

# Ermittlung von Materialkennwerten für additiv gefertigte Bauteile im Kreuzverbund nach dem FDM-Verfahren zur numerischen Berechnung der Festigkeitseigenschaften

Lohr, Wolfgang; Härtel, Alexander; Reinicke Tamara

Universität Siegen, Institut für Konstruktion, Lehrstuhl für Produktentwicklung, 2018

**Zusammenfassung:** *Additiv gefertigte Bauteile finden immer stärkeren Einzug in Produktionsprozesse. Es ist daher unerlässlich im Vorfeld eine Aussage zu deren Festigkeitseigenschaften treffen zu können. Üblicherweise werden Aussagen zum Festigkeitsverhalten von Bauteilen mit beliebiger Geometrie mit Hilfe von FEM-Analysen gewonnen. Hierfür werden Elastizitätsgrößen und Materialgesetze als Eingangsparameter für die durchzuführende Analyse benötigt. In den vorliegenden Untersuchungen wird gezeigt, welches Materialgesetz sich für die Beschreibung eines Bauteils eignet, dass mit Hilfe des FDM-Verfahrens im Kreuzverbund generiert wird. Weiterhin wird gezeigt, wie die benötigten Elastizitätsgrößen einfach messtechnisch mit einem alternativen Verfahren zum klassischen Zugversuch ermittelt werden können.*

**Schlüsselworte:** *Additive Fertigung, FDM-Verfahren, Materialeigenschaften, FEM, Zugversuche, Optisches Messverfahren*

## 1 Einleitung

Ursprünglich wurden additive Fertigungsverfahren hauptsächlich im Prototypenbau verwendet. Durch eine ständige Weiterentwicklung der Verfahren finden diese aktuell immer stärkeren Einzug in Produktionsprozesse. Für eine frühe Vorhersage des mechanischen Verhaltens schichtweise erzeugter Bauteile ist die Simulation im frühen Entwicklungsstadium unerlässlich.

Bei der Erzeugung additiv gefertigter Bauteile ist das FDM-Verfahren (Fused Deposition Modeling), das durch seinen strangweisen Materialaufbau gekennzeichnet ist, weit verbreitet. Da zum einen die Anlagen, die nach diesem Prinzip arbeiten, günstig zu erwerben sind und zum anderen die so erzeugten Bauteile eine verhältnismäßig hohe Auflösung bei gleichzeitig guter Festigkeit aufweisen. Die zu generierende Geometrie des Bauteils basiert auf einem 3D-CAD-Datensatz, der häufig in Form eines stl-Files an die Slicing-Software und von dort an den FDM-Drucker übergeben wird. Das Material wird in Drahtform zur Verfügung gestellt, für den Prozess aufgeschmolzen und zu Strängen extrudiert. Die Materialeinbringung erfolgt somit strangweise in parallelen Bahnen zu einer Schicht in einer Ebene. Ist eine Schicht abgeschlossen, wird die Bauplattform um eine Schichtdicke in z-Richtung abgesenkt. Die Strangorientierung in der folgenden Schicht kann je nach Strategie in einem beliebigen Winkel zur darunterliegenden Schicht angeordnet sein.

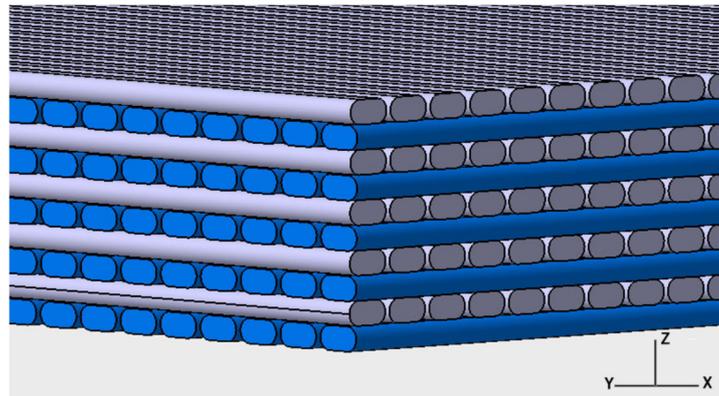
Eine hinreichend genaue Aussage zu den Festigkeitseigenschaften eines Bauteils kann im Vorfeld bisher häufig nicht mit vertretbarem Aufwand getroffen werden. Dies liegt zum einen an mangelnden Regelwerken und Normen und zum anderen an den nicht hinreichend bekann-

ten Materialeigenschaften, die das Bauteil nach der Fertigung aufweist. Denn die Bauteileigenschaften basieren nicht nur auf den Eigenschaften des unverarbeiteten Materials, sondern auch auf den Prozessparametern des FDM-Druckers und der resultierenden strangweise aufgebauten Geometrie inklusive kleiner Lufträume. Aktuelle Forschungsansätze beschäftigen sich mit der Abbildung und Berechnung einzelner Stränge, der so genannten „Printpath-Modellierung“, wie z.B. aus [1] entnommen werden kann. Diese liefert gute Ergebnisse, weist jedoch den Nachteil einer hohen Rechenintensität und Bearbeitungsdauer auf, da jeder Strang einzeln vernetzt und somit abgebildet wird.

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie mit Hilfe geeigneter Materialgesetze und ohne die Abbildung einzelner Stränge, die Beanspruchung eines schichtweisen gefertigten Bauteils anwendungsbezogen berechnet werden kann.

## 2 Experimentelle Ermittlung der Materialeigenschaften

Den folgenden Untersuchungen liegen Zugproben zu Grunde. Diese weisen eine inhomogene Struktur auf, die folgendermaßen beschrieben werden kann. Der Materialaufbau erfolgt schichtweise (*Abbildung 2.1*). Hierbei werden Stränge parallel in einer Ebene zu einer Schicht angeordnet. Die darauffolgende Schicht ist um  $90^\circ$  im Verhältnis zur darunterliegenden Schicht orientiert. Die Probe ist somit als mehrschichtiger, unverstärkter Kreuzverbund ausgeführt.



*Abbildung 2.1: Schichtweiser Aufbau des FDM Modells*

Der Versatz der Stränge um  $90^\circ$  ist jedoch nicht zwingend und kann bei anderen Fertigungsstrategien in abweichender Form auftreten.

Als Baumaterial können verschiedene Thermoplaste wie z.B. ABS, PLA oder PET eingesetzt werden. In den folgenden Untersuchungen wurde ausschließlich PLA der Fa. Janbex verwendet. Zur Herstellung der Proben wurde der FDM-Drucker „N2 Plus“ der Fa. Raise3D eingesetzt. Die Probengeometrie basiert auf dem Typ 1B der DIN-Norm EN ISO 527-2:2012-06 (*Abbildung 2.2*).

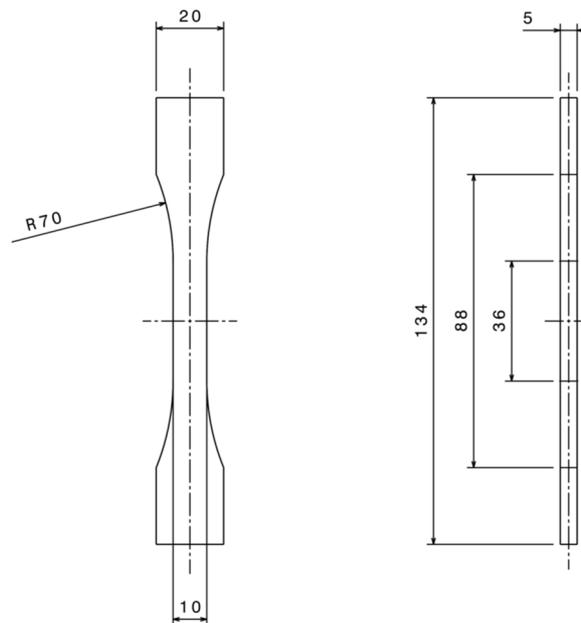


Abbildung 2.2: Probengeometrie

Die Proben wurden auf der Universalprüfmaschine „Inspekt 100“ der Fa. Hegewald & Peschke im einachsigen Zugversuch bis zum Bruch belastet. Für die Datenauswertung wurde das Videoextensometer MCR100 Mercury mit einem digitalen Bildkorrelations-Messsystem eingesetzt. Bei diesen Versuchen wurde der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl bei verschiedenen Versuchsparametern ermittelt. Die Proben wurden mit einer Verschiebung von 1 mm pro Minute kontinuierlich belastet.

Um die verschiedenen Materialorientierungen zu berücksichtigen, wurden die Proben innerhalb des Bauraumes entlang der 3 Raumachsen ausgerichtet. Diese Ausrichtungen und die daraus resultierenden Orientierungen der einzelnen Stränge sind in *Abbildung 2.3* beispielhaft dargestellt. Die einzelnen Stränge sind zur Verdeutlichung stark vergrößert dargestellt.

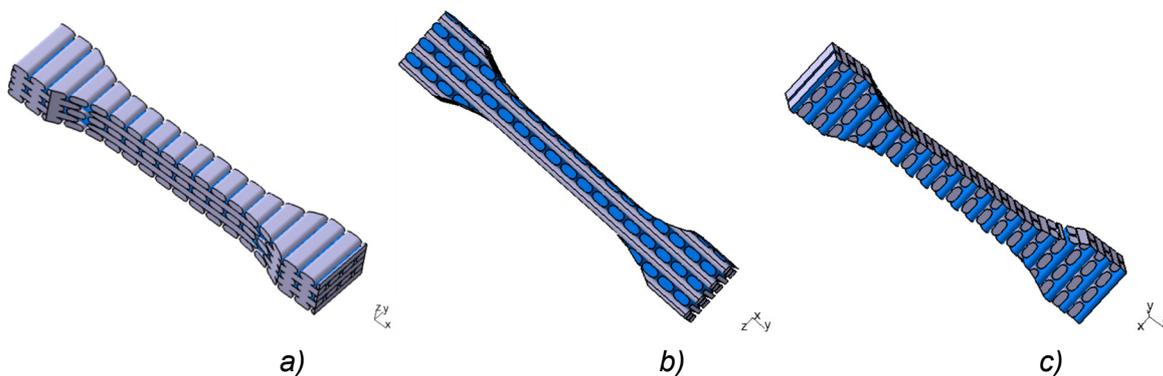


Abbildung 2.3: Strangorientierung der Zugproben

Mit Hilfe der Probengeometrie wurden folgende Messgrößen ermittelt.

Strangorientierung	E-Modul	Querkontraktionszahl
a)	$E_x$	$\mu_{xy}$
b)	$E_y$	$\mu_{yz}$
c)	$E_z$	$\mu_{zx}$

Tabelle 2.1: Strangorientierung und damit ermittelte Messgrößen

Die Messwerte stellen einen Mittelwert aus je 5 Einzelmessungen in jeder Strangorientierung unter gleichen Bedingungen dar. Eine Übersicht der ermittelten Messwerte für Messreihe A ist in *Abbildung 2.4* dargestellt. Hierin bedeutet z.B. „A<sub>x</sub>“ das Ergebnis der Messreihe A in x-Richtung. Die Messreihe A wurde mit einer Temperatur von 215°C und einer konstanten Schichthöhe von 0,2 mm gedruckt.

Bzgl. des E-Moduls ist zu erkennen, dass die Messwerte in die x- und y-Richtung nur um 2,7% voneinander abweichen. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die Strangorientierungen in den beiden Richtungen gleichen. Im Gegensatz hierzu ist die Strangorientierung in die z-Richtung eine andere. Hier sind keine durchlaufenden Stränge in Zugrichtung vorhanden. Hieraus resultiert eine größere Streuung der Messwerte und ein deutlich geringerer Mittelwert (-9,64%). Diese sind durch die unterschiedliche Qualität der Haftung einzelner Stränge gegenüber benachbarten Schichten zu erklären.

Im Bereich der Messwerte zur Querkontraktion ist zu erkennen, dass  $\mu_{yz}$  und  $\mu_{zx}$  deutlich näher beieinanderliegen als  $\mu_{xy}$ . Die exakten Werte können aus *Tabelle 2.2* entnommen werden. Hierin ist auch ein Varianzkoeffizient aufgeführt, der die Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert der Messreihe darstellt.

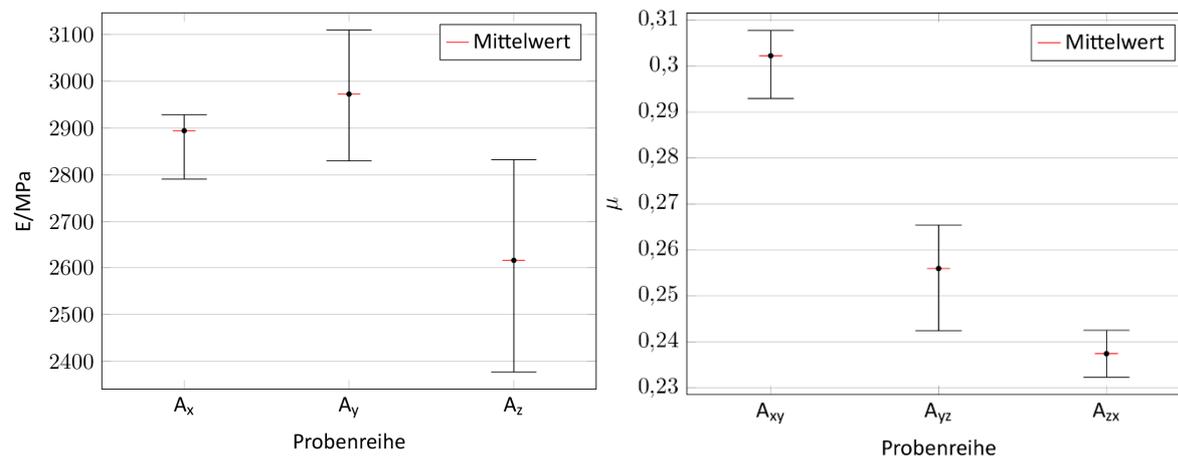


Abbildung 2.4: Messergebnisse der Messreihe A zu E-Modul und Querkontraktionszahl in grafischer Form

	Mittelwert E in MPa	Varianzkoeffizient in %	Abweichung zum Messwert in x-Richtung in %
$A_x$	2894,37	3,32	
$A_y$	2972,65	2,80	2,70
$A_z$	2615,49	6,77	-9,64
	Mittelwert $\mu$	Varianzkoeffizient in %	Abweichung zum Messwert in xy-Richtung in %
$A_{xy}$	0,302	2,74	
$A_{yz}$	0,256	3,24	-18,10
$A_{zx}$	0,237	1,35	-21,52

Tabelle 2.2: Messergebnisse der Messreihe A zu E-Modul und Querkontraktionszahl in tabellarischer Form

In *Abbildung 2.5* ist die Spannung über der Dehnung einer Messung in z-Richtung aus der Messreihe A dargestellt. Man erkennt ein lineares Verhalten bis zu einer Dehnung von ca. 0,8%. Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden ausschließlich Daten aus diesen linearen Bereichen herangezogen.

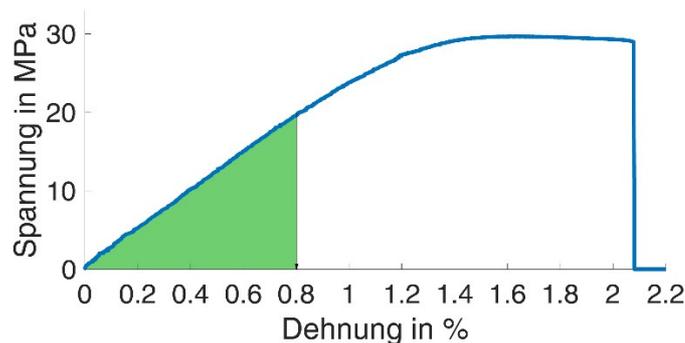


Abbildung 2.5: Aus den Zugversuchen in z-Richtung ermittelte Spannungs-Dehnungskennlinie der Messreihe A

Für eine Berechnung des Bauteilverhaltens in diesem Bereich wird hier ein linearer Berechnungsansatz gewählt.

## 2.1 Charakterisierung eines Materialgesetzes

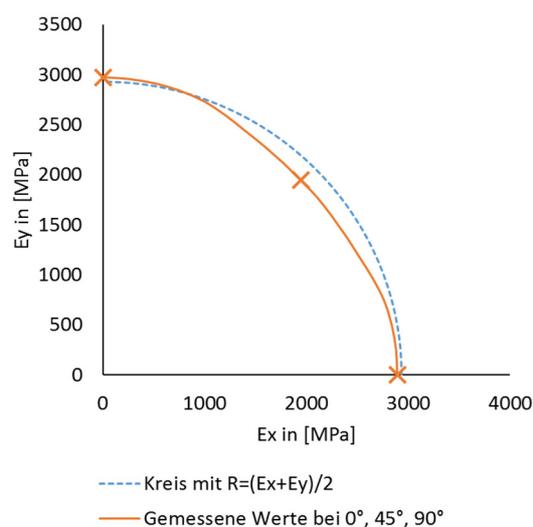
Aus der Betrachtung der oben aufgeführten Messergebnisse kann festgehalten werden, dass der E-Modul für die Belastung in x- und y-Richtung nahezu gleiche Ergebnisse aufweist. Der E-Modul in die z-Richtung weist jedoch einen kleineren Wert auf. D.h. durch ein isotropes Materialgesetz würde das Bauteilverhalten nur unzureichend beschrieben.

Bauteile, die mit Hilfe des FDM-Verfahrens erzeugt wurden, weisen häufig ein anisotropes Verhalten auf, wie z.B. aus den Arbeiten von LEE und AHN et al. hervorgeht [2, 3]. Ein anisotropes Bauteilverhalten kann im allgemeinen Fall durch 21 unabhängige Elastizitätskonstanten

beschrieben werden. Allgemein wird der Grad der Anisotropie durch eine Vielzahl von anisotropen Untermodellen (z.B. Orthotropie, transversal Isotropie, monoklines Materialverhalten) differenziert. Mit zunehmenden Symmetrien im Materialverhalten nimmt der Grad der Anisotropie im Werkstoffmodell ab. Charakteristisch für orthotropes Materialverhalten ist der Kreuzverbund aus Laminaten mit unidirektionalen Einzelschichten, da die Orientierung der Fasern denen der Koordinatenachsen entspricht.

In [4] wurde z.B. die klassische Laminattheorie zur Berechnung des orthogonalen Materialverhaltens von Bauteilen, die mit Hilfe des FDM-Verfahrens erzeugt wurden, erfolgreich eingesetzt. Hierbei waren die einzelnen Schichten zur Ermittlung des E-Moduls und der Querkontraktionszahl jedoch nicht im Kreuzverbund angeordnet, sondern wurden anhand einzelner Schichten ermittelt. Eine Ermittlung des Materialverhaltens in z-Richtung konnte nicht erfolgen, da es nicht gelungen ist, eine einzelne Schicht mit Hilfe des FDM-Verfahrens in z-Richtung zu generieren.

Die Orthotropie nimmt in der Anisotropie eine besondere Stellung ein, denn sie zeichnet sich durch ihre drei orthogonalen Raumebenen sowie durch die Entkopplung zwischen Normal- und Schubdehnung aus. In jeder Ebene hat das Material ein unterschiedliches mechanisches Verhalten, sodass 9 Elastizitätsgrößen benötigt werden, um die Nachgiebigkeitsmatrix eindeutig zu beschreiben [5]. Ein Sonderfall der Orthotropie ist transversal isotropes Materialverhalten, denn es weist rotationssymmetrische Eigenschaften auf. Um eine Übertragbarkeit dieses Materialverhaltens auf die vorliegenden Proben zu prüfen, sind zusätzliche Zugproben gemessen worden. Diese sind so hergestellt, dass die Probenhauptachse in der x-, y-Ebene liegt und um  $45^\circ$  zur x- bzw. y-Achse geneigt ist. Hierbei ergibt sich das  $E_{45}$ -Modul zu 2752 MPa. Wie aus dem Polardiagramm in *Abbildung 2.6* zu erkennen ist, tritt nur eine geringe Differenz (6,2%) zwischen einem rein transversal isotropen Materialverhalten (blaue gestrichelte Linie) und den dargestellten Messergebnissen (orange durchgezogene Linie) auf. Der Radius der blauen gestrichelten Kreislinie resultiert aus dem Mittelwert von  $E_x$  und  $E_y$ . Bei der orangenen durchgezogenen Linie ist zu beachten, dass diese nur 3 Messwerte ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_{45}$ ) enthält.



*Abbildung 2.6:* Gemessene E-Module ( $E_x(0^\circ)$ ,  $E_y(90^\circ)$ ,  $E_{45}(45^\circ)$ ) im Verhältnis zu einem konstanten aus  $E_x$  und  $E_y$  gemittelten Modul

Der restliche Verlauf ist qualitativ ergänzt worden. Das Materialverhalten der gefertigten Proben wird hier näherungsweise als transversal isotrop betrachtet. Das für dieses Materialverhalten abgeleitete Materialgesetz benötigt nur noch 5 unabhängige Elastizitätsgrößen, um die Nachgiebigkeitsmatrix aus Gleichung 2.1 eindeutig zu beschreiben [6].

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_x & -\mu_{xy}/E_x & -\mu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{xy}/E_x & 1/E_x & -\mu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{xz}/E_x & -\mu_{xz}/E_x & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1 + \mu_{xy})/E_x \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Für transversal isotropes Materialverhalten gelten folgende Identitäten:

$$E_x = E_y \quad (2.2)$$

$$G_{xy} = E_x / 2 \cdot (1 + \mu_{xy}) \quad (2.3)$$

$$G_{yz} = G_{zx} \quad (2.4)$$

$$\mu_{xy}/E_x = \mu_{yx}/E_y \quad (2.5)$$

$$\mu_{xz}/E_x = \mu_{yz}/E_y = \mu_{zx}/E_z \quad (2.6)$$

Aufgrund fehlender Messeinrichtung kann das Schubmodul  $G_{zx}$  in der vorliegenden Betrachtung nicht experimentell ermittelt werden. Näherungsweise wird  $G_{zx}$  durch folgenden Ansatz ermittelt, der streng genommen nur für isotropes Materialverhalten zutrifft.

$$G_{zx} = E_z / 2 \cdot (1 + \mu_{zx}) \quad (2.7)$$

Hierdurch reduziert sich die Anzahl der messtechnisch zu ermittelnden Elastizitätsgrößen auf 4.

In einer weiteren Messreihe B wurde die Schichtdicke auf 0,358 mm erhöht. Es kann gezeigt werden, dass die Messergebnisse von Proben mit einer höheren Schichtdicke zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen, wie Proben mit einer geringeren Schichtdicke (Messreihe A). Eine Übersicht der Ergebnisse ist im Vergleich zu Messreihe A in *Tabelle 2.3* dargestellt.

	Mittelwert $E_x$ in MPa	Varianzkoeffizient in %	Abweichung in %
$A_x$	2894,37	3,32	
$B_x$	2825,13	0,76	2,39
	Mittelwert $E_z$ in MPa	Varianzkoeffizient in %	Abweichung in %
$A_z$	2615,49	6,77	
$B_z$	2540,26	10,65	2,88
	Mittelwert $\mu_{xy}$	Varianzkoeffizient in %	Abweichung in %
$A_{xy}$	0,302	2,74	
$B_{xy}$	0,314	3,81	3,97
	Mittelwert $\mu_{zx}$	Varianzkoeffizient in %	Abweichung in %
$A_{zx}$	0,237	1,35	
$B_{zx}$	0,261	2,84	10,13

Tabelle 2.3: Messergebnisse der Messreihe B zu E-Modul und im Vergleich zu Messreihe A

Für den vorliegenden Fall können die elastischen Eigenschaften des Materials somit als unabhängig von der gewählten Schichtdicke im untersuchten Bereich betrachtet werden.

## 2.2 Alternative Ermittlung der relevanten Materialkennwerte

Die Durchführung von Zugversuchen zur Ermittlung der relevanten Materialkennwerte ist von verhältnismäßig langer Dauer geprägt. Dies macht sich besonders bemerkbar, wenn eine Vielzahl von Materialien getestet werden sollen. Aus diesem Grund soll hier ein Verfahren vorgestellt werden, das auf einer visuellen Auswertung eines Bauteilquerschnittes basiert. Eine Zugprüfmaschine ist hierzu nicht mehr notwendig. Hierbei wird der Querschnitt einer Probe mikroskopisch betrachtet. Es wird die Fläche vorhandener Materialausparungen (Voids) im Verhältnis zur Fläche des Gesamtquerschnitts betrachtet. Diese Methode hat bereits RODRIGUEZ in seinen Untersuchungen [7] für unidirektionale Stranglamine aus ABS entwickelt und getestet. Im Folgenden wird gezeigt, dass sich diese Methode auch auf Kreuzverbunde aus PLA übertragen lässt.

Hierzu wurde ein Probekörper mit den Kennwerten aus Messreihe B gefertigt und in Acrylharz eingebettet und geschliffen. Die Körnung des Schleifwerkzeugs betrug 320. Anschließend ist die Querschnittsfläche mit dem Lichtmikroskop „Axioscope 2“ von Zeiss um das 50-fache vergrößert worden (Abbildung 2.7). Die hellgrünen Bereiche sind Bereiche ohne Materialfüllung. Die Form der Voids lässt auf Materialstrukturen schließen, die eine (bereichsweise) runde Querschnittsflächen aufweisen und senkrecht zur Bildebene orientiert sind. Die Aufnahme kann auf zwei unterschiedliche Weisen interpretiert werden (Abbildung 2.8 a,b). Hierzu ist die Abbildung 2.7 zeichnerisch ergänzt worden. In beiden Fällen sieht man am oberen Rand des Schliffbildes Stränge, die senkrecht zur Bildebene erscheinen. In der darunterliegenden Schicht verlaufen sie senkrecht zu diesen in der Bildebene. Zukünftige Untersuchungen werden sich auch damit beschäftigen, wie das Schliffbild geometrisch eindeutig interpretiert werden kann. Für die vorliegende Betrachtung ist dies jedoch unerheblich, da nur die Bereiche ohne Material im Verhältnis zur Gesamtquerschnittsfläche betrachtet wird.

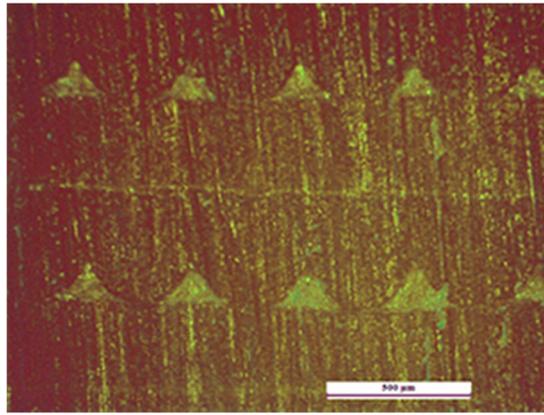


Abbildung 2.7: Mikroskopische Aufnahme der Probenquerschnittsfläche

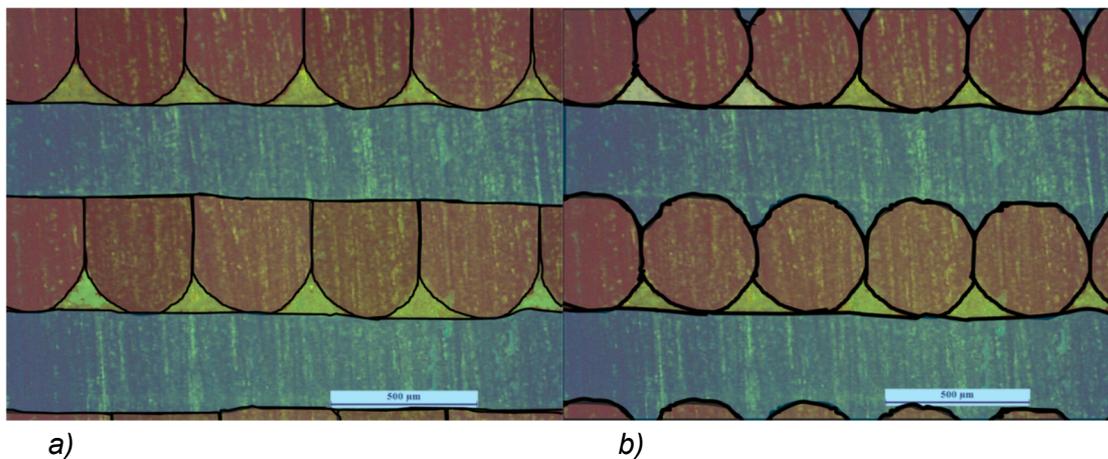


Abbildung 2.8: Interpretation des Schliffbildes durch manuelle Kolorierung der Probenquerschnittsfläche

Um eine korrekte Aussage zu diesem Verhältnis machen zu können, wird der betrachtete Ausschnitt des Schliffbildes soweit verkleinert, dass ganzzahlige Strangquerschnitte in einer Materialschicht erkennbar sind. Dieser Ausschnitt wird danach in ein Schwarz-/Weißbild umgewandelt und anhand von Pixelzahlen ausgewertet (Abbildung 2.9). Die weißen Flächen stellen somit Bereiche ohne Material- und die schwarzen Flächen Bereiche mit Materialfüllung dar. Es wird davon ausgegangen, dass sich in den Schichten darüber und darunter ähnliche Materialverhältnisse ergeben, die sich nur in ihrer Orientierung unterscheiden.

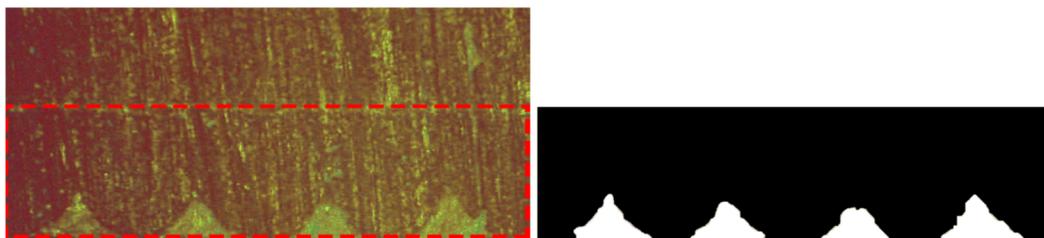


Abbildung 2.9: Ausschnitt des Probenquerschnitts zur Auswertung der Flächenverhältnisse

Aus dieser Betrachtung ergibt sich ein Verhältnis von

$$\phi = \frac{\text{Fläche der Voids}}{\text{Fläche des Querschnitts}} = 0,089 \quad (2.8)$$

RODRIGUEZ hat in seinen Untersuchungen unidirektional aufgebaute Bauteile (Abbildung 2.10) experimentell untersucht.

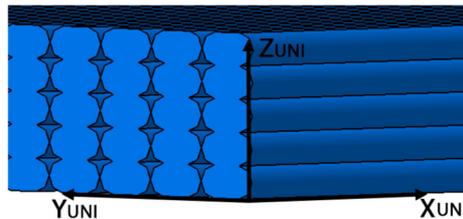


Abbildung 2.10: Unidirektionale Bauteilstruktur

Hieraus ergeben sich folgende empirische Zusammenhänge.

$$E_{x,UNI} = E \cdot (1 - \phi) \quad (2.9)$$

$$E_{y,UNI} = E_{z,UNI} = E \cdot (1 - \sqrt{\phi}) \quad (2.10)$$

$$\mu_{xy,UNI} = \mu \cdot (1 - \phi) \quad (2.11)$$

$$\mu_{yx,UNI} = \mu_{zx,UNI} = \mu \cdot (1 - \sqrt{\phi}) \quad (2.12)$$

In diesen Gleichungen beschreibt  $E_{x, UNI}$  den E-Modul in die Extrusionsrichtung und  $E_{y, UNI}$  sowie  $E_{z, UNI}$  den E-Modul senkrecht hierzu. Für die Querkontraktionszahl ergibt sich die Indizierung vergleichbar. Aus [8] kann z.B. entnommen werden, dass der E-Modul für ein unverarbeitetes PLA mit homogener Struktur  $E = 3500 \text{ MPa}$  beträgt und sich die Querkontraktionszahl zu  $\mu = 0,36$  ergibt. Setzt man die Werte in die obigen Gleichungen ein, ergibt sich

$$E_{x,UNI} = 3500 \text{ MPa} \cdot (1 - 0,089) = 3188,63 \text{ MPa} \quad (2.13)$$

$$E_{y,UNI} = E_{z,UNI} = 3500 \text{ MPa} \cdot (1 - \sqrt{0,089}) = 2456,07 \text{ MPa} \quad (2.14)$$

$$\mu_{xy,UNI} = 0,36 \cdot (1 - 0,089) = 0,33 \quad (2.15)$$

$$\mu_{yx,UNI} = \mu_{zx,UNI} = 0,36 \cdot (1 - \sqrt{0,089}) = 0,25 \quad (2.16)$$

Betrachtet man den vorliegenden Kreuzverbund an PLA-Strängen, so wechselt schichtweise die Extrusionsrichtung. Um die Ergebnisse von RODRIGUEZ auf den Kreuzverbund zu übertragen, wird folgender Ansatz gewählt.

$$E_x = E_y = \frac{E_{x,UNI} + E_{y,UNI}}{2} = 2822,35 \text{ MPa} \quad (2.17)$$

$$E_z = E_{z,UNI} = 2456,07 \text{ MPa} \quad (2.18)$$

$$\mu_{xy} = \frac{\mu_{xy,UNI} + \mu_{yx,UNI}}{2} = 0,29 \quad (2.19)$$

$$\mu_{zx} = \mu_{zx,UNI} = \mu_{yz} = \mu_{yz,UNI} = 0,25 \quad (2.20)$$

Diese Ergebnisse sind zum Vergleich mit den Ergebnissen der Messreihe B in *Tabelle 2.4* zusammengestellt.

	Durch Zugversuche ermittelte Größen (Messreihe B)	Durch visuelle Prüfung ermittelte Größen	Abweichung in %
$E_x$	2825,13 MPa	2822,35 MPa	0,1
$E_z$	2540,26 MPa	2456,07 MPa	3,31
$\mu_{xy}$	0,31	0,29	7,41
$\mu_{zx}, \mu_{yz}$	0,26	0,25	3,37

*Tabelle 2.4: Vergleich der Messgrößen, die im Zugversuch und durch visuelle Prüfung ermittelt wurden*

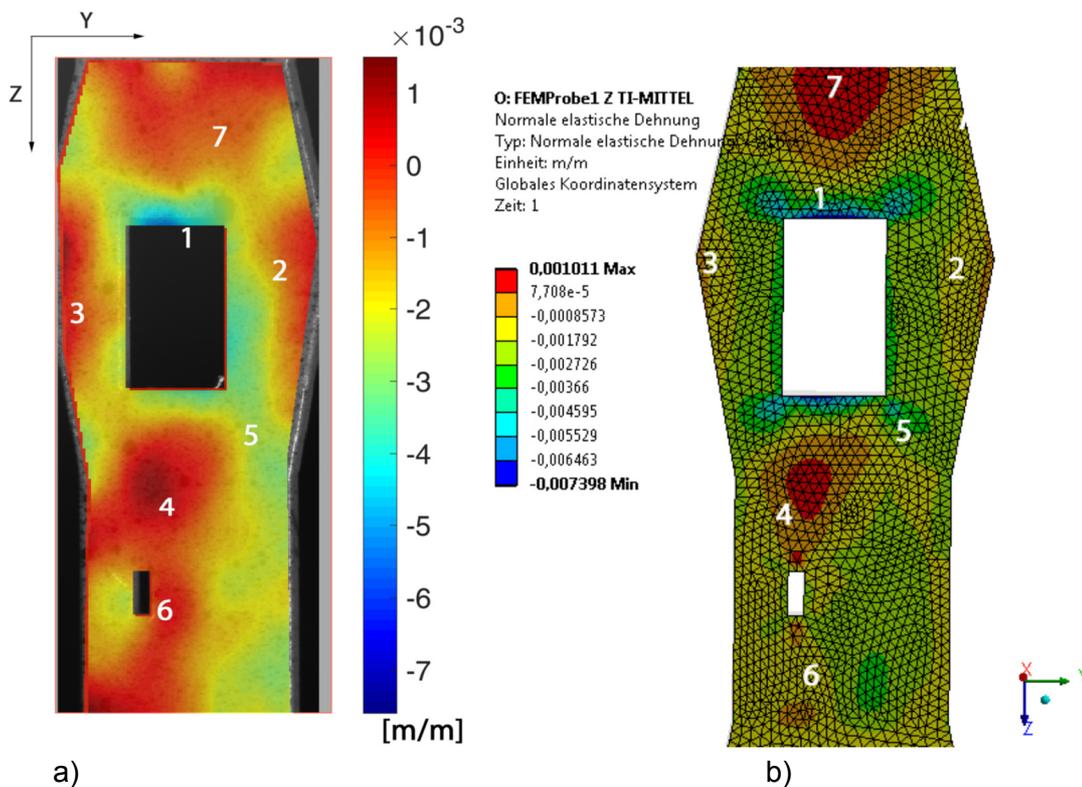
Man erkennt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse, die auf 2 grundlegend verschiedenen Messmethoden basieren.

Ob diese Übereinstimmung auch bei anderen Materialien und Strangorientierungen erkennbar ist und sich eine daraus ableitbare Allgemeingültigkeit ergibt, wird durch weitere geplante Messungen zu ermitteln sein.

### 3 Validierung der Ergebnisse

Das Ziel der Untersuchungen stellt die Ermittlung von Elastizitätsgrößen dar, die für die numerische Ermittlung der Festigkeitseigenschaften gedruckter Bauteile, die mit Hilfe des FDM-Verfahrens erzeugt wurden, geeignet sind. Hierzu wurden die ermittelten Größen in das FEM-System ANSYS übergeben. Um einen Vergleich der berechneten Ergebnisse mit Versuchsdaten zu erhalten, wurden weitere Zugversuche mit Proben unterschiedlicher Geometrien durchgeführt. Das hierbei auftretende Dehnungsverhalten wurde mit dem Videoextensiometer aufgezeichnet. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe der MATLAB-Applikation NCORR. Hierzu muss die Probengeometrie eine größere ebene Fläche aufweisen, die zur

Auswertung des Dehnungsverhaltens betrachtet werden kann. Die Proben wurden ausschließlich im elastischen Bereich belastet. Exemplarisch sind in der folgenden *Abbildung 3.1* die Dehnungsergebnisse in y-Richtung bei einer Belastung in z-Richtung dargestellt, die sich im Fall a durch Zugversuche und im Fall B durch eine FEM Analyse ergeben haben.



**Abbildung 3.1:** Darstellung der Dehnungsergebnisse in y-Richtung (Belastung in z-Richtung)  
 a) durch Zugversuch und Videoextensiomter  
 b) durch FEM-Analyse

Man erkennt in *Abbildung 3.1* eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung der Ergebnisse. In den Bereichen 1-6 ist der Unterschied der Ergebnisse kleiner als 10 %. Lediglich im Bereich der Einspannung (Bereich 7) tritt ein Unterschied von 27 % auf. Es sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlicher Orientierung und Belastung der Proben durchgeführt worden. Auch bei diesen Untersuchungen sind häufig nur geringe Unterschiede kleiner 10 % zu beobachten.

Diese Ergebnisse bestätigen die Annahme und Beschreibung des Materialverhaltens als transversal isotrop.

#### 4 Fazit

Durch experimentelle und numerische Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die Annahme eines transversal isotropen Materialverhaltens bei additiv gefertigten Bauteilen aus PLA, die mit Hilfe des FDM-Verfahrens als Kreuzverbund generiert werden, zu zielführenden

Ergebnissen führt. Die Ermittlung der für die FEM-Analyse notwendigen Elastizitätsgrößen kann alternativ zu den klassischen und zeitintensiven Zugversuchen auch durch visuelle Ermittlung der Flächenverhältnisse von Bereichen mit Materialfüllung und leeren Bereichen im Querschnitt einer Probe ermittelt werden. Eine Übertragbarkeit auf andere Strangorientierungen und Materialien muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

#### **Schrifttum:**

- [1] Zarbakhsh, Javad; Iravani, Armin; Amin-Akhlaghi, Zeinab: Submodeling Finite Element Analysis of 3D printed structures. In: 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 19.04.2015 - 22.04.2015. – ISBN 978–1–4799–9950–7, S. 1–4
- [2] S.-H. Ahn, et al., Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, Rapid Prototyp. J. 8. (2002)
- [3] B.H. Lee, J. Abdullah, Z.A. Khan, Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, J. Mater. Process. Technol. 169 (2005) 54–61.
- [4] Casavola, Caterina; Cazzato, Alberto; Moramarco, Vincenzo; Pappalettere, Carmine: Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. Materials and Design 90. Elsevier, 2016
- [5] Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978–3–540–72189–5
- [6] Altenbach, Holm: Kontinuumsmechanik: Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen. 3., überarbeitete Auflage. Berlin und Heidelberg. Springer Vieweg, 2015.
- [7] Rodríguez, José F.; Thomas, James P.; Renaud, John E.: Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation. In: Rapid Prototyping Journal 7 (2001), Nr. 3, S. 148–158.
- [8] Torres, Jonathan; Cotelo, José; Karl, Justin; Gordon, Ali P.: Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives. In: JOM 67 (2015), Nr. 5, S. 1183–1193.