

**Virtuelles Labor für
Ni/PU-Hybridschäume - Der Weg von
experimentellen Untersuchungen zur
virtuellen Auslegung**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Martin Reis, M. Sc.

Saarbrücken

2021

Tag des Kolloquiums: 15.10.21

Dekan:	Prof. Dr. Jörn Walter
Berichterstatter:	Apl. Prof. Dr.-Ing. Dr. Anne Jung Prof. Dr. Christian Motz
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Steven Quirin

Danksagung

Als Allererstes danke ich Apl. Prof. Dr.-Ing. Dr. rer. nat. Anne Jung. Noch heute erinnere ich mich an den Tag, an dem ich ihr vor der Abgabe meiner Bachelorarbeit gesagt habe, dass ich nach dem Bachelorabschluss nicht weiter machen möchte. Umso mehr bin ich dankbar dafür, dass sie mich bis zum heutigen Tag motiviert, angespornt und geprägt hat. Ich danke dir herzlich, Anne.

An zweiter Stelle danke ich Prof. Dr. Christian Motz, Leiter des Lehrstuhls für Experimentelle Methodik der Werkstoffwissenschaften, für die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren und für die Erstellung des Zweitgutachten.

Außerdem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels bedanken. Neben der Möglichkeit, an seinem Institut zu arbeiten, übernahm er die Aufgabe meines wissenschaftlichen Begleiters. In beiden Positionen stand er mir mit einem offenen Ohr gegenüber und hat durch seine Ideen maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Weiter bedanke ich mich bei den Projektpartnern Dr. Lars A. A. Beex und Dr. Li Chen, ohne deren Hilfe der Aufbau der Virtuellen Labors nicht möglich gewesen wäre.

Mit den richtigen Kollegen werden die nervigsten Tage doch wieder zu guten Tagen. Deshalb möchte ich mich von ganzem Herzen bei Christine Grill, M. Sc., Dr.-Ing. Thomas Bleistein und Dr.-Ing. Ralf Derr bedanken. Ohne euch hätte ich einen anderen Weg eingeschlagen. Natürlich möchte ich mich auch bei vielen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern am LTM bedanken, die immer bereitwillig bei Problemen geholfen, mit mir diskutiert und gelacht haben. Alle Namen zu nennen und alle Geschichten zu erzählen würde hier definitiv den Rahmen sprengen, trotzdem möchte ich an dieser Stelle Michael Fries, B. Sc. und Kristian König B. Sc. besonders hervorheben. So mancher Tag wäre ohne euch deutlich weniger Spaßig gewesen.

Zu guter Letzt gilt mein Dank meiner gesamten Familie und meinen Freunden, die mich in allen Lebenslagen der letzten 10 Jahre unterstützt haben. Danke Mama und Papa! Ihr hab an mich geglaubt, bevor ich es selber getan habe. Ohne die Möglichkeit die ihr mit geboten habt, meinen Weg selbst zu finden, wäre ich heute nicht so zufrieden, wie ich es bin.

Zusammenfassung

Steigende Anforderungen an Gewicht, Stabilität und Kosten von Bauteilen erfordern den Einsatz von immer leichteren, steiferen und günstigeren Strukturen. Durch die Beschichtung eines kostengünstigen Polyurethan-Schaums mit nanokristallinem Nickel, bieten Ni/PU-Hybridschäume eine gute Lösung. Die Charakterisierung des Materials ist allerdings eine Herausforderung. Die komplexe Struktur-Eigenschafts-Beziehung des Schaums erfordert eine hohe Anzahl an Versuchen, um ein umfassendes Materialverständnis zu erhalten. Zusätzlich dauern Finite-Elemente-Simulationen durch ihre Komplexität sehr lange, wodurch bislang der breite industrielle Einsatz des Hybridschaums verhindert wird.

Diese Arbeit präsentiert ein Virtuelles Labor für Hybridschäume. Dazu wird zunächst eine experimentelle Charakterisierung des Schaums vorgenommen, wobei zunächst die Erhöhung der Messgenauigkeit der digitalen Bildkorrelation im Fokus steht. Die hohe Messgenauigkeit ermöglicht die präzise Untersuchung von individuellen Stegen unter Zug- und Biegebelastung. Die mikromechanisch ermittelten Materialparameter dienen als Input für ein Simulationsmodell auf Basis einfacher Einheitszellen. Dabei zeigt die Verifikation auf der Porenebene gute Übereinstimmungen der Ergebnisse. Der abschließende Vergleich der experimentellen und simulativen Untersuchungen der Makroebene bestätigt die Ergebnisse. Durch das Virtuelle Labor kann ein Schaum exakt entsprechend der vorhandenen Anforderungen ausgelegt werden.

Abstract

Increasing demands on weight, stability and cost of components require the use of ever lighter, stiffer and cheaper structures. By coating a low-cost polyurethane foam with nanocrystalline nickel, Ni/PU hybrid foams offer a good solution. However, characterising the material is a challenge. The complex structure-property-relationship of the foam requires a high number of experiments to obtain a comprehensive understanding of the material. In addition, finite-element-simulations take a long time due to their complexity. This has so far prevented the widespread industrial use of hybrid foam.

This work presents the construction of a Virtual Lab for hybrid foams. For this purpose, an experimental characterisation of the foam is first carried out, whereby the focus is initially on increasing the measurement accuracy of the digital image correlation. The high measurement accuracy enables the precise investigation of individual struts under tensile and bending loads. The micromechanically determined material parameters serve as input for a simulation model based on simple unit cells. The verification on the cell scale shows good agreement of the results. The final comparison of the experimental and simulative investigations of the macro scale confirm the results. The Virtual Lab allows a foam to be designed exactly according to the existing requirements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
2	Hybridschäume - Ein von der Natur inspiriertes Material	5
2.1	Struktur-Eigenschafts-Beziehung	7
2.2	Konzept und Potential von Hybridschäumen	14
3	Experimenteller Aufbau	19
3.1	Die digitale Bildkorrelation	20
3.1.1	Theoretische Grundlagen	20
3.1.2	Verbesserung der Messgenauigkeit	23
3.2	Probenvorbereitung	32
3.2.1	Präparation	33
3.2.2	Fotogrammetrie zur 3D Rekonstruktion	34
3.3	Universelle mikromechanische Prüfeinrichtung	37
3.3.1	Spezifikationen des Aufbaus	37
3.3.2	Adaptionen	37
4	Experimentelle Materialcharakterisierung	41
4.1	Untersuchung der Schichtdicke	42
4.1.1	Optische Quantifizierung	42
4.1.2	Virtuelle Beschichtungserzeugung	48
4.2	Mikroskalenexperimente	49
4.2.1	Dreipunktbiegung	50
4.2.2	Zweipunktbiegung	55
4.2.3	Zugversuche	61

4.2.4	Diskussion: Mikroskalenexperimente	69
5	Virtuelle Erweiterung der Datenbasis	71
5.1	Parameteridentifikation aus realen Experimenten	73
5.2	Virtuelle Experimente	79
5.2.1	Torsion	80
5.2.2	Biegung	80
5.2.3	Ergebnisse der virtuellen Experimente	81
5.3	Stochastische Materialparameterverteilung	83
6	Virtuelles Labor	87
6.1	Pentagondodekaeder als Einheitszelle	88
6.2	Integration des Pentagondodekaeders ins Balkenmodell nach Li et al.	89
6.3	Verifikation des Modellierungsansatzs	91
6.3.1	Experimente an Einzelporen	91
6.3.2	Simulationen an Einheitszellen	96
7	Validierung	101
7.1	Optische Charakterisierung	102
7.2	Makroskopische Druckversuche	104
7.2.1	Kleine Würfel	104
7.2.2	Große Würfel	108
7.3	Simulationen im Virtuellen Labor	112
7.4	Diskussion: Validierung	114
8	Die Zukunft von Ni/PU Hybridschäumen	117
	Literaturverzeichnis	121
A	Anhang	135

1

Einleitung und Motivation

Über lange Zeit hinweg hat der Mensch die vorhandenen Ressourcen ausgiebig genutzt, ohne dabei auf die Natur zu sehen. Doch mit steigender Ressourcenverknappung und immer höheren Ansprüchen an Gewicht und Steifigkeit von Bauteilen, muss über alternative Strukturen und Konzepte nachgedacht werden. Dabei präsentiert die Natur zum Aufbau großer und stabiler Strukturen eine ideale Lösung. Beispiele sind Holz [20] oder Röhrenknochen [143], die aus einer kompakten Deckschicht und einer Füllung mit feinen, verästelten Materialstrukturen bestehen. Dadurch sind sie ideal auf ihre Anforderung angepasst und können gezielt hohe kinetische Energien aufnehmen [139]. Das Volumen besteht dabei zum größten Teil aus Luft und nur wenig Material. Die äußeren Belastungen werden über die feine Struktur von zufällig verteilten Streben gleichmäßig über das gesamte Volumen verteilt, wodurch eine große Belastung ausgehalten werden kann.

Diese Strukturen im Inneren von beispielsweise Holz oder Knochen sind das Vorbild für künstliche Schaumstrukturen und letztendlich Metall- und Hybridschäume [50]. Der Vorteil dabei ist klar. Die komplexe makroskopische Struktur, bestehend aus einzelnen Stegen auf der Mikroebene und einzelnen oder wenigen Poren auf der Mesoebene, ermöglicht es, eine relativ hohe Menge an Energie bei verhältnismäßig geringem Gewicht zu absorbieren [50]. Der aufwendige Herstellungsprozess und die hohen Kosten von Metallschäumen beschränken den breiten Einsatz auf Anwendungen, bei denen die Kosten eine untergeordnete Rolle spielen. Die Entwicklung von Hybridschäumen und deren Verwendung bietet dazu eine Alternative [68]. Durch die Verwendung eines kostengünstigen Grundschaums, der mit einem Metall beschichtet wird, können die

Herstellungskosten gesenkt werden ohne Nachteile in der Steifigkeit zu bieten [68], sodass der breite industrielle Einsatz ermöglicht wird.

Die Verteilung der Belastung über die gesamte Struktur und die daraus resultierende starke Korrelation von Struktur und Eigenschaften [59] stellt für die mechanische Charakterisierung und die Beschreibung der Eigenschaften eine große Herausforderung dar. Die experimentelle Charakterisierung erfordert durch eine breite Streuung der Materialeigenschaften und deren starken Zusammenhang mit der Struktur besonders hohe Messgenauigkeiten und ein besonderes Maß an Sorgfalt. Nur so können die makroskopischen Eigenschaften verstanden werden. Für die Durchführung von Finite-Elemente-Simulationen bedeutet das, dass die komplexe und individuelle Struktur des Schaumes abgebildet werden muss. Die Simulationen sind sehr zeitintensiv und erfordern hohe Rechenleistungen. Im Zeitalter von Industrie 4.0 müssen die Anzahl an mechanischen Versuchen allerdings minimiert und die virtuelle Auslegung von Bauteilen ermöglicht werden, damit die industrielle Anwendung relevant ist. Bei der Verwendung von Finite-Elemente-Simulationen und den dazu benötigten fein aufgelösten Netzen des Schaums ist die virtuelle Auslegung aufgrund von hohen Simulationszeiten nicht möglich. Die Abstraktion der Struktur zu einem Aufbau aus einfachen Einheitszellen, die das reale Verhalten der Schäume dennoch repräsentieren können ist deshalb notwendig. Ein solches Modell verkürzt die Rechenzeit erheblich und macht dadurch die virtuelle Auslegung lukrativ. Das Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, eine qualitativ hochwertige Datenbasis durch experimentelle Charakterisierung zu erstellen, die Daten zu abstrahieren und abschließend alle Informationen zu einem Virtuellen Labor zusammenzufügen, das eine virtuelle Auslegung von Ni/PU-Hybridschäumen ermöglicht. Dabei liegt der Fokus auf den mechanischen Versuchen auf Mikro- und Mesoebene der Schäume. Dazu ist diese Arbeit in die folgenden Kapitel unterteilt, wobei die Zusammenhänge der Kapitel 4 bis Kapitel 7 in Abbildung 1.1 dargestellt sind.

Das grundlegende Verhalten von Metallschäumen wird in **Kapitel 2 - Hybridschäume - Ein von der Natur inspiriertes Material** zunächst erläutert. Dabei spielt die Struktur-Eigenschafts-Beziehung von Metallschäumen eine wesentliche Rolle. Im Anschluss wird das Konzept von Hybridschäumen erörtert und dabei kurz auf die dadurch entstehenden Möglichkeiten bei der Verbesserung des Materialverhaltens eingegangen.

Die besonderen Herausforderungen bei der mechanischen Charakterisierung der Schäume erfordern, dass in **Kapitel 3 - Experimenteller Aufbau** detailliert auf die digitale Bildkorrelation und die Verbesserung der Messgenauigkeit eingegangen wird. Das Kapitel beschreibt danach die unterschiedlichen Probenformen und eine einfache Methode, ein Geometriemodell unter Verwendung von Fotogrammetrie zu erzeugen. Im

letzten Teil des Kapitels ist der universelle mikromechanische Prüfstand und dessen Adaptionen zur Untersuchung von Einzelstegen und -poren beschrieben.

Kapitel 4 - Experimentelle Materialcharakterisierung befasst sich zunächst mit der optischen Quantifizierung der Schichtdicke, wobei anhand von Schliffbildern eine starke Abweichung zwischen Zielschichtdicke und realer Schichtdicke gezeigt wird. Außerdem präsentiert der erste Abschnitt des Kapitels eine Möglichkeit, die Oberflächenmodelle aus der Fotogrammetrie virtuell zu beschichten und somit ein Modell für die Nickelschicht zu generieren. Die folgenden mechanischen Mikroskalenexperimente sind in Dreipunktbiege-, Zweipunktbiege- und Zugversuche an Einzelstegen unterteilt.

Nachdem in Kapitel 4 durch eine große Anzahl an Versuchen eine breite Datenbasis an mikromechanischen Parametern geschaffen wurde, identifiziert **Kapitel 5 - Virtuelle Erweiterung der Datenbasis** zunächst die Materialparameter aus den mikromechanischen Zugversuchen. Im nächsten Schritt werden mit diesen Materialparametern weitere virtuelle Experimente durchgeführt. Diese virtuellen Experimente liefern die Möglichkeit, das Materialverhalten der Stege auf einfache Balkenelemente zu übertragen und dann stochastische Materialparameter zu identifizieren. Diese stochastischen Parameter erlauben das Schätzen neuer Parameter, die ein Strukturverhalten wie die identifizierten Parameter erzeugen.

Zur Verifikation des Modellierungsansatzes beschreibt **Kapitel 6 - Virtuelles Labor** die Umsetzung des Virtuellen Labors. Dazu wird zunächst das Pentagondodekaeder als Einheitszelle vorgestellt. Zur Verifikation präsentiert das Kapitel experimentelle Druck- und Zugversuche an Einzelporen und vergleicht sie mit simulierten Druckversuchen an der Einheitszelle. Dabei kann die Einheitszelle schon mit einfachen Materialparametern eine ähnlich breite Streuung der Reaktionskraft wie die experimentell gemessenen Kräfte aufzeigen.

Kapitel 7 - Validierung validiert das Virtuelle Labor auf Meso- und Makroebene. Dazu beschreibt es zunächst mechanische Versuche an Schaumwürfeln mit verschiedenen Kantenlängen, um diese anschließend mit Simulationen im Virtuellen Labor zu vergleichen. Dabei zeigt das Virtuelle Labor sein Potential und stellt das charakteristische Verhalten der Schäume realistisch anhand einfacher Parameter dar.

Das abschließende **Kapitel 8 - Die Zukunft von Ni/PU-Hybridschäumen** zieht ein Fazit aus dieser Arbeit und schafft unter Berücksichtigung der präsentierten Ergebnisse einen Ausblick hin zur industriellen Anwendung von Ni/PU-Hybridschäumen.

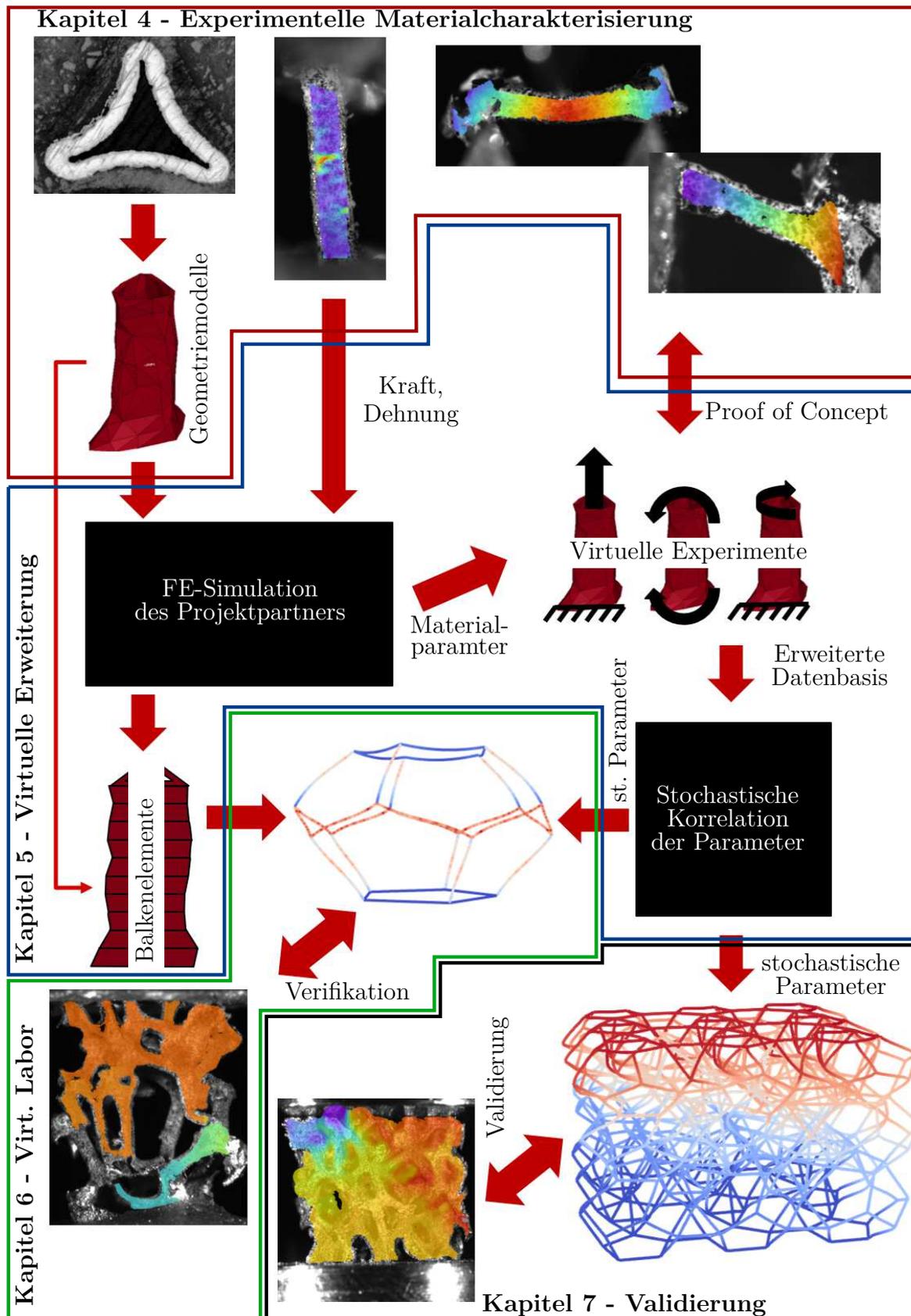


Abbildung 1.1: Graphische Zusammenfassung der Zusammenhänge von Kapitel 4 bis Kapitel 7

Hybridschäume - Ein von der Natur inspiriertes Material

Dieses Kapitel beschreibt die Entstehungsgeschichte von Hybridschäumen. Dazu wird zunächst der Begriff des Metallschaums definiert, um anschließend die Vorbilder aus der Natur zu nennen. Danach führt das Kapitel wichtige Kenngrößen zur Unterteilung von Metallschäumen ein, um darauf aufbauend das makroskopische Deformationsverhalten von Metallschäumen mit der Struktur und den mikroskopischen Eigenschaften in Zusammenhang zu setzen. Mit diesen Grundlagen wird schließlich die Idee und das Potential von Hybridschäumen sowohl allgemein als auch am Beispiel des hier im Fokus stehenden Ni/PU-Hybridschaums erläutert.

Der Begriff Metallschaum wird erstmals in einem französischen Patent von 1925 benutzt [100]. Er bezeichnet ein aufgeschäumtes Metall, dessen Gesamtstruktur zu großen Teilen aus Hohlräumen besteht. Eine feine Tragwerkstruktur aus Metall sorgt mittels eines komplexen Aufbaus für einen stabilen Zusammenhalt des Materials. Das Interesse an dem Material stieg erst in den 1950er Jahren und später nochmals durch einen finanziellen An Schub der Forschung im Jahr 1990 an [88]. Erste Vermarktungserfolge und das enorme Leichtbaupotential förderten die Weiterentwicklung von Metallschäumen bis heute. Das Konzept des strukturellen Materials stammt dabei nicht vom Menschen, sondern ist der Natur entnommen. Durch die Evolution haben sich zum Aufbau großer Volumina Tragwerkkonzepte durchgesetzt (vgl. Abbildung 2.1). So besteht beispielswei-

se ein menschlicher Oberschenkelknochen nicht aus einem Vollmaterial, sondern ist in verschiedenen Schichten aufgebaut. Unterhalb der harten und vollgefüllten Deckschicht des Knochens befindet sich ein komplexes Tragwerk aus feinen Materialstrukturen und Hohlräumen. An besonders belasteten Stellen liegt eine Versteifung in Form einer stärker ausgebildeten Struktur vor, wohingegen an weniger belasteten Stellen eine feinere und leichtere Struktur zu finden ist (vgl. Abbildung 2.1(a)). Durch diese inhomogene Materialverteilung ist der Knochen ideal auf seine Anforderungen hin optimiert [139, 143].

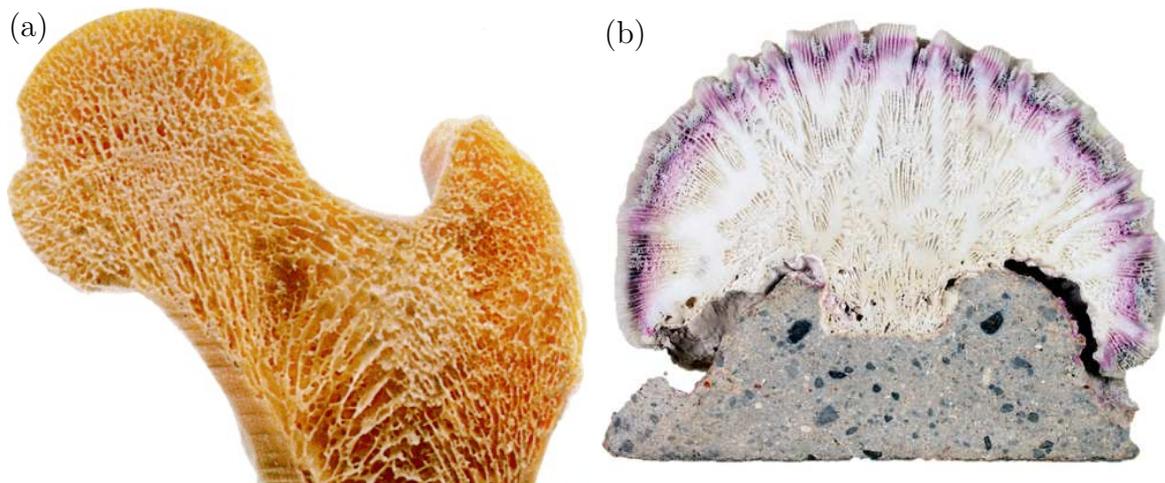


Abbildung 2.1: Beispiele für offenporige Schaumstrukturen in der Natur: (a) Oberschenkelknochen nach Dorozhkin und Epple [36] und (b) Koralle nach Grobe [54]

Die innere Struktur ist aus einer Vielzahl einzelner Streben, den sogenannten Trabekeln, aufgebaut, welche an Knotenpunkten miteinander verbunden sind. Einen ähnlichen Aufbau zeigt das Kalkskelett von Korallen (vgl. Abbildung 2.1 (b)) und Seesternen. Bäume und Kork sind ebenfalls nicht aus solidem Material, sondern aus einer Ansammlung von geschlossenen Zellen aufgebaut [20, 49, 53]. Diese Zellen besitzen keine offene Tragwerkstruktur aus Verstrebungen. Sie weisen feine Verbindungswände auf, die Gas im Inneren der Zellen einschließen. Dabei bleibt das Prinzip identisch. Durch die Nutzung einer optimierten Tragwerkstruktur wird das Gewicht reduziert und die auftretenden Belastungen auf die gesamte Struktur verteilt. Im Gegensatz zu den Beispielen aus der Natur setzt der Mensch bei der Entwicklung von Bauteilen vielfach auf die Verwendung von schweren Konstruktionen aus Vollmaterial. Diese benötigen enorm viele Ressourcen und sind oftmals unnötig schwer. Zukünftig stellt die Verwendung von Metallschäumen eine Alternative hierzu dar. Dazu müssen jedoch das Materialverhalten von Metallschäumen verstanden, die Auslegung von Bauteilen vereinfacht und die Herstellungskosten gesenkt werden.

Wie auch bei Schaumstrukturen in der Natur wird bei der Betrachtung von technischen Metallschäumen zwischen offen-, teilweise geschlossen- und geschlossenenporigen Strukturen unterschieden. Die Strukturen von teilweise geschlossen- und geschlossenenporigen Schäumen sind vergleichbar mit Holz und Kork mit größtenteils oder vollständig abgeschlossenen Zellen. Im Gegensatz dazu stehen die offenporigen Schäume, die aus einer Tragwerkstruktur einzelner Elemente, den sogenannten Stegen, bestehen. Die Stege sind an Knotenpunkten verbunden und bilden einzelne Poren. Makroskopische Schäume darüber hinaus bestehen aus einem Agglomerat vieler Poren. Durch den Aufbau ohne Zellwände ist das Material von Fluiden durchströmbar und die Beschichtung mit einem weiteren Material ist möglich. Bei dem Aufbau aus geschlossenen Zellen ist die Durchströmbarkeit nicht gegeben, weshalb diese Schäume nicht zur vollständigen Beschichtung geeignet sind. Da in dieser Arbeit beschichtete Schäume untersucht werden, werden teilweise geschlossen- und geschlossenenporige Schäume im Weiteren nicht mehr berücksichtigt und auf die Unterscheidung verzichtet. Die Begriffe Metallschaum und Schaum bezeichnen in dieser Arbeit immer offenporige Metall- beziehungsweise Hybrid-schäume.

2.1 Struktur-Eigenschafts-Beziehung

Zur Charakterisierung von Metallschäumen werden diese in drei Hierarchieebenen unterteilt [32, 59, 102]. Dabei wird die größte Strukturebene als Makroebene bezeichnet. Sie beschreibt Proben mit einer Mindestgröße von vier bis sieben Poren [4, 64, 102] bis hin zu gesamten Bauteilen. Die nächstkleinere Ebene ist die Mesoebene. Sie befasst sich mit Proben in der Größenordnung von einzelnen Poren. In der kleinsten Ebene, der Mikroebene, werden einzelne Stege und deren Eigenschaften untersucht. Abbildung 2.2 zeigt die einzelnen Ebenen am Beispiel eines Ni/PU-Hybridschaums. Bei der Betrachtung einer Ebene wird diese als Kontinuum mit homogenen Materialeigenschaften angenommen und Inhomogenitäten in den tieferen Hierarchieebenen werden nicht berücksichtigt [8, 50]. Durch den hierarchischen Aufbau gehören Metallschäume zu den mikroheterogenen Materialien [69].

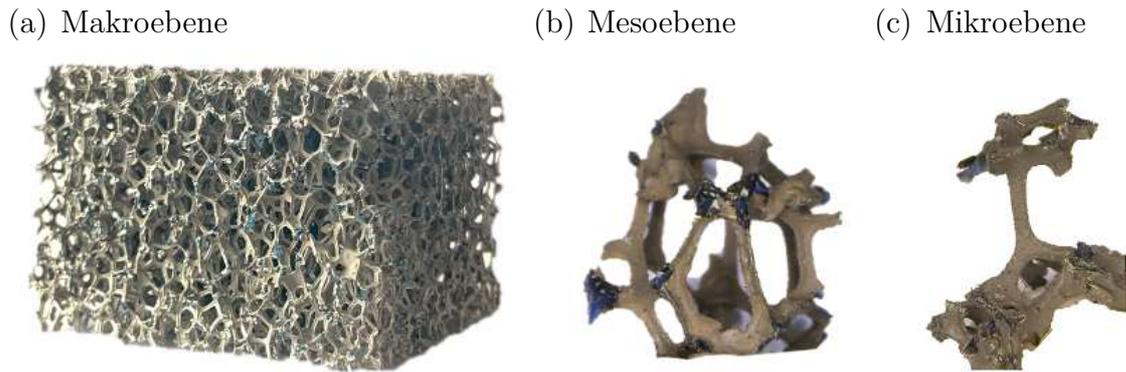


Abbildung 2.2: Hierarchischer Aufbau eines offenporigen Schaums am Beispiel eines Ni/PU-Hybridschaums: (a) makroskopische Probe, (b) Einzelpore als Beispiel der Mesoebene, (c) Einzelsteg als Beispiel der Mikroebene

In der Makroebene erlauben vier Kenngrößen die Unterteilung und Klassifizierung von Metallschäumen. Die erste Kenngröße ist die Porosität. Sie beschreibt das Verhältnis von Hohlraum zu Material. Bei Metallschäumen kann eine Porosität von bis zu 99 % erreicht werden. In dem Gesamtvolumen befände sich somit nur 1 % Material [41]. In direktem Zusammenhang zur Porosität steht die relative Dichte des Schaums als zweite Kenngröße. Die relative Dichte ρ_r beschreibt den Quotienten aus der spezifischen Dichte des Schaums ρ und der Dichte des Materials ρ_s . Die spezifische Dichte ρ beschreibt die auf das Gesamtvolumen normierte Masse des Schaums. Mit der Porenanzahl pro Zoll (ppi, *pores per inch*) beschreibt die dritte Kenngröße indirekt die mittlere Porengröße. Zur Bestimmung der ppi-Zahl wird die Anzahl der Poren pro Zoll ausgewertet. Typische Größen reichen dabei von 5 ppi bis 100 ppi. Die Größe der Poren nimmt dabei mit steigender ppi-Zahl ab. Die vierte Kenngröße ist die Konnektivität. Sie beschreibt die Anzahl und Art der Verbindungen der Stege an den Knoten.

Für die mechanische Charakterisierung von Metallschäumen werden vielfach makroskopische Druckversuche verwendet. Um die in den Versuchen gemessenen Kräfte vergleichen zu können, werden sie auf die Grundfläche der Proben normiert. Die entstandene Größe wird als Spannung σ mit der Einheit $\text{N}/\text{mm}^2 = \text{MPa}$ bezeichnet. Die Längenänderung in Belastungsrichtung wird auf die Ausgangslänge normiert und Verzerrung ε genannt. Zur besseren Veranschaulichung wird in der Regel der Betrag der Verzerrung aufgetragen. Der Begriff Dehnung bezeichnet den Spezialfall einer positiven Längenänderung. Das Spannungs-Verzerrungs-Diagramm lässt sich in drei Abschnitte unterteilen (vgl. Abbildung 2.3, Druckversuch). Im ersten Abschnitt liegt ein linearer Anstieg der Spannung vor. Für gewöhnlich entspricht ein solcher linearer Anstieg einer elastischen Verformung des Materials. Bei Schäumen ist der Bereich über eine lange Verzerrung konstant und nicht vollständig elastisch. Durch lokal begrenzte, plastische Verformungen kommt es zu einer irreversiblen Deformation [3, 4]. Aufgrund des linearen, scheinbar elastischen Verhaltens wird dieser Bereich als pseudo-elastischer Bereich bezeichnet.

Durch die lokale Plastizität unterscheiden sich sowohl die Elastizitätsmoduln E als auch die Schubmoduln G entlang des Belastungs- und Entlastungspfads. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, müssen die Moduln daher entlang eines Entlastungspfades bei vorher definierter Dehnung bestimmt werden [50]. Der lineare Bereich endet mit einer Spannungsüberhöhung. Bei der maximalen Spannung kommt es zu einem Kollabieren erster Poren. Diese Spannung wird als plastische Versagensspannung (PCS, *plastic collapse stress*) bezeichnet [50]. Auf die leichte Spannungsüberhöhung folgt ein langes Spannungsplateau, bei dem unter großer Dehnung einzelne Porenlagen nacheinander kollabieren. Scheffler und Colombo [125] sehen als Grund der Überhöhung des PCS den Unterschied zwischen biegedominiertem und streckungsdominiertem Verhalten der Stege. Dabei zeigen Schäume mit Stegen, die sich biegedominiert deformieren eine Überhöhung des PCS. Bei der Verwendung als Crashabsorber erzeugt die starke Überhöhung eine deutlich höhere Belastung auf das Bauteil als der spätere Plateaubereich. Die zulässige Bauteilbelastung darf allerdings zu keinem Zeitpunkt überschritten werden, wodurch eine Überhöhung des PCS deutliche Nachteile mit sich bringt. Durch das Kollabieren einzelner Porenlagen variiert die Spannung in diesem Bereich kaum. Der zweite Bereich endet in einem starken Anstieg der Spannung bei geringem Anstieg der Dehnung. Dieser Bereich ist rein geometrisch durch den Kontakt einzelner Stege geprägt. Der dritte Bereich wird als Verdichtungsbereich, die Dehnung bis zu diesem Punkt als Verdichtungsdehnung bezeichnet.

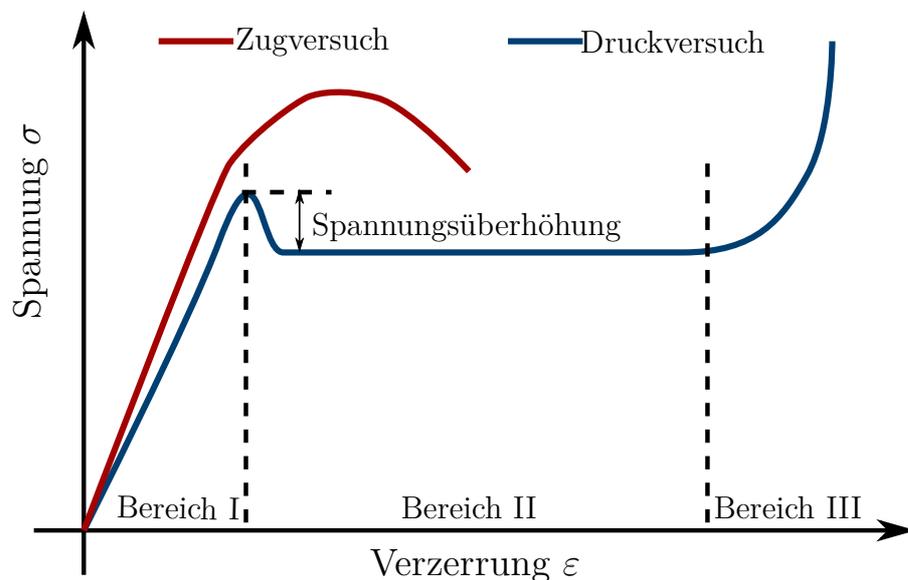


Abbildung 2.3: Schematische Spannungs-Verzerrungs-Diagramme zur Darstellung des Deformationsverhaltens eines Metallschaums unter Zug- und Druckbelastung für einen Schaum mit höherer Zug- als Drucksteifigkeit; Bereich I: pseudoelastischer Bereich, Bereich II: Plateauphase, Bereich III: Verdichtungsphase

Schon im ersten Bereich zeigt sich der starke Zusammenhang von Struktur und Eigenschaften. Nur durch die lokale Plastifizierung von einzelnen Knoten kommt es zu einer langen Linearität des Verlaufs im Spannungs-Verzerrungs-Diagramm. Gleiches gilt für den zweiten Bereich. Das lange Spannungsplateau kann nur durch das Kollabieren der einzelnen Porenlagen erklärt werden. Bei der Betrachtung eines Schaums als homogenes Material kann dieses Verhalten nur phänomenologisch beschrieben werden. Die Struktur-Eigenschafts-Beziehung von Schäumen verlangt deshalb nach einer Charakterisierung auf der Meso- und Mikroebene.

Das Verhalten von Metallschäumen unter Zugbelastung unterscheidet sich wesentlich vom Verhalten unter Druckbelastung. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt zwar den gleichen pseudo-elastischen Bereich zu Beginn der Deformation wie im Druckfall, aber bei Erreichen der PCS versagt eine komplette Porenlage. Dadurch geht der Kontakt innerhalb der Probe komplett verloren und die Spannung sinkt schlagartig auf null ab (vgl. Abbildung 2.3). Durch die Abhängigkeit des makroskopischen Verhaltens von der Struktur unterscheiden sich die ermittelten Elastizitäts- und Schubmoduln für Metallschäume signifikant von denen des Vollmaterials. Nach Gibson und Ashby [50] lassen sich die Moduln unter Zuhilfenahme der relativen Dichte des Metallschaums und der Moduln des Vollmaterials quantifizieren. Mit der relativen Dichte $\rho_r = \rho/\rho_s$ folgt für den Elastizitätsmodul

$$E \approx \alpha E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n, \quad (2.1)$$

und für den Schubmodul

$$G \approx \frac{3}{8} \alpha G_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n. \quad (2.2)$$

Die Parameter n und α sind abhängig vom betrachteten Metallschaum. Die Querdehnzahl ν des Vollmaterials ist konstant mit $\nu \approx 0,3$ [50]. Evans et al. [42] bestätigten diese Feststellungen für nahezu alle kommerziellen Metallschäume. Der Zugmodul ist zwischen 10 % und 30 % höher als der Druckmodul [50]. Dabei lässt sich eine starke Korrelation zwischen der Porenanisotropie und der Differenz der Moduln erkennen. Relativ runde Poren weisen eine kleinere Abweichung auf, wohingegen Poren mit starker Abweichung der Längen in longitudinaler und transversaler Richtung stärkere Abweichungen zwischen Zug- und Druckmodul zeigen.

Durch das ausgeprägte Spannungsplateau ist das Dämpfungsvermögen eines Metallschaums zwischen fünf- und zehnmal höher als das Dämpfungsvermögen des Vollmaterials [50, 103]. Die Höhe des Plateaus, d.h. die Spannung, bei der die einzelnen Porenlagen kollabieren, variiert abhängig vom untersuchten Schaum sowie der Porengeometrie [50, 51, 63]. Die nominell konstante Spannung macht Metallschäume zum perfekten Energieabsorber. Durch die Verwendung unterschiedlicher Geometrien und Materialien des Schaums lässt er sich ideal entsprechend des Bauteilschutzes auslegen. Im Vergleich zu standardisierten Versuchen an Probenkörpern aus Vollmaterial streuen die Ergebnisse von Versuchen an Metallschäumen deutlich. Die Haupteinflussfaktoren auf das Verhalten der Schäume liegen neben der relativen Dichte des Schaums, in der Mesostruktur und den mikromechanischen Eigenschaften [8, 69]. Die Materialeigenschaften des Stegs unterscheiden sich dabei deutlich zu den Materialparametern des Vollmaterials, aus dem die Stege hergestellt wurden. Durch das deutlich kleinere Volumen der einzelnen Stege und dem durch die Stegeometrie bedingten größeren Verhältnis von Oberfläche zu Volumen im Vergleich zu einem im Block gegossenen Material, treten bei Stegen höhere Temperaturgradienten während der Erstarrung auf. Die dadurch entstehende Gefügestruktur der Stege sowie eine während der Herstellung entstehende Oxidschicht auf der Stegoberfläche und die Oberflächenstruktur der Stege bewirken hohe Abweichungen der Materialeigenschaften [64]. Die Mesostruktur beschreibt dabei Morphologie, Form, Größe und Verteilung der Poren. Die mikromechanischen Eigenschaften beinhalten sowohl die Materialeigenschaften als auch die Geometrie der Stege [69]. Die mesoskopischen und mikroskopischen Parameter können dabei nicht mit Hilfe von makroskopischen Versuchen identifiziert werden. Die Charakterisierungen von Metallschäumen auf Meso- und Mikroebene sind deshalb unbedingt notwendig, um das Materialverhalten von Metallschäumen vollständig verstehen zu können.

Mikromechanische Charakterisierung

Die experimentelle Charakterisierung von Metallschäumen mittels Versuchen an Einzelporen und Einzelstegen stellt in vielerlei Hinsicht eine besondere Herausforderung dar. Die zu untersuchenden Proben befinden sich deutlich unterhalb der Größenordnung von DIN-normierten Prüfkörpern, weshalb sie nicht oder nur mittels komplexer Adaptionen in kommerziellen, makroskopischen Versuchsständen getestet werden können. Für die Untersuchung in mikroskopischen Versuchsständen, wie Mikro- und Nanoindentationsaufbauten sind Poren und Stege zu groß und die für die Deformation benötigten Kräfte überschreiten die maximale Prüfkraft der Geräte deutlich. Zwar können in Indentationsversuchsständen unter hochauflösenden Mikroskopen Mikrobiegeversuche durchgeführt werden, allerdings müssen die Prüfkörper mittels fokussiertem

Ionenstrahl (FIB, *focussed ion beam*) aus dem Probenmaterial ausgeschnitten werden [95]. Die Versuche sind durch die aufwendige Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung mittels FIB sowohl zeit- als auch kostenintensiv [95]. Wie auch bei der Mikro- und Nanoindentation, bei denen eine instrumentierte Eindringprüfung mit einer feinen Indenternadel durchgeführt wird, liefern Mikrobiegeversuche in Mikro- und Nanoindentationsversuchsständen nur sehr lokale Materialparameter. Durch die Inhomogenitäten innerhalb der Stege sowie der starken Kopplung zwischen Steg- bzw. Porengeometrie und dem makroskopischen Materialverhalten haben die lokalen Parameter allein wenig Aussagekraft über das makroskopische Materialverhalten [72]. Versuche an einzelnen Stegen und Poren bieten deutlich bessere Möglichkeiten, das Verständnis des Materialverhaltens zu fördern. Durch die besondere Herausforderung bei der mechanischen Charakterisierung von Stegen müssen speziell angepasste oder entwickelte Versuchsaufbauten und Auswertungsmethoden verwendet werden. Aus diesem Grund werden hier zunächst die in der Literatur gefundenen Versuchsaufbauten vorgestellt.

Zhou et al. [147] und Kaya et al. [75, 76] klemmen die Stege durch einen Formschluss an den Knoten. Durch diese Art der Befestigung sind die Versuche auf uniaxiale Zugversuche beschränkt. Schüler et al. [130] nutzen zur ersten Ausrichtung der Stege Modelliermasse. Zur endgültigen Fixierung wird hochfester Klebstoff verwendet. Der in dieser Arbeit benutzte und von Jung et al. [74] entwickelte Versuchsstand verwendet Vergusszylinder, in denen die Stege außerhalb des Versuchsstandes in Woodschem Metall vergossen werden [72, 74]. Der geringe Schmelzpunkt und die hohe Festigkeit im erstarrten Zustand machen das Material zum idealen Einbettmittel. Durch die Nutzung von Vergusszylindern und deren Adaption am Versuchsstand sind neben uniaxialen Zugversuchen auch Druck- und Biegeversuche realisierbar (vgl. Kapitel 3.3). Die Auswertung der Dehnung mittels Maschinenweg birgt ein hohes Fehlerpotential [11]. Aus diesem Grund wird größtenteils die digitale Bildkorrelation (DIC, *digital image correlation*) verwendet. Die individuelle Form der Stege erfordert die Kenntnis ihrer exakten Geometrie zur Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus den experimentell ermittelten Kraft-Dehnungs-Diagrammen. Zum einen werden CT-Modelle genutzt, um die kleinste Querschnittsfläche auszuwerten [75, 76]. Zum andern werden die Kantenlängen mittels Lichtmikroskopie [130] und Elektronenstrahlmikroskopie [147] gemessen und die Querschnittsfläche als Dreiecksfläche angenähert [130, 147]. Jung et al. [66] nutzen die Messung der Bruchfläche und eine Rückrechnung auf die Ausgangsfläche mittels Auswertung der Einschnürung mit DIC. Bleistein et al. [15] präsentieren die Erzeugung eines geometrischen Modells mittels Fotogrammetrie. Als Fläche zur Spannungsberechnung wird schließlich die Querschnittsfläche an der Bruchstelle ausgewertet (Kapitel 3.2.2).

Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Stege, extrahiert aus wärmebehandelten Aluminium (Al)-Schäumen [130, 147], unbehandelten Al-Schäumen [11, 74], Ni/Al-Hybridschäumen [72] sowie Hohlstege aus gesintertem Stahl [75, 76]. Zhou et al. [147] beobachten zwei Schädigungsarten. Zum einen kommt es zum Gleiten entlang von Korngrenzen und zum anderen kann ein Riss innerhalb von Körnern beobachtet werden. Neben der Geometrie der Stege bewirken die unterschiedlichen Schädigungsarten ihrer Meinung nach einen Unterschied in den gemessenen Kräften. Außerdem zeigen die Stege in den Versuchen eine deutlich höhere Zugfestigkeit und Bruchdehnung als Proben aus Vollmaterial mit gleicher Wärmebehandlung. Wie auch Zhou et al. [147] stellen Schüler et al. [130] in ihrer Arbeit große Körner und in Folge dessen einen geringen Einfluss der Wärmebehandlung auf das Materialverhalten in Zugversuchen an Einzelstegen fest. Der Elastizitätsmodul von allen untersuchten Stegen liegt dabei zwischen 54 und 80 GPa und damit sehr nah an Werten für gleichbehandeltes Vollmaterial [130, 147]. Betts et al. [11] messen einen Elastizitätsmodul von nur 14 GPa in Zugversuchen für die Stege. Im Vergleich mit dem Elastizitätsmodul des Vollmaterials von 70 GPa ist der Wert sehr gering. In ihrer Arbeit begründen Betts et al. [11] die großen Abweichungen mit Messungenauigkeit aufgrund von Schlupf in der Probenklemmung. Den Einfluss der Stegeometrie auf die große Abweichung sehen sie dabei als sehr gering an. Die von Kaya et al. [75, 76] untersuchten Schäume unterscheiden sich stark von den anderen Schäumen. Sie werden aus Stahlpulver gesintert, der Grundschaum verbrennt bei der Sinterung und es bleiben hohle Stege übrig. Durch die Herstellung entsteht eine elliptische äußere Kontur und eine konkave, dreieckige Struktur im Inneren der Stege. Im Vergleich dazu weisen alle anderen Stege eine rein dreieckige Struktur auf. Der gemessene Elastizitätsmodul liegt für die Untersuchungen deutlich unter den Erwartungen und beinhaltet eine große Streuung ($33,8 \pm 27,8$ GPa; Vollmaterial ≈ 200 GPa; Material mit gleicher Porosität: 143 GPa). Wie auch Schüler et al. [130] geben Kaya et al. [75] hier eine fehlerhafte Klemmung und eine hohe Porosität in den Stegen an. Neben uniaxialen Zugversuchen finden sich in der Literatur auch uniaxiale Druckversuche an Einzelstegen [15, 16]. Bleistein et al. [16] zeigen mit ihren Versuchen, dass der Elastizitätsmodul für die Druckversuche deutlich höher ist als der Elastizitätsmodul unter Zugbelastung. Als Grund dafür nennen sie das vom Knicken der Stege dominierte Verhalten unter Druck. Für die Versuche wird der Aufbau nach Jung et al. [74] verwendet. Das untersuchte Material ist in beiden Fällen ein Al-Schaum.

2.2 Konzept und Potential von Hybridschäumen

Unter dem Begriff der Hybridschäume wird eine Klasse von Kompositschäumen zusammengefasst, bei der eine zweite Materialphase erzeugt wird, um die Eigenschaften des ursprünglichen Schaums zu verändern. Eine Art von Hybridschäumen sind Schäume mit gezielt erzeugter Interphase. Bei der Herstellung werden verschiedene Mikro- und Nanopartikel vor der Erzeugung des Schaums in die Schmelze gegeben [38]. Dadurch entsteht im erstarrten Schaum eine Matrix aus dem Herstellungsmetall und beispielsweise Carbon-Nanotubes [39, 40, 146] oder Keramikpartikeln [91, 115]. Solche Hybridschäume unterscheiden sich stark von den hier betrachteten Hybridschäumen. Deshalb werden sie im Folgenden nicht im Detail betrachtet.

Die in dieser Arbeit betrachteten Hybridschäume sind Schäume, bei denen durch elektrochemische Abscheidung eine Schicht eines Metalls auf den Grundschaum aufgebracht wird. Bei der Beschichtung mit nanokristallinem Metall ist es das Ziel, die Plateauspannung zu erhöhen, die Kompressionsdehnung zu steigern oder höhere Energien zu absorbieren [38]. So wird ein Schaum aus einer Aluminiumlegierung (Al-Legierung) mit nanokristallinem Nickel (Ni) beschichtet, um dessen mechanische Eigenschaften zu verbessern [21, 73]. Durch die Beschichtung mit nanokristallinem Ni wird bei $\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0.3}$ Schäumen ein linearer Anstieg des PCS entsprechend der Erhöhung der Beschichtungsdicke gemessen [67]. Dabei steigt das Verhältnis aus absorbierter Energie und Gewicht für einen 30 ppi Schaum bis zu einer Beschichtungsdicke von $50\ \mu\text{m}$ [71], für einen 10 ppi Schaum liegt die optimale Beschichtungsdicke bei $150\ \mu\text{m}$ [73]. Bei höherer Beschichtungsdicke steigt das Gewicht stärker an als die zusätzlich absorbierte Energie. Für den 30 ppi Schaum liegt die absorbierte Energie bei einer Beschichtungsdicke von $50\ \mu\text{m}$ Ni etwa sieben mal höher als die des reinen $\text{AlSi}_7\text{Mg}_{0.3}$ Schaums, für einen ideal beschichteten 10 ppi Schaum liegt die Erhöhung bei neun. Normiert auf das Gewicht wird die Energieabsorption verdoppelt [45, 71, 73]. Ein weiteres Beispiel sind mit Kupfer (Cu) beschichtete Aluminium-Schäume [134]. Die Plateauspannung steigt durch die Beschichtung mit Cu deutlich an. Durch das spröde Verhalten des nanokristallinen Cu ist die Steigerung bei dynamischer Belastung aber limitiert. Unter quasi-statischer Belastung wird das Energieabsorptionsvermögen bei einer Beschichtungsdicke von $120\ \mu\text{m}$ um 500 % gesteigert [134]. Sowohl bei der Beschichtung mit Ni als auch bei der Beschichtung mit Cu kommt es zu früherem Kontakt der Stege und die Kompressionsdehnung sinkt [67, 134]. Bei hohen Beschichtungsdicken wird die Plateauphase in solchem Maße verkürzt, dass das Energieabsorptionsvermögen nur noch gering im Verhältnis zum Gewicht steigt. Bei steigender Beschichtungsdicke kommt es sowohl für Ni [21, 71] als auch für Cu [134, 141] zu einer größeren Überhöhung des PCS über die Plateauspannung (vgl. 2.3). Je dicker dabei die Beschichtung wird, desto größer wird die Überhöhung. Sun et al. [134] begründen diese Überhöhung mit der nanokristallinen Gefügestruktur der Beschichtung und der daraus resultierenden Änderung des Stegverhaltens. Die

zugrunde liegende Beziehung wird als Hall-Petch-Beziehung bezeichnet [55, 112]. Sie beschreibt den Zusammenhang der Streckgrenze und der Korngröße eines Materials. Durch Wärmebehandlung wird die Gefügestruktur der Beschichtung vergrößert und die Duktilität der Beschichtung erhöht [80]. Die Wärmebehandlung senkt dabei die Überhöhung des PCS und steigert die Plateauspannung.

Weitere Probleme bei der Beschichtung sind die elektromagnetische Abschirmung und die Stofftransportlimitierung innerhalb des Schaums. Diese Störgrößen führen zu einer ungleichmäßigen Beschichtung (vgl. Abbildung 2.4) und somit zu einer Änderung des mechanischen Verhaltens innerhalb des Schaums [21, 67]. Durch inhomogene Beschichtung werden lokal schwächere Bereiche erzeugt. Die instabilen Bereiche kollabieren deutlich früher als erwartet und führen zu einer Schwächung der Gesamtstruktur. Das für Schäume lange und konstante Spannungsplateau über große Verzerrungen entfällt. Vielmehr kollabieren die einzelnen Bereiche bei unterschiedlicher Spannung und es kommt zu einem treppenförmigen Verlauf im Spannungs-Verzerrungs-Diagramm. Durch die lokalen Instabilitäten und Schwächung der benachbarten Bereiche ist die absorbierte Energie deutlich geringer als bei homogen beschichteten Schäumen [21]. Inhomogen oder lokal beschichtete Schäume bringen nicht zwingend Nachteile mit sich. Durch eine speziell angepasste partielle Beschichtung kann die Plateauspannung sehr genau und sehr lokal eingestellt werden [65]. Im Fall von Crash-Absorbern kann dadurch ein besonderer Bauteilschutz gewährleistet werden. Ein wesentlicher Nachteil bei der Herstellung von Hybridschäumen mit Al als Grundschaum sind die Herstellungskosten der



Abbildung 2.4: Inhomogene Beschichtung eine Hybridschaums nach Bouhwuis et al. [21]

Al-Schäume. Durch die hohen Kosten des Al-Schaums und den aufwendigen Herstellungsprozess von offenporigen Metallschäumen beschränken sich die Anwendungsgebiete der Schäume auf Nischenanwendungen [8, 68].

Eine kostengünstigere Alternative bietet die Beschichtung von Polymerstrukturen. Durch die fehlende elektrische Leitfähigkeit können Polymere dabei nicht ohne weiteres in einem Elektrodepositionsprozess beschichtet werden. Beispielsweise werden 3D gedruckte Tragwerkstrukturen mit Hilfe von nanokristallinem Ni versteift [22, 52]. Jung und Diebels [68] stellen in ihrer Arbeit von 2016 einen Vergleich von Al-Schäumen mit Ni/Al- und Ni/PU-Hybridschäumen an. Zur Beschichtung des PU-Schaums wird dieser zunächst in einen Cu-Lack getaucht, um eine elektrische Leitfähigkeit herzustellen. Das Aufbringen der Ni-Schicht ist dann äquivalent zu dem Verfahren bei den Ni/Al-Hybridschäumen. Der direkte Vergleich der beiden Hybridschäume zeigt klare ökonomische Vorteile für den Ni/PU-Hybridschaum. Als Messgröße werden die Kosten pro absorbierte Energie angeführt. Diese sind bei Ni/PU mit 50 μm 800 % geringer als bei Ni/Al. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen bietet der Ni/PU-Hybridschaum eine deutlich größere Kompressionsdehnung. Der Beschichtungsprozess beinhaltet jedoch deutliche Schwachstellen. Die zur Beschichtung benötigte Cu-Schicht ist dicker als nötig und erhöht dadurch das Gewicht ohne einen positiven Einfluss auf die Materialeigenschaften zu haben. In der Arbeit von Felten et al. [44] wird ein Tauchlack-Prozess mit Graphit genutzt, um den PU-Schaum leitfähig zu machen. Durch den optimierten Prozess, bei dem überflüssiger Lack entfernt wird, kann eine sehr dünne Schichtdicke des Hilfsmaterials erzeugt werden, wodurch die Gewichts- und Kosteneffizienz weiter gesteigert wird.

Fazit Hybridschäume

Die mechanischen Eigenschaften von Metallschäumen lassen sich weder durch alleiniges Untersuchen ihrer makroskopischen Eigenschaften noch durch die Mikromaterialparameter alleine beschreiben. Vielmehr ergibt sich das Verhalten der Schäume aus einer Überlagerung von geometrischen Eigenschaften und stochastischen, mikromechanischen Materialparametern. Aus diesem Grund müssen Möglichkeiten gefunden werden, die Materialparameter der Stege zu nutzen, um das makroskopische Verhalten darstellen und vorhersagen zu können. Es ist nicht das Ziel, alle Fehlstellen und lokalen Schwankungen der Materialparameter in einem Simulationsmodell vollständig aufzulösen. Die dadurch entstehende Komplexität der Simulationsmodelle und die damit verbundene Steigerung der Rechenzeit ist weder kosten- noch zeittechnisch vertretbar. Zusätzlich stehen der breiten und wirtschaftlich sinnvollen Nutzung von Metallschäumen die hohen Kosten entgegen. Hybridschäume, insbesondere Ni/PU-Hybridschäume

bieten hier eine kostengünstige Alternative. Durch den geringen Preis des Grundmaterials wird das ökonomische Leistungspotential deutlich gesteigert. Die mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich allerdings deutlich von Einmaterial-Schäumen und metallischen Hybridschäumen. Die Besonderheiten des Deformationsverhaltens erfordern eine skalenübergreifende Charakterisierung des Materials. Die Versuche an Einzelstegen sind sehr fehleranfällig und erfordern sehr hohe Messgenauigkeiten. Der Versuchsaufbau [74] und die in Kapitel 3.3 vorgestellten Verbesserungen am Versuchsaufbau bieten eine ideale Basis, um aus den so ermittelten experimentellen Daten ein umfangreiches Simulationstool für makroskopische Ni/PU-Hybridschäume (vgl. Kapitel 6) zu erstellen.

3

Experimenteller Aufbau

Experimentelle Untersuchungen an Schäumen erfordern hohe Präzision während des gesamten Prozesses; von der Probenherstellung, über die Versuchsdurchführung an speziellen Versuchsaufbauten, bis hin zur Messung von Kräften und Verzerrungen. Dieses Kapitel beschreibt die Verfahren und Versuchsaufbauten die verwendet wurden, um reproduzierbar, repräsentative Versuchsergebnisse zu erhalten. Dazu erläutert das Kapitel im ersten Teil das Prinzip der DIC sowie eine Routine, um die Messgenauigkeit bei der Verwendung einer kommerziellen Software zu verbessern. Als zweites stellt das Kapitel den am Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität des Saarlandes realisierten Aufbau zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Stegen und Poren auf Basis von Fotogrammetrie vor. Dazu ist das Grundprinzip der Fotogrammetrie grob skizziert sowie Vor- und Nachteile des Verfahrens kurz zusammengefasst. Anschließend werden der Aufbau vorgestellt und die Schritte aufgezeigt, die bei der Verwendung einer kommerziellen Software notwendig sind. Im dritten Teil des Kapitels ist der Versuchsaufbau beschrieben, der für alle mechanischen Versuche auf Mikro- und Mesoebene verwendet wurde. Dabei wird auf die Anpassungen am Versuchsstand zur Verbesserung der Messgenauigkeit und Erweiterung zur Durchführung von Biegeversuchen eingegangen.

3.1 Die digitale Bildkorrelation

Die DIC ist ein rein optisches Messverfahren zur Auswertung von Form, Bewegung und Verzerrung von Objekten allein anhand von digitalen Fotografien [135, 137]. Durch die geringen Anforderungen an den Aufbau und die einfache Verwendung von beispielsweise kommerzieller Software ist die DIC in der experimentellen Mechanik weit verbreitet [99, 105]. Die Hersteller kommerzieller Software geben dabei immer die maximale Genauigkeit ihrer Software an, allerdings ist die Genauigkeit des Verfahrens in der Realität von zusätzlichen Faktoren abhängig [5, 19, 111]. Beispielsweise haben die Probenvorbereitung [87, 109], die Beleuchtung [5, 79], der Kontrast [137], die Qualität des Musters [60, 107], die Facettengröße [129, 145], die Kameraausrichtung [57], das Sensorrauschen [14] und viele weitere Faktoren [13, 104, 106] einen Einfluss auf die Genauigkeit. Badaloni et al. [5] ermitteln durch die Fehler in der DIC einen Unterschied von bis zu fünf Prozent im Elastizitätsmodul. Belda et al. [10] zeigen in ihrer Arbeit, dass für Druckversuche an PU-Schäumen je nach gewählten Auswerteparametern unterschiedliche Fehlerbilder festgestellt werden. Der Einfluss auf die Messwerte ist somit nicht vernachlässigbar und muss unbedingt untersucht und minimiert werden.

3.1.1 Theoretische Grundlagen

Die digitale Fotografie basiert auf der Umwandlung von Licht in ein elektrisches Signal. Dabei werden unter anderem CCD-Sensoren (CCD, *charged-coupled device*) verwendet. Diese Sensoren bestehen aus ladungsgekoppelten Schichten, in denen bei Lichteinfall eine elektrische Ladung erzeugt wird. Die erzeugte elektrische Ladung skaliert mit der Intensität des Lichtes. Das Funktionsprinzip der Sensoren ist in Janesick [62] und in Theuwissen [138] ausführlich vorgestellt und wird hier nicht näher erläutert. Bei der Interpretation als Bild entsprechen die Werte der elektrischen Impulse unterschiedlichen Grauwerten. Für Bilder mit einer 8-bit Auflösung hat ein schwarzer Pixel einen Zahlenwert von 0 und ein weißer Pixel den Zahlenwert von 255. Die Abstufung von 8-bit Bildern liegt somit bei 256 Graustufen, bei 14-bit Auflösung liegt entsprechend eine Abstufung von 16384 Graustufen vor. Ein ganzes Bild setzt sich aus einer Vielzahl dieser einzelnen Bildpunkte (px, *picture elements*), den sogenannten Pixeln zusammen [124]. Die Anzahl der Pixel wird durch die Sensorgröße festgelegt, so hat eine neun Megapixel (9 Mpx) Kamera einen Sensor mit neun Millionen Pixeln. Zur Aufnahme von farblichen Bildern werden die Sensoren in rote, grüne und blaue Pixel unterteilt. Bei monochromen Sensoren ist eine solche Unterteilung nicht notwendig und es steht die gesamte Auflösung zur Aufnahme von Grauwerten zur Verfügung. Dadurch haben monochrome Sensoren bei gleicher Pixelanzahl eine dreimal höhere Auflösung [7]. Durch die geringere Auflösung und die leichte Verschiebung der Pixel für die verschiedenen

Farben, fokussieren sich die meisten DIC Algorithmen auf monochrome Aufnahmen [7]. Da in dieser Arbeit ausschließlich monochrome Kameras verwendet wurden, beschränken sich die folgenden Beschreibungen auf die Analyse monochromer Bilder.

Mathematisch gesehen besteht ein Bild aus einer Matrix in der Größe der Sensorauf-
 lösung, mit Einträgen aus dem Wertebereich der Anzahl der Graustufen. Zur Verar-
 beitung der Bilder mittels DIC wird das Bild zunächst in einzelne Abschnitte, den
 sogenannten Facetten unterteilt. Die Facetten haben eine Größe von maximal wenigen
 hundert Pixeln. Zur zuverlässigen Identifizierung jeder Facette muss sie ein zufälliges
 Muster besitzen. Da die Probenoberfläche meist optisch zu homogen erscheint, wird ein
 Specklemuster (*speckle*: engl. für Fleck/Sprenkel) aufgebracht, um die Einzigartigkeit
 der Facetten zu gewährleisten. Zur Auswertung von Verschiebungen und Verzerrungen
 müssen Bilder zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgezeichnet werden. Das Bild im
 Ausgangszustand (Zeitpunkt $t = t_0$) dient als Referenzbild. Es wird mit allen fol-
 genden Bildern verglichen. Dazu werden die einzelnen Facetten in allen Bildern zu
 späteren Zeitpunkten abhängig von ihrer Ausgangsposition gesucht und mittels Kreuz-
 korrelation identifiziert [58]. Dabei wird die Größe der deformierten Facette auf die
 Ausgangsgröße zurück gerechnet und so die Verzerrung bestimmt (vgl. Abbildung 3.1).

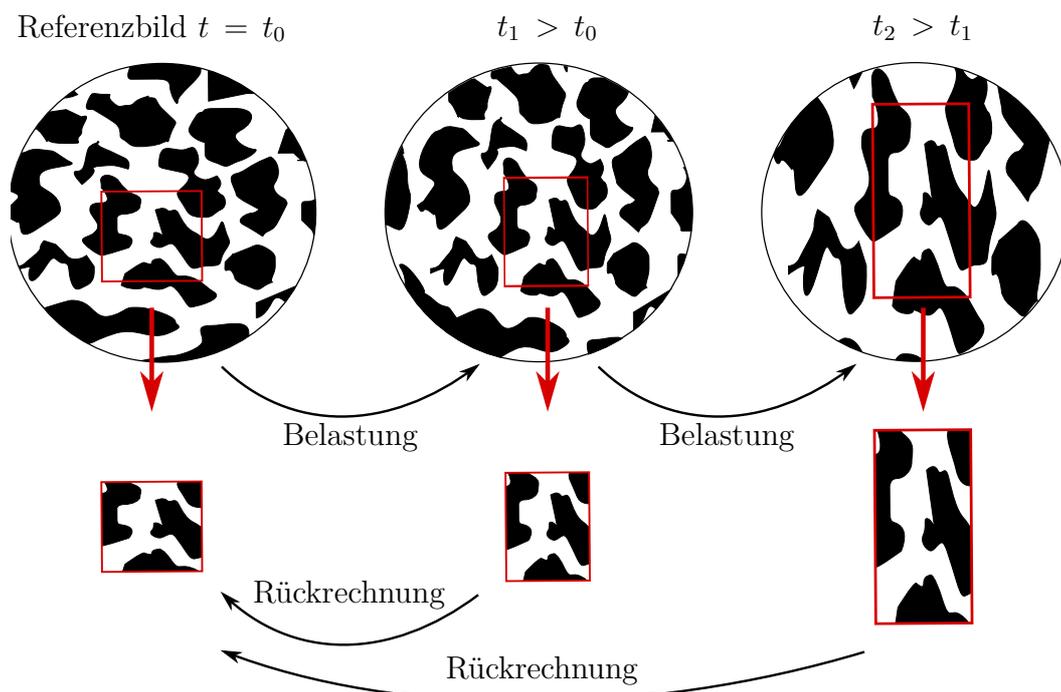


Abbildung 3.1: Grundprinzip der digitalen Bildkorrelation für eine Facette (rotes Rechteck) anhand von drei Deformationszeitpunkten in Anlehnung an H. Seibert [131]

Die Veränderung der Probe von Bild zu Bild entspricht in den seltensten Fällen exakt der Pixelgröße, sondern ist meistens deutlich geringer. Außerdem enden die Speckle selten an der Pixelgrenze und Pixel müssen schwarze Speckle und weißen Hintergrund

gleichzeitig abbilden. Dadurch entsteht an der Grenze von schwarzen Punkten und weißem Hintergrund ein grauer Übergangsbereich (vgl. Abbildung 3.2). Besteht ein Pixel beispielsweise aus 50 % weiß und 50 % schwarz erkennt ein 8-bit Sensor ihn als Grauwert 128. Die Interpolation der Grauwerte zwischen weißem und schwarzem Anteil bietet für die DIC sehr große Vorteile. So können kleine Veränderungen des Grauwertes einzelner Pixel von der DIC Software erkannt und als Verschiebung kleiner einem Pixel verstanden werden [113, 132, 148]. Die theoretische Auflösung von der DIC ist somit für Bilder mit einer 8-bit Auflösung $1/256$ Pixel. In der Praxis wird dieser Wert nicht erreicht, allerdings werden Genauigkeiten von einem Prozent eines Pixel erzielt [128].

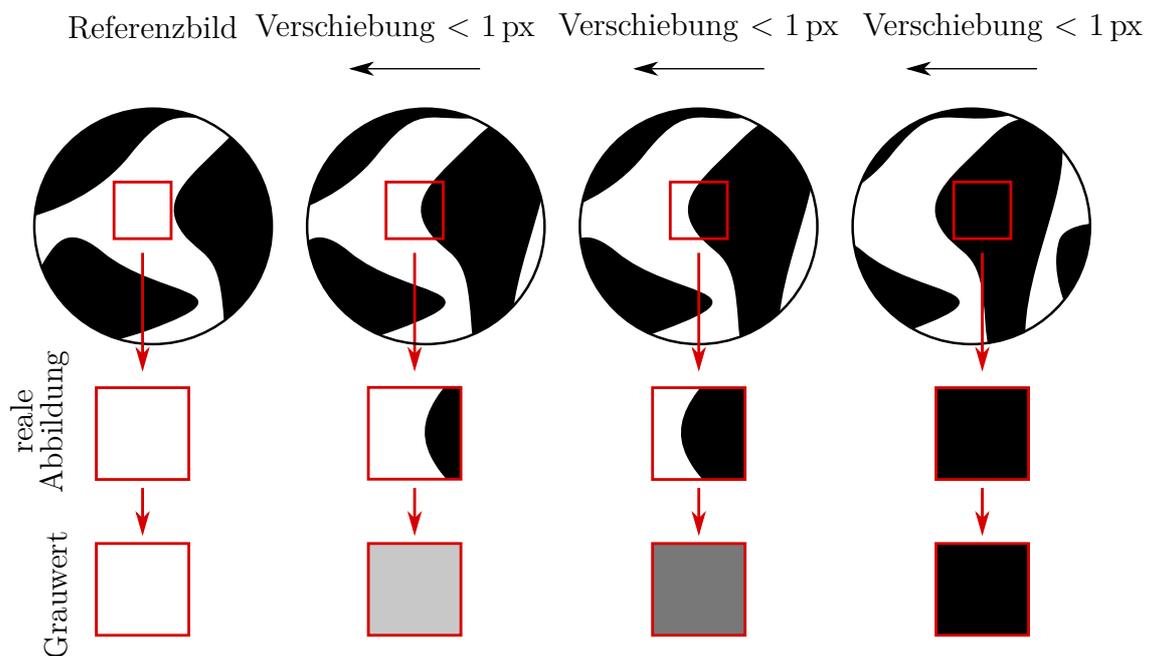


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Interpretation von Grenzflächen zwischen weißen und schwarzen Bereichen als Grauwert für ein Pixel (rotes Quadrat)

Die Aufteilung der Bilder und somit der Probe in einzelne Teilbereiche bietet die Option neben der globalen Dehnung der gesamten Probe, auch lokale Dehnungen zu messen. Im Gegensatz zur Dehnungsmessung mittels Kantenerkennung oder Extensometern werden bei der DIC lokale Anstiege der Dehnungen und die daran zu erkennende lokale Schädigung frühzeitig visualisiert. Diese frühe Abbildung von lokal erhöhter Dehnung wird in der Realität beispielsweise zur automatischen Risserkennung in Bauwerken [48, 101] oder Bauteilüberwachung verwendet [25]. Darüber hinaus können bei der Untersuchung von Metallschäumen mittels DIC in Druckversuchen auf der Makroebene Dehnungsbänder identifiziert werden [10, 70]. Die so gewonnenen Informationen tragen deutlich zum Materialverständnis bei und sind ohne die Verwendung von DIC nur bedingt möglich.

Neben der in den Abbildungen 3.1 und 3.2 dargestellt zweidimensionalen (2D) DIC, bei der eine Kamera senkrecht zur Probe ausgerichtet wird, können auch mehrere Kameras verwendet werden. Dazu müssen bei der dreidimensionalen (3D) DIC die Position und die Ausrichtung der Kameras vor der Versuchsdurchführung mit Hilfe eines Musters kalibriert werden. Die 3D DIC bietet dann die Möglichkeit, Verschiebungen in allen drei Raumrichtungen zu messen, wohingegen die 2D DIC nur Messungen parallel zum Kamerasensor zulässt. Aus diesem Grund ist bei der 2D DIC immer zu gewährleisten, dass keine Verschiebung orthogonal zum Kamerasensor vorliegt [136, 137]. Die fehlerhafte Darstellung der Verschiebung orthogonal zum Sensor führt in der 2D Projektion zu einer Verzerrung und damit zu Messungenauigkeiten [57, 86]. Die besten Ergebnisse werden für die 2D DIC mit telezentrischen Objektiven erreicht. Diese gewährleisten einen parallelen Strahlengang über den gesamten Bildbereich wodurch Verzerrungen am Rand des Bildbereiches minimiert werden [108]. Die Verwendung von telezentrischen Objektiven ist für die 3D DIC nicht möglich. Durch ihre geringe Tiefenschärfe können Kameraposition und Abstand nicht kalibriert werden.

3.1.2 Verbesserung der Messgenauigkeit

Mit sinkender Probengröße muss die Messgenauigkeit der DIC zwangsläufig steigen. Jede kleine Ungenauigkeit in der Messung führt zu einer prozentual deutlich größeren Verzerrung der Ergebnisse. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle auf Fehlerquellen der DIC und Ansätze zur Verbesserung der Messgenauigkeit eingegangen werden. Für alle Untersuchungen in dieser Arbeit wird die kommerzielle DIC Software ISTR44D® (Dantec Dynamics GmbH, 89077 Ulm) verwendet. Durch die Verwendung einer kommerziellen Software kann kein Einfluss auf den Auswertungs- und Korrelationsalgorithmus genommen werden. Dennoch lassen sich wichtige Stellgrößen, wie das Specklemuster, die Beleuchtungsqualität und die Facettengröße anpassen, um die Qualität der DIC zu steigern.

Specklemuster

Die Qualität des Specklemusters hat eine hohe Relevanz für die Genauigkeit der DIC [109]. Je nach Probe lässt es sich aufsprühen [90, 128], drucken [35], stempeln [26, 28] oder mit Laserlithographie erzeugen [35]. Für die komplexe und filigrane Struktur einzelner Stege kann das Muster ausschließlich durch Aufsprühen erzeugt werden. Alle anderen Methoden hätten entweder eine Vorschädigung der Stege zur Folge oder sind mit den vorhandenen Mitteln nicht umsetzbar. Die Größe der gewünschten Speckle richtet sich nach der Auflösung der Kamera und dem Bildbereich. Für eine gute Korrelation sollen die Speckle eine Größe von vier bis sieben Pixel haben [60]. Kleinere Speckle mit einer Größe von drei Pixel und kleiner führen zu Pixel-Jitter [6]. Dabei kann die Position der Speckle aufgrund von Bildrauschen nicht genau bestimmt werden und das Messrauschen steigt überdurchschnittlich stark an [109]. Im Gegensatz dazu vermeiden große Speckle systematische Fehler, führen aber zu lokalen Ungenauigkeiten [60]. Für die Versuche an Stegen und Poren sollten deshalb Speckle mit einem Durchmesser von acht bis zehn Mikrometer erzeugt werden. Außerdem hat das Verhältnis von weißem Hintergrund und schwarzen Speckeln einen Einfluss auf die Auswertung. Ein zu hoher Schwarzanteil führt zu einer Eliminierung von rein weißen Pixeln (vgl. Abbildung 3.2) und es kommt zu einer Vergrauung des Bildes. Bei einem Verhältnis von 70 % weiß zu 30 % schwarz kann eine Vergrauung des Bildes verhindert werden ohne eine Überbelichtung zu erzwingen [29, 109] und die gesamte Bandbreite an Grauwerten wird genutzt [133, 137]. Im Kontrast zu den genau definierten Anforderungen an das Muster steht das händische Aufsprühen der Farbe, bei dem die Qualität des Musters stark von Erfahrung und Können abhängt. Aus diesem Grund befasste sich K. König [85] im Rahmen einer Seminararbeit am Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität des Saarlandes mit der Entwicklung eines Aufbaus zum automatischen Bespeckeln von Proben (vgl. Abbildung 3.3). Der Aufbau ermöglicht durch die Einstellung von Luft- und Farbmenge ein konstantes, an die Anforderungen angepasstes Muster zu erzeugen. Durch die Automatisierung des Prozesses wird der Einflussfaktor Mensch minimiert und zusätzlich wird durch den Aufbau das Auftreten von Aerosolen außerhalb der Kammer auf ein Minimum beschränkt [85]. Dazu besteht der Aufbau aus einer geschlossenen Kammer, innerhalb der die Probe an einem Gitter in verschiedenen Abständen zur Farbdüse befestigt wird. Die Farbdüse funktioniert dabei nach dem Venturi-Prinzip. Die Farbe wird von einem durch den Luftstrom erzeugten Unterdruck angesaugt und mit dem Luftstrom zur Probe transportiert. Auf der Vorderseite der Kammer befindet sich eine durchsichtige Scheibe, um den Specklegrad während des Prozesses zu bewerten. Ein ausreichender Luftstrom und die Filterung der überflüssigen Farbe wird durch die Kombination einer Filtermatte und einem Lüfter auf der Rückseite der Kammer gewährleistet.

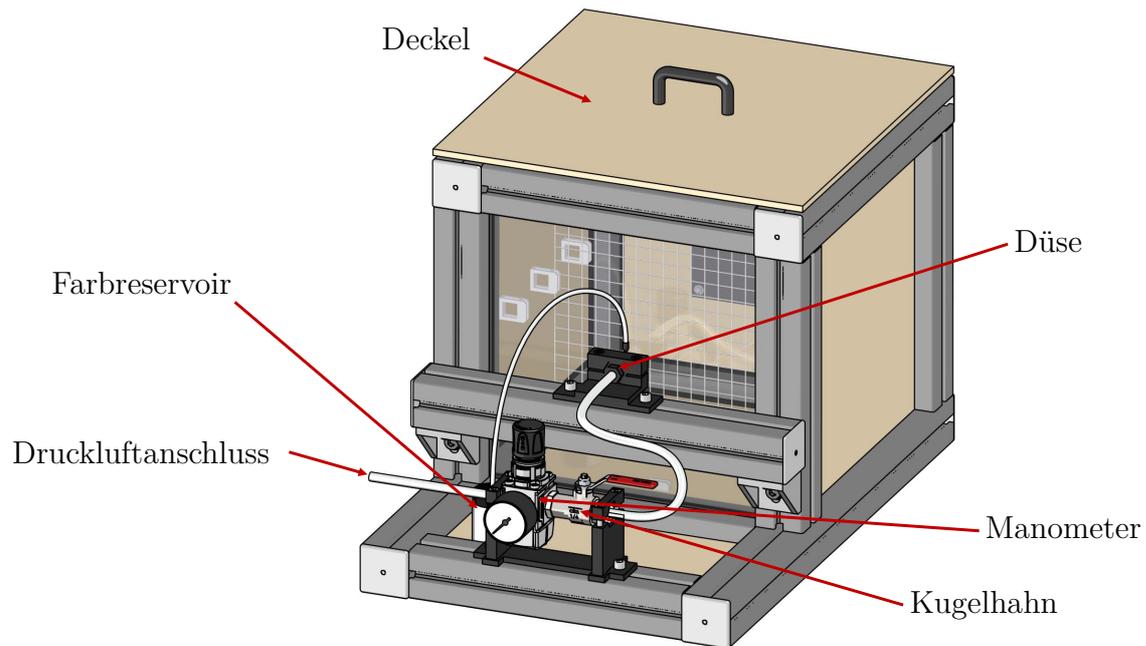


Abbildung 3.3: Aufbau zum automatischen Speckeln von Proben nach K. König [85]

In Abbildung 3.4 ist das Ergebnis der Kammer auf einer Pore abgebildet. Deutlich ist hier ein sehr feines und gleichmäßiges Muster über den gesamten Probenbereich mit einem Schwarzanteil von circa 30 % zu erkennen. Die Vergrößerung auf einen einzelnen Steg im rechten Teil der Abbildung verdeutlicht die Gleichmäßigkeit der einzelnen Speckle.

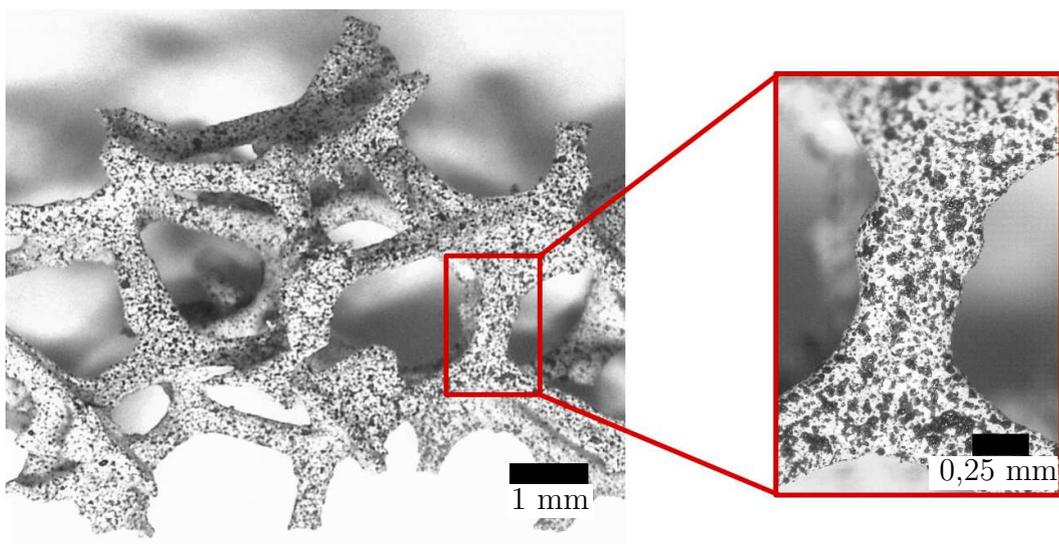


Abbildung 3.4: Beispiel eines mit dem Aufbau erzeugten Specklemusters auf einer Pore (links) und die Vergrößerung auf einen einzelnen Steg (rechts)

Rauschminimierung in drei Schritten

Die in diesem Abschnitt beschriebene Methode ist im Artikel *Improving DIC Accuracy in Experimental Setups; Reis et al.* [119] veröffentlicht. Die verwendeten Kameras sind zwei Manta G917B (Allied Vision Technologies GmbH, 07646 Stadtroda). Für die 2D DIC wird ein telezentrisches Objektiv (VICO DTCM110-16.6, VicoTechnology Co., LTD, Guangdong, China) und für die 3D DIC werden zwei Teleobjektive (KOWA LM50HC, Kowa Optimed Deutschland GmbH, Düsseldorf) verwendet.

Im ersten Schritt der Routine werden die idealen Einstellungen für die Facettengröße und die Beleuchtung gesucht. Dazu werden die Kameras und die Probe fest im Versuchsstand verbaut und eine Reihe von Bildern aufgenommen, ohne dass sich die Kamera oder die Probe bewegen. Diese Bilderreihe wird anschließend ausgewertet und auf Verschiebungen geprüft. Alle gemessenen Verschiebungen müssen hier dem Messrauschen entsprechen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, verschiedene Einstellungen und ihre Auswirkungen auf die Messgenauigkeit unter Verwendung einer kommerziellen Software (Istra 4D[®], Dantec Dynamics GmbH, 89077 Ulm) und eines realen Aufbaus (vgl. Kapitel 3.3) zu testen. Neben einem Wert für die gesuchte Größe liefert ISTR44D[®] eine Messunsicherheit mit. Dieser Wert ist abhängig von Qualität der Bilder und der Kalibrierung. Dabei ist unklar, wie dieser Wert genau ermittelt wird und welche Aussagekraft er hat. Nachdem das Specklemuster in einem separaten Aufbau, unabhängig vom Benutzer aufgebracht wird, bleiben die Facettengröße und die Beleuchtung als wesentliche Einflussfaktoren übrig. Um die Verschiebungen zu exportieren, müssen in ISTR44D[®] Gauge-Elemente gewählt werden. Diese Elemente können ein einzelner Punkt, ein Kreis, ein Polygon oder eine Linie sein. Für die flächigen Elemente (Kreis und Polygon) lassen sich sowohl der Mittelwert der Verschiebung über die Fläche als auch die maximale und minimale Verschiebung ausgeben. Bei der Auswahl des Punkt-Elements wird die Verschiebung für genau eine Facette exportiert. Zum Vergleich zwischen der gemessenen Verschiebung für einen Einzelpunkt und dem Mittelwert über einer Kreisfläche wurden für eine Reihe von 100 Bildern die Verschiebungen jeweils zentral im Bildbereich ausgegeben. Der betrachtete Punkt liegt dabei innerhalb der Kreisfläche. Als Mittelwert der Verschiebung für die Kreisfläche ergibt sich $1,23 \pm 0,70 \mu\text{m}$, für den Punkt beträgt sie $1,25 \pm 0,70 \mu\text{m}$. Aufgrund des geringen Unterschiedes und der lokaleren Aussagekraft wird im Folgenden die Verschiebung immer für einen einzelnen Punkt ausgewertet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Facettengröße, wird eine Bilderserie von 100 Bildern mit Facetten der Kantenlänge von 19 px bis 69 px in 10 px Schritten ausgewertet. Durch die steigende Facettengröße wird von jeder Facette ein größerer Bereich abgedeckt. Dadurch ist eine eindeutige Identifizierung der Facette einfach und die Messunsicherheit sinkt. Für die untersuchten Bilder bleibt die gemessene Verschiebung allerdings nahezu konstant. Abbildung 3.5 (a) zeigt die Abweichung der gemessenen

Verschiebung der verschiedenen Facetten zur Referenzfacette von $69 \times 69 \text{ px}^2$. Dabei wurde die größte Facette als Referenz gewählt, da diese zu den kleinsten Fehlern neigen [145]. Nichtsdestotrotz liegen die Unterschiede unter $0,1 \text{ }\mu\text{m}$. Im Gegensatz dazu sinkt die Messunsicherheit mit steigender Facettengröße deutlich. Die Messunsicherheit ist allerdings für alle Größen so gering, dass die Verwendung aller Facettengrößen möglich ist. Sie liegt für die kleinsten Facetten bei $0,05 \text{ }\mu\text{m}$ und sinkt bis zur größten Facette auf $0,004 \text{ }\mu\text{m}$.

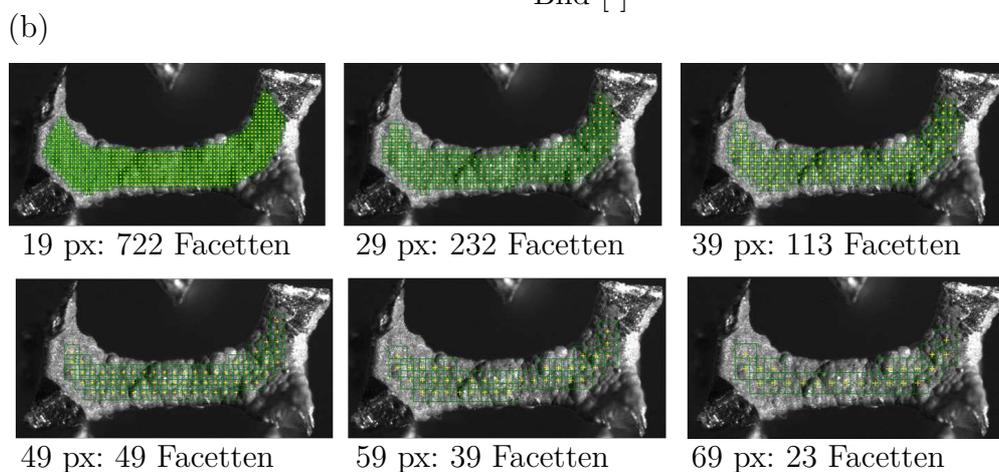
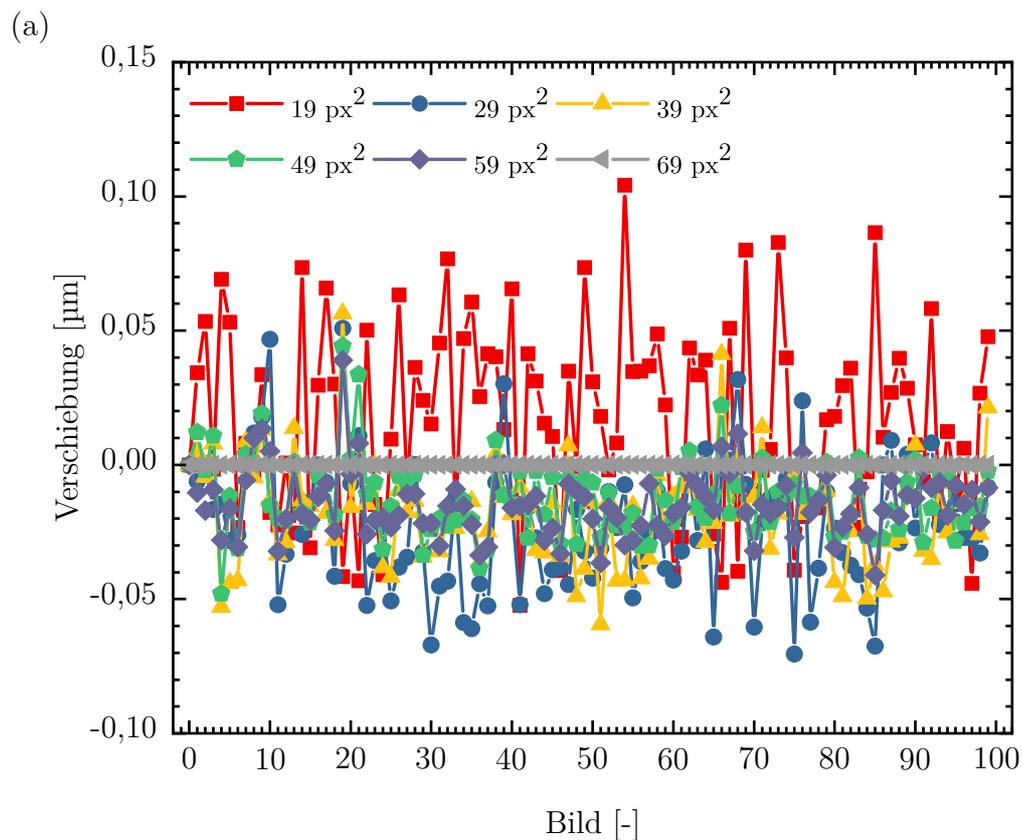


Abbildung 3.5: Einfluss der Facettengröße auf das Messrauschen: (a) Verschiebung über Bildserie als Abweichung der Verschiebung der 69 px Facette; (b) Anzahl von Facetten auf einem Steg in Abhängigkeit ihrer Größe

Die Facettengröße muss deshalb anhand der Probengröße ausgewählt werden. Abbildung 3.5(b) zeigt für verschiedene Facettengrößen die Anzahl an Facetten für eine Standardüberschneidung der Facetten von $\frac{2}{3}$ auf einem Ni/PU-Hybridschaumsteg. Bei einer Facettengröße von $69 \times 69 \text{ px}^2$ befinden sich nur 23 Facetten auf dem Steg. Die geringe Anzahl kann schnell zu einem Informationsverlust durch Verlust der Facette führen. Dahingegen befinden sich bei einer Facettengröße von $19 \times 19 \text{ px}^2$ 722 Facetten auf dem Steg und ein Verlust einer einzelnen Facette hat einen geringeren Einfluss auf die Ergebnisse.

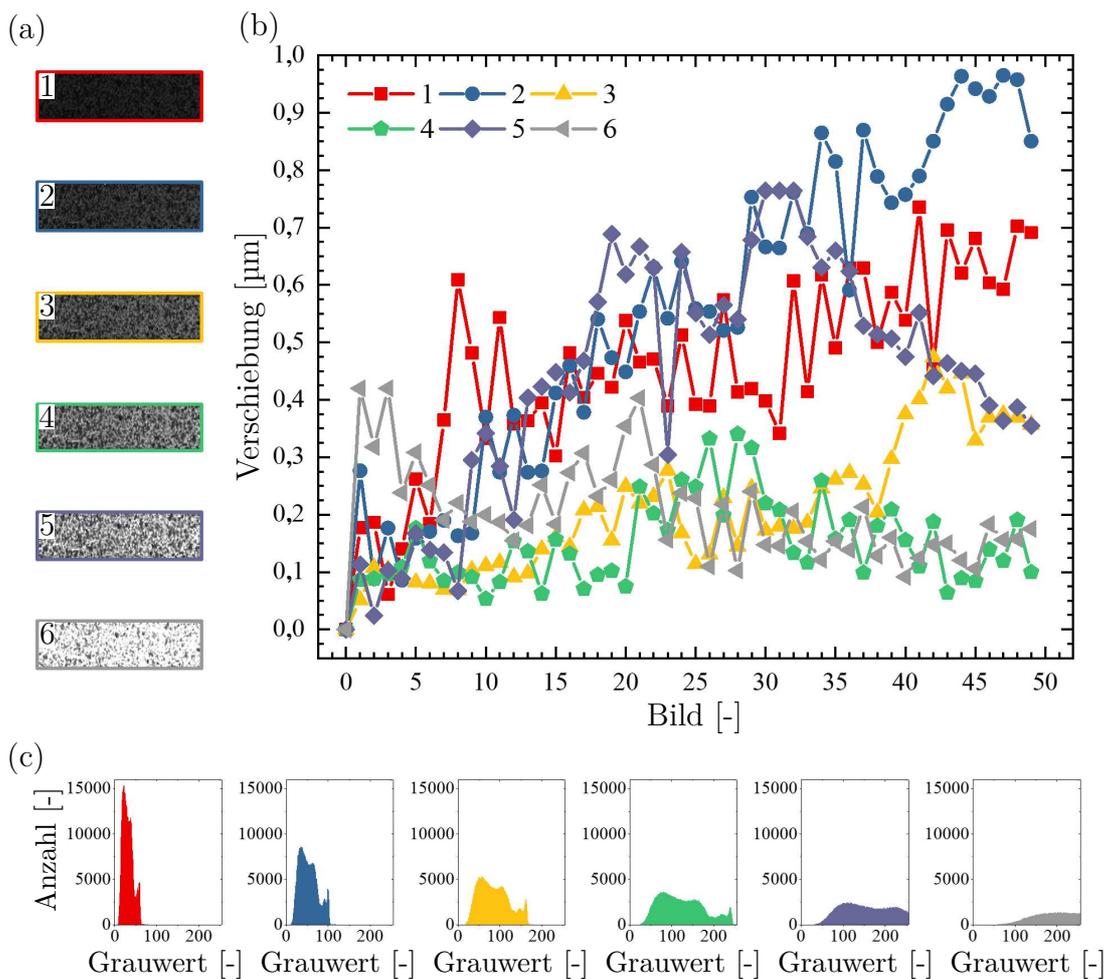


Abbildung 3.6: Einfluss der Beleuchtung auf das Messrauschen: (a) 6 unterschiedliche Beleuchtungsstufen von dunkel (1) nach hell (6); (b) Verschiebung-Bild-Diagramm für die einzelnen Beleuchtungsstufen; (c) Histogramme zu den Bildern aus (a)

Der zweite Einflussfaktor, der wesentlich für die Genauigkeit der DIC verantwortlich ist, ist die Beleuchtungsqualität. Abbildung 3.6 vergleicht die Genauigkeit der DIC für sechs verschiedene Beleuchtungsstufen, bei einer Facettengröße von $19 \times 19 \text{ px}^2$ für eine Bilderserie von 50 Bildern. Die Bilder der dunklen Beleuchtungsstufen 1 und 2 zeigen dabei eine starke Vergrauung. Die entsprechenden Histogramme in Abbildung 3.6 (c) beschränken sich auf den linken Bereich. Alle auftretenden Pixel haben einen Grauwert

unter 125, es gibt also keine hellen Pixel in den Bildern. Diese geringe Aufspreizung der Grauwerte schlägt sich außerdem in einem großen Rauschen nieder. Die Bilder der hellen Beleuchtungsstufen 5 und 6 zeigen deutliche Zeichen der Überbelichtung. Durch die helle Beleuchtung kommt es zu einem Ausbrennen der weißen Bereiche. Die schwarzen Speckle erscheinen dadurch auf den Bildern kleiner als sie in der Realität sind. Auf den Histogrammen lässt sich dieser Effekt durch ein wenig ausgeprägtes Profil erkennen. Für die Helligkeitsstufe 4 wird höchste Genauigkeit über alle 50 Bilder erzielt. Dabei zeigt das Histogramm bei dieser Helligkeitsstufe eine Aufspreizung über fast alle Grauwerte, ohne eine erhöhte Anzahl von Pixeln am Rand der Skala. Die Verteilung weist außerdem ein Maximum, nahe von 0 für den weißen Hintergrund und in der Nähe der 255 für die schwarzen Punkte auf. Dass es weder exakt weiße noch exakt schwarze Pixel gibt, liegt an der in Abbildung 3.2 beschriebenen Interpolation zur Errechnung der Grauwerte.

Die in dieser Arbeit verwendete DIC-Software verspricht eine Auflösung von bis zu einem Prozent eines Pixels [31]. Mit dem in dieser Arbeit verwendeten Aufbau konnte eine solch hohe Genauigkeit nicht erreicht werden. Das Rauschen bei der Untersuchung von Stegen liegt bei circa 150 nm, was circa vier Prozent eines Pixel entspricht. Dennoch versprechen die gefundenen Einstellungen eine hohe Messgenauigkeit und können für den zweiten Teil der Untersuchung verwendet werden. In diesem Teil wird die Verschiebung einer Probe gemessen. Dazu ist eine Probe fest mit dem Versuchsstand verbunden und eine weitere Probe ist auf der Lineareinheit des Versuchsstandes befestigt. Obwohl sowohl Kammersystem als auch Proben fest mit dem Versuchsstand verbunden sind, kann es durch Vibrationen des Bodens zu Messabweichungen kommen. Deshalb wird die Verschiebung als Differenz der Bewegung beider Proben errechnet. Diese Verschiebung wird dann mit der errechneten Verschiebung der Lineareinheit zu jedem Zeitpunkt verglichen. Da es sich bei der Lineareinheit um eine Kombination eines Schrittmotors und eines Spindelantriebs handelt, kann die translatorische Bewegung aus der Anzahl der Schritte des Motors und der Steigung der Spindel errechnet werden. Die so errechnete Verschiebung bietet eine sehr hohe Genauigkeit und eignet sich deshalb zum Vergleich mit der gemessenen Verschiebung. Dieser zweite Teil liefert eine Erkenntnis darüber, ob die im ersten Teil gefundenen Einstellungen, auch für die Verschiebungsmessung geeignet sind. Dabei bestätigt die Verschiebungsmessung die hohe Qualität der DIC. Für drei Experimente mit jeweils 100 Schritten liegt der absolute Fehler bei $0,30 \pm 0,39 \mu\text{m}$ (Experiment 1: $0,57 \pm 0,32 \mu\text{m}$; Experiment 2: $0,02 \pm 0,11 \mu\text{m}$; Experiment 3: $0,32 \pm 0,43 \mu\text{m}$).

Um die gemessene Verschiebung auf eine weitere Art zu validieren, wird die von Patterson et al. [111] vorgestellte Kalibrierprobe genutzt. In ihrer Arbeit zeigen sie unter anderem einen Probenkörper, in dem ein Balken unter Vierpunkt-Biegung belastet wird. Durch die Geometrie des Probenkörpers wird die maximale Durchbiegung des Balkens

so definiert, dass er nur elastisch belastet wird. Der in Patterson et al. [111] untersuchte Probenkörper ist deutlich größer als die hier untersuchten Proben und würde den Bildbereich deutlich überschreiten. Die aus der notwendigen Skalierung resultierende Probengröße erfordert eine Anpassung der Probe. Der hier gewählte Aufbau sieht dabei eine Dreipunkt-Biegung des Balkens vor, außerdem kann die maximale Durchbiegung nicht durch die Probengeometrie festgelegt werden. Patterson et al. [111] fordern eine Begrenzung auf $1/58$ der Balkendicke. Bei einer Balkendicke von 1 mm entspricht das $17,24 \mu\text{m}$. Die Fertigungsgenauigkeit der Drahterosion lässt eine Genauigkeit von $400 \mu\text{m}$ zu und die maximale Durchbiegung muss softwareseitig realisiert werden. Die Probe wurde am Lehrstuhl für Experimentelle Methodik der Werkstoffwissenschaft, Universität des Saarlandes, Prof. C. Motz hergestellt. Eine vereinfachte Konstruktionszeichnung der Probe sowie eine Fotografie der bespreckelten Probe sind in Abbildung 3.7 dargestellt.

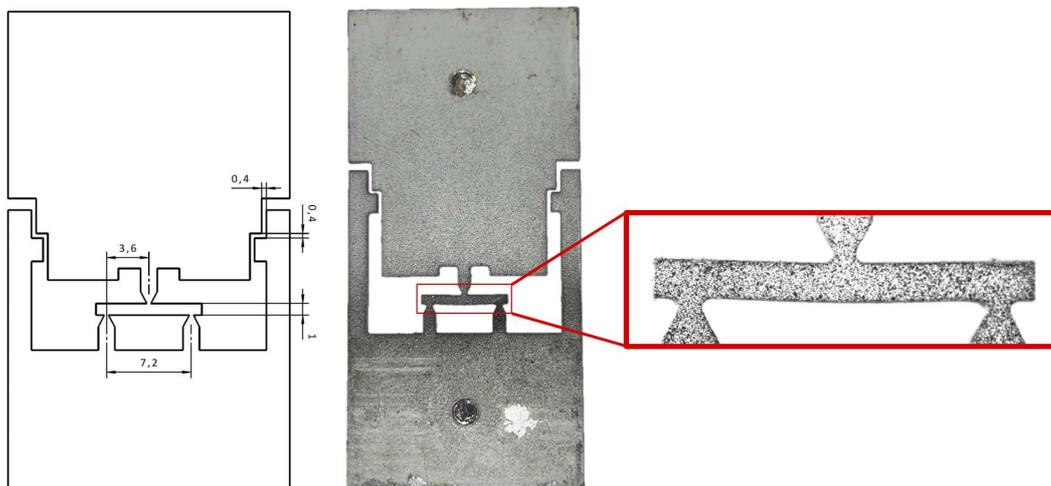


Abbildung 3.7: Fertigungszeichnung (links) und Foto der verwendeten Kalibrierprobe mit Zoom auf Specklemuster (rechts) nach Idee von Patterson et al. [111]

Im Fall der Dreipunkt-Biegung beschreibt die Euler-Bernoulli-Balkentheorie den Zusammenhang der Durchbiegung w und der Kraft F als

$$w = \frac{Fl^3}{48EI} \quad . \quad (3.1)$$

Dabei sind l die Länge des Balkens und E der Elastizitätsmodul des Materials. Das Flächenträgheitsmoment I ist von der Geometrie des Balkens abhängig. Für einen Balken mit quadratischer Querschnittsfläche mit Kantenlänge a ist das Flächenträgheitsmoment

$$I = \frac{a^4}{12} \quad . \quad (3.2)$$

Der Vergleich der theoretischen und experimentellen Kraft in Abbildung 3.8 zeigt in den ersten Schritten eine große Abweichung. In diesem Bereich liegt noch keine Biegung vor und der experimentell gemessene Wert liegt bei etwa 250 mN, wohingegen der theoretische Wert den Erwartungen von 0 N entspricht. Mit beginnender Durchbiegung nähern sich die Werte einander an. Am Ende des Versuches liegen die Kurven übereinander und die Differenz ist Null. Dabei unterscheidet sich die Steigung der beiden Kurven von Schritt 15 bis Schritt 25 deutlich voneinander. Danach liegen die Kurven übereinander und die Kraft steigt für Theorie und Experiment gleichmäßig pro Schritt. Das zeigt, dass die DIC hier nicht für den Fehler verantwortlich ist. Die Unterschiede können vielmehr mit einer fehlerhaften Befestigung und einem Spiel in der Lagerung erklärt werden. Außerdem liegt eine Kraft von 0 N deutlich außerhalb des kalibrierten Messbereichs des Kraftsensors, wodurch für sehr kleine Kräfte mit einer größeren Abweichung zu rechnen ist. Deshalb stimmen sowohl die Kraftwerte als auch die Ver-

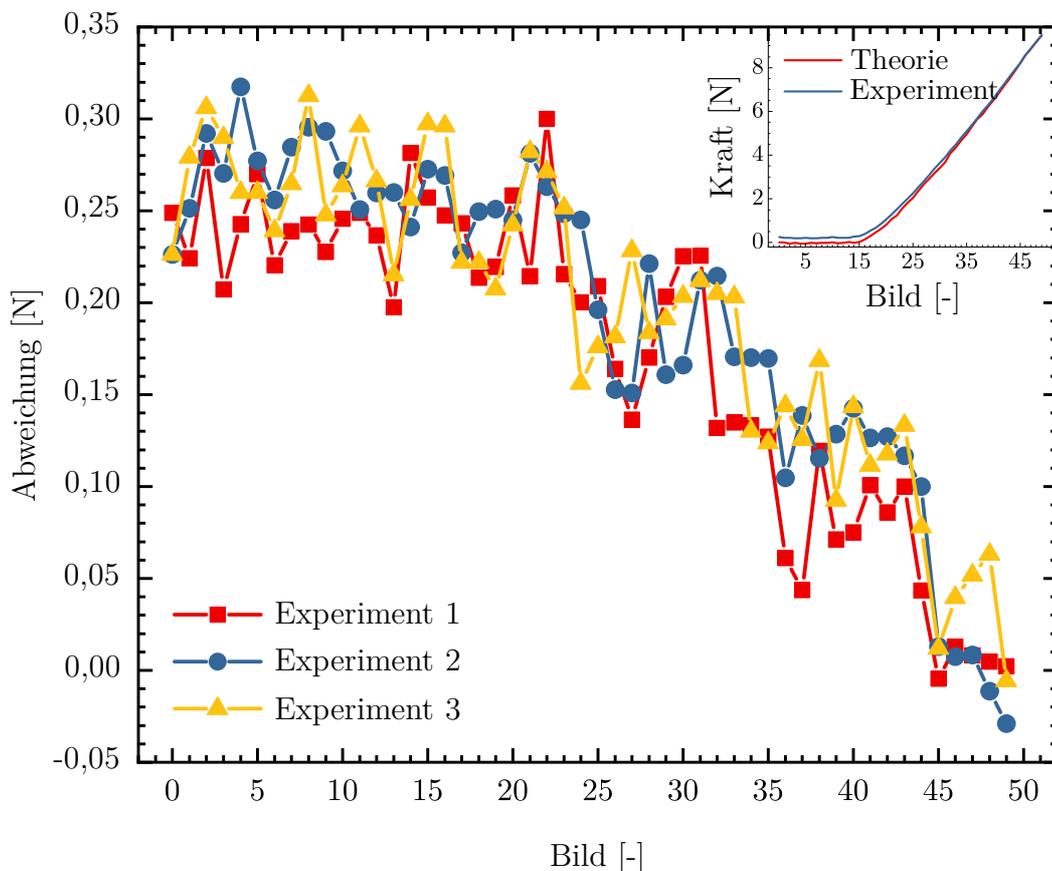


Abbildung 3.8: Abweichung von theoretischer und gemessener Kraft für die in Abbildung 3.7 abgebildete Kalibrierprobe für drei Versuche mit einem exemplarischen Kraft-Bilder-Verlauf im Inlet

änderung dieser pro Schritt überein, nachdem Probe und Lagerung sich gesetzt haben. Dieser Effekt ist in allen der drei durchgeführten Messungen zu sehen.

Damit haben sowohl die einfache Verschiebungsmessung in Schritt zwei als auch die Erweiterung auf die Verwendung der Kalibrierprobe gezeigt, dass die Parameter aus den statischen Versuchen gute Ergebnisse liefern. Für alle zukünftigen Versuche werden aus diesem Grund 20 Bilder vor der Versuchsdurchführung aufgenommen. In diesen Bildern wird das Rauschlevel ermittelt und somit die Qualität der DIC Auswertung bestimmt.

Ausblick: UV-DIC

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der DIC stellt eine gute Beleuchtung dar. In vielen Fällen kommt es zu einer unzureichenden Ausleuchtung oder zu sehr hellen Bereichen auf der Probenoberfläche. Eine Alternative stellt hier die Verwendung von ultraviolettem (UV) Licht dar. In Kombination mit der Verwendung von speziellen fluoreszierenden Farben leuchtet die Probe. Dabei werden die Reflektionen des UV-Lichts auf der Probenoberfläche vom Kameraobjektiv abgeschirmt und gelangen nicht auf den Sensor. Allein das im sichtbaren Bereich emittierte Licht wird auf dem Kamerasensor registriert.

Inwiefern dieser Effekt nutzbar ist und welche Farben sich am besten eignen hat K. König [84] im Rahmen seiner Bachelorarbeit untersucht. Dabei hat er gezeigt, dass die Qualität der DIC auf gleichem Niveau liegt, wie bei mit sichtbarem Licht ideal ausgeleuchteten Proben. Die Ausleuchtung der Probe ist dabei gleichmäßiger als bei normaler Beleuchtung und das Histogramm der Grauwerte zeigt deutlichere Maxima. Die Bilder wirken für das Auge weniger grau. Außerdem konnte er die Abwesenheit von Reflektionen beweisen. Durch die Kombination der Vorteile eignet sich die Verwendung von UV-Licht und fluoreszierenden Farben besonders bei komplexen Probengeometrien und für 3D DIC bei der alle Seiten einer Probe betrachtet werden sollen. Alle für diese Arbeit durchgeführten Versuche werden mit 2D DIC ausgewertet. Dadurch bietet die Verwendung der UV-DIC hier nur wenige Vorteile und wird nicht verwendet. Dennoch bietet das Verfahren ein großes Potential für die Verwendung bei der Untersuchung von Meso- und Makroversuchen an Schäumen und sollte zukünftig verwendet werden.

3.2 Probenvorbereitung

Das untersuchte Material ist ein Ni/PU-Hybridschaum mit einer Porengröße von 20 ppi und Zielschichtdicken der Ni-Schicht von 40 μm und 80 μm . Für die mikro- und die mesomechanische Charakterisierung von Schäumen ist die Probenvorbereitung eine besondere Herausforderung. Die Stege und Poren müssen aus dem Schaum ausge-

löst werden ohne sie durch eine Vorbelastung zu beschädigen. Dabei unterscheiden sich die Proben und ihre Präparation je nach Versuchsart leicht voneinander. Dieser Abschnitt beschreibt das Ausschneiden und die Unterschiede der Proben. Um zukünftig eine schnelle und einfache Zuordnung der Proben zur Versuchsart zu ermöglichen, sind den Proben je nach Versuchsart ein Kürzel zugeordnet. Die Stege zur optischen Untersuchung werden mit UD bezeichnet. TS bezeichnet Zugversuche an Stegen, 3PB bezeichnet Dreipunktbiegung von Stegen und die Zweipunktbiegeversuche an Stegen haben das Kürzel 2PB. Die Poren werden unabhängig der Versuchsart gleich vorbereitet. Nichtsdestotrotz wird bei der Benennung zwischen Zugversuchen (TP) und Druckversuchen (CP) unterschieden. Die unterschiedlichen Probenarten sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

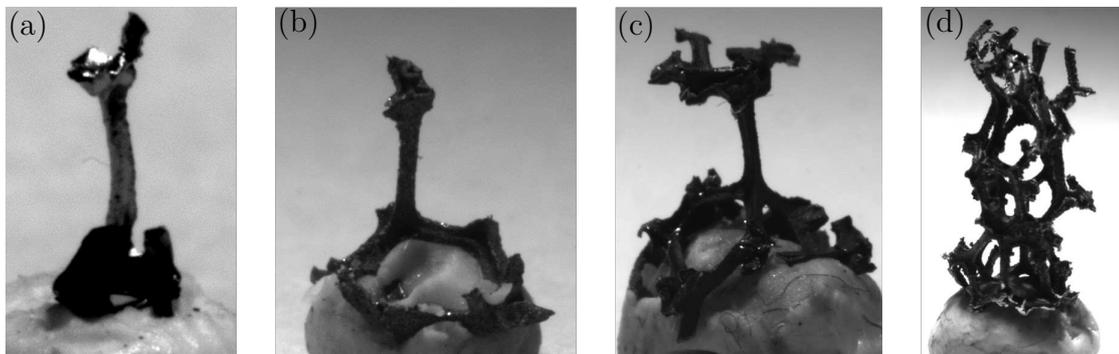


Abbildung 3.9: Verschieden vorbereitete Stege für (a) optische Untersuchung (UD) und Dreipunktbiegeversuch (3PB), (b) Zweipunktbiegeversuch (2PB), (c) Zugversuch (TS) und (d) Poren für Zug- und Druckversuche (TP / CP)

3.2.1 Präparation

Ausschneiden von Einzelstegen

Beim Extrahieren der Stege wird zunächst ein größerer Bereich der Probe abgetrennt, innerhalb dieses Bereichs wird dann ein Steg ausgewählt. Um an diesen Steg zu gelangen, müssen mit Hilfe eines feinen Seitenschneiders vorsichtig alle überflüssigen Stege ausgelöst werden. Für die mechanischen Versuche ist es dabei wichtig, an den Eingussstellen eine zusätzliche halbe Pore übrig zu lassen, um eine ausreichende Stabilität in der Einbettung zu erreichen. Für TS ist eine halbe Pore auf jeder Seite des Stegs, für 2PB ist nur auf einer Seite des Stegs eine halb Pore notwendig. Diese zusätzliche Pore ist für UD und 3PB nicht notwendig und die Knoten können relativ eng zugeschnitten werden.

Ausschneiden von Einzelporen

Die Poren sind nicht perfekt rund, sie lassen sich am besten als Ellipsoid beschreiben. In der Regel werden die Poren entlang ihrer längsten Achse, also longitudinal belastet. Dazu müssen drei Poren gefunden werden, die sich entlang einer Linie aufreihen (vgl. Abbildung 3.9 (d)). Wie auch bei den Stegen, ist diese zusätzliche Pore zum sicheren Fixieren innerhalb der Einbettung notwendig. Zur späteren Weiterverarbeitung werden von allen Proben geometrische Modelle unter Verwendung der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methode erzeugt.

3.2.2 Fotogrammetrie zur 3D Rekonstruktion

Die Fotogrammetrie ist ein Verfahren, bei dem mit Hilfe von Fotografien ein topologisches Modell erzeugt wird. Das Verfahren wird dabei hauptsächlich zur Erstellung von Topologiekarten oder der Rekonstruktion von Fassaden, Brücken oder Dachkonstruktionen genutzt [2, 81, 121]. Neben diesen Anwendungen, bei denen die Objekte sehr groß sind, beschäftigt sich die Nahbereichfotogrammetrie mit kleineren Objekten [93, 94]. Durch die Möglichkeit, auch kleinere Objekte vollständig in 3D zu digitalisieren, fand die Methode Einzug in industrielle Anwendungen [46, 93]. Die Weiterentwicklung der Methode und die damit einhergehende vereinfachte Bedienbarkeit ermöglicht die Anwendung für eine breite Masse [12, 23]. Es wird mit speziellen Fotogrammetrie-Kameras eine Genauigkeit von 1/50 Pixel bzw. 1:100.000 bis 1:200.000 der größten Abmessung erreicht [47]. Darüber hinaus ist mit geringen Einschränkungen der Genauigkeit die Nutzung von nicht speziell für Fotogrammetrie entwickelten Kameras möglich [120]. Zur 3D Rekonstruktion eines Objektes müssen zunächst Bilder mit hoher Qualität von diesem Objekt aufgenommen werden. Dabei ist eine Überschneidung des Bildbereiches von mindestens zwei Bildern notwendig. Anhand dieser Bilder werden dann signifikante Punkte des Objektes gesucht und deren Position rekonstruiert. Durch die Position der signifikanten Punkte in den verschiedenen Bildern und den verschiedenen Kamerapositionen errechnet die Software einzelne Punkte im Raum. Zur einfacheren Identifizierung der Kameraposition kann ein eindeutiges Muster unterhalb der Probe angebracht werden. Dadurch wird es ermöglicht, die 3D Raumkoordinaten von allen signifikanten Punkten zu errechnen. Im nächsten Schritt werden die Informationen zu einer dichten Punktwolke erweitert. Aus der Punktwolke wird dann ein 3D Oberflächennetz generiert. Die Verfahren unterteilen sich in Online- und Offline-Fotogrammetrie [93]. Bei der Online-Methode entsteht das Modell während der Aufnahme der Bilder, die Genauigkeit ist dabei leicht geringer als bei der Offline-Variante [89].

Digitalisierung von Stegen und Poren

Um eine optimale Qualität der Modelle zu erreichen, wird am Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität des Saarlandes die Kombination einer kommerziellen Software (3DSom Pro, Creative Dimension Software Ltd, London, UK) und einem intern entwickelten Aufbau zur Bildaufnahme verwendet. Im Aufbau befindet sich die Probe in der Mitte eines Kalibrierungsmusters auf einer drehbar gelagerten Probenhalterung. Ein Schrittmotor (mDrive 17 plus², KOCO MOTION GmbH, 78083 Dauchingen) dreht die Halterung in 24 Schritten um 360°. Durch die automatisierte Rotation ist ein exakter Winkelabstand zwischen allen Bildern gewährleistet. Ein Drehwinkel von 15° gewährleistet dabei eine ausreichend große Überschneidung des Bildbereichs zwischen zwei benachbarten Bildern. Das Kalibrierungsmuster erfüllt dabei zwei Aufgaben. Zum einen ermöglicht es die Identifikation der Kameraposition [30], zum anderen wird dem Bildbereich durch das Muster eine reale Abmessung zugeordnet und die Größe der Probe definiert. Um eine hohe Beleuchtungsqualität zu gewährleisten, ist der Aufbau vollständig mit undurchsichtigen Platten verkleidet. Als Lichtquelle dient eine Kaltlichtquelle mit zwei Schwanenhälsen (PFBR-150SW-MN, CCS Inc., EFFILUX GmbH, 50354 Hürth). Als Kamera befindet sich eine 9 Mpx CCD Kamera (Manta G917B, Allied Vision Technology GmbH, 07646 Stadtroda) im Versuchsstand. Um einen ausreichend kleinen Bildbereich zu gewährleisten, wird ein Kowa LM50HC (Kowa Optimed Deutschland GmbH, 40233 Düsseldorf) mit einem 40 mm Abstandsring verwendet. Die Verwendung des Abstandsrings hat dabei zwar einen negativen Einfluss auf die Kantenschärfe der abzubildenden Objekte, nichtsdestotrotz bietet die Verwendung den besten Kompromiss aus Bildbereich und notwendigem Abstand bei vertretbaren Kosten.

Der Prozess zur Digitalisierung besteht aus vier Schritten (vgl. Abbildung 3.10). Im ersten Schritt werden die Bilder zugeschnitten und der Kontrast erhöht. Dadurch wird die Kantenerkennung für die Fotogrammetrie-Software vereinfacht. Im zweiten Schritt werden die Kanten des Objektes grob vorgegeben. 3DSom[®] bietet hier die Möglichkeit, mit einem Pinsel über den Rand der Probe zu malen und so einen Bereich zu markieren in dem sich die Kante des Objektes befindet. Im dritten Schritt wird daraus die Maske erzeugt. Aus den maskierten Bildern erstellt die Software im vierten Schritt die 3D Modelle.

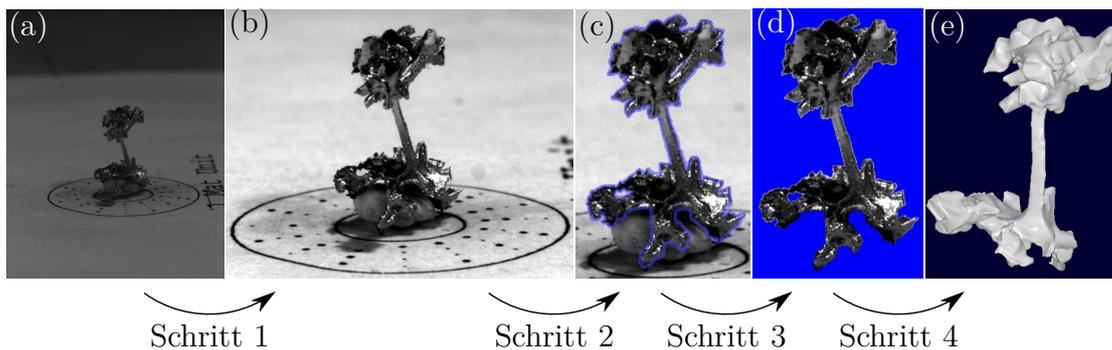


Abbildung 3.10: Schritte zur Digitalisierung von Stegen und Poren; Schritt 1: Zuschneiden der Bilder von Originalbild (a) nach (b); Schritt 2: Vorauswahl der Kontur in (c), Schritt 3: Automatisches Erstellen der Maske in (d), Schritt 4: Erstellen des geometrischen 3D Modells in (e)

Im direkten Vergleich mit Computertomographie- (CT-) Modellen ist der Nachteil der Fotogrammetrie leicht zu erkennen. CT-Modelle bilden sowohl die äußere Geometrie der Probe als auch die innere Struktur ab. Das bietet die Fotogrammetrie nicht. Fotogrammetrie-Modelle liefern eine exakte digitale Nachbildung der äußeren Probengeometrie und eignen sich aus diesem Grund bei der reinen Geometriebetrachtung als kostengünstige Alternative zu CT-Modellen. Muss die innere Struktur der Probe mitberücksichtigt werden, sind CT-Modelle unumgänglich. Im Spezialfall der Schäume kann die Fotogrammetrie für einzelne Poren und Stege problemlos genutzt werden. Bei größeren Abmessungen, wie beispielsweise einem makroskopischen Würfel, bilden Fotografien aufgrund von Hinterscheidungen nicht alle Details der Probe ab und die Fotogrammetrie stößt an ihre Grenzen.

3.3 Universelle mikromechanische Prüfeinrichtung

Die speziellen Anforderungen an den Aufbau und das begrenzte Budget erfordern für die mechanische Charakterisierung auf Meso- und Mikroebene die eigenständige Entwicklung eines Versuchsaufbaus. Der in Jung et al. [74] vorgestellte und in Abbildung 3.11 gezeigte Versuchsstand wurde von M. Wocker im Rahmen seiner Bachelorarbeit [144] konzipiert und konstruiert und von Dr.-Ing. H. Seibert realisiert.

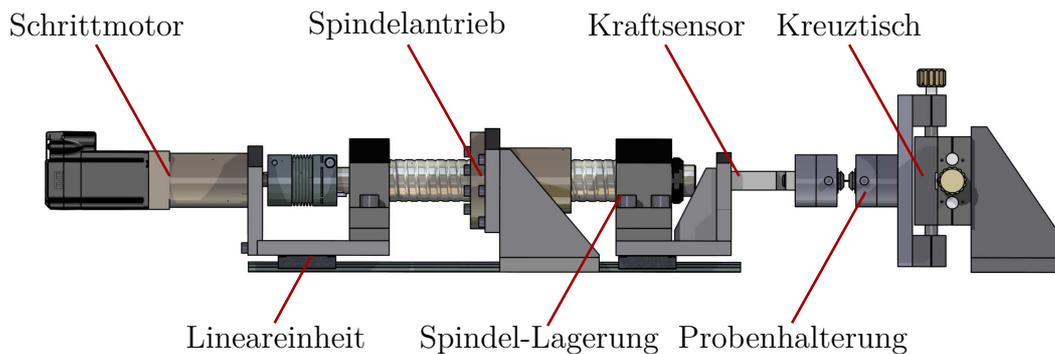


Abbildung 3.11: Wichtige Komponenten des universellen mikromechanischen Prüfstands nach Jung et al. [74]

3.3.1 Spezifikationen des Aufbaus

Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus findet sich in Jung et al. [74]. Der Antrieb besteht aus einem Schrittmotor (mDrive 17 Plus², KOCO MOTION GmbH, 78083 Dauchingen) und einem Präzisions-Spindelantrieb. Durch diese Kombination kann zuverlässig eine Schrittweite von 0,2 μm bei einer Prüfkraft von 1,5 kN gewährleistet werden. Die maximale Prüfkraft des Aufbaus beträgt 6 kN, wobei bei Kräften über 1,5 kN eine Verfahrensgenauigkeit von wenigen Mikrometern realisierbar ist [74]. Die Kraft wird durch einen S-Bügel Kraftsensor (ME K24S, ME-Meßsysteme GmbH, 16761 Henningsdorf) gemessen. Die gesamte Steuerung ist als Virtuelles Instrument[®] (VI) in LabVIEW[®] umgesetzt. Das VI gewährleistet dabei die präzise Bewegung des Antriebes, die Messung der Kraft, das Speichern der Messwerte und das zeitlich korrekte Auslösen und Speichern der Bilder für die DIC.

3.3.2 Adaptionen

In diesem Abschnitt sind Erweiterungen des ursprünglichen Versuchsstandes aufgeführt. Alle Erweiterungen wurden im Rahmen dieser Arbeit zur Verbesserung der Messgenauigkeit oder Erweiterung der Funktionalität umgesetzt. Um einen vollständigen Ausschluss äußerer Beleuchtungseinflüsse zu gewährleisten, wurde der Versuchsstand an

drei Seiten um eine lichtundurchlässige Einhausung ergänzt. Durch die Umsetzung des Versuchsstandes ist die Rückwand ohnehin schon lichtundurchlässig. An der Vorderseite ist eine blickdichte Jalousie montiert. Diese erlaubt weiterhin den einfachen und schnellen Einbau der Probe. Der Tiefenschärfebereich der verwendeten Objektive ist sehr gering und eine Fokussierung direkt über das Objekt schlecht möglich. Deshalb müssen die Kameras zum Fokussieren verschoben werden. Die Verschiebung ist mittels eines Lineartisches (SHTP-0110, igus GmbH, 51127 Köln) pro Kamera umgesetzt. In Abbildung 3.12 (c) ist der Aufbau aus Kamera, telezentrischem Objektiv, Lineartisch und gedruckter Adaption zu sehen. Durch die seitlichen Führungsplatten der Adaption ist die Rotation der Kamera während der Verschiebung ausgeschlossen und ein Winkelfehler bei 2D DIC wird minimiert.

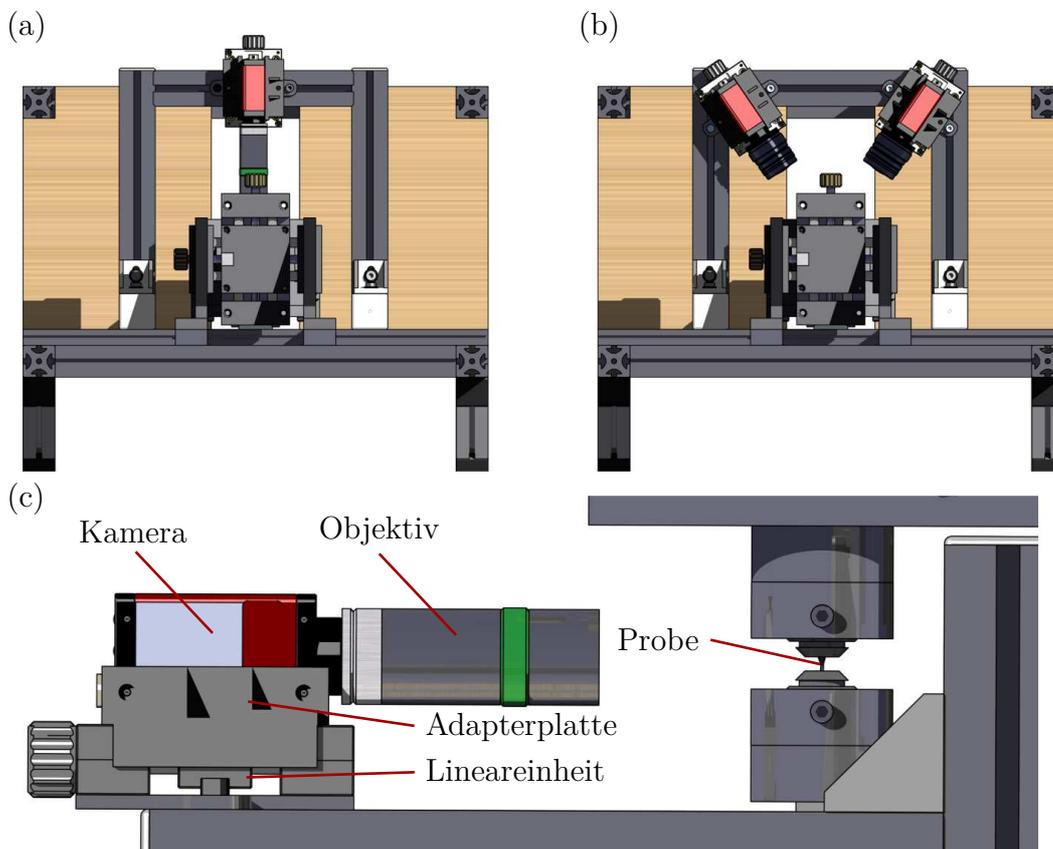


Abbildung 3.12: Kamerapositionierung für (a) 2D und (b) 3D DIC und (c) Aufbau zu Kamerapositionierung mit Lineareinheit und Adapterplatten

Um die durch den Versuchsstand erzeugte Kraft als Belastung auf die Proben zu übertragen, werden die Proben in Probenhalterungen vergossen. Das Vergussmaterial ist Woodsches Metall. Durch eine Schmelztemperatur von 65°C bis 71°C und die hohe Festigkeit im erstarrten Zustand [34], ist es bei richtiger Handhabung das ideale Einbettmittel. Die Probenhalterungen sind so konstruiert, dass sie durch Madenschrauben mit Kegelkuppe im Versuchsstand fixiert werden. Diese Aufnahme ermöglicht die einfache

Erweiterung des Aufbaus zur Durchführung weiterer Versuchsarten und Vereinfachung des Präparationsablaufs. Die Ergänzung des Aufbaus um eine beheizbare Probenhalterung ermöglicht das Aufschmelzen des Metalls direkt im Versuchsstand. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit für eine Vorschädigung der Stege und Poren durch beidseitiges Eingießen der Proben außerhalb des Versuchsstandes reduziert.

Die beheizbare Probenhalterung besteht im Gegensatz zu den Standard-Halterungen nicht aus Aluminium sondern aus Polyetheretherketon (PEEK). PEEK eignet sich durch seine hohe Temperaturbeständigkeit und relativ geringe Wärmeleitfähigkeit gut als Grundmaterial [110]. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit wird das Woodsche Metall im Inneren des Töpfchens aufgeschmolzen ohne eine zu große Erwärmung der anliegenden Komponenten zu erzeugen. Als Heizelement wird ein Widerstandsdraht verwendet. Dieser ist um den oberen Bereich der Probenhalterung gewickelt und mit Harz isoliert (vgl. Abbildung 3.13 (a)). Die Verwendung des Widerstandsdrahts und die Beaufschlagung mit einer konstanten Spannung sorgt für eine gleichmäßige und gezielte Erwärmung des Woodschen Metalls. Zusätzlich zu den Zug- und Druckversuchen sind Zweipunkt- und Dreipunktbiegeversuche möglich. Für die Dreipunktbiegung wird der Steg auf zwei Klingen platziert. Der Abstand der Auflagepunkte ist auf 2 mm fixiert. Die Belastung der Probe ist durch eine dritte Klinge realisiert (vgl. Abbildung 3.13 (b)). Die Belastung während der Zweipunktbiegung wird mit einer Klinge aufgebracht (vgl. Abbildung 3.13 (c)). Um die Probe 90° zur Belastungsrichtung zu platzieren, wird eine Adapterplatte benutzt. Durch die Verwendung des gleichen Lochmusters bleiben alle weiteren Komponenten die gleichen wie bei Zug- und Druckversuchen.

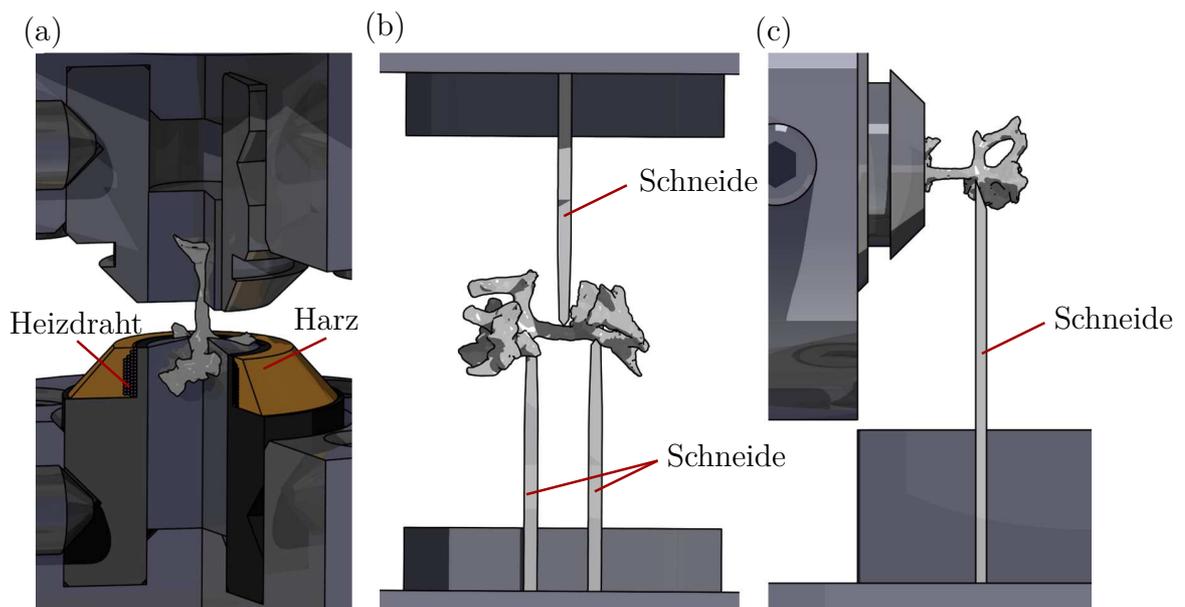


Abbildung 3.13: Verschiedene Probenhalterungen: (a) beheizbare Probenhalterung zum einfacheren Einbau bei Zug- und Druckversuchen; (b) Dreipunktbiegung; (c) Zweipunktbiegung

4

Experimentelle Materialcharakterisierung

Dieses Kapitel behandelt die experimentelle Charakterisierung von Ni/PU-Hybridschäumen. Im ersten Teil liegt das Augenmerk auf der optischen Charakterisierung. Das Ziel ist es dabei, die reale Ni-Schichtdicke und daraus eine Schichtdickenverteilung entlang der einzelnen Stege und im gesamten Schaum zu bestimmen. Durch die starke Struktur-Eigenschafts-Beziehung der Schäume, wird das makroskopische Verhalten von den Materialeigenschaften auf der Mikroebene geprägt und eine experimentelle Charakterisierung der Mikroebene ist notwendig. Diese Charakterisierung ist Inhalt des zweiten Teils. Die Versuche an Einzelstegen stellen dabei eine große Herausforderung dar. Zum einen müssen durch die breite Streuung der Eigenschaften eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt werden, zum anderen kommt es durch die Komplexität der Versuchsvorbereitung und Durchführung zu einem großen Anteil an nicht auswertbaren Versuchen. Durch den hohen Anspruch an die Qualität der Messergebnisse können eine Vielzahl der durchgeführten Versuche nicht berücksichtigt werden. Die Messgenauigkeit für die übrigen Versuche ist dadurch ausgesprochen gut. Zusätzlich ist die Berechnung der Spannungen eine Herausforderung. Im Gegensatz zu standardisierten Probenkörpern, bei denen die Geometrie für alle Proben gleich ist, muss für die Stege die Auswertung der Geometrie individuell erfolgen. Mit der virtuellen Beschichtung bietet das Kapitel eine Lösung, um die Geometrie der Ni-Schicht nachzubilden und damit die Querschnittsfläche sowie das Flächenträgheits- und Widerstandsmoment zu berechnen. Dadurch ist eine zuverlässige Auswertung der unterschiedlichen Versuche möglich, wodurch die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuchsarten in einen Zusammenhang gebracht werden können.

Die im dritten Teil vorgestellten Versuche auf der Mesoebene bestätigen zum einen das Biegen und Knicken als Hauptdeformationsmechanismus von Stegen in Poren und zum anderen dienen sie als Datengrundlage für die Validierung des Virtuellen Labors (vgl. Kapitel 6).

4.1 Untersuchung der Schichtdicke

Die Bestimmung der Schichtdicke lässt sich auf verschiedenen Wegen realisieren. Eine sehr einfache Option ist das Messen der Gewichtsveränderung, die durch den Beschichtungsvorgang auftritt. Unter der Annahme einer homogenen Beschichtung und einer Schätzung der Probenoberfläche lässt sich dabei aus der dazu gewonnenen Masse, eine Schichtdicke schätzen [21, 134]. Dieses Verfahren ist durch die große Anzahl an Vereinfachungen und die Inhomogenität der Beschichtungsdicke im Schaum deutlich zu ungenau. Weitere Methoden zur lokalen Schichtdickenbestimmung sind die Computertomographie (CT) und die Rasterelektronenmikroskopie (REM) [18, 52, 141]. Sowohl die CT als auch die REM benötigen teure Versuchseinrichtungen und eine komplexe Nachbereitung der Daten, wodurch ihre Verwendung in dieser Arbeit nicht möglich war. Ein guter Kompromiss aus der Genauigkeit der Schichtdickenbestimmung und dem Aufwand zur experimentellen Untersuchung bietet die lichtmikroskopische Untersuchung von Schliffbildern. Im Gegensatz zu den sonstigen Verfahren wird die Probe bei der Präparation abgetragen und zerstört. Die Probe kann nicht für weitere Versuche verwendet werden.

4.1.1 Optische Quantifizierung

Die reale Schichtdicke hat einen großen Einfluss auf das tatsächliche Verhalten der Schäume. Aus diesem Grund ist es wichtig zu wissen, wie stark und gleichmäßig die Stege im Schaum beschichtet sind, um die Ergebnisse der mechanischen Versuche einordnen und interpretieren zu können. Dazu wird auf die Erstellung von Schliffbildern mit anschließender Messung der Ni-Schichtdicke zurückgegriffen. Die optische Quantifizierung untersucht hier Stege mit Zielschichtdicken von 40 μm und 80 μm . Die Probenvorbereitung ist dabei für alle der untersuchten Stege gleich. Zunächst müssen die Stege aus der makroskopischen Schaumprobe extrahiert werden. Für die Zielschichtdicke von 40 μm wurde je ein Steg an fünf zufälligen Positionen innerhalb des makroskopischen Schaums entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, keine Stege zu nah am Rand auszuwählen, da dort mit einer deutlich überhöhten Schichtdicke aufgrund des Beschichtungsprozesses zu rechnen ist. Für die Zielschichtdicke von 80 μm wurden zwei Stege

aus dem äußeren Bereich extrahiert und ein Steg aus der Mitte. Wie auch bei den 40 μm stammt keiner der Stege aus dem Randbereich der makroskopischen Probe. Die Fixierung der Proben während des Schleifens wird mithilfe eines Einbettmittels (Technovit 4002IQ, Kulzer GmbH, 63450 Hanau) gewährleistet. Das Schleifen geschieht mit zwei unterschiedlichen Körnungen des Schleifpapiers, mit einem Papier mit 600er Körnung, um einen ausreichenden Abtrag zu gewährleisten und mit einem feineren Papier mit 1200er Körnung, um grobe Schleifriefen von der Oberfläche zu entfernen. Dabei ist die Körnungszahl identisch mit der Maschenzahl pro Zoll und ist somit ein indirektes Indiz auf die Feinheit des Schleifpapiers [78]. Die Betrachtung unter dem Lichtmikroskop (Axio Imager 2, Carls Zeiss AG, 73447 Oberkochen) zeigt, dass ein feineres Schleifen bzw. Polieren für die Messung der Schichtdicke nicht notwendig ist. Das mit dem Mikroskop erzeugte Bild (vgl. Abbildung 4.1), zeigt eine deutliche Abgrenzung zwischen den unterschiedlichen Materialien und ermöglicht die Messung der Schichtdicke.

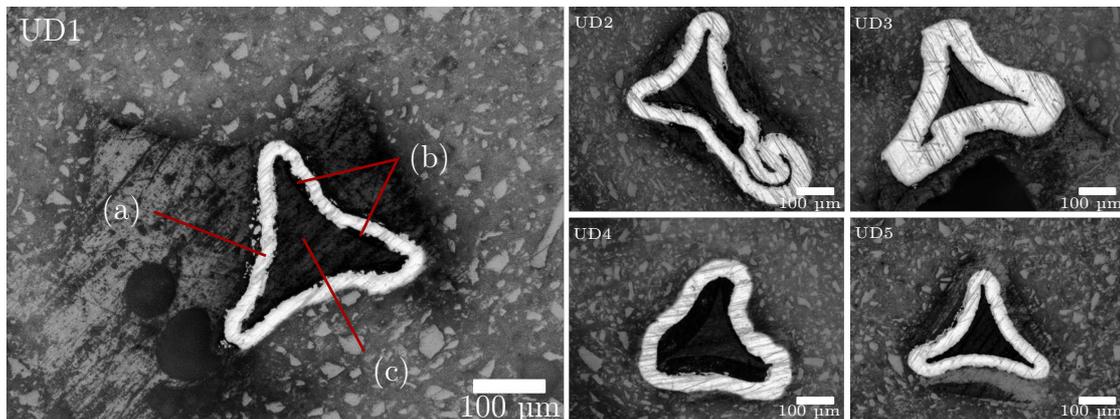


Abbildung 4.1: Beispielhafte Schliiffbilder zur Verdeutlichung der (a) Nickelbeschichtung, (b) Graphitschicht und des (c) PU-Kerns

Methoden zur Schichtdickenmessung

Zur Bestimmung der Schichtdicke anhand der Schliiffbilder werden im Folgenden zwei Methoden aufgeführt und verglichen. Bei *Methode 1* wird die Beschichtungsdicke an sechs Messpunkten gemessen. Die Messpunkte sind dabei gleichmäßig über den Umfang verteilt und bleiben für alle Schliiffbilder an der gleichen Position (vgl. Abbildung 4.2 (a)). Die Beschichtungsdicke in jedem Schliiffbild wird als Mittelwert der sechs Messpunkte berechnet. Zur Messung mit *Methode 1* muss an jedem Messpunkt ein digitales Lineal angelegt werden. Das Lineal wird von Hand auf die kürzeste Distanz zwischen äußerer und innerer Kante der Ni-Schicht ausgerichtet. Für *Methode 2* müssen die Bilder zunächst binarisiert werden. Das Ergebnisbild enthält dann ausschließlich weiße Pixel für die Ni-Schicht und schwarze Pixel für das Einbettmittel, die Graphitschicht und den PU-Kern (vgl. Abbildung 4.2 (b)). Die Verwendung des

BoneJ-Plugin [37] in der Open Source Software ImageJ [123, 126] ermöglicht eine Vielzahl von Messungen. Unter anderem bestimmt das Tool die mittlere und maximale 2D-Schichtdicke der weißen Pixel innerhalb jedes Bildes.

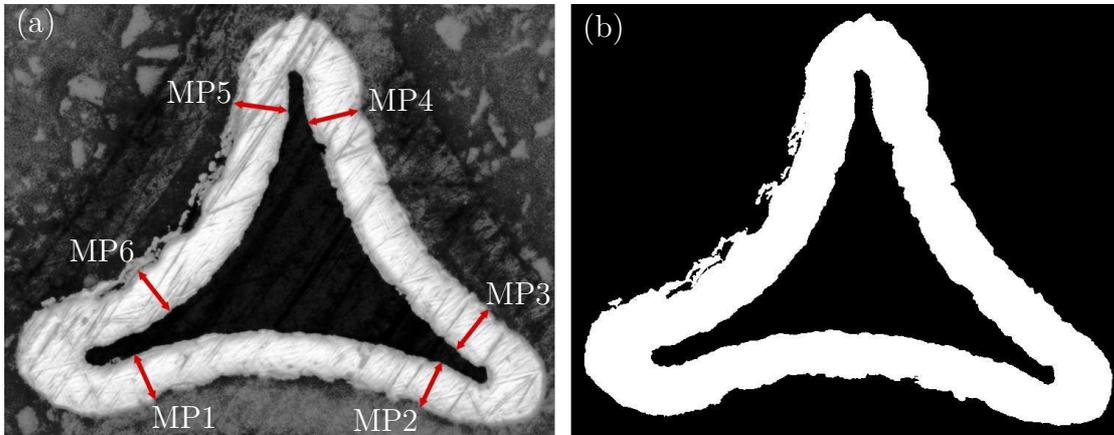


Abbildung 4.2: Schliffbild eines Steges (a) mit 6 Messpunkten (MP) und (b) als binarisiertes Bild zur Schichtdickenmessung mit BoneJ

Die Nachteile der *Methode 1* sind dabei offensichtlich. Durch das händische Anlegen des Lineals kann es sowohl bei der Auswahl der kürzesten Distanz, der Positionierung des Messpunktes als auch bei der genauen Kantenerkennung zu Fehlern kommen. Ein weiterer Nachteil der *Methode 1* ist, dass in den wenigsten Fällen die maximale Schichtdicke an der Stelle eines Messpunktes liegt und diese Methode somit keine Möglichkeit bietet, die Extremwerte der Schichtdicke zu bestimmen. Im Gegensatz dazu basiert die Schichtdickenmessung von BoneJ auf einer Kreis-Einpassung. Dadurch ist keine händische Positionierung notwendig, aber die genaue Anzahl und die exakten Positionen der Messpunkte sind nicht bekannt. Der Vergleich zwischen den beiden Methoden zeigt dabei deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen Werten. In Tabelle 4.1 sind die Mittelwerte der absoluten und relativen Abweichungen für die Beschichtungsdicke von fünf Stegen inklusive ihrer Standardabweichung über die gesamte Steglänge zu sehen. Zur Ermittlung der Abweichung wird der Wert von *Methode 1* von dem Wert von *Methode 2* subtrahiert. Es treten dabei sowohl positive als auch negative mittlere Abweichungen auf. Aus diesem Grund kann hier keine generelle Abschätzung getroffen werden, ob einer der beiden Methoden zum Über- oder Unterschätzen der Schichtdicke neigt. Für die folgenden Untersuchungen der Schichtdicke wird *Methode 2* verwendet, da sie eine objektive und automatisierte Auswertung gewährleistet.

Tabelle 4.1: Abweichung der Beschichtungsdicke bei Verwendung unterschiedlicher Messmethoden (*Methode 1* und *Methode 2*) für fünf Stege (UD1 - UD5)

		UD1	UD2	UD3	UD4	UD5
absolut	[μm]	$2,17 \pm 3,36$	$-0,84 \pm 3,76$	$2,09 \pm 7,13$	$-0,95 \pm 4,28$	$1,36 \pm 3,12$
relativ	[%]	$8,24 \pm 12,40$	$-2,47 \pm 9,14$	$1,95 \pm 8,86$	$-2,02 \pm 8,20$	$3,36 \pm 7,74$

Schichtdicke entlang einzelner Stege

Um die Schichtdicke entlang der einzelnen Stege zu bestimmen, wurden für die fünf Stege der 40 μm Zielschichtdicke jeweils 33 Schliffbilder angefertigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Die relative Position bezeichnet dabei die Position des Bildes zwischen oberem Knoten (0,00) und unterem Knoten (1,00) des Stegs.

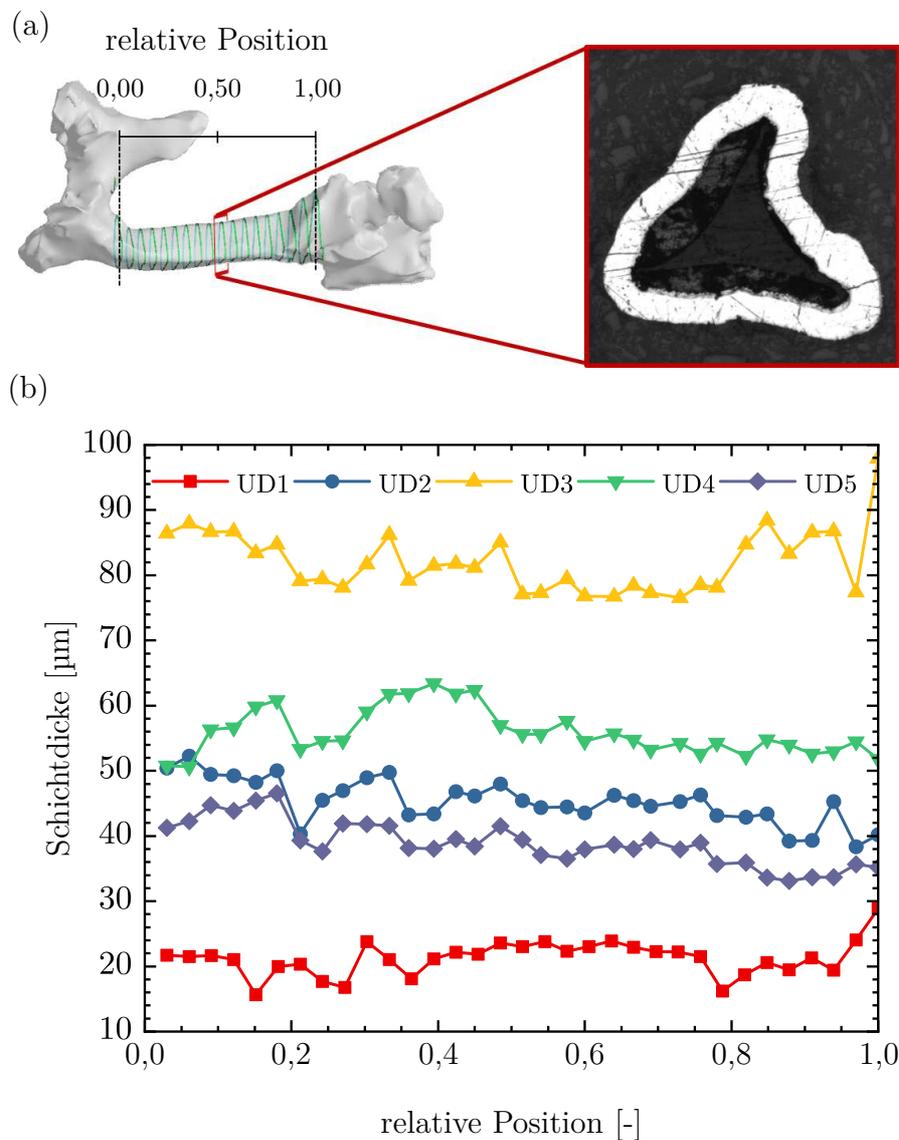


Abbildung 4.3: (a) relative Position im Steg; (b) mittlere Beschichtungsdicke für die Stege UD1-UD5 mit Zielschichtdicke von 40 μm

Dabei zeigt jeder Steg eine konstante Schichtdicke über die gesamte Länge. Außerdem liegt die gemessene Schichtdicke für drei der fünf Stege sehr nah an der Zielschichtdicke. Die mittlere Schichtdicke für diese drei Stege beträgt $44,91 \pm 4,32 \mu\text{m}$, $55,47 \pm 3,48 \mu\text{m}$ und $40,22 \pm 1,64 \mu\text{m}$. Die Abweichung der andere beiden Stege zur geplanten Schichtdicke ist deutlich größer. Für UD3 beträgt die Schichtdicke $83,17 \pm 6,41 \mu\text{m}$. Die Ni-Schicht ist damit mehr als doppelt so dick wie geplant. UD2 hat eine Schichtdicke von $23,42 \pm 3,40 \mu\text{m}$ und ist somit nur halb so dick beschichtet wie geplant. Die maximale Beschichtungsdicke zeigt aber starke, lokale Überhöhungen. Die mittlere Beschichtungsdicke über alle Schiffe, der Mittelwert aller 33 Maximalwerte sowie der absolute Maximalwert aus allen 33 Schiffs sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Zusätzlich ist die Differenz zwischen dem absoluten Maximalwert und dem Mittelwert des entsprechenden Schiffs aufgelistet.

Tabelle 4.2: Beschichtungsdicke der Stege UD1 - UD5 mit einer Zielschichtdicke von $40 \mu\text{m}$

	UD1	UD2	UD3	UD4	UD5
a	$22,43 \pm 3,40$	$44,91 \pm 4,32$	$83,17 \pm 6,41$	$55,47 \pm 3,48$	$40,22 \pm 1,64$
b	$33,38 \pm 8,66$	$64,89 \pm 10,77$	$113,61 \pm 12,25$	$74,92 \pm 6,13$	$51,31 \pm 4,89$
c	72,02	102,08	147,68	85,80	61,56
d	36,38	47,66	57,98	24,11	18,29
e	102,09	87,56	54,32	39,07	42,27

- a: mittlere Beschichtungsdicke über alle Schiffe in μm
- b: Mittelwert der maximalen Beschichtungsdicke in allen Schiffs in μm
- c: absoluter maximaler Einzelwert der Beschichtungsdicke in allen Schiffsbildern in μm
- d: Abweichung des Maximalwertes zum Mittelwert des Schiffs in μm
- e: Abweichung des Maximalwertes zum Mittelwert des Schiffs in %

Dabei treten die starken Überhöhungen an den spitzen Ecken der dreieckigen Grundfläche auf. Wie die Mittelwerte mit ihrer zugehörigen Standardabweichung in Tabelle 4.2 aber zeigen, sind die extremen Überhöhungen zwar vorhanden aber lokal begrenzt. Der Einfluss auf die Standardabweichung ist gering. Insgesamt lässt sich eine konstante Beschichtungsdicke entlang der relativen Position im Steg erkennen.

Die Schliffbilder an Stegen mit einer Zielschichtdicke von 40 μm haben mit unter eine starke Abweichung der realen Schichtdicke zur Zielschichtdicke gezeigt. Aus diesem Grund werden im nächsten Schritt Stege mit einer Zielschichtdicke von 80 μm untersucht. Da die erste optische Untersuchung eine konstante Schichtdicke entlang der Stege gezeigt hat, wurden hier Schliffbilder an nur fünf Positionen entlang der Stege aufgenommen. Die Ergebnisse der Schichtdickenmessung sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Beschichtungsdicke der Stege UD6 - UD8 mit einer Zielschichtdicke von 80 μm

	UD6	UD7	UD8
a	$47,09 \pm 3,65$	$23,35 \pm 3,41$	$27,17 \pm 5,38$
b	$72,62 \pm 4,17$	$33,53 \pm 5,27$	$54,89 \pm 9,53$
c	76,67	40,56	68,00
d	29,63	17,98	35,81
e	62,98	79,31	52,66

- a: mittlere Beschichtungsdicke über alle Schliffe in μm
- b: Mittelwert der maximalen Beschichtungsdicke in allen Schliffen in μm
- c: absoluter maximaler Einzelwert der Beschichtungsdicke in allen Schliffbildern in μm
- d: Abweichung des Maximalwertes zum Mittelwert des Schliffs in μm
- e: Abweichung des Maximalwertes zum Mittelwert des Schliffs in %

Mit Mittelwerten von $47,09 \pm 3,65 \mu\text{m}$, $23,35 \pm 3,41 \mu\text{m}$ und $27,17 \pm 5,38 \mu\text{m}$ erreicht keiner der drei Stege die Zielschichtdicke von 80 μm . Durch die große Varianz in der Schichtdicke kann die Zielschichtdicke nicht für die spätere Auswertung der mechanischen Ergebnisse verwendet werden. Vielmehr muss zur Ermittlung der Querschnittsfläche die reale Beschichtungsdicke an der Bruchstelle untersucht werden. Dieser Mehraufwand ist bei den vorliegenden Ergebnissen unumgänglich.

Querschnittsfläche des Trägermaterials

Neben der Beschichtungsdicke lässt sich in den Schliffbildern auch die Querschnittsfläche des PU-Stegs messen. Dazu wurde hier die Helligkeit der Bilder erhöht, wodurch sich der PU-Kern deutlich von den restlichen Schichten abgrenzen lässt. Unter Verwendung des *versatile wand* Werkzeuges in BoneJ [123, 126] kann dann die Fläche bestimmt werden. Dabei wird die PU-Fläche anhand des Kontrastes zu den anderen Materialien automatisch ausgewählt und die Pixel innerhalb der Auswahl gezählt. Die Umrechnung auf eine Fläche in Quadratmikrometer erfolgt über die Abmessungen der Pixel. Die mittlere Fläche ist mit $23.329,06 \pm 2.494,85 \mu\text{m}^2$ nahezu konstant für alle untersuchten Stege.

4.1.2 Virtuelle Beschichtungserzeugung

Die fotogrammetrischen 3D Modelle der Stege bilden rein die äußere Geometrie ab. Wird aus ihnen eine Querschnittsfläche bestimmt, entspricht sie der Summe der Querschnittsflächen von Ni-Schicht, Graphitlack, Hohlräumen und PU-Steg. Soll nur die Ni-Schicht betrachtet werden, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Beschichtung virtuell zu erzeugen. Dieser Abschnitt beschreibt das verwendete Verfahren zum virtuellen Beschichten und prüft es auf seine Genauigkeit.

Die verwendete Software zur Bearbeitung der 3D Modelle ist Meshmixer® (Autodesk GmbH, 81379 München). Sie erlaubt das Manipulieren der STL-Dateien und bietet ein Werkzeug zum Erzeugen hohler Strukturen. Neben der Auswahl der gewünschten Schichtdicke können auch die gewünschte Abbildegenauigkeit und Netzqualität ausgewählt werden. Die Software ist nicht für Geometrien in der Größenordnung und Komplexität der Stege entwickelt worden, deshalb muss zur Erzeugung der Ni-Schicht die höchste Genauigkeit gewählt werden. Abbildung 4.4 zeigt einen entlang der Längsachse geschnittenen, hohlen Steg. Darin ist die virtuelle Beschichtung als konstant über den gesamten Steg zu erkennen.

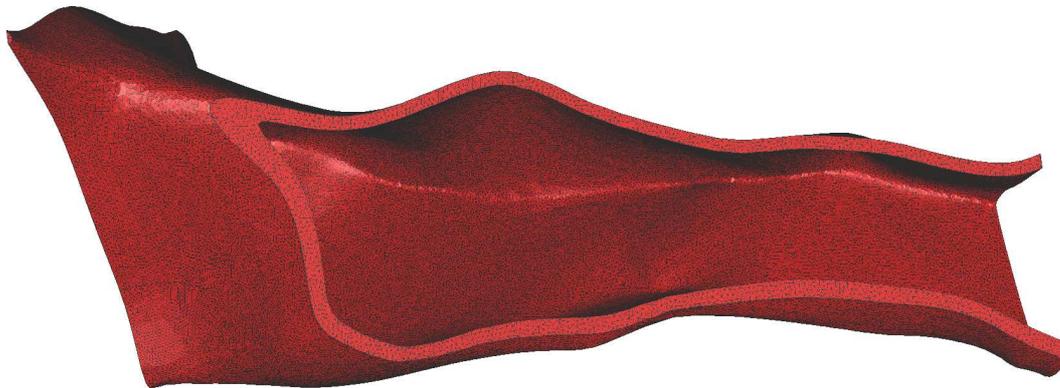


Abbildung 4.4: Virtuell beschichteter, geschnittener Steg mit konstanter Ni-Schicht über die gesamte Geometrie

In diesem Beispiel wurden die realen Schichtdicken der Stege UD1 bis UD5 ausgewählt, um die virtuelle Beschichtung zu erzeugen. Zur Messung der tatsächlich erzeugten Schichtdicke wird das Modell zunächst so zugeschnitten, dass der Steg alleine ohne Knoten vorliegt. Anschließend wird aus der 3D Geometrie ein Bilderstapel erzeugt. Dazu wird die Funktion *voxelization* im 3D Viewer Plugin von ImageJ benutzt. Im nächsten Schritt lässt sich in diesem Bilderstapel die Schichtdicke, wie auch vorher für die Schlifffbilder, bestimmen. Die so ermittelten Daten lassen sich dann sowohl mit der virtuellen Zielschichtdicke, als auch mit den real gemessenen Werten aus Kapitel 4.1.1 vergleichen. Tabelle 4.4 zeigt den Vergleich der realen und virtuellen Beschichtung.

Tabelle 4.4: Vergleich zwischen realer Beschichtungsdicke für die Stege UD1 - UD5 in [μm]

	UD1	UD2	UD3	UD4	UD5
real	$22,43 \pm 3,40$	$44,91 \pm 4,32$	$83,17 \pm 6,41$	$55,47 \pm 3,48$	$40,22 \pm 1,64$
virtuell	$24,06 \pm 1,10$	$44,82 \pm 2,24$	$88,01 \pm 14,67$	$54,55 \pm 2,00$	$40,75 \pm 3,55$

Die Unterschiede zwischen der realen und virtuellen mittleren Beschichtung liegen für drei Stege unterhalb eines Mikrometers. Für UD3 liegt die Abweichung bei $4,84 \mu\text{m}$. Normiert auf die reale Beschichtungsdicke entspricht das einer Abweichung von $5,82 \%$. Die Differenz zwischen den realen und virtuellen Werten ist dabei kleiner als die Standardabweichung von $6,41 \mu\text{m}$. Für UD1 liegt der Unterschied bei $1,63 \mu\text{m}$, das entspricht einer Abweichung von $7,27 \%$. Die Standardabweichung der realen Beschichtungsdicke ist deutlich größer als die Abweichung zwischen dem Mittelwert der realen und der virtuellen Schichtdicke. Die virtuelle Schichtdicke ist somit im Bereich der realen Schichtdicke. Die Messungen zeigen, dass das Verfahren zur Erzeugung der virtuellen Schichtdicken eine gute Möglichkeit bietet, um geometrische Modelle der Ni-Schicht zu erzeugen, die für die spätere Auswertung der mechanischen Versuche benötigt werden.

4.2 Mikroskalenexperimente

Bei der mechanischen Charakterisierung ist eine möglichst realistische Prüfung der Stege erforderlich, um im weiteren Verlauf dieser Arbeit das makroskopische Materialverhalten der Schäume mit den in der Mikroebene gewonnenen Daten abzubilden. So zeigen Stege in makroskopischen Proben, die unter Druck belastet werden, Deformationen ähnlich den Deformationsmechanismen bei Zwei- und Dreipunktbiegung. Deshalb ist es wichtig, neben Zugversuchen, auch Zwei- und Dreipunktbiegeversuche an Stegen durchzuführen, um anschließend die Ergebnisse in einen Zusammenhang zu bringen. Dabei muss aufgrund der individuellen Geometrie der Stege, für die Spannungsberechnung die reale Geometrie der Stege berücksichtigt werden. Dehnungen und Verschiebungen werden mit DIC gemessen und der Messfehler der DIC für jeden Versuch bestimmt. Abschließend werden die Ergebnisse der Zweipunktbiegung und der Zugversuche in einem Zusammenhang diskutiert und erste Erkenntnisse der Stegeigenschaften präsentiert.

4.2.1 Dreipunktbiegung

Bei der Dreipunktbiegung liegt der Steg auf zwei Klingen mit einem festen Abstand von zwei Millimetern auf. Die Lagerung wird schrittweise nach oben bewegt und der Steg durch einen feststehenden Dorn gebogen. Während der Belastung werden in 3 μm -Schritten Bilder der Probe aufgenommen. Die Positionierung des Stegs muss parallel zur Kamera erfolgen, da eine Abweichung zu Messfehlern in der DIC-Auswertung führt. Die Steggeometrie, die im Querschnitt einem dreiseitigen Prisma ähnelt, erschwert die Auswertung zusätzlich. Durch die Form des Stegs befindet sich der untere Teil der sichtbaren Seite näher an der Kamera als die obere Kante. Die Differenz des Abstands beträgt Δl (vgl. Abbildung 4.5). Mit der begrenzten Tiefenschärfe (ca. 0,3 μm [140]) der telezentrischen Objektive ist das Fokussieren auf den gesamten Steg unmöglich sobald $\Delta l \geq 0,3 \mu\text{m}$ ist. Die fehlende Parallelität von Kamerasensor und Stegoberfläche führt zu zusätzlichen Messfehlern außerhalb der Stegmitte, wodurch die gemessenen Werte fehlerhaft sind [108, 136]. Für die Auswertung mit 3D DIC im Gegenzug müssen zwei Kameras am Versuchstand angebracht und für jeden Versuch kalibriert werden. Dabei stellt die geringe Probengröße und der daraus resultierende kleine Bildbereich eine Herausforderung dar. Kleinste Bewegungen der Kamera, die beispielsweise durch zu schnelles Zufallen der Labortür ausgelöst werden, führen zu einer schlechten Korrelation und starkem Messrauschen. Die hohe Sensibilität des Aufbaus gegenüber äußerer Einflüsse bewirkt dabei einen hohen Ausschuss an Versuchen.

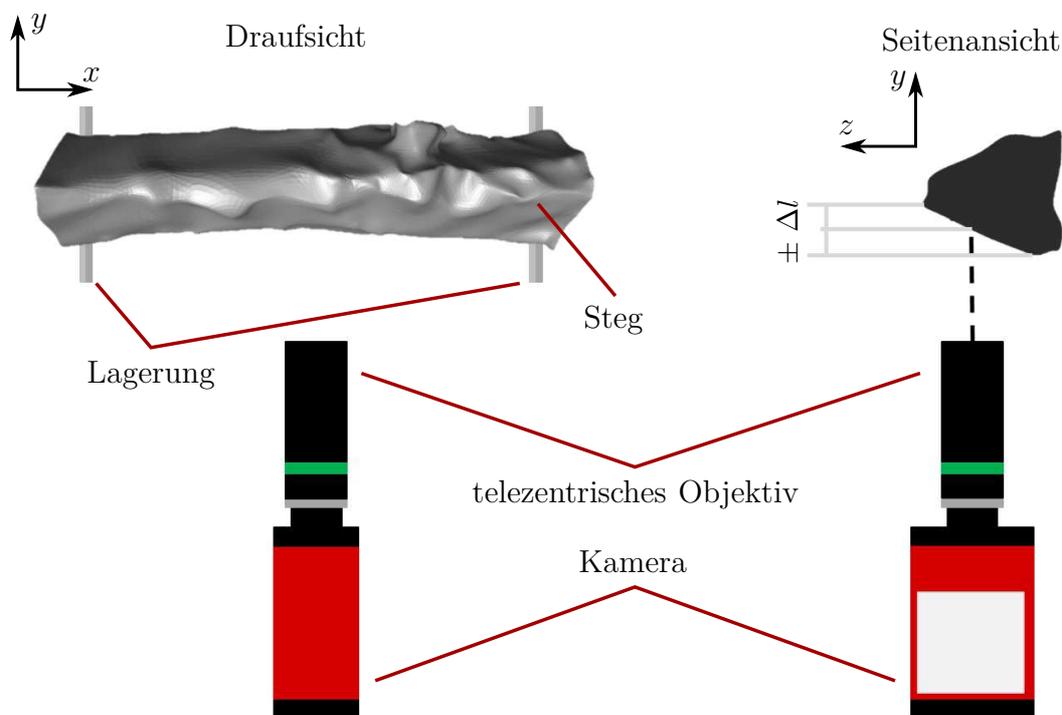


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung von Kamera- und Stegpositionierung während der Dreipunktbiegung mit $\pm \Delta l$ als Fehlerquelle der 2D DIC

Es ist somit keine Vollfeldmessung auf der Stegoberfläche möglich. Als Alternative wird die Verschiebung der Lagerstellen und des Biegedorns mit 2D DIC und telezentrischem Objektiv gemessen, um daraus die Durchbiegung des Stegs zu berechnen. Dafür sind die zur Kamera parallelen Flächen mit einem Specklemuster versehen. Die Durchbiegung des Stegs wird aus der Verschiebungsdifferenz der Lagerstellen berechnet. Dehnungen auf dem Steg können hier nicht zuverlässig gemessen werden, sie sind im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die während des Versuchs gemessene Kraft hängt stark von der Steggeometrie ab. Die Streuung der Messwerte ist entsprechend groß. Mit Hilfe der Bernoulli-Balkentheorie kann für einen Körper, dessen Kantenlänge der Querschnittsfläche deutlich kleiner als dessen Länge ist, mit folgenden Formeln die Spannungsverteilung innerhalb des Querschnitts berechnet werden [127]. Die Spannung $\sigma(z)$ ergibt sich aus dem Quotienten des Biegemoments M_b und des Flächenträgheitsmoments I in Abhängigkeit der z -Position im Querschnitt (vgl. Koordinatensystem Abbildung 4.5).

$$\sigma(z) = \frac{M_b}{I} z \quad (4.1)$$

Dabei besagt die Theorie, dass eine neutrale Achse ($z = 0$) existiert, bei der die Spannung gleich null wird. Die maximale Biegespannung σ_b liegt bei maximalem Abstand z_{max} zur neutralen Faser, also in den Randfasern der Probe vor. Der Zusammenhang wird durch das Widerstandsmoment W ausgedrückt.

$$W = \frac{I}{z_{max}} \quad (4.2)$$

Die maximale Biegespannung σ_b ergibt sich als Quotient aus Biegemoment M_b und Widerstandsmoment W

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} \quad (4.3)$$

Im Fall der Dreipunktbiegung und zentraler Krafteinbringung errechnet sich das Biegemoment zu

$$M_b = \frac{Fl}{4} \quad , \quad (4.4)$$

wobei F die gemessene Kraft und l den Abstand zwischen den Lagerpunkten beschreibt. Das Flächenträgheitsmoment I ist eine geometrische Größe und berücksichtigt die Achse um welche der Körper verdreht, respektive deformiert wird. Bei Verdrehung um die y -Achse ergibt sich das Flächenträgheitsmoment I_y als

$$I_y = \int_z z^2 dA \quad . \quad (4.5)$$

Die Größe z beschreibt dabei den senkrechten Abstand zur y -Achse und A die senkrechte Querschnittsfläche. Zur Bestimmung des Flächenträgheitsmoments I der Stege werden die Geometriemodelle zunächst in einen Bilderstapel umgewandelt. Neben der Flächenmessung (vgl. Bestimmung der Querschnittsfläche, Kapitel 4.1.2) bietet das BoneJ-Plugin [37] in ImageJ [123, 126] die Möglichkeit der direkten Bestimmung von Flächenträgheitsmoment I und Widerstandsmoment W . Damit kann neben der Biegespannung σ_b (vgl. Gleichung 4.2.1) auch der Elastizitätsmodul E aus der gemessenen Kraft F und der Durchbiegung w bestimmt werden.

$$E = \frac{Fl^3}{48wI} \quad (4.6)$$

Abbildung 4.6 zeigt die Spannungs-Durchbiegungs-Diagramme für 12 Dreipunktbiegeversuche. Die gemessenen Biegefestigkeiten für die in Abbildung 4.6 dargestellten Versuche, reichen von 576,64 MPa bis 1604,66 MPa mit einem Mittelwert von $1189,68 \pm 270,70$ MPa. Die Elastizitätsmoduln haben eine Streuung von 5,30 GPa bis 101,79 GPa bei einem Mittelwert von $53,04 \pm 29,41$ GPa. Die Ergebnisse für alle Dreipunktbiegeversuche befinden sich in Tabelle 4.5.

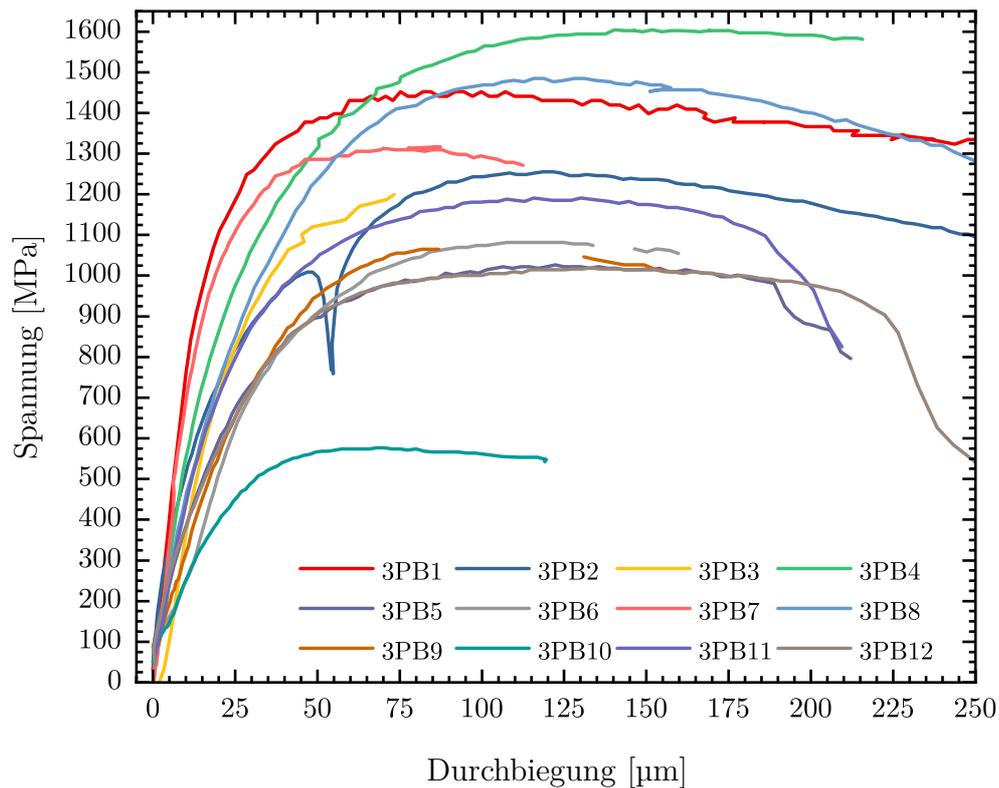


Abbildung 4.6: Spannungs-Durchbiegungs-Diagramme für 12 Stege (3PB1-3PB12) unter Dreipunktbiegung

Tabelle 4.5: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der 12 Dreipunktbiegeversuche

	E -Modul [GPa]	Biegefestigkeit [MPa]		E -Modul [GPa]	Biegefestigkeit [MPa]
3PB1	101,79	1451,81	3PB7	100,33	1316,81
3PB2	5,30	1255,24	3PB8	60,50	1484,48
3PB3	38,01	1199,17	3PB9	36,68	1070,08
3PB4	84,72	1604,66	3PB10	36,57	576,64
3PB5	42,36	1026,30	3PB11	55,23	1190,61
3PB6	27,62	1081,59	3PB12	47,34	1018,77
Ø E -Modul		$53,04 \pm 29,41$	Ø Biegefestigkeit		$1189,68 \pm 270,70$

Fazit Dreipunktbiegung

Bei genauer Betrachtung der Bilder während der Deformation, wird neben der Biegung der Stege für viele der durchgeführten Versuche auch eine Rotation sichtbar. Besonders deutlich wird das für 3PB2, hier führt die Rotation des Stegs nach einer Durchbiegung von $50\ \mu\text{m}$ zu einem Abfall der gemessenen Kraft. Der daraus resultierende Spannungsabfall mit anschließendem erneuten Anstieg der Spannung ist in Abbildung 4.6 deutlich zu erkennen. Außerdem kommt es bei Stegen mit einer Länge von rund zwei Millimetern zum Einrasten der Knoten auf den Klingen. Dabei wird das durch die Biegung der Stege entstehende Gleiten an den beiden Lagerstellen blockiert und die Belastung entspricht nicht mehr einer Dreipunktbiegung. Die Überlagerung der Belastungsarten führt zu unklaren Randbedingungen während der Versuche. Es ist fragwürdig, ob die Daten reproduzierbare Ergebnisse von Versuchen mit den gewünschten Randbedingungen repräsentieren. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Dreipunktbiegung zur Materialcharakterisierung nicht berücksichtigt. Nichtsdestotrotz muss die Reaktion der Stege unter Biegebelastung untersucht werden. Durch die feste, einseitige Einspannung bei der Zweipunktbiegung hat diese die bessere Voraussetzung, um reproduzierbar vertrauenswürdige Ergebnisse zu erzeugen.

4.2.2 Zweipunktbiegung

Bei der Zweipunktbiegung ist der Steg einseitig in Woodschem Metall eingebettet und wird fest mit dem Versuchsstand verbunden. Während des Einbaus des Stegs in den Versuchsstand ist eine genaue, translatorische und rotatorische Ausrichtung möglich. Dadurch wird gewährleistet, dass die Biegung über die gesamte Steglänge erfolgt und die gespeckelte Seite parallel zur Kamera ausgerichtet ist (vgl. Abbildung 4.7). Im Gegensatz zur Dreipunktbiegung sind dadurch Vollfeldverschiebungs- und -dehnungsmessung auf der Stegoberfläche möglich.

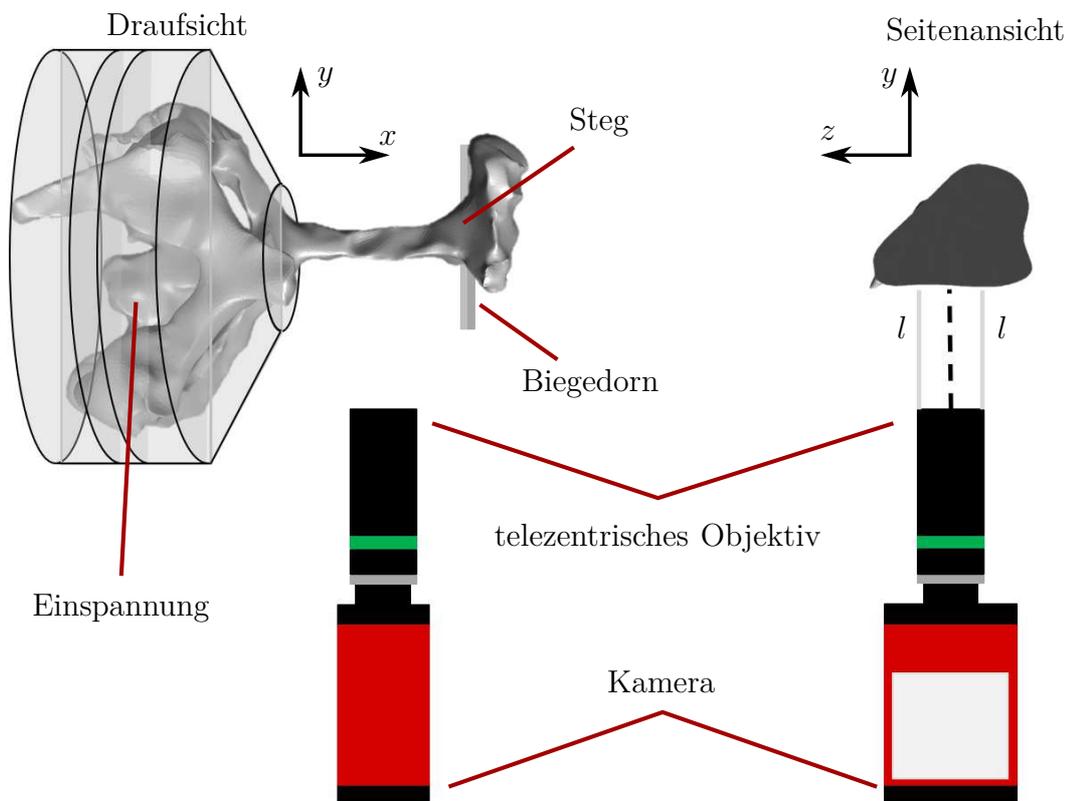


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung von Kamera- und Stegpositionierung während der Zweipunktbiegung mit parallel ausgerichtetem Steg

Bei den Versuchen handelt es sich um quasistatische Versuche mit einer Dehnrates von $\leq 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, bei denen in $3 \text{ }\mu\text{m}$ -Schritten ein Bild aufgenommen wurde. Trotz der Möglichkeit der Vollfeldmessung wird die Durchbiegung des Stegs aus der Bewegung zweier Punkte berechnet. Dazu befindet sich ein Messpunkt nahe der Einbettung (P1, Abbildung 4.8) und der zweite in der Flucht des Biegedorns (P2, Abbildung 4.8). Die Durchbiegung w errechnet sich aus der Verschiebungsdifferenz beider Punkte. Außerdem dient der Abstand der Punkte als Biegelänge l und somit zur Berechnung des Biegemoments M_b . Die ermittelte Durchbiegung dient zur Berechnung der maximalen

Spannung. Wie auch bei der Dreipunktbiegung errechnet sich die maximale Biegespannung aus dem Biegemoment M_b und dem Widerstandmoment W (vgl. Gleichung 4.2.2).

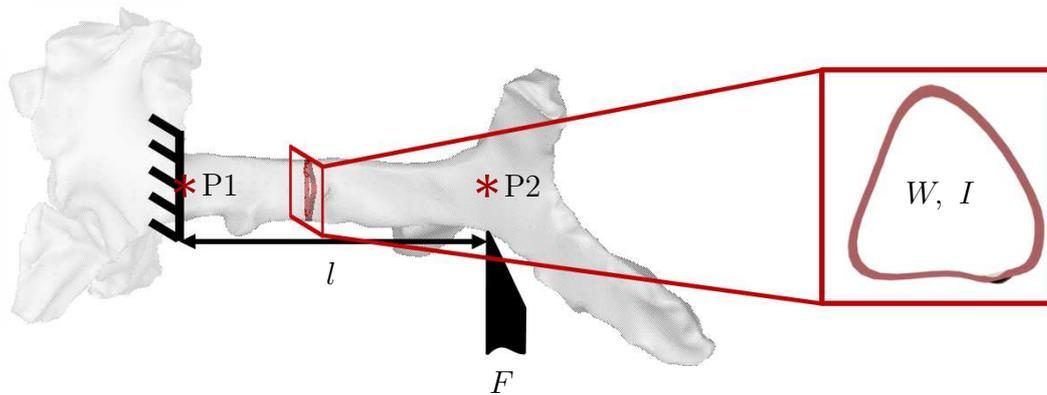


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Messpunkte für die Zweipunktbiegung

Wie auch schon bei der Dreipunktbiegung wird zur Auswertung der Flächenträgheits- und Widerstandsmomente das BoneJ-Plugin [37] in ImageJ [123, 126] genutzt. Dafür werden aus den Versuchsbildern die Position der Einspannung und der Kräfteinleitung bestimmt und die Stege auf den entsprechenden Bereich zugeschnitten. Diese Modelle werden dann im 3D Viewer Plugin von ImageJ in einen Bilderstapel umgewandelt. Sowohl Widerstands- als auch Flächenträgheitsmoment sind von der Achse abhängig, um die deformiert wird. Aus diesem Grund muss bei der Auswertung zwingend auf die korrekte Orientierung des Koordinatensystems geachtet werden. Die individuelle Geometrie der Stege erlaubt dabei anhand der Versuchsbilder die genaue Orientierung des Koordinatensystems in BoneJ. Die maximale Biegespannung errechnet sich mit der gemessenen Kraft F und der Biegelänge l als

$$\sigma_b = \frac{Fl}{W} \quad . \quad (4.7)$$

Zur Bestimmung des Materialverhaltens unter Zweipunktbiegung werden hier die Ergebnisse für 14 Stege unter quasistatischer Biegebelastung präsentiert. Durch die Abweichung der realen Beschichtungsdicke zur Zielschichtdicke aus Kapitel 4.1.1 wird hier zunächst die reale Schichtdicke der geprüften Stege gemessen. Da die Schichtdicke entlang des Stegs nicht wesentlich streut (vgl. Kapitel 4.1.1), reicht die Messung der Schichtdicke an einer einzelnen Stelle aus. Dazu werden die bereits geprüften Stege mittig getrennt und ihre Schichtdicke unter einem Lichtmikroskop gemessen. Die Ergebnisse der Schichtdickenmessung sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Beschichtungsdicke in Mikrometer für 2PB

#	mittlere Schichtdicke	Standardabweichung	#	mittlere Schichtdicke	Standardabweichung
2PB1	23,78	2,95	2PB8	18,38	3,41
2PB2	22,20	3,66	2PB9	36,18	2,71
2PB3	19,57	1,84	2PB10	22,10	2,42
2PB4	14,96	2,76	2PB11	30,15	5,81
2PB5	23,53	2,61	2PB12	20,28	3,39
2PB6	34,59	3,44	2PB13	21,06	4,90
2PB7	32,21	7,09	2PB14	16,67	4,90

Die sich ergebende Spannungs-Durchbiegungs-Diagramme unter Verwendung der realen Schichtdicke zur Bestimmung des Widerstandsmoments sind in Abbildung 4.9 zu sehen. Die maximale, theoretische Spannung unter Verwendung der elastischen Balkentheorie (Biegefestigkeit [122]) reicht von 1146,18 MPa bis 4154,67 MPa mit einem Mittelwert von $2404,53 \pm 934,17$ MPa. Vom Minimal- bis Maximalwert entspricht das einer Streubreite von 362 %.

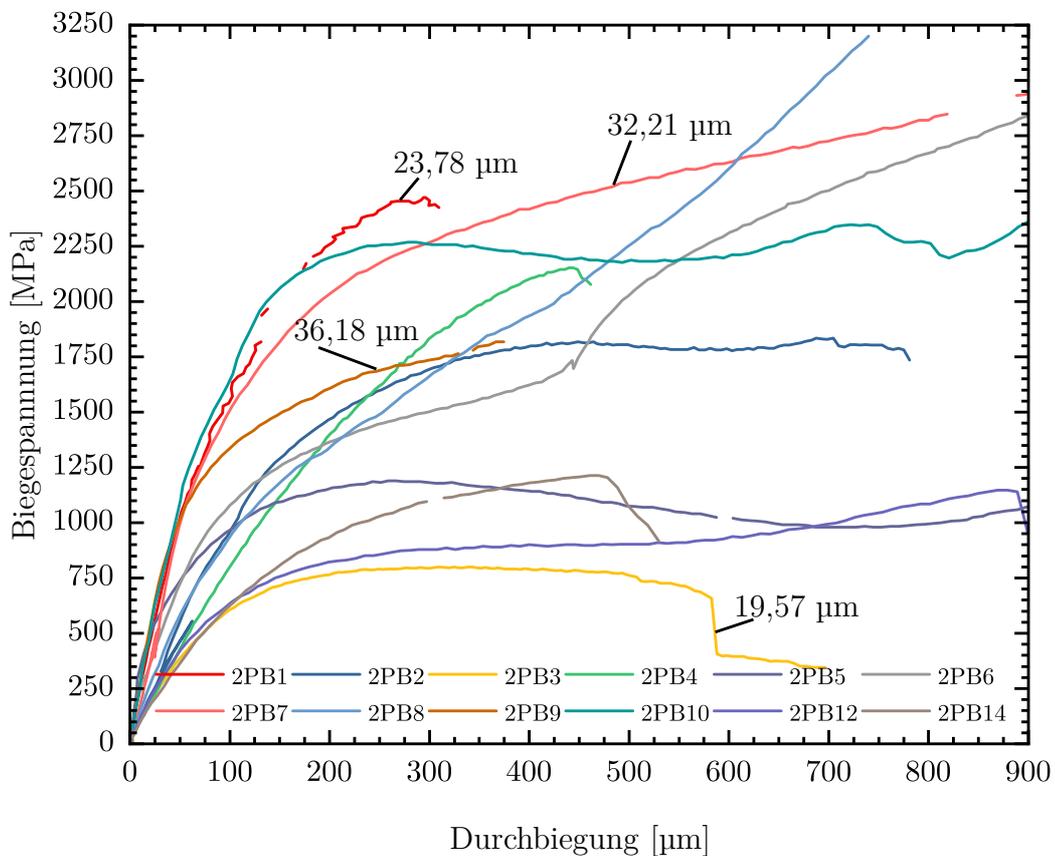


Abbildung 4.9: Spannungs-Durchbiegungs-Diagramme für 12 Stege bei realer Beschichtungsdicke mit Durchbiegung

Zusätzlich zu der Biegefestigkeit kann der Elastizitätsmodul E aus der Durchbiegung w und der gemessenen Kraft F ermittelt werden. Die Biegetheorie liefert für den Fall der Zweipunktbiegung den Zusammenhang

$$w = \frac{F l^3}{3 EI} \quad . \quad (4.8)$$

Um daraus den Elastizitätsmodul zu ermitteln, muss die Gleichung nach E umgestellt werden und die Veränderung der Kraft ΔF und der Durchbiegung Δw von Schritt zu Schritt berücksichtigt werden, also

$$E = \frac{\Delta F l^3}{3 \Delta w I} \quad . \quad (4.9)$$

Dabei bezeichnet I das Flächenträgheitsmoment. In der Auswertung ist der Elastizitätsmodul ein relativ konstanter Wert in den ersten Deformationsschritten. Anschließend sinkt der berechnete Wert. In der physikalischen Interpretation entspricht das dem Ende des elastischen Bereiches. Für die 12 Versuche ergibt sich ein gemittelter Elastizitätsmodul von $95,10 \pm 30,39$ GPa mit einem maximalen Wert von 148,52 GPa und einem minimalen Wert von 53,07 GPa. Die ermittelten Biegefestigkeiten und Elastizitätsmoduln sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Tabelle 4.7: Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit der 12 Zweipunktbiegeversuche

	E -Modul [GPa]	Biegefestigkeit [MPa]		E -Modul [GPa]	Biegefestigkeit [MPa]
2PB1	91,27	2671,37	2PB7	109,66	3603,88
2PB2	77,10	1834,04	2PB8	54,92	4154,67
2PB3	117,99	2672,88	2PB9	113,36	2687,20
2PB4	72,40	2152,06	2PB10	148,52	2348,18
2PB5	136,10	1354,31	2PB12	53,07	1146,18
2PB6	78,66	3017,06	2PB14	88,16	1212,50
Ø E -Modul		95,10 ± 30,39	Ø Biegefestigkeit		2404,53 ± 934,17

Die Spannungs-Durchbiegungs-Diagramme in Abbildung 4.9 zeigen keine klaren Klassen, sondern eine kontinuierliche Verteilung der Biegefestigkeiten. Ein Grund für die breite Streuung kann in dem starken Zusammenhang der Biegeeigenschaften und der Geometrie liegen. Weicht die Stärke der Ni-Schicht leicht von der mittleren Schichtdicke ab oder enthält die Ni-Schicht Fehlstellen beispielsweise an besonders belasteten Stellen, so wirkt sich das deutlich auf die gemessene Kraft aus. Diese sehr lokalen Abweichungen werden von der konstanten virtuellen Beschichtung, die keine starken

lokalen Abweichungen zeigt, nicht wiedergegeben. Somit berücksichtigt die verwendete Methode zur Berechnung des Widerstandmoments diese lokalen Inhomogenitäten der Realität nicht. Da es in einer makroskopischen Probe nicht möglich ist alle lokalen Fehlstellen zu berücksichtigen, ist das hier auch nicht das Ziel. Vielmehr wird es möglich sein, aus den direkten, mikromechanischen Versuchsparametern und der darin enthaltenen Streuung eine Erweiterung auf Meso- und Makroebene zu bilden, die das reale makroskopische Verhalten und dessen Streuung abbildet.

Abbildung 4.10 zeigt sowohl die Elastizitätsmoduln als auch Biegefestigkeiten aller Stege in Abhängigkeit zur Schichtdicke (oben) und zur Querschnittsfläche (unten). Dabei ist für beide dargestellten Werte keine Tendenz, weder unter Berücksichtigung steigender Schichtdicke, noch unter Berücksichtigung der steigenden Querschnittsfläche zu erkennen, die auf eine falsch angenommene Schichtdicke oder fehlerhafte Auswertung hinweist. Des Weiteren kann kein Zusammenhang von Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit festgestellt werden. 2PB8 beispielsweise zeigt eine hohe Biegefestigkeit aber einem sehr geringen Elastizitätsmodul, wohingegen 2PB10 einen hohen Elastizitätsmodul aber nur eine geringe Biegefestigkeit aufweist. Eine Vereinfachung ist nicht möglich und eine stochastische Analyse des Zusammenhangs zwischen den Material- und Geometrieparametern ist zum genaueren Verständnis der Beziehung zwischen Material- und Geometrieparametern erforderlich. Durch den hohen Anspruch an die Messgenauigkeit und das dadurch erreichte geringe Rauschniveau wird die stochastische Analyse erst möglich.

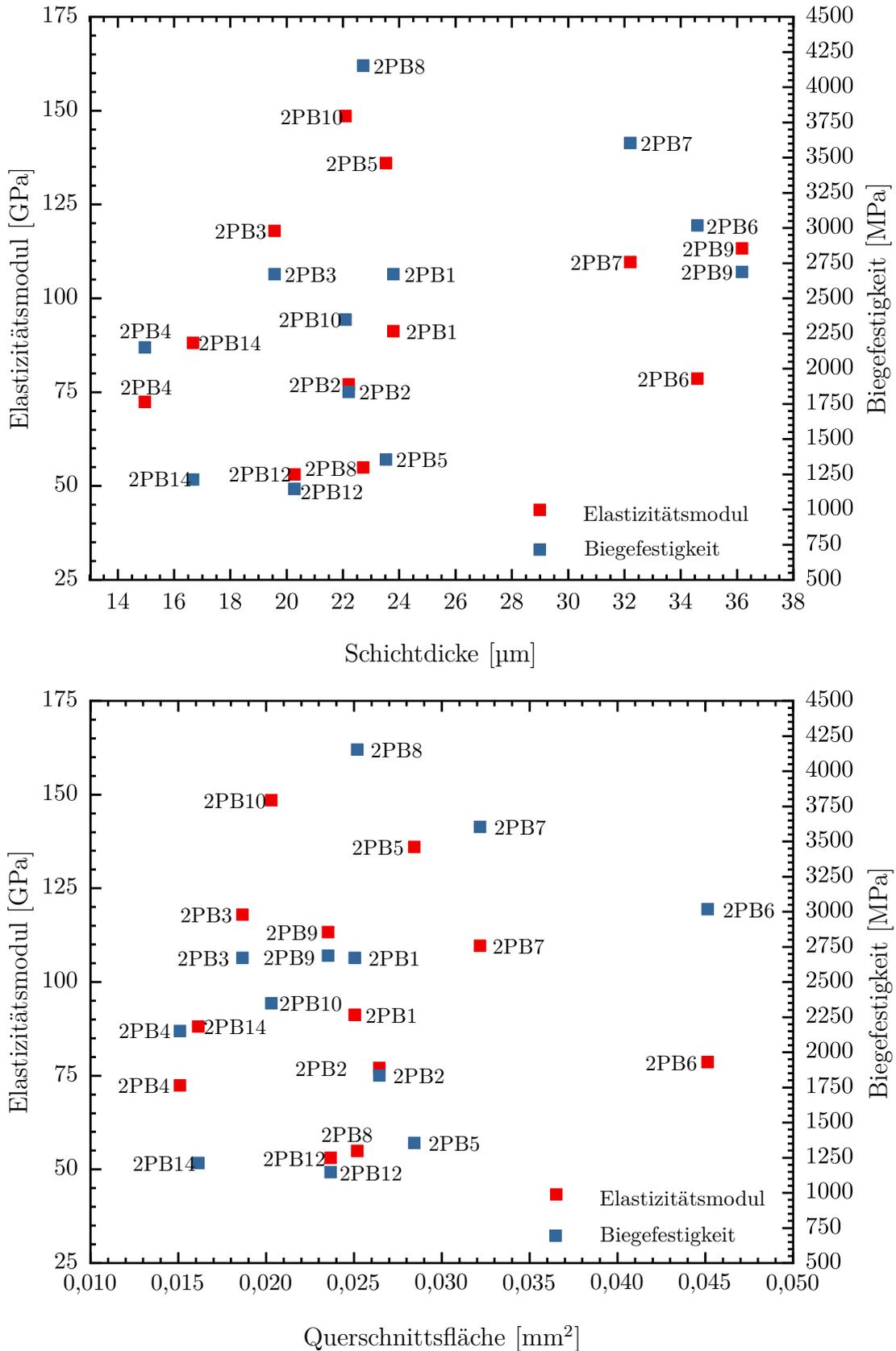


Abbildung 4.10: Zusammenhang von Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit mit Bezug auf die Ni-Schichtdicke (oben) und Querschnittsfläche (unten)

4.2.3 Zugversuche

Wie auch die Biegeversuche erfordern die Zugversuche ein hohes Maß an Präzision während der gesamten Versuchsdurchführung, von der Versuchsvorbereitung über das mechanische Experiment bis hin zur Auswertung. Um auf die Schwierigkeiten hinzuweisen, sind hier als erstes eine Reihe von Fehlern aufgelistet, die während der hier durchgeführten Versuche aufgetreten sind.

- Eine fehlerhafte Einbettung beispielsweise führt zu einer zu geringen Haftung zwischen Steg und Klemmung. Als Ergebnis wird der Steg aus der Einbettung gezogen (TS18) oder der Steg versagt in der Einbettung (TS14, TS15; Abbildung 4.11 (c)).
- Ein nicht definierter Bruch nahe der Einspannung (TS5, TS6; Abbildung 4.11 (b)).
- Ein weiterer Fehler ist, dass während der Einbettung Woodsches Metall an den Steg gelangt und zu Messfehlern in der Kraftmessung führt (TS4, TS10; Abbildung 4.11 (a)).
- Außerdem stellt die Ausrichtung der Stege, parallel zur Krafteinleitungsrichtung, eine Herausforderung dar. Nicht korrekt eingegossene Stege werden zunächst gebogen und anschließend gezogen (TS10, TS15; Abbildung 4.11 (c)).
- Zusätzlich kann es bei der Probenvorbereitung und dem Einbau in den Versuchstand zur vorzeitigen Beschädigung und zu Fehlern kommen, wie beispielsweise bei TS12, hier wurde der Vergusszylinder nicht ausreichend befestigt, wodurch der Versuch nicht ausgewertet werden konnte.

Einige der genannten Fehler lassen sich dabei nicht während des Versuchs sondern erst während der Auswertung erkennen und erschweren dadurch den Prozess. Jeder einzelne dieser Fehler führt dazu, dass die Messwerte nicht brauchbar sind und die Anzahl an nutzbaren Versuchen minimiert wird. Durch die große Streuung der Messergebnisse müssen ohnehin schon eine hohe Anzahl an Versuchen mit einem enormen Anspruch an die Messgenauigkeit durchgeführt werden. Durch all diese Faktoren kommt es dazu, dass ein großer Teil der Messergebnisse nicht dem Anspruch genügt, aber nur so ist es möglich eine klare Aussage über die Verteilung der Materialparameter zu treffen. Aus diesem Grund wurden insgesamt 138 Zugversuche an Einzelstegen durchgeführt von denen 10 vollständig auswertbar waren.

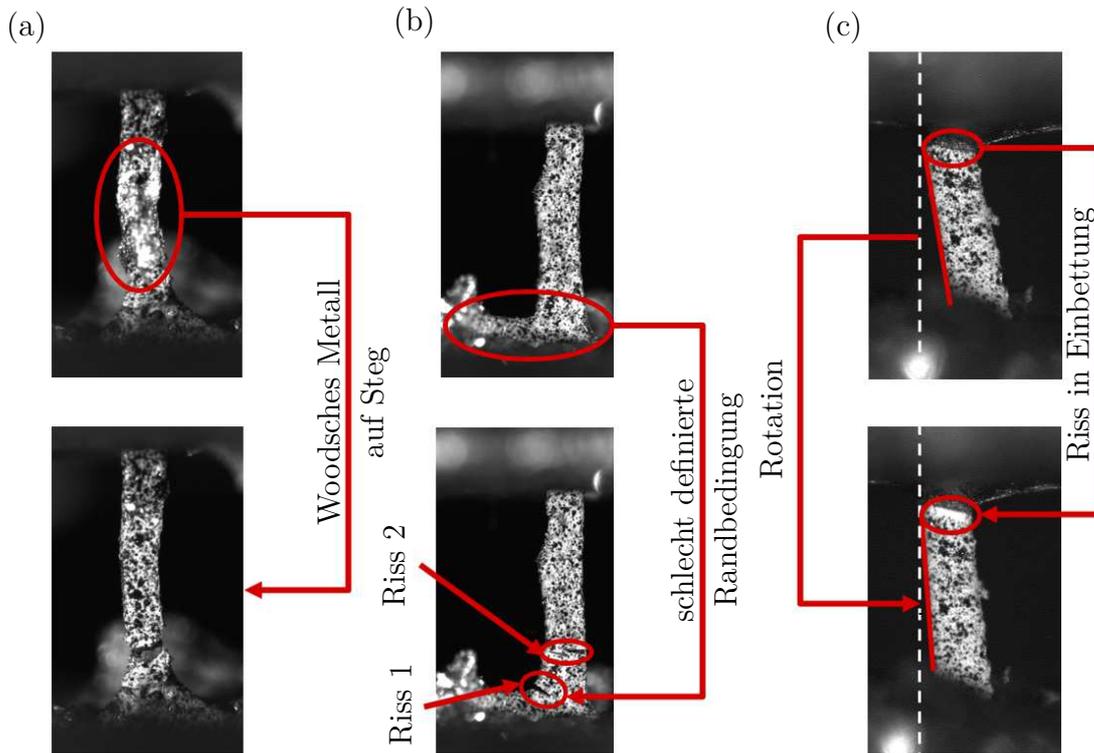


Abbildung 4.11: (a) TS4 zu Beginn mit Woodschem Metall auf Oberfläche und nach Ende des Versuches; (b) einseitig schlecht eingebetteter Steg mit unklarem Rissbild (TS6); (c) schräg eingegossener Steg mit Riss in der Einbettung (TS15)

Die maximalen Kräfte in den Versuchen zeigen eine breite Streuung und liegen zwischen 11 N und 66 N. Dabei kann der Einfluss der Steggeometrie auf die maximale Belastbarkeit nicht ausgeschlossen werden und eine Auswertung der Spannung im Rissbereich ist unbedingt notwendig. Zur Auswertung werden direkt die realen Schichtdicken im Rissbereich bestimmt (vgl. Tabelle 4.8) und zur virtuelle Beschichtung verwendet.

Tabelle 4.8: Reale Beschichtungsdicke in Mikrometer an der Bruchstelle für TS

#	mittlere Schichtdicke	Standardabweichung	#	mittlere Schichtdicke	Standardabweichung
TS 1	34,32	4,78	TS11	19,05	1,40
TS 2	35,34	6,69	TS12	17,93	1,00
TS 3	23,58	5,33	TS13	16,68	1,09
TS 4	36,41	6,68	TS14	35,29	4,73
TS 5	50,49	9,97	TS15	17,48	1,21
TS 6	40,13	6,80	TS16	39,85	3,49
TS 7	24,32	4,25	TS17	22,99	2,20
TS 8	28,25	7,33	TS18	39,28	1,97
TS 9	19,48	1,56	TS19	50,84	7,02
TS10	18,94	3,79			

Für die Spannungsberechnung im Rissbereich muss die Fläche in diesem Bereich ausgewertet werden. Hierbei hilft die komplexe Geometrie der Stege. Dabei lassen sich aus den Versuchsbildern markante Stellen in der Nähe des Risses identifizieren. Anhand dieser markanten Stellen kann diese Stelle im Geometriemodell wiedergefunden werden. Wie auch in Kapitel 4.1.2 muss dann zunächst ein Bilderstapel aus dem Geometriemodell generiert werden. Anschließend wird die Querschnittsfläche des Stegs aus den 10 Bildern nahe der Rissposition bestimmt und auf einen Wert gemittelt. Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist der Prozess in Abbildung 4.12 dargestellt.

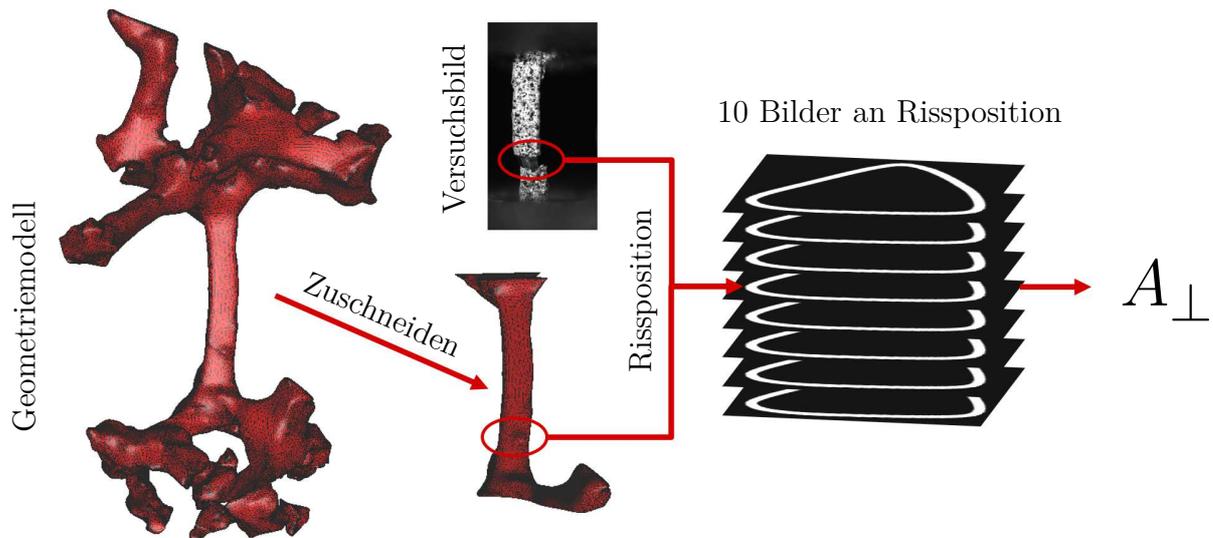


Abbildung 4.12: Flächenbestimmung im Rissbereich bei Zugversuchen

Mit der so ermittelten Ausgangsfläche lässt sich die Spannung im Rissbereich berechnen. Die mechanische Spannung σ_{Zug} im Zugversuch wird als Quotient aus gemessener Kraft F und der senkrechten Fläche A_{\perp} bestimmt

$$\sigma_{Zug} = \frac{F}{A_{\perp}} \quad (4.10)$$

Dabei wurde zur Bestimmung der Querschnittsfläche die gemessene Schichtdicke verwendet. Eine Rückrechnung auf die Ausgangsdicke vor der Dehnung ist zwar möglich, ergibt aber bei einer Dehnung von maximal 10 % im Rissbereich und einer Querdehnzahl von $\nu = 0,31$ für Ni [122] eine Differenz von 3,1 %. Für eine gemessene Dicke von 40 μm entspricht das einer theoretischen Ausgangsdicke von 41,24 μm . Aufgrund dieser geringen Abweichung zur gemessenen Dicke und des Fehlers während der virtuellen Beschichtung wird eine Rückrechnung auf die Ausgangsschichtdicke hier nicht weiter betrachtet. Zur Erzeugung der hohlen Stegmodelle wird im Folgenden die gemessene Schichtdicke verwendet (vgl. Tabelle 4.8).

Die hier durchgeführten Zugversuche sind quasistatische Zugversuche mit einer Dehnrate von unter 10^{-3} s^{-1} . Für die Auswertung mit DIC wird in $3 \mu\text{m}$ -Schritten ein Bild aufgenommen. Die Dehnung wird mit DIC als Mittelwert von drei Liniendehnungen ermittelt. Dazu sind virtuelle Linien links, rechts und in der Mitte der Probe über die gesamte Länge des Stegs angebracht. Die Linien dienen außerdem zur Bestimmung der Messgenauigkeit. Anhand ihrer Längenänderung in den ersten 20 Bildern lässt sich das Fehlermaß der Messung bestimmen (vgl. Kapitel 3.1.2). Der Messfehler, der durch die DIC während der Dehnungsmessung entsteht, beträgt maximal $0,014 \%$ (TS1). Der Kraftsensor erreicht eine Genauigkeit von $0,1 \%$ in der Nähe der Kalibrierung. Durch diese extrem hohe Messgenauigkeit wird garantiert, dass die große Streuung in den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen (Abbildung 4.13) nicht durch Messabweichungen produziert wird, sondern das reale Verhalten der Stege widerspiegelt.

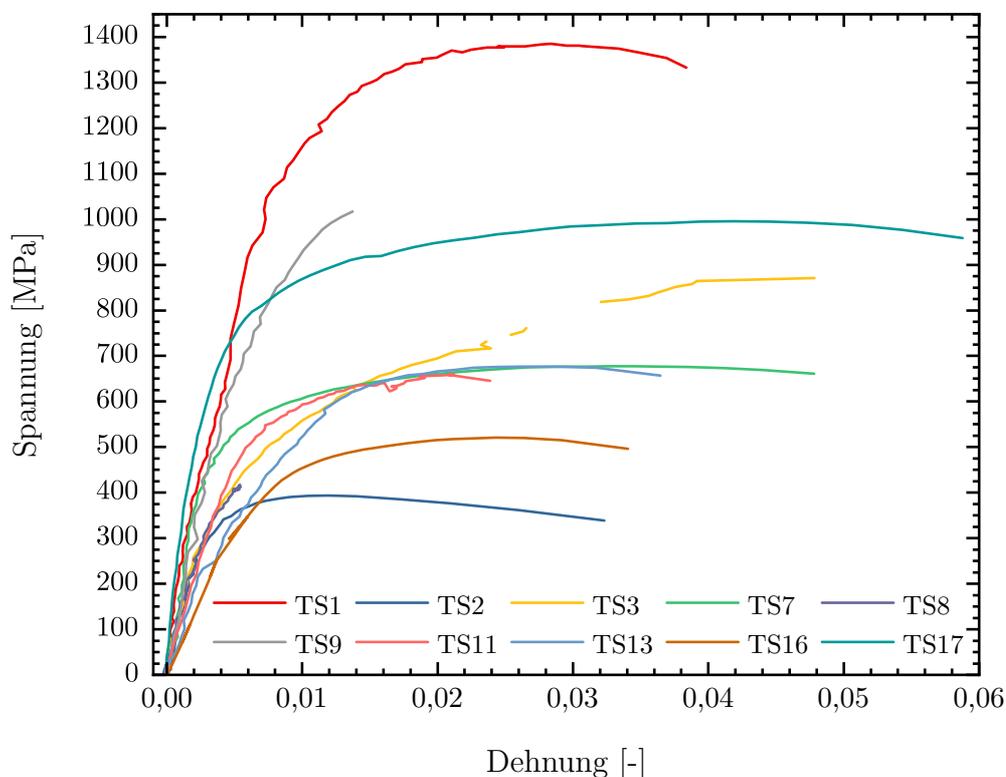


Abbildung 4.13: Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus Zugversuchen für 10 Einzelstege

Dabei reichen die maximal auftretenden Spannungen (Zugfestigkeit) von $393,7 \text{ MPa}$ bis $1384,92 \text{ MPa}$ bei einem Mittelwert von $771,87 \pm 313,27 \text{ MPa}$. Die Elastizitätsmoduln streuen von $55,60 \text{ GPa}$ bis $205,70 \text{ GPa}$. Der Mittelwert mit Standardabweichung liegt bei $132,69 \pm 55,90 \text{ GPa}$. Die Werte für alle Stege sind in Tabelle 4.9 aufgeführt. Aus den vorliegenden Daten kann rein händisch keine eindeutige Verteilung der Werte identifiziert werden. Deshalb muss in den folgenden Schritten die stochastische Verteilung der ermittelten Daten analysiert werden, um diese Verteilung zur genauen Vorhersage des makroskopischen Materialverhaltens zu nutzen.

Neben dem Elastizitätsmodul und der Zugfestigkeit ist in Tabelle 4.9 die Streckgrenze angegeben. Dieser Wert beschreibt die maximale Spannung, die der Werkstoff unter elastischer Verformung aushält. Zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm am Ende des linear-elastischen Bereiches keine eindeutige Streckgrenze wird als Ersatz der Spannungswert bei 0,2 % Dehnung als Streckgrenze ermittelt [122]. Die Werte in Tabelle 4.9 entsprechen dieser Ersatzstreckgrenze. In den Versuchen liegt der Mittelwert der Ersatzstreckgrenze bei $285,02 \pm 125,02$ MPa, die Ergebnisse zeigen somit keine geringere Streubreite als die Elastizitätsmoduln und die Zugfestigkeiten. Um den fehlerhaften Einfluss einer falsch gemessenen Schichtdicke auszuschließen, ist die jeweils gemessene Schichtdicke ebenfalls in der Tabelle aufgeführt.

Tabelle 4.9: Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Ersatzstreckgrenze und Schichtdicke für TS

	E -Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Ersatzstreckgrenze [MPa]	Schichtdicke [μm]
TS1	205,70	1384,92	390,15	34,32
TS2	114,47	393,79	221,71	35,34
TS3	116,03	968,82	257,18	23,58
TS7	202,68	677,31	464,50	23,32
TS8	102,29	417,63	230,22	28,25
TS9	167,20	1016,67	324,88	19,48
TS11	96,95	659,74	196,71	19,05
TS13	69,97	676,93	177,41	16,68
TS16	55,60	527,47	108,24	39,85
TS17	196,05	995,46	479,17	22,99
	$132,69 \pm 55,90$	$771,87 \pm 313,27$	$285,02 \pm 125,15$	$26,39 \pm 7,80$

Abbildung 4.14 zeigt die Elastizitätsmoduln und die Streckgrenzen in Abhängigkeit der Schichtdicke und Querschnittsfläche der Ni-Schicht. Das oberste Diagramm beinhaltet die Elastizitätsmoduln und die Ersatzstreckgrenze. Die Ersatzstreckgrenze und der Elastizitätsmodul zeigen hier eine gute Übereinstimmung. Stege mit einem hohen Elastizitätsmodul haben eine höhere Streckgrenze und umgekehrt. Dabei unterscheiden sich die Diagramme nicht, ob über die Ni-Schichtdicke oder die Ni-Querschnittsfläche aufgetragen wird. In Abbildung 4.15 ist ein solch klarer Zusammenhang nicht zu erkennen. Hier sind die Elastizitätsmoduln und die Zugfestigkeiten aufgetragen. Dabei ist zu sehen, dass ein hoher Elastizitätsmodul nicht zwingend eine hohe Zugfestigkeit bedeutet (vgl. TS7). Im Gegensatz zu TS7 zeigt TS1 sowohl einen sehr hohen Elastizitätsmodul, als auch eine hohe Zugfestigkeit. Dabei lässt sich für die Zugfestigkeit zwar keine Tendenz unter Berücksichtigung der Ni-Schichtdicke auf der x -Achse betrachten, bei einem Auftrag über die Ni-Querschnittsfläche lässt sich aber ein Trend erkennen. Die Zugfestigkeit scheint mit steigender Fläche zu sinken. So hat TS2 mit rund $0,07 \text{ mm}^2$ sowohl die größte Fläche als auch die geringste Zugfestigkeit mit rund 395 MPa. TS1 mit der kleinsten Fläche (ca. $0,02 \text{ mm}^2$) weist mit 1384,92 MPa die

höchste Zugfestigkeit auf. Um das Verhalten eindeutig charakterisieren zu können, ist eine stochastische Analyse des Verhaltens in Abhängigkeit der Steggeometrie somit zwingend erforderlich.

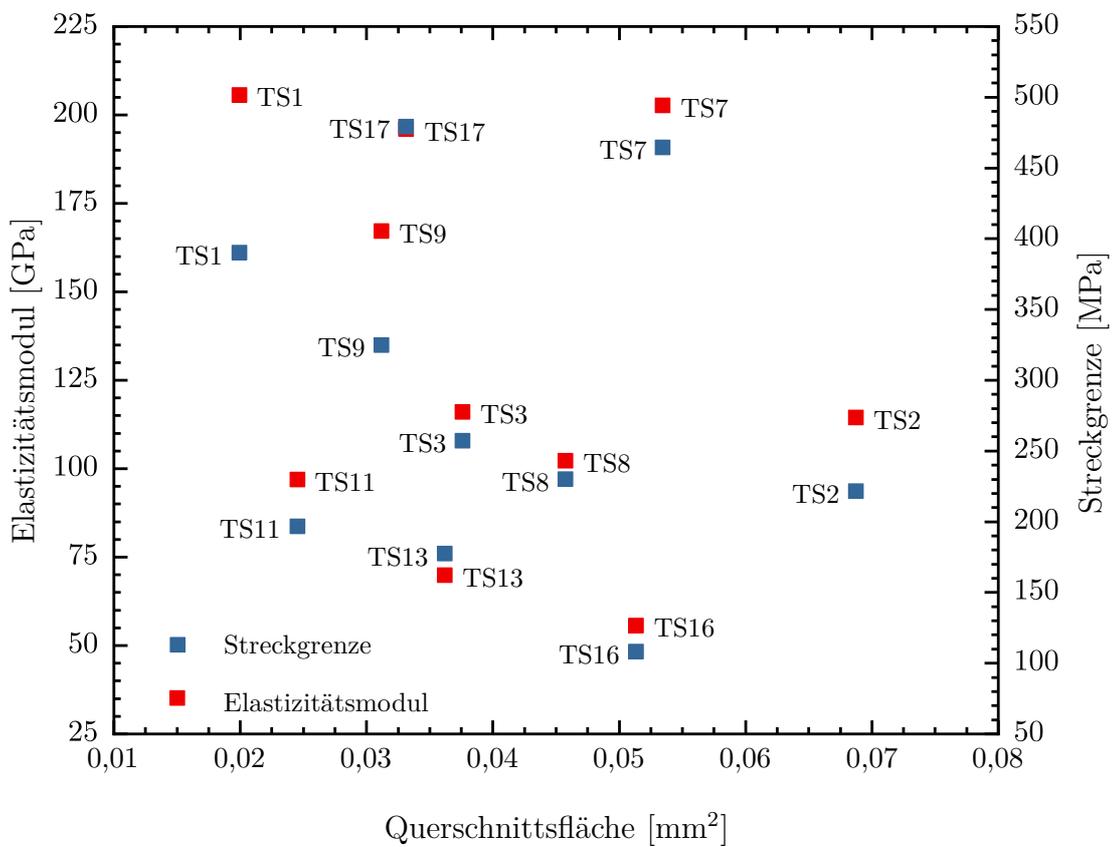
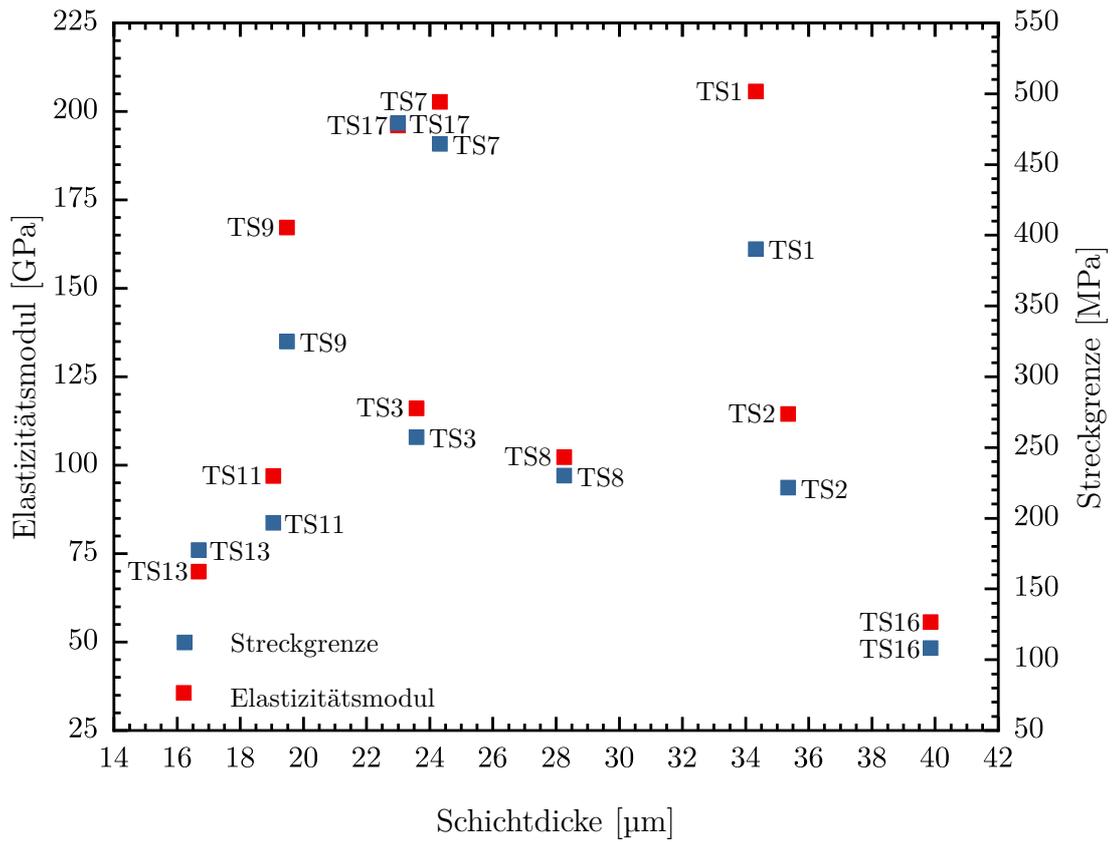


Abbildung 4.14: Zusammenhang von Elastizitätsmodul und Ersatzstreckgrenze mit Bezug auf die Ni-Schichtdicke (x-Achse) (oben) und die Ni-Querschnittsfläche (unten)

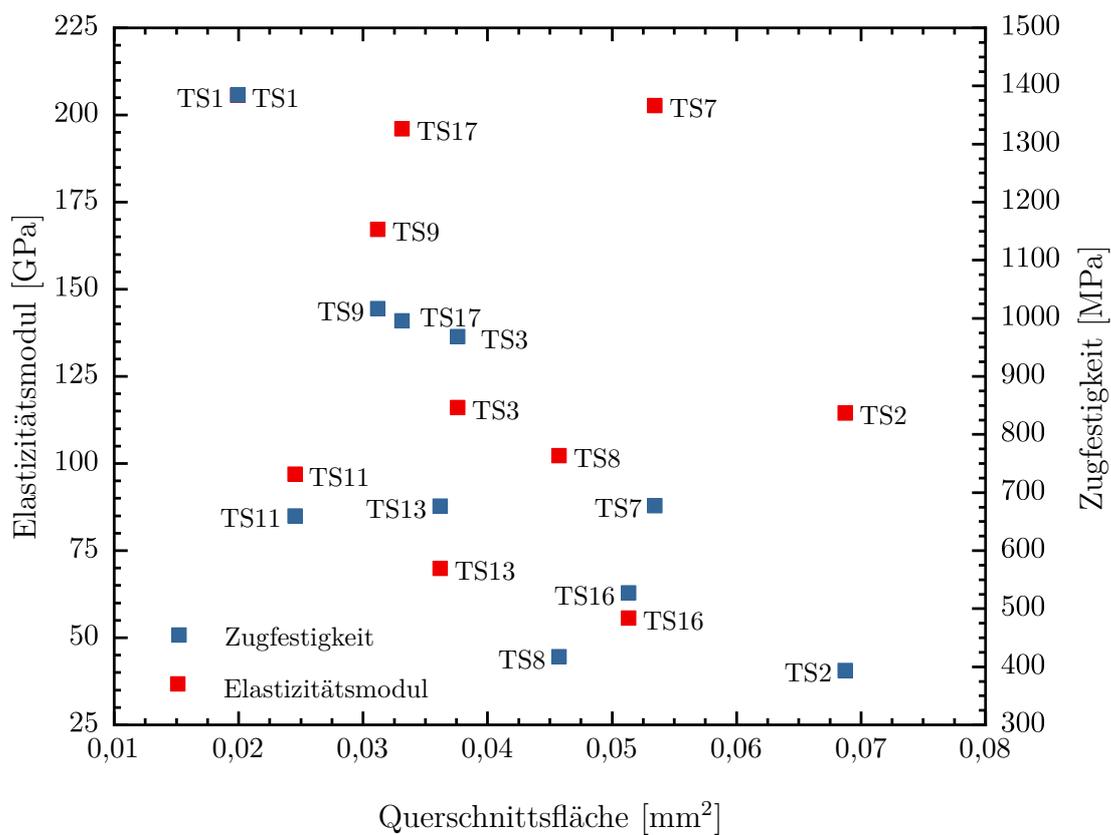
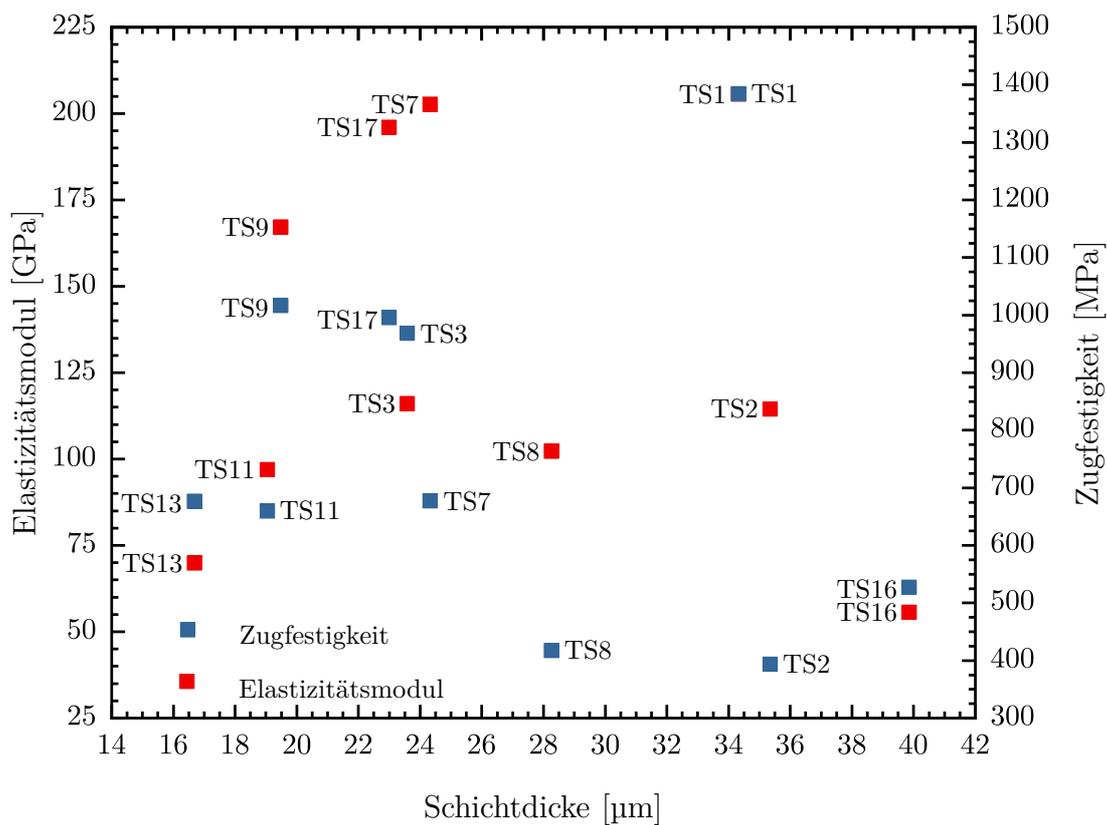


Abbildung 4.15: Zusammenhang von Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit mit Bezug auf die Ni-Schichtdicke (oben) und die Ni-Querschnittsfläche (unten)

4.2.4 Diskussion: Mikroskalenexperimente

Nachdem mit der Dreipunktbiegung aufgrund des hohen Fehlerniveaus keine reproduzierbaren, vertrauenswürdigen Ergebnisse erzeugt werden konnten, wurde für die Ergebnisse von Zweipunktbiegung und Zugversuchen ein sehr geringes Fehlerniveau und damit eine hohe Qualität der Messergebnisse erreicht. Aus diesem Grund werden nur die Ergebnisse von Zweipunktbiege- und Zugversuchen im Zusammenhang diskutiert. Die Elastizitätsmoduln zeigen eine gute Überschneidung. Die Mittelwerte für beide Versuchsarten liegen dabei nicht perfekt übereinander ($\bar{\sigma}$ TS: 132,69 GPa; $\bar{\sigma}$ 2PB: 95,10 GPa), jedoch zeigt das Histogramm in Abbildung 4.16 eine klare Überschneidung der ermittelten Werte. Die erreichte Übereinstimmung weist damit auf eine reproduzierbare Versuchsdurchführung hin. Die in den mikromechanischen Experimenten ermittelten Daten eignen sich somit als breite Datengrundlage für die stochastische Parameteridentifikation.

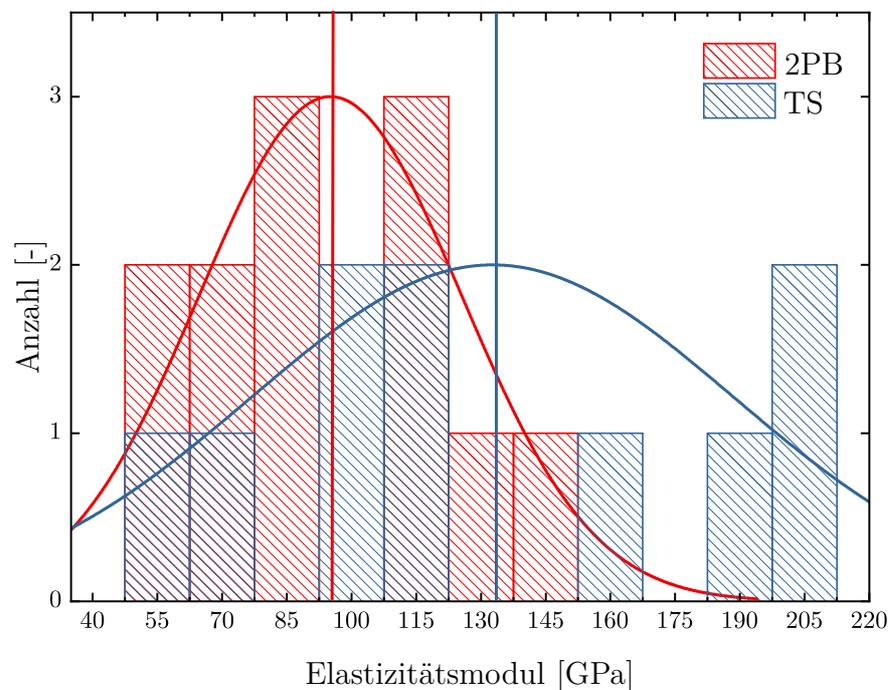


Abbildung 4.16: Histogramm der Elastizitätsmoduln aus Zug- (TS) und Zweipunktbiegeversuchen (2PB) mit einer Klassenbreite von 15 GPa

Im Gegensatz zu der erwarteten und aufgetretenen Übereinstimmung der Elastizitätsmoduln ist mit einer Differenz der Festigkeiten unter Zug- und Biegebelastung zu rechnen. Die höhere Biegefestigkeit ergibt sich dabei aus dem inhomogenen Spannungsverlauf innerhalb des Querschnittes. In den äußeren, stärker belasteten Bereichen der Stege wird die Streckgrenze früher erreicht. Die Randfasern werden plastisch deformiert, die inneren Bereiche der Stege sind dabei noch elastisch verformt und blockieren die weitere plastische Deformation in den Randfasern. Im Vergleich dazu liegt während des Zugversuchs eine homogene Spannungsverteilung über den gesamten Probenquer-

schnitt vor und die Streckgrenze wird zu genau einem Belastungszeitpunkt erreicht. Die Berechnung der Biegefestigkeit erfolgt als ein theoretischer Wert, der eine elastische Deformation bis zur maximalen Belastung annimmt, wodurch die Unterschiede zwischen plastisch und elastisch deformierten Bereichen nicht berücksichtigt werden. In den experimentellen Ergebnissen ist dies durch die unterschiedlichen Festigkeiten erkennbar. Die mittlere Zugfestigkeit ist mit einem Wert von $771,87 \pm 323,27$ MPa um einen Faktor von etwa drei geringer als die mittlere Biegefestigkeit mit einem Wert von $2404,53 \pm 934,17$ MPa. Dieser Unterschied entspricht einem gewöhnlichen Materialverhalten und muss in jedem Fall vom späteren Balkenmodell abgebildet werden können.

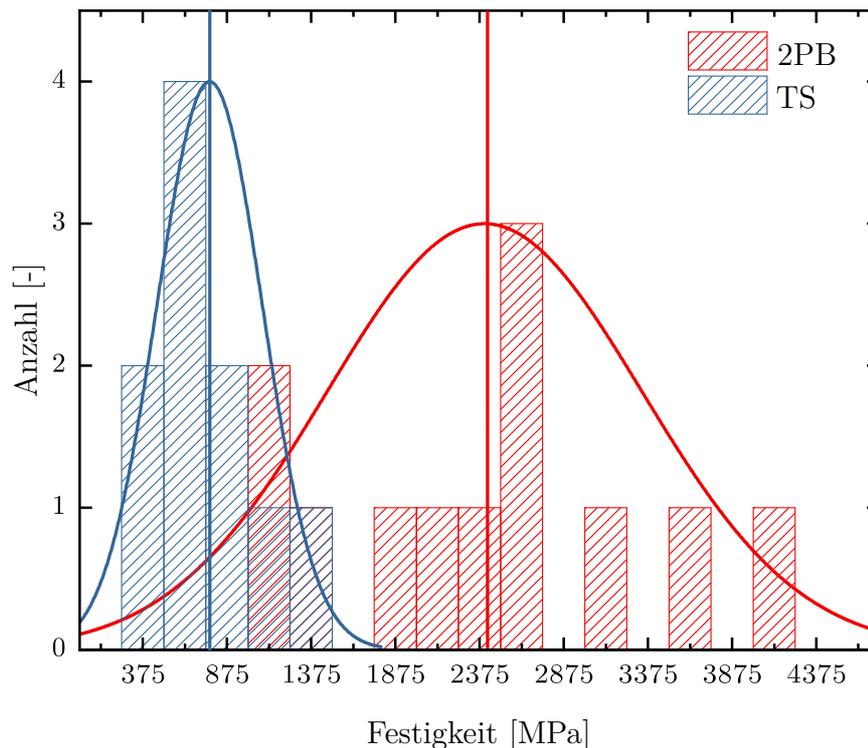


Abbildung 4.17: Histogramm der Festigkeiten aus Zug- und Zweipunktbiegeversuchen mit einer Klassenbreite von 250 MPa (unten)

In dieser Arbeit war es möglich, eine extrem gute Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Versuche zu erreichen, wodurch die Streuung der Messwerte alleine auf das untersuchte Material zurückzuführen ist. Die hohe Anzahl an benötigten Versuchen macht die experimentelle mikromechanische Charakterisierung allerdings sehr zeitaufwendig und eine alternative, kostengünstigere Möglichkeit muss gefunden werden, um eine große Anzahl an Daten zu erhalten. Diese wird im Kapitel 5.2 in Form von virtuellen Experimenten präsentiert. Dabei ist eine vertrauenswürdige Datenbank aus den realen Experimenten als Ausgangspunkt für die Erweiterung zwingend notwendig und durch die hier durchgeführten Versuche gegeben.

5

Virtuelle Erweiterung der Datenbasis

Der starke Zusammenhang von mikromechanischen Eigenschaften und Steggeometrie bewirkt unterschiedliche Reaktionen des Stegs je nach Belastungsart und -richtung. So ist zu erwarten, dass ein einzelner Steg ein anderes Verhalten aufweist, je nachdem um welche Achse er gebogen oder tordiert wird. In der Realität ist lediglich ein Versuch pro Steg möglich, da der Steg nach dem Experiment zerstört ist. Durch die virtuelle Erweiterung in diesem Kapitel, wird die virtuelle Belastung jeder Geometrie auf verschiedene Arten möglich. Dazu werden mittels computergestützter Simulation, die Materialparameter der Stege aus den im vorangegangenen Kapitel experimentell ermittelten Daten der Zugversuche bestimmt. Diese Materialparameter werden dann genutzt, um virtuelle Biege- und Torsionversuche an den Stegen durchzuführen. Die erweiterte Datenbasis ermöglicht die stochastische Korrelation von mechanischen und geometrischen Eigenschaften der Stege durch den Projektpartner. Die korrelierten Materialparameter erlauben dann die Abstraktion von der realen Steggeometrie und die Abbildung des realen Verhaltens durch einfache Balkenelemente. Als Ergebnis des Kapitels stehen dann die stochastischen Materialparameter, die das reale Verhalten der Mikroebene repräsentieren.

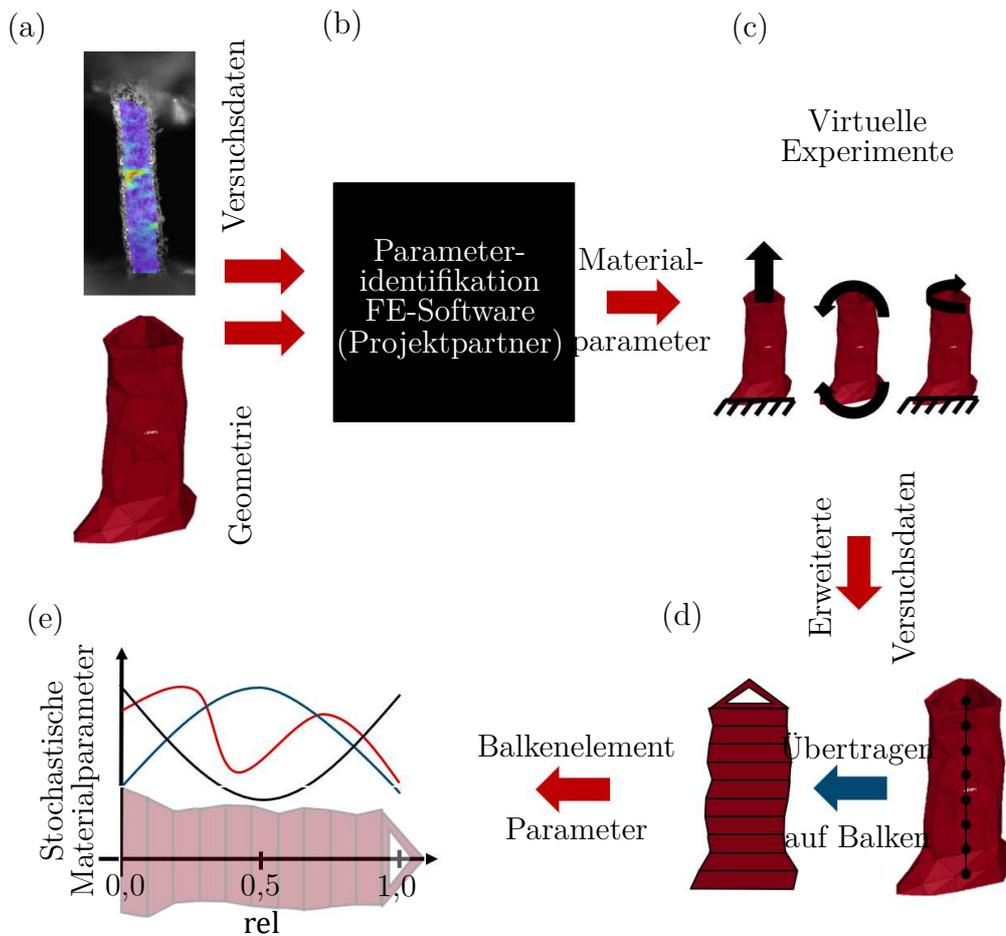


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der stochastischen Materialparameteridentifikation: (a) Experimentelle Daten; (b) FE-Software des Projektpartners; (c) Virtuelle Experimente zur Erweiterung der Daten; (d) Übertragung der Daten durch virtuelle Experimente; (e) stochastisch korrelierte Materialparameter

Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Verlaufsplan der virtuellen Erweiterung der Datenbasis. Die Steggeometrien und Kraft-Dehnungs-Kurven aus den Zugversuchen dienen als Eingangsdaten zur Identifikation von Materialparametern. Eine Umrechnung des Kraftverlaufs in einen Spannungsverlauf ist hier nicht notwendig, da die Verwendungen der Geometriemodelle für die Finite-Elemente (FE)-Simulation die lokalen Spannungen deutlich effizienter berechnet, als die Berechnung einer globalen Spannung per Hand wäre. Mit den so ermittelten Parametern werden dann an jedem Steg virtuell drei Biege- und ein Torsionsversuch durchgeführt. Dabei werden innerhalb des Prozesses an zwei Stellen FE-Simulationen mit dem Programm des Projektpartners durchgeführt. Da in dieser Arbeit keine eigenständigen Änderungen an dem FE-Programm des Projektpartners vorgenommen werden, wird hier nicht auf die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingegangen sondern nur die Funktionen des Programms erklärt. Das FE-Programm des Projektpartners erlaubt das Einlesen der Steggeometrie und die Durchführung von Zug-, Biege-, und Torsionsversuche. Bei den Zugversuchen wird ein Ende des Stegs fixiert und das zweite Ende entsprechend der Verschiebung im Expe-

riment bewegt. Die Biegung wird senkrecht zur Stegsachse aufgebracht, es lassen sich drei unterschiedliche Biegerichtungen definieren (vgl. Abbildung 5.8), um eine breite Basis an Daten zu erzeugen. In den Torsionsversuchen wird eine Seite des Stegs fixiert und ein Moment um die Stegachse am anderen Ende des Stegs aufgebracht (vgl. Abbildung 5.7). Anhand dieser Daten findet die Identifikation der stochastischen Materialparameter statt (Abbildung 5.1 (e)). Diese beschreiben einen Zusammenhang der einzelnen Materialparameter sowie deren Wahrscheinlichkeitsverteilung und erlauben dadurch die Vorhersage von Wahrscheinlichkeiten für neu geschätzte Parameter. Dadurch entsteht die Möglichkeit, eine unbegrenzte Anzahl von realistischen Parametern zu erzeugen, ohne weitere aufwendige experimentelle Untersuchungen durchführen zu müssen. Die Qualität der Vorhersage korreliert stark mit der Qualität der experimentellen Datenbasis, weshalb in dem vorangegangenen Kapitel 4.2 sehr viel Wert auf die Qualität der Daten gelegt wurde.

5.1 Parameteridentifikation aus realen Experimenten

Ziel der Parameteridentifikation ist es, das verwendete FE-Modell auf die experimentellen Daten zu kalibrieren, d. h., für jeden Steg müssen Eingabeparameter gefunden werden, mit denen die Kraft-Dehnungs-Kurve aus dem Experiment (vgl. Kapitel 4.2.3) mit der Kraft-Dehnungs-Kurve aus der Simulation übereinstimmt (vgl. Abbildung 5.2 (c)). Der hier verwendete Ansatz ist die inverse Parameteridentifikation. Dabei wird die Simulation iterativ mit neuen Eingabeparametern gestartet, um die Abweichung zwischen den unterschiedlich ermittelten Kraft-Dehnungs-Kurven zu minimieren.

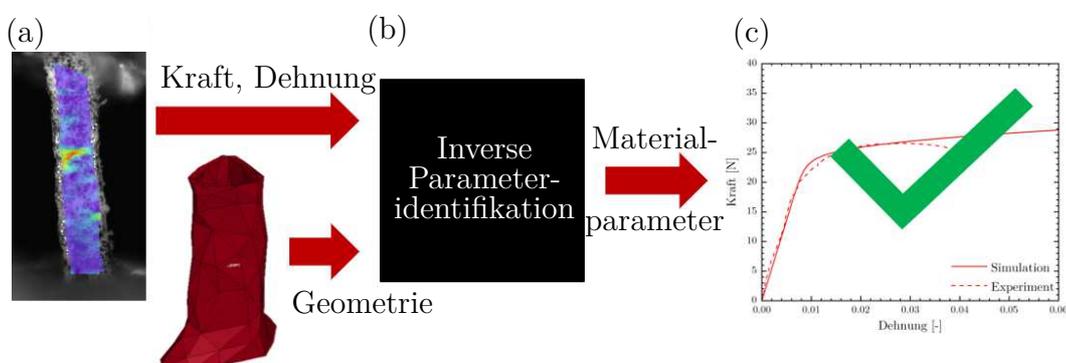


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Parameteridentifikation mit (a) den Zugversuchsdaten aus Kapitel 4.2.3; (b) der FE-Simulation des Projektpartners und (c) den übereinstimmenden Kraft-Dehnungs-Kurven

Vor der Parameteridentifikation muss zunächst eine Netzstudie durchgeführt werden, da die Ergebnisse der Simulation stark von der Vernetzung der Geometrie abhängen. Der Begriff Netz bezeichnet die Struktur, durch die der Körper abgebildet wird. Das Netz besteht aus einzelnen Elementen, die untereinander verbunden sind und dadurch die Geometrie des Körpers aufspannen. Das Ziel der Netzstudie ist, eine ideale Auflösung des Netzes zu finden. Die Auflösung muss dabei fein genug sein, um die Geometrie des Körpers so abzubilden, damit das Netz keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Da ein feineres Netz mehr Elemente beinhaltet und die Auswertung von Spannung und Dehnung für jedes Element erfolgt, steigt die Rechenzeit mit einem feineren Netz deutlich an. Daher muss ein guter Kompromiss aus feinem Netz und geringer Rechenzeit gefunden werden.

Abbildung 5.3 zeigt die Simulationsergebnisse für verschiedene Netzauflösungen. Dabei gibt die Legende die Anzahl der 10 Knoten Tetraeder-Elemente des Netzes an. Es ist deutlich zu erkennen, dass nahezu kein Einfluss des Netzes auf die Ergebnisse vorliegt. Da die Simulation mit einer Elementanzahl von 878 mit einer Simulationszeit von rund 90 Minuten eine schnelle Durchführung ermöglicht, werden die Parameteridentifikationen mit Netzen mit circa 900 Elementen durchgeführt.

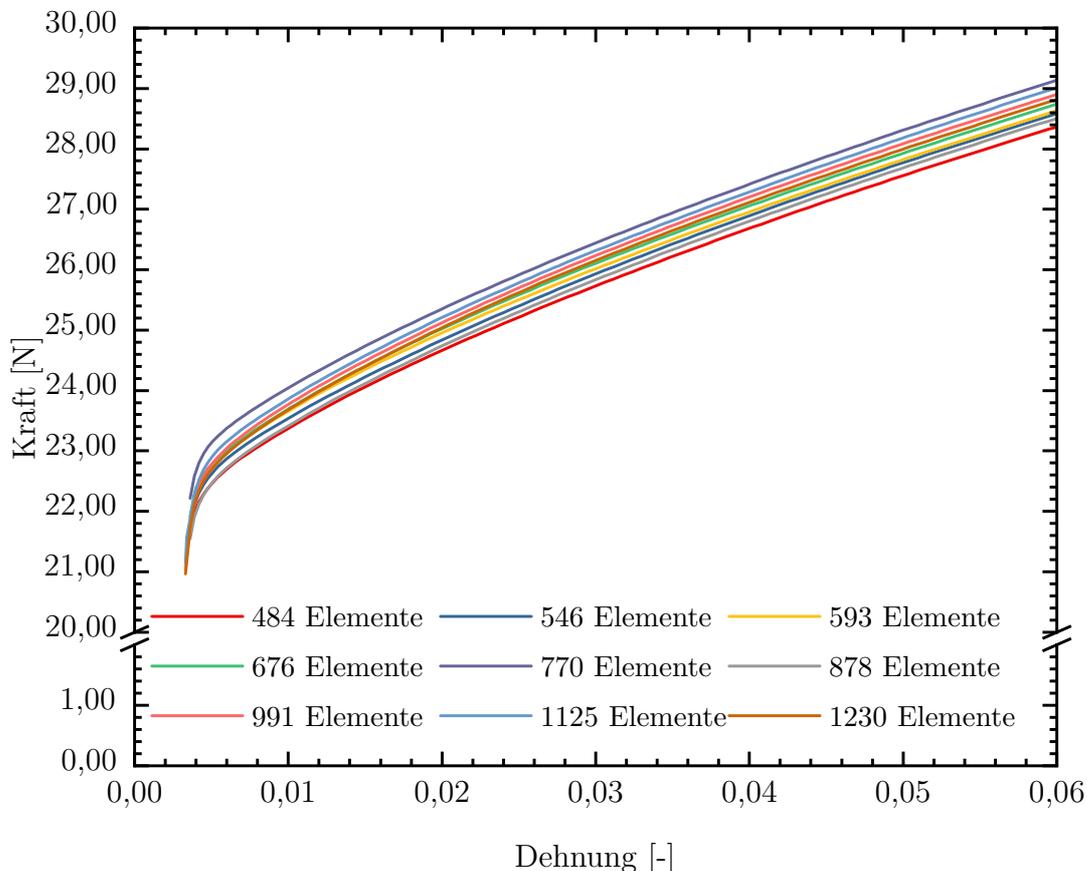


Abbildung 5.3: Netzstudie Zugversuche zur Bestimmung der idealen Netzfeinheit

Der FE-Code ist in MATLAB, MathWorks® Inc. realisiert. Das Verhalten des Körpers ist darin als elasto-plastisches Materialmodell mit linearer Verfestigung hinterlegt. Dadurch beschränken sich die Eingabeparameter auf den Elastizitätsmodul, die Querdehnzahl, die Streckgrenze und einen Verfestigungsparameter. Die Querdehnzahl ist auf 0,33 festgesetzt, wodurch lediglich drei Parameter identifiziert werden müssen. Die Steggeometrie wird als Knoten- und Elementliste in das Programm geladen. Die fotografischen Oberflächenmodelle werden dafür zunächst auf die Steglänge ohne Knoten zugeschnitten. Dabei werden die Länge der Stege anhand der Bilder aus den Zugversuchen bestimmt, um gleiche Randbedingungen für Experiment und Simulation zu gewährleisten. Anschließend werden die Netze in LS-PrePost, Livermore Software Technology in Festkörpernetze mit 10 Knoten Tetraedern umgewandelt. Der Kalibrierungsprozess ist als Flussdiagramm in Abbildung 5.4 dargestellt.

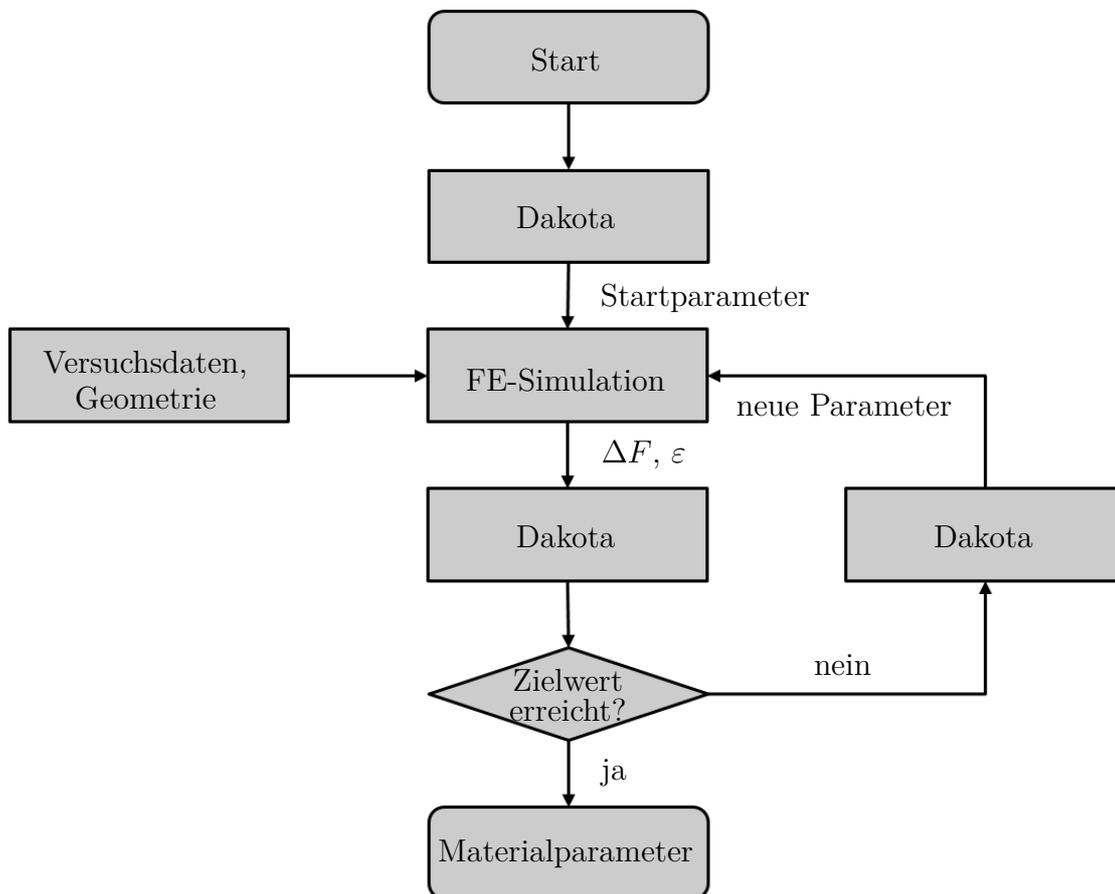


Abbildung 5.4: Flussdiagramm zur Parameteridentifikation mit Dakota (Optimierung-, Parameteranalyse- und Modellkalibrierungssoftware, National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC)[1]

Für die Parameteridentifikation müssen neben den genannten Eingabeparametern auch die Versuchsdaten eingelesen werden. Um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation zu gewährleisten, wird die maximale Dehnung und die Anzahl der Stufen aus dem Experiment in die Simulation übernommen. Dadurch liefert die Simulation für die gleichen Deformationszustände Kräfte, wie sie im Experiment gemessen wurden. Die Differenz aus experimentell gemessener Kraft und simulierter Kraft wird für jeden Schritt berechnet und als Liste ausgegeben.

Dakota (National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC) erlaubt die Optimierung, Parameteranalyse und Modellkalibrierung unter Verwendung vorgefertigter Bausteine [1]. Bei der hier verwendeten Modellkalibrierung wird ein Lösungsvektor in Abhängigkeit von Eingabeparametern minimiert und dadurch die richtigen Modellparameter identifiziert. Dabei agiert Dakota ohne die Lösungsfunktion, hier den FE-Code, zu kennen. Die Software reagiert ausschließlich auf die Veränderung der zu minimierenden Ausgabe mit einer Anpassung der Eingabeparameter. Dazu muss als Erstes eine Methode ausgewählt werden.

```
method,  
  n12sol  
  convergence_tolerance = 1.0e-6
```

Bei `n12sol` handelt es sich um einen robusten, sekantenbasierten Algorithmus der kleinsten Quadrate [1, 33]. Dabei wird die quadrierte Abweichung zwischen experimentell und simulativ ermittelten Daten minimiert. Danach werden die Eingangsparameter als aktive Variablen definiert.

```
variables,  
  active design  
  continuous_desgin = 3  
  initial_point 5.00e4 150 2000  
  lower_bounds 5.00e3 15 40  
  upper_bounds 5.00e6 30000 40000  
  descriptor 'Youngsmodulus''sigmay0''hardening1'
```

Hier sollen der Elastizitätsmodul (Youngsmodulus), die Streckgrenze (`sigmay0`) und ein Verfestigungsparameter (`hardening1`) bestimmt werden. Dazu variiert Dakota die Variablen ausgehend vom Startpunkt (`initial_point`) zwischen den unteren (`lower_bounds`) und oberen (`upper_bounds`) Grenzen. Liegen die ermittelten Werte

auf einer der Grenzen, muss die Grenze angepasst und der Identifikationsprozess neu gestartet werden. Im nächsten Abschnitt wird die Schnittstelle konfiguriert.

```
interface,  
  system  
  analysis_driver = 'callmatlab.sh'  
  parameters_file = 'params.in'  
  results_file = 'results.out'  
  asynchronous  
    evaluation_concurrency 4  
    allow_existing_results
```

Die Kalibrierung läuft auf dem lokalen System ab (`system`), das Modell wird über ein Shell-Skript aufgerufen (`callmatlab.sh`). Die Aufgabe des Skriptes ist es MatLab® zu starten, das Simulationsprogramm mit den Eingabeparametern (`params.in`) aufzurufen und nach der Simulation den Lösungsvektor (`results.out`) zurückzugeben. Dakota ermöglicht die parallele Ausführung des Codes (`asynchronous`), in diesem Fall insgesamt vier parallele Simulationen mit unterschiedlichen Materialparametersätzen. Der Lösungsvektor wird schließlich im letzten Schritt in Dakota verarbeitet.

```
descriptors = 'delta_force'  
  calibration_terms = 1  
  field_calibration_terms = 1  
  lengths = 74
```

Das Programm erwartet bei dieser Eingabe einen Zeilenvektor (`field_calibration_terms = 1`) mit 74 Einträgen (`lengths = 74`). Die Simulation wird dann solange mit neuen Eingabeparametern erneut gestartet, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Das Ergebnis dieses Prozesses sind ermittelte Materialparameter für die 10 Versuche aus Kapitel 4.2.3. Tabelle 5.1 zeigt den Vergleich zwischen simulativ und experimentell ermittelten Parametern der Zugversuche.

Tabelle 5.1: Vergleich der simulativ und experimentell ermittelten Materialparameter

	Experiment		Simulation	
	E-Modul [GPa]	Streckgrenze [MPa]	E-Modul [GPa]	Streckgrenze [MPa]
TS1	205,70	390,15	60,46	623,01
TS2	114,47	221,71	148,40	412,63
TS3	116,03	257,18	115,20	571,03
TS7	202,68	464,50	—	—
TS8	102,29	230,22	138,17	438,25
TS9	167,20	324,88	161,93	875,53
TS11	96,95	196,71	102,25	720,91
TS13	69,97	177,41	90,47	1096,87
TS16	55,60	108,24	55,98	536,05
TS17	196,05	479,17	231,59	1199,29
	$132,69 \pm 55,90$	$285,02 \pm 125,15$	$122,46 \pm 55,03$	$723,09 \pm 276,54$

Die Elastizitätsmoduln zeigen bis auf eine Ausnahme (TS1) sehr gute Übereinstimmungen. Der Beginn des plastischen Bereiches wird nicht ideal abgebildet. Durch die Verwendung eines einfachen Modells mit linearer Verfestigung kann der experimentell ermittelte Verlauf der Kraft-Dehnungs-Kurve mit einem weichen Übergang zwischen elastischem und plastischem Bereich von der Simulation nicht abgebildet werden. Viel-

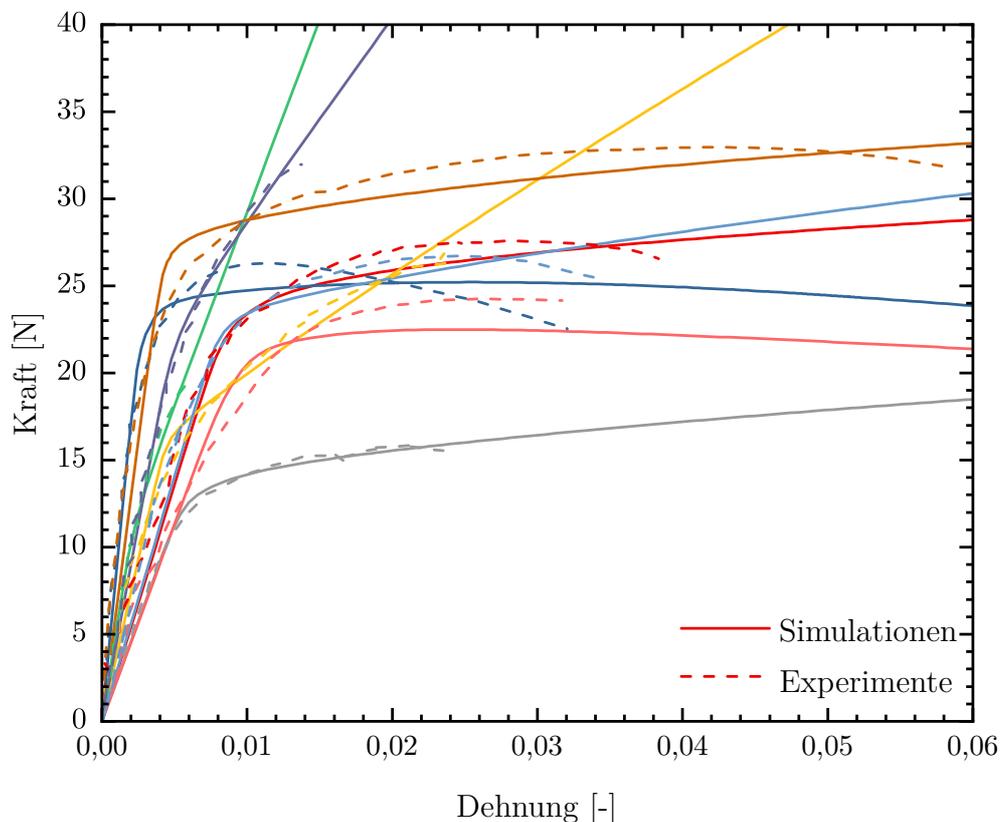


Abbildung 5.5: Vergleich der Kraft-Verschiebungs-Kurven aus Simulation und Experiment

mehr entspricht der experimentell ermittelte Wert der Ersatzstreckgrenze wodurch ein direkter Vergleich mit der Streckgrenze eines Simulationsmodells mit linearer Verfestigung und fest definierter Streckgrenze aus der Simulation nicht möglich ist. Die Betrachtung der Diagramme in Abbildung 5.5 relativiert die Abweichungen allerdings sehr schnell. Die Kurven werden optimal abgebildet und die ermittelten Parameter liefern für das verwendete Modell sehr gute Übereinstimmungen in den Kraft-Dehnungs-Kurven. Die Ergebnisse der Simulationen enthalten im Gegensatz zu den Ergebnisse der Versuche zusätzlich die Spannungsverteilung im Steg. Diese zusätzliche Information ermöglicht die Geometrie der Stege und das lokale Materialverhalten in einen Zusammenhang zu bringen. Die identifizierten Materialparameter sind die perfekte Grundlage, um im nächsten Schritt die Daten zu erweitern. Sie dienen als Eingabeparameter für die virtuellen Experimente (vgl. Abbildung 5.6 (a))

5.2 Virtuelle Experimente

Die FE-Simulationen bieten die Möglichkeit, mechanische Versuche abzubilden, ohne das Prüfobjekt zu zerstören. In der Realität ist eine umfangreiche, zerstörungsfreie Prüfung nicht möglich. Eine Probe an der ein Zugversuch durchgeführt wurde ist defekt und kann danach nicht mehr im Biegeversuch untersucht werden. Bei Proben, die von der standardisierten Probenform abweichen, kann diese Mehrfachtestung allerdings erhebliche Mehrinformation liefern. Im Gegensatz zu realen Versuchen bietet die FE-Simulation die Möglichkeit, virtuelle Experimente durchzuführen (vgl. Abbildung 5.6). Dabei wird jeder einzelne Steg auf verschiedenste Art und Weise belastet (vgl. Abbildung 5.6 (b)). Die virtuellen Experimente bieten so eine kostengünstige und effiziente Alternative zu realen Experimenten, um die Versuchsdaten auf Basis der experimentellen Daten zu erweitern und das Stegverhalten für unterschiedliche Belastungsarten zu identifizieren (vgl. Abbildung 5.6 (c)).

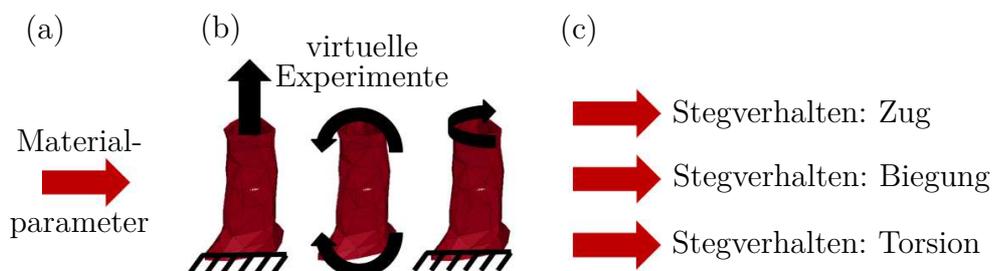


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der virtuellen Erweiterung der (a) Materialparameter aus Kapitel 5.1 mit (b) virtuellen Experimenten zur Bestimmung des (c) Verhaltens bei unterschiedlichen Belastungen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Materialparameter aus realen Zugversuchen identifiziert wurden, werden an den Geometrien mit den passenden Materialparametern Torsions- und Biegeversuche simuliert. Dazu muss zunächst eine Netzstudie durchgeführt werden, um den negativen Einfluss eines zu groben Netzes auf die Versuche auszuschließen. Die Netzstudie muss dabei für die verschiedenen Belastungsarten einzeln durchgeführt werden, da die unterschiedlichen Deformationen unterschiedliche Netzfeinheiten benötigen.

5.2.1 Torsion

Für die Simulation der Torsionsversuche wird eine Seite des Stegs fixiert und keine Bewegung oder Rotation zugelassen. Auf die gegenüberliegende Seite des Stegs wird ein Moment um die Längsachse aufgebracht und die translatorische Bewegung entlang der Längsachse des Stegs zugelassen (vgl. Abbildung 5.7). Durch diese Art der Randbedingungen wird die Überlagerung von Torsions- und Zugbelastung verhindert. Als Angriffspunkt für das Moment ist der Schwerpunkt der Stirnfläche definiert.

Die simulierten Deformationen überschreiten auf Wunsch des Projektpartners reale Deformationen um ein Vielfaches. Es wird in 1000 Lastschritten bis zu einer maximalen Verdrehung von 180° simuliert und in jedem Lastschritt die Deformationen und Spannungen für jedes Element gespeichert.

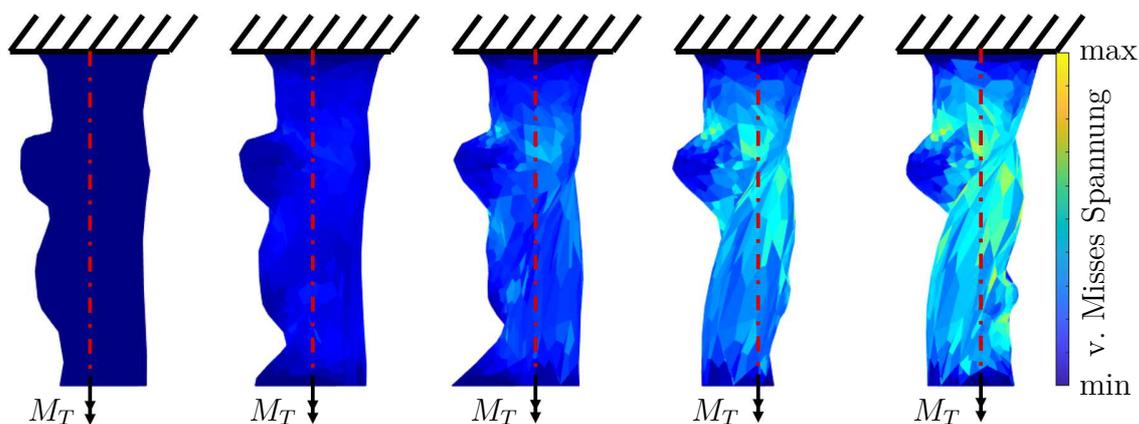


Abbildung 5.7: Virtuelle Torsionsversuche mit der Spannungsverteilung im Steg normiert auf Minimal- und Maximalwert im letzten Belastungsschritt

5.2.2 Biegung

Wie bei der Torsion wird bei der Biegung eine Seite des Stegs fixiert. Die zweite Seite des Stegs wird entlang einer Bahn gebogen, sodass die Normale der Stirnfläche immer senkrecht zu dieser Bahn steht. Jeder Steg wird in drei einzelnen Versuchen gebogen,

um die x -Achse (Biegung 1, Abbildung 5.8), entlang der Winkelhalbierenden von x - und z -Achse (Biegung 2, Abbildung 5.8) und um die z -Achse (Biegung 3, Abbildung 5.8).

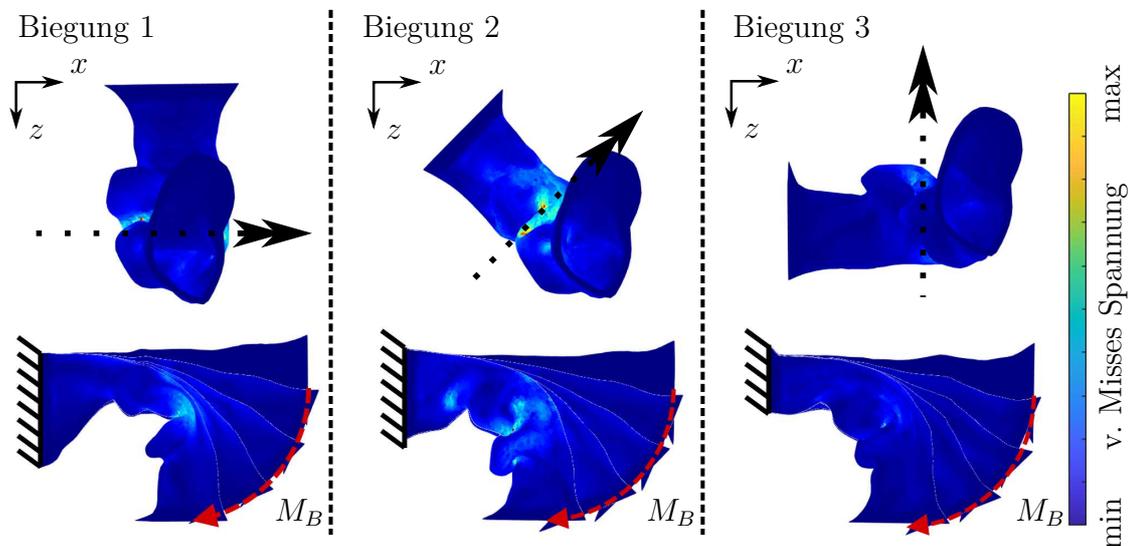


Abbildung 5.8: Virtuelle Biegeversuche mit der Spannungsverteilung im Steg normiert auf Minimal- und Maximalwert im letzten Belastungsschritt

Im dargestellten Beispiel (vgl. Abbildung 5.8) lässt sich eine klare Abhängigkeit von Geometrie und Deformationsverhalten beobachten. Die Geometrie des Stegs führt lokal zu großen Deformationen und zu unterschiedlichem Verhalten des Stegs. Bei der Biegung 1 ist ein Knicken zu erkennen, wohingegen bei Biegung 2 und Biegung 3 eine kontinuierliche Deformation zu beobachten ist (vgl. Abbildung 5.8). Die Biegung wird in 1000 Lastschritten bis zu einem Winkel von 90° simuliert. Für jeden Lastschritt wird die Deformation und Spannung in jedem Element gespeichert.

5.2.3 Ergebnisse der virtuellen Experimente

Der Vergleich von Kraft-Verschiebungs-Diagrammen aus realen Zweipunktbiegeversuchen und virtueller Biegung ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Dabei zeigt die virtuelle Biegung eine Aufspreizung der Kräfte am Ende des linearen Bereichs von 0,2 N bis 3 N, diese liegen somit im gleichen Bereich wie die gemessenen Kräfte in den realen Experimenten. Durch die fehlende Schädigung in den Simulationen zeigen die Kraftverläufe einen Anstieg bei großer Verschiebung ($\geq 0,50$ mm) der in Realität nicht zu sehen ist. Im Experiment zeigen die Stege in diesem Verschiebungsbereich schon deutliche Risse, wodurch kein weiteres Ansteigen der gemessenen Kraft zu Stande kommt. Weiter ist bei den virtuellen Versuchen zu sehen, dass einzelne Stege einknicken (z.B. Abbildung 5.8, Biegung 1). In Realität tritt dieses Einfallen der Ni-Schicht nach Innen nicht auf. Gründe für dieses Verhalten in der Simulation können zum einen die fehlende

Schädigung im Materialmodell oder das Fehlen des PU-Kerns in der Simulation sein. Im Kraftverlauf entsteht dadurch zunächst ein degressiver Verlauf mit anschließendem Anstieg der Kraft. Trotz all der genannten Abweichungen stimmen die Anfangsbereiche der gezeigten Diagramme sehr gut überein. Wodurch die Ergebnisse der virtuellen Biegung ohne Zweifel für die weiteren Schritte genutzt werden können.

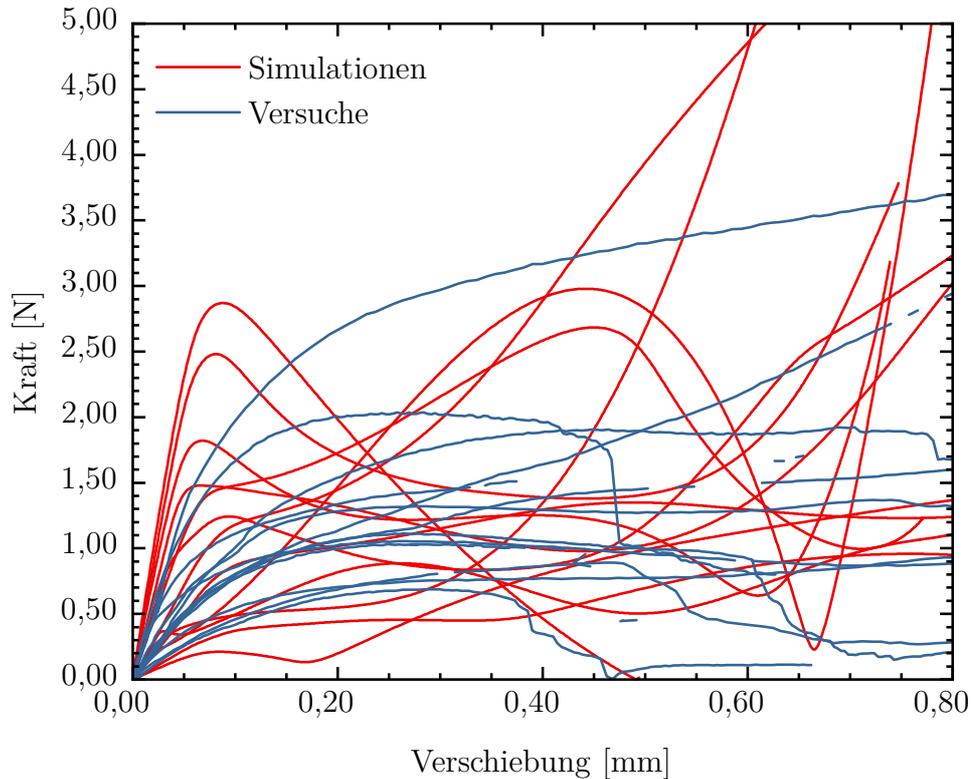


Abbildung 5.9: Vergleich zwischen Kraft-Verschiebungs-Diagramme aus virtueller Biegung und 2PB-Versuchen

Durch die virtuellen Experimente kann die Datenbasis um eine Vielzahl von Versuchen erweitert werden. Im konkreten Fall können mit den Materialparametern aus neun realen Experimenten vier weitere Belastungsarten simuliert werden. Dadurch werden aus neun realen Experimenten Daten von 45 virtuellen Experimenten gewonnen. Darüber hinaus liefern die virtuellen Experimente mit der Auflösung von lokalen Dehnungen und Spannungen zusätzlich Informationen, wie die Geometrie und das Deformationsverhalten korrelieren. Dieser Zusammenhang wird mit dem vorgehen in Kapitel 5.3 analysiert und anschließend genutzt, um das Verhalten der Stege durch einfache Balkenelemente abzubilden (vgl. Abbildung 5.1 (d)). Die Verwendung von einfachen Balkenelementen ist durch die geringere benötigte Rechenzeit ein erster Schritt zum Virtuellen Labor.

5.3 Stochastische Materialparameterverteilung

Ziel bei der Ermittlung stochastisch korrelierter Materialparameter ist es, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Materialparameter zu identifizieren, die eine Vorhersage neuer Parameter ermöglicht. Das in den virtuellen Experimenten identifizierte Verhalten der einzelnen Stege (vgl. Abbildung 5.10 (a)) wird dabei durch einfache Balkenelemente abgebildet, ohne die reale Geometrie der Stege zu verwenden. Hier besteht jeder Steg aus mehreren Balkenelementen, um das durch die Steggeometrie beeinflusste Verhalten zu repräsentieren. Hierzu müssen in einem mehrstufigen Prozess die korrelierten Parameter der Balkenelemente identifiziert werden (vgl. Abbildung 5.10 (d)). Zunächst wird eine Linie durch den jeweiligen Steg ermittelt. Dazu wird jeder Steg in eine bestimmte Anzahl von Segmenten, entsprechend der geplanten Anzahl von Balkenelementen unterteilt (vgl. Abbildung 5.10 (b)). Anschließend wird die Geometrie des Stegs an den Verbindungsstellen der einzelnen Segmente als Fläche betrachtet und für diese Flächen wird jeweils der Flächenschwerpunkt ermittelt. Als Verbindung der Punkte jedes Segments resultiert die Schwerpunktsachse die zur weiteren Identifikation der Balkenelementparameter verwendet wird.

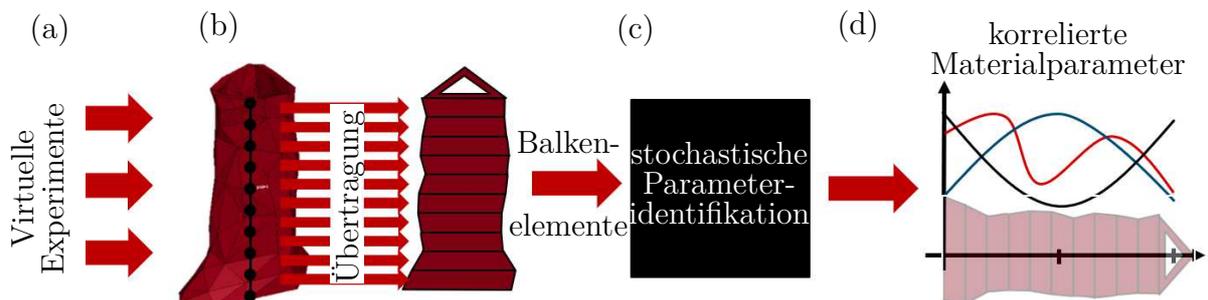


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung der Ermittlung korrelierter Materialparameter mit (a) Daten aus den virtuellen Experimenten; (b) der Übertragung von FE-Elementen auf Balkenelemente; (c) der stochastischen Parameteridentifikation und den (d) korrelierten Materialparametern

Durch die Steggeometrie ist die Verschiebung und die Kraft je nach Belastungsart und -richtung unterschiedlich (vgl. Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8). Es entsteht für die virtuelle Biegung keine ideale Biegelinie wie bei der Theorie der Balkenbiegung, sondern ein stark von der Geometrie der Stege beeinflusstes Verhalten. Deshalb wird für alle ermittelten Flächenschwerpunkte in jedem Schritt der Simulationen die Verschiebung und die Kraft für den Flächenschwerpunkt als Summe der Elementverschiebungen und -kräfte berechnet. Als Resultat entsteht eine Kraft-Verschiebungskurve für jeden der Flächenschwerpunkte. Da die Abstände der Flächenschwerpunkte der Länge der Balkenelemente entsprechen, werden die Kraft-Verschiebungs-Daten direkt zur inversen Materialparameteridentifikation genutzt. Abbildung 5.11 beinhaltet die Verschiebungs-

Balkenelement-Diagramme. Die homogene Lösung beschreibt das Verhalten für einen Steg aus 10 identischen Balkenelementen, der Verlauf für die FE-Simulation ist das Ziel der Optimierung. In diesem Beispiel wird eine Verbesserung des initialen Verhaltens durch den Optimierungsprozess dargestellt, wie er vom Projektpartner gewünscht ist.

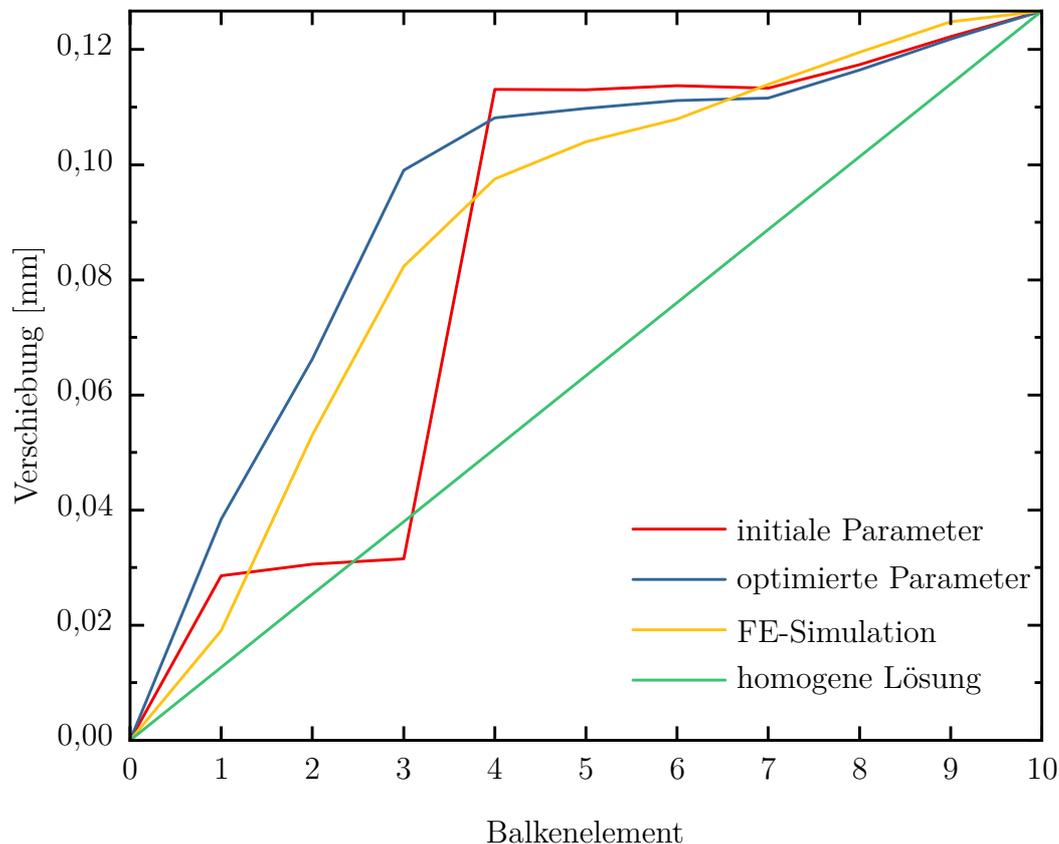


Abbildung 5.11: Schematische Verschiebung-Balkenelement-Diagramme für Abschnitte aus FE-Simulation, homogene, initiale und optimierte Balkenelement

Wie in Kapitel 5.1 werden die Simulationen mit dem Balkenmodell immer wieder mit einem neuen Satz Materialparameter gestartet, um die Abweichung in den Kraft-Verschiebungs-Kurven aus der FE-Simulation und der Simulation mit Balkenelementen zu minimieren (vgl. Abbildung 5.10 (c)). Im Gegensatz zur Parameteridentifikation in Kapitel 5.1, bei der für jeden Steg nur ein Satz an Materialparametern mit drei Parametern bestimmt wurde, muss hier für jedes Balkenelement des Stegs ein Satz an Materialparametern gefunden werden. Wie auch die FE-Simulation verwendet das Balkenmodell ein Materialmodell mit linearer Elastizität und linearer Verfestigung, wodurch drei Materialparameter (Elastizitätsmodul, Streckgrenze und Verfestigungsparameter) benötigt werden. Somit ergeben sich für beispielsweise 20 Balkenelementen und die drei Materialparameter des Balkenmodells eine Gesamtsumme von 60 Materialparametern die pro Steg identifiziert werden müssen. Die deutlich höhere Anzahl an Materialparametern erschwert dabei die Identifikation.

Die so erzeugten Parameter übertragen das Verhalten eines einzelnen Stegs auf einen Balken (vgl. Abbildung 5.10 (d)). Eine stochastische Identifikation von Materialparametern ist bis zu diesem Abschnitt noch nicht erfolgt. Die Identifikation der stochastischen Parameter wurde von H. Rappel (Projektpartner, Universität Luxemburg) durchgeführt und wird hier nur zur Vollständigkeit grob skizziert. Nähere Details zur Vorgehensweise können in Rappel et al. [117, 118] nachgelesen werden. Da hierfür verschiedene stochastische Verfahren und Begrifflichkeiten verwendet werden, werden diese an dieser Stelle kurz definiert. Für die stochastische Materialparameteridentifikation werden die Materialparameter als Zufallszahlen angesehen, die während eines Events (Versuch) auftreten. Die a-priori Verteilung ist dabei das Vorwissen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Parameters [43], die a-posteriori Verteilung beschreibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Parameters nach der Durchführung des Verfahrens [43]. Um aus dieser a-posteriori Verteilung den Parameter zu schätzen, wird in diesem Fall die Maximum-a-posteriori-Methode verwendet. Bei dieser Methode handelt es sich um einen speziellen Bayes-Schätzer, der den Parameter anhand des Modalwerts der a-posteriori-Verteilung ermittelt [43]. Zwei weitere wichtige Begriffe sind hier die Markov-Kette und Markov-Ketten Monte Carlo (*MCMC, Markov-Chain Monte Carlo*). Eine Markov-Kette ist ein stochastisches Modell zur Beschreibung einer Serie von Events, bei der die Wahrscheinlichkeiten von jedem Event rein von dem vorherigen Event abhängen [43]. MCMC ist ein Sammelbegriff für eine Reihe von Algorithmen, um Proben aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung zu ziehen unter Ausnutzung von Markov-Ketten [43]. Die Anwendung von MCMC ist ein häufig verwendetes Werkzeug, um Materialparameter aus a-posteriori Verteilungen zu identifizieren [9, 82, 97]. Damit das Verfahren angewendet werden kann, muss zuerst eine a-posteriori Verteilung entsprechend dem verwendeten Materialmodell formuliert werden. Für lineare Elastizität und lineare Verfestigung lautet diese Verteilung nach Rappel et al. [117]

$$\pi(\mathbf{x}|\mathbf{y}) \propto \exp\left(-\left[\frac{(x - \bar{x})^T \Gamma_x^{-1} (x - \bar{x})}{2} + \frac{(\sum_{i=1}^{n_m} (y_i - E\varepsilon_i(1 - h(\varepsilon_i - \frac{\sigma_{y0}}{E}))) - (\sigma_{y0} + \frac{HE}{H+E}(\varepsilon_i - \frac{\sigma_{y0}}{E})) h(\varepsilon_i - \frac{\sigma_{y0}}{E}))^2}{2s_{noise}^2}\right]\right) \quad (5.1)$$

Dabei ist $\mathbf{x} = [E \sigma_{y0} H]^T$ der neue Parametersatz, bestehend aus dem Elastizitätsmodul E , der Streckgrenze σ_{y0} und dem Verfestigungsparameter H . $\pi(\mathbf{x}|\mathbf{y})$ beschreibt die

bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Parametersatz \mathbf{x} mit dem Vorwissen der Parametersätze aus den Vorversuchen \mathbf{y} . Die Variable s_{noise} ist eine Größe zur Beschreibung des Rauschens Ω_σ und Ω_ϵ der in den Versuchen gemessenen Spannung σ^* und Dehnung ϵ^*

$$\sigma^* = \sigma + \Omega_\sigma \quad \text{und} \quad \epsilon^* = \epsilon + \Omega_\epsilon \quad . \quad (5.2)$$

Hier stehen die Variablen σ und ϵ für die realen Größen ohne jegliches Rauschen. Die a-posteriori Verteilung in Gleichung 5.1 entspricht einer Markov-Kette auf die MCMC angewendet wird, um die aggregierten Parameter zu ermitteln [117]. Die so ermittelten Maßzahlen werden genutzt, um mittels posteriori predictive distribution [97] neue Parametersätze zu schätzen, die ein Materialverhalten entsprechend der stochastischen Parameter erzeugen.

Das hier verwendete Verfahren ist stark von der Qualität der Messwerte abhängig. Haben diese ein hohes Rauschniveau, führt dies zu einer deutlich höheren Unsicherheit bei der Vorhersage neuer Parameter [117]. Durch die Anstrengung im Kapitel 3.1.2, die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen sowie durch die sorgsame Auswertung der Zugversuche in Kapitel 4.2.3, wurden bestmögliche Bedingungen geschaffen, eine passgenaue Vorhersage der Messergebnisse zu erreichen. Des Weiteren minimiert eine hohe Anzahl an Messungen einen möglichen negativen Einfluss einer nicht ideal zu treffenden a-priori Verteilung [117], welche durch die virtuellen Experimente in Kapitel 5.2 realisiert wurden. Alles in allem ermöglicht die stochastische Analyse die breite Streuung der Versuchsdaten einzuschränken und somit die Materialparameter mit einer kleineren Unsicherheit abzubilden [117, 118].

6

Virtuelles Labor

Die komplexe und stochastische Struktur von offenporigen Hybridschäumen erschwert die virtuelle Auslegung. Zur genauen Abbildung der Geometrie der Schäume, werden Netze mit einer Vielzahl von Elementen benötigt. Um eine FE-Simulation an einer solchen realen Geometrie durchzuführen, müssen zum einen sehr hohe Rechenkapazitäten vorhanden sein und zum anderen wird viel Zeit benötigt. Eine virtuelle Auslegung, bei der die Porengröße und Beschichtungsdicke virtuell variiert werden, um die für den Bauraum bestmögliche Energieabsorption zu erreichen, ist somit unvorstellbar. Der in diesem Kapitel erarbeitete Ansatz bietet eine Alternative. Durch die im vorangegangenen Kapitel ermittelten Materialparameter (vgl. Abbildung 6.1 (a)) ist eine Abstraktion von der realen Geometrie und der Weg hin zu einfachen Balkenelementen umsetzbar.

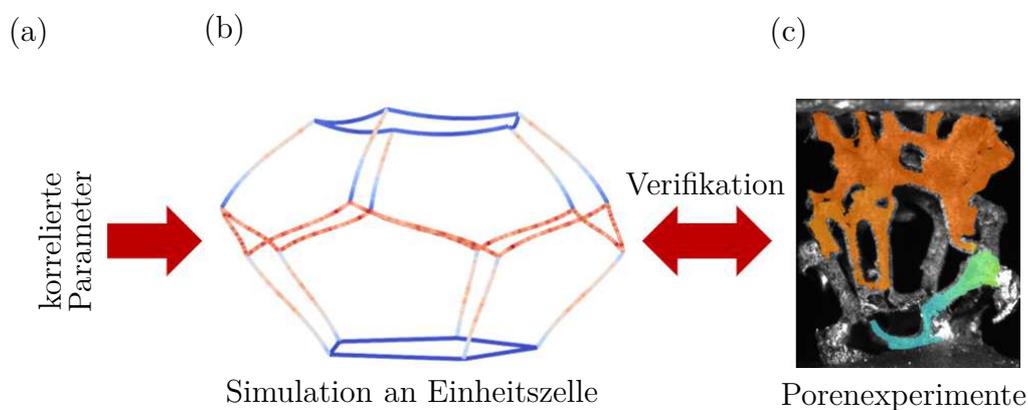


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Virtuellen Labors in dem anhand von (a) korrelierten Materialparametern aus Kapitel 5.3 und (b) Simulationen an einfachen Einheitszellen (c) das Verhalten realer Porenexperimente abgebildet wird

Aus diesem Grund legt dieses Kapitel das Grundverständnis für das Einheitszellenmodell (vgl. Abbildung 6.1 (b)). Dadurch wird die Vereinfachung der realen Geometrie ermöglicht. Dabei kann die reale Geometrie durch die Verwendung einer einfachen Einheitszelle, dem Pentagondodekaeder, dargestellt werden. Weiter verifiziert das Kapitel den Modellierungsansatz, indem Zug- und Druckversuch an Einzelporen präsentiert (vgl. Abbildung 6.1 (c)) und diese mit dem Verhalten von Druckversuchen an Pentagondodekaedern verglichen werden. Die Verifikation zeigt, dass das Verhalten der Mesoebene durch die Verwendung dieser Einheitszelle unter Berücksichtigung der Streuung der mikromechanischen Materialparameter abgebildet wird.

6.1 Pentagondodekaeder als Einheitszelle

Die Idee, Schäume vereinfacht als eine Kombination von Einheitszellen darzustellen, ist nicht neu. Schon 1873 charakterisierte Plateau [114] die Geometrie von Schäumen als rhombische Dodekaeder [50]. Auf der Suche nach einer Struktur, die ein Volumen effektiver füllt, fand Lord Kelvin [77] 1887 eine aus sechs quadratischen und acht hexagonalen Flächen bestehende Struktur (vgl. Abbildung 6.2 (a)) [50]. Heute wird diese Struktur im Allgemeinen als Kelvin-Zelle bezeichnet und ist wegen ihres simplen Aufbaus als Einheitszelle für Schäume weit verbreitet [17]. So zeigen Hedayati et al. [56] beispielsweise eine gute Übereinstimmung bei der Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von Knochenstrukturen unter Verwendung der Kelvin-Zelle. Ein Nachteil der Kelvin-Zelle ist, dass sie im Gegensatz zu realen Schäumen, keine fünfeckigen Flächen beinhaltet und somit die reale Struktur nicht exakt nachbildet [24, 98]. Die Weaire-Phelan-Struktur [142] beinhaltet zum einen fünfeckige Flächen, zum anderen weist sie ein noch besseres Oberfläche-Volumen-Verhältnis auf. Die Struktur besteht aus zwei unterschiedlichen Zelltypen. Aus Zellen mit 12 Fünfecken und zwei 6-seitigen Polygonen und aus unregelmäßigen Pentagondodekaedern (vgl. Abbildung 6.2 (b)). Die kleinste stapelbare Zusammenschluss an Zellen, die dadurch repräsentiert werden kann besteht aus acht Zellen [83], wodurch die Verwendung dieser Struktur hier nicht möglich ist. Die genauere Abbildung der realen Struktur erzielt für die mechanische Modellierung von Al-Schäumen bessere Ergebnisse [17]. Außerdem zeigen Huu et al. [61] in ihrer Arbeit, dass die Poren in einem PU-Schaum größtenteils aus 12 pentagonalen Flächen, also Pentagondodekaedern, bestehen (vgl. Abbildung 6.2 (b)).

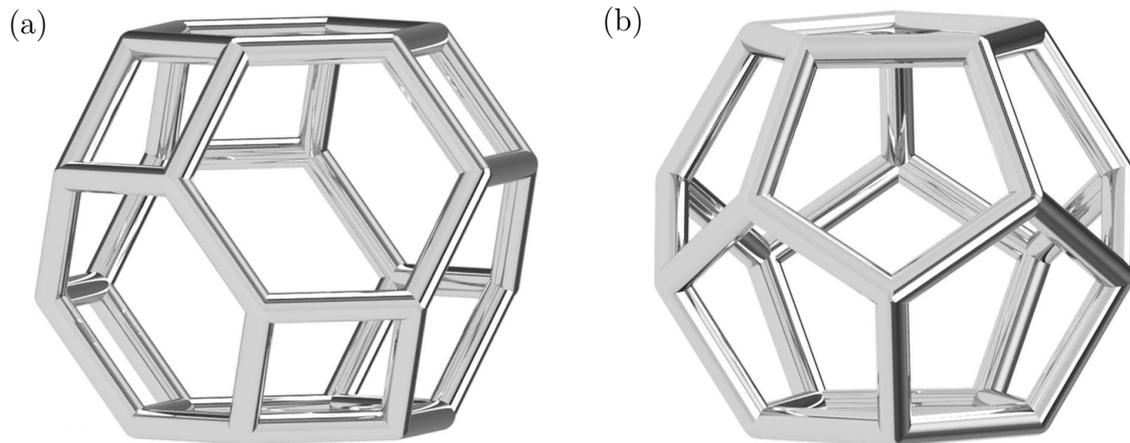


Abbildung 6.2: Darstellung von (a) Kelvin-Zelle und (b) Pentagondodekaeder

Die Umsetzung dieser Pentagondodekaeder genannten Struktur ist somit sinnvoll für die Modellierung eines Ni/PU-Hybridschaums. Darüber hinaus ist es möglich, neben den sonst zylindrischen Stegen hier prismatische Stege mit dreieckiger Grundfläche zu verwenden [61], wodurch die reale Geometrie der Stege besser abgebildet wird (vgl. Kapitel 4.1.1). Im Gegensatz zu den anderen beiden Strukturen lässt sich der perfekte Pentagondodekaeder nicht stapeln, ohne dass Hohlräume zwischen den einzelnen Zellen entstehen [50]. Die fehlende Stapelbarkeit lässt sich durch Anpassen der perfekten Struktur zu einem Gerüst aus ungleichmäßigen Pentagondodekaedern teilweise ausgleichen. Der Schritt von der perfekten Geometrie der Einheitszelle zu einem unregelmäßigeren Aufbau entspricht eher dem Aufbau eines realen Schaumes, bei dem die Porengrößen innerhalb eines Schaums auch leicht schwanken. Die Auswahl fällt deshalb auf den Pentagondodekaeder als Einheitszelle, welcher in das Balkenmodell des Projektpartners integriert werden muss.

6.2 Integration des Pentagondodekaeders ins Balkenmodell nach Li et al.

Das in diesem Abschnitt verwendete Simulationsprogramm wurde von C. Li während seiner Promotion 2020 aufbaut [27]. Die Aufgabe in dieser Arbeit war es, eine Eingabedatei zu erstellen, die den Aufbau eines makroskopischen Schaums aus Einheitszellen erlaubt und dabei eine stochastische Materialparameterverteilung für jeden Steg der Einheitszelle ermöglicht. Dazu muss zunächst die Geometrie eines Pentagondodekaeders näher betrachtet werden. Ein einzelner Pentagondodekaeder hat 20 Ecken, die eine fest definierte Position im Raum haben. Die Koordinaten der Eckpunkte sind dabei

$$\begin{pmatrix} \pm 1 & \pm 1 & \pm 1 \\ 0 & \pm \phi & \pm \frac{1}{\phi} \\ \pm \frac{1}{\phi} & 0 & \pm \phi \\ \pm \phi & \pm \frac{1}{\phi} & 0 \end{pmatrix},$$

mit $\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}$ und einem Abstand zwischen den Eckpunkten von $\frac{\phi}{2}$ [96].

Für die Umsetzung in Matlab® werden die Koordinaten der Eckpunkte zum Aufbauen der Einheitszelle benötigt. Hierzu wird das Pentagondodekaeder als Würfel mit einem Walmdach pro Seite betrachtet (vgl. Abbildung 6.3). Dabei beschreibt l die Abmaße des Würfels und H die Dachhöhe. Die Kantenlänge des Pentagondodekaeders ergibt sich in dem dargestellten Fall als $l - 2a$.

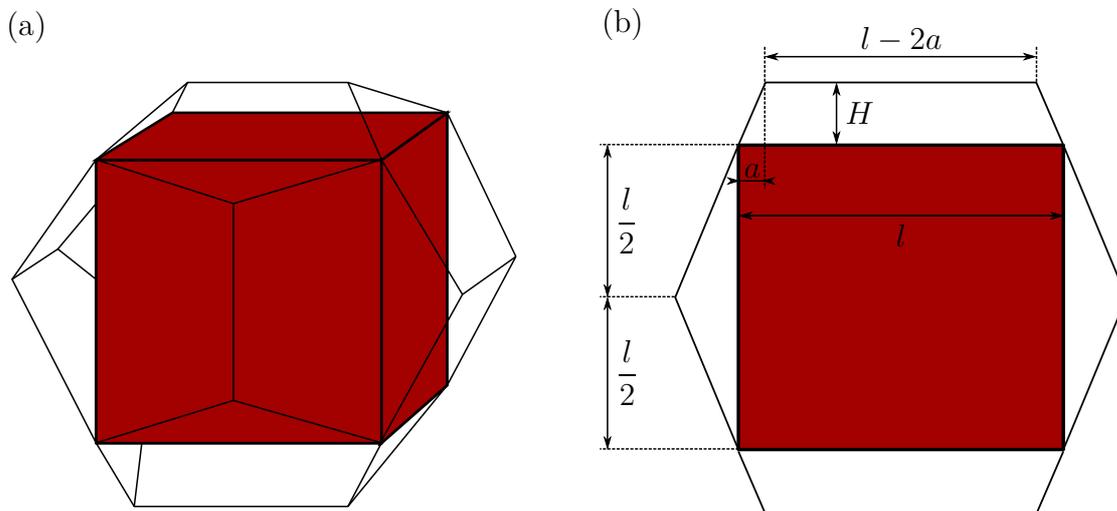


Abbildung 6.3: Darstellung eines Pentagondodekaeders auf Basis eines Würfels mit Walmdächern auf jeder Seite nach Berger [116]: (a) 3D Darstellungen; (b) 2D Schnitt

Das Verhältnis von Höhe und Kantenlänge des Pentagondodekaeders errechnet sich analog zum Durchmesser der Innenkugel als [96]

$$\text{Höhe des Pentagondodekaeders} = \frac{2\sqrt{250 + 110\sqrt{5}}}{20} \times \text{Kantenlänge} \quad . \quad (6.1)$$

Mit einer realen Steglänge von $1,50 \pm 0,31$ mm errechnet sich damit eine mittlere Pentagondodekaeder Höhe von 3,34 mm. Daraus ergibt sich die Knotenliste in Matlab[®] aus den acht Eckpunkten des Würfels und den 12 Knoten oberhalb der Würfelseiten. Durch eine Veränderung der Knotenposition um bis zu 20 % können die idealen Pentagondodekaeder zu zufälligen unregelmäßigen Pentagondodekaedern hin verändert werden. Dabei wird die Variable als Eingabewert in die Matlab[®] Funktion übergeben. Danach wird das Pentagondodekaeder gedreht damit zwei Pentagone parallel zur x - y -Ebene sind und eine Deformation entlang der z -Achse einem Druck- bzw. Zugversuch in Realität entspricht. Im Pentagondodekaeder treffen drei Kanten in jedem der Knotenpunkte aufeinander. Der kürzeste Abstand zwischen den Knotenpunkten entspricht den Kanten. Diese Kanten werden zunächst als ein Balkenelement realisiert und anschließend segmentiert, um eine höhere Ortsauflösung zu erreichen. Dadurch entsteht die Möglichkeit, jedem Balkenelement entlang der Kante eigene Materialparameter zuzuordnen. Beispielsweise können die Elemente nahe der Knoten steifer als die Balkenelemente in der Mitte ausgelegt werden. Somit kann die Stabilität der Knoten im realen Schaum nachgebildet werden. Das Ziel ist es, die in Kapitel 5.3 beschriebene stochastisch korrelierte Verteilung der Materialparameter in der Eingabedatei zu integrieren. Das Ergebnis hier ist ein Pentagondodekaeder, welches die Eigenschaften der Poren eines Ni/PU-Hybridschaumes abbilden kann.

6.3 Verifikation des Modellierungsansatzs

Die Verifikation des Virtuellen Labors wird auf der Mesoebene durchgeführt. Dabei dienen die in den Mikroskalen-Experimenten ermittelten Daten als Eingabeparameter und die Ergebnisse des Virtuellen Labors werden mit der auf der Mesoebene aufgetretenen Streuung verglichen. Dazu werden reale Zug- und Druckversuche an Poren präsentiert, die anschließend mit simulierten Druckversuchen an Pentagondodekaedern verglichen werden.

6.3.1 Experimente an Einzelporen

Neben der mechanischen Charakterisierung auf der Mikroebene müssen mechanische Versuche auch auf der Mesoebene durchgeführt werden, um das Funktionsprinzip des Virtuellen Labors zu validieren. Dieses Kapitel behandelt diese experimentellen Untersuchungen an Poren. Dabei verlangt die komplexe 3D-Geometrie der Poren die Verwendung von 3D DIC zur Verschiebungsmessung. Da die DIC aber rein zur Auswertung einer 1D Verschiebung genutzt wird, muss zunächst die Frage beantwortet werden, wie

sinnvoll die Verwendung von 3D DIC ist. Durch den Versuchsaufbau werden die Poren an den Lagerstellen in zwei Achsen gesperrt und entlang der dritten Achse deformiert. Die Stege nahe der Einspannung bleiben somit parallel zur Kamera und können zur globalen Verschiebungsmessung genutzt werden. Sollen Dehnungen auf den Stegen der gesamten vorderen Ebene der Pore ausgewertet werden, ist eine 3D DIC notwendig, um quantitative Aussagen über die Verformung zu treffen. Um rein qualitative Aussagen über das Deformationsverhalten der Stege treffen zu können, ist die 2D DIC allerdings ausreichend. Der Nachteil der 3D DIC liegt in der notwendigen Kalibrierung von Kamerapositionen und -winkeln, dabei führt eine nachträgliche Bewegung der Kameras zu starkem Rauschen und schlechter Korrelation in der Auswertung. Um einen Vergleich der Messgenauigkeiten von 2D und 3D DIC durchführen zu können, müssen sie möglichst gleichzeitig Bilder von der gleichen Probe aufzeichnen. Da der Bauraum des Versuchsstands die gleichzeitige Aufnahme von Bildern für 2D und 3D DIC nicht erlaubt, kann keine 2D und 3D DIC-Auswertung für die gleiche Pore erfolgen. Um dennoch einen Vergleich anstellen zu können, wird das Rauschniveau als Verschiebung eines Messpunkts auf dem unteren (Punkt 1, Abbildung 6.4) und dem oberen Steg (Punkt 2, Abbildung 6.4) einer Pore in 20 Bildern ermittelt.

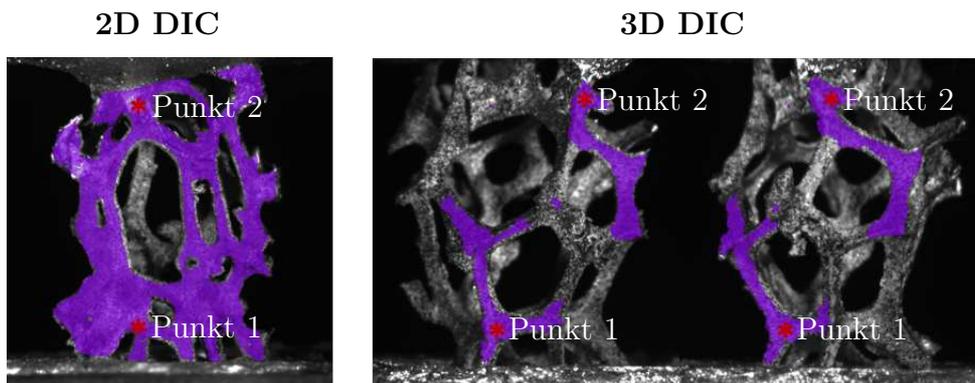


Abbildung 6.4: Messpunkte zur Bestimmung des Rauschniveaus von 2D und 3D DIC

Abbildung 6.5 zeigt die Verschiebungen in den ersten 20 statischen Bildern. Dabei ist das Rauschen für die 3D DIC von $2,5 \mu\text{m}$ bis $-2,0 \mu\text{m}$ zu sehen. Für die 2D DIC liegen die gemessenen Verschiebungen zwischen $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Damit liegt das Rauschen bei der 2D DIC deutlich unterhalb des Niveaus der 3D DIC. Insgesamt scheint es bei Verwendung des hier genutzten Versuchsaufbaus keine klare Entscheidung für eine der beiden DIC-Varianten zu geben. Mit dem Fokus auf die hier durchgeführten Auswertungen der 1D Verschiebungsmessung im Bereich der Klemmung, kann die Entscheidung aber klar für die Aufzeichnung der Versuche mit einer Kamera und die Auswertung mittels 2D DIC getroffen werden. Wie eingangs erwähnt, können dadurch keine quantitativen Aussagen über Dehnungen auf den einzelnen Stegen der Pore getroffen werden. Dies ist hier aber auch nicht notwendig.

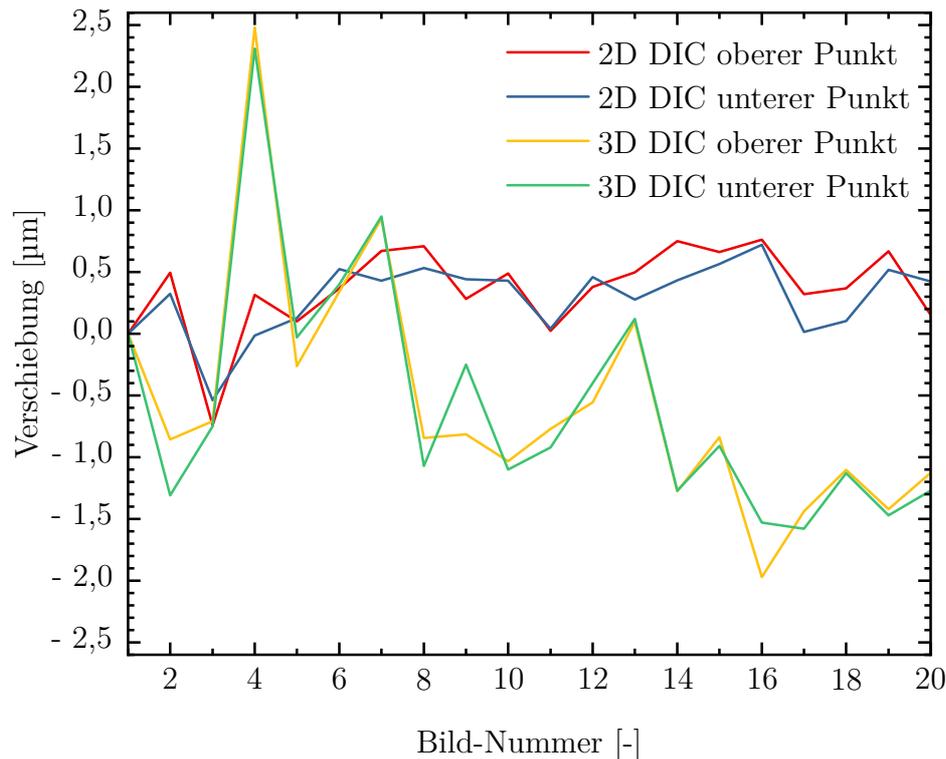


Abbildung 6.5: Rauschniveau von 2D und 3D DIC anhand von Messpunktverschiebung im oberen und unteren Bereich der Pore

Die klar definierten Randbedingungen während der Versuche, werden durch beidseitiges Vergießen der Pore gewährleistet. Dazu werden die Poren einseitig und senkrecht in den Vergusszylinder eingegossen. Dabei ist eine mittige und gerade Ausrichtung der Proben wichtig, um eine uniaxiale Belastung der Poren zu gewährleisten. Die zweite Seite der Poren wird dann im Versuchsstand unter Verwendung eines beheizbaren Vergusszylinders eingebettet. Durch die Einbettung im Versuchsstand wird die perfekte Ausrichtung der Probe garantiert und die Gefahr einer Vorbelastung ausgeschlossen.

Druckversuch

Bei den Druckversuchen werden die Proben mit einer Schritthöhe von $5\ \mu\text{m}$ und einer Verfahrgeschwindigkeit von $2\ \mu\text{m}/\text{s}$ belastet. Die geringe Geschwindigkeit gewährleistet dabei eine Dehnrates unterhalb von $10^{-3}\ \text{s}^{-1}$, die Versuche werden somit quasistatisch durchgeführt. Als Ergebnis werden hier Kraft-Verschiebungs-Diagramme präsentiert. Die Verschiebung wird dabei als die Differenz der Verschiebung nahe der unteren (Punkt 1, Abbildung 6.4) und oberen Klemmung (Punkt 2, Abbildung 6.4) berechnet. Sie entspricht somit der Stauchung der Probe.

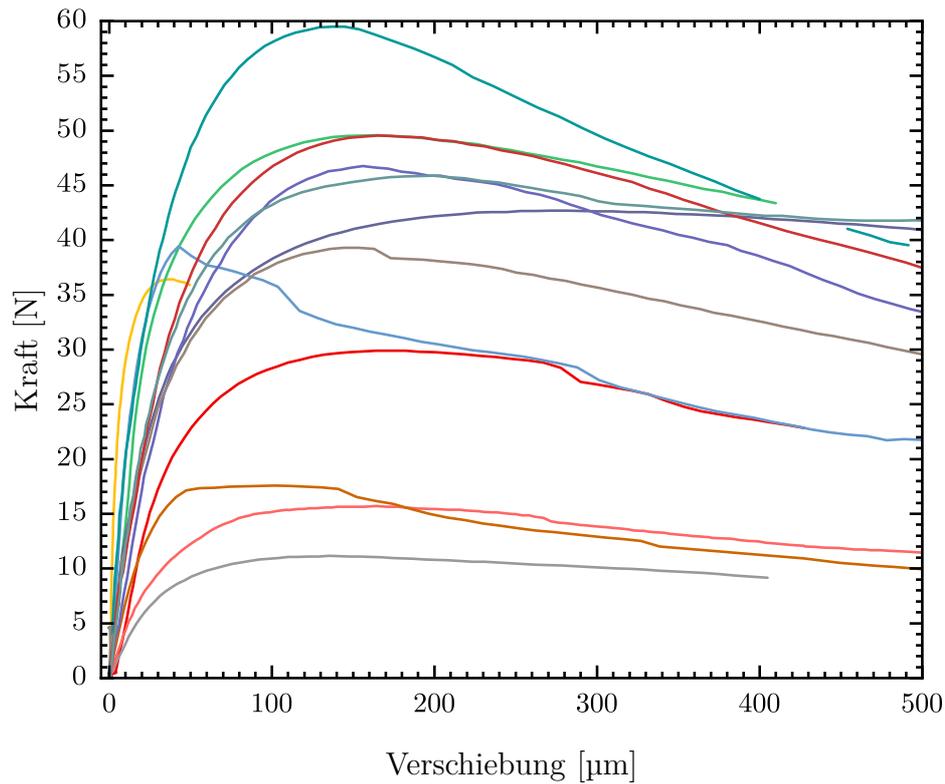


Abbildung 6.6: Kraft-Verschiebungs-Diagramme für Druckversuche an verschiedenen Poren

Die breite Streuung aus der Mikroebene überträgt sich auf die Mesoebene und führt zusammen mit den unterschiedlichen Geometrien der Poren zu einer Streuung der maximalen Kräfte von 10 N bis 60 N. Dabei wird die maximale Kraft für einen Großteil der Poren unterhalb von 100 μm Stauchung erreicht. Nach Überschreiten der maximalen Kraft kommt es zum Knicken und Biegen einzelner Stege. Dadurch steigt die Verformung der Poren unter geringerer beziehungsweise konstanter Krafteinwirkung deutlich an. Es stellt sich für alle Poren unabhängig von der gemessenen Kraft ein ähnlicher Verlauf der Kraft-Verschiebungs-Kurven ein. Hauptziel der späteren Modellierung ist es, sowohl die Streubreite der gemessenen Kräfte als auch den signifikanten Verlauf abzubilden.

Zugversuche

Für die Durchführung der Zugversuche werden die gleichen Randbedingungen wie in den Druckversuchen erzeugt. Die Probe wird beidseitig eingegossen und anschließend unter Zug belastet. Dabei ist die Stufenhöhe 2 μm und die Dehnrates unter 10^{-3} s^{-1} . Da eine Belastung unter Zug in Realität deutlich seltener auftaucht, wurden hier lediglich sechs Versuche durchgeführt. Davon konnten vier ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.7 zu sehen.

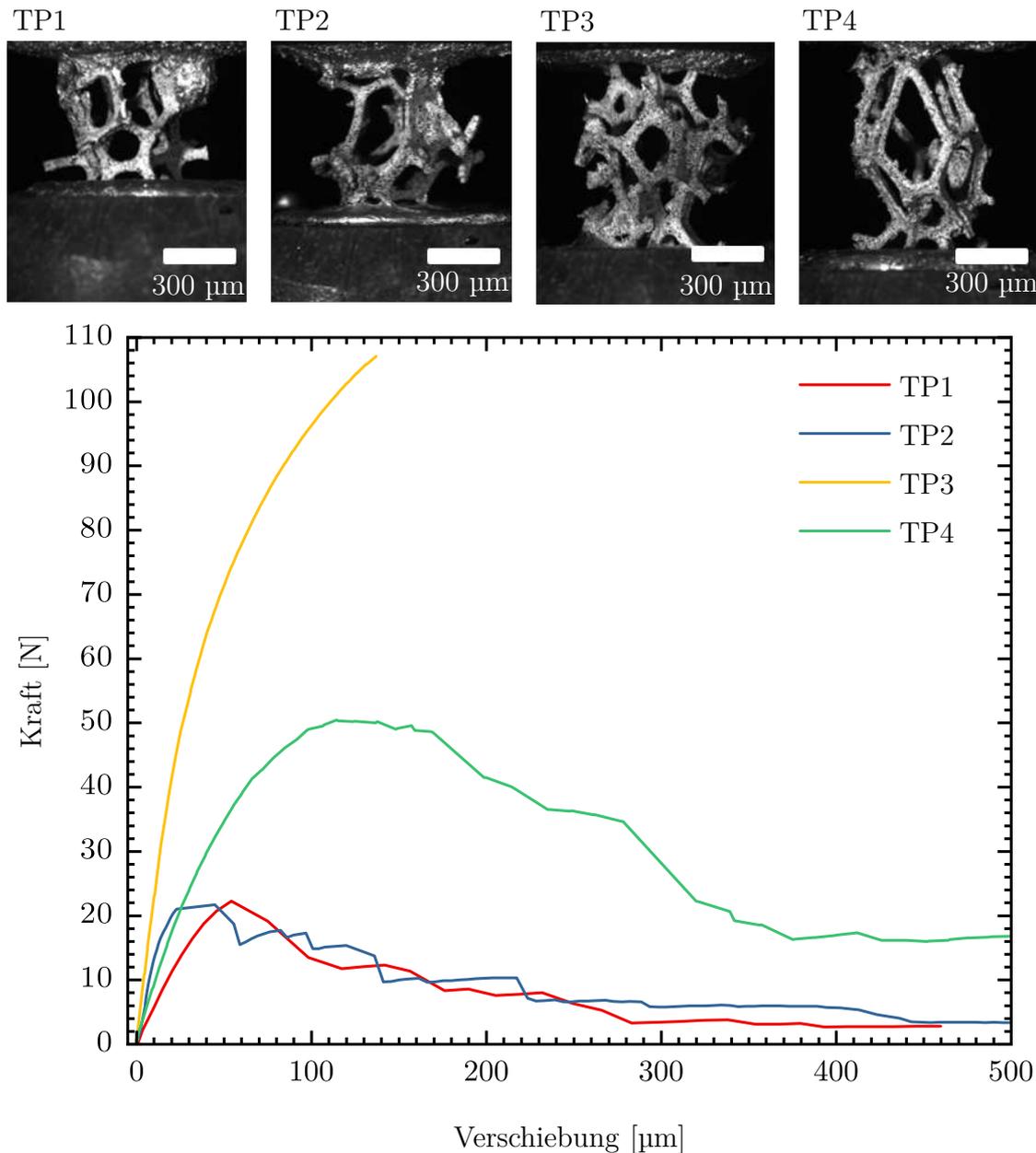


Abbildung 6.7: Poren TP1-TP4 vor der Belastung (oben); Kraft-Verschiebungs-Diagramme für Zugversuche an Poren TP1 - TP4 (unten)

Die maximalen Kräfte je Versuch reichen dabei von 20 N bis 110 N. Die Poren TP1 und TP2 sind sehr kleine Poren mit kurzen Stegen (vgl. Abbildung 6.7). Die Stege zeigen dadurch nahezu keine Rotation bevor sie brechen. TP4 (vgl. Abbildung 6.7) zeigt ein anderes Verhalten, die längeren Stege der Pore werden durch die Belastung zunächst verdreht bevor sie versagen. Pore TP3 hält in den Versuchen eine deutlich höhere Kraft aus als die anderen drei Poren. Die Deformation sieht allerdings vergleichbar mit denen von TP1 und TP2 aus. Allerdings hat die Probe deutlich mehr Stege auf die die Last verteilt wird. Dadurch ist es für die Pore möglich, eine deutlich höhere Belastung zu ertragen.

Fazit Porenexperimente

Die Versuche auf der Mesoebene ermöglichen einen Einblick in das Deformationsverhalten einzelner Poren innerhalb eines Schaumes. Durch den starken Zusammenhang der mechanischen Eigenschaften mit der Geometrie der Poren zeigt sich eine breite Aufspreizung der maximalen Kräfte. Der Verlauf der Kurven ist allerdings immer ähnlich. Es kommt zu einem steilen Anstieg der gemessenen Kraft, nach dem Ausknicken erster Stege sinkt die Kraft ab und die Probe wird vollständig zerstört. Für die Zugversuche folgt auf den steilen Anstieg der Kraft ein Versagen eines einzelnen Stegs, wodurch die Pore soweit geschwächt ist, dass sie vollständig versagt. Der Zusammenhang von Geometrie und Kraft ist dabei noch deutlicher zu erkennen.

6.3.2 Simulationen an Einheitszellen

Zur Identifikation einer ersten Streubreite werden die minimalen Parameter (Simulation 1) und maximalen Parameter (Simulation 2) der Parameteridentifikation aus Kapitel 5.1 als konstante Eingabe für das Balkenmodell verwendet. Die Balken bestehen aus hohlen, dreieckigen Prismen, die Dimensionen wurden dabei als konstante Parameter aus den Mikroskopaufnahmen der Bruchfläche (vgl. Tabelle 4.9) und der mittleren Länge der Stege ermittelt. Daraus ergeben sich eine innere Kantenlänge der Grundfläche von 298,40 μm , die Beschichtungsdicke ist 26,39 μm und die Länge als 1,50 mm. Dadurch kann die maximale Aufspreizung der resultierenden Kraft der Einheitszelle unter Kompression ermittelt werden. Abbildung 6.8 (a) zeigt die Kraft-Verzerrungs-Diagramme aus der Simulation. Der Anfangsbereich der Kraft-Verzerrungs-Diagramme und die breite Streuung der Kraftwerte wird durch den ersten Ansatz allerdings schon sehr gut abgebildet. Bei Simulation 1 (Elastizitätsmodul: 60,46 GPa; Fließspannung: 623,01 MPa; Verfestigungsparameter: 1397,00) tritt der Übergang von elastischem zu plastischem Bereich bei einer Kraft von 19,61 N und einer Verzerrung von 0,03 auf. Für die Simulation 2 (Elastizitätsmodul: 231,59 GPa; Fließspannung: 1199,29 MPa; Verfestigungsparameter: 2547,57) wird der Übergang zum selben Verzerrungszeitpunkt bei einer Kraft von 43,50 N erreicht. Der Vergleich von Experiment und Simulation in Abbildung 6.8 (b) weist neben den leicht unterschiedlichen maximalen Kräften von Simulation und Experiment ein abweichendes Verhalten auf. Durch das Knicken der Stege nach überschreiten der kritischen Kraftwerte tritt bei den Poren im Experiment eine Schädigung auf und die Stege versagen. Dadurch entsteht in Realität ein abfallender Kraftverlauf und ein Versagen der Pore. In der Simulation ist eine solche Schädigung aktuell nicht vorgesehen, wodurch ein leicht ansteigendes Plateau im Kraftverlauf entsteht. Außerdem zeigen Poren in Realität durch ihre individuelle Geo-

metrie unterschiedliche Deformationsmechanismen. Vom idealen Pentagondodekaeder kann ein solcher Unterschied im Deformationsverhalten nicht abgebildet werden.

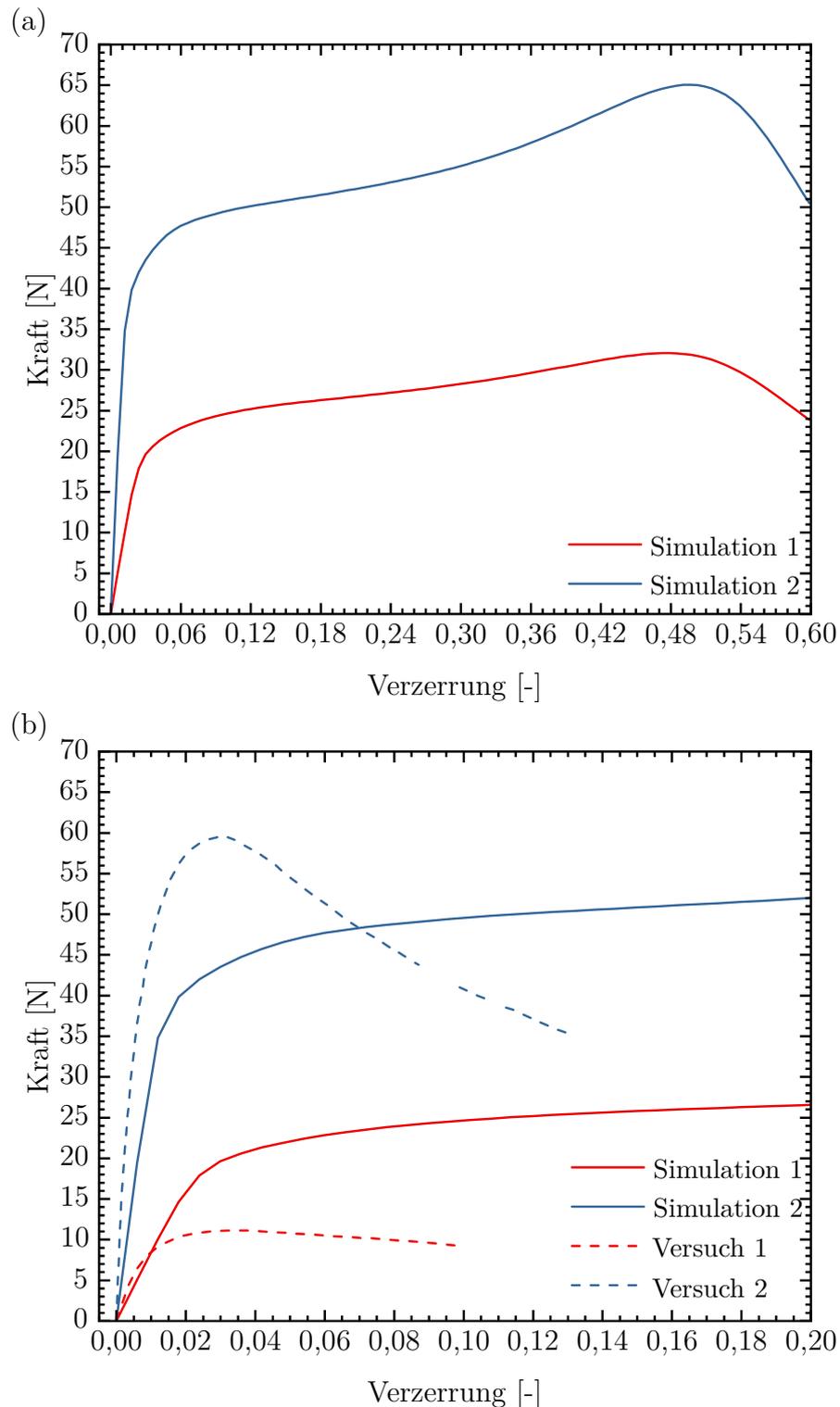


Abbildung 6.8: Vergleich Kraft-Verzerrungs-Diagramme: (a) mit konstanten Materialparametern für Minimal- und Maximalwerte aus Parameteridentifikation; (b) Kraft-Verzerrungs-Kurven aus Porenversuchen und Simulation bis zu einer Dehnung von 0,2

Nichtsdestotrotz zeigt dieser einfache Vergleich bereits das große Potential des Virtuellen Labors, weshalb die im Experiment ermittelte Streuung in vereinfachter Form als Variation der Eingabeparameter und der Steglängen in die Simulation übernommen werden. Dazu erhält jeder der 20 Stege der Einheitszelle eine eigene, zufällige Verteilung der Materialparameter. Ohne die Daten des Projektpartners, geschieht das hier in vereinfachter Form. Zunächst wird für jeden Steg ein Satz von Materialparametern bestimmt, der im Bereich der Normalverteilung vom Mittelwert der Materialparameter liegt. Im nächsten Schritt wird jedem Balkenelement des Stegs ein Materialparametersatz zugeordnet der pro Balkenelement um bis zu 5 % von Materialparametersatz für den Steg abweicht (vgl. Abbildung 6.9).

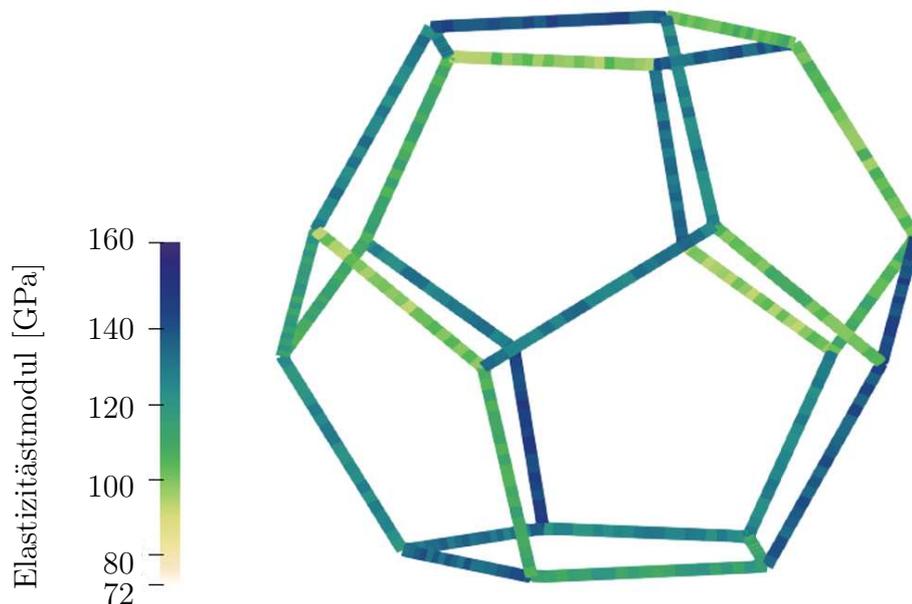


Abbildung 6.9: Zufällige Verteilung des Elastizitätsmoduls auf Stegen als Beispiel für die Materialparameterverteilung innerhalb eines Pentagondodekaeders

Dadurch werden zum einen die große Streubreite unter den Stegen und zum anderen die lokalen Abweichungen innerhalb eines Stegs ideal repräsentiert. Zusätzlich dazu weichen die Pentagondodekaeder durch zufällige Veränderung der Steglängen um bis zu $\pm 5\%$ von der idealen Form ab. Die Ergebnisse für 15 solcher Simulationen sind in Abbildung 6.10 zusehen.

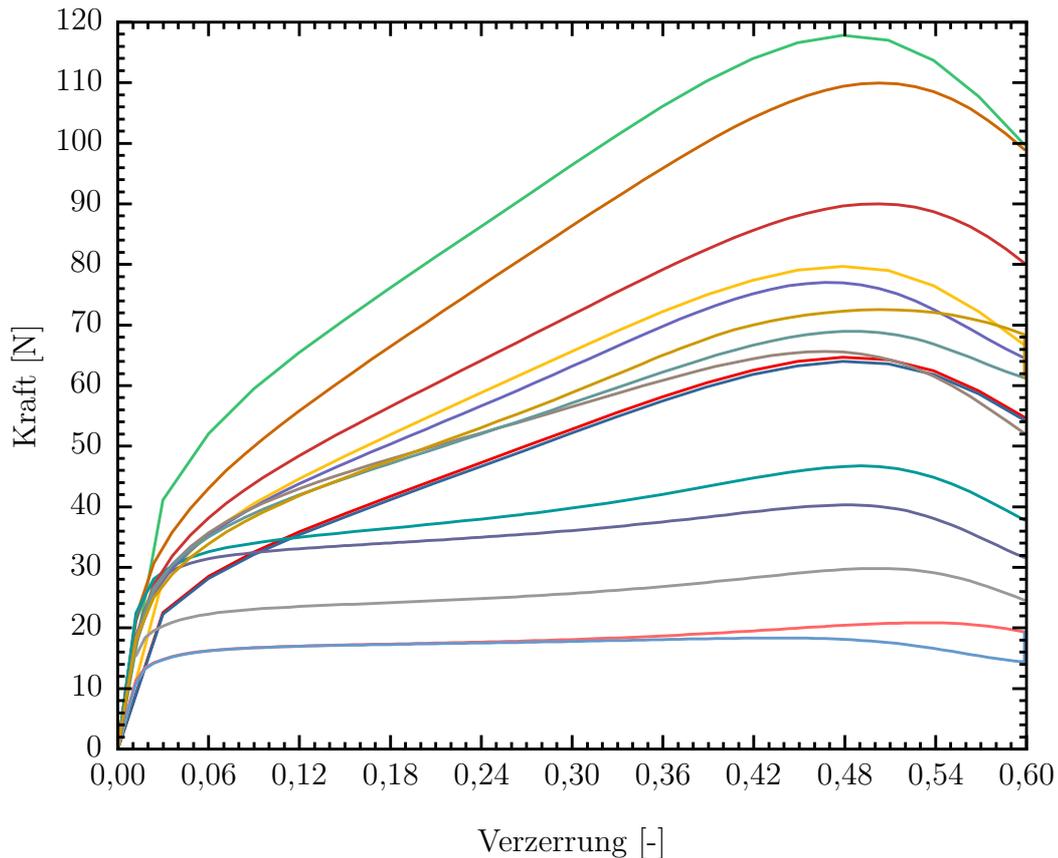


Abbildung 6.10: Streubreite der Kraft-Verzerrungs-Kurve bei der Verwendung von zufälligen Materialparametersätzen aus dem experimentell ermittelten Streubereich

Die Ergebnisse in Abbildung 6.10 zeigen eine breite Streuung der maximalen Kräfte und unterschiedliche strukturelle Steifigkeiten im Anfangsbereich der Kurven. Insgesamt bilden die Simulationen trotz der zufälligen und damit nicht realistischen Materialparameterverteilung entlang der einzelnen Stege die Streubreite aus den Experimenten gut ab. Mit einer korrelierten Verteilung und stochastisch ermittelten Materialparametern kann in Zukunft sowohl das elastische als auch das plastische Verhalten der Poren noch besser abgebildet werden. Dabei ist die Simulationszeit für eine solche Einheitszelle aus Balkenelementen mit rund 90 Minuten sehr gering im Vergleich zu einem vollvernetzten einzelnen Steg mit einer Simulationszeit von bis zu 16 Stunden unter Biegung und der damit zu erwartenden Zeit für eine vollvernetzte Pore. Die Funktionalität des Virtuellen Labors ist somit bestätigt und die Erweiterung auf Untersuchung mit mehreren Poren pro Probe möglich.

7

Validierung

Nachdem die Materialparameter mit den Daten in der Mikroebene identifiziert und das Prinzip des Virtuellen Labors in der Mesoebene verifiziert wurde, beschäftigt sich dieses Kapitel mit der makroskopischen Validierung. Zunächst wird die Beschichtungsdicke bestimmt und deren Inhomogenität in der Probe analysiert. Danach präsentiert der zweite Teil des Kapitels makroskopische Druckversuche an Schaumwürfeln mit Kantenlängen von 10 mm und 20 mm. Im dritten Teil werden die Simulationen aus dem virtuellen Labor an gestapelten Einheitszellen in der Größe der realen Proben präsentiert und die Ergebnisse mit den Ergebnissen aus den realen Experimenten zu vergleichen. Die Simulationen im Virtuellen Labor zeigen dabei eine gute Übereinstimmung in den Spannungs-Verzerrungs-Kurven. Durch die Verwendung der einfachen Struktur mit einer verhältnismäßig geringen Elementanzahl wird dabei die Simulation auf einem Desktop-PC ermöglicht, was für die Simulation an der realen Struktur nicht möglich ist.

7.1 Optische Charakterisierung

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Kapitel 4.1.1 werden hier keine Schliffbilder angefertigt, sondern die Beschichtungsdicke wird mittels Schnittbildern aus CT-Aufnahmen bestimmt. Das Ergebnis des CTs ist ein Bilderstapel, in dem ein einzelnes Bild den x-y-Koordinaten des Schaums und die Höhe im Bilderstapel der z-Koordinate im 3D Schaum entspricht. Ein 3D Bildpunkt wird als Voxel bezeichnet. Die untersuchte, würfelförmige Probe hat eine Kantenlänge von 20 mm, wodurch die CT-Aufnahmen lediglich mit einer Voxelgröße von 15,01 μm realisiert werden konnten. Durch Grauwertinterpolation zwischen schwarzem Hintergrund und grauer Ni-Schicht, ist eine Messung in einer feineren Abstufung als die Voxelgröße möglich. Nichtsdestotrotz dient die Messung der Schichtdicke aufgrund der geringen Genauigkeit hier nur zur Einschätzung der Homogenität und Größenordnung der Beschichtungsdicke. Sie können nicht zur exakten Bestimmung der Schichtdicke verwendet werden. Die zur Beschichtung notwendigen Litzen (vgl. markierter Bereich Abbildung 7.1) und die komplexe Geometrie der Schäume verhindern außerdem ein automatisches Vermessen der Schichtdicke. Aus diesem Grund wird die Schichtdicke stichprobenartig an verschiedenen Stellen des Bildes und in verschiedenen Höhen innerhalb des Bilderstapels händisch gemessen. Dabei wird, wie in Kapitel 4.1.1, mit dem Lineal-Werkzeug in ImageJ die Dicke der Ni-Schicht bestimmt. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden Messungen in 10 gleichmäßig verteilten Bildern des Bilderstapels an sechs Stellen pro Bild durchgeführt (vgl. Abbildung 7.1).

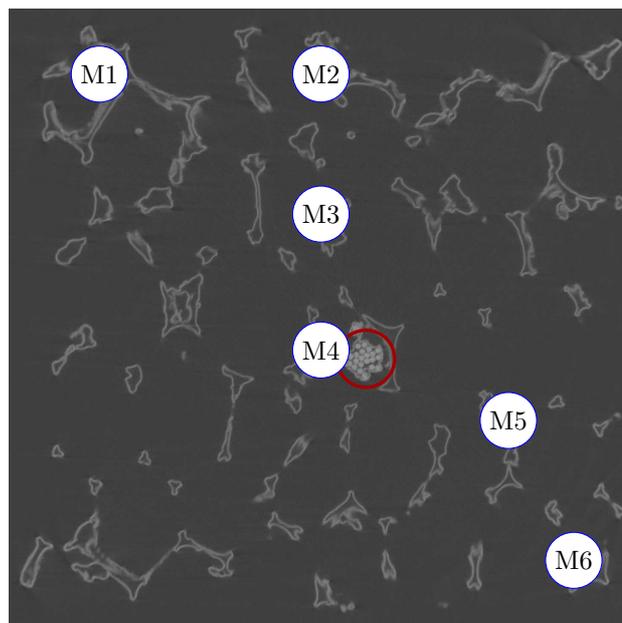


Abbildung 7.1: Einzelbild aus CT von makroskopischem Schaumwürfel mit zur Beschichtung notwendigen Litzen (rote Kreis) und Messpositionen (M1) - (M6) zur stichprobenartigen Schichtdickenmessung

Dabei befinden sich die Messpositionen sowohl im äußeren wie auch im inneren Bereich der Probe, da nur so eventuelle Inhomogenitäten der Schichtdicke in Abhängigkeit der Position im Schaum detektiert werden können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Sie zeigen eine mittlere Schichtdicke über alle Werte von $68,58 \mu\text{m}$. Bei einer Zielschichtdicke von $80 \mu\text{m}$ entspricht das einer verhältnismäßig kleinen Abweichung im Gegensatz zu der Abweichung bei den Einzelstegen (vgl. Kapitel 4.1.1). Diese Annäherung kann auf eine Verbesserung des Beschichtungsprozesses und die kleinere Probengröße zurück geführt werden. Nichtsdestotrotz weisen die Messwerte auf eine dickere Beschichtung im äußeren Bereich des Schaumes (M1, M2, M6) und eine dünnere Beschichtung für die Messpunkte M3 und M4 im Inneren hin. Diese Erkenntnis wird durch die Schichtdickenverteilung im Bilderstapel bestätigt, die mittlere Schichtdicke für Bilder in der Mitte des Bilderstapels liegt leicht unterhalb der Schichtdicke der äußeren Bilder. Die maximale Abweichung zwischen Mittelwerten der einzelnen Messpunkte liegt bei $16,17 \mu\text{m}$ (\varnothing M1: $75,01 \pm 6,17 \mu\text{m}$; \varnothing M4: $58,84 \pm 10,07 \mu\text{m}$). Die Abweichung zwischen den Mittelwerten einzelner Bilder liegt mit einem Wert von $11,87 \mu\text{m}$ (\varnothing Bild 1080: $75,39 \pm 11,85 \mu\text{m}$; \varnothing Bild 840: $63,52 \pm 10,71 \mu\text{m}$) leicht unterhalb der Abweichung zwischen den Messpunkten.

Tabelle 7.1: Schichtdickenmessung an sechs Messpositionen M1 - M6 an 10 gleichmäßig verteilten Stellen im Bilderstapel

Bildnummer	Schichtdicke [μm]						\varnothing Bild [μm]
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	
0001/1190	77,28	76,21	66,82	58,98	75,06	69,20	$70,59 \pm 7,03$
0120/1190	71,65	87,53	55,95	65,54	71,20	73,74	$70,93 \pm 10,37$
0240/1190	65,90	74,68	58,48	60,15	72,19	67,10	$66,42 \pm 6,40$
0360/1190	69,98	59,59	65,01	58,03	61,01	75,19	$64,80 \pm 6,67$
0480/1190	75,15	56,29	53,11	61,85	71,30	79,64	$66,22 \pm 10,72$
0600/1190	85,40	83,96	62,96	60,26	63,80	74,10	$71,74 \pm 11,08$
0720/1190	77,59	77,37	61,47	57,96	62,22	70,81	$67,90 \pm 8,54$
0840/1190	83,91	63,83	59,43	52,78	58,62	62,55	$63,52 \pm 10,71$
0960/1190	67,79	65,13	61,41	53,80	84,96	76,57	$68,28 \pm 11,08$
1080/1190	75,45	92,57	67,97	59,08	72,94	84,33	$75,39 \pm 11,85$
\varnothing M	$75,01 \pm 6,17$	$73,72 \pm 11,66$	$61,26 \pm 11,16$	$58,84 \pm 10,08$	$69,33 \pm 9,14$	$73,33 \pm 7,83$	$68,58 \pm 4,87$

Die Messwerte zeigen zwar mitunter Abweichungen zwischen einzelnen Messpunkten und Bildern, sie liegen allerdings deutlich unterhalb der Abweichungen auf der Mikroebene. Die Tendenz einer dünneren Beschichtung zur Mitte der Probe hin muss allerdings in der Auswertung der folgenden makroskopischen Druckversuche berücksichtigt werden.

7.2 Makroskopische Druckversuche

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Versuche sind in Versuche an Würfeln der Größe $10 \times 10 \times 10$ mm (KW_x) und Würfeln mit den Abmessungen $20 \times 20 \times 20$ mm (GW_x) unterteilt. Dabei enthalten die KW_x-Proben eine zu geringe Porenanzahl, um für das makroskopische Verhalten repräsentative Ergebnisse zu liefern. Die Versuche an der kleinen Porengröße ist dennoch wichtig, da für diese Probengröße die Simulationen im Virtuellen Labor mit deutlich kürzeren Rechenzeiten Ergebnisse erzielt werden können. Die Verifikation des Virtuellen Labors geschieht deshalb für kleine, makroskopisch nicht repräsentative und große, makroskopisch repräsentative Proben. Abbildung 7.2 zeigt aus welchem Teil der GW-Probe die KW-Proben entnommen wurden.

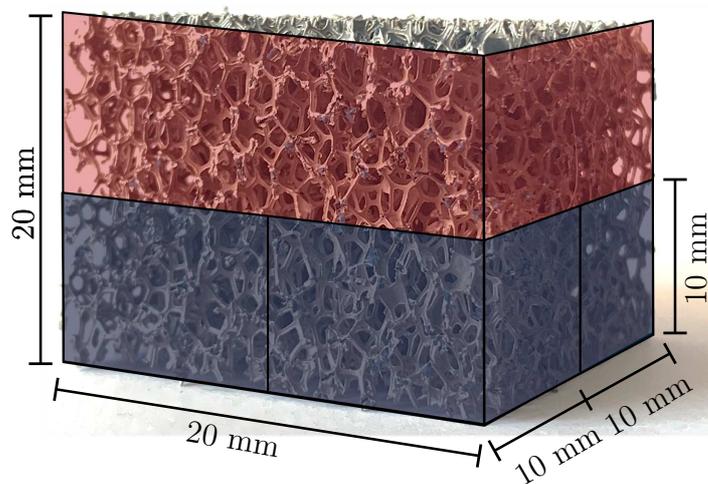


Abbildung 7.2: Großer Würfel (GW, gesamte Probe) und Entnahme der kleinen Würfel (KW, blau) im unteren Teil der GW-Probe

7.2.1 Kleine Würfel

Die zur Beschichtung benötigten Litzen (vgl. Abbildung 7.1, rote Markierung) befinden sich im oberen Teil des großen Würfels. Da sie bei der Erstellung der Geometriemodelle aus den CT-Daten nicht ohne weiteres entfernt werden können und zusätzlich bei der geringeren Probengröße mit einem starken Einfluss auf die Messergebnisse durch den beschichteten Draht zu rechnen ist, wurden lediglich vier Proben (KW1 - KW4) aus dem unteren Teil des großen Würfels zugeschnitten. Die realen Abmessungen und Massen der Proben sind in Tabelle 7.2 aufgeführt.

Tabelle 7.2: Abmessungen an je drei Positionen und Masse der Proben KW1 - KW4

	Höhe [mm]			Breite [mm]			Tiefe [mm]			Masse [mg]
KW1	9,58	9,70	9,75	9,80	10,15	10,01	10,77	10,64	10,34	480
	9,64 ± 0,08			9,99 ± 0,18			10,58 ± 0,22			
KW2	10,02	10,03	9,98	10,31	10,27	9,87	10,06	10,14	10,28	514
	10,01 ± 0,03			10,15 ± 0,24			10,16 ± 0,11			
KW3	10,59	10,44	10,39	10,14	10,20	10,14	9,70	9,54	9,40	499
	10,47 ± 0,10			10,16 ± 0,03			9,55 ± 0,15			
KW4	9,75	9,74	9,70	10,67	10,31	10,28	9,84	9,61	9,64	526
	9,73 ± 0,03			10,42 ± 0,22			9,70 ± 0,13			

Aufgrund der Probenfertigung ist eine absolute Maßtreue nicht gegeben. Die Abweichungen von der gewünschten Größe liegen bei bis zu 10 %. Durch diese großen Abweichungen muss zur Berechnung der homogenisierten Spannung die Grundfläche jeder Probe berücksichtigt werden. Die Betrachtung der scheinbaren Dichte (Masse / Würfelvolumen) zeigen eine gute Übereinstimmung für die Proben KW2 und KW3 ($\rho_{KW2} = 4,98 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$, $\rho_{KW3} = 4,91 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$). Probe KW1 zeigt mit $\rho_{KW1} = 4,70 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$ eine deutliche Abweichung nach unten, hingegen weist KW4 mit $\rho_{KW4} = 5,35 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$ eine deutliche Abweichungen nach oben auf. Dabei kann eine Abweichung der spezifischen Dichte auf eine dünnere beziehungsweise dickere Ni-Schichtdicke hinweisen, was einen deutlichen Einfluss auf die gemessene Kraft und somit auf den Spannungs-Verzerrungs-Verlauf hat.

Die Versuche wurden als quasistatische Druckversuche mit einer Dehnrates von $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ und einem Bildabstand von 0,05 mm am universellen mikromechanischen Prüfstand (vgl. Kapitel 3.3) durchgeführt. Die Auswertung der lokalen und globalen Verzerrungen wird mittels 2D-DIC realisiert. Dabei werden zu Beginn der Versuche 20 Bilder ohne Deformation aufgenommen, um im Postprozessing die Qualität der Auswertung bewerten zu können. Die Messung der Kraft stellt bei den Druckversuchen eine höhere Herausforderung dar. Der PCS der Schäume tritt schon bei relativ geringen Kräften auf, wohingegen die Kräfte in der Kompressionsphase sehr hoch steigen. In der Bachelorarbeit von P. Lorson [92] zeigten die fünf Proben der kleinsten Proben-dimension von 2×2 Poren (circa $6 \times 6 \text{ mm}^2$, 20 ppi, Zielschichtdicke: 80 μm) beim Erreichen des PCS eine Kraft von $121,44 \pm 33,63 \text{ N}$. Die maximal gemessene Kraft bei einer Verzerrung von rund 90 % lag bei Kräften zwischen 894,71 N und 1623,80 N. Aufgrund der größeren Proben-dimensionen der hier untersuchten Proben wird unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von einer dreimal höheren Kraft ausgegangen. Daraus wird der PCS bei einer Kraft von circa 400 N und 90 % Kompression bei einer Kraft zwischen 2700 N und 5000 N erwartet. Diese große Spanne kann von keinem der vorhandenen Sensoren mit einer zufriedenstellenden Messgenauigkeit aufgelöst werden. Da der Fokus der Untersuchungen hier auf dem PCS und dem Spannungsplateau liegt

und nicht auf der maximal auftretenden Kraft am Ende der Kompression, werden die Messungen mit einem 1 kN Kraftsensor durchgeführt und beim überschreiten einer kritischen Belastung von 1,15 kN abgebrochen.

Als ein Ergebnis entstehen die Spannungs-Verzerrungs-Diagramme in Abbildung 7.3 der vier Proben. Die angegebene Spannung ist dabei eine homogenisierte Spannung, die aus der gemessenen Kraft normiert auf die Grundfläche der Probe berechnet wurde. Dabei zeigt Probe KW4 einen deutliche höheren PCS als die Proben KW1-KW3. Da diese Probe schon eine höhere scheinbare Dichte als die anderen Proben aufgewiesen hat, kann die höhere Belastbarkeit mit einem höheren Materialanteil pro Volumen begründet werden. Dabei kann der höhere Massenanteil entweder auf eine höhere Beschichtungsdicke oder eine kompaktere Mesostruktur hinweisen. Die Betrachtung der CT-Aufnahmen für diesen Bereich zeigt keine deutliche Erhöhung der Beschichtungsdicke, deshalb kann für KW4 von sehr wenigen offenen Poren ausgegangen werden. Auffallend ist die geringe strukturelle Steifigkeit von Probe KW1.

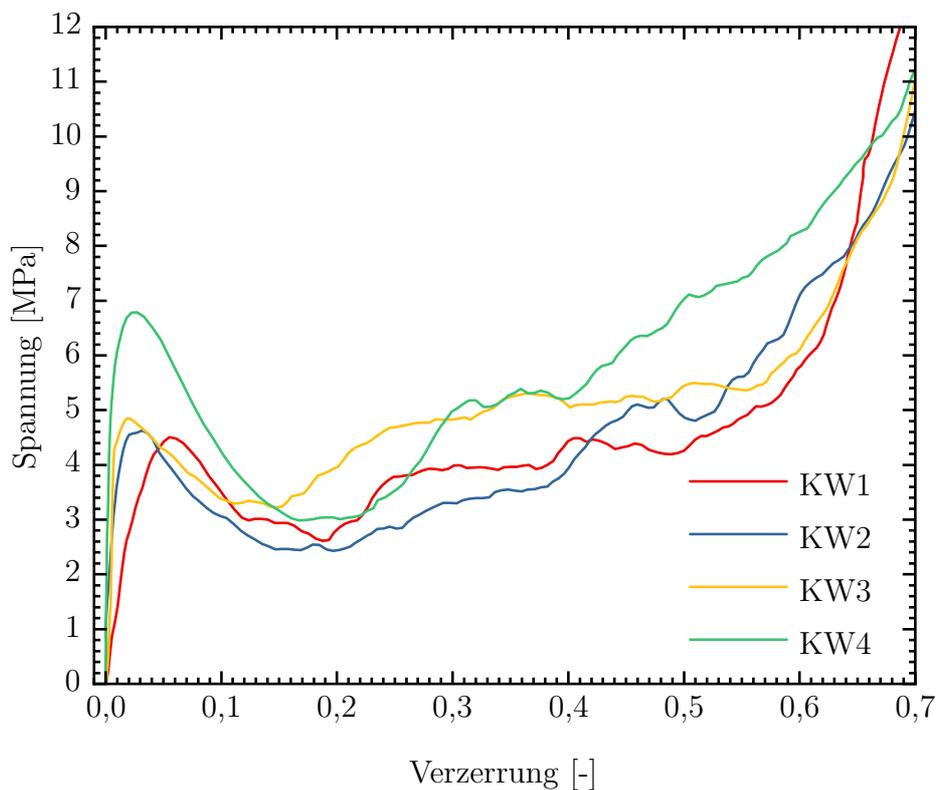


Abbildung 7.3: Spannungs-Verzerrungs-Diagramme für vier Würfel mit Kantenlänge 10 mm (KW1 - KW4) unter Druckbelastung

Die Dehnung bis zum PCS ist bei dieser Probe etwa doppelt so hoch wie bei den anderen untersuchten Proben. Die Betrachtung der DIC-Auswertung (vgl. Abbildung 7.4) zeigt ein klares, lokal begrenztes Versagen der Probe im oberen rechten Teil des Würfels. Diese lokale Deformation der Probe vor dem Kollabieren einer ersten vollständigen Porenlage erhöht die Dehnung bis zum PCS erheblich. Dieses Ausknicken eines gesam-

ten Teilbereichs entsteht hier durch die geringere Anzahl der Stege im Randbereich der Probe und hat bei solch geringer Probengröße einen deutlich höheren Einfluss auf das makroskopische Ergebnis als für eine größere Probe.

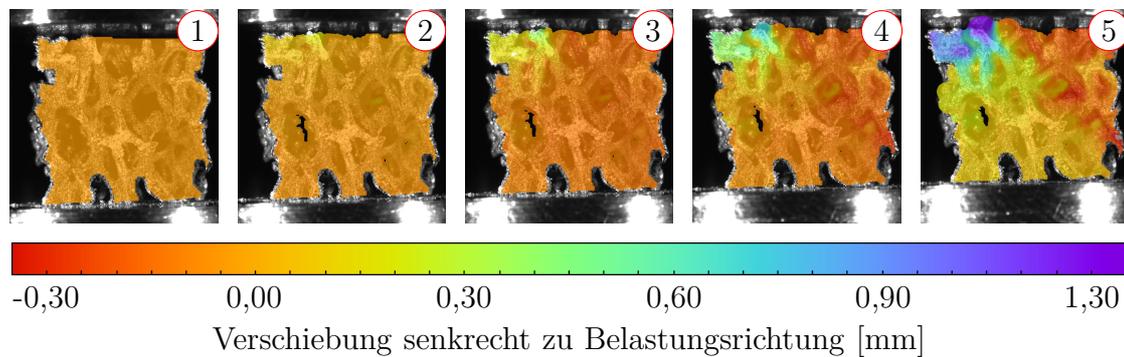


Abbildung 7.4: Deformation der Probe KW1 zu fünf Belastungszeitpunkten vor Erreichen des PCS; DIC: Verschiebung senkrecht zur Belastungsrichtung

Proben KW1 - KW3 zeigen das spezifische Verhalten von offenporigen Schäumen. Nach überschreiten des PCS und geringem Spannungsabfall liegt über eine Dehnung von 50 % ein nahezu ebenes Spannungsplateau vor. Bei einer Dehnung von rund 60 % ist für die ersten drei Proben dann ein exponentieller Spannungsverlauf zu sehen. Im Gegensatz dazu zeigt Probe KW4 nahezu kein Spannungsplateau, nach einer starken Spannungsüberhöhung ist hier ein nahezu konstanter Anstieg der Spannung bis zu Dehnung von 70 % zu sehen. Ein solches Verhalten weist in der Regel auf eine inhomogene Beschichtung oder lokalen Dichteunterschied der Schäume hin, da diese hier durch die CT-Aufnahmen nicht bestätigt werden können muss von einem Einfluss der Mesostruktur ausgegangen werden.

7.2.2 Große Würfel

Zur makroskopischen Untersuchung des Ni/PU-Hybridschaumes beschreibt dieser Abschnitt die Druckversuche an den Proben mit einer Kantenlänge von 20 mm. Wie die CT-Aufnahme des Würfels im ersten Abschnitt gezeigt hat, kann hier von einer konstanten Beschichtungsdicke von 80 μm ausgegangen werden. Bei einer Porengröße von $3,09 \pm 0,20$ mm [92] und einer Kantenlänge der Proben von 20 mm kann von einer Probengröße von circa $6,47 \times 6,47$ Poren ausgegangen werden. Die Untersuchungen in der Bachelorarbeit von P. Lorson [92] zeigen, dass diese Probengröße eine ausreichende Porenanzahl beinhaltet, um repräsentative Ergebnisse zu erzielen. Wie auch an den kleinen Würfeln im Kapitel 7.2.1 werden an diesen Würfeln quasistatische Druckversuche durchgeführt. Durch die hohen zu erwartenden Kräfte wurden die Versuche von M. Fries an der Instron[®] ElectroPulse[™] E10000 (Instron Deutschland GmbH, Pfungstadt, Deutschland) durchgeführt. Zur Auswertung der Verzerrungen wird hier die 2D-DIC genutzt.

Das Belastungsverhalten der Schäume unter Druck wird hier beispielhaft für eine Probe gezeigt. Dazu zeigt Abbildung 7.5 (a) die Deformation der Probe MP2 zu neun Belastungszeitpunkten. Die ersten drei Bilder sind aus der pseudo-elastischen Phase der Deformation. Hier ist eine gleichmäßige Deformation der Probe zu erkennen. Nach Überschreiten des PCS entstehen lokal größere Deformationen. Diese sind in den Bildern 4 und 5 durch Dehnungsbänder zu erkennen. Dabei kollabiert eine einzelne Porenlage, wobei der Rest der Probe nahezu undeformiert bleibt. Dieses schrittweise Versagen des Schaums führt zu einer großen Dehnung bei gleichbleibender Belastung. Im Gegensatz zur schematischen Darstellung des Deformationsverhaltens in Abbildung 2.3 ist hier ein leichter Anstieg der gemessenen Kraft zu erkennen (vgl. Abbildung 7.5 (b)).

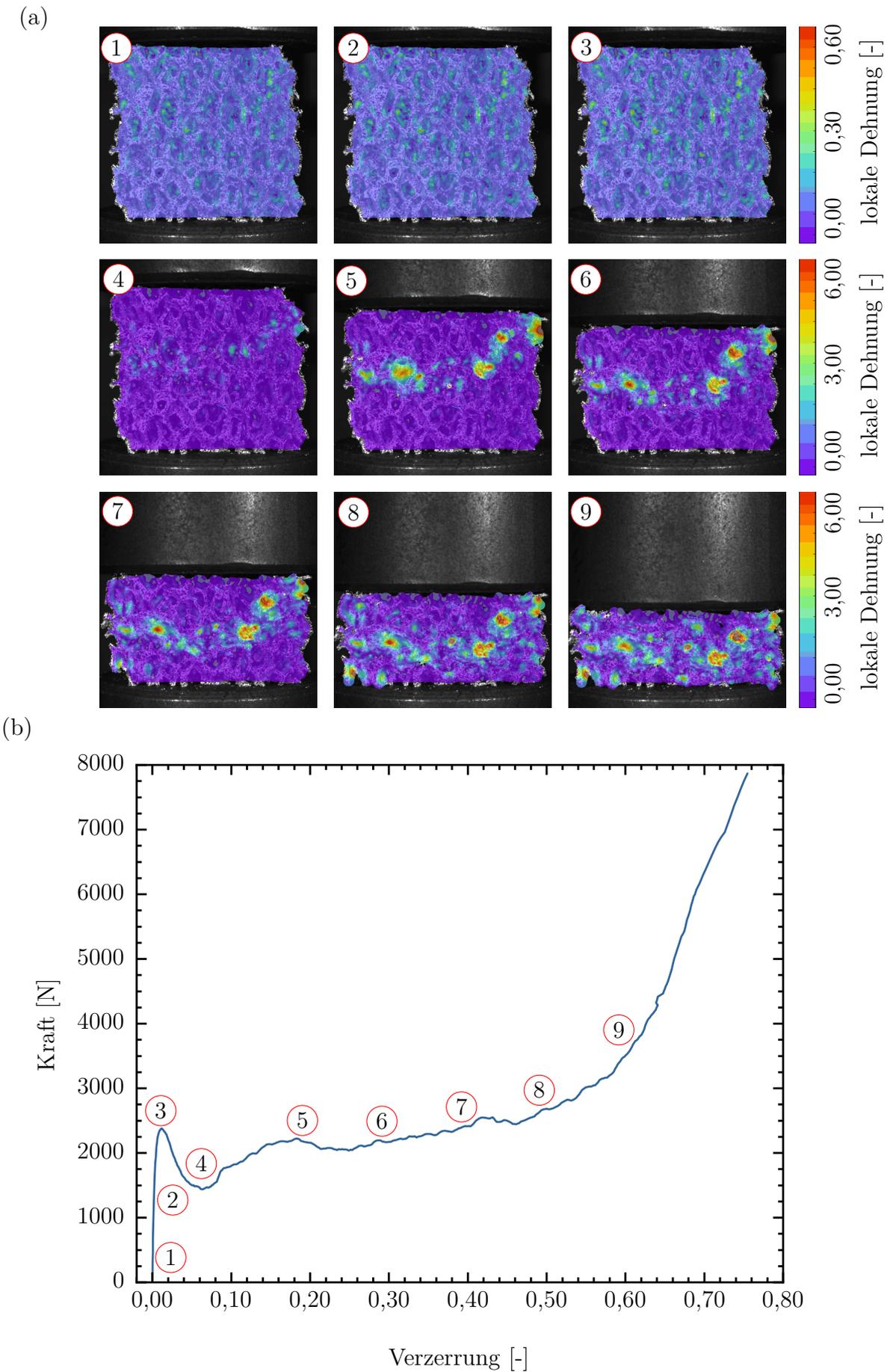


Abbildung 7.5: Druckversuch an Probe GW2: (a) DIC-Bilder zu neun Belastungszeitpunkten während der Deformation; (b) Kraft-Verzerrungs-Diagramm mit Belastungszeitpunkten ① - ⑨

Bei beschichteten Schäumen kann dieser Anstieg auf lokale Inhomogenitäten der Beschichtungsdicke hindeuten, wobei dünner beschichtete Bereiche unter geringerer Belastung versagen als dicker beschichtete Bereiche und es dadurch zu einem Anstieg des Plateaus kommt. Auffällig ist hier, dass die Deformation relativ mittig in der Probe startet, in den Bereichen in denen die optische Untersuchung (vgl. Kapitel 7.1) eine dünnere Beschichtung zeigt. Die äußeren, dicker beschichteten Bereiche, zeigen bis kurz vor Beginn der Kompressionsphase nahezu keine Deformation. Anhand der DIC-Aufnahmen lässt sich die Schwächung der Probe ausgehend von der Mitte am breiter werdenden Dehnungsband erkennen.

Abbildung 7.6 zeigt die Spannungs-Verzerrungs-Diagramme für alle vier GW-Proben. Dabei ist die abgebildete Spannung ein homogenisierter Wert für die gesamte Probe, dieser errechnet sich aus den Abmessungen der Grundfläche und der gemessenen Kraft. Da diese Proben vor der Beschichtung auf die richtige Größe zugeschnitten wurden, sind die Abweichungen im Bereich von zwei Prozent der Probengröße.

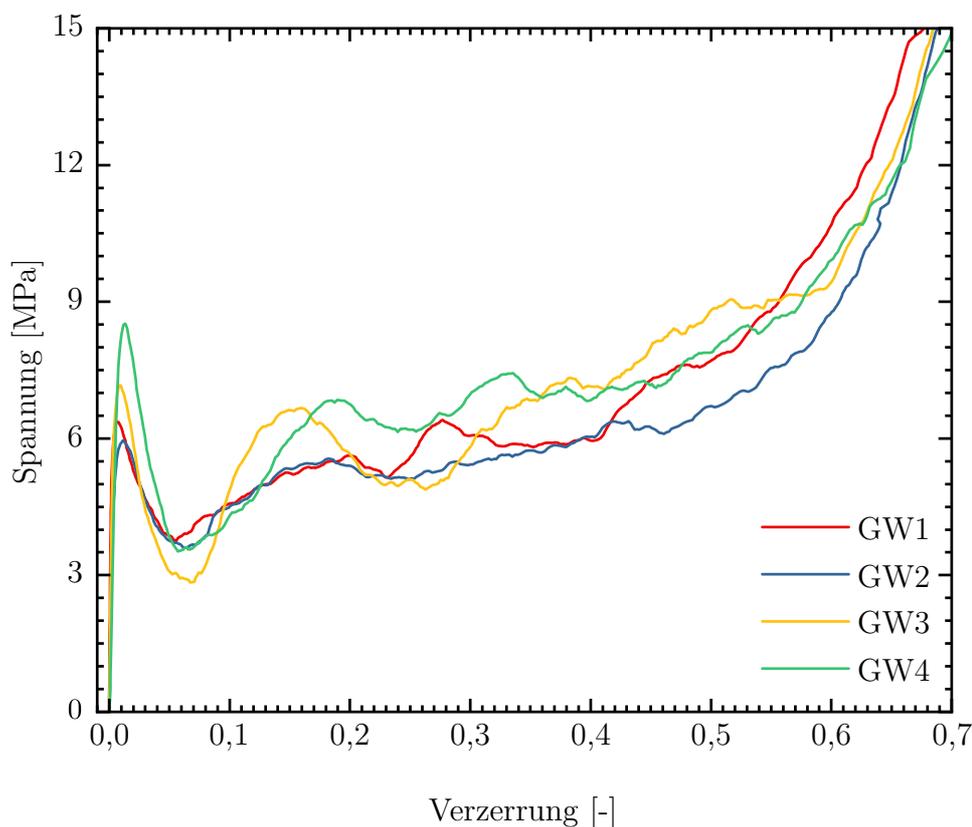


Abbildung 7.6: Spannungs-Verzerrungs-Diagramme von vier makroskopischen Druckversuchen (GW1-GW4)

Die Diagramme in Abbildung 7.6 zeigen einen PCS zwischen 6 MPa und 9 MPa und einen starken Abfall der Spannung. Dieser starke Abfall kann auf ein Kollabieren einer gesamten Porenlage und damit auf ein eher sprödes Materialverhalten hindeuten. Diese Beobachtung wird bei der Betrachtung von Probe GW3 weiter unterstützt. Hier

kommt es während der Plateauphase zu einem wellenförmigen Verlauf der Spannung, bei dem immer wieder einzelne Porenlagen kollabieren. Ein ähnliches, wenn auch nicht so stark ausgeprägtes Verhalten lässt sich für die Proben GW1 und GW4 erkennen. Probe GW2 hingegen zeigt zwar einen leichten Anstieg der Plateauspannung, aber keine ausgeprägten Wellen. Da sich die Steigung des Be- und Entlastungspfad im Spannungs-Verzerrungs-Diagramm von offenporigen Schäumen unterscheidet und der Elastizitätsmodul aus dem Entlastungspfad bestimmt werden muss (vgl. Kapitel 2.1) wird hier ausschließlich die strukturelle Steifigkeit als Steigung im pseudo-elastischen Bereich der Spannungs-Verzerrungs-Diagramme betrachtet. Zusätzlich zum PCS und der strukturellen Steifigkeit wird die Plateauspannung als mittlere Spannung zwischen 10 % und 50 % Verzerrung ausgewertet. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 7.3 aufgetragen.

Tabelle 7.3: Ergebnisse aus Druckversuchen an vier großen Würfeln (GW1-GW4) mit PCS, struktureller Steifigkeit als Steigung des pseudo-elastischen Bereichs und Plateauspannung als Mittelwert von 10 % - 50 % Verzerrung

	PCS [MPa]	strukturelle Steifigkeit [GPa]	Ø Plateauspannung [MPa]
GW1	6,36	3,50	5,94 ± 0,78
GW2	5,95	2,35	5,62 ± 0,50
GW3	7,17	2,40	6,58 ± 1,12
GW4	8,52	1,33	6,70 ± 0,78

Die gezeigten Versuche charakterisieren das spezifische Verhalten von Metallschäumen sehr gut. Nach einem pseudo-elastischen Bereich und dem PCS folgt ein langes, konstantes Plateau, bei dem der Schaum einer konstanten Belastung standhält und dabei große Verzerrungen zeigt. Die große Energieabsorption mit einer spezifischen maximalen Belastung in den ersten beiden Phasen der Deformation eines Schaums sind entscheidend für die industrielle Anwendung des Schaumes. Aus diesem Grund müssen die Simulationen eben dieses Verhalten darstellen können, um im nächsten Schritt eine rein virtuelle Auslegung der Schäume realisieren zu können.

7.3 Simulationen im Virtuellen Labor

Dieses Unterkapitel vergleicht die makroskopischen Druckversuche mit den Ergebnissen des Virtuellen Labors. Dabei wurden die in der Mikroebene ermittelten Materialparameter und deren Streuung als Eingabewerte verwendet (vgl. Abbildung 6.10). Das in Kapitel 6 vorgestellte Tool erlaubt, neben der Simulation einzelner Poren, die Simulation von mehreren Poren bis hin zu makroskopisch repräsentativen Probengrößen. Dabei beschränkt sich die simulierte Probengröße auf ganze Einheitszellen. Es können nur ganze Vielfache von Pentagondodekaedern zu einer makroskopischen Probe zusammengeschlossen werden. Mit einer Steglänge von 1,5 mm ergibt sich eine Größe des Pentagondodekaeders von 3,34 mm (vgl. Kapitel 6.2). Dabei werden die KW-Versuche mit zwei Simulationen an $3 \times 3 \times 3$ Pentagondodekaedern (Kantenlänge: 10,02 mm) und die GW-Versuche mit einer Simulation an $6 \times 6 \times 6$ Pentagondodekaedern (Kantenlänge: 20,04 mm) verglichen. Die Verzerrung wird über die Verschiebung der obersten Knotenlage und der Fixierung der untersten Porenlage gewährleistet. Die resultierenden Spannungs-Verzerrungs-Diagramme der Simulationen und zum Vergleich die Spannungs-Verzerrungs-Diagramme aus den Experimenten für die kleinen Probengrößen sind in Abbildung 7.7 zu sehen.

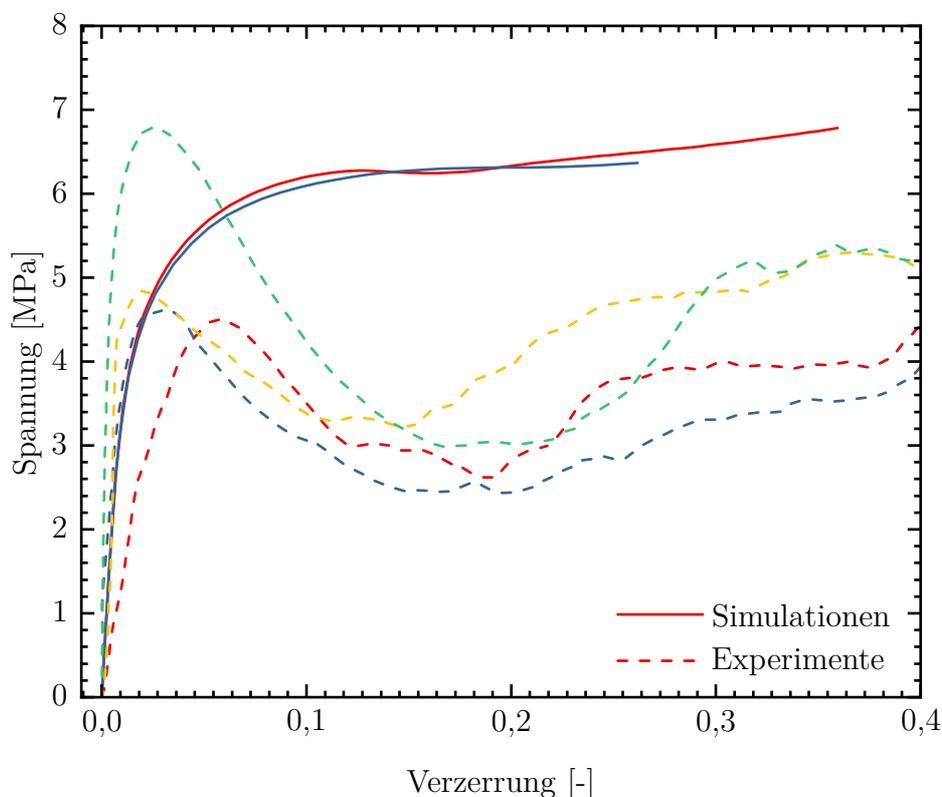


Abbildung 7.7: Vergleich von Spannungs-Verzerrungs-Diagramm aus dem Virtuellen Labor an einer Struktur aus $3 \times 3 \times 3$ Pentagondodekaedern und Versuchen an kleinen Würfeln ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$)

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung im pseudo-elastischen Bereich der Deformation. Die strukturelle Steifigkeit der zwei Simulationen stimmt mit den in den Experimenten gemessenen Werten überein. Im Gegensatz zu den Experimenten zeigen die Simulationen keine Überhöhung des PCS und eine leicht höhere Plateauspannung. Durch den fehlenden Selbstkontakt zwischen den Balken kann die Kompressionsphase nicht abgebildet werden. Die Simulationen wurden deshalb während der Plateauphase abgebrochen. Unter Berücksichtigung der angenommenen Vereinfachung (vgl. einfache Parameter, Abbildung 6.9) wird das makroskopische Verhalten der Ni/PU-Hybridschäume sehr gut abgebildet.

Zusätzlich zu den Simulationen in der Größenordnung der KW-Proben sind im Virtuellen Labor auch Simulationen in der Größenordnung der GW-Proben und größeren Proben dimensionen möglich. Zum Vergleich mit den Druckversuchen an den GW-Proben besteht das Geometriemodell aus $6 \times 6 \times 6$ Pentagondodekaedern. Die resultierenden Spannungs-Verzerrungs-Diagramme sind in Abbildung 7.8 abgebildet.

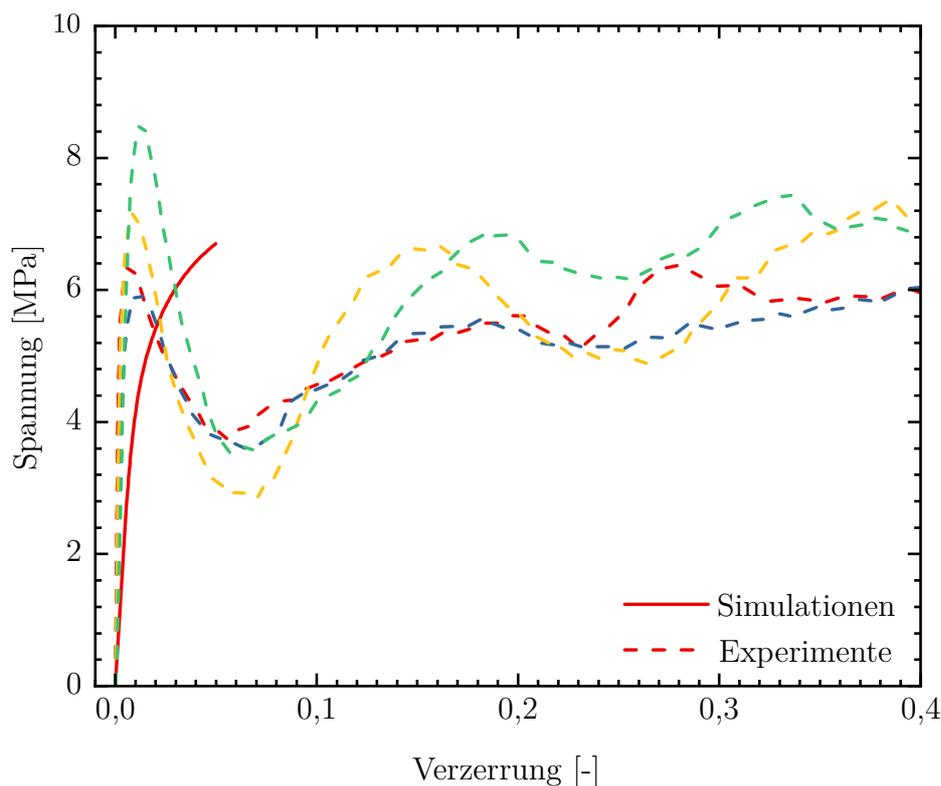


Abbildung 7.8: Vergleich von Spannungs-Verzerrungs-Diagramm aus dem Virtuellen Labor an einer Struktur aus $6 \times 6 \times 6$ Pentagondodekaedern und Versuchen an kleinen Würfeln ($20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$)

Aufgrund der hohen Simulationszeiten für die GW Simulationen zeigt die Abbildung 7.8 die Simulation nur bis zu einer Verzerrung von 5 %, das Spannungsplateau ist bei dieser Verzerrung noch nicht erreicht. Die Simulation unterschätzt für den Fall der größeren Struktur die strukturelle Steifigkeit. Sie liegt mit einem Wert von 0,5 GPa bei rund der Hälfte der realen Proben. Im Vergleich dazu liegt die strukturelle Steifigkeit der KW Proben im Experiment bei 0,14 GPa - 1,18 GPa. Das Virtuelle Labor weist für die kleine Größe eine strukturelle Steifigkeit von 0,33 GPa auf. Da für die Simulation die Schichtdicke des zerteilten Würfels verwendet wurde und für die übrigen Würfel keine Informationen über die Schichtdicke vorliegen, kann über Gründe für eine mögliche Abweichung keine verifizierte Aussage getroffen werden. Es ist aufgrund der schwankenden Schichtdicke (vgl. Kapitel 7.1) vorstellbar, dass die Abweichung in der strukturellen Steifigkeit aufgrund von einer Abweichung der Schichtdicke oder lokalen Dichteunterschieden erzeugt wird. Da die Probe für die CT-Messung aufgrund der benötigten Zeit zum Erstellen der CT-Aufnahmen erheblich früher beschichtet wurde als die vier weiteren Proben, kann hier nicht zwingend von einer gleichen Beschichtungsdicke ausgegangen werden. Da für keine der Proben die Masse erfasst wurde, können hier keine massennormierten Diagramme gezeigt werden, die gegebenenfalls eine etwaige ungleichmäßige Beschichtung ausgleichen könnten. Wie auch schon für die kleine Probengröße wird für die Simulation keine Überhöhung des PCS erreicht. Das Spannungsplateau der Simulation stimmt gut mit den Experimenten überein.

7.4 Diskussion: Validierung

Die in den Abbildungen 7.7 und 7.8 dargestellten Spannungs-Verzerrungs-Diagramme zeigen eindrucksvoll die Funktionsfähigkeit des Virtuellen Labors. Die Ergebnisse zeigen trotz der nicht korrelierten Materialparameter und der Annahme einer einfachen Zufallsverteilung eine gute Übereinstimmung der resultierenden Kräfte sowohl für die kleinen als auch für die großen Abmessungen. Die Übereinstimmung der strukturellen Steifigkeit für die kleine Probenabmessung ist deutlich zu sehen. Die leichte Überschätzung des PCS für drei der kleinen Proben kann dabei mit den kleinen Dimensionen der Proben erklärt werden. Für die Simulationen im virtuellen Labor existieren keine halben Einheitszellen, in der Realität ist das allerdings der Fall. Durch viele halbe Poren in den Randbereichen wird gerade eine kleine Probe übermäßig geschwächt und zeigt einen niedrigeren PCS, der Einfluss ist für größere Probenabmessungen kleiner. Dadurch liegen zum einen der PCS der realen GW-Versuche näher beieinander und zum anderen wird der PCS vom Virtuellen Labor besser abgebildet. Die leichte Überhöhung des PCS wird dabei weder für die kleine noch für die große Probengröße abgebildet, aufgrund der geringen Abweichung kann aber hier und für die Plateauspannung von

einer guten Übereinstimmung gesprochen werden. Die Integration der korrelierten Materialparameter vom Projektpartner wird die Genauigkeit noch weiter erhöhen und eine virtuelle Auslegung von Ni/PU-Hybridschäumen ermöglichen. Das Virtuelle Labor bietet somit ein einfaches Tool zur Darstellung des Materialverhaltens eines offenporigen Ni/PU-Hybridschaums alleine auf der Basis von mikromechanischen Materialparametern und deren korrelierter Streuung.

Die Zukunft von Ni/PU Hybridschäumen

Das Ziel dieser Arbeit war es, zuverlässig und reproduzierbar mikromechanische Materialparameter eines Ni/PU Hybridschaums zu identifizieren, diese im Anschluss mit Hilfe des Projektpartners zu abstrahieren und als stochastische Materialparameter für ein Virtuelles Labor zu nutzen. Dabei lag der Fokus klar auf der hohen Messgenauigkeit während der Versuche und auf der Qualität der Messergebnisse.

Die starke Verknüpfung der Schaumstruktur und deren mechanischen Eigenschaften erzeugt einen großen Einfluss der geometrischen und mechanischen Eigenschaften der einzelnen Stege auf das makroskopische Verhalten des Schaumes. Zusätzlich stellt die Identifikation der Stegparameter durch die geringen Stegabmessungen und die komplexe Geometrie eine große Herausforderung an die mechanische Prüfung dar. Aus diesem Grund präsentiert diese Arbeit zunächst den experimentellen Aufbau mit allen Erweiterungen zur mechanischen Prüfung von Stegen. Die komplexe Geometrie der Stege erfordert neben speziellen Vorrichtungen zur mechanischen Prüfung auch eine präzise Dehnungsmessung. Deshalb wurde hier das Verfahren der DIC erläutert und eine Methode zur Verbesserung der DIC-Messgenauigkeit präsentiert. Dabei beschränkt sich die DIC-Auswertung auf die Verwendung einer kommerziellen Software. Unter Verwendung dieser Software wird eine Methode präsentiert, die es ermöglicht, die idealen Einstellparameter der DIC zu bestimmen und somit den minimalen Fehler bei jeder Dehnungsmessung für jeden Versuch zu erreichen. Zusätzlich wird anhand von vor dem Versuch aufgezeichneten Bildern die Genauigkeit der Messung bestimmt.

Neben der Dehnungsmessung ist die Berechnung der Spannung aus der experimentell gemessenen Kraft ein wichtiger Aspekt bei der Auswertung der Versuchsdaten. Die Verwendung von Fotogrammetrie zur Erzeugung eines geometrischen Modells der Außenkontur bietet hier eine schnelle und einfache Alternative zu CT-Aufnahmen. Da das Verfahren nur die Außenkontur aufzeichnen kann, wird die Ni-Schicht virtuell auf Basis der Schichtdicke an der Bruchstelle der Stege nach dem Versuch bestimmt. So entstand für jeden Steg ein hohles Modell, welches die Ni-Schicht realitätsgetreu nachbildet. Die so ermöglichte Flächenmessung im Rissbereich erlaubt die individuelle Berechnung der Spannung für jeden getesteten Steg.

Durch den speziell konzipierten Versuchsstand und die verwendeten Erweiterungen kann diese Arbeit neben einfachen Zugversuchen an Einzelstegen auch Zweipunkt- und Dreipunktbiegeversuche an Stegen vorstellen. Die Stege zeigen hier eine deutlich höhere Biege- als Zugsteifigkeit, welche durch die unterschiedlichen Belastungsverläufe erklärt wird. Die Elastizitätsmoduln der Stege hingegen zeigen über alle Versuchsarten eine gute Übereinstimmung. Durch die hier erreichte hohe Genauigkeit der Dehnungsmessungen konnten zusammen mit der fotogrammetrisch ermittelten Außenkontur jedes Stegs und der virtuellen Beschichtung hoch präzise Spannungs-Verzerrungs-Diagramme für alle mikromechanischen Versuche erzeugt werden.

Zur Übertragung der experimentell ermittelten Daten in von der Simulation verwendbare Materialparametersätze wurde die inverse Parameteridentifikation genutzt. Die so erzeugten Materialparametersätze ermöglichen es, das Verhalten der realen Stege in FE-Simulationen abzubilden. So entstand die Möglichkeit, jeden Steg auf unterschiedliche Arten zu belasten und ein besseres Verständnis des Zusammenhangs von Stegeometrie und Stegverhalten zu erhalten. Hier wurden die Material- und Geometrieparameter aus den Zugversuchen genutzt, um virtuell jeweils drei Biegeversuche und ein Torsionsversuch durchzuführen. So wurde die Datenbank von 9 Zugversuchen auf 45 Versuche unterschiedlicher Belastungsarten erweitert. Der Vergleich von realer und virtueller Biegung verifiziert dabei durch eine gute Übereinstimmung der Anfangsbereich der Kraft-Verschiebungs-Diagramme, die Verwendung der Daten.

Das Stegverhalten wurde dann auf einfache Balkenelemente übertragen, die durch den Zusammenschluss zu Pentagondodekaedern das Verhalten des offenporigen Ni/PU-Hybridschaums abbilden sollen. Die Verifikation des Prinzips erfolgte mit der Verifikation anhand von Porenexperimenten. Dabei zeigen die realen Experimente an Einzelpo-

ren eine breite Streuung im Kraftverlauf, die im Virtuellen Labor durch die Verwendung von mikromechanischen Parametern und dem Pentagondodekaeder als Einheitszelle ebenso abgebildet wird. Die Validierung mit Probengrößen von $3 \times 3 \times 3$ und $6 \times 6 \times 6$ Einheitszellen bestätigt die Funktionalität und gibt einen ersten Hinweis auf das Potenzial des Virtuellen Labors.

Durch die enge Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in Luxemburg wurde für diese Arbeit eine erste Version des Virtuellen Labors für Ni/PU-Hybridschäume umgesetzt. In dieser Version musste dabei auf die stochastisch korrelierten Materialparameter verzichtet werden und es konnte nur die einfache, nicht korrelierte Streuung der mikromechanischen Parameter berücksichtigt werden. Außerdem beschränkt sich das verwendete Simulationsmodell auf ein elasto-plastisches Materialmodell, bei der eine Schädigung der Stege respektive der Balkenelemente nicht berücksichtigt wird. Dieses Verhalten entspricht nicht der Realität. In der realen Probe wird es immer Stege geben, die vollständig versagen und keinen Einfluss auf die Stabilität der makroskopischen Probe haben. Eine entsprechende Erweiterung des Modells würde helfen, das Verhalten des makroskopischen Schaums noch präziser hervorzusagen. Die hier erreichte Übereinstimmung der simulativ und experimentell ermittelten Spannungs-Verzerrungs-Kurven ist dennoch beeindruckend. Die zukünftige Verwendung von korrelierten Materialparametern und ihre gezielte Anpassung wird eine virtuelle Auslegung von Ni/PU-Hybridschäumen in Bezug auf Porengröße und Beschichtungsdicke ermöglichen. Dabei wird der reale Schaum als Grundlage genutzt und nicht auf ein idealisiertes Modell zurückgegriffen. Dadurch kann das Virtuelle Labor lokale Inhomogenitäten in Beschichtungsdicke und Porengröße berücksichtigen und aktiv für die Auslegung der Schäume nutzen. Mit dem Virtuellen Labor können die Schäume also speziell an die unterschiedlichsten Anforderungen angepasst werden und somit wird der zukünftige breite industrielle Einsatz von Ni/PU-Hybridschäumen ermöglicht.

Literaturverzeichnis

- [1] [May 2020]. *Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.12 User's Manual*.
- [2] Armesto, J., I. Lubowiecka, C. Ordóñez & F. I. Rial [2009]. 'FEM modeling of structures based on close range digital photogrammetry.' *Automation in Construction*, **18**(5), pp. 559–569.
- [3] Ashby, M. F., T. Evans, N. A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley & L. Gibson [2000]. *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier.
- [4] Ashby, M. F. & T. Lu [2003]. 'Metal Foams: A Survey.' *Science in China Series B: Chemistry*, **46**(6), pp. 521–532.
- [5] Badaloni, M., M. Rossi, G. Chiappini, P. Lava & D. Debruyne [2015]. 'Impact of experimental uncertainties on the identification of mechanical material properties using DIC.' *Experimental Mechanics*, **55**(8), pp. 1411–1426.
- [6] Balcaen, R., P. Reu, P. Lava & D. Debruyne [2017]. 'Stereo-DIC uncertainty quantification based on simulated images.' *Experimental Mechanics*, **57**(6), pp. 939–951.
- [7] Baldi, A. [2018]. 'Digital Image Correlation and Color Cameras.' *Experimental Mechanics*, **58**(2), pp. 315–333.
- [8] Banhart, J. [2001]. 'Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams.' *Progress in Materials Science*, **46**(6), pp. 559–632.
- [9] Beck, J. L. & S.-K. Au [2002]. 'Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation.' *Journal of engineering mechanics*, **128**(4), pp. 380–391.

- [10] Belda, R., R. Megías, N. Feito, A. Vercher-Martínez & E. Giner [2020]. ‘Some Practical Considerations for Compression Failure Characterization of Open-Cell Polyurethane Foams Using Digital Image Correlation.’ *Sensors*, **20**(15), pp. 4141.
- [11] Betts, C., D. Balint, J. Lee, J. Lin & P. Lee [2014]. ‘In-situ Microtensile Testing and X-ray Microtomography-based Finite Element Modelling of Open-cell Metal Foam Struts and Sandwich Panels.’ *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **49**(8), pp. 592–606.
- [12] Beyer, H. A. [1992]. *Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system*. Ph.D. thesis, ETH Zürich.
- [13] Bing, P., X. Hui-min, X. Bo-qin & D. Fu-long [2006]. ‘Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation.’ *Measurement Science and Technology*, **17**(6), pp. 1615.
- [14] Blaysat, B., M. Grediac & F. Sur [2016]. ‘On the propagation of camera sensor noise to displacement maps obtained by DIC - An experimental study.’ *Experimental Mechanics*, **56**(6), pp. 919–944.
- [15] Bleistein, T., A. Jung & S. Diebels [2018]. ‘Multiscale Characterisation and Simulation of Open-cell Metal Foams.’ *PAMM*, **18**(1), pp. e201800211.
- [16] Bleistein, T., A. Jung & S. Diebels [2020]. ‘A Microsphere-based Material Model for Open Cell Metal Foams.’ *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, **32**(1), pp. 255–267.
- [17] Bock, J. & A. M. Jacobi [2013]. ‘Geometric classification of open-cell metal foams using X-ray micro-computed tomography.’ *Materials Characterization*, **75**, pp. 35–43.
- [18] Boonyongmaneerat, Y., C. A. Schuh & D. C. Dunand [2008]. ‘Mechanical Properties of Reticulated Aluminum Foams with Electrodeposited Ni-W Coatings.’ *Scripta Materialia*, **59**(3), pp. 336–339.
- [19] Bornert, M., F. Brémand, P. Doumalin, J.-C. Dupré, M. Fazzini, M. Grediac, F. Hild, S. Mistou, J. Molimard, J.-J. Orteu et al. [2009]. ‘Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results.’ *Experimental Mechanics*, **49**(3), pp. 353–370.
- [20] Borrega, M. & L. J. Gibson [2015]. ‘Mechanics of Balsa (*Ochroma pyramidale*) Wood.’ *Mechanics of Materials*, **84**, pp. 75–90.

- [21] Bouwhuis, B., J. McCrea, G. Palumbo & G. Hibbard [2009]. ‘Mechanical Properties of Hybrid Nanocrystalline Metal Foams.’ *Acta Materialia*, **57**(14), pp. 4046 – 4053.
- [22] Bronder, S., M. Adorna, T. Fíla, P. Koudelka, J. Falta, O. Jiřroušek & A. Jung [2021]. ‘Hybrid auxetic structures: Structural optimization and mechanical characterization.’ *Advanced Engineering Materials*, p. 2001393.
- [23] Brown, J. & J. Dold [1995]. ‘V-STARS-A system for digital industrial photogrammetry.’ *Optical 3-D Measurement Techniques III*, pp. 12–21.
- [24] Buffel, B., F. Desplentere, K. Bracke & I. Verpoests [2014]. ‘Modelling open cell-foams based on the Weaire–Phelan unit cell with a minimal surface energy approach.’ *International Journal of Solids and Structures*, **51**(19), pp. 3461–3470.
- [25] Caminero, M. A., M. Lopez-Pedrosa, C. Pinna & C. Soutis [2013]. ‘Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation.’ *Composites Part B: Engineering*, **53**, pp. 76–91.
- [26] Cannon, A. H., J. D. Hochhalter, A. W. Mello, G. F. Bomarito & M. D. Sangid [2015]. ‘Microstamping for improved speckle patterns to enable digital image correlation.’ *Microscopy and Microanalysis*, **21**(S3), pp. 451–452.
- [27] Chen, L. [2020]. *A quasicontinuum approach towards mechanical simulation of periodic lattice structures*. Ph.D. thesis, Université Libre de Bruxelles.
- [28] Chen, Z., C. Quan, F. Zhu & X. He [2015]. ‘A method to transfer speckle patterns for digital image correlation.’ *Measurement science and technology*, **26**(9), pp. 095201.
- [29] Crammond, G., S. Boyd & J. Dulieu-Barton [2013]. ‘Speckle pattern quality assessment for digital image correlation.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **51**(12), pp. 1368–1378.
- [30] Creative Dimension Software Ltd [2016]. *3Dsom Pro User Guide*.
- [31] Dantec Dynamics GmbH [January 2016]. *Istra4D Software Manual*.
- [32] Degischer, H. P. & B. Kriszt [2002]. *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*. Wiley-vch.
- [33] Dennis Jr, J. E., D. M. Gay & R. E. Walsh [1981]. ‘An adaptive nonlinear least-squares algorithm.’ *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, **7**(3), pp. 348–368.

- [34] Dingler, J. G. [1860]. ‘Wood’s leichtflüssiges Metall.’ *Polytechnisches Journal*, **158**(LXX.), pp. 271–272.
- [35] Dong, Y. & B. Pan [2017]. ‘A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation.’ *Experimental Mechanics*, **57**(8), pp. 1161–1181.
- [36] Dorozhkin, S. V. & M. Epple [2002]. ‘Die biologische und medizinische Bedeutung von Calciumphosphaten.’ *angewandte Chemie*, **114**(17), pp. 3260–3277.
- [37] Doube, M., M. M. Kłosowski, I. Arganda-Carreras, F. P. Cordelières, R. P. Dougherty, J. S. Jackson, B. Schmid, J. R. Hutchinson & S. J. Shefelbine [2010]. ‘BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ.’ *Bone*, **47**(6), pp. 1076–1079.
- [38] Duarte, I. & J. M. F. Ferreira [2016]. ‘Composite and Nanocomposite Metal Foams.’ *Materials*, **9**(2).
- [39] Duarte, I., E. Ventura, S. Olhero & J. M. Ferreira [2015]. ‘A Novel Approach to Prepare Aluminium-Alloy Foams Reinforced by Carbon-Nanotubes.’ *Materials Letters*, **160**, pp. 162–166.
- [40] Duarte, I., E. Ventura, S. Olhero & J. M. Ferreira [2015]. ‘An Effective Approach to Reinforced Closed-cell Al-alloy Foams with Multiwalled Carbon Nanotubes.’ *Carbon*, **95**, pp. 589–600.
- [41] Dukhan, N. [2013]. *Metal Foams: Fundamentals and Applications*. DEStech Publications, Inc.
- [42] Evans, A. G., J. Hutchinson & M. Ashby [1998]. ‘Multifunctionality of Cellular Metal Systems.’ *Progress in materials science*, **43**(3), pp. 171–221.
- [43] Everitt, B. & A. Skron dal [2002]. *The Cambridge dictionary of statistics*, volume 106. Cambridge University Press Cambridge.
- [44] Felten, M., M. Fries, A. Pullen, W. G. Proud & A. Jung [2020]. ‘Investigation of Strain-Rate Effects in Ni/PU Hybrid Foams under Low-Impact Velocities.’ *Advanced Engineering Materials*.
- [45] Fíla, T., O. Jiroušek, A. Jung & I. Kumpová [November 2016]. ‘Identification of Strain Fields in Pure Al and Hybrid Ni/Al Metal Foams using X-ray Microtomography under Loading.’ *Journal of Instrumentation*, **11**(11), pp. C11017–C11017.
- [46] Fraser, C. & D. Brown [1986]. ‘Industrial photogrammetry: New developments and recent applications.’ *The Photogrammetric Record*, **12**(68), pp. 197–217.

- [47] Fraser, C. S., A. Woods & D. Brizzi [2005]. ‘Hyper redundancy for accuracy enhancement in automated close range photogrammetry.’ *The Photogrammetric Record*, **20**(111), pp. 205–217.
- [48] Gehri, N., J. Mata-Falcón & W. Kaufmann [2020]. ‘Automated crack detection and measurement based on digital image correlation.’ *Construction and Building Materials*, **256**, pp. 119383.
- [49] Gibson, L., K. Easterling & M. F. Ashby [1981]. ‘The Structure and Mechanics of Cork.’ *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, **377**(1769), pp. 99–117.
- [50] Gibson, L. J. & M. F. Ashby [1999]. *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge university press.
- [51] Gong, L., S. Kyriakides & W.-Y. Jang [2005]. ‘Compressive Response of Open-cell Foams. Part I: Morphology and Elastic Properties.’ *International Journal of Solids and Structures*, **42**(5-6), pp. 1355–1379.
- [52] Gordon, L., B. Bouwhuis, M. Suralvo, J. McCrea, G. Palumbo & G. Hibbard [2009]. ‘Micro-truss Nanocrystalline Ni Hybrids.’ *Acta Materialia*, **57**(3), pp. 932 – 939.
- [53] Green, D. W., J. E. Winandy & D. E. Kretschmann [1999]. ‘Mechanical Properties of Wood.’ *Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. General technical report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45*, **113**.
- [54] Grobes, H. [2006]. ‘Coral stained hg, Hintergrund entfernt.’ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coral_stained_hg.jpg. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/legalcode>, [online: 01-02-2021].
- [55] Hall, E. [1951]. ‘The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results.’ *Proceedings of the Physical Society. Section B*, **64**(9), pp. 747.
- [56] Hedayati, R., M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam & A. Zadpoor [2016]. ‘Effect of mass multiple counting on the elastic properties of open-cell regular porous biomaterials.’ *Materials & Design*, **89**, pp. 9–20.
- [57] Helm, J. D. & J. Deanner [2004]. ‘Off-Axis Two-Dimensional Digital Image Correlation.’ In *Proc. 2004 SEM X Int. Congress & Exposition on Exp. and Appl. Mech*, pp. 6–7.
- [58] Hild, F. & S. Roux [2012]. ‘Comparison of local and global approaches to digital image correlation.’ *Experimental Mechanics*, **52**(9), pp. 1503–1519.

- [59] Hill, R. [1963]. ‘Elastic Properties of Reinforced Solids: Some Theoretical Principles.’ *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **11**(5), pp. 357–372.
- [60] Hua, T., H. Xie, S. Wang, Z. Hu, P. Chen & Q. Zhang [2011]. ‘Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation.’ *Optics & Laser Technology*, **43**(1), pp. 9–13.
- [61] Huu, T. T., M. Lacroix, C. P. Huu, D. Schweich & D. Edouard [2009]. ‘Towards a more realistic modeling of solid foam: use of the pentagonal dodecahedron geometry.’ *Chemical Engineering Science*, **64**(24), pp. 5131–5142.
- [62] Janesick, J. R. [2001]. *Scientific charge-coupled devices*, volume 83. SPIE press.
- [63] Jang, W.-Y., A. M. Kraynik & S. Kyriakides [2008]. ‘On the microstructure of open-cell foams and its effect on elastic properties.’ *International Journal of Solids and Structures*, **45**(7-8), pp. 1845–1875.
- [64] Jung, A. [2016]. *Cellular Materials: Structure-Property Relationships and Mechanical Modelling*. Habilitationsschrift, Universität des Saarlandes.
- [65] Jung, A., L. Beex, S. Diebels & S. Bordas [2015]. ‘Open-cell Aluminium Foams with Graded Coatings as Passively Controllable Energy Absorbers.’ *Materials & Design*, **87**, pp. 36 – 41.
- [66] Jung, A., S. Bronder, S. Diebels, M. Schmidt & S. Seelecke [2018]. ‘Thermographic Investigation of Strain Rate Effects in Al Foams and Ni/Al Hybrid Foams.’ *Materials & Design*, **160**, pp. 363–370.
- [67] Jung, A. & S. Diebels [2014]. ‘Hybrid Metal Foams.’ *Technische Mechanik. Scientific Journal for Fundamentals and Applications of Engineering Mechanics*, **34**(1), pp. 12–22.
- [68] Jung, A. & S. Diebels [2016]. ‘Synthesis and Mechanical Properties of novel Ni/PU Hybrid Foams: A new Economic Composite Material for Energy Absorbers.’ *Advanced Engineering Materials*, **18**(4), pp. 532–541.
- [69] Jung, A. & S. Diebels [2019]. ‘Micromechanical Characterization of Metal Foams.’ *Advanced Engineering Materials*, **21**(8), pp. 1900237.
- [70] Jung, A., T. Grammes & S. Diebels [2015]. ‘Micro-structural motivated phenomenological modelling of metal foams: experiments and modelling.’ *Archive of Applied Mechanics*, **85**(8), pp. 1147–1160.
- [71] Jung, A., E. Lach & S. Diebels [2014]. ‘New Hybrid Foam Materials for Impact Protection.’ *International Journal of Impact Engineering*, **64**, pp. 30 – 38.

- [72] Jung, A., J. Luksch, S. Diebels, F. Schäfer & C. Motz [2018]. ‘In-situ and Ex-situ Microtensile Testing of Individual Struts of Al Foams and Ni/Al Hybrid Foams.’ *Materials & Design*, **153**, pp. 104–119.
- [73] Jung, A., H. Natter, S. Diebels, E. Lach & R. Hempelmann [2011]. ‘Nanonickel Coated Aluminum Foam for Enhanced Impact Energy Absorption.’ *Advanced Engineering Materials*, **13**(1-2), pp. 23–28.
- [74] Jung, A., M. Wocker, Z. Chen & H. Seibert [2015]. ‘Microtensile Testing of Open-cell Metal Foams - Experimental Setup, Micromechanical Properties.’ *Materials & Design*, **88**, pp. 1021–1030.
- [75] Kaya, A. C., P. Zaslansky, A. Nikolaus & C. Fleck [2016]. ‘Tensile Failure Observations in Sintered Steel Foam Struts Revealed by Sub-micron Contrast-enhanced Microtomography.’ *Materials & Design*, **105**, pp. 190–200.
- [76] Kaya, A. C., P. Zaslansky, A. Rack, S. F. Fischer & C. Fleck [2019]. ‘Foams of Gray Cast Iron as Efficient Energy Absorption Structures: A Feasibility Study.’ *Advanced Engineering Materials*, **21**(6), pp. 1900080.
- [77] Kelvin, W. & E. London [1887]. ‘Dublin phil. mag.’ *J. Sci*, **24**, pp. 503.
- [78] Klocke, F. [2018]. *Fertigungsverfahren 2: Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*. Springer-Verlag.
- [79] Knauss, W. G., I. Chasiotis & Y. Huang [2003]. ‘Mechanical Measurements at the Micron and Nanometer Scales.’ *Mechanics of materials*, **35**(3-6), pp. 217–231.
- [80] Kohtz, D. [2013]. *Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe: Grundlagen und Verfahren*. Springer-Verlag.
- [81] Kraus, K. [2012]. *Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Walter de Gruyter.
- [82] Kristensen, J. & N. J. Zabaras [2014]. ‘Bayesian uncertainty quantification in the evaluation of alloy properties with the cluster expansion method.’ *Computer Physics Communications*, **185**(11), pp. 2885–2892.
- [83] Kusner, R. & J. M. Sullivan [1996]. ‘Comparing the weaire-phelan equal-volume foam to kelvin’s foam.’ *Forma*, **11**(3), pp. 233–242.
- [84] König, K. [2019]. *Digitale Bildkorrelation unter ultraviolettem Licht*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität des Saarlandes.
- [85] König, K. [2019]. *Optimierung des Speckleprozesses für Digitale Bildkorrelation*. Seminararbeit, Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität des Saarlandes.

- [86] Lava, P., S. Coppeters, Y. Wang, P. V. Houtte & D. Debruyne [2011]. ‘Error estimation in measuring strain fields with DIC on planar sheet metal specimens with a non-perpendicular camera alignment.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **49**(1), pp. 57 – 65.
- [87] Lecompte, D., A. Smits, S. Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. V. Hemelrijck & A. Habraken [2006]. ‘Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **44**(11), pp. 1132 – 1145.
- [88] Lefebvre, L.-P., J. Banhart & D. C. Dunand [2008]. ‘Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments.’ *Advanced engineering materials*, **10**(9), pp. 775–787.
- [89] Li, J., J. Berglund, F. Auris, A. Hanna, J. Vallhagen & K. Åkesson [2018]. ‘Evaluation of photogrammetry for use in industrial production systems.’ In *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 414–420.
- [90] Lionello, G. & L. Cristofolini [2014]. ‘A practical approach to optimizing the preparation of speckle patterns for digital-image correlation.’ *Measurement Science and Technology*, **25**(10), pp. 107001.
- [91] Liu, J., S. Yu, X. Zhu, M. Wei, S. Li, Y. Luo & Y. Liu [2008]. ‘Effect of Al₂O₃ Short Fiber on the Compressive Properties of Zn–22Al Foams.’ *Materials Letters*, **62**(21-22), pp. 3636–3638.
- [92] Lorson, P. [2021]. *Untersuchung von Maßstabeffekten in Nickel/Polyurethan Hybridschäumen*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität des Saarlandes.
- [93] Luhmann, T. [2010]. ‘Close range photogrammetry for industrial applications.’ *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **65**(6), pp. 558 – 569. ISPRS Centenary Celebration Issue.
- [94] Luhmann, T., S. Robson, S. Kyle & J. Boehm [2013]. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter.
- [95] Luksch, J., A. Jung, C. Pauly, C. Motz, F. Mücklich & F. Schaefer [2019]. ‘Effect of Pretreatment on Interface Stability and Morphology of Ni/Al Hybrid Foams by in situ Microcantilever Fracture Experiment.’ *Procedia Structural Integrity*, **17**, pp. 206–213.
- [96] MacLean, K. J. [2007]. *A Geometric Analysis of the Platonic Solids and Other Semi-Regular Polyhedra*, volume 1. Loving Healing Press.

- [97] Marzouk, Y. M., H. N. Najm & L. A. Rahn [2007]. ‘Stochastic spectral methods for efficient bayesian solution of inverse problems.’ *Journal of Computational Physics*, **224**(2), pp. 560–586.
- [98] Matzke, E. B. [1946]. ‘The Three-Dimensional Shape of Bubbles in Foam - An Analysis of the Role of Surface Forces in Three-Dimensional Cell Shape Determination.’ *American Journal of Botany*, **33**(1), pp. 58–80.
- [99] McCormick, N. & J. Lord [2010]. ‘Digital image correlation.’ *Materials today*, **13**(12), pp. 52–54.
- [100] Meller, M. [1925]. ‘Produit métall. pour l’obtention d’objets laminés, moulés ou autres.’ *et Proc. Pour sa Fabrication*.
- [101] Mohan, A. & S. Poobal [2018]. ‘Crack detection using image processing: A critical review and analysis.’ *Alexandria Engineering Journal*, **57**(2), pp. 787–798.
- [102] Nemat-Nasser, S. & M. Hori [2013]. *Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials*. Elsevier.
- [103] Nieh, T., K. Higashi & J. Wadsworth [2000]. ‘Effect of Cell Morphology on the Compressive Properties of Open-cell Aluminum Foams.’ *Materials Science and Engineering: A*, **283**(1-2), pp. 105–110.
- [104] Pan, B. [2013]. ‘Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **51**(10), pp. 1161–1167.
- [105] Pan, B., A. Asundi, H. Xie & J. Gao [2009]. ‘Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **47**(7-8), pp. 865–874.
- [106] Pan, B., B. Wang & G. Lubineau [2016]. ‘Comparison of subset-based local and FE-based global digital image correlation: Theoretical error analysis and validation.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **82**, pp. 148–158.
- [107] Pan, B., H. Xie, Z. Wang, K. Qian & Z. Wang [2008]. ‘Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns.’ *Optics express*, **16**(10), pp. 7037–7048.
- [108] Pan, B., L. Yu & D. Wu [2013]. ‘High-Accuracy 2D Digital Image Correlation Measurements with Bilateral Telecentric Lenses: Error Analysis and Experimental Verification.’ *Experimental Mechanics*, **53**(9), pp. 1719–1733.

- [109] Park, J., S. Yoon, T.-H. Kwon & K. Park [2017]. ‘Assessment of speckle-pattern quality in digital image correlation based on gray intensity and speckle morphology.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **91**, pp. 62–72.
- [110] Parker, D., J. Bussink, H. T. van de Grampel, G. W. Wheatley, E.-U. Dorf, E. Ostlinning, K. Reinking, F. Schubert, O. Jünger & R. Wagener [2012]. *Polymers, High-Temperature*. American Cancer Society.
- [111] Patterson, E. A., E. Hack, P. Brailly, R. L. Burguete, Q. Saleem, T. Siebert, R. A. Tomlinson & M. P. Whelan [2007]. ‘Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **45**(5), pp. 550–564.
- [112] Petch, N. [1953]. ‘The cleavage strength of polycrystals.’ *Journal of the Iron and Steel Institute*, **174**, pp. 25–28.
- [113] Pitter, M. C., C. W. See & M. G. Somekh [Mar 2001]. ‘Subpixel microscopic deformation analysis using correlation and artificial neural networks.’ *Opt. Express*, **8**(6), pp. 322–327.
- [114] Plateau, J. [1873]. *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires*, volume 2. Gauthier-Villars.
- [115] Prabhu, B., C. Suryanarayana, L. An & R. Vaidyanathan [2006]. ‘Synthesis and Characterization of High Volume Fraction Al–Al₂O₃ Nanocomposite Powders by High-Energy Milling.’ *Materials Science and Engineering: A*, **425**(1-2), pp. 192–200.
- [116] PROF. DR. PETER BERGER [2016]. *Aspekte der Körpergeometrie*.
- [117] Rappel, H., L. A. Beex, J. S. Hale, L. Noels & S. Bordas [2020]. ‘A tutorial on bayesian inference to identify material parameters in solid mechanics.’ *Archives of Computational Methods in Engineering*, **27**(2), pp. 361–385.
- [118] Rappel, H., L. Wu, L. Noels & L. A. A. Beex [2019]. ‘A bayesian framework to identify random parameter fields based on the copula theorem and gaussian fields: Application to polycrystalline materials.’ *Journal of Applied Mechanics*, **86**(12), pp. 121009.
- [119] Reis, M., M. Adorna, O. Jiroušek & A. Jung [2019]. ‘Improving DIC Accuracy in Experimental Setups.’ *Advanced Engineering Materials*, **21**(7), pp. 1900092.

- [120] Rieke-Zapp, D., W. Tecklenburg, J. Peipe, H. Hastedt & C. Haig [2009]. ‘Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras — Comparing mechanical stabilisation versus parameterisation.’ *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**(3), pp. 248–258.
- [121] Riveiro, B., J. Caamaño, P. Arias & E. Sanz [2011]. ‘Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs.’ *Automation in Construction*, **20**(4), pp. 380–388.
- [122] Rösler, J., H. Harders & M. Bäker [2019]. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Springer-Verlag.
- [123] Rueden, C. T., J. Schindelin, M. C. Hiner, B. E. DeZonia, A. E. Walter, E. T. Arena & K. W. Eliceiri [2017]. ‘ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data.’ *BMC bioinformatics*, **18**(1), pp. 529.
- [124] Sachs, J. [1996]. ‘Digital image basics.’ *Digital Light & Color*, **1999**.
- [125] Scheffler, M. & P. Colombo [2006]. *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. John Wiley & Sons.
- [126] Schmid, B., J. Schindelin, A. Cardona, M. Longair & M. Heisenberg [2010]. ‘A high-level 3D visualization API for Java and ImageJ.’ *BMC bioinformatics*, **11**(1), pp. 1–7.
- [127] Schnell, W., D. Gross & W. Hauger [2013]. *Technische Mechanik: Band 2: Elastostatik*, volume 216. Springer-Verlag.
- [128] Schreier, H. W., J. R. Braasch & M. A. Sutton [2000]. ‘Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation.’ *Optical engineering*, **39**(11), pp. 2915–2922.
- [129] Schreier, H. W. & M. A. Sutton [2002]. ‘Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions.’ *Experimental Mechanics*, **42**(3), pp. 303–310.
- [130] Schüler, P., R. Frank, D. Uebel, S. F. Fischer, A. Bührig-Polaczek & C. Fleck [2016]. ‘Influence of Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Behaviour of Open Cell AlSi7Mg0.3 Foams on Different Lengthscales.’ *Acta Materialia*, **109**, pp. 32–45.
- [131] Seibert, H. [2017]. *Multiaxiale, thermomechanische Charakterisierung und Modellierung poröser Elastomere*. Ph.D. thesis.

- [132] Sjö Dahl, M. & L. Benckert [1993]. ‘Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy.’ *Applied Optics*, **32**(13), pp. 2278–2284.
- [133] Su, Y., Q. Zhang, X. Xu & Z. Gao [2016]. ‘Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **86**, pp. 132–142.
- [134] Sun, Y., R. Burgueño, A. J. Vanderklok, S. A. Tekalur, W. Wang & I. Lee [2014]. ‘Compressive Behavior of Aluminum/Copper Hybrid Foams under High Strain Rate Loading.’ *Materials Science and Engineering: A*, **592**, pp. 111 – 120.
- [135] Sutton, M., C. Mingqi, W. Peters, Y. Chao & S. McNeill [1986]. ‘Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis.’ *Image and Vision Computing*, **4**(3), pp. 143 – 150.
- [136] Sutton, M., J. Yan, V. Tiwari, H. Schreier & J. Orteu [2008]. ‘The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **46**(10), pp. 746 – 757.
- [137] Sutton, M. A., J. J. Orteu & H. Schreier [2009]. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Science & Business Media.
- [138] Theuwissen, A. J. [2006]. *Solid-state imaging with charge-coupled devices*, volume 1. Springer Science & Business Media.
- [139] Van Rietbergen, B., A. Odgaard, J. Kabel & R. Huiskes [1996]. ‘Direct mechanics assessment of elastic symmetries and properties of trabecular bone architecture.’ *Journal of biomechanics*, **29**(12), pp. 1653–1657.
- [140] vico imaging [June 2018]. *Datenblatt VICO DTCM110-16,6*.
- [141] Wang, W., R. Burgueño, J.-W. Hong & I. Lee [2013]. ‘Nano-deposition on 3-D Open-cell Aluminum Foam Materials for Improved Energy Absorption Capacity.’ *Materials Science and Engineering: A*, **572**, pp. 75 – 82.
- [142] Weaire, D. & R. Phelan [1994]. ‘A counter-example to Kelvin’s conjecture on minimal surfaces.’ *Philosophical Magazine Letters*, **69**(2), pp. 107–110.
- [143] Weiner, S. & H. D. Wagner [1998]. ‘The Material Bone: Structure-mechanical Function Relations.’ *Annual review of materials science*, **28**(1), pp. 271–298.
- [144] Wocker, M. M. [2014]. *Konzeption und Konstruktion eines Versuchsstands zur mikromechanischen Materialcharakterisierung zellulärer Materialien*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität des Saarlandes.

-
- [145] Yaofeng, S. & J. H. Pang [2007]. ‘Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images.’ *Optics and Lasers in Engineering*, **45**(9), pp. 967 – 974.
- [146] Zhang, Z., J. Ding, X. Xia, X. Sun, K. Song, W. Zhao & B. Liao [2015]. ‘Fabrication and Characterization of Closed-cell Aluminum Foams with Different Contents of Multi-walled Carbon Nanotubes.’ *Materials & Design*, **88**, pp. 359–365.
- [147] Zhou, J., S. Allameh & W. Soboyejo [2005]. ‘Microscale Testing of the Strut in Open Cell Aluminum Foams.’ *Journal of materials science*, **40**(2), pp. 429–439.
- [148] Zhou, P. & K. E. Goodson [2001]. ‘Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation.’ *Optical Engineering*, **40**(8), pp. 1613–1620.

A

Veröffentlichungen, Vorträge und Poster

A.1 Veröffentlichungen und Proceedings

- Reis, M., König, K., Diebels, S., & Jung, A. (2020). Micromechanical Characterisation of Ni/PU Hybrid Foams. *Materials*, 13(17), 3746.
- Bleistein, T., Reis, M., Cheng, X., Redenbach, C., Diebels, S., & Jung, A. (2020). Multiscale microsphere modelling of open-cell metal foams enriched by statistical analysis of geometric parameters. *Mechanics of Materials*, 142, 103295.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2020). DIC Measurements on Single Struts of Ni/PU Hybrid Foams—Damage Behaviour During Three-Point Bending. In *Developments and Novel Approaches in Biomechanics and Metamaterials* (pp. 423-430). Springer, Cham.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2019). "Noise reduction for DIC measurements." *PAMM* 19.1: e201900077.
- Reis, M., Adorna, M., Jiroušek, O., & Jung, A. (2019). Improving DIC accuracy in experimental setups. *Advanced Engineering Materials*, 21(7), 1900092. Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2019). Noise reduction for DIC measurements. *PAMM*, 19(1), e201900077.

- Ramsthaler, F., Kettner, M., Potente, S., Verhoff, M. A., Seibert, H., Reis, M., ... & Roland, M. (2019). Hammer blows to the head. *Forensic science international*, 301, 358-370.
- Jung, A., Luksch, J., Felten, M., Reis, M., Sory, D. R., Pullen, A. D., ... & Solomos, G. (2017). Investigation of strain-rate effects in Al foams and Ni/Al hybrid foams on different scales. *PAMM*, 17(1), 317-318.

A.2 Vorträge

- Reis, M., Beex, L.A.A., & Jung A. (2021). Virtual Lab for Stochastic Simulation of Ni/PU Hybrid Foams, WINTER SCHOOL DRIVEN ON 26-29TH JANUARY 2021, Universität Luxemburg, Online Workshop.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2019). Ni/PU hybrid foam struts tensile testing and stress calculation, 12. Workshop Kontinuumsmechanik, Schwarzenborn, Deutschland.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2019). Full Field Strain Measurements on Single Struts of a Ni/PU Hybrid Foam, 8. GACM, Kassel, Deutschland.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2019). DIC Measurements on Single Struts of a Ni/PU Hybrid Foam Damage Behavior during Three-Point Bending, IConSom 2019, Rom, Italien.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2019). Noise reduction for DIC measurements and single strut testing, 90. Gamm Jahrestagung, Wien, Österreich.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2018). Investigation of stochastic noise in DIC measurements, Doktorandentag, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland.
- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A. (2018). Stochastic noise in experiments and first 3 point bending tests on single struts, 11. Workshop Kontinuumsmechanik, Söllerhaus, Hirschegg, Österreich.

A.3 Poster

- Reis, M., Diebels, S., & Jung, A.(2018).Investigation of stochastic noise in DIC measurements, Doktorandentag der Naturwissenschaftlich Technischen Fakultät NT der Universität des Saarlandes, 14. November 2018, Saarbrücken.