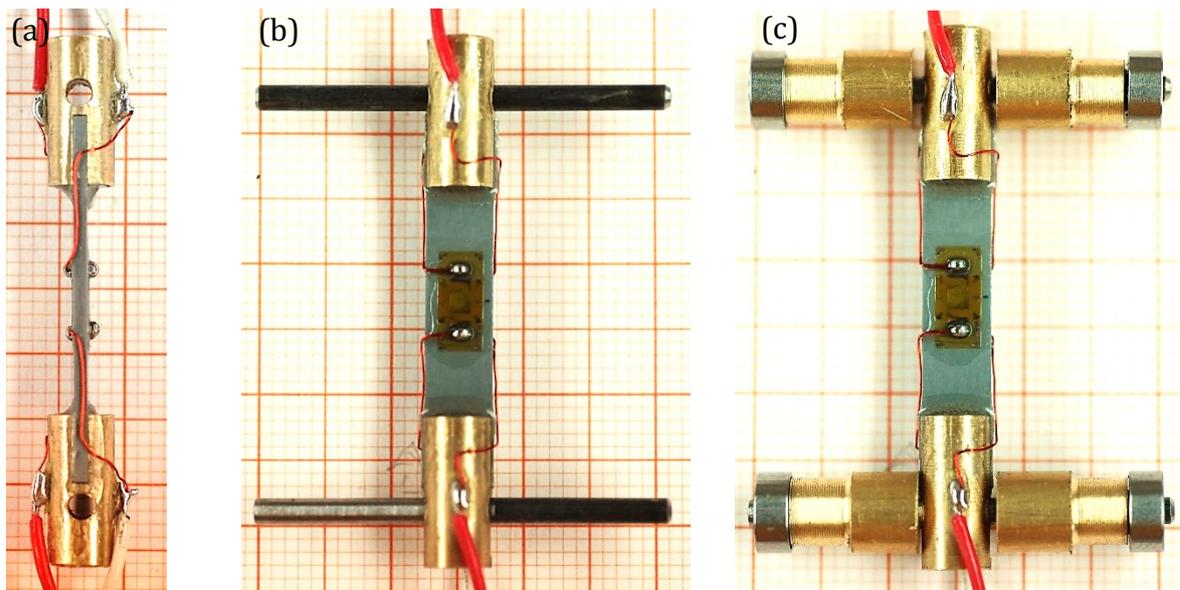
Es handelt sich dabei um eine „kardanische“ Aufhängung, die eine allseitige Drehung ermöglicht. Eine kardanische Aufhängung kann mit Hilfe von drei Ringen realisiert werden, von denen jeder um jeweils eine der drei senkrecht aufeinander stehenden Achsen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  im Raum möglichst reibungsfrei drehbar ist [40]. Die Aufgabe dieser Aufhängung besteht darin, die vermeintliche Schrägstellung auszugleichen und somit eine möglicherweise auftretende Biegebeanspruchung zu verhindern. Für den hier beschriebenen Zugversuch müssen nur zwei Drehachsen ausgeglichen werden und somit besteht die kardanische Aufhängung nur aus zwei verdrehbaren Ringen, deren Drehachsen senkrecht zueinander stehend aufgebaut sind. Der Schnittpunkt der Drehachsen liegt oberhalb des Schwerpunktes der Probe, welche in der Mitte der Aufhängung hängt. Der Schnittpunkt muss exakt in der Flucht der Probe liegen, um ein Entstehen von Querkräften im Zugversuch zu vermeiden.



**Abbildung 38:** Detailaufnahme der kardanischen Probenaufhängung; (a) Darstellung des unteren Abschnittes der Probe, welche durch einen Metallstift inklusive Schieberhülsen in der kardanischen Aufhängung befestigt wurde; (b) Ansicht von unten nach oben ins Innere der kardanischen Probenaufhängung.

Für die kardanische Aufhängung musste eine neue Klebehalterung für die Probe hergestellt werden. In der neuen Version wurde auf das Schraubengewinde verzichtet, anstatt dessen wurde die Halterung mit einer Bohrung für einen Stift von einem Millimeter Durchmesser versehen. Der Stift wird im inneren Ring der kardanischen Aufhängung gelagert montiert und entspricht somit einer der beiden Drehachsen für den Winkelausgleich.

Um die Positionierung der Zugprobe zentriert in der Mitte des inneren Ringes zu gewährleisten und um den Stift selbst gegen mechanische Belastung zu verstärken, wurden zusätzlich größere Schieberhülsen auf den Metallstift hinaufgeschoben. In die kardanische Aufhängung wurde eine durchgehende Ausnehmung für den Metallstift gefräst, die zur Führung der Probe in die Endposition diente und eine weitere Ausnehmung zur Befestigung. Der Metallstift und die verstärkenden Schieberhülsen wurden zusätzlich am Ende mit einem Rollenlagert versehen, um so weitere Bewegungsfreiheiten in allen Richtungen zu ermöglichen (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39:** Detailaufnahme der Zugprobe für die kardanische Aufhängung; (a) Seitenansicht der Zugprobe, welche den seitlichen roten Kupferdraht zur Verbindung der Lötstützstellen zeigt, als auch die 2 mm Bohrungen für die nachfolgende Aufhängung; (b) Vorderansicht der Zugprobe mit den durch die Bohrungen geschobenen Metallstiften; (c) Vorderansicht der Zugprobe mit den Metallstiften inklusive Schiebehülsen und Rollenkugellagern am Ende.

Bei der Zugbeanspruchung der kardanischen Aufhängung mittels Schweißdrähten (Abbildung 37b) wurden deutlich bessere Ergebnisse erzielt als bei dem Prüfaufbau 1 in Abbildung 37a. Es wurden keine Biegespannungen erzeugt, allerdings unterschieden sich die Dehnmessstreifen erheblich in ihrer Steigung. Während dieses Zugversuches kam es bereits bei Maximalkräften von 15 N zu einer Verbiegung der Metallstifte und den Schiebehülsen. Entsprechend dieser Beobachtung wurden die Bohrung und die Metallstifte plus Schiebehülsen um 1 mm vergrößert. Größere Dimensionen konnten nicht realisiert werden, da der innere Ring eine sehr geringe Wandstärke aufweist. Diese Verbiegung könnte eine mögliche Ursache für die unterschiedlich auftretenden Steigungen der Dehnmessstreifen sein. Eine weitere Fehlerquelle könnte die auftretende Torsion, welche aufgrund des starren Schweißdrahtes entsteht, sein. Dementsprechend wurde der Aufbau mit einer zusätzlichen elastischen Schnur flexibler konzipiert (siehe Abbildung 37c).

Zuvor wurde derselbe Aufbau (Abbildung 37b), nur unter Verwendung des stärkeren Metallstifts inklusive Schiebhülsen wiederholt. Dabei kam es zu einer deutlichen Verringerung des Steigungsunterschiedes. Die Anstiege der Dehnmessstreifen unterschieden sich ungefähr um 30% voneinander. Durch den Einsatz der verstärkten Probenaufhängung konnten größere Kräfte im Vergleich zum Versuch zuvor erzielt werden, allerdings waren auch diese bei Maximalkräften von 40 N begrenzt. Für zukünftige Versuche müsste der innere Ring verkleinert oder dickwandiger angefertigt werden, um so durch Verkürzung des gelagerten Mittelstiftes höheren Kräften standzuhalten. Infolgedessen wurde die

Probenaufhängung nicht mehr verändert und hauptsächlich an der Verbindung der Maschine mit der kardanischen Probenaufhängung experimentiert.

In Abbildung 37c wurde eine weitere Option zur Gestaltung des Zugversuchs abgebildet. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus Schweißdrähten und einer flexiblen Schnur an beiden Seiten der Aufhängung. Diese zusätzlich verwendete Schnur hatte die Aufgabe die Flexibilität des Aufbaus im Gegensatz zu den vorherigen Prüfständen zu erhöhen. Nach Auswertung der Daten wurden sehr geringe Veränderungen der Steigungen beobachtet.

Um eine noch größere Flexibilität der Aufhängung zu garantieren wurden die Schweißdrähte komplett durch Schnüre ersetzt (Abbildung 37 d). Die Messergebnisse waren den vorherigen Ergebnissen ähnlich und führten somit zur Erkenntnis, dass nicht die Verbindung von Probenaufhängung zu Maschine die Fehlerquelle darstellte, sondern die Probenbefestigung.

Zur Messung der Dehnung wurden wie schon zuvor im 4 Punkt-Biegeversuch (vgl. Abschnitt 3.3.4) Dehnmessstreifen auf beiden Stirnflächen verwendet. Die Dehnmessstreifen der Zugprobe und der Temperaturkompensations-Probe wurden als Halbbrücke über die Klemmleisten verschaltet. Dafür wurden die Kabel der Zugprobe an die Kontakte 5 & 8 und die Temperaturkompensations-Probe an die Kontakte 12 & 15 angeschlossen. Die durch den Messverstärker eingestellten Parameter werden im Anhang genauer erläutert. Vor dem Messbeginn wurde ein Nullabgleich der DMS Brückenspannung vorgenommen.

Das verwendete Prüfprogramm beinhaltet ebenfalls drei Rampen, die bis zur eingestellten Maximalkraft und wieder zurück auf die Vorkraft fahren. Im Vergleich zur 4 Punkt-Biegung wurden hier sofort die Dehnungen aufgezeichnet, somit musste nur mehr die Spannung über die Beziehung

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (19)$$

bestimmt werden, wobei  $F$  die Zugkraft und  $S_0$  den Anfangsquerschnitt beschreiben. Nun konnte ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm gezeichnet werden, aus dem über die Steigung der Elastizitätsmodul berechnet wurde.

---

## 4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel wird das elastische Verhalten der untersuchten Werkstoffe durch die Auswertung von Spannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt. Die unterschiedlichen Dickenverhältnisse der Proben, als auch die Bulkproben mit den Kompositen werden mittels Histogramm verglichen. Die Messergebnisse der verschiedenen statischen Messmethoden (3 Punkt-, 4 Punkt-Biegeversuch und Zugversuch) werden sowohl mit den bereits vorhandenen dynamischen Messergebnissen (aus Tabelle 5) als auch untereinander verglichen.

Die Bezeichnung „DMS“ in den Diagrammen bezieht sich auf die gemessenen Dehnungen durch den jeweiligen Dehnmessstreifen. Es wurden pro Probe maximal zwei DMS verwendet, die als DMS 1 und DMS 2 benannt wurden. In dieser Arbeit versteht man unter dem Begriff Elastizitätsmodul immer den Anstieg der Hooke'schen Gerade im linear elastischen Bereich. Der Elastizitätsmodul wird stets als Mittelwert der gemessenen Werte angegeben.

### 4.1 Ergebnisse der Durchbiegung (Wegaufnehmer)

#### 4.1.1 Vergleich der dünnen und dicken Bulkproben mittels 3 Punkt-Biegung

Bei den Messergebnissen der 3 Punkt-Biegungen handelt es sich um fünf geprüfte Proben pro Werkstoff. Als Proben wurden dicke und dünne Biegeproben herangezogen, wobei die dünnen bzw. dicken Proben eine Dicke von 1 mm bzw. 3 mm betragen. Die untersuchten Werkstoffe waren Aluminium, Siliziumnitrid und  $Y_2O_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid.

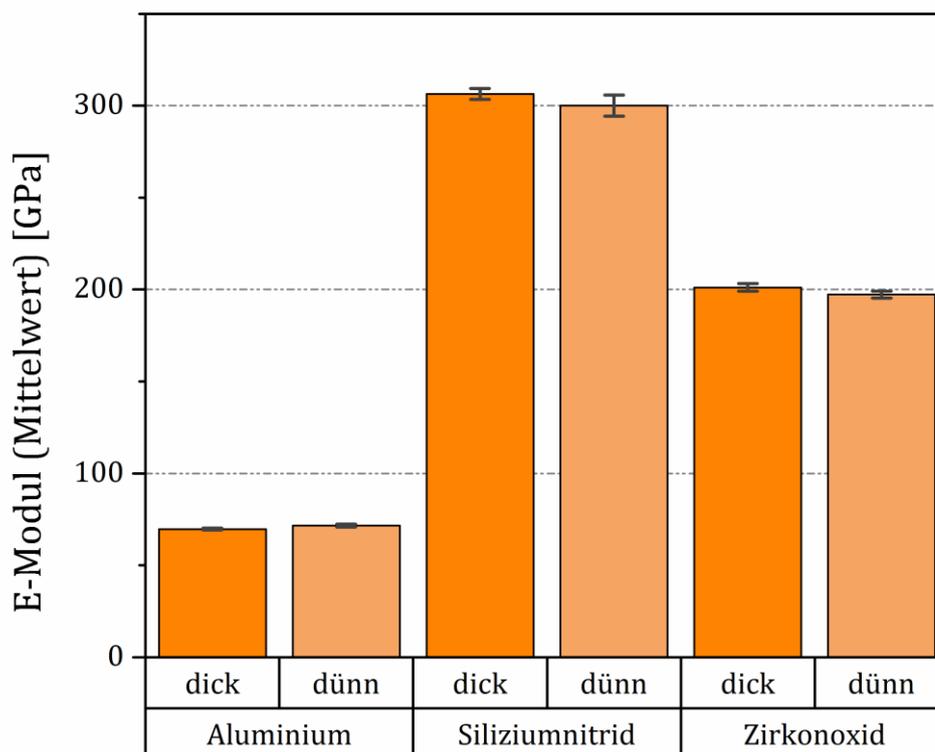
In Abbildung 40 ist das Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit den Standardabweichungen für dünne und dicke Proben der Werkstoffe Aluminium, Siliziumnitrid und Zirkonoxid mittels 3 Punkt-Biegung dargestellt. In der Tabelle 7 und Tabelle 8 werden für die Referenzproben die einzelnen k-Werte der Ausgleichsgeraden und die gemittelten E-Module mit ihren Standardabweichungen angegeben. Die rot markierten Mittelwerte sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Die Messergebnisse der dünnen Proben ergeben ähnliche Ergebnisse wie die der dicken Proben. Die Elastizitätsmodule der dünnen Proben besitzen einen geringfügig höheren Wert als die E-Module der dicken Proben (Tabelle 10). Aluminium stellt die Ausnahme, hier ist der Wert für die dünne Probe mit 69,7 GPa geringer als für die dicke Probe mit 71,6 GPa. Die Standardabweichung zeigt eine geringe Schwankungsbreite für die Elastizitätsmodule. Einzig Siliziumnitrid weist eine höhere Abweichung von höchstens 5,7 % auf. Die anderen Werkstoffe liegen im Bereich von 0,5–2,9 %. Die gemessenen E-Module von Aluminium betragen  $\sim 70$  GPa, von

---

Siliziumnitrid  $\sim 300$  GPa und von  $Y_2O_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid ungefähr 200 GPa. Die Werte stimmen mit den Literaturwerten, die in Tabelle 5 stehen, nahezu überein.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der gemittelten Elastizitätswerte, der maximalen Prüfkraft und der maximalen resultierenden Dehnung eingetragen. Bei den dicken Biegeproben der Werkstoffe Aluminium, Siliziumnitrid und  $Y_2O_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid kommt es bei einer maximalen Prüfkraft von etwa 12 N für Al, 25 N für  $Si_3N_4$  und  $\sim 50$  N für Y-TZP zu einer maximalen Dehnung im Bereich von 10-40  $\mu m/m$ . Die dünnen Biegeproben weisen bei der jeweiligen maximalen Prüfkraft, die zwischen 2 – 8 N liegt, eine maximale Dehnung von ungefähr 80-100  $\mu m/m$  auf. Die dünnen Biegeproben wurden mit geringeren Kräften belastet, aber im Vergleich zu den dicken Proben wesentlich mehr gedehnt. Es kam zu keiner großen Veränderung der Messergebnisse, somit kann durch diese Erkenntnis geschlussfolgert werden, dass dünne Biegeproben trotz größerer Dehnungen denselben Elastizitätsmodul liefern wie dicke Biegeproben.



**Abbildung 40:** Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit Standardabweichungen für dünne und dicke Proben der Werkstoffe Aluminium, Siliziumnitrid und Zirkonoxid mittels 3 Punkt-Biegung (Anzahl der Proben = 5 pro Werkstoff).

**Tabelle 7:** Messergebnisse der dicken Bulkproben mittels 3 Punkt-Biegung mit der Steigung der Ausgleichsgeraden und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den Standardabweichungen.

Probe	k-Wert	E-Modul	E-Modul	Stabw.
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
<b>Aluminium (Al)</b>	540,2	72,5	<b>71,6</b>	<b>0,8</b>
	521,4	71,7		
	536,8	71,9		
	523,9	71,2		
	531,8	70,5		
<b>Siliziumnitrid (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)</b>	2044,5	307,5	<b>300,1</b>	<b>5,7</b>
	2026,3	299,4		
	2019,0	303,8		
	2001,2	296,8		
	2026,6	293,0		
<b>Zirkonoxid (Y-TZP)</b>	1308,6	194,0	<b>197,3</b>	<b>1,9</b>
	1279,2	198,5		
	1276,2	198,7		
	1338,3	197,5		
	1278,0	197,7		

**Tabelle 8:** Messergebnisse der dünnen Bulkproben mittels 3 Punkt-Biegung mit der Steigung der Ausgleichsgeraden und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den Standardabweichungen.

Probe	k-Wert	E-Modul	E-Modul	Stabw.
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
<b>Aluminium (Al)</b>	22,0	70,2	<b>69,7</b>	<b>0,5</b>
	22,3	69,9		
	22,7	68,9		
	22,3	69,6		
	22,4	69,9		
<b>Siliziumnitrid (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)</b>	80,7	306,1	<b>306,4</b>	<b>2,9</b>
	81,3	307,7		
	80,8	301,4		
	83,7	308,5		
	83,2	308,2		
<b>Zirkonoxid (Y-TZP)</b>	50,5	199,3	<b>201,1</b>	<b>2,1</b>
	51,4	199,6		
	51,2	201,9		
	51,1	204,4		
	50,0	200,6		

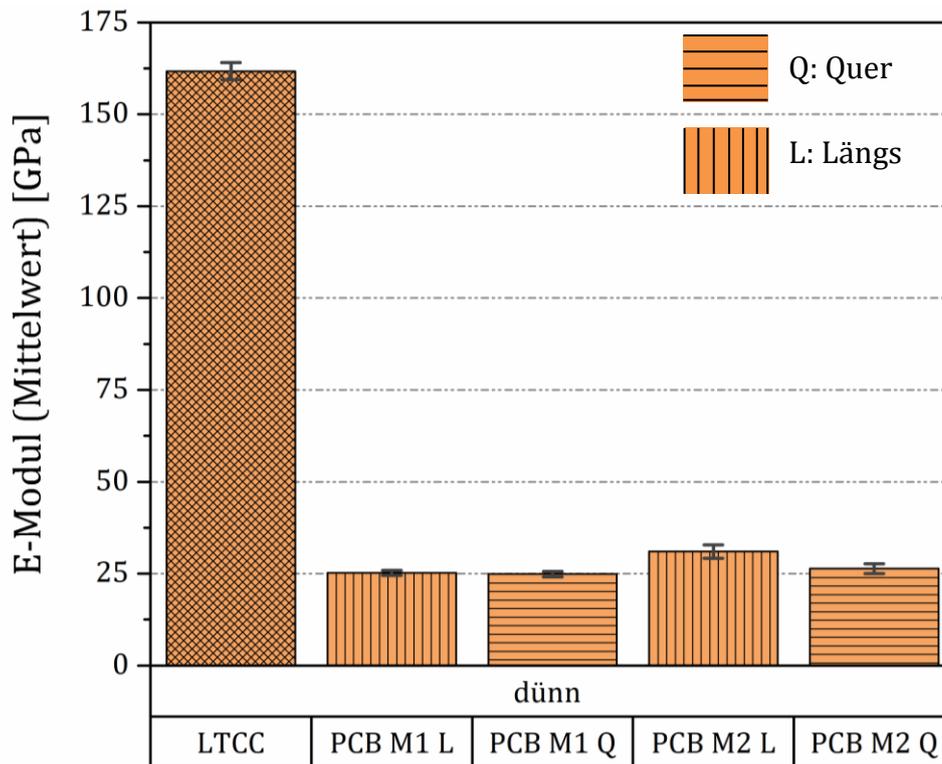
### 4.1.2 Vergleich der dünnen quer/ längs geschnittenen Komposite mittels 3 Punkt-Biegung

Bei den gemessenen Biegeproben handelte es sich ausschließlich um dünne Proben. Es wurden fünf Proben pro Werkstoff geprüft. Dabei wurden die Komposite LTCC und PCB untersucht. Bei den PCBs wurde zwischen längs und quer geschnittenen Proben der Materialien 1 & 2 unterschieden. Bei den LTCC wurde eine Glas-Keramik-Komposite mit ca. 40% Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und 60% Glas herangezogen. In Abbildung 41 ist das Histogramm der gemessenen Elastizitätsmodule von dünnen Proben der Komposite LTCC und PCB mittels durchgeführter 3 Punkt-Biegung zu sehen. Es ist ein großer Unterschied zwischen den beiden Kompositen zu erkennen. Die PCBs liegen im Bereich von 25-30 GPa, während die LTCC einen Elastizitätsmodul von ungefähr 160 GPa aufweist. Um die Werte für die PCB-Proben untereinander besser vergleichen zu können, wurden die Messergebnisse in Abbildung 42 noch einmal gesondert dargestellt. Die PCBs des Materials 1 weisen in Längs- und Querrichtung ungefähr dieselben Elastizitätsmodule auf. Bei den PCBs des Materials 2 konnte mittels 3 Punkt-Biegungen ein Unterschied in der Faserrichtung nachgewiesen werden. Die längsgeschnittenen PCBs des Materials 2 weisen entsprechend der Messergebnisse einen höheren Faseranteil auf und sind somit steifer als die quergeschnittenen PCBs desselben Materials.

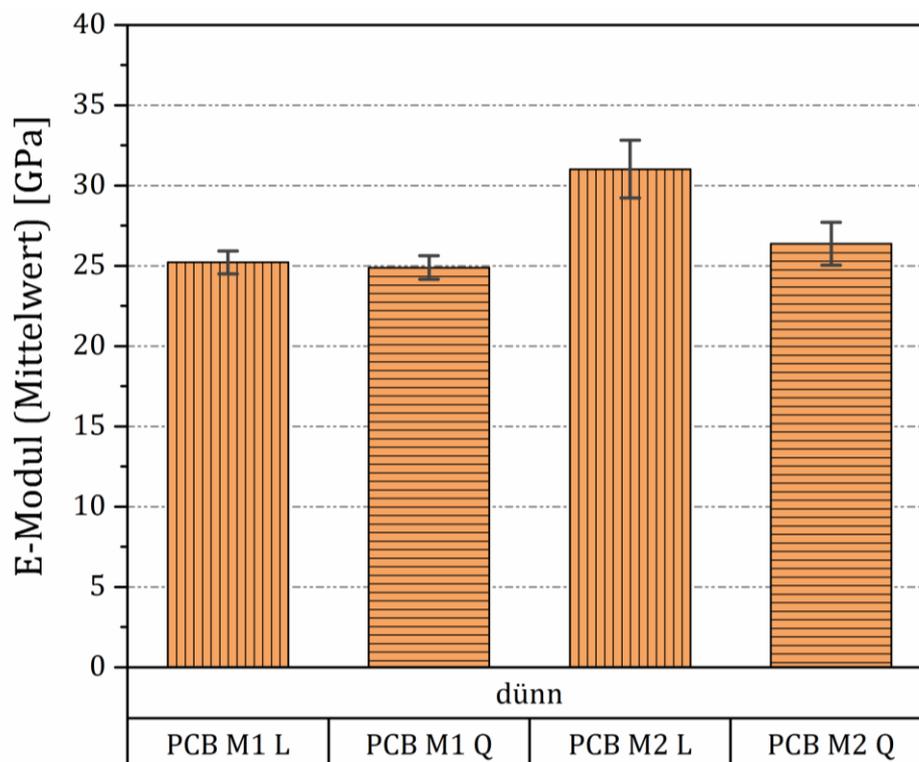
In Tabelle 9 werden für die Komposite LTCC und PCB die einzelnen k-Werte der Ausgleichsgeraden und die gemittelten E-Module mit ihren Standardabweichungen angegeben. Die rot markierten Mittelwerte sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

In Tabelle 10 sind zusätzlich die maximalen Prüfkräfte und Dehnungen eingetragen. Anhand dieser Werte ist zu erkennen, dass sich die PCBs aufgrund ihrer Kunststoffmatrix wesentlich elastischer als die LTCC-Proben verhalten, welche auf keramischer Basis aufgebaut sind. Die maximalen Dehnungen der LTCCs betragen bei 4 N ungefähr  $80 \mu\text{m}/\text{m}$ . Im Vergleich dazu liegen die Dehnungen der PCB-Proben des Materials 1 bei Prüfkräften von 7 N ungefähr bei  $700 \mu\text{m}/\text{m}$ . Beim Material 2 wurde in Längsrichtung ein höherer Elastizitätsmodul als in Querrichtung gemessen, wodurch sich seine Steifigkeit auf die Dehnung der Probe auswirkt. Die längsgeschnittene Biegeprobe weist somit maximale Dehnungen von  $953 \mu\text{m}/\text{m}$  auf, während bei der quergeschnittenen Probe Dehnungen im Bereich von  $581 \mu\text{m}/\text{m}$  beobachtet wurden. Dies stützt die Annahme, dass der Faseranteil in Querrichtung geringer als in Längsrichtung ist.

---



**Abbildung 41:** Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit Standardabweichungen für dünne Proben der Komposite LTCC und PCB mittels 3 Punkt-Biegung (Anzahl der Proben = 5 pro Komposit).



**Abbildung 42:** Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit Standardabweichungen für dünne Proben der Komposite PCB mittels 3 Punkt-Biegung (Anzahl der Proben = 5 pro PCB).

**Tabelle 9:** Messergebnisse der dünnen Komposite (LTCC, PCB) mittels 3 Punkt-Biegung mit der Steigung der Ausgleichsgeraden und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den Standardabweichungen.

<b>Probe</b>	<b>k-Wert</b>	<b>E-Modul</b>	<b>E-Modul</b>	<b>Stabw.</b>
	<b>[-]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[GPa]</b>
<b>LTCC</b>	47,4	163,1	<b>161,8</b>	<b>2,4</b>
	47,2	161,2		
	47,6	158,0		
	48,9	162,5		
	48,5	164,0		
<b>PCB M1 L</b>	10,1	25,2	<b>25,2</b>	<b>0,7</b>
	10,5	26,3		
	9,2	24,6		
	9,9	25,4		
	9,3	24,5		
<b>PCB M1 Q</b>	9,3	24,7	<b>24,9</b>	<b>0,7</b>
	9,4	25,6		
	9,5	25,3		
	9,1	23,7		
	9,4	25,1		
<b>PCB M2 L</b>	14,3	33,5	<b>31,0</b>	<b>1,8</b>
	13,2	29,1		
	13,5	30,7		
	14,1	32,1		
	13,2	29,7		
<b>PCB M2 Q</b>	11,9	27,8	<b>26,4</b>	<b>1,3</b>
	10,3	24,8		
	11,1	26,1		
	10,7	25,5		
	11,7	27,7		

**Tabelle 10:** Zusammenfassung der Messergebnisse der 3 Punkt-Biegung.

Werkstoff	Probenbezeichnung	Abmessungen	Versuchstyp	max. Kraft	E-Modul	ABW	max. Dehnung
		[mm]		[N]	[GPa]	$\sigma_x$	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
Aluminium (Al)	Al_dick	4 x 3 x 50	3PB	12	71,6	0,79	23
	Al_dünn	4 x 1 x 50	3PB	2	69,7	0,5	79
Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	Si3N4_dick	4 x 3 x 50	3PB	25	300,1	5,7	13
	Si3N4_dünn	4 x 1 x 50	3PB	8	306,4	2,9	97
Y2O3-stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP)	TZP_dick	4 x 3 x 50	3PB	50	197,3	1,9	38
	TZP_dünn	4 x 1 x 50	3PB	5	201,1	2,1	96
Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC)	LTCC_dünn	5 x 1 x 50	3PB	4	161,8	2,4	82
Polymer Printed Circuit Board (PCB)	PCB_M1_längs_dünn	5 x 1 x 50	3PB	7	25,2	0,7	696
	PCB_M1_quer_dünn	5 x 1 x 50	3PB	7	24,9	0,7	700
	PCB_M2_längs_dünn	5 x 1 x 50	3PB	7	31,0	1,8	953
	PCB_M2_quer_dünn	5 x 1 x 50	3PB	7	26,4	1,3	581

## 4.2 Ergebnisse der relativen Längenänderung (DMS)

### 4.2.1 Vergleich der dünnen und dicken Bulkproben mittels 4 Punkt-Biegung

Bei den 4 Punkt-Biegungs-Experimenten wurde pro Werkstoff nur eine Biegeprobe gemessen. Als untersuchte Werkstoffe wurden Aluminium, Siliziumnitrid und  $Y_2O_3$ -stabilisiertes Zirkonoxid verwendet. In Abbildung 43 ist das Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit ihren Standardabweichungen für dünne Proben der Werkstoffe Aluminium, Siliziumnitrid und Zirkonoxid mittels 4 Punkt-Biegeversuch dargestellt. Bei den Standardabweichungen handelt es sich um die Messwiederholungen der einen geprüften Probe.

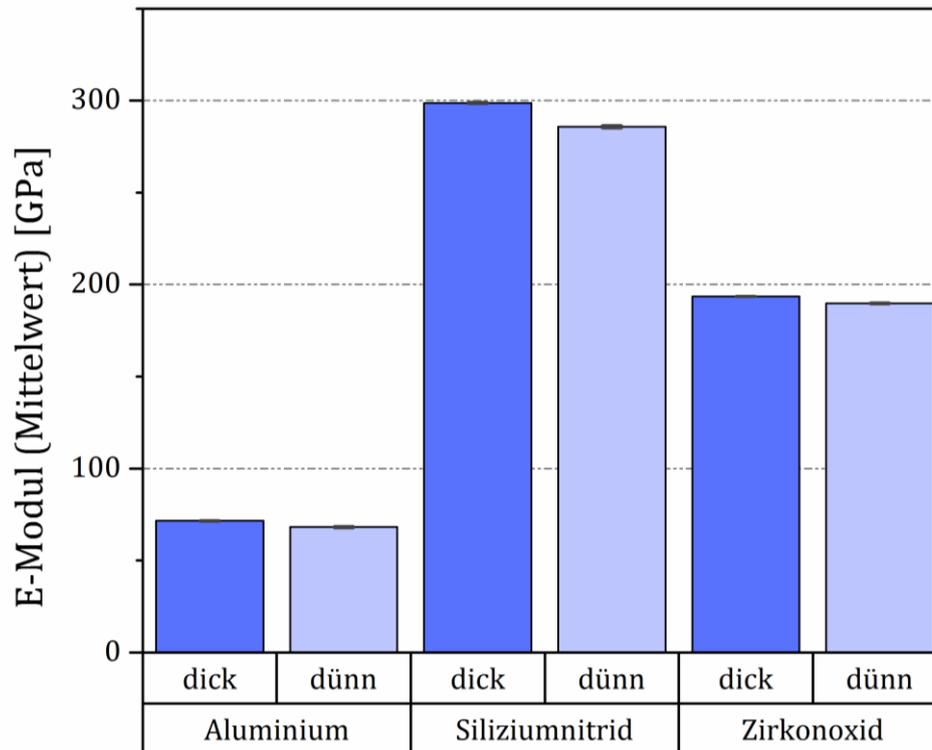
Beim Vergleich der dünnen mit den dicken Biegeproben erkennt man in Abbildung 43 keinen großen Unterschied zwischen den Messergebnissen. Die Werte der Elastizitätsmodule sind fast identisch, größere Abweichungen können nur bei Siliziumnitrid bemerkt werden (Abbildung 43). Bei exakter Betrachtung der Elastizitätsmodule in Tabelle 14 erkennt man, dass die dünnen Proben geringfügig kleinere Werte aufweisen als die dicken Proben. Die dünnen Biegeproben wurden, wie bei der 3 Punkt-Biegung, mit geringeren Kräften belastet, verglichen mit den dicken Proben aber trotzdem wesentlich mehr gedehnt. Die Annahme, dass die Applikation der DMS sich bei dünnen Proben mehr versteifend auswirkt als bei den dicken Proben, ließ sich nicht bestätigen. Die dünnen Biegeproben wiesen bei Maximalprüfkräften von 6 N – 35 N maximale Dehnungen von 200 - 800  $\mu\text{m}/\text{m}$  auf. Die Prüfkräfte für die dicken Biegeproben lagen im Bereich von 35 N bis 90 N und erzeugten maximale Dehnungen von 280 bis 780  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Vergleicht man 3 Punkt-Biegung mit 4 Punkt-Biegung ergibt sich der exakt umgekehrte Zusammenhang zwischen dünnen und dicken Proben mit Ausnahme von Aluminium, welches annähernd gleiche Werte aufweist. Obwohl bei der 4 Punkt-Biegung die Probenmitte auf beiden Seiten mit Dehnmesstreifen verstärkt wurde, konnte keine Versteifung gegenüber den 3 Punkt-Biegeproben beobachtet werden. Für die hier untersuchten Materialien kommt es durch die Applikation der DMS bei den genannten Probengeometrien zu keinem merkbaren Einfluss auf das Experiment.

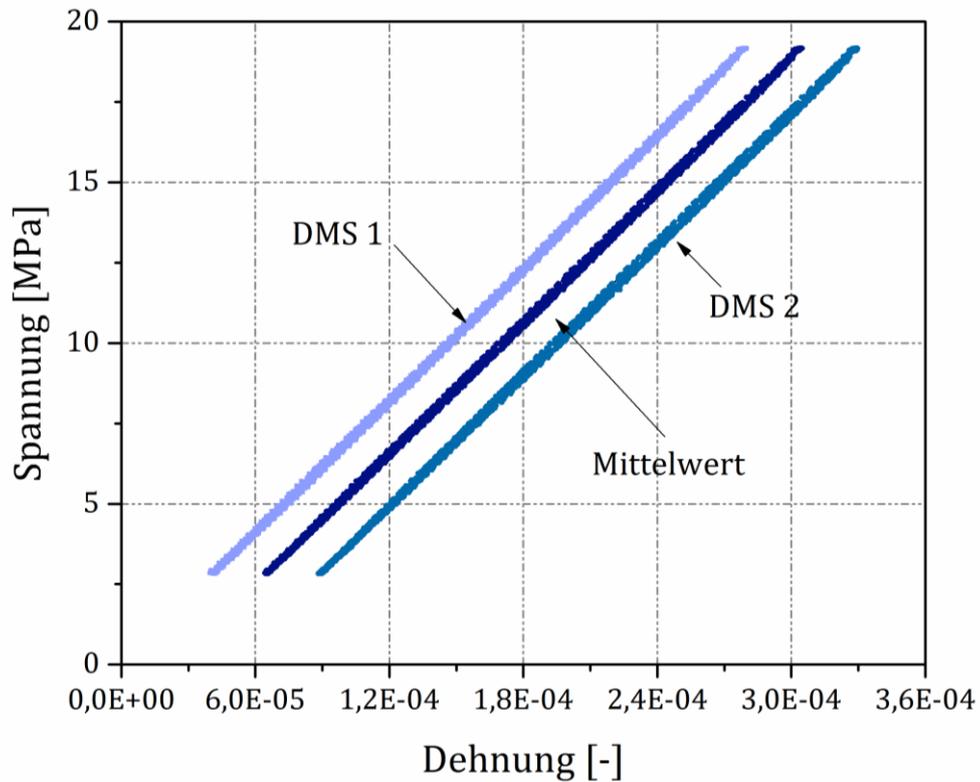
Der E-Modul wurde getrennt für die beiden DMS und jeden Belastungsschritt einzeln ermittelt und in Tabelle 11 & Tabelle 12 eingetragen. Abschließend wird für die gesammelten Werte pro Versuch und Probe ein Mittelwert mit Standardabweichung angegeben (rot markierte Werte) (siehe Tabelle 14). Die Standardabweichung gibt hier also ein Maß für die Wiederholbarkeit eines Versuches an.

In der Abbildung 44 und Abbildung 45 wurden als Beispiele die ausgewerteten Spannungs-Dehnungs-Kurven für den Werkstoff Aluminium und Siliziumnitrid dargestellt. In diesen Diagrammen sind jeweils drei Geraden ersichtlich, je eine für

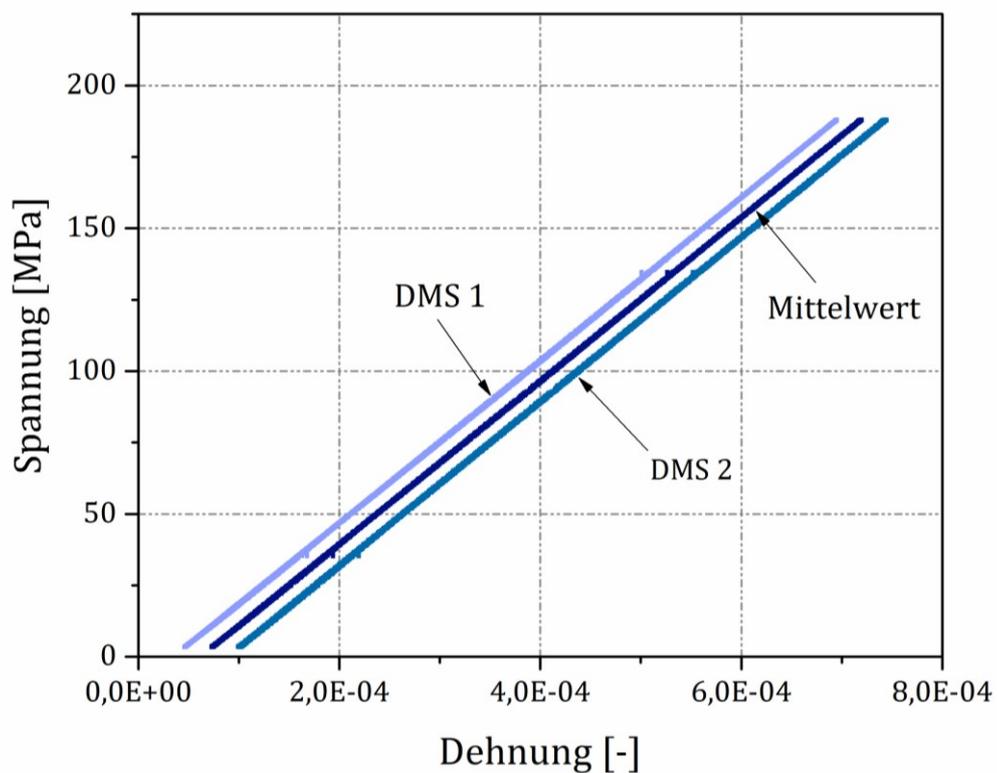
die gemessenen Dehnungen des DMS 1 und DMS 2 sowie für die gemittelten der beiden DMS. Die Steigungen der zwei DMS besitzen annähernd dieselben Werte und unterscheiden sich voneinander (DMS 1 zu DMS 2) maximal um 1,3 % bei den dünnen Proben bzw. 1,8 % bei den dicken Proben (Tabelle 11 und Tabelle 12). Die rot markierten Werte sind die aufgetragenen Elastizitätsmodul-Mittelwerte in den Diagrammen. Der Abstand zwischen den Geraden ist auf Grund des Offsets während der Messungen entstanden.



**Abbildung 43:** Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit Standardabweichungen für dünne Proben der Werkstoffe Aluminium, Siliziumnitrid und Zirkonoxid mittels 4 Punkt Biegung (Anzahl der Proben = 1 pro Werkstoff).



**Abbildung 44:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer dünnen Aluminium-Biegeprobe mit den gemessenen Kurven des DMS 1, DMS 2 und der gemittelten Kurve dieser beiden.



**Abbildung 45:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer dicken Siliziumnitrid-Biegeprobe mit den gemessenen Kurven des DMS 1, DMS 2 und der gemittelten Kurve dieser beiden.

**Tabelle 11:** Messergebnisse der dünnen Bulkproben mittels 4 Punkt-Biegung mit den unterschiedlichen Steigungen der DMS und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den prozentuellen Unterschieden und Standardabweichungen.

Probe	E-Modul (DMS 1)	E-Modul (DMS 2)	Mittelwert E-Modul	$\Delta$	E-Modul	Stabw.
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[GPa]
<b>Aluminium (Al)</b>	68,4	68,4	68,4	0,1 %	<b>68,2</b>	<b>0,3</b>
	68,0	68,6	68,3	0,8 %		
	68,1	68,6	68,4	0,7 %		
	67,3	68,1	67,7	1,2 %		
	67,4	68,2	67,8	1,3 %		
	68,0	68,5	68,3	0,8 %		
	68,2	68,7	68,5	0,8 %		
<b>Siliziumnitrid (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)</b>	286,5	283,7	285,1	1,0 %	<b>285,8</b>	<b>0,6</b>
	287,5	284,8	286,1	1,0 %		
	287,4	284,9	286,1	0,9 %		
<b>Zirkonoxid (Y-TZP)</b>	189,6	189,6	189,6	0,01 %	<b>189,7</b>	<b>0,2</b>
	190,7	189,3	190,0	0,7 %		
	190,0	189,4	189,7	0,3 %		
	189,9	189,2	189,6	0,4 %		
	190,2	189,4	189,8	0,4 %		

**Tabelle 12:** Messergebnisse der dicken Bulkproben mittels 4 Punkt-Biegung mit den unterschiedlichen Steigungen der DMS und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den prozentuellen Unterschieden und Standardabweichungen.

Probe	E-Modul (DMS 1)	E-Modul (DMS 2)	Mittelwert E-Modul	$\Delta$	E-Modul	Stabw.
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[GPa]
<b>Aluminium (Al)</b>	71,2	72,1	71,7	-1,3 %	<b>71,5</b>	<b>0,1</b>
	71,2	71,9	71,5	-1,0 %		
	71,0	71,9	71,5	-1,1 %		
<b>Siliziumnitrid (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)</b>	298,7	298,0	298,4	0,2 %	<b>298,8</b>	<b>0,3</b>
	299,5	298,2	298,8	0,4 %		
	299,8	298,3	299,0	0,5 %		
<b>Zirkonoxid (Y-TZP)</b>	194,9	192,1	193,5	1,5 %	<b>193,5</b>	<b>0,01</b>
	195,2	191,8	193,5	1,8 %		
	194,8	192,2	193,5	1,4 %		

#### 4.2.2 Vergleich der dünnen quer/-längs geschnittenen Komposite mittels 4 Punkt-Biegung

Zur Prüfung der Komposite wurden für die LTCC eine und für die PCB zwei Biegeproben angefertigt. Die PCB wurde wieder in Material 1 & 2 und der Schneidrichtung in längs & quer unterteilt. In Abbildung 46 ist das Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit ihren Standardabweichungen für dünne Proben der Komposite LTCC und PCB mittels 4 Punkt-Biegung dargestellt.

Wie in Abbildung 46 ersichtlich, ist ein großer Unterschied zwischen den verschiedenen aufgebauten Kompositen zu erkennen. Die LTCC weist einen Elastizitätsmodul von ungefähr 150 GPa auf, während die PCB Werte von 25-30 GPa besitzen.

Bei der getrennten Darstellung der PCBs ohne die LTCC Komposite werden die Änderungen zwischen den einzelnen Proben in Abbildung 47 klar ersichtlich. Vergleicht man die Biegeproben des gleich geschnittenen Materials untereinander erkennt man, dass nur die Proben des Materials 1 in Querrichtung identische Werte aufweisen. Die anderen Biegeproben besitzen geringfügig verschiedene Elastizitätsmodule, wobei die größte Differenz bei Material 1 in Längsrichtung beobachtet werden kann. Die höchste Standardabweichung wird allerdings bei Material 2 in Längsrichtung gemessen. Stellt man nun die einzelnen Materialien gegenüber misst man beim Material 1 in Längs – und Querrichtung relativ die gleichen Werte für den Elastizitätsmodul. Bei dem Material 2 wurde eine bevorzugte Faserrichtung in der längsgeschnitten Biegeprobe beobachtet, die im Gegensatz zur querpräparierten Probe zu erhöhten Elastizitätsmodulen führt.

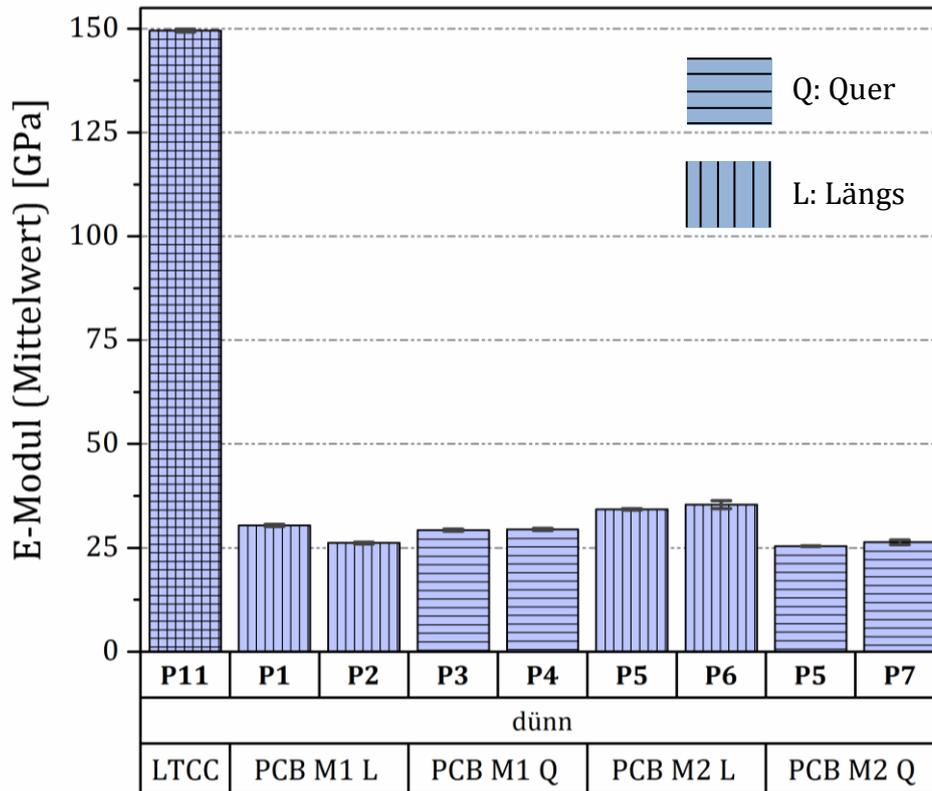
In Tabelle 14 sind die maximalen Prüfkräfte und Dehnungen angegeben. Die LTCC erzeugt bei Prüfkräften von 25 N maximale Dehnungen von  $\sim 800$  GPa. Entsprechend ihres elastischen Aufbaus wurden bei den PCBs Dehnungen im Bereich von 1400 bis 3100  $\mu\text{m}/\text{m}$  bei Belastungen von 10 N gemessen. Im Gegensatz zu den Elastizitätsmodulen der 3 Punkt-Biegung erwiesen sich die E-Module der Biegeproben, die mittels 4 Punkt-Biegung geprüft wurden, als steifer. Diese Tatsache kann durch die Verstärkung der Proben durch beidseitig geklebte Dehnmessstreifen verursacht worden sein. Diese Versteifung konnte bei den keramischen Werkstoffen jedoch nicht festgestellt werden. Dementsprechend könnten nicht nur die Dehnmessstreifen, sondern auch der beklebte/untersuchte Werkstoff eine Rolle bei der Prüfung mittels 4 Punkt-Biegungen spielen.

Zur Veranschaulichung der verschiedenen Komposite bezüglich ihres Aufbaus wurden in Abbildung 48 und Abbildung 49 die Spannungs-Dehnungs-Diagramme dargestellt. Wie in Abbildung 48 zu sehen zeigen die Belastungskurven der PCBs eine Hysterese, es kommt jedoch zu keiner bleibenden plastischen Verformung, da die Anfangs- und Endpunkte der Belastungskurve deckungsgleich sind. Im Vergleich zu den PCBs besitzen die LTCCs dasselbe lineare Verhalten, wie die oben untersuchten

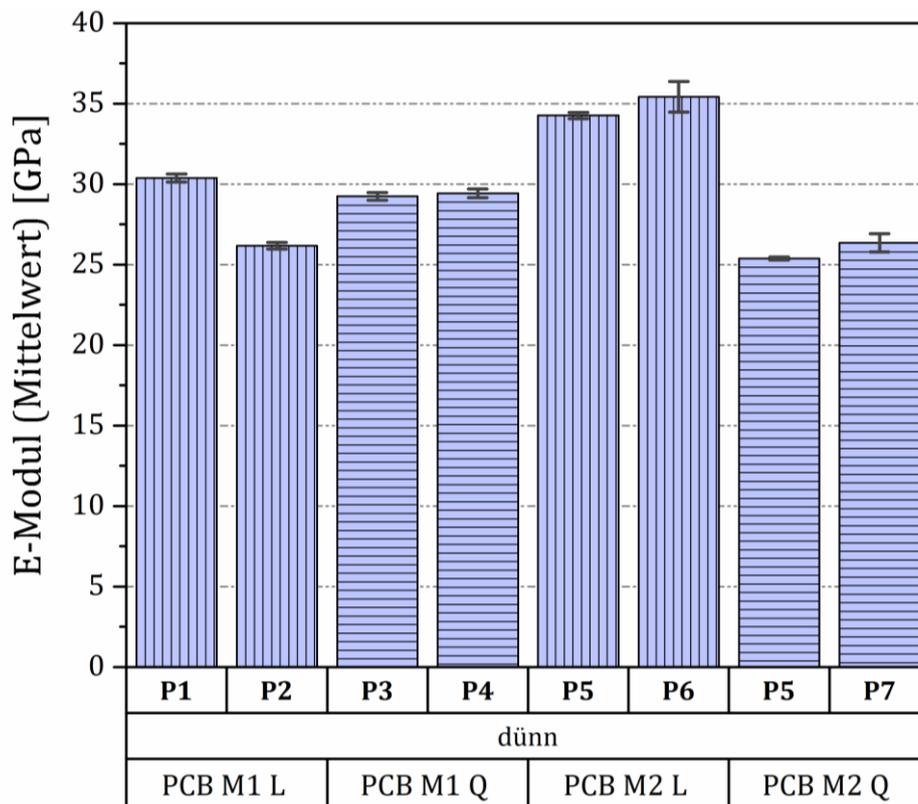
keramischen Werkstoffe (siehe Abbildung 49). Bei den Geraden in den Diagrammen handelt es sich um die gemessenen Dehnungen des DMS 1 sowie des DMS 2 und den gemittelten Dehnungen dieser beiden.

In Tabelle 13 sind die gemessenen Steigungen des DMS 1 und DMS 2 sowie die gemittelten E-Module der beiden DMS und der prozentuelle Unterschied (DMS 1 zu DMS 2) als auch die Standardabweichungen angegeben. Die Standardabweichungen liegen bei Werten von höchstens 0,6 GPa. Die prozentuellen Unterschiede zwischen den Steigungen der jeweiligen DMS betragen 0,2-3,4%. Ausreißer sind im Material 2 in Längsrichtung und ebenfalls in Querrichtung mit 9,3% und 4,4% zu finden. Die rot markierten Elastizitätsmodule sind die gemittelten E-Module in Tabelle 14.

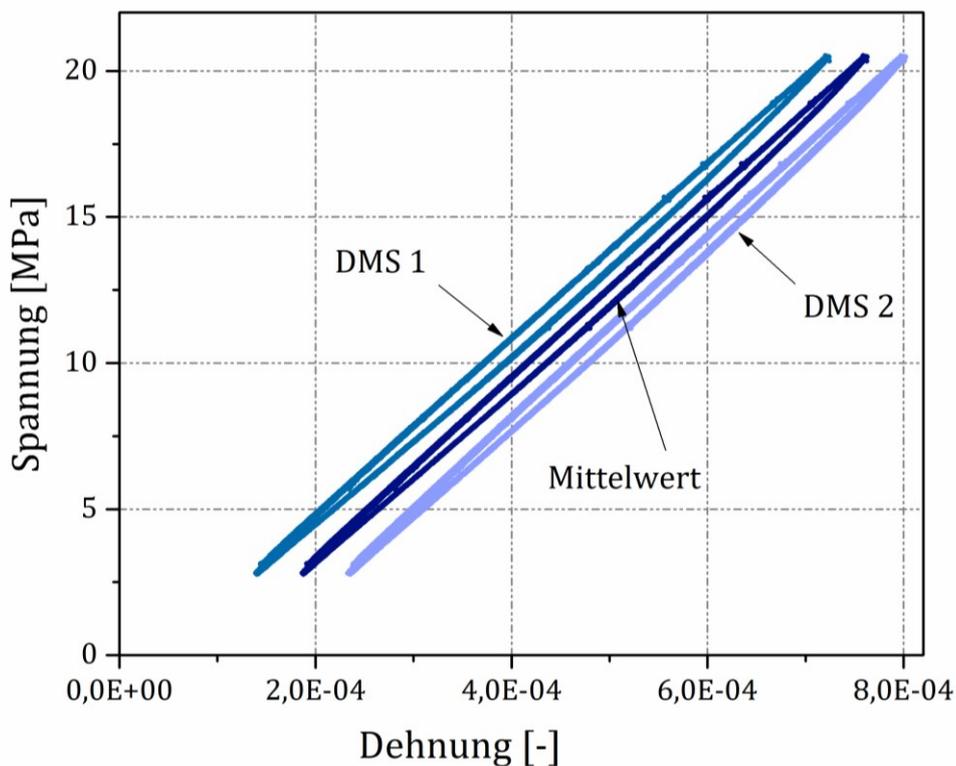
---



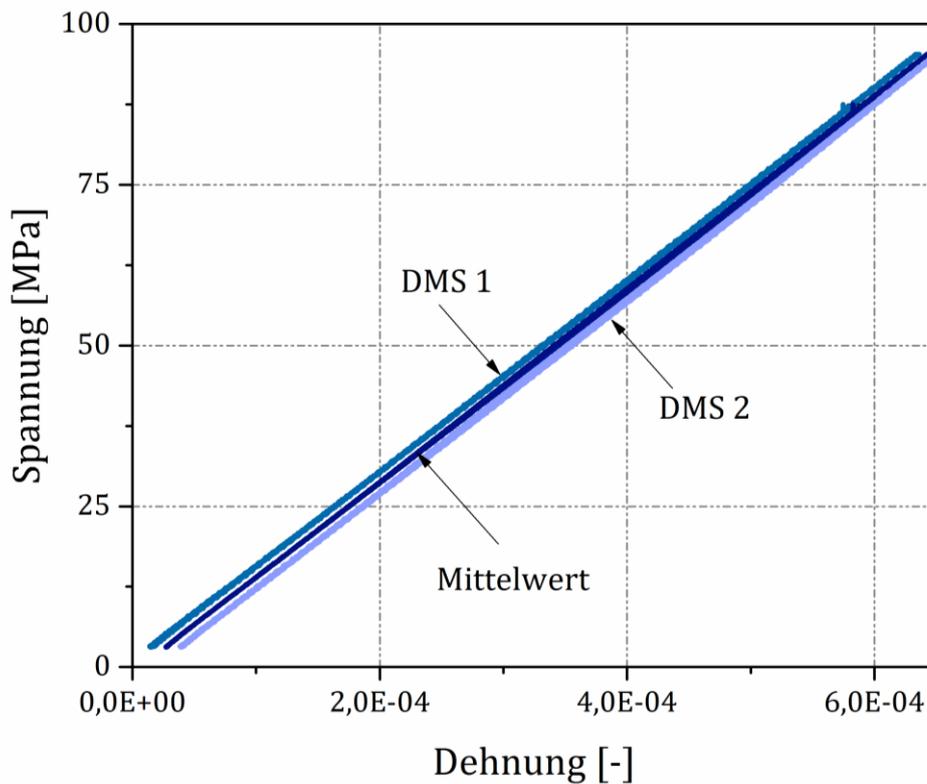
**Abbildung 46:** Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit Standardabweichungen für dünne Proben der Komposite LTCC und PCB; ermittelt über 4 Punkt-Biegung (Anzahl der Proben = 2 pro PCB und 1 pro LTCC).



**Abbildung 47:** Histogramm der gemittelten Elastizitätsmodule mit Standardabweichungen für dünne Proben der Komposite PCB; ermittelt über 4 Punkt-Biegung (Anzahl der Proben = 2 pro PCB).



**Abbildung 48:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines längsgeschnitten dünnen PCBs aus Materials 1; gemessene Dehnungskurven des DMS 1, DMS 2 und gemittelte Kurve dieser beiden.



**Abbildung 49:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm der dünnen LTCC-Probe; gemessene Dehnungskurven des DMS 1, DMS 2 und gemittelte Kurve dieser beiden.

**Tabelle 13:** Messergebnisse der dünnen Komposite (LTCC, PCB) mittels 4 Punkt-Biegung mit den unterschiedlichen Steigungen der DMS und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den prozentuellen Unterschieden und Standardabweichungen.

Probe	E-Modul (DMS 1)	E-Modul (DMS 2)	Mittelwert E-Modul	$\Delta$	E-Modul	Stabw.
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[GPa]
<b>LTCC</b>						
P11	148,2	150,2	149,2	1,3 %	<b>149,6</b>	<b>0,3</b>
	148,6	150,5	149,6	1,2 %		
	148,9	150,9	149,9	1,3 %		
	148,2	150,2	149,2	1,3 %		
	148,6	150,5	149,6	1,2 %		
	148,9	150,9	149,9	1,3 %		
<b>PCB M1 L</b>						
P1	29,6	30,5	30,1	3,1 %	<b>30,4</b>	<b>0,3</b>
	29,8	30,8	30,3	3,3 %		
	30,1	31,0	30,6	3,0 %		
	30,1	31,0	30,6	2,9 %		
P2	25,7	26,5	26,1	3,0 %	<b>26,2</b>	<b>0,2</b>
	26,0	26,8	26,4	3,1 %		
	25,6	26,5	26,0	3,4 %		
<b>PCB M1 Q</b>						
P3	29,1	29,5	29,3	1,1 %	<b>29,2</b>	<b>0,2</b>
	29,3	29,6	29,5	1,2 %		
	28,7	29,2	29,0	1,7 %		
P4	29,4	29,4	29,4	0,2 %	<b>29,4</b>	<b>0,3</b>
	29,1	29,3	29,2	0,7 %		
	29,7	29,8	29,7	0,5 %		
<b>PCB M2 L</b>						
P5	32,6	35,9	34,2	9,1 %	<b>34,3</b>	<b>0,2</b>
	32,8	36,1	34,4	9,0 %		
	32,4	35,6	34,0	9,1 %		
	32,7	36,1	34,4	9,3 %		
P6	36,3	35,8	36,1	1,6 %	<b>35,4</b>	<b>1,0</b>
	34,6	34,0	34,3	1,8 %		
	36,1	35,6	35,9	1,5 %		
<b>PCB M2 Q</b>						
P5	25,6	25,3	25,5	1,3 %	<b>25,4</b>	<b>0,1</b>
	25,4	25,3	25,3	0,5 %		
P7	26,1	27,4	26,8	4,4 %	<b>26,4</b>	<b>0,6</b>
	25,4	26,5	25,9	4,3 %		

**Tabelle 14:** Zusammenfassung der Messergebnisse der 4 Punkt-Biegeversuche.

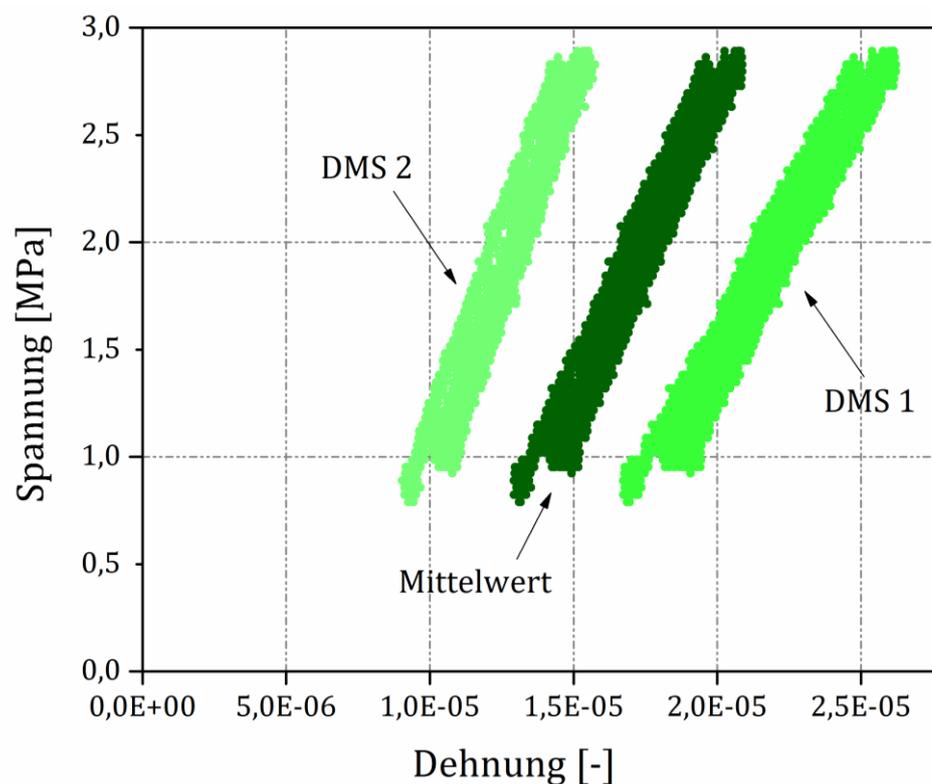
Werkstoff	Probenbezeichnung	Abmessungen [mm]	Versuchstyp	max. Kraft [N]	E-Modul [GPa]	ABW $\sigma_x$	max. Dehnung [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
Aluminium (Al)	Al_dick	4 x 3 x 50	4PB	35	71,6	0,10	770,5
	Al_dünn	4 x 1 x 50	4PB	6	68,2	0,31	501,3
Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	Si3N4_dick	4 x 3 x 50	4PB	90	298,8	0,34	208,7
	Si3N4_dünn	4 x 1 x 50	4PB	35	285,8	0,58	719,9
Y2O3-stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP)	TZP_dick	4 x 3 x 50	4PB	90	193,5	0,01	274,9
	TZP_dünn	4 x 1 x 50	4PB	20	189,7	0,17	673,8
Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC)	LTCC_dünn	5 x 1 x 50	4PB	25	149,6	0,33	802,7
Polymer Printed Circuit Board (PCB)	PCB_M1_Längs_dünn	5 x 1 x 50	4PB	10	30,4	0,3	1450,2
		5 x 1 x 50	4PB	10	26,2	0,2	1436,2
	PCB_M1_Quer_dünn	5 x 1 x 50	4PB	10	29,2	0,2	1513,0
		5 x 1 x 50	4PB	10	29,4	0,3	1576,3
	PCB_M2_Längs_dünn	5 x 1 x 50	4PB	10	34,3	0,2	1286,8
		5 x 1 x 50	4PB	10	35,4	1,0	1233,9
	PCB_M2_Quer_dünn	5 x 1 x 50	4PB	10	25,4	0,1	3091,2
	5 x 1 x 50	4PB	10	26,4	0,6	1707,0	

### 4.3 Ergebnisse des Zugversuchs

Die Messergebnisse des Zugversuches werden anhand ihres unterschiedlichen Aufbaus, der aus Schweißdrähten, einer Kombination aus Schweißdrähten und Schnur sowie nur aus Schnüren besteht unterteilt. Die Prüfaufbauten werden in Prüfaufbau 1, 2 und 3 gekennzeichnet. Die unterschiedlichen Methoden werden in den weiteren Abschnitten im Detail betrachtet. Zur Durchführung der Zugversuche wurde eine Siliziumnitrid-Probe mit beidseitig beklebten Dehnmessstreifen angefertigt.

#### 4.3.1 Zugversuch mit Prüfaufbau 1: Schweißdrähte

Die Messergebnisse sind in der Tabelle 15 angegeben. Dabei handelt es sich um die gemessenen Steigungen des DMS 1 und DMS 2, als auch um den daraus gemittelten Elastizitätsmodul. Die Abweichung zum Mittelwert des Elastizitätsmoduls beträgt für die beiden DMS jeweils 19,3 %. Der gemittelte Elastizitätsmodul stimmt mit dem Literaturwert in Tabelle 5 fast überein. Zur Veranschaulichung wurden die Messergebnisse zusätzlich noch in Abbildung 50 dargestellt.



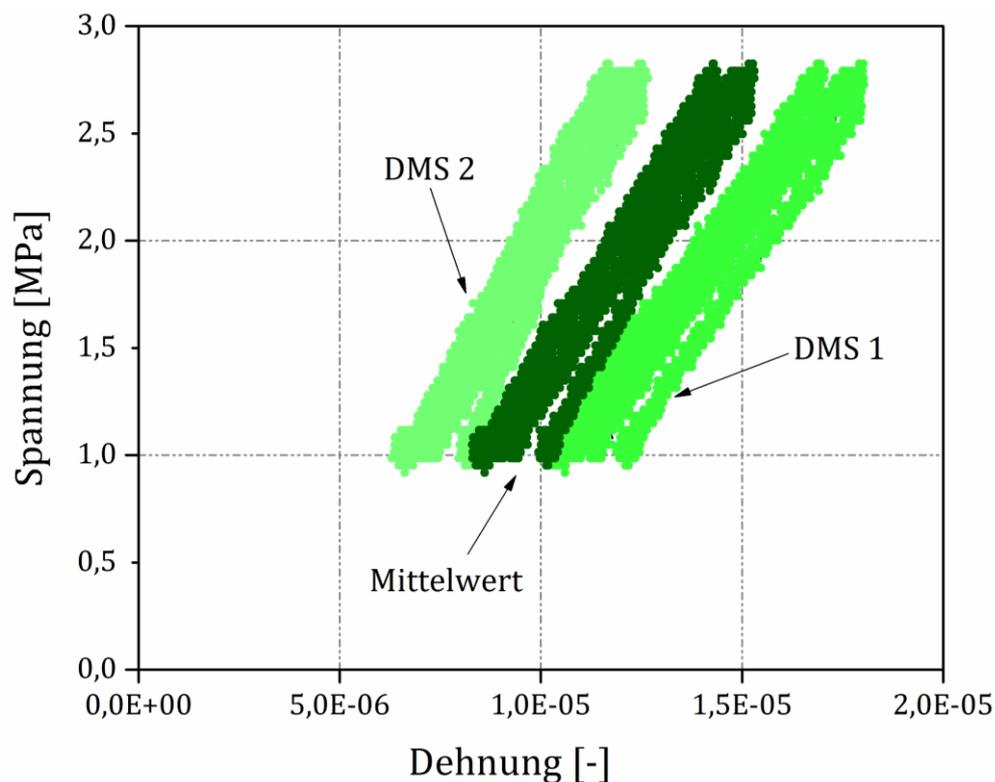
**Abbildung 50:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuches über Schweißdrähte an einer Siliziumnitrid-Probe ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

**Tabelle 15:** Messergebnis des Zugversuches einer dünnen Siliziumnitrid-Probe; Aufbau mit Schweißdrähten; Angabe der unterschiedlichen Steigungen der DMS und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den prozentuellen Unterschieden.

Probe	E-Modul (DMS 1)	E-Modul (DMS 2)	Mittelwert E-Modul	$\Delta$
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
Siliziumnitrid	242,2	357,9	300,1	19,3

### 4.3.2 Zugversuch mit Prüfaufbau 2: Schweißdraht und Schnur

Die Ergebnisse des Zugversuches mit einem Aufbau aus einer Kombination von Schweißdraht und Schnur sind in Tabelle 16 angegeben. Diese besteht aus den Steigungen des jeweiligen DMS sowie aus dem daraus gemittelten Elastizitätsmodul. Die Abweichung zum Mittelwert des Elastizitätsmoduls beträgt für die beiden DMS jeweils 13,7 %. Der gemittelte Elastizitätsmodul liegt mit 297,4 GPa annähernd im Bereich des Literaturwertes (siehe Tabelle 5). Die gemessenen Dehnungen der DMS als auch der berechnete Mittelwert wurde in Abbildung 51 dargestellt.



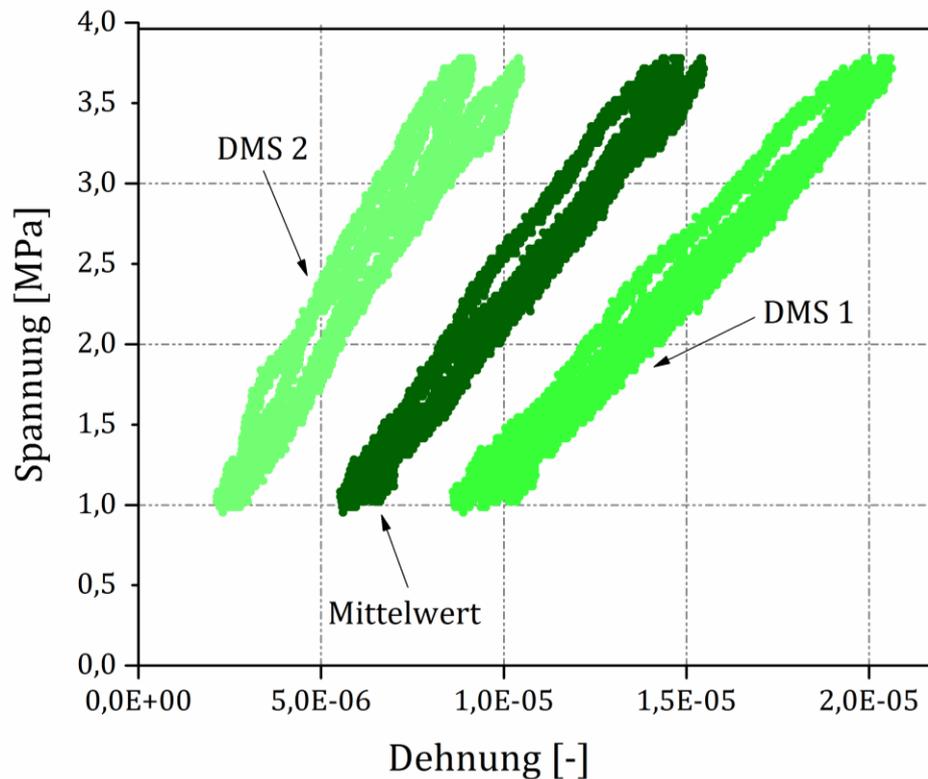
**Abbildung 51:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuches über eine Kombination von Schweißdraht und Schnur an einer Siliziumnitrid-Probe.

**Tabelle 16:** Messergebnis des Zugversuches einer dünnen Siliziumnitrid-Probe; Aufbau mit einer Kombination von Schweißdraht und Schnur; Angabe der unterschiedlichen Steigungen der DMS und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den prozentuellen Unterschieden.

Probe	E-Modul (DMS 1)	E-Modul (DMS 2)	Mittelwert E-Modul	$\Delta$
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
Siliziumnitrid	256,8	338,0	297,4	13,7%

### 4.3.3 Zugversuch mit Prüfaufbau 3: Schnüre

Wie schon zuvor handelt es sich in Tabelle 17 um die gesamten Messergebnisse, wie beispielweise den Steigungen der jeweiligen DMS, dem prozentuellen Unterschied sowie dem gemittelten Elastizitätsmodul. Die Abweichung zum Mittelwert des Elastizitätsmoduls beträgt für die beiden DMS jeweils 20 %. Der gemittelte Elastizitätsmodul beträgt 297,7 GPa. Die Dehnungen der DMS als auch der berechnete Mittelwert wurde in Abbildung 52 dargestellt.



**Abbildung 52:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuches über Schnüre an einer Siliziumnitrid-Probe.

**Tabelle 17:** Messergebnis des Zugversuches einer dünnen Siliziumnitrid-Probe; Aufbau mit Schnüre; Angabe der unterschiedlichen Steigungen der DMS und den gemittelten Elastizitätsmoduln sowie den prozentuellen Unterschieden.

Probe	E-Modul (DMS 1)	E-Modul (DMS 2)	Mittelwert E-Modul	$\Delta$
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
Siliziumnitrid	238,3	357,2	297,7	20 %

## 5 Zusammenfassung der Ergebnisse

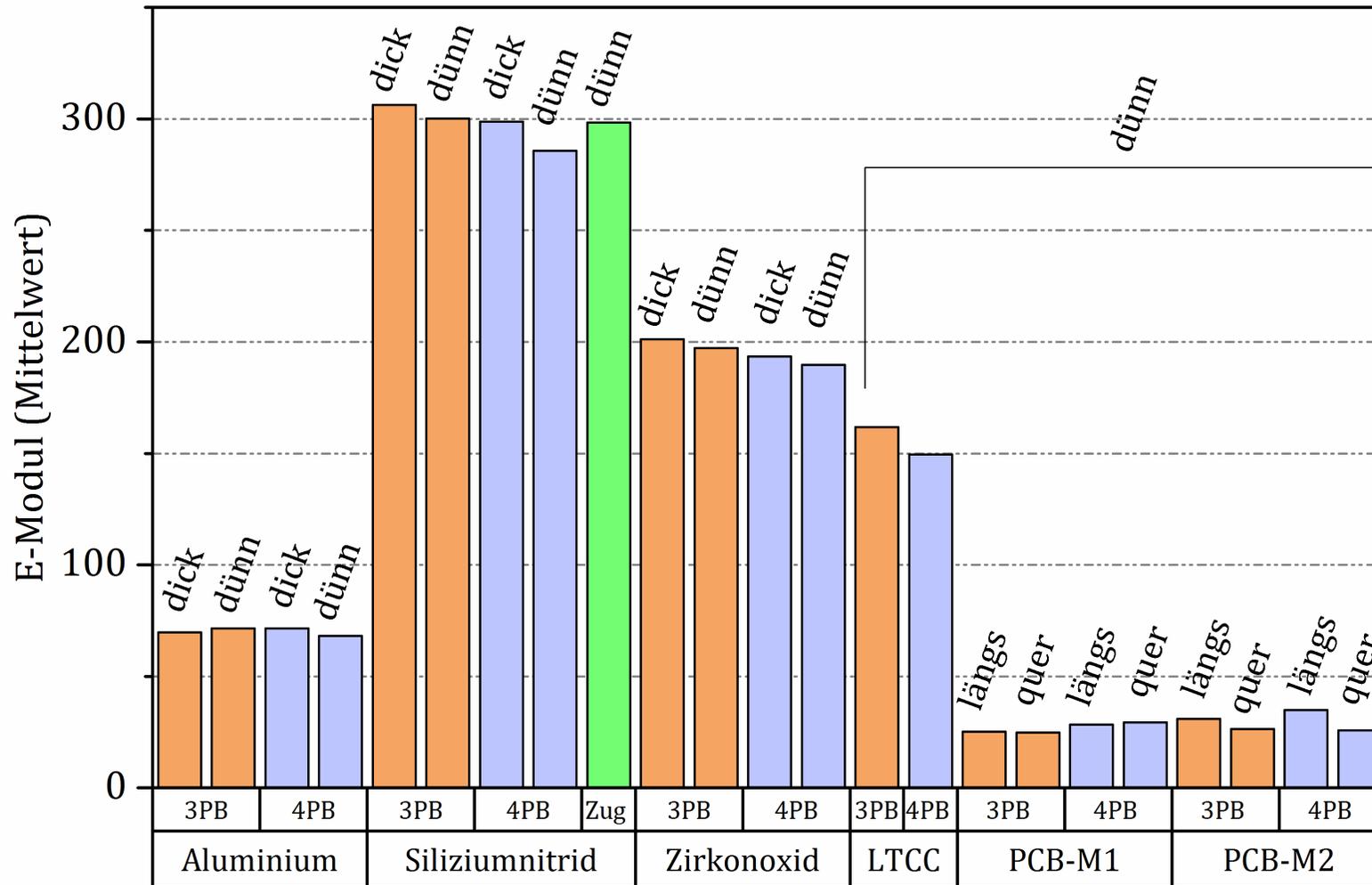
In dieser Arbeit wurde das elastische Verhalten (Elastizitätsmodul) von dünnen keramischen und polymeren Leiterplatten mit Hilfe von statischen Messmethoden ermittelt. Als statische Messmethoden wurden der 3 Punkt- und 4 Punkt-Biegeversuch als auch der Zugversuch herangezogen. Die verwendeten Probengeometrien wurden in dünne und dicke Proben eingeteilt, wobei die „dicken“ Proben den in der Norm standardisierten Abmessungen folgen und die „dünnen“ Proben davon signifikant abweichende Abmessungen von 1 x 4 x 50 mm (h x b x l) haben. Die direkt auf Fertigungslinien der Firma EPCOS OHG, Deutschlandsberg in Österreich erzeugten keramischen und polymeren Leiterplatten standen nur als „dünne“ Proben zur Verfügung. Für die keramische Leiterplatte (LTCC) wurde ein Material verwendet, während für die polymeren PCBs zwei Materialien desselben Gemisches aus faserverstärkten Kunststoffharz und Kupfer herangezogen wurde. Die unterschiedlich angeordneten Fasern könnten die Ergebnisse beeinflussen, wodurch die Proben einmal in Längsrichtung und einmal in Querrichtung aus den erhaltenen Leiterplatten herausgeschnitten wurden. Die Proben der polymeren Leiterplatten wurden somit nach Art des Materials und Schneidrichtung eingeteilt. Beim Ausschneiden der Biegeproben wurden Lötstützpunkte (Metallisierung auf der Oberfläche der Leiterplatte) vermieden, um bei den Biegeversuchen einen unrepräsentativen Einfluss der Metallisierung auf die Randfaserdehnung zu verhindern.

Zu Beginn erfolgten die Messungen des Elastizitätsmoduls an ausgewählten dicken und dünnen Referenzmaterialien, wie Aluminium (Al), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -stabilisiertem Zirkonoxid. Anschließend wurden die dünnen keramischen LTCCs und polymeren PCBs über 3 Punkt- und 4 Punkt-Biegeversuche geprüft. Bei den 3 Punkt-Biegeversuchen wurde die Durchbiegung gemessen, über die mit Hilfe eines Mathematica Programmes die Steigung (k-Wert) einer Ausgleichsgeraden im Kraft-Weg-Diagramm ermittelt und daraus der Elastizitätsmodul berechnet werden konnte. Bei den 4 Punkt-Biegungen wurden die gemessenen elektrischen Spannungen der beiden DMS herangezogen und auf die aktuelle Dehnung umgerechnet. Die Prüfkraft wurde mittels Randfaserspannungsbeziehung auf die mechanische Spannung überführt. Entsprechend dieser Umrechnungen konnte mittels Spannungs-Dehnungs-Diagramm die Steigung und somit der Elastizitätsmodul ermittelt werden. Für die Zugversuche musste eine eigene Klebeschablone zur Probenpräparation, als auch eine Probenaufhängung und die Aufhängung zur Maschine konzipiert werden. Bei der Klebeschablone handelte es sich um eine Einlegevorrichtung aus Teflon, die zur Positionierung der Probe mit den angeklebten Hülsen mittels Zwei-Komponenten-Kleber diente. Bei der Probenaufhängung wurden unterschiedliche Versionen probiert, die entweder aus aufgeklebten Gewindehülsen über Metallhaken oder aus einer „kardanischen“ Aufhängung mit zwei Ausgleichsringen bestand. Ebenfalls bei der Aufhängung zwischen Probe und Maschine wurden einige Möglichkeiten an

Prüfaufbauten, die entweder aus Schweißdrähten, einer Kombination aus Schweißdrähten und Schnur sowie nur aus Schnüren bestand, untersucht. Im Gegensatz zur 4 Punkt-Biegung wird im Zugversuch das gesamte Probenvolumen uniaxial belastet, Spannung und Dehnung sind über einfache Zusammenhänge direkt aus dem Experiment ermittelbar. Aus der Steigung des ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramms wurde der Elastizitätsmodul berechnet.

Die Ergebnisse der 3 Punkt- und 4 Punktbiegung zeigen, dass die dünnen Referenzproben ähnliche Elastizitätsmodule, wie die der standardisierten dicken Referenzproben aufweisen. Diese Messergebnisse werden innerhalb der Messmethode verglichen, untereinander kommt es zu geringfügigen Abweichungen. Die Messergebnisse weisen eine geringe Standardabweichung auf, wodurch eine geringe Schwankungsbreite für die Elastizitätsmodule angezeigt werden kann. Die Elastizitätsmodule stimmen nahezu mit den Literaturwerten überein. Bei den Versuchen mit den Leiterplatten konnte der größte Unterschied zwischen den verschiedenen aufgebauten Materialsystemen beobachtet werden. Bei einer Sorte der polymeren Leiterplatten manifestierte sich eine Vorzugsrichtung der Fasern in deutlich unterschiedlichen Werten für den Elastizitätsmodul bezüglich Längs- und Querrichtung. Bei den Materialien mit kleinem Elastizitätsmodul kann ein versteifender Einfluss der aufgeklebten DMS auf die Probe nicht ausgeschlossen werden. Diese Annahme könnte eine Erklärung für die erhöhten E-Modul Werte bei den 4 Punkt-Biegeversuchen sein. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird in Abbildung 53 dargestellt.

Bei den Zugversuchen wurde für die Messung die Referenzprobe Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) herangezogen. Die verschiedenen Prüfaufbauten mit der kardanischen Probenaufhängung wurden untereinander verglichen. Die gemittelten Elastizitätsmodule aus DMS 1 und DMS 2 unterscheiden sich nur geringfügig und liegen annähernd im Bereich des Literaturwertes. Die Abweichung zum Mittelwert des Elastizitätsmoduls beträgt für die beiden DMS jeweils maximal 13,7 %. Die Differenz zwischen den Steigungen könnte durch eine weitere Optimierung der Probenaufhängung realisiert werden. Der innere Ring müsste verkleinert oder dickwandiger angefertigt werden, um so durch Verkürzung des gelagerten Mittelstiftes höheren Kräften standzuhalten. Die derzeitigen Prüfkräfte belaufen sich auf 15 N.



**Abbildung 53:** Histogramm aller gemittelten Elastizitätsmodule der Referenzproben und der Komposite mit den verschiedenen statischen Messmethoden (3 Punkt- u. 4 Punkt-Biegeversuch und Zugversuch).

## 6 Verzeichnisse

- [1] Y. Imanaka, *Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology*. Springer, 2004.
  - [2] T. Blank, „*Funktionale Schichten in Leiterplatten Entwicklung von intelligenten Mikrovibrationssensoren in mehrdimensionaler Leiterplattentechnologie*“, 2013.
  - [3] M. Achternbosch und D. Brune, „*Stoffströme bei der Herstellung von Leiterplatten*“, Forschungszentrum Karlsruhe, 1996.
  - [4] C. Krautgasser, R. Danzer, M. Deluca, P. Supancic, F. Aldrian, und R. Bermejo, „*Subcritical crack growth in multilayer Low Temperature Co-fired Ceramics designed with surface compressive stresses*“, J. Eur. Ceram. Soc., Bd. 36, Nr. 16, S. 4095–4105, 2016.
  - [5] D. Schwarzenberg, „*Der Elastizitätsmodul: Messung und Anwendung in der Schule*“, Institut für Physik; Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2004.
  - [6] G. Gottstein, *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*, 2.Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
  - [7] W. Schatt und H. Worch, *Werkstoffwissenschaft*, 8.neubearb. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 1996.
  - [8] J. Rösler, H. Harders, und M. Bäker, *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, 4.überarbe. Springer Vieweg, 2012.
  - [9] ME-Meßsysteme GmbH, „*Häufig gestellte Fragen zum Thema Dehnung*“, S. 1–3, 2014.
  - [10] W. Callister und D. Rethwisch, *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, 1.Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2013.
  - [11] E. Roos und K. Maile, *Werkstoffkunde für Ingenieure*, 5. Auflage. Springer Vieweg, 2015.
  - [12] M. F. Ashby und D. R. H. Jones, *Werkstoffe 1: Eigenschaften, Mechanismen und Anwendungen*, 3. Auflage. ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag, 2006.
  - [13] M. F. Ashby und D. R. H. Jones, *Werkstoffe 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe*, 3.Auflage. ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag, 2007.
  - [14] T. Lube, „*Vorlesung: Schichtverbundwerkstoffe*“, Institut für Struktur- und Funktionskeramik, Montanuniversität Leoben.
  - [15] H. Altenbach, J. Altenbach, und W. Kissing, *Mechanics of Composite Structural Elements*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.
-

- [16] W. Weißbach, M. Dahms, und C. Jaroschek, *Werkstoffkunde Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*, 19.Auflage. Springer Vieweg, 2015.
- [17] E. Hornbogen, G. Eggeler, und E. Werner, *Werkstoffe Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*, 10.neubear. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [18] W. D. Kingery, H. K. Bowen, und D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [19] E. Hille, „*Versuch : Druckversuch*“, Labor für Werkstoffprüfung/Metallographie; Fachhochschule Lausitz, 2008.
- [20] G. Wassermann, *Praktikum der Metallkunde und Werkstoffprüfung*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1965.
- [21] K. Sommersguter, „*Elastizitätsmodulmessungen an kleinen Proben*“, Institut für Struktur- und Funktionskeramik; Montanuniversität Leoben, 2004.
- [22] D. Schmidt, „*Biegefestigkeitsuntersuchung an unterschiedlichen Werkstoffen*“, Institut für Werkstofftechnik; Technische Universität Illmenau, 2010.
- [23] F. Körber, A. Kirsch, *Festigkeitsprüfung bei ruhender Beanspruchung*, in Handbuch der Werkstoffprüfung von E. Siebel, 2.Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1955, S. 35-138.
- [24] „Grundpraktikum I - Mechanik: *M 16 Elastizitätsmodul durch Biegung*“, Institut für experimentelle Physik; OVGU Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.
- [25] E. Macherauch und H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde*, 12. Auflag. Springer Vieweg, 2014.
- [26] C. Berger und K. H. Kloos, „*Werkstoffprüfung*“, in *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 2011, S. E24–E32.
- [27] „Maschinenbau-wissen.de“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.google.at/search?q=Zugversuch&client=firefox-b-ab&tbm=isch&imgil=G9bpEq3nlKvKiM%253A%253BvgjPzXGPpAalTM%253Bhttps%25253A%25252F%25252Fde.wikipedia.org%25252Fwiki%25252FZugversuch&source=iu&pf=m&fir=G9bpEq3nlKvKiM%253A%252CvgjPzXGPpAalTM%252C\\_&](https://www.google.at/search?q=Zugversuch&client=firefox-b-ab&tbm=isch&imgil=G9bpEq3nlKvKiM%253A%253BvgjPzXGPpAalTM%253Bhttps%25253A%25252F%25252Fde.wikipedia.org%25252Fwiki%25252FZugversuch&source=iu&pf=m&fir=G9bpEq3nlKvKiM%253A%252CvgjPzXGPpAalTM%252C_&).
- [28] E. Heurich, „*Materialprüfung*“, Institut für Materialwissenschaften und Werkstofftechnologie; Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2006.
- [29] „Sprödigkeit“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.at/search?q=zugversuch+spröd&client=firefox-b-ab&biw=1876&bih=1049&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwj6rpvP1KjSAhXHzRQKHQ7zCLgQsAQIRA#imgrc=InVv5a--UD-zEM>.
-

- [30] „der Lehrerfreund.de“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.at/search?q=zugprobe&client=firefox-b-ab&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwiz-8q81KjSAhVDOBQKHVoab7gQsAQIKQ&biw=1876&bih=1049#imgrc=Alks2OGsYWWtmM>.
- [31] W. Kollenberg, *Technische Keramik Grundlagen Werkstoffe Verfahrenstechnik*, 2.Auflage. VULKAN Verlag, 2009.
- [32] W. Seidel, *Werkstofftechnik Werkstoffe Eigenschaften Prüfung Anwendung*, 3.neubearb. Carl Hanser Verlag, 1999.
- [33] Andreas Kalweit, C. Paul, S. Peters, und R. Wallbaum, *Handbuch für Technisches Produktdesign*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [34] M. Kugler, „Siliziumnitrid: " Der Stahl unter den Keramiken“, *Die Presse*, 2008.
- [35] J. König, „Vergleichende Untersuchungen ausgewählter mechanischer Kennwerte dreier Weißkeramiken in der CAD/CAM-Technik“, Medizinische Fakultät Charité' - Universitätsmedizin Berlin, 2009.
- [36] H. Salmang und H. Scholze, *Keramik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1982.
- [37] K. Makarovic u. a., „The Effect of Phase Composition on the Mechanical Properties of LTCC Material“, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, Bd. 10, Nr. 3, S. 449–457, 2013.
- [38] R. Kulke, M. Rittweger, P. Uhlig, und C. Günner, „LTCC-Mehrlagenkeramik für Funk- und Sensor-Andwendungen“, Leuze Verlag, 2001, S. 2131–2136.
- [39] M. Pletz, „Theoretische Untersuchung der Einbettung von keramischen Komponenten in Leiterplatten“, Institut für Struktur- und Funktionskeramik; Montanuniversität Leoben, 2009.
- [40] Spektrum.de, „Kardanische Aufhängung“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/kardanische-aufhaengung/7800>],[<http://www.wissen.de/lexikon/kardanische-aufhaengung>].
-

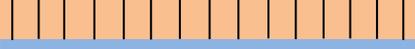
## 6.1 Abkürzungsverzeichnis

A	Bruchdehnung [%]
$A_g$	Gleichmaßdehnung [%]
$A_t$	gesamte Dehnung bei Bruch [%]
Al	Aluminium
b	Probenbreite[m]
DMS	Dehnmessstreifen
DD1	Wegaufnehmer
E-Modul	Elastizitätsmodul [GPa]
$E_M(0\text{ K})$	Elastizitätsmodul des Metalls bei einer Temperatur von 0 K
$E_K(0\text{ K})$	Elastizitätsmodul der Keramik bei einer Temperatur von 0 K
$\varepsilon$	Normaldehnung []
$\varepsilon_L$	Lüdersdehnung [%]
$\varepsilon_{el}$	elastische Verformung []
$\varepsilon_{pl}$	plastische Verformung []
F	Kraft [N]
$F_i$	Bindungskraft [N]
$F_R$	abstoßende Kraft [N]
$F_A$	anziehende Kraft [N]
$F_{\perp}$	Kraft steht senkrecht zur Fläche [N]
$F_{\parallel}$	Kraft wirkt parallel zur Fläche [N]
$\gamma$	Scherung []
h	Probendicke [m]
k	Steigung der Ausgleichsgeraden
LTCC	Low Temperature Co-fired Ceramic
L	Stützweite [m]
$L_0$	Anfangslänge [m]
$l_1$	Länge [m]
$l_0$	Ausgangslänge [m]
$\Delta l$	Längendifferenz [m]
l, m	Auflagerabstand [m]
$M_b$	Biegemoment [Nm]
PCB	Printed Circuit Board
$r_0$	Gleichgewichtsabstand [m]
r	interatomarer Abstand [m]
$R_m$	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]

---

$R_{EH}$	obere Streckgrenze [N/m <sup>2</sup> ]
$R_{EL}$	untere Streckgrenze [N/m <sup>2</sup> ]
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze [N/m <sup>2</sup> ]
$Si_3N_4$	Siliziumnitrid
$S_0$	Anfangsquerschnitt [m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Normalspannung [MPa]
$\sigma_b$	maximale Biegespannung (Biegefestigkeit) [MPa]
$T$	Temperatur [K]
$T_M$	Schmelztemperatur [K]
$\tau$	Schubspannung [MPa]
$U_{th}$	thermischen Betrag [J]
$U_R$	abstoßendes Potentials [J]
$U_A$	anziehendes Potentials [J]
$U_0$	Bindungsenergie im Potentialminimum [J]
$W$	Widerstandsmoment [m <sup>3</sup> ]
$\Delta x$	Verschiebung [m]
$y$	Höhe [m]
Y-TZP	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -stabilisiertes Zirkonoxid

**Farbcodierung:**

	3 Punkt-Biegung (dicke Referenzproben)
	3 Punkt-Biegung (dünne Referenzproben)
	3 Punkt-Biegung (dünne Komposite), Quer geschnitten
	3 Punkt-Biegung (dünne Komposite), Längs geschnitten
	4 Punkt-Biegung (dicke Referenzproben)
	4 Punkt-Biegung (dünne Referenzproben)
	4 Punkt-Biegung (dünne Komposite), Quer geschnitten
	4 Punkt-Biegung (dünne Komposite), Längs geschnitten
	Zugversuch

## Anhang A

### Anleitung zur Applikation der Dehnmessstreifen mit integrierten Lötvorgang für den 4 Punkt-Biegeversuch und den Zugversuch

In diesem Abschnitt werden alle verwendeten Utensilien für die DMS-Klebung inklusive den Lötvorgang und die Präparation der Zugprobenaufhängung beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Arbeitsschritte zum Kleben und Löten eines Dehnmessstreifens erklärt. Ebenfalls wird auf die Herstellung der Zugproben mittels Klebeschablone eingegangen.

### Zubehör für die DMS-Klebung, den Lötvorgang und der Präparation der Zugprobenaufhängung

In der Abbildung 54 sind die gesamten verwendeten Applikations-Utensilien zur Klebung der DMS und zur anschließenden Lötung, als auch für die Präparation der Zugprobenaufhängung dargestellt. Detaillierte Angaben über die Utensilien werden in den folgenden Unterpunkten und Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 20 erläutert.



**Abbildung 54:** Gesamtbild aller verwendeten Utensilien für die DMS-Klebung, den Lötvorgang und der Zugprobenaufhängung.

## Verwendete Utensilien für die DMS-Klebung

**Tabelle 18:** Zubehör für die DMS-Klebung.

<b>Zubehör zu DMS-Applikation</b>	
	Dikso (Klebeband)
<i>MCA-1</i>	M-Prep Conditioner A
<i>MN5A-1</i>	M-Prep Neutralizer 5A
<i>M-Bond 200</i>	Schnellkleber und Catalyst-C Beschleuniger
<i>M Line</i>	Rosin Solvent (Reinigungsmittel)
<i>M-Coat A Kit</i>	Polyurethanlack (Schutzlack)
<i>PDT-3</i>	Krepp-Klebeband

Sonstiges Zubehör für die DMS-Klebung ist hier aufgelistet:

- Kratzfeste Glasplatte
- Ethanol
- Schiebelehre
- Spitze und stumpfe Pinzette
- Stanley Messer
- Wattestäbchen

## Verwendete Utensilien für den Lötvorgang und Verbindung des DMS mit den Lötstützstellen:

**Tabelle 19:** Zubehör für den Lötvorgang und die Verbindung des DMS mit den Lötstützstellen.

<b>Zubehör für den Lötvorgang</b>	
<i>Weller</i>	Lötstation
<i>2,5 mm breit</i>	Lötkopf
<i>Kester</i>	Lötzinn
<i>134-AWP</i>	roter Kupferlackdraht
<i>M-Flux AR Kit</i>	Flussmittel
<i>M-Line CEG-38C</i>	Lötstützstellen
<i>Knipex</i>	Zange
<i>Weldsteel</i>	Isolierabziehmaschine
<i>326-DFV</i>	Kabel

Sonstiges Zubehör für die DMS-Klebung ist hier aufgelistet:

- Kratzfeste Glasplatte
- Miniaturschraubstock
- Stahlplatten (3 Stück)
- Schere
- UHU-Sekundenkleber
- Spitze und stumpfe Pinzette
- Wattestäbchen
- Multimeter (Fluke)

### **Zusätzliches Zubehör für den Zugversuch zur Klebung der Probenaufhängung**

**Tabelle 20:** Zubehör zur Klebung der Probenaufhängung.

<b>Zubehör für die Klebung der Probenaufhängung</b>	
<i>Selfmade</i>	Klebeschablone aus Teflon
<i>UHU plus Endfest</i>	Zwei-Komponenten Epoxidharzkleber
	Ofen

### **Klebeanleitung zur Sicherstellung einer einwandfreien Klebung des Dehnmessstreifens**

- Die Glasplatte mit Ethanol reinigen.
- Zusätzlicher Schritt nur bei dem untersuchten Werkstoff PCB: Aufräuen der Oberfläche mit einem Schmirgelpapier (Körnung 800).
- Die Probe ebenfalls mit Ethanol reinigen.
- Anschließend die Probe zusätzlich mit M-Prep Conditioner A und M-Prep Neutralizer 5A reinigen. Dabei verwendet man jeweils ein Wattestäbchen, trinkt dieses mit der Reinigungsflüssigkeit und streift damit 2x über die Probe. Danach wird mit der trockenen Seite des Wattestäbchen die Probe trocken gewischt.
- Die Probenmitte mittels Schiebelehre einzeichnen.
- Den Dehnmessstreifen mit einer spitzen Pinzette aus der Folie holen und auf die gereinigte Glasplatte legen.
- Den Dehnmessstreifen gerade positionieren und ein Klebeband (Dikso) darüber kleben.
- Unter Verwendung eines Stanleyessers das Klebeband inklusive DMS zurechtschneiden.
- Vorsichtiges Abziehen des Klebebandes unter einem Winkel von 30°.
- Positionieren des Klebebands plus DMS mittig durch die vorab eingezeichnete Probenmitte.

- Ablösen im 30° Winkel und Zurückbiegen des Klebebandes bis zum Dehnmessstreifen, um mit der Klebung beginnen zu können.
- Dabei wird der Catalyst-C Beschleuniger auf dem Dehnmessstreifen und der Probe aufgetragen. Er muss eine Minute einwirken. Vor dem Auftragen wird der Pinsel des Beschleunigers ungefähr 10mal abgestreift.
- Der nächste Schritt ist sehr kritisch und muss innerhalb von 3-5 Sekunden abgeschlossen werden. Nach der einminütigen Einwirkzeit wird der Kleber durch einen kleinen Tropfen auf die Probe aufgegeben. Sofort wird das Klebeband inklusiver DMS unter Verwendung eines speziellen Papiers glatt gestreift und für 1 Minute gedrückt gehalten.
- Nach diesem Schritt wird 2 Minuten gewartet bis das Klebeband abgezogen werden kann. Bei optimaler Klebung bleibt der Dehnmessstreifen auf der Probe kleben und nur das Klebeband wird abgelöst.
- Um den Dehnmessstreifen zu schützen wird ein Krepp-Klebeband auf den DMS geklebt.

### **Lötvorgang und Verbindung des DMS mit den Lötstützstellen**

- Das zuvor aufgeklebte Krepp-Klebeband wird vorsichtig vom DMS heruntergezogen.
  - Nach Abziehen des Krepp-Klebebandes wird der DMS unter Verwendung der Rosin-Solvent-Lösung von möglichen Klebstoffresten gereinigt.
  - Der Dehnmessstreifen wird nun mit einem Flussmittel benetzt um das Verzinnen der Lötstellen am DMS leichter zu gestalten. Zu beachten ist, dass keine kalte Lötstelle entsteht!
  - Nach dem Verzinnen des Dehnmessstreifens werden die roten Kupferlackdrähte, die vorab ebenfalls verzinnt wurden (Wegbrennen der roten Mantelfarbe bei der Spitze des Drahtes) an den DMS angelötet.
  - Mit Hilfe einer spitzen und stumpfen Pinzette wird der rote Kupferlackdraht zu den Lötstützstellen hingebogen und an den Enden verzinnt.
  - Vorab wurden die Lötstützstellen mittels UHU-Sekundenkleber an die Hülsen geklebt und ebenfalls verzinnt.
  - Zum Schluss werden die verzinnten Enden des Kupferlackdrahtes mit den verzinnten Lötstützstellen zusammengelötet.
  - Zum Abschluss wird der Widerstand des DMS über ein Multimeter kontrolliert.
  - Danach wird der Schutzlack auf den DMS aufgetragen und ~ 24 h getrocknet.
  - Um ein Signal bei der Messung zu erhalten muss die Probe mit den Klemmleisten verbunden werden. Dabei verwendet man zwei verschieden farbige Kabel pro Seite, die zusätzlich zum Kupferlackdraht dazu gelötet werden.
  - Die Isolierung der Kabel wird zuvor durch eine Abisolierzange abgezogen und beide Enden ebenfalls verzinnt.
-

## Klebung der Probenaufhängung für den Zugversuch

- Die Hülsen werden mit Hilfe eines Zwei-Komponenten-Klebers an die Probe angeklebt.
- Danach in die Klebeschablone gelegt und ausgerichtet.
- Anschließend wird die Probe bei einer Temperatur von ungefähr 80°C in einem Zeitraum von 30 Minuten in den Ofen gegeben.
- Vorab wurde die Probe mit Dehnmessstreifen auf den beiden Seitenflächen bestückt.
- Nach Abkühlen der Probe werden die selben, wie oben beschriebenen Schritte, abgearbeitet. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Lötstützstellen auf den Hülsen angebracht werden und nicht wie zuvor an den Probenenden (siehe Abbildung 55).



**Abbildung 55:** Klebeschablone mit eingelegter  $Y_2O_3$ -stabilisierter Zirkonoxid-Probe.

## Einstellungen zur Anpassung der verschiedenen DMS-Typen am MGC-Gerät:

### Anpassung des k-Faktors:

Das Spannungsverhältnis von Brückenausgangsspannung  $U_a$  & Brückenspeisespannung  $U_b$  an der Wheatstone-Brücke ergibt sich aus den Dehnungen in der Vollbrücke:

$$\frac{U_a}{U_b} = \frac{k}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

- k k-Faktor auch Proportionalitätsfaktor genannt, gibt die Änderung des elektrischen Widerstandes mit der mechanischen Dehnung des DMS an -> siehe DMS-Datenblatt, [hier](#): 1,94
-

**a) Hier:** Aluminium (P6) mit 2 aktiven Dehnmessstreifen (1-LY81-1.5/120):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{20 \text{ MPa}}{71709 \text{ MPa}} = 0,0002789 = 0,0002789 * 10^6 = 278,9 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

➔ Richtwert für die Randfaserdehnung. Für das MGC-Gerät wird somit eine max. Auslenkung von  $1000 \mu\text{m}/\text{m}$  angenommen

$$\begin{aligned} \frac{U_a}{U_b} &= \frac{k}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{1,94}{4} * \left[ 1000 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \left( * 10^{-3} \text{ für } \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right) - 0 + 0 - 0 \right] \\ &= 0,485 \frac{\text{mV}}{\text{V}} \end{aligned}$$

Beim Einstellen im MGC-Gerät für Kanal 1 & 2 muss  $+0,485 \text{ mV}/\text{V}$  stehen! Infolgedessen kann man erkennen, welcher DMS bzw. Kanal negativ wird und welcher positiv und somit auf Druck- und Zugspannungen schließen. Die Dehnungen  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  und  $\varepsilon_4$  in der Formel werden Null gesetzt aufgrund der Tatsache, dass die Halbbrücke nur aus einem aktiven DMS besteht. Der zweite DMS der Halbbrücke dient ausschließlich zur Temperaturkompensation und trägt zur Dehnung nicht bei.  $\varepsilon_3$  und  $\varepsilon_4$  sind intern im Verstärker als Festwiderstände realisiert und tragen zur Dehnung der Probe ebenfalls nicht bei.

### Bedienung des MGC-Gerätes:

- Direkt am MGC-Gerät werden die Einstellungen eingegeben.
- Wichtig: Jeder Schritt muss für alle Channels (hier 1-2) gleich sein und kontrolliert werden!
- Achtung: Bei jeder Änderung muss sofort nach korrekter Eingabe eines neuen Wertes durch „ENTER“ bestätigt werden, ansonsten merkt sich das Gerät den Wert nicht!



**Abbildung 56:** Detailaufnahme des Messverstärker MGC.

**Für Channel 1:(Abbildung 56)**

## 1)Einstellung der max. Spannung:

*Drehschalter auf Ve [VOLT] drehen*

Standardeinstellung 1 V für alle 4 Channels

Bei kleinen erwarteten Signalen ist eine höhere Spannung vorteilhafter -> 2.5V & 5V sind möglich; Hier: 2.5V eingestellt -> weil DMS-Hersteller max. Belastung für DMS mit 2.5V (siehe Wiki) angegeben hat

## 2)Auswahl der Messbrücke:

*Drehschalter auf Brückensymbol drehen*Mögliche Einstellungen:

\*)Viertelbrücke

\*)Halbbrücke mit Temperatur-Kompensation  
!!! Achtung -> Brücke ohne Füllung nehmen!!

\*)Halbbrücke

\*)Vollbrücke

## 3)Die zu erwartenden Spannung angeben:

*Drehschalter auf Range ½ drehen*

Zuvor berechnetes Spannungsverhältnis mit dem Wert 0.485 Volt eintippen

-> Beachte: ein Plus davor einzugeben

Eingabe erfolgt durch Drücken von „Select“ (dadurch hüpft die Anzeige weiter und jedes Mal wenn der Wert korrekt ist wird mit „ENTER“ bestätigt!!

## 3)Einstellung der Anzeigen „DISP“,„DECP“,„STEP“:

*Drehschalter auf Indication Adaptation Value DEC Point, STEP drehen*

\*)„Select“ drücken um auszuwählen oder bei korrekter Angabe weiter drücken

\*)für „DISP“ wird 1000000 (1 Million) eingestellt -> dies bedeutet, dass 6 Stellen angezeigt werden. Eingestellt wird dieser Wert durch Drücken der Taste „Indication“ (rechts schwarze Knöpfe mit weißen Pfeilen)

\*)„Select“ drücken

\*)für „DECP“ wird der max. Ausschlag (Dehnung) -> hier: 1000 µm/m eingestellt (zuvor die Randfaserdehnung ausrechnen -> Richtwert)

\*)„Select“ drücken

\*)für „STEP“ wird 000001 eingestellt -> durch Drücken der Taste „Indication“  
!!Bleibt aber immer bei 1!

## 4) Einstellung des Nullniveaus:

Erst vornehmen, wenn die Probe eingespannt ist (keine Vorkraft) und die Messung gestartet werden kann

*Drehschalter auf ->0<- drehe*

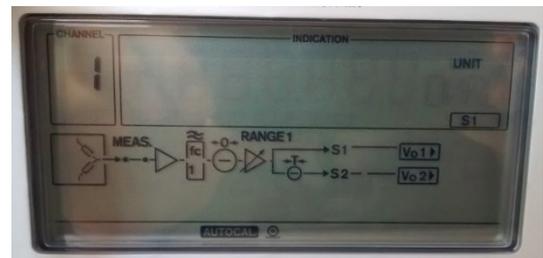
\*)Mit „S1“ (Schalter links auf gleicher Höhe wie ->0<- auf Null stellen und mit „ENTER“ bestätigen

## 5) Einstellen der Einheit:

*Drehschalter auf „unit“ drehen & auf  $\mu\text{m}/\text{m}$  einstellen*

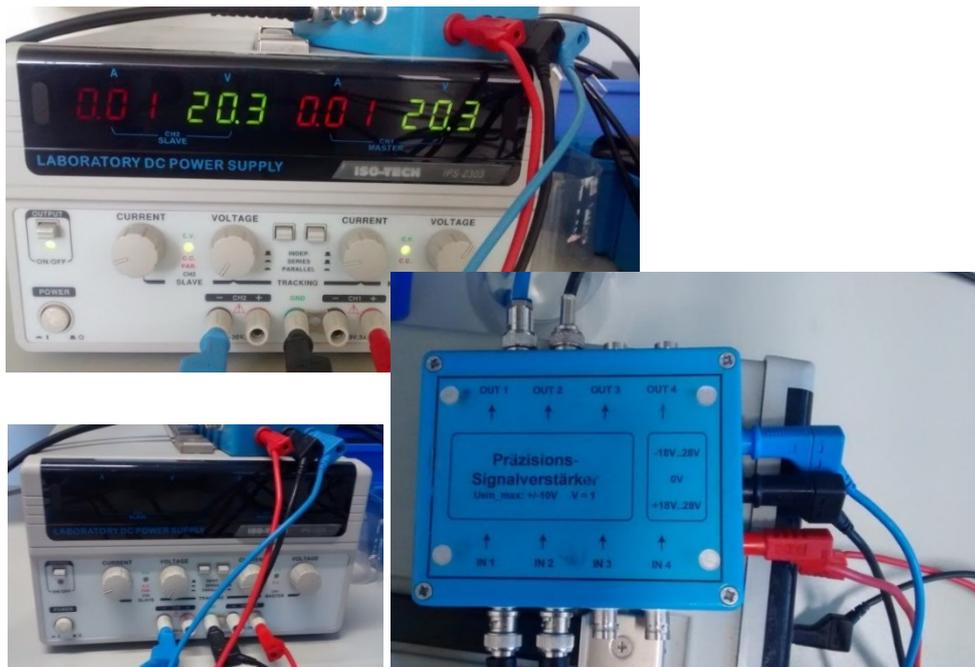
\*)Umstellen mit „Select“ und „ENTER“ drücken

**Für Channel 2:** Alle Schritte sind identisch mit denen die zuvor beschrieben wurden, jedoch muss man von Kanal 1 auf Kanal 2 stellen! (Abbildung 57)



**Abbildung 57:** Detailaufnahme zur Anzeige des Kanals, hier: Channel 1.

In Abbildung 58 ist der sogenannte Präzisions-Signalverstärker, der zur Verstärkung der Ausgangsspannung verwendet wurde, dargestellt. Dieser Verstärker verbindet den analogen Ausgang des MGC Messverstärkers mit dem Eingang der Prüfmaschine und ist für eine Impedanzanpassung notwendig.



**Abbildung 58:** Detailaufnahme des Präzisions-Signalverstärkers.