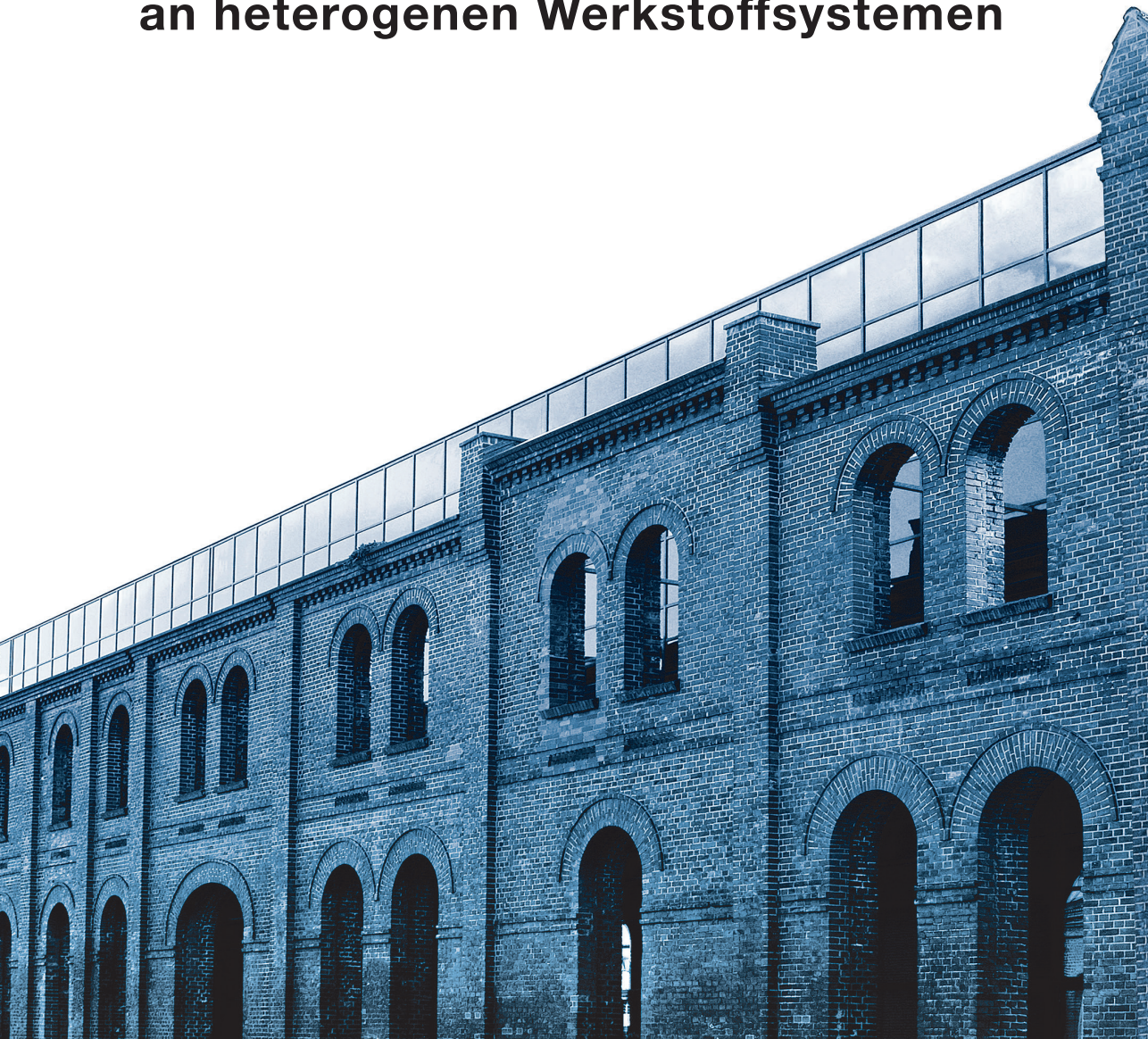


Christoph Skotarek

# Optische Verformungsmessung an heterogenen Werkstoffsystemen



**Christoph Skotarek**

**Optische Verformungsmessung an  
heterogenen Werkstoffsystemen**

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Angelika Brückner-Foit  
Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:  
Prof. Dr.-Ing. Angela Ries  
Prof. Dr.-Ing. habil. Kurt Steinhoff

Tag der mündlichen Prüfung: 4. November 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2019  
ISBN 978-3-7376-0822-0 (print)  
ISBN 978-3-7376-0823-7 (e-book)  
DOI: 10.17170/kobra-202002271027

© 2020, kassel university press, Kassel

Printed in Germany

---

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner 6-jährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet „Qualität und Zuverlässigkeit“ am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel. Daher gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Instituts, die mir während dieser Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Besonders danken möchte ich Frau Prof. Brückner-Foit, die es mir ermöglicht hat in Ihrem Fachgebiet arbeiten und forschen zu können. Die Verknüpfung aus praktischer und selbstständiger Arbeit im Labor kombiniert mit den fachlichen Diskussionen auf der anderen Seite habe ich sehr genossen. Im praktischen Bereich wurden mir sehr viele Freiheiten eingeräumt und die notwendigen finanziellen Ressourcen bereitgestellt, was mir viel Freude bereitete. Das kritische Hinterfragen der Ergebnisse führte zwar teilweise zu einer gewissen Reibungswärme, hat mich und den Erkenntnisgewinn aber deutlich vorangebracht, wofür ich sehr dankbar bin.

Herrn Prof. Rienäcker danke ich für seine Tätigkeit als Gutachter im Rahmen des Promotionsverfahrens, sowie Frau. Prof. Ries und Herrn Prof. Steinhoff für die Bereitschaft in der Prüfungskommission mitzuwirken.

Nur durch die tatkräftige Unterstützung der studentischen Hilfskräfte Luisa Hunold und Benno Matheis (späterer Arbeitskollege) konnte diese Dissertation erarbeitet werden. Ich habe die Zusammenarbeit sehr genossen. Auch wenn meine Anforderungen an die Ergebnisse oft sehr hoch waren, ließen sich beide nicht entmutigen und lieferten beste Resultate. Für diese tolle gemeinsame Zeit und die herausragende Unterstützung möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Was wäre eine Praktische Arbeit ohne gute Prüfkörper und sehr präzise Prüfaufbauten? Deswegen gilt ein besonderer Dank den Kollegen Thorsten, Jörg und Dirk aus der universitären Mechanikwerkstatt, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Durch die schnelle und zuverlässige Arbeit auf der einen Seite, aber vor allem auch die sehr gute Stimmung auf der anderen Seite hat mir die Zusammenarbeit sehr viel Spaß gemacht.

Natürlich möchte ich auch meinen direkten Arbeitskollegen danken. Hervorheben möchte ich John Steger für die tatkräftige Unterstützung am REM und die erfrischenden Diskussionen, sowohl fachlich als auch privat.

Abschließender Dank gilt meiner ehemaligen Freundin Theresa Brede, die mich in der Anfangszeit der Dissertation tatkräftig unterstützte und meiner jetzigen Freundin Daniela Langendorf, für den herausragenden Support und die Motivation in der Endphase.

---

# Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung der optischen Verformungsmessung auf heterogene Werkstoffsysteme untersucht, wobei dieses Verfahren auf unterschiedlichen Skalenebenen eingesetzt wird.

Als erstes wird die digitale Bildkorrelation zur Temperaturüberwachung bei Hochtemperaturzugversuchen bis 350 °C an 0,6 mm dünnen lotplattierten Aluminiumprüfkörpern eingesetzt. Flächige Dehnungsauswertungen innerhalb des Prüfbereichs bestätigen die homogene Temperaturverteilung, wobei die Temperatur gleichzeitig mit einer Thermographiekamera und Thermoelementen bestimmt wurde. Mit diesem Aufbau lässt sich das dynamische Reckgleiten (PLC-Effekt) bei Raumtemperatur im Detail erfassen. Es können einzelne lokale Dehnungsbänder aufgelöst und deren Verlauf beschrieben werden.

Im zweiten Anwendungsfall wird das Schädigungsverhalten von eigenverstärkten Polypropylen Kunststoffverbunden untersucht. Lokale Dehnungskonzentrationen unter quasi statischer Zugbelastung der Prüfkörper liefern Aufschluss über mögliche Schadstellen. Die Verformungsmessungen auf der Gewebestruktur der 2-lagigen Prüfkörper beschreiben das mechanische Verhalten des Verbundes, während die mikroskopische Analyse der Verschiebungen am Querschnitt eines 16-lagigen Mikrozugprüfkörpers die Interaktion der Gewebelagen zueinander beschreiben. Damit lassen sich darüber verschiedene versagenskritische Bereiche darstellen. Begleitende REM-Untersuchungen an belasteten und unbelasteten Prüfkörpern liefern sowohl Schwachstellen des mehrschichtigen Verbundes als auch die Art der Schädigung.

Abschließend werden mittels optischer Verformungsmessungen die Eigenschaften der Verbundzonen von Einpresskontakten beschrieben. Da die Verbundzonen optisch nicht zugänglich sind, erfolgt eine indirekte Messung der Schädigung über die Antwort des mechanischen Systems. Durch den Einsatz virtueller Extensometer an allen kritischen Stellen des Verbundes lässt sich ein charakteristischer Verschiebungsverlauf ableiten, dem die Schädigung entnommen werden kann. Hochoflösende REM-Untersuchungen an definiert belasteten Prüfkörpern ermöglichen die Bestimmung der Risse in der Kontaktzone. Basierend auf den Experimenten wurde in einer parallelen Arbeit von K. Markstädter ein Simulationsmodell aufgebaut. Durch die Verwendung von im CT gescannten Pins und optisch vermessener Hülsendurchmesser im Simulationsmodell lässt sich das reale mechanische Verhalten simulieren und mit den dazugehörigen Experimenten abgleichen. Die Kombination aus Experiment und Simulation führt zur vollständigen Beschreibung des mechanischen Systems und zur Bestimmung des Schädigungsbeginns.

---

# Abstract

The present work investigates the application of optical deformation measurement to heterogeneous material systems with the method being used at different scale levels.

First, digital image correlation is used for temperature monitoring in high-temperature tensile tests with testing temperature up to 350 °C and 0.6 mm thin solder-plated aluminum specimens. The homogeneous strain field in the gauge section indicates that a homogeneous temperature distribution is reached corresponding to a thermographic analysis and measurements with thermocouples. This set-up allows visualizing the dynamic strain ageing effect (PLC effect) at room temperature. Individual local strain bands can be resolved and their development under loading can be described.

In the second application, the damage behavior of self-reinforced polypropylene plastic composites is investigated. Local strain concentrations in the test specimens under quasi static tensile load provide information about possible damaged areas. The deformation measurements on the fabric structure of the 2-layer test specimens describe the mechanical behavior of the composite. The microscopic analysis of the displacements on the cross-section of a 16-layer miniaturized specimen, on the other hand, describes the interaction of the fabric layers with each other and allows identifying critical regions. Accompanying SEM investigations give more details of the damage process under tensile loading.

Finally, the properties of the contact zones of press-fit contacts are characterized by means of optical deformation measurements. Since the contact zones are not optically accessible, the damage is measured indirectly via the response of the mechanical system. By using virtual extensometers at all critical points of the composite, a characteristic displacement curve can be derived from which the damage accumulation process can be deduced. High-resolution SEM examinations on loaded test specimens allow the determination of cracks in the contact zone. Based on the experiments, a simulation model was developed in a parallel thesis by K. Markstädter. By using CT scanned pins and optically measured borehole diameters in the simulation model the actual mechanical behavior can be simulated and compared with the corresponding experiments. The combination of experiment and simulation leads to the complete description of the mechanical system and to the determination of the onset of the damage.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der digitalen Bildkorrelation</b>	<b>3</b>
2.1 Funktionsprinzip . . . . .	4
2.1.1 Randbedingungen und Anwendungsgrenzen . . . . .	7
2.1.2 Triangulation . . . . .	9
2.1.3 Bewertung des Grauwertmusters . . . . .	11
2.2 Anwendungsbeispiele . . . . .	12
2.2.1 Globale Analysen . . . . .	12
2.2.2 Lokale Analysen . . . . .	15
2.3 Ziel der eigenen Arbeiten . . . . .	16
<b>3 Hochtemperaturversuche an dünnen Aluminiumblechen</b>	<b>18</b>
3.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen . . . . .	18
3.1.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau . . . . .	19
3.1.2 Aufbau der Ausrichteinheit . . . . .	21
3.1.2.1 Konstruktion Grundgestell . . . . .	22
3.1.2.2 Temperaturmessung und Erprobung des Versuchsaufbaus	23
3.1.3 Probenvorbereitung und Versuchsbedingungen . . . . .	26
3.2 Versuchsergebnisse . . . . .	28
3.2.1 Festigkeiten . . . . .	28
3.2.2 Optische Verformungsmessung . . . . .	30
3.3 Diskussion . . . . .	34
3.3.1 Vergleich Messdaten mit Werkstoffdaten des Grundwerkstoffs . . . .	34
3.3.2 Diskussion lokales Dehnungsfeld . . . . .	36

<b>4</b>	<b>Schädigungsverhalten eines eigenverstärkten Polypropylen Komposites</b>	<b>38</b>
4.1	Material und Probenpräparation . . . . .	38
4.1.1	Material . . . . .	38
4.1.2	Probenpräparation . . . . .	40
4.1.3	Probendefinition . . . . .	42
4.1.4	Versuchsdurchführung . . . . .	45
4.2	Versuchsergebnisse . . . . .	45
4.2.1	Makroskopische Analyse . . . . .	46
4.2.2	Mesoskopische Analyse . . . . .	49
4.2.2.1	Verformungsanalyse der Gewebelagen . . . . .	54
4.2.3	Mikroskopische Analyse . . . . .	57
4.2.3.1	REM-Untersuchung unbelasteter Prüfkörper . . . . .	57
4.2.3.2	REM-Untersuchung belasteter Prüfkörper . . . . .	60
4.2.3.3	Tomographie . . . . .	62
4.3	Diskussion . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Eigenschaften der Verbundzonen bei Einpresskontakten (Press-Fit-Kontakten)</b>	<b>67</b>
5.1	Versuchsmethodik . . . . .	69
5.1.1	Messaufbau mit Leica Mikroskop . . . . .	70
5.1.2	Probengeometrien . . . . .	73
5.1.3	Präparation für Längs- und Querschliffe . . . . .	75
5.1.4	Methodik Verformungsanalyse . . . . .	78
5.1.5	Vorversuche . . . . .	79
5.1.6	Simulationsmodell . . . . .	84
5.2	Versuchsergebnisse Flexx-Pin mit offener Pinspitze . . . . .	85
5.2.1	Abhängigkeit des Messsignals der Querkzugprobe von der Einpressrichtung des Pins . . . . .	85
5.2.2	Reproduzierbarkeit der Messung mit der Querkzugprobe . . . . .	90
5.2.3	Nachweis von Rissen in der Kaltverschweißung . . . . .	93
5.2.3.1	Beschreibung der Kaltverschweißung . . . . .	93
5.2.3.2	Verfahren und Probenpräparation . . . . .	96
5.2.4	Aufgeschnittene Querkzugprobe . . . . .	97
5.2.5	Laterale Belastung . . . . .	100
5.3	Versuchsergebnisse EloPin mit geschlossener Pinspitze . . . . .	101
5.3.1	Definition Messprozedur . . . . .	101
5.3.2	Versuchsergebnisse . . . . .	102

5.4	Diskussion . . . . .	104
5.4.1	Optische Messung im Vergleich mit anderen Prüfverfahren . . . . .	104
5.4.2	Vergleich Experiment-Simulation . . . . .	106
5.4.2.1	Materialparameter . . . . .	106
5.4.2.2	Kontaktspannung . . . . .	106
5.4.2.3	Kohäsivzone . . . . .	108
5.4.2.4	Kontaktflächen und Schädigungsentwicklung . . . . .	109
5.4.2.5	Schlussbemerkung . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>112</b>
<b>A</b>	<b>Anhang zu Kapitel 3.2</b>	<b>113</b>
<b>B</b>	<b>Anhang zu Kapitel 5.1.5</b>	<b>114</b>
<b>C</b>	<b>Anhang zu Kapitel 5.4.2.1</b>	<b>117</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Grauwertintensitäten einzelner Pixel einer 8-Bit-Aufnahme [FK16] . . . . .	4
2.2	(a) Referenzbild eines stochastischen Musters, Kreuze stellen die Mittelpunkte der Subsets, welche beispielhaft eingezeichnet sind (Quadrate), dar; (b) verzerrtes Muster und Subsetfeld [FK16] . . . . .	5
2.3	(a) Grauwertverteilung innerhalb eines Subsets bestehend aus 7x7 Pixeln im unbelasteten Zustand; (b) verdreht und verschobenes Subset [FK16] . .	6
2.4	Schematische Darstellung der Verschiebungs- (a) und Dehnungsberechnung (b) an einem Subset gemäß [Sut+00] . . . . .	6
2.5	Variation des Grauwertmusters in Abhängigkeit der Messfläche [Gmb16] .	7
2.6	Schematische Darstellung der Überlappung zweier 3x3 Facetten (rote/grüne Quadrate) bei Schrittweite von 2 Pixeln . . . . .	8
2.7	Verzerrte Abbildung eines Messobjektes bei der Verwendung eines Stereokamerasystems [SW17] . . . . .	9
2.8	Grundprinzip der Triangulation im zweidimensionalen Fall am Beispiel eines Stereokamerasystems [Wio01] . . . . .	10
2.9	(a) Stereokamerasystem bei dem zwei Kameras fest miteinander verbunden sind; (b) Kalibrierobjekt mit einem eindeutigen Punktmuster [FK16] . .	11
2.10	Schlechte Ausleuchtung am Beispiel einer metallischen CT-Probe [Gmb17b]	11
2.11	Intensitätsverteilung der Grauwerte über alle Pixel [Gmb17b] . . . . .	12
2.12	Gute Intensitätsverteilung der Grauwerte des analysierten Bildes [Gmb17b]	12
2.13	Darstellung der Phasenumwandlung durch die Dehnungsverteilung (links) bzw. Bestimmung der lokalen Dehngeschwindigkeit [Sch12] . . . . .	13
2.14	Messung von Zug- und Scherdehnungen in der Umgebung des oberen und unteren Risses [Cho+17] . . . . .	14
2.15	Vergleich der gemessenen Dehnungen an der Oberfläche zwischen (a) Experiment und (b) Simulation [Zha+08] . . . . .	15

3.1	Nicht proportionaler Zugprüfkörper für dünne Bleche der Form H nach DIN 50125 [Dina] . . . . .	19
3.2	Darstellung des Einflusses der relativen Induktorneigung zum Prüfkörper auf den Kopplungsabstand . . . . .	20
3.3	Aufnahme bzw. Ausrichteinheit für den Außenschwingkreis inkl. Induktor . . . . .	21
3.4	CAD-Modell des Prüfaufbaus; Integration des Grundgestells in die Zugprüfmaschine, inkl. der Ausrichteinheit für die optische Messtechnik und induktive Erwärmung [Mat18] . . . . .	22
3.5	Versuchsaufbau; Grundgestell inkl. Ausrichteinheiten in eine MTS Criterion integriert . . . . .	23
3.6	(a) schematische Darstellung des Messfeldes von 50 mm und der Positionierung der Thermolemente; (b) realer Versuchsaufbau [Mat18] . . . . .	24
3.7	Temperaturverlauf einer Aufheizkurve eines 0,6 mm dicken Aluminiumbleches auf 250 °C mit anschließender Haltezeit von 180 s und abschließender Abkühlkurve . . . . .	25
3.8	Messrauschen des optischen Messsignals bei Temperaturen von 22 °C (Raumtemperatur), 150 °C, 250 °C und 350 °C . . . . .	26
3.9	Schwarz weiß kodierter Aluminiumprüfkörper zur optischen Verformungsmessung bei erhöhten Temperaturen . . . . .	27
3.10	Übersicht der Festigkeitskennwerte in Abhängigkeit der Temperatur bei 0,6 mm dünnem Aluminiumblech . . . . .	29
3.11	Abflachen des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs in Abhängigkeit der Temperatur bei 0,6 mm dünnem Aluminiumblech . . . . .	29
3.12	Kleiner werdender linear-elastischer Bereich in Abhängigkeit der Temperatur 30	
3.13	Darstellung von Deformationsbändern durch optische Verformungsmessung bei unterschiedlichen Verformungszuständen . . . . .	31
3.14	Korrelation von Spannungsabfällen mit lokalen Dehnungserhöhungen . . . . .	32
3.15	Wachsen eines Gleitbandes und der sich damit ausbreitenden Zunahme der Oberflächenverformung in alle drei Raumrichtungen . . . . .	33
3.16	Dehnungsverteilung bei unterschiedlichen Temperaturen von 22 °C (Raumtemperatur), 150 °C und 250 °C und einer globalen Dehnung von 5 % . . . . .	34
3.17	Versagen des Prüfkörpers bei Raumtemperatur innerhalb eines Gleitbandes durch Scherbruch, ohne signifikante Einschnürung . . . . .	36
4.1	(a) Schematische Darstellung des Schachbrettmusters einer Pure-Leinwandbindung, (b) Schnittansicht in Kett- und Schussrichtung, (c) dreidimensionale Prinzipdarstellung [Kow+11] . . . . .	39

---

4.2	Schematische Darstellung der einzelnen Phasen des Heißkompaktierprozesses . . . . .	39
4.3	Gegenüberstellung der Fräsflächen ohne Kühlung (a) und mit geeigneter Kühlung (b) . . . . .	41
4.4	Sandwichaufbau zur Herstellung von Zugprüfkörpern aus 2-lagigem PURE-Komposit . . . . .	41
4.5	Vergleich zweier Mikrotomschnitte an einem 200 MPa belasteten Pure-Verbund; links bei Raumtemperatur und rechts gekühlt nahe der Glasübergangstemperatur geschnitten . . . . .	42
4.6	Schematische Darstellung des Prüfaufbaus mit eingespanntem Prüfkörper zur Analyse der Verschiebung in der Seitenansicht . . . . .	43
4.7	Mikrozugprobengeometrie zur Charakterisierung der Kompositverbunde mit hoher Ortsauflösung . . . . .	43
4.8	links: Delamination der Spannflächen; rechts: optimierte Probengeometrie nach Abb. 4.7 mit mittigem Versagen des Prüfkörpers . . . . .	44
4.9	Zugprobengeometrie zur Charakterisierung von Kompositverbunden nach DIN EN ISO 527-4 [Dinb] . . . . .	44
4.10	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Mikrozugproben . . . . .	45
4.11	Spannungs-Dehnungs-Verläufe der entwickelten Mikrozugprobe (Abb. 4.7) . . . . .	46
4.12	Wahrscheinlichkeitsplott der Zugfestigkeiten $R_m$ von 12 Versuchen basierend auf einer Normalverteilung . . . . .	47
4.13	Wahrscheinlichkeitsplott der logarithmierten Zugfestigkeiten $R_m$ von 12 Versuchen basierend auf einer linearisierten Weibull-Verteilung . . . . .	48
4.14	Darstellung von Dehnungslokalisierungen an 2-lagigen Pure Kompositen auf der Gewebeoberfläche . . . . .	49
4.15	Bildung von quer zur Belastungsrichtung liegenden linearen lokalen Vertiefungen . . . . .	50
4.16	Korrelation lokaler Verformungskonzentrationen in Belastungsrichtung mit lokalen Vertiefungen in Dickenrichtung und Visualisierung der entsprechenden Querdehnung eines 2-lagigen Komposits . . . . .	51
4.17	Darstellung von Dehnungslokalisierungen an 16-lagigen Pure Kompositen auf der Gewebeoberfläche . . . . .	52
4.18	Lokalen Dehnungskonzentrationen in 90°-orientierten Bändchen bei einer Spannung von 225 MPa und einer Dehnung von 8,46 % . . . . .	53
4.19	Bildung von lokalen Dehnungskonzentrationen neben der Verschweißung der Bändchen an einem Kreuzungspunkt des Gewebes bei einem 16-lagigen PURE-Verbundwerkstoff . . . . .	54

4.20 Schematischer Aufbau des Komposits und Entstehung stark gekrümmter Bändchen durch Missorientierung der Gewebelagen . . . . .	55
4.21 Gewebelagen Aufbau eines 16-lagigen PURE-Komposits in der Seitenansicht . . . . .	56
4.22 Anfängliche Dehnungslokalisierung an den Bändchengrenzen und mit zunehmender Belastung starke Dominanz von Dehnungserhöhungen an den Anfangs- und Endpunkten verschweißter 0°-Lagen (horizontale Belastungsrichtung) . . . . .	57
4.23 Übersicht der Zwickel im Bereich der Zusammenführung zweier gleich orientierter Bändchen; (a) vollständig gefüllte Zwickel; (b) teilweise gefüllte Zwickel; (c) gefüllte, nicht gefüllte und teilweise gefüllte Zwickel . . . . .	58
4.24 Konzentration von drei nicht gefüllten Zwickeln an einer kurzen schrägen Verschweißung zweier 0°-Lagen . . . . .	59
4.25 Längsrisse entlang der 0°-Lage, außerhalb der Verschweißung . . . . .	60
4.26 Schädigung an einer kurzen schrägen Verschweißung zweier 0°-Lagen mit nicht gefüllter Zwickelkonzentration nach einer Belastung von 200 MPa . . . . .	61
4.27 Kohäsives Versagen verschweißter Bändchen im Scherversuch/Peeltest [Alc+07a] . . . . .	61
4.28 Schematische Darstellung einer symmetrischen Schädigung an einem 0°-orientieren Bändchen in einem Gewebeverbund . . . . .	62
4.29 Schädigung eines gefüllten Zwickels nach einer Belastung von 200 MPa . . . . .	62
4.30 Darstellung der einzelnen Bändchenlagen im Volumen und teilkristalliner Strukturen in einem 16-lagigen PURE-Komposit . . . . .	63
4.31 Defektstrukturen im Inneren eines unbelasteten 16-lagigen Pure-Komposits . . . . .	64
4.32 Gegenüberstellung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme eines zwei- und 16-lagigen PURE Komposits; deutliche Reduktion der Steifigkeit des 16-lagigen Verbundes . . . . .	65
5.1 Darstellung der beiden geprüften Pingeometrien; (a) FlexPin mit offener Pinspitze, (b) EloPin mit geschlossener Pinspitze . . . . .	67
5.2 Schematische Darstellung eines Querschliffs der Press-Fit-Verbindung und Kennzeichnung der 4 Kontaktbereiche . . . . .	68
5.3 Schematischer Aufbau eines eingepressten Pins inkl. dem Schichtaufbau des Multimaterialsystems am Beispiel eines Pins mit geschlossener Pinspitze [Kim14] . . . . .	69
5.4 Prüfaufbau zur Bestimmung der Verschiebungen an eingepressten Press-Fit-Verbindungen . . . . .	70

---

5.5	Mögliche Belastungsszenarien der Press-Fit-Verbindung . . . . .	72
5.6	Belastungsarten der Press-Fit-Verbindung; (a) Zugversuch mit Querzugprobe, (b) laterale Belastung der Kontaktierung . . . . .	72
5.7	CAD-Modell der Probeneinspannung für (a) die Zugversuche und (b) die laterale Belastung im Zug-Druckmodul . . . . .	73
5.8	Probengeometrie der Querzugprobe . . . . .	74
5.9	Leiterplattenhalbzeug mit eingepresstem Pin, aus der die Querzugprobe (weiß markiert) ausgefräst wird . . . . .	74
5.10	Querzugprobe mit (a) längs und (b) quer zur Lastrichtung eingepresstem Pin . . . . .	75
5.11	Prüfkörper zur lateralen Belastung der Press-Fit-Verbindung . . . . .	75
5.12	Längsschliff eines Press-Fit-Kontakts . . . . .	77
5.13	Querschliff eines Press-Fit-Kontakts . . . . .	77
5.14	Feste Kontaktpunkte zwischen den Pinschenkeln nach dem Einpressen . . . . .	78
5.15	Risse in der Platine laufen in die Kaltverschweißung . . . . .	80
5.16	Mittiger Bruch der Querzugprobe bei längs eingepresstem Pin . . . . .	80
5.17	Messung des Dehnungsfelds an der Pinspitze bei gleichzeitiger Verformungsmessung der Platine . . . . .	81
5.18	Einfluss der Einpressrichtung des Pins auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Querzugprobe . . . . .	82
5.19	Vergleich des Platinenbasierten Materials Isola IT 180 (Normprüfkörper) mit dem realen Platinenwerkstoffverbund (Querzugprobe) . . . . .	83
5.20	Schematischer Aufbau des Simulationsmodells; Darstellung der kaltverschweißten Zonen nach der Relaxation und der Spannungsverteilung im eingepressten Zustand . . . . .	85
5.21	Messpunkte zur Bestimmung der Verschiebungen zwischen quer eingepresstem Pin und der Hülse . . . . .	86
5.22	Verschiebungen an der Pinspitze mit quer eingepresstem Pin in Korrelation mit dem globalen Spannungs-Dehnungs-Verlauf . . . . .	86
5.23	Signifikant unterschiedliche Verschiebungsverläufe zwischen der Pinspitze und der Hülse bei quer eingepresstem Pin . . . . .	87
5.24	Messpunkte zur Bestimmung der Verschiebungen zwischen längs eingepresstem Pin und der Hülse, sowie die Spitzen der Pinschenkel zueinander . . . . .	88
5.25	Verschiebungen an der Pinspitze mit längs eingepresstem Pin in Korrelation mit dem globalen Spannungs-Dehnungs-Verlauf . . . . .	89

5.26	Prinzipiell gleichbleibender Verschiebungsverlauf an der Pinspitze mit längs eingepresstem Pin bei unterschiedlichen Verschiebungsverläufen zwischen Pin und Hülse . . . . .	90
5.27	Abweichung der Kraft-Weg-Verläufe in Abhängigkeit der unterschiedlichen Ausgangsmesslängen . . . . .	90
5.28	Eindeutig definierte Relativverschiebungen auf längs eingepresstem Pin und Hülse . . . . .	91
5.29	Reproduzierbare Messergebnisse bei definierter Versuchsführung und eindeutiger Auswertung . . . . .	92
5.30	Starke Porosität in der Kontaktzone zwischen Pin und Hülse . . . . .	93
5.31	Darstellung der chemischen Elemente (b) Kupfer, (c) Nickel und (d) Zinn im Bereich der porösen Kaltverschweißung (a) . . . . .	94
5.32	Quantitative Auswertung der EDX-Analyse im Bereich der Kaltverschweißung zwischen Pin und Hülse . . . . .	94
5.33	Ausprägung der ovalen Anlageflächen an einem Flexx-Pin . . . . .	95
5.34	Pinspitzenverschiebung zur Schädigungsanalyse der Kaltverschweißung .	96
5.35	Schematische Darstellung des Einklebens . . . . .	97
5.36	Risse in der porösen Kaltverschweißung bei einer Pinspitzenöffnung von ca. 7 $\mu\text{m}$ . . . . .	97
5.37	Schließen der Pinspitze nach dem Öffnen der Hülse . . . . .	98
5.38	Korrelation des Schließens der Pinspitze nach dem Öffnen der Hülse mit dem Verschiebungsverlauf von Pinspitze und Hülse in einem Zugversuch .	99
5.39	Ungeschädigte poröse Kaltverschweißung nach dem Öffnen der Hülse und der Zielpräparation bis zur Kontaktzone . . . . .	99
5.40	Kraft-Weg-Hysteresen bei lateraler Belastung, bei Auslenkungen von $\pm 10 \mu\text{m}$ - $\pm 40 \mu\text{m}$ mit jeweils drei 3 Zyklen . . . . .	100
5.41	Virtuelle Extensometer zwischen den Pinschenkeln des EloPins und der Hülse, sowie auf der Hülse . . . . .	101
5.42	Verschiebungsverläufe zwischen längs eingepresstem EloPin und Hülse im Bereich der Kaltverschweißungen . . . . .	102
5.43	Grundsätzlich gleiches Verhalten der Verschiebungen an den Kaltverschweißungen bei längs eingepresstem EloPin, trotz anfänglicher Abweichungen . . . . .	103
5.44	Variation des kritischen Punktes der Steigungsänderung von ca. 28 $\mu\text{m}$ bis 48 $\mu\text{m}$ bei längs eingepresstem EloPin . . . . .	104
5.45	Änderung des Widerstands im Fretting-Versuch bei unterschiedlichen Verschiebungen von $\pm 10,3 \mu\text{m}$ bis $\pm 48 \mu\text{m}$ [Han+01] . . . . .	105

---

5.46	Verifizierung der simulativen Einpressverläufe an den realen Einpresskurven [Mar19] . . . . .	107
5.47	Reduktion der gemittelten Kontaktnormalspannung nach dem Öffnen der Hülse [Mar19] . . . . .	107
5.48	Einfluss des kohäsiven Modells auf die simulative Verschiebungsbewegung an der Pinspitze im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen [Mar19] . . . . .	108
5.49	Simulierte Anlageflächen an den Pinschenkeln im eingepressten Zustand [Mar19] . . . . .	109
5.50	Ausprägung der Schädigung an den Kontaktflächen des rechten Pinschenkels bei unterschiedlichen Belastungszuständen [Mar19] . . . . .	110
B.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm des galvanisierten Pinbasismaterials . .	114
B.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Platinengrundmaterials IT 180 von Göttele in Kettrichtung . . . . .	115
B.3	Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Platinengrundmaterials IT 180 von Göttele in Schussrichtung . . . . .	115
B.4	Spannungsverteilung im Pin und in der Platine nach dem Einpressvorgang ohne Berücksichtigung der Relaxation . . . . .	116
C.1	Auszug aus dem Datenblatt des Pinbasismaterials . . . . .	117

# Tabellenverzeichnis

3.1	Werkstoffzusammensetzung . . . . .	28
3.2	Vergleich der Festigkeitswerte vor und nach der Lötsimulation mit Werten aus der Literatur, gemessen bei Raumtemperatur . . . . .	35
A.1	Übersicht der einzelnen Messwerte für die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Aluminiumlegierung . . . . .	113

# Kapitel 1

## Einleitung

Bildgebende Verfahren haben mit der Digitalisierung eine neue Bedeutung in der Werkstofftechnik gewonnen. Während Bilder in analoger Form meist nur eine beschreibende Darstellung des Werkstoffzustands ermöglichen, können digitale Bilder quantitativ ausgewertet werden. Dies ist besonders dann wertvoll, wenn Zustände verglichen werden sollen, da sich aus der Veränderung eines Pixelmusters eine Fülle von Informationen ableiten lassen. Die Verformungsanalyse mittels digitaler Bildkorrelation (DIC) ist ein solches quantitatives bildgebendes Verfahren, das seit den ersten Analysen [Chu+85] stetig zugenommen hat. So ergibt aktuell eine wissenschaftliche Suche nach dem Stichwort „digital image correlation“ bei Web of Science über 15000 Treffer. Eine Übersicht der wichtigsten Entwicklungen ist in [Sut+09] zu finden. Die Grundidee der Messmethode ist es, Veränderungen eines Pixelmusters unter mechanischer Belastung den mechanisch induzierten Belastungen zuzuschreiben. Kommerzielle Systeme wie die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Systeme GOM ARAMIS [Gmb16] und LaVision Davis [Gmb17a] enthalten entsprechende Algorithmen zur Mustererkennung und Musterkorrelation. Die Aufgabe des Wissenschaftlers, der solche Analysen verwenden möchte, ist es, für experimentelle Randbedingungen zu sorgen, so dass die gemessenen Verformungen auch einem definierten werkstoffmechanischen Problem zugeordnet werden können. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten. Die untersuchten Systeme spiegeln die Bandbreite der Möglichkeiten wider, die die digitale Bildkorrelation in der Werkstoffmechanik eröffnet. Im ersten Fall, der Prüfung von extrem dünnen Blechen aus einer Al-Legierung bei hohen Temperaturen, dient die DIC-Analyse zunächst hauptsächlich der Kontrolle des Temperaturfeldes. Im zweiten Beispiel, der Beschreibung des Schädigungsverhaltens eines eigenverstärkten Faserverbundkunststoffs aus Polypropylen, stehen hingegen Lokalisierungen des Dehnungsfeldes im Vordergrund, da diese klare Hin-

weise auf Gefügeänderungen liefern. Der dritte Anwendungsfall, in dem die Kontaktbereiche einer Einpressverbindung im Fokus stehen, illustriert, wie durch die Platzierung virtueller Extensometer optische nicht zugängliche Phänomene analysiert werden können, wenn gleichzeitig ein vollständiges mechanisches Modell zur Verfügung steht.

In der vorliegenden Arbeit werden, nach einer kurzen Einführung in die Methode der digitalen Bildverarbeitung, die drei oben beschriebenen Beispiele ausführlich diskutiert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Versuchsmethodik, mit der die jeweiligen Randbedingungen präzise und reproduzierbar festgelegt werden sollen. Eine kurze Zusammenfassung schließt die Arbeit ab.

## Kapitel 2

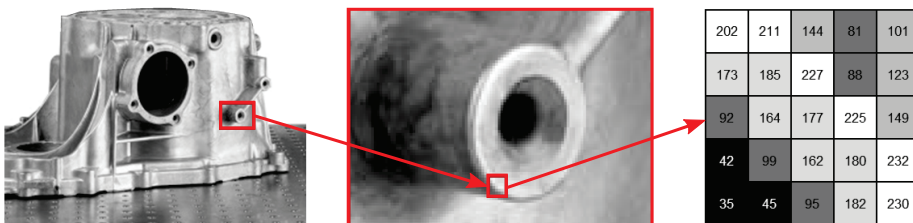
# Grundlagen der digitalen Bildkorrelation

Das optische Messen von Parametern wie Dehnungen und Verschieben hat sich zu einem anerkannten experimentellen Verfahren entwickelt. Um die Auswirkungen geometrischer und werkstoffseitiger Unstetigkeiten auf das Dehnungsverhalten an Bauteil- und Prüfkörperoberflächen beurteilen zu können, werden Verfahren verwendet, die es ermöglichen Oberflächendehnungen an mehreren Stellen des Prüfobjektes zeitgleich durchzuführen. Für solche Anwendungen kommen bevorzugt optische Messverfahren wie holografische Interferometrie [Gab49], Speckle-basierte Interferometrie [AE72; Lee70], Shearografie [Hun82; Lee+04] und Moiré-basierte Verfahren [DP70; The69] zum Einsatz. Jedoch leiden die genannten Techniken unter zwei erheblichen Einschränkungen. Das sind zum einen die hohen Stabilitätsanforderungen bei den Interferometrischen Verfahren und den damit verbundenen Limitierungen bezüglich der Anwendbarkeit auf die jeweilige Forschungsumgebung. Zum anderen ist die Selektion der Daten und die Diskretisierung der relevanten Ergebnisse sehr zeitaufwändig [Chu+85]. Basierend auf diesen optischen Verfahren und den damit verbundenen Nachteilen wurde mit der immer besser werdenden digitalen Datenverarbeitung die digitale Bildkorrelation (engl. Digital Image Correlation, DIC) entwickelt [Men81; PR82; Sut+83]. Die DIC ist ein Auswerteverfahren zur Messung von Verschiebungen und Dehnungen basierend auf digitalen Bilddaten. Als Grundlage für die softwareunterstützte Bestimmung der Verschiebungen bzw. Dehnungen dienen Bilddaten, die den unverformten und verformten Zustand eines Prüfkörpers oder Bauteils abbilden. Dabei wird zwischen der In-Plane Deformationsmessung von planaren Oberflächen (2D-DIC) und der Messung der allgemeinen Verformung sowohl von planaren als auch gekrümmten Flächen in den drei Raumrichtungen unterschieden [Sut+00].

## 2.1 Funktionsprinzip

Voraussetzung für die digitale Bildkorrelation ist eine eindeutige und gleiche Identifikation von Bildpunkten an der Oberfläche des Prüfobjektes, die eine signifikante Signalamplitude aufweisen [Gmb16]. Bei dieser eindeutigen Bemusterung der Oberflächen wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden, das ist einerseits ein regelmäßiges [Sch+03] und andererseits ein stochastisches Muster [Sut+00]. Zudem werden die beiden Mustertypen noch untergliedert in die Auswertung der Messbereiche über Referenzpunktmarken und einer Subset [Gmb17b] - bzw. Facettenauswertung [Gmb16]. Die Anwendung der Korrelation basierend auf unregelmäßigen Strukturen hat den Vorteil, dass natürliche Bauteiloberflächen als Referenzmuster genutzt werden können.

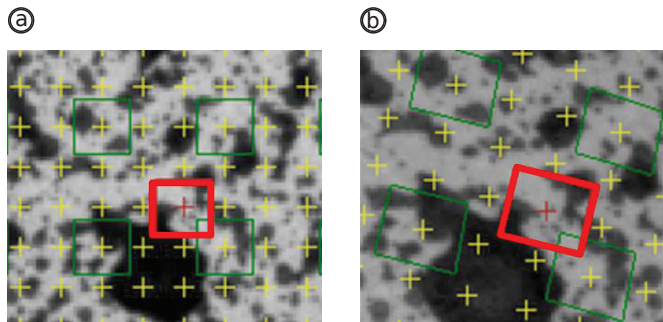
Da für die späteren Verformungsmessungen (Kap. 3, 4 und 5) Systeme verwendet werden, die auf der Analyse stochastischer Muster basieren und die Auswertung über Subsets erfolgt, wird dieses Verfahren im Folgenden näher beschrieben. Als Messsysteme kommen das ARAMIS der Firma GOM und ein Stereomikroskop in Verbindung mit der DaVis Software der Firma LaVision zum Einsatz. Zur Auswertung der stochastischen Grauwertbilder wird die besprenkelte Oberfläche in einzelne Subsets untergliedert. Dadurch lassen sich die kleinen Bildausschnitte (Subsets) eindeutig identifizieren. Sie werden im Ausgangszustand (Referenzbild) definiert, sind quadratisch und können zum Beginn der Auswertung softwareseitig in der Größe angepasst werden (Abb. 2.2). Dementsprechend enthält ein Subset eine definierte Anzahl an Pixeln, denen wiederum ein eindeutiger Grauwert zugeordnet ist. Bei einer Helligkeitsauflösung von 8 Bit (GOM ARAMIS) wird zwischen 256 Grauwerten unterschieden (Abb. 2.1), wohingegen bei einer Auflösung von 12 Bit (LaVision) die Grauwerte in 4096 Intensitäten unterteilt sind.



**Abbildung 2.1:** Grauwertintensitäten einzelner Pixel einer 8-Bit-Aufnahme [FK16]

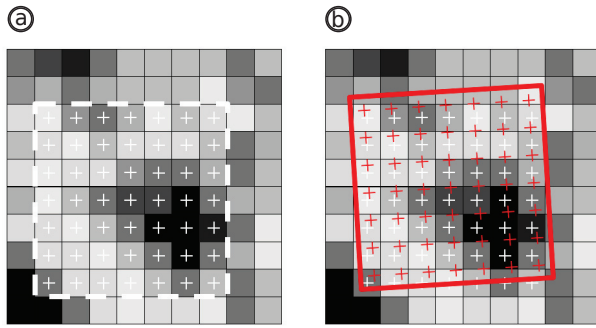
Die Verschiebungsberechnung erfolgt durch die Identifikation gleicher Bildbereiche zwischen verformtem und unverformtem Zustand über die Helligkeitsverteilung innerhalb eines Subsets (Abb. 2.2). Um die verformten Bildbereiche mit den unverformten zu korre-

lieren gibt es unterschiedliche adaptive Ansätze, wie z.B. die Methode der kleinsten Fehlerquadrate [Gru85] oder die Maximierung der Cross-Correlations-Koeffizienten [Fra+91]. Dabei besteht die grundlegende Annahme, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen dem Bezugsbild und dem Verformungszustand besteht. Die Korrelationsfunktion liefert eine Aussage über die Ähnlichkeit der beiden Messsignale. Darüber lässt sich die näherungsweise Übereinstimmung zweier Subsets innerhalb eines definierten Suchbereichs an verschiedenen Abtaststellen und differierenden Verschiebungen bestimmen [Gmb16].



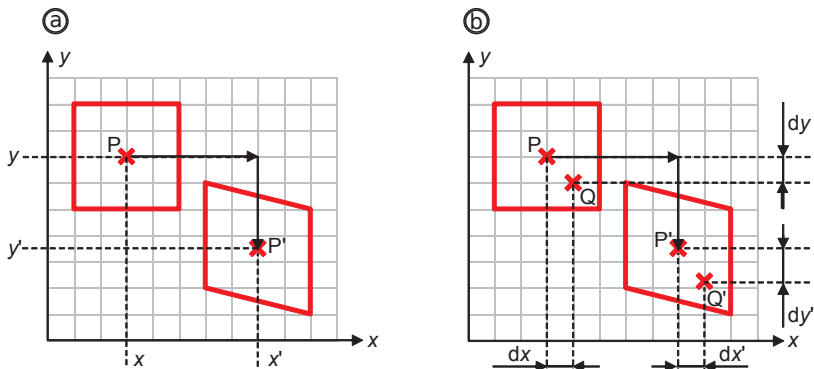
**Abbildung 2.2:** (a) Referenzbild eines stochastischen Musters, Kreuze stellen die Mittelpunkte der Subsets, welche beispielhaft eingezeichnet sind (Quadrate), dar; (b) verzerrtes Muster und Subsetfeld [FK16]

Durch eine Subpixel-Interpolation werden Helligkeitsersatzwerte berechnet, mit Hilfe derer die Position des Subsets iterativ zur maximalen geometrischen Übereinstimmung im Subpixelbereich gebracht wird (Abb. 2.3). Dabei werden die Helligkeiten der Pixel innerhalb eines Subsets durch eine stetige Funktion abgebildet [Gor13]. Typische Subpixel-Interpolationen basieren auf linearen und quadratischen Funktionen sowie Splines [Pan+09; Sut+00]. Dementsprechend findet die Korrelation der Subsets zwischen verformtem und unverformtem Zustand nicht anhand der Helligkeitswerte der Pixel statt, sondern anhand der interpolierten Grauwertfunktion. Durch diese rechnerische Methode können Verschiebungen bei optimalen Bedingungen mit einer Genauigkeit von unter 1/50stel der Pixelgröße ermittelt werden [FK16; Sut+00].



**Abbildung 2.3:** (a) Grauwertverteilung innerhalb eines Subsets bestehend aus 7x7 Pixeln im unbelasteten Zustand; (b) verdreht und verschobenes Subset [FK16]

Die errechneten Verschiebungen beziehen sich auf den Mittelpunkt eines Subsets. Somit lassen sich durch die vorher beschriebene Methode die Verschiebungen subpixelgenau für jedes Subset vektoriell beschreiben. Auch bei der Dehnungsberechnung liegt der Bezugspunkt in der Mitte des Subsets. Um die Dehnungen innerhalb eines Subsets zu messen, wird die dreidimensionale Abstandsänderung eines Punktes Q zum Subsetmittelpunkt P zwischen unverformtem (P, Q) und verformtem (P', Q') Zustand bestimmt (Abb. 2.4). Auf Grundlage der ermittelten Dehnung zwischen den beiden genannten Punkten werden die Subsetdehnungen bestimmt. Dies erfolgt mit einem iterativen Näherungsverfahren, z.B. dem Newton-Raphson-Verfahren, das für alle Punkte des Subsets konvergiert [Gmb16; Lan03; VK98].



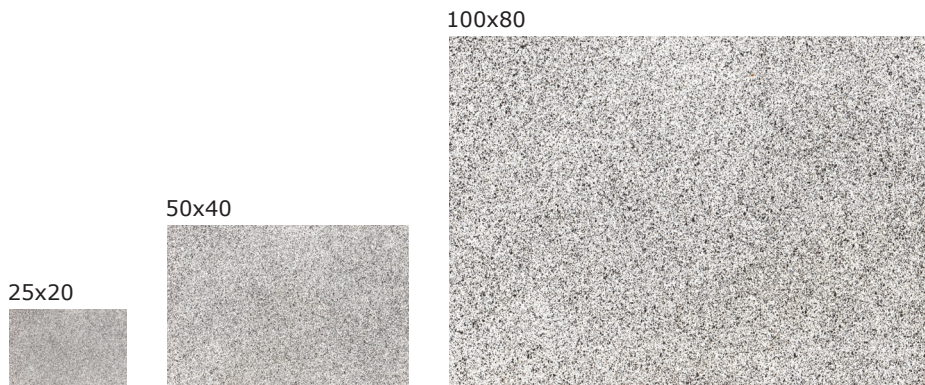
**Abbildung 2.4:** Schematische Darstellung der Verschiebungs- (a) und Dehnungsberechnung (b) an einem Subset gemäß [Sut+00]

Bei der Auswertung einer Bildserie mittels der vorher beschriebenen Methode wird zwi-

schen einer direkten und einer iterativen Korrelation unterschieden. Bei der direkten Korrelation werden alle Bilder auf das Referenzbild bezogen, was eine sehr hohe Genauigkeit der Ergebnisse liefert. Die iterative Korrelation bezieht sich bei der Berechnung immer nur auf das vorherige Bild. Zum Schluss erfolgt eine Aufsummierung aller Einzelergebnisse. Diese Auswertemethode hat den Vorteil, dass sich Verschiebungen an Oberflächen mit großen Verformungen, Topographie- und Kontraständerungen berechnen lassen. Ein sehr großer Nachteil gegenüber der direkten Korrelation ist jedoch, dass sich Fehler einzelner Berechnungsschritte aufsummieren und somit das Maß der Genauigkeit reduziert wird [Gor13].

### 2.1.1 Randbedingungen und Anwendungsgrenzen

Um für die digitale Bildkorrelation unter der Verwendung eines stochastischen Musters ein bestmögliches Signal zu liefern, ist ein Muster mit maximaler Amplitude der Grauwerte notwendig. Dementsprechend muss das Muster einen möglichst hohen Kontrast aufweisen [Gmb16]. Innerhalb eines Subsets sollte eine näherungsweise gleichverteilte und ausgeprägte Grauwertverteilung vorliegen. Die Feinheit des Musters richtet sich nach dem verwendeten Messvolumen.



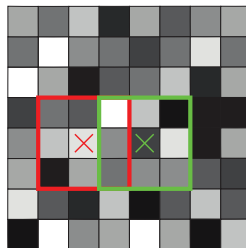
**Abbildung 2.5:** Variation des Grauwertmusters in Abhängigkeit der Messfläche [Gmb16]

In der Praxis haben sich drei bis vier Kontrastpunkte pro Subset als ideal erwiesen [Gmb16]. Eine solch zufällige Musterbeschaffenheit ist zum Teil durch natürliche, unregelmäßige Oberflächen gegeben, oder lässt sich durch eine entsprechende Oberflächenbehandlung erzeugen. Ein Beispiel für natürliche Muster sind z.B. die Fasern in einem Verbundkunststoff. Im Bereich der Oberflächenbehandlung führt z.B. das Aufbringen von

Farben/Lacken und Partikeln aber auch ein gezieltes chemisches Anätzen des Prüfkörpers zur gewünschten Musterqualität.

Zu raue oder unebene Oberflächen können für die DIC problematisch sein, wenn nicht der gesamte Messbereich gleichmäßig fokussiert werden kann und somit einige Bereiche unscharf abgebildet werden. Raue und reflektierende Oberflächen erfordern eine gleichmäßige Beleuchtung, um eine Schattenbildung und punktuelle Spiegelungen zu vermeiden, da diese Effekte das Ergebnis stark beeinflussen können [Gor13]. Ein Schatten würde sich durch eine Bewegung des Prüfkörpers bei feststehender Beleuchtung ebenfalls mit verschieben bzw. verändern, was zu verfälschten Verschiebungen aufgrund der Schattenbewegung führt. Um Reflektionen zu reduzieren, können Polarisationsfilter sowohl für die Beleuchtung als auch die Kameraobjektive eingesetzt werden.

Neben der Probenoberfläche stellt der Bildeinzug einen weiteren bedeutenden Einfluss auf die Korrelation dar. Dazu muss der gesamte Signalweg berücksichtigt werden, der sich aus der für die Bildaufnahme eingesetzten Optik, dem Bildsensor, der Analog-Digital-Wandlung und die Speicherung des Bildmaterials zusammensetzt. Je nach verwendeter Optik, kann es zu Verzerrungen des Bildes kommen. Solche Abbildungsfehler sind mit ausreichend korrigierten Optiken oder softwareseitig fast vollständig korrigierbar [Sun+97].

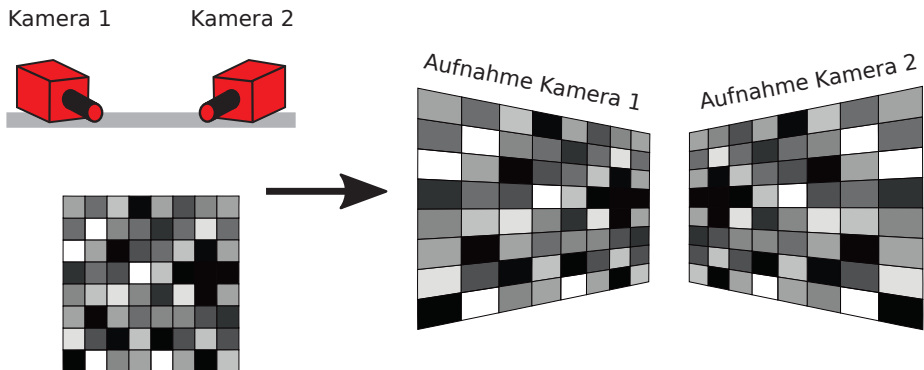


**Abbildung 2.6:** Schematische Darstellung der Überlappung zweier 3x3 Facetten (rote/grüne Quadrate) bei Schrittweite von 2 Pixeln

Einen weiteren Einfluss auf das Ergebnis der DIC stellt die Subsetgröße dar [Zei13]. Bei der Verwendung von großen Subsets werden die lokalen Dehnungen über einen größeren Bereich gemittelt, woraus eine Reduktion der Ortsauflösung resultiert. Mit kleineren Subsets lassen sich hingegen lokale Veränderungen besser auflösen, jedoch steigt auch das Messrauschen [YP07]. Ein weiterer Parameter der die Auflösung der Messwerte beeinflusst ist die Schrittweite, die den geometrischen Abstand der Subsets zueinander angibt (Abb. 2.6). Je kleiner die Schrittweite ist, desto mehr Verschiebungsvektoren wer-

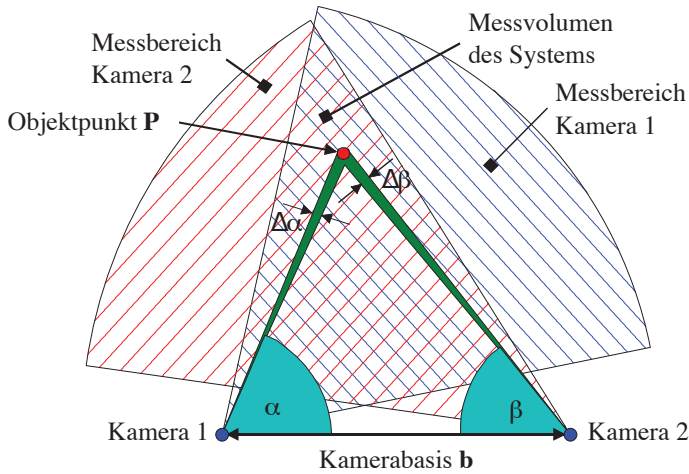
den berechnet. Jedoch steigt damit die Rechendauer. Somit ist ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Auflösung zu finden.

## 2.1.2 Triangulation



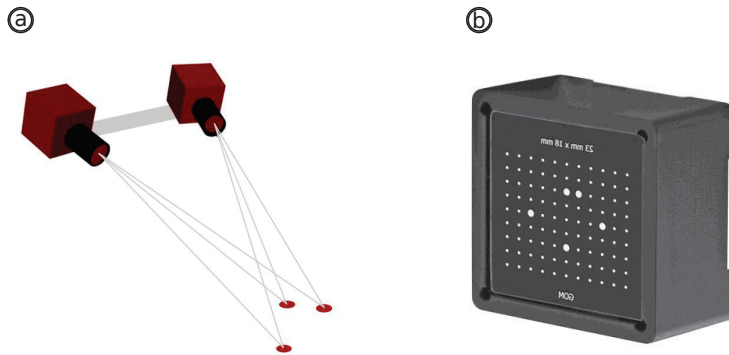
**Abbildung 2.7:** Verzerrte Abbildung eines Messobjektes bei der Verwendung eines Stereokamerasystems [SW17]

Werden für die Erfassung der Bilddaten Sensoren mit zwei oder mehr fest miteinander verbundenen Kameras verwendet, so kann anhand eines zeitgleich aufgenommenen Bildpaares die Bestimmung der 3D-Koordinaten erfolgen. Zur Berechnung der punktuellen 3D-Koordinaten wird beispielsweise das Prinzip der Triangulation verwendet [Gmb16]. Im Falle eines Stereokamerasystems wird ein Punkt  $\mathbf{P}$  von zwei verschiedenen Kameras angepeilt 2.8. Daraus resultieren die beiden Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  mit den Genauigkeiten  $\Delta\alpha$  und  $\Delta\beta$ . Die Kamerabasis  $\mathbf{b}$  und die beiden Peilstrahlen bilden ein Dreieck, in dem alle Winkel und eine Seite bekannt ist [Wio01]. Somit lässt sich die Position des Objektpunkts  $\mathbf{P}$  relativ zu den beiden anderen Eckpunkten berechnen. Der Messbereich des Gesamtsystems setzt sich aus der Schnittmenge der Messbereiche der Einzelsysteme zusammen [Wio01].



**Abbildung 2.8:** Grundprinzip der Triangulation im zweidimensionalen Fall am Beispiel eines Stereokamerasystems [Wio01]

Durch die Verwendung eines Stereokamerasystems ist die Blickrichtung der einzelnen Kameras nicht mehr senkrecht zur Messfläche, wodurch der Messpunkt oder das Subset auf unterschiedliche Positionen in der Bildebene abgebildet wird (Abb. 2.7) [Jä05; SW17]. Diese Differenzstrecke wird als Parallaxe bezeichnet. Somit müssen die optischen Parameter beider Kameras in einer definierten Kalibrierprozedur bestimmt werden. Dafür werden Kalibrierobjekte eingesetzt, die ein eindeutig kodiertes Muster aufweisen und mindestens einen bekannten Maßstab enthalten (Abb. 2.9). Bei der Kalibrierung werden nacheinander mehrere Bildpaare von der Kalibriervorlage aufgenommen, wobei das Kalibrierobjekt aus unterschiedlichen Perspektiven im Bezug zum Stereokamerasystem eingemessen wird (verdreht, gekippt, In-Plane out of Plane). Mittels mathematischer Operationen wird aus den unterschiedlichen Kalibrierbildern ein Kalibriermodell des Kamerasystems inklusive der Kameraposition und der Verzerrungsparameter des Objektivs berechnet. Somit lässt sich für jeden identifizierten Subsetmittelpunkt eine eindeutige dreidimensionale Raumkoordinate bestimmen [FK16].



**Abbildung 2.9:** (a) Stereokamerasystem bei dem zwei Kameras fest miteinander verbunden sind; (b) Kalibrierobjekt mit einem eindeutigen Punktmuster [FK16]

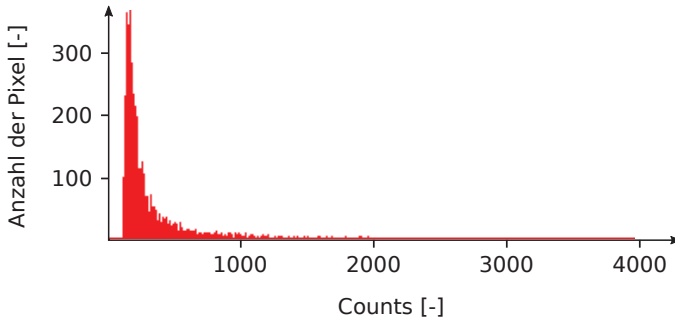
### 2.1.3 Bewertung des Grauwertmusters

Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, ist ein kontrastreiches Muster für die DIC zu verwenden. Gerade bei der Analyse natürlicher Oberflächen ist die Kontrastierung teilweise sehr schwierig, da z.B. metallische Oberflächen ohne eine gezielte Oberflächenbehandlung und angepasste Beleuchtung nur ein sehr geringes Spektrum an Grauwerten aufweisen (Abb. 2.10). Die Abstufungen der einzelnen Grauwerte wird im weiteren Verlauf in Counts angegeben.



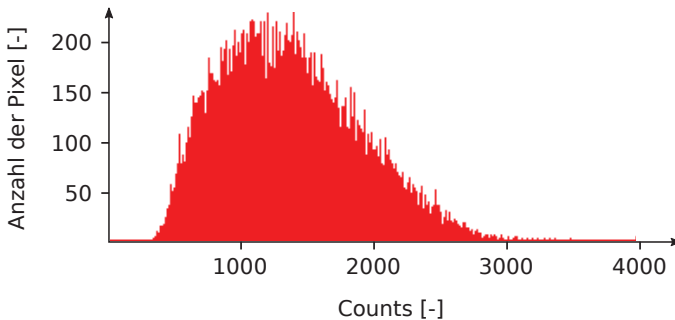
**Abbildung 2.10:** Schlechte Ausleuchtung am Beispiel einer metallischen CT-Probe [Gmb17b]

Für diese Aufnahme wurde eine 12-Bit-Kamera (4095 counts) verwendet. Eine Analyse der Grauwertstruktur aus Abbildung 2.10 zeigt, dass die Dynamik der Kamera nicht vollständig ausgenutzt wird (Abb. 2.11). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Grauwerte sehr dicht beieinander liegen und somit nur eine geringe Abstufung zwischen den Grauwerten vorhanden ist.



**Abbildung 2.11:** Intensitätsverteilung der Grauwerte über alle Pixel [Gmb17b]

Über gezielte Beleuchtungen und entsprechend präparierte Oberflächen lassen sich die Verteilung der Counts optimieren. Anzustreben ist, dass der Dynamikumfang der Kameras soweit wie möglich ausgeschöpft wird, ohne dabei in Sättigung zu gehen. Eine Überbelichtung kann durch ungünstige Beleuchtung oder reflektierende Bereiche auf der Oberfläche entstehen. In Abbildung 2.12 ist eine gute Verteilung der Counts angegeben, bei der ein breiter Bereich der Kameradynamik ausgeschöpft wird und über die Anzahl der Pixel recht gleichmäßig verteilt ist [Gmb17b].



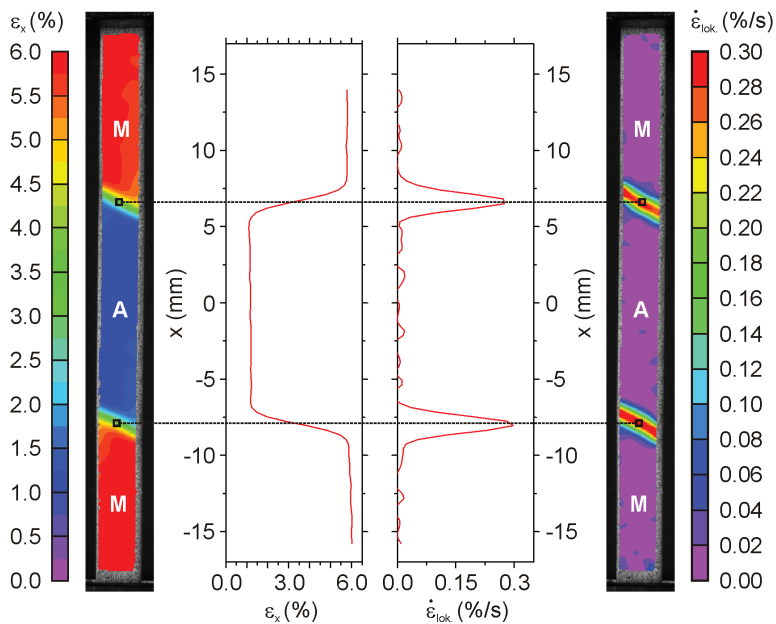
**Abbildung 2.12:** Gute Intensitätsverteilung der Grauwerte des analysierten Bildes [Gmb17b]

## 2.2 Anwendungsbeispiele

### 2.2.1 Globale Analysen

Die digitale Bildkorrelation findet bereits ein breites Anwendungsspektrum auf unterschiedlichen Skalenebenen, von der Analyse großer Brückenkonstruktionen [Bur+17] bis

hin zu Verformungsmessungen auf Mikrostrukturebene [Zha+08]. Mit der Grauwertkorrelation lassen sich an statisch und dynamisch belasteten Prüfkörpern oder Bauteilen flächige Analysen von Verschiebungen bzw. den daraus errechneten Dehnungen bestimmen. Basierend auf diesen Oberflächenanalysen, können z.B. Werkstoffkennwerte oder Materialeigenschaften ermittelt werden. Ein Beispiel für die Charakterisierung von Materialeigenschaften ist die in [Sch12] durchgeführte Untersuchung zur Martensitbildung und zum Martensitwachstum in NiTi-Formgedächtnislegierungen. Unter einachsiger Zugbelastung eines austenitischen Prüfkörpers kommt es bei einer kritischen Dehnung zu lokalen Phasenumwandlungen des anfänglichen Austenits in Martensit (Abb. 2.13). Es konnten die unterschiedlichen Umwandlungsverhalten zwischen Rund- und Flachproben gezeigt werden, und dass nur die Bereiche an der Umwandlungsfront zur makroskopischen Verformung beitragen, da dort die lokale Dehnrates größer Null ist (Abb. 2.13).

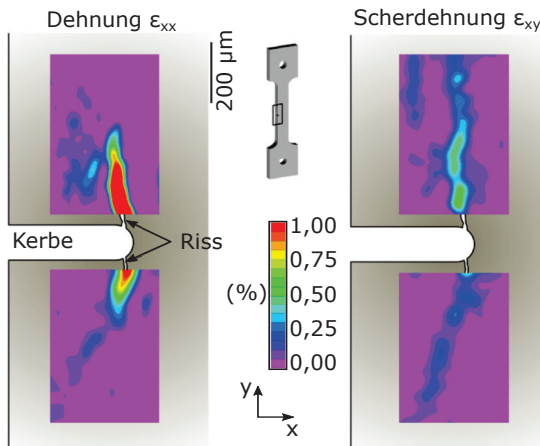


**Abbildung 2.13:** Darstellung der Phasenumwandlung durch die Dehnungsverteilung (links) bzw. Bestimmung der lokalen Dehngeschwindigkeit [Sch12]

Zudem verwendet Halim et al. [H.H+07] die berührungslose Dehnungsmesstechnik um das Scherbandverhalten bei der dynamischen Reckalterung (PLC-Effekt) während des Zugversuchs von AA5754-Blechproben zu untersuchen. Dabei wurden die Veränderung der PLC-Bänder in Abhängigkeit einer definierten Vordehnung untersucht. Vordehnungen ab 0,15 haben einen Einfluss auf die Art der PLC-Bänder. Aus den Untersuchungen folgt,

dass bei vorbelasteten Prüfkörpern keine Ausbildung von mehreren Verformungsbändern statt findet, sondern es kommt zu einer eindeutigen Ausbreitung eines einzelnen PLC-Bandes [H.H+07].

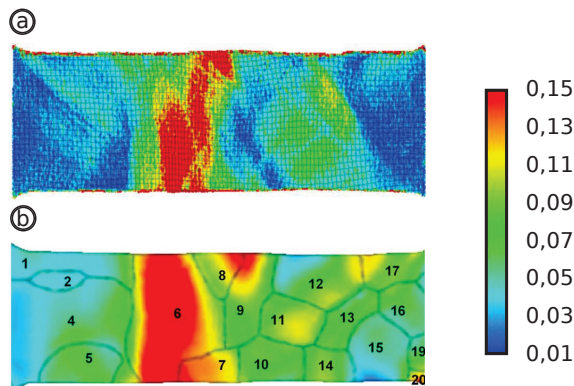
Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Untersuchung des Ermüdungsrisswachstums von unidirektional verstärkten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen(CFK) [Cho+17]. Dazu wird über flächige Verschiebungsmessungen die Entwicklung der Dehnungslokalisierungen an definiert gekerbten CFK-Prüfkörpern gemessen. Zum einen dienen die gemessenen Verschiebungsfelder zur Berechnung der Kräfte, die für einen Rissfortschritt notwendig sind. Zum anderen lässt sich aus den DIC-Analysen ableiten, dass sich innerhalb von lokalisierten Dehnungsbändern (Abb. 2.14), die parallel zu Faserorientierung verlaufen, eine Ansammlung an irreversiblen zyklischen Schäden bildet. Begleitende  $\mu$ CT-Analysen der detektierten Schadstellen zeigen, dass es während des Risswachstums zur Faserbrüchen kommt, die einen entscheidenden Einfluss auf die Verlangsamung des Risswachstums haben. Darüber hinaus ist durch REM-Untersuchungen der Rissoberflächen ein durch Faserbrüche dominierter Schadensverlauf nachgewiesen [Cho+17]. Anhand dieses Vorgehens wird deutlich, dass sich das Versagensverhalten unter Verwendung der digitalen Bildkorrelation und Kopplung weiterer Auswertemethoden eindeutig beschreiben lässt.



**Abbildung 2.14:** Messung von Zug- und Scherdehnungen in der Umgebung des oberen und unteren Risses [Cho+17]

## 2.2.2 Lokale Analysen

Zu den globalen Verformungsanalysen wird die digitale Bildkorrelation auch auf wesentlich kleineren Skalenebenen verwendet, um z.B. lokale Effekte auf Gefügeebene zu untersuchen. Z. Zhao et al. [Zha+08] beschäftigen sich diesbezüglich mit der plastischen Oberflächenverformung eines ein Korn dicken Aluminiumprüfkörpers. Bei diesen Untersuchungen wurden unter uniaxialer Zugbelastung der sehr dünnen Probe kristallplastische Verformungen mittels der DIC gemessen und anschließend mit einem entsprechenden Simulationsmodell abgeglichen (Abb. 2.15). Durch den Abgleich des Experiments mit der Simulation lassen sich die lokalen Dehnungen einzelnen Körnern zuordnen. So kann gefolgert werden, dass das Korn, welches sich über die gesamte Probenbreite erstreckt, sehr weich ist und dass die fehlenden Korngrenzen förderlich für die Verformungslokalisierung sind [Zha+08]. Dieses Vorgehen veranschaulicht zudem, dass die digitale Bildkorrelation auch zur Verifikation von numerischen Simulationen verwendet werden kann.



**Abbildung 2.15:** Vergleich der gemessenen Dehnungen an der Oberfläche zwischen (a) Experiment und (b) Simulation [Zha+08]

Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz der digitalen Bildkorrelation zur Beschreibung des Ermüdungsrisswachstums in Ni-basierten polykristallinen Superlegierungen [Luc+18]. Dazu wurde in Rissverschleißexperimenten die relative Verschiebung der Rissflanken unter Verwendung virtueller Extensometer gemessen. Somit lässt sich die Rissöffnung für unterschiedliche Belastungszustände beschreiben. Diese experimentellen Ergebnisse dienen dem Vergleich mit einem kristallplastischen Modell, bei denen das Risswachstum simuliert wurde [Luc+18].

Da die lokalen Dehnungen im Bereich der Rissspitze einen entschiedenen Einfluss auf die Rissausbreitung haben, wurden diese Dehnungsfelder mit der DIC von Zeismann [Zei13]

näher untersucht. Diese Analysen erfolgten an einem Ermüdungsriss in einem thermo-mechanisch umgeformten Vergütungsstahl 51CrV4. Aus den Verformungsmessungen resultierte, dass der Rissfortschritt eine starke Abhängigkeit von Druckbelastung hat. Darüber hinaus ließ sich eine starke Schubdehnungsabhängigkeit des Rissfortschritts basierend auf den hochauflösenden flächigen Dehnungsauswertungen nachweisen [Zei13].

## 2.3 Ziel der eigenen Arbeiten

Im Fokus dieser Arbeit steht die Anwendung der digitalen Bildkorrelation unter definierter mechanischer Belastung zur Ermittlung kritischer Größen bei schwierigen Randbedingungen. Dazu werden unterschiedliche Themenfelder bearbeitet, die jeweils ihre eigenen Herausforderungen mit sich bringen. Das ist zum einen die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lotplattierten Aluminiumblechen unter uniaxialer Belastung bei erhöhten Temperaturen bis zu 350 °C. Dabei wurde die digitale Bildkorrelation zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens verwendet, aber auch als Kontrollelement zur Analyse der Temperaturverteilung in den dünnen Blechen. Die Schwierigkeit lag bei diesen Experimenten in der gleichmäßigen Temperierung der Prüfkörper über die gesamte Versuchsdauer und deren damit verbundene geringe Steifigkeit. Als kritische Größen galt es, die Zugfestigkeiten und das dynamische Reckgleiten zu bestimmen.

Im weiteren wird die DIC zur Beschreibung des Versagensverhaltens an eigenverstärktem PURE-Faserverbundkunststoff angewendet. Dazu werden Verbunde in unterschiedlichen Dicken bzw. mit unterschiedlicher Anzahl an Gewebelagen geprüft. Um eine Überlagerung von Verformungseffekten an der Gewebeoberfläche aufgrund der Materialdicke zu vermeiden, erfolgt eine Analyse von Prüfkörpern mit nur zwei Gewebelagen. Diese zweilagigen Verbunde weisen eine sehr geringe Steifigkeit auf, wodurch eine sehr präzise Versuchsführung notwendig ist, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Nach der Beschreibung des Verformungsverhaltens an der Gewebeoberfläche erfolgt eine Charakterisierung des Schädigungsverhaltens an 16-lagigen Verbunden. Dabei besteht die Herausforderung das Ablöseverhalten einzelner Gewebelagen mittels der DIC aufzulösen, was die Messung von sehr kleinen und schwer messbaren Verschiebungen erfordert. Mittels einer geeigneten Methodenkopplung von den Analysen DIC-Auswertungen und Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop (REM) kann der Versagensmechanismus als kritische Größe beschrieben werden.

In einem dritten Anwendungsfall wird das mechanische Schädigungsverhalten an elektrischen Einpresskontakten betrachtet. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegen Be-

schädigung sind auch hierbei definierte mechanische Versuche unabdingbar. Zur gezielten Belastung der Kontaktverbindung wird ein Prüfkörper entwickelt. Jedoch ermöglicht dieser Prüfkörper keinen direkten optischen Zugang zu den Kontaktstellen. Somit wird eine indirekte Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Verbindung basierend auf äußeren optischen Verformungsmessungen durchgeführt. Die dabei zu messenden Verschiebungen sind sehr klein und lassen sich bedingt durch eine unebene Messfläche nur schwer messen. Begleitende mikroskopische Untersuchungen an Kontaktflächen gezielt belasteter Prüfkörper geben Aufschluss über den Ort und das Ausmaß der Schädigung. Damit diese Untersuchungen durchgeführt werden können, ist ein aufwändiges Präparationsverfahren notwendig. Allein aus den mechanischen Analysen ist das genaue Schädigungsverhalten bzw. ist die kritische Größe der Rissbildung nicht eindeutig zu bestimmen. Erst ein Simulationsmodell basierend auf den Experimenten des Verbundsystems gibt Aufschluss über den Schädigungsbeginn.

## **Kapitel 3**

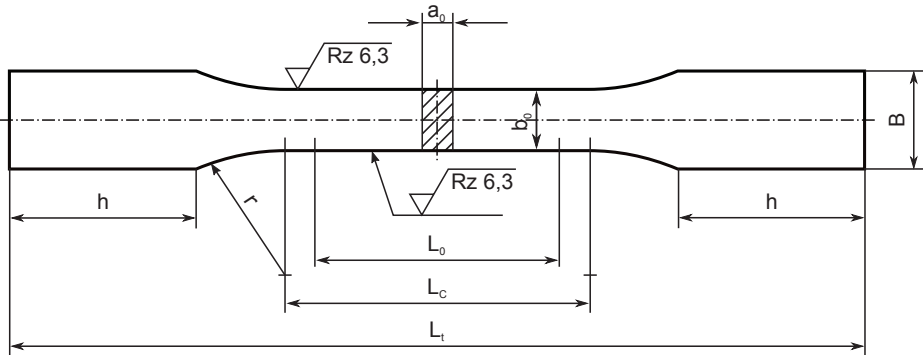
# **Hochtemperaturversuche an dünnen Aluminiumblechen**

### **3.1 Versuchsaufbau und Randbedingungen**

Ziel der Untersuchungen ist es, die mechanischen Kennwerte an 0,6 mm dünnen lotplattierten AlMn-Aluminiumblechen (3000er-Serie) zu ermitteln. Da diese Bleche unter erhöhten Temperaturen Anwendung finden, sind die Kennwerte über ein definiertes Temperaturspektrum zu ermitteln. Dazu muss der Versuchsaufbau eine gezielte und gleichmäßige Temperierung der Prüfkörper bis 350 °C in einer Zugprüfmaschine auch während der Versuchsdurchführung gewährleisten. Die Erwärmung der Prüflinge erfolgt induktiv, wodurch der Außenschwingkreis der Induktionsanlage in den Versuchsaufbau integriert ist. Innerhalb des Aufbaus ist ein optisches Messsystem zur Detektion der Verformungen vorgesehen. Obwohl es sich bei den Versuchen um einen gewöhnlichen Zugversuch unter Temperatur handelt, ist ein bildgebendes Messverfahren aus folgenden Gründen erforderlich:

1. Ungleichmäßige Dehnungen liefern ein Indiz für inhomogene Temperaturverteilung
2. Wegmessung mit konventionellen Mitteln verursacht inhomogene Verformungen (Kerbwirkung der Messspitzen von Dehnungsaufnehmern)

Das bedeutet, dass die digitale Bildkorrelation (DIC) in diesem Fall als empfindlicher Wegsensor und zur Versuchskontrolle verwendet wird. Als Probengeometrie wird eine Zugprobe nach DIN 50125 Form H verwendet, die speziell für dünne Bleche geeignet ist [Dina]. Die genauen Maße des Prüfkörpers sind der Abbildung 3.1 zu entnehmen.



$a_0$	$b_0$	B	h	$L_0$	$L_c$	$L_t$	r
0,6	12,5	20	35	50	75	165	20

**Abbildung 3.1:** Nicht proportionaler Zugprüfkörper für dünne Bleche der Form H nach DIN 50125 [Dina]

Vor dem Entnehmen der Prüfkörper aus lotplattierten Blechen wird das Grundmaterial einer Lötsimulation unterzogen, um den realitätsnahen Werkstoffzustand nach der Verarbeitung bzw. dem Verlöten widerzuspiegeln. Bei der Lötsimulation wird das lotplattierte Ausgangsmaterial in einem Ofen bei kontrollierter Atmosphäre (CAB-Ofen) auf 575 °C erwärmt und für eine definierte Zeit gehalten. Im Anschluss an die Lötsimulation werden aus den wärmebehandelten Blechen die in Abbildung 3.1 dargestellten Zugprüfkörper ausgestanzt, welche als Basis für die Entwicklung des Prüfstands und die Bestimmung der anwendungsnahen mechanischen Kennwerte dienen. Die Entnahme der Prüfkörper aus den Blechen erfolgt in Walzrichtung.

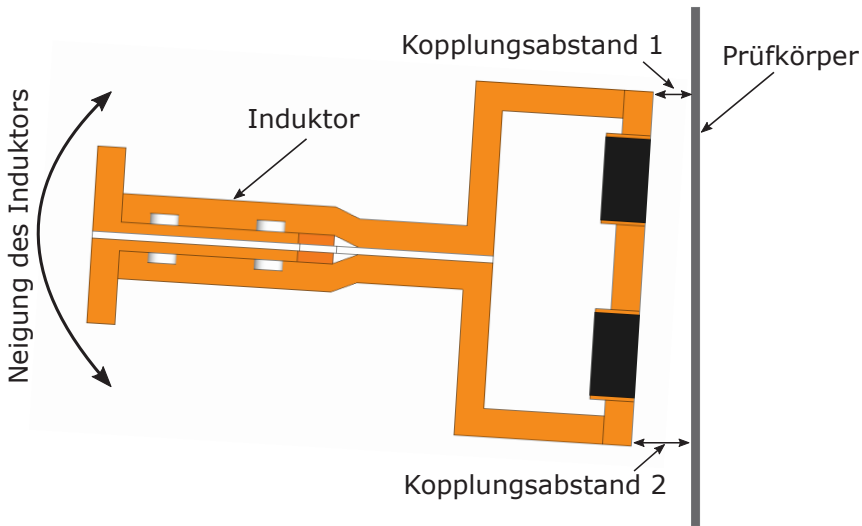
### 3.1.1 Anforderungen an den Versuchsaufbau

Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus drei Elementen:

- 1.) Ausrichteinheit Induktor mit Außenschwingkreis
- 2.) Ausrichteinheit optisches Messsystem ARAMIS
- 3.) Grundgestell

Die Ausrichteinheit für den Außenschwingkreis der Induktionsanlage muss den Induktor sehr präzise zum eingespannten Prüfkörper in der Prüfmaschine ausrichten können, um

eine homogene Temperaturverteilung über einen Prüfbereich von  $L_0 = 50 \text{ mm}$  (gemäß DIN 6892-2) zu realisieren. Dazu ist es erforderlich, dass alle drei Raumachsen fein verstellbar sind und dass die relative Neigung des Induktors zum Prüfkörper justierbar ist (Abb. 3.2).



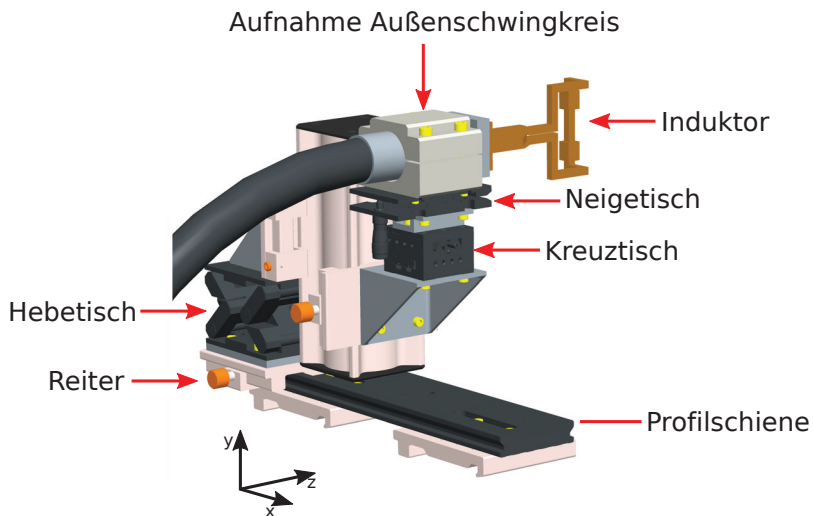
**Abbildung 3.2:** Darstellung des Einflusses der relativen Induktorneigung zum Prüfkörper auf den Kopplungsabstand

Werden diese Voraussetzungen nicht erfüllt, treten bedingt durch unterschiedliche Kopplungsabstände Temperatur-Hot-Spots auf, wodurch eine homogene Temperierung nicht gegeben ist. Aus Abweichungen in der Größenordnung von  $0,1 \text{ mm}$  resultieren bei  $0,6 \text{ mm}$  dickem Aluminiumblech bereits Inhomogenitäten der Temperaturverteilung. Als zweites wird eine Vorrichtung benötigt, um das optische Messsystem ARAMIS der Firma GOM auf der gegenüberliegenden Seite des Induktors zu platzieren. Dabei ist eine exakte und reproduzierbare Ausrichtung in den drei Raumrichtungen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  zu gewährleisten. Die dritte Komponente bildet das Grundgestell, welches beide Ausrichtvorrichtungen aufnimmt, Befestigungsmöglichkeiten bietet, um Thermoelemente anzubringen und sich in andere Prüfmaschinen installieren lässt. Die Flexibilität ist ein wichtiges Kriterium, da der Aufbau auch in den engen Platzverhältnissen an einer MTS Criterion Zugprüfmaschine Verwendung finden soll. In dieser Maschine sind keine geeigneten Anbindungen vorhanden, sodass das Gestell selbsttragend ausgeführt werden muss. Bei dem gesamten Aufbau ist darauf zu achten, dass eine Seite des Prüfkörpers frei zugänglich ist, um die Deformationen optisch zu erfassen. Das gilt insbesondere für den Induktor, der

in Kooperation mit der Firma EFD-Induction entwickelt wurde. Bedingt durch die freie Zugänglichkeit des Prüfkörpers kommt ein speziell auf die Probengeometrie und den Versuchsaufbau abgestimmter Induktor zum Einsatz.

### 3.1.2 Aufbau der Ausrichteinheit

Um eine möglichst große Flexibilität der Ausrichteinheit für den Außenschwingkreis zu erhalten, wurde bei der Konstruktion auf ein Profilsystem zurückgegriffen, welches für den Aufbau von optischen Messbänken vorgesehen ist. Auch die Positioniertische stammen aus dem Bereich der Opto-Mechanik, was für die notwendige Präzision und Reproduzierbarkeit erforderlich ist.



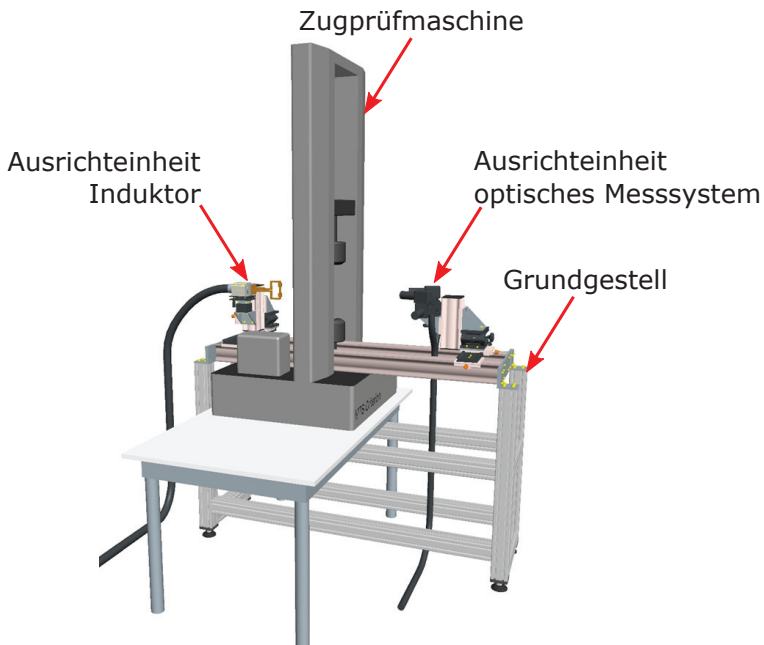
**Abbildung 3.3:** Aufnahme bzw. Ausrichteinheit für den Außenschwingkreis inkl. Induktor

Die grobe Ausrichtung des Induktors in x-Richtung erfolgt über das Verschieben des Reiters auf der Profilschiene (Abb. 3.3). Über zwei weitere Reiter unterhalb der Profilschiene wird die Ausrichtvorrichtung an das Grundgestell angebunden und die grobe Anordnung in z-Richtung eingestellt. Mittels eines Kreuztisches ist die Feinjustage in x- und z-Richtung möglich. Der verwendete Hebetisch sorgt für präzise Einstellung in y-Richtung. Damit auch die geforderte Neigung des Induktors zum Prüfkörper eingestellt werden kann, wird auf den Kreuztisch ein Neigetisch gebaut. Eine Schelle auf dem Neigetisch verbindet den Außenschwingkreis der Induktionsanlage inkl. Induktor mit der Ausrichteinheit. Dieser Aufbau entspricht den notwendigen Anforderungen aus

Kap. 3.1.1 und stellt eine reproduzierbare Positionierung des Induktors zum Prüfkörper her, was für gleichbleibende Prüfbedingungen sorgt. Die Ausrichteinheit für das optische Messsystem ist nach gleichem Prinzip aufgebaut, nur dass der Kameraträger direkt auf den Winkel unterhalb des Kreuztisches geschraubt wird.

### 3.1.2.1 Konstruktion Grundgestell

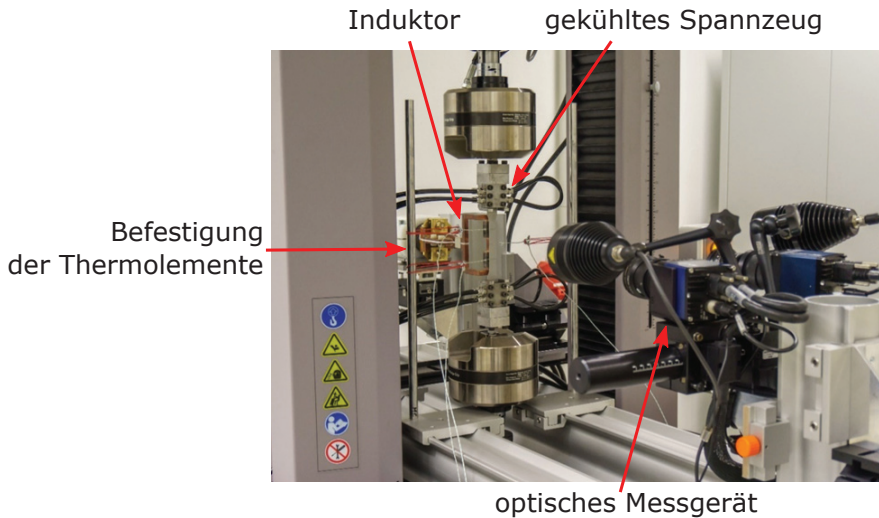
Wie schon bei den beiden Ausrichteinheiten aus Kapitel 3.1.2, wird auch das freistehende Grundgestell aus Profilschienen konstruiert (3.4). Somit wird in Anbetracht der Integration in unterschiedliche Prüfmaschinen die größtmögliche Flexibilität erreicht. Darüber hinaus lassen sich durch die Verwendung gleicher Profilsysteme beide Ausrichteinheiten präzise führen und wiederholgenau positionieren.



**Abbildung 3.4:** CAD-Modell des Prüfaufbaus; Integration des Grundgestells in die Zugprüfmaschine, inkl. der Ausrichteinheit für die optische Messtechnik und induktive Erwärmung [Mat18]

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die zur Temperaturmessung und Regelung der Induktionsanlage notwendigen Thermoelemente an dem Grundgestell befestigt werden können, ohne dabei die einseitig freie Sicht auf den Prüfkörper einzuschränken und

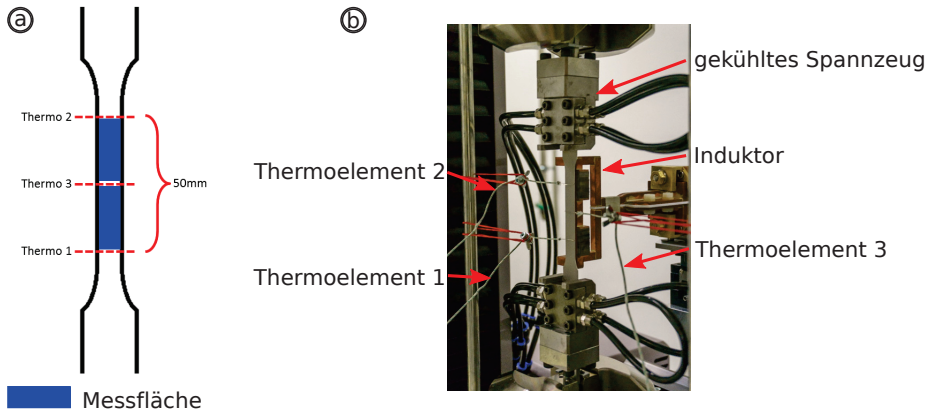
den eigentlichen Prüfablauf zu stören (Abb. 3.5). Dementsprechend sind alle Voraussetzungen für die optische Verformungsmessung bei gleichzeitig induktiver Erwärmung der Prüfkörper gegeben.



**Abbildung 3.5:** Versuchsaufbau; Grundgestell inkl. Ausrichteinheiten in eine MTS Criterion integriert

### 3.1.2.2 Temperaturmessung und Erprobung des Versuchsaufbaus

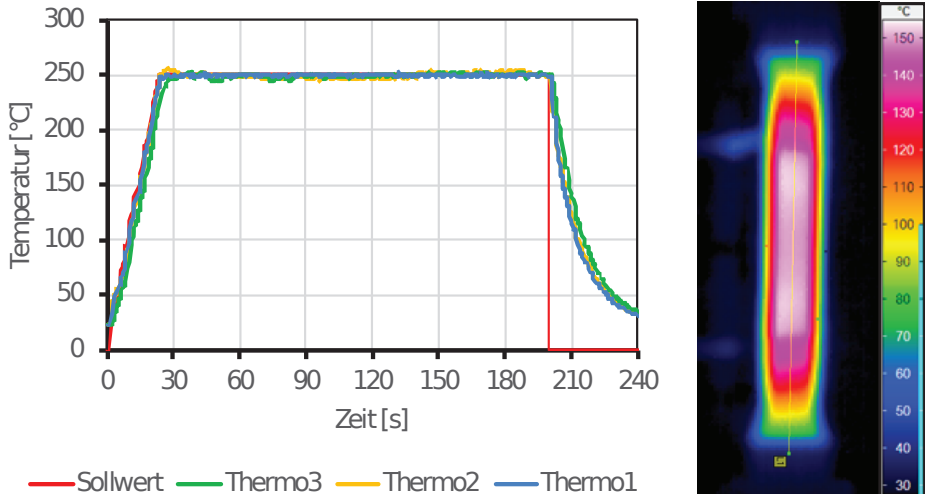
Zur Temperaturmessung an 0,6 mm Aluminiumblechen werden die Prüfkörper in eine MTS Criterion Zugprüfmaschine eingespannt und mit einer konstanten Kraft von 5 N belastet (Abb. 3.6). Die Belastung verhindert ein Ausbeulen des Prüfkörpers während der Erwärmung, das Ausbeulen des Prüflings hätte differierende Kopplungsabstände zur Folge, was eine homogene Durchwärmung verhindern würde. Gemäß der DIN 6892-2 sind bei einer geforderten Messlänge von 50 mm 3 Thermolemente zur Messung der Temperaturverteilung zu verwenden. Diese sind jeweils an den beiden Enden und in der Mitte des Prüfbereichs zu applizieren [Dinc] (Abb. 3.6).



**Abbildung 3.6:** (a) schematische Darstellung des Messfeldes von 50 mm und der Positionierung der Thermoelemente; (b) realer Versuchsaufbau [Mat18]

Die zulässige Temperaturdifferenz zum Sollwert innerhalb des Messbereichs beträgt  $\pm 3$  °C. Die Thermoelementdrähte werden über Gummibänder an den Prüfkörper gezogen, um einen guten Kontakt zu gewährleisten. Das Thermoelement 1 (unten) wird für die Regelung der Induktionsanlage verwendet, da es näherungsweise ortsfest bleibt und nach dem Bruch des Prüfkörpers weiterhin Kontakt hat. Die Regelung über die Thermoelemente 2 und 3 ist weniger sinnvoll, weil das obere gekühlte Spannzeug verfährt (Abb.3.6). Durch die größeren Bewegungen in axialer Richtung kann es zu einem schnelleren Ablösen der beiden Thermoelemente 2 und 3 kommen. Um den Prüfbau zu testen, den Induktor mittels der Ausrichteinheiten korrekt zu positionieren und die Regelparameter der Induktionsanlage einzustellen, werden Aufheizversuche durchgeführt. Dabei wird eine 0,6 mm dicke Zugprobe aus Aluminium auf die festgelegten Prüftemperaturen 150 °C, 250 °C und 350 °C erwärmt und für 180 s. gehalten. In Abbildung 3.7 ist ein solcher Erwärmungsverlauf bei der mittleren Temperatur von 250 °C dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gewünschte Temperatur von 250 °C sehr sauber und ohne starkes Überschwingen angefahren wird. Ein Überschwingen der Temperatur kann zu lokalen Anschmelzungen führen. Die Aufheizkurven in Abbildung 3.7 zeigen, dass der gemessene Temperaturanstieg des mittleren Thermoelementdrahts im Vergleich zu den beiden äußeren etwas verzögert erfolgt. Die Verzögerung spiegelt eine Durchwärmung von außen nach innen wieder. Diese Eigenschaft resultiert aus dem Aufbau des Induktors, wodurch die meiste Energie in den Randbereichen des Prüfkörpers eingebracht wird, um den starken seitlichen Wärmeabfluss durch die gekühlten Spannzeuge zu kompensieren. Sehr schön zu erkennen ist auch, dass die kleine Temperaturerhöhung des Überschingers sich schnell relativiert, in dem die Wärme zur Mitte hin zieht und somit eine gleichmäßige

Durchwärmung entsteht.

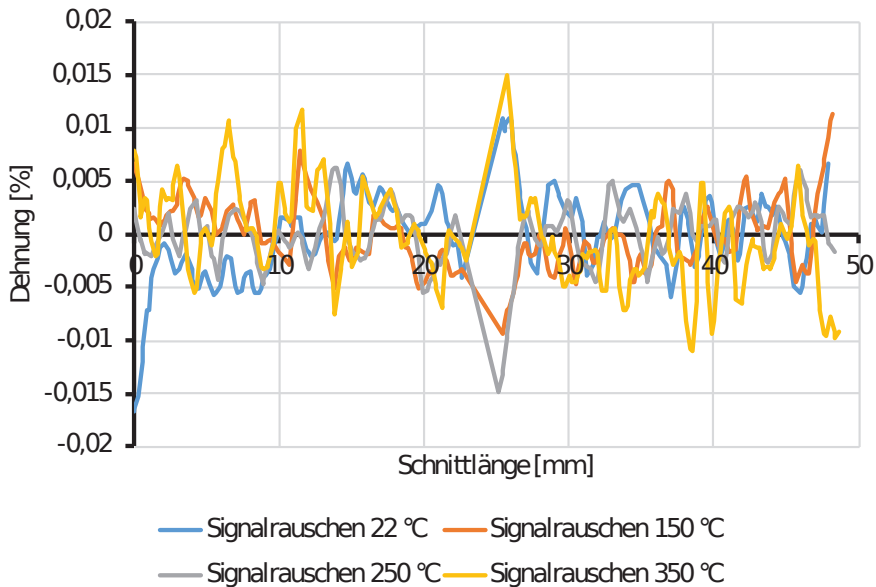


**Abbildung 3.7:** Temperaturverlauf einer Aufheizkurve eines 0,6 mm dicken Aluminiumbleches auf 250 °C mit anschließender Haltezeit von 180 s und abschließender Abkühlkurve

Der anschließende Temperatur-Verlauf über die 180 s Haltezeit spiegelt eine sehr konstante und homogene Durchwärmung des Prüfkörpers wieder. Alle drei Messsignale liegen in einem Bereich von 3 °C. Dieser enge Temperaturbereich und die dementsprechend glatten Temperaturkurven sind der guten Abstimmung des Prüfaufbaus auf den Induktor und den Reglereinstellungen geschuldet.

Auch das optische Messverfahren wurde im Vorfeld überprüft, um die Funktionalität der Messung unter erhöhter Temperatur zu gewährleisten. Die Problematik bei Messungen oberhalb der Raumtemperatur besteht darin, dass sich wabernde Luftschichten vor dem Probekörper bilden. Durch diese unterschiedlichen Luftschichten wird das Licht anders gebrochen und es kann ein erheblicher Messfehler entstehen. Dazu wurde das Rauschen des optischen Messsignals bei allen drei Temperaturen mittels einer Schnittdarstellung im Ausgangszustand (Belastung von 5 N) gemessen. Zur Darstellung des Rausches werden die Dehnungen entlang des Schnitts gegenüber der Schnittlänge aufgetragen (Abb. 3.8). Wie der Abbildung 3.8 zu entnehmen ist, liegt das Messrauschen bei Raumtemperatur, 150 °C und 250 °C im Bereich von  $\pm 0,007$  %. Lediglich bei 350 °C steigt das Rauschen auf  $\pm 0,011$  %. Das etwas erhöhte Messrauschen liegt jedoch im Bereich der Dehnungsgenauigkeit von 0,01 %, was der Hersteller des Messgerätes unter besten Verhältnissen angibt. Die Peaks bei einer Schnittlänge von 25 mm sind den Randeffekten

zweier Messbereiche, dem oberhalb und unterhalb des mittleren Thermoelements, geschuldet und dementsprechend nicht repräsentativ. Durch das näherungsweise konstante Messrauschen über die verschiedenen Temperaturen sind keine signifikanten Messabweichungen zu erwarten. Diese Ergebnisse untermauern, dass die Funktionalität des Versuchsaufbaus bezüglich der Temperierung und optischen Verformungsmessung innerhalb der Zugprüfmaschine in vollem Umfang gegeben ist.

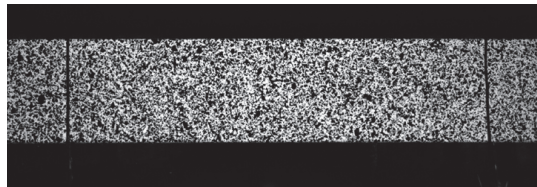


**Abbildung 3.8:** Messrauschen des optischen Messsignals bei Temperaturen von 22 °C (Raumtemperatur), 150 °C, 250 °C und 350 °C

### 3.1.3 Probenvorbereitung und Versuchsbedingungen

Da die optische Dehnungsmessung auf dem Prinzip der Grauwertkorrelation basiert (Kap. 2.1), ist es notwendig ein stochastisches Muster mit möglichst hohem Kontrast auf die Prüflinge aufzubringen (Abb. 3.9). Zur besseren Anhaftung der Lackierung werden als erstes die Prüfkörper gesäubert und von Ölen/Fetten befreit. Um den starken Grauwertkontrast zu erhalten, werden die Prüfkörper weiß grundiert und im Anschluss mit einem schwarzen Muster versehen. Die Grundierung wird in zwei Schritten ausgeführt. Die erste Schicht bildet eine sehr dünne weiße Schicht aus temperaturbeständigem Ofenlack, worauf ein matt weißer Entwickler sehr fein aufgesprüht wird. Dabei muss der Entwickler in die angetrocknete weiße erste Schicht gesprüht werden, um eine bes-

sere Verbindung beider Farbschichten zu erhalten. Das Aufsprühen der zweiten Schicht erfolgte nach einer kurzen Antrocknungsphase. Zum Aufprägen des stochastischen Musters wird ein schwarzes Graphit-Spray verwendet, welches sich durch seinen guten Kontrast zur Grundierung und der guten Temperaturbeständigkeit auszeichnet. Diese Farbkombination ermöglicht die Verformungsmessung während des gesamten Versuchs, bei Dehnungen von bis zu 25 % (Kap. 3.2.1).



**Abbildung 3.9:** Schwarz weiß kodierter Aluminiumprüfkörper zur optischen Verformungsmessung bei erhöhten Temperaturen

Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte an 0,6 mm dünnen Aluminiumblechen wurde der in Kapitel 3.1.2 und 3.1.2.1 beschriebene Prüfaufbau in eine Zugprüfmaschine des Firma MTS integriert. Die Zugprüfmaschine wurde mit bereits vorhandenen wassergekühlten Spannzeugen bestückt, um darin die Prüfkörper einzuspannen (Abb. 3.6). Vor dem Einspannen findet die Kodierung der Prüfkörper mit dem beschriebenen Farbmuster statt. Zur Temperaturregelung während der Zugversuche wurden nur zwei Thermoelementdrähte des Typs K verwendet, um für die optische Dehnungsmessung eine durchgehende Messfläche von 50 mm ohne Störfaktoren zu erhalten. Dementsprechend wird auf das mittlere Thermoelement verzichtet. Die ausführlichen Vorversuche haben eine reproduzierbare Homogenität der Durchwärmung ergeben, was die Reduzierung auf zwei Thermoelemente rechtfertigt. Diese sind so anzubringen, dass die aufgebrachte Kodierung auch während des Einspannprozesses nicht beschädigt wird und eine mittige Messlänge von 50 mm überwacht (Abb. 3.6). Als Anzugmomente der 6 Schrauben wurden 5 Nm gewählt, um ein wiederholgenaues Einspannen zu gewährleisten und die Prüfkraft übertragen zu können. Bevor der induktive Erwärmungsprozess beginnt, muss die selbstgeschriebene Prüfprozedur an der Zugprüfmaschine gestartet werden. Die Prüfvorschrift beinhaltet ein Programmteil, über den die Längenausdehnung des Prüfkörpers während der Erwärmung kompensiert wird. Somit bleibt die Kraft konstant bei 5 N und ein Ausbeulen wird verhindert. Nach der Erwärmung ist eine Haltezeit von drei Minuten vorgesehen, um eine gleichmäßige Durchwärmung zu garantieren und im durchgewärmten Zustand das Referenzbild für die digitale Bildkorrelation aufzunehmen. Durch die Aufnahme des Referenzbildes wird der Grundzustand des Prüfkörpers unter der jeweiligen

Temperatur definiert, auf den sich die Verformungsmessungen beziehen (Kap.2.1). Nach der Haltezeit beginnt der Zugversuch, und die Bildaufnahme startet automatisch bei einer Kraft von 10 N. Das Beenden der Bildaufnahme ist ebenfalls automatisiert und endet mit dem Bruch der Probe. Das Messfeld beträgt 95 mm x 65 mm, woraus bei der Verwendung eines ARAMIS 4M System der Firma GOM eine Auflösung von 40  $\mu\text{m}/\text{px}$  resultiert. Die Größe des Messvolumens wurde so groß gewählt, um die großen Dehnungen bei 350 °C vollständig messen zu können.

## 3.2 Versuchsergebnisse

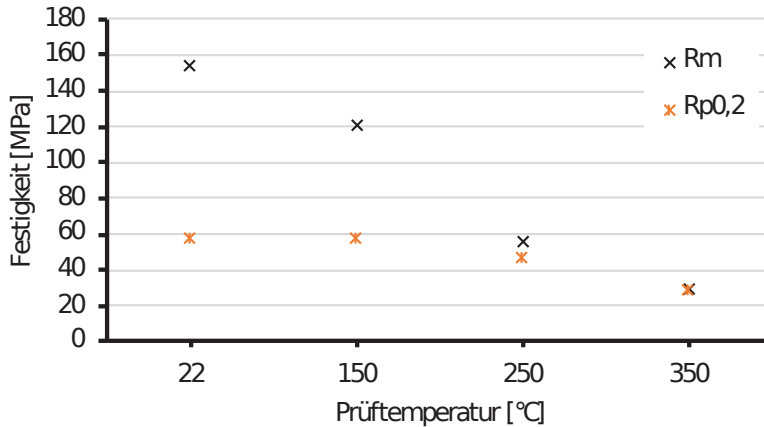
### 3.2.1 Festigkeiten

Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Aluminiumlegierungen untersucht. Jedoch sind nicht bei allen Legierungen die 4 genannten Prüftemperaturen von 22 °C, 150 °C, 250 °C und 350 °C geprüft worden. Folglich wird sich bei der Auswertung in dieser Arbeit auf die in Tabelle 3.1 gelistete Werkstoffzusammensetzung bezogen, da hierfür die Festigkeitswerte des ganzen Temperaturspektrums bestimmt wurden.

**Tabelle 3.1:** *Werkstoffzusammensetzung des Prüfkörpers; Angabe der Legierungselemente in Gewichtsprozent*

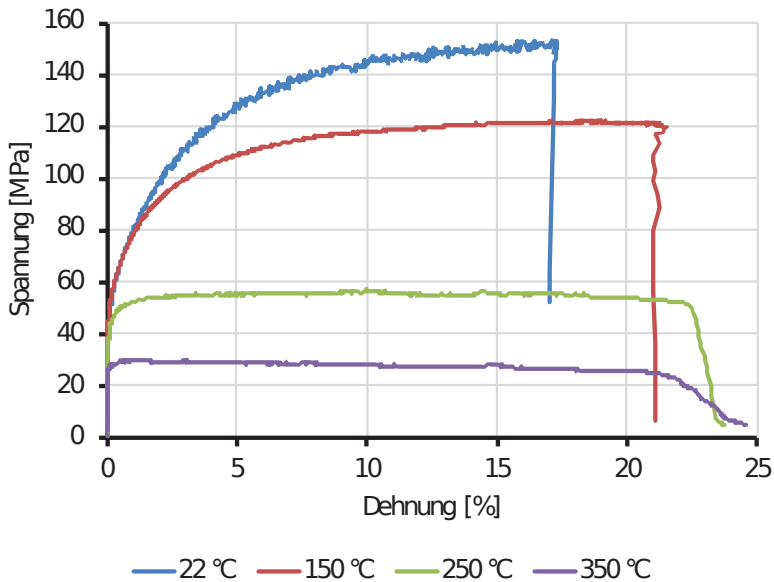
Si	Fe	Ti	Pb	Ca	Al	Cu	Mn	Mg	Zn
0,07	0,18	0,01	0,03	0,0001	97,57	0,52	1,5	0,08	0,04

In Abbildung 3.10 sind die gemessenen Festigkeiten über der Prüftemperatur aufgetragen. Pro Prüftemperatur wurden jeweils 3 Versuche durchgeführt und die jeweiligen Mittelwerte in dem Diagramm dargestellt. Tabelle A.1 im Anhang enthält die einzelnen Messwerte. Die geringe Streuung auch bei hoher Temperatur verdeutlicht die Qualität des entwickelten Versuchsaufbaus.



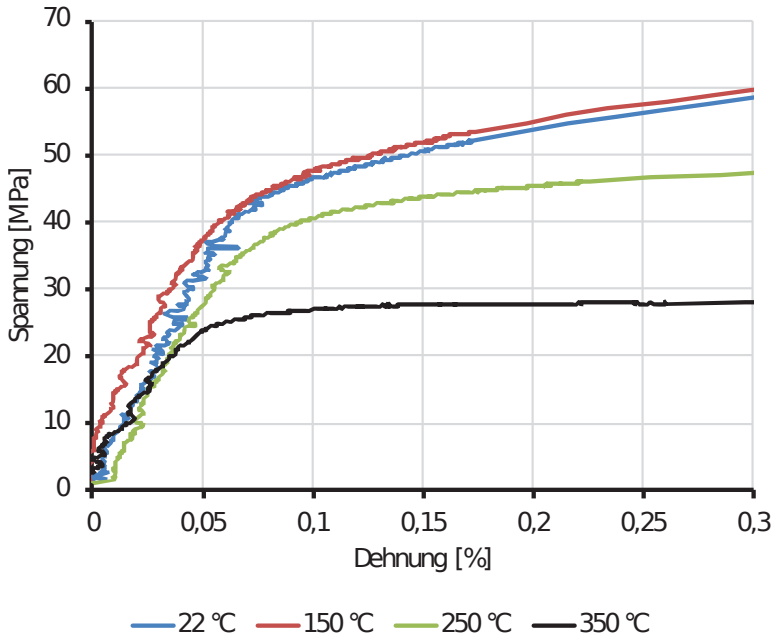
**Abbildung 3.10:** Übersicht der Festigkeitskennwerte in Abhängigkeit der Temperatur bei 0,6 mm dünnem Aluminiumblech

Die Spannungs-Dehnungskurven in Abbildung 3.11 zeigen, dass bei Temperaturen von 250 °C und 350 °C ausgeprägte Kriecheffekte vorhanden sind, die die in Abbildung 3.10 sichtbare Annäherung von  $R_m$  und  $R_{p0,2}$  erklären.



**Abbildung 3.11:** Abflachen des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs in Abhängigkeit der Temperatur bei 0,6 mm dünnem Aluminiumblech

Die Darstellung des Anfangsbereichs der Spannungs-Dehnungskurven in Abbildung 3.12 zeigt, dass bei 350 °C kein ausgeprägter linear-elastischer Bereich mehr erkennbar ist. Auffällig sind die ausgeprägten Zacken der Spannungs-Dehnungskurve bei 22 °C, die ab einer Dehnung von ca. 1 % einsetzen.

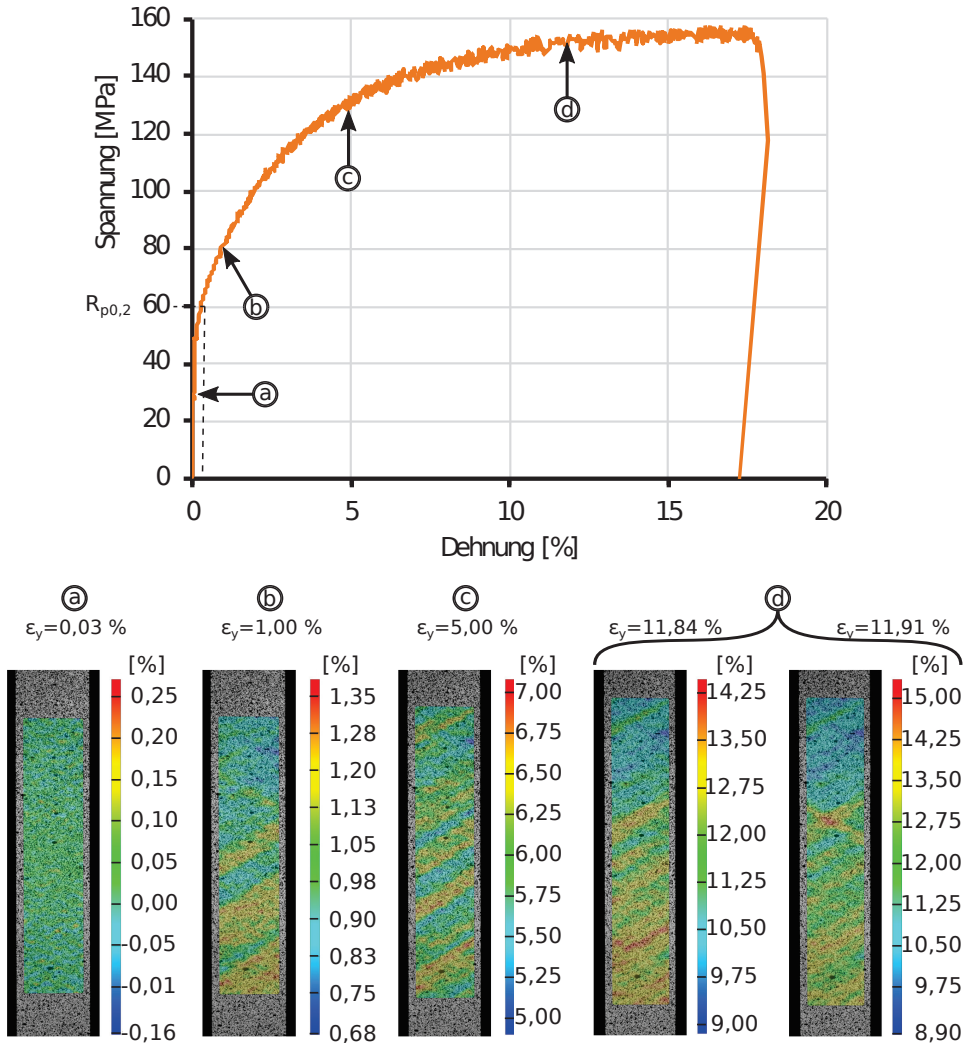


**Abbildung 3.12:** Kleiner werdender linear-elastischer Bereich in Abhängigkeit der Temperatur

### 3.2.2 Optische Verformungsmessung

Wie bereits in Abbildung 3.11 und 3.13 zu sehen ist, weisen die Spannungs-Dehnungskurven bei Raumtemperatur einen sehr rauen Verlauf im plastischen Bereich auf. Der „sägezahnartige“ Spannungsverlauf, setzt nicht sofort mit Beginn der irreversiblen Verformung ein, sondern erst ab einem kritischen Wert von ca. 1 % Dehnung bzw. einer Spannung von 80 MPa. Ab diesem Startpunkt steigen mit zunehmender Verformung auch die Amplituden des gezackten Spannungsverlaufs. Bei erhöhten Temperaturen ab 150 °C sind diese rauen Verläufe nicht mehr vorhanden. Mittels der optischen Dehnungsmessung lässt sich im elastischen Bereich eine homogene Dehnungsverteilung nachweisen (Punkt a in Abb. 3.13). Im Bereich der plastischen Deformation bilden sich lokale Dehnungserhöhungen mit differierender Breite aus. Die lokalen Verformungskonzentrationen verlaufen in einem Winkel zwischen 50 ° - 66 ° zur Belastungsrichtung und nehmen mit

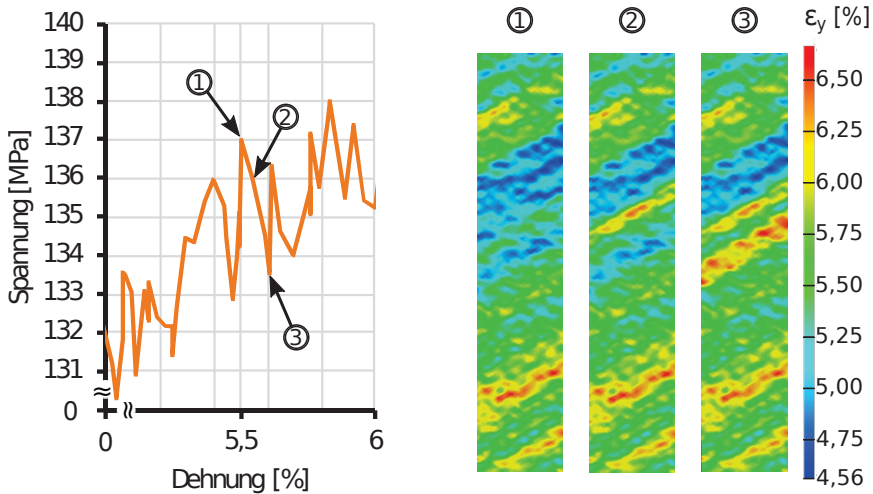
steigender irreversibler Verformung zu (Punkte b und c in Abb. 3.13) [Cas+09; Ost14; Yil11]. Dabei wachsen einzelne Bänder mit benachbarten zusammen. Jedoch kann sich die Richtung der einzelner Deformationslokalisierungen ändern.



**Abbildung 3.13:** Darstellung von Deformationsbändern durch optische Verformungsmessung bei unterschiedlichen Verformungszuständen

Der Punkt d in Abbildung 3.13 zeigt, dass eines der lokalen Dehnungsbänder umklappt und danach spiegelsymmetrisch zur y-Achse verläuft. Jedoch klappt das Band nicht vollständig um, sondern ein Teil bleibt weiterhin bestehen, nur nicht mehr so stark ausge-

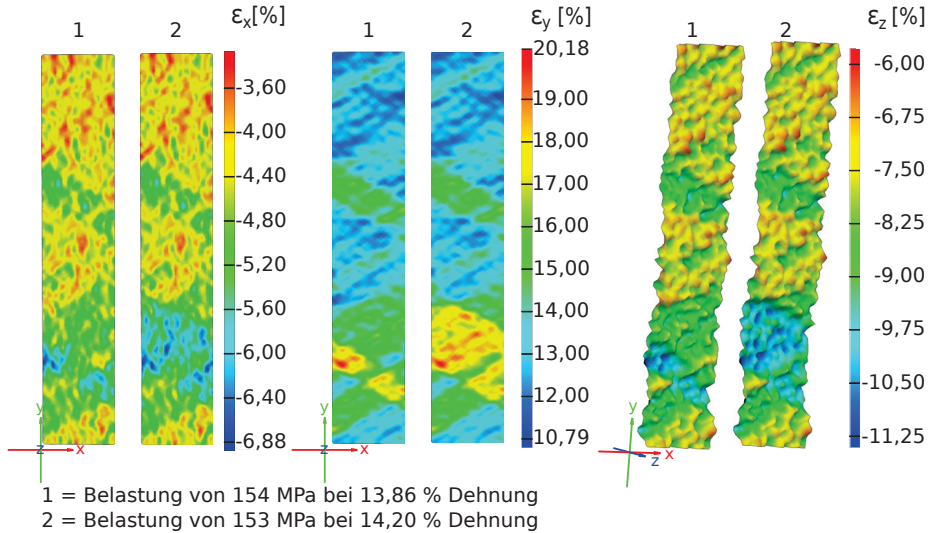
prägt. Somit kreuzen sich die beiden Bereiche großer Verformung und im Schnittpunkt entsteht eine höhere Dehnungslokalisierung, als im restlichen Band. Durch die Bewegung der Dehnungsbänder während der Belastung und der daraus resultierenden inhomogenen Dehnungsverteilung im plastischen Bereich ist auch ein wechselnder Kraftanstieg und -abfall zu verzeichnen. Abbildung 3.14 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den Spannungsabfällen und den lokalen Dehnungsüberhöhungen. Von Punkt 1 zu 2 entsteht das erste und von Punkt 2 zu 3 das zweite größere Deformationsband innerhalb eines negativen Spannungspeaks. Somit lassen sich die Spannungsabfälle mit der Entstehung neuer lokaler Verformungsmaxima korrelieren.



**Abbildung 3.14:** Korrelation von Spannungsabfällen mit lokalen Dehnungserhöhungen

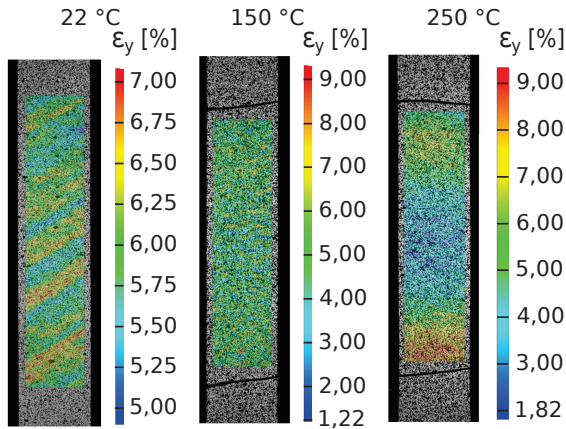
Einhergehend mit den lokalen Dehnungserhöhungen in Belastungsrichtung ist eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit gegeben (Abb. 3.15). Im elastischen Bereich liegt eine relativ ebene Oberflächenstruktur vor. Ab dem Einsetzen einer kritischen Dehnung von 1% beginnt die Zunahme der Rauigkeit an der Oberfläche. Diese Strukturierung ist geprägt von den lokalen Dehnungsbändern (Abb. 3.15). Innerhalb dieser Bänder treten irreversible Formänderungen auch in die Dickenrichtung des Prüfkörpers auf, die teilweise stufenartig ausfallen [Jia+05]. Zu den Formänderungen in Dicken- und Belastungsrichtung überlagern sich lokale Dehnungsmaxima in Breitenrichtung des Prüfkörpers, die geringe lokale Einschnüren hervorrufen (Abb. 3.15). Da die Bereiche großer Verformung während der Plastifizierung des Prüfkörpers nicht ortsfest sind, sondern sich über den Prüfbereich instabil ausbreiten, entsteht eine bleibende Veränderung der gesamten Oberfläche. Im Bereich größerer plastischer Verformung wachsen einzelne kleine Loka-

lisierungen zu größeren Bändern heran, die Breiten bis zu einigen Millimetern aufweisen können, was der gelbe Bereich der y-Dehnung in Abbildung 3.15 deutlich hervorhebt. Das Wachstum wird gestoppt, wenn sich neue Lokalisierungen bilden oder bestehende weiter wachsen.



**Abbildung 3.15:** Wachsen eines Gleitbandes und der sich damit ausbreitenden Zunahme der Oberflächenverformung in alle drei Raumrichtungen

In Abbildung 3.16 sind Dehnungsverläufe bei einer globalen Dehnung von 5 % und unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass auf diesem Dehnungsniveau in Kombination mit einer Temperatur von 150 °C bei geringer Dehnrage keine schräg verlaufenden Verformungsinhomogenitäten zu verzeichnen sind und eine homogenere Spannungsverteilung innerhalb des Prüfbereichs vorliegt. Gleiches gilt auch für 250 °C, wobei die Spannung nicht mehr homogen verteilt ist, da sich im Prüfkörper bei einer Dehnung von 5 % zwei lokale Verformungsmaxima bilden (Abb. 3.16). Das Versagen der Prüfkörper erfolgt am Ende innerhalb des dominanteren der beiden lokalen Verformungsextrema.



**Abbildung 3.16:** Dehnungsverteilung bei unterschiedlichen Temperaturen von 22 °C (Raumtemperatur), 150 °C und 250 °C und einer globalen Dehnung von 5 %

## 3.3 Diskussion

### 3.3.1 Vergleich Messdaten mit Werkstoffdaten des Grundwerkstoffs

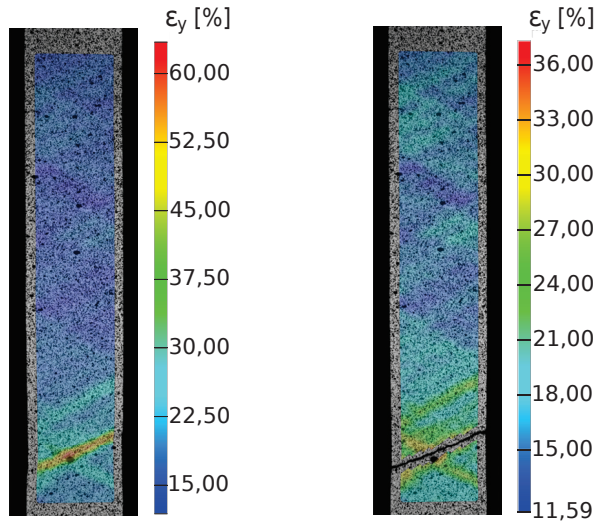
Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, werden die Prüfkörper vor den Versuchen einer Lötsimulation unterzogen, um den realitätsnahen Werkstoffzustand im Gebrauch wieder zu spiegeln. Bei der Lötsimulation wird das lotplattierte Grundmaterial in einem CAB-Ofen auf 575 °C erwärmt und für eine definierte Zeit gehalten, die dem realen Lötprozess entspricht. Durch diese Wärmebehandlung haben sich die Werkstoffeigenschaften im Vergleich zum Ausgangszustand und damit im Vergleich zu den Herstellerangaben geändert. Wie der Tabelle 3.2 zu entnehmen ist, beträgt die 0,2 %-Dehngrenze noch ca. ein Drittel von dem Wert des Ausgangsmaterials. Bei AlMn-Legierungen kann die Streckgrenze im harten Zustand bis zum vierfachen bzw. die Zugfestigkeit bis zum doppelten des weichen Zustands betragen [Ost14]. Das bedeutet, dass ursprüngliche Verfestigungen, die z.B. aus einem Walzprozess bei der Herstellung oder aus einer Ausscheidungshärtung resultieren, nach der Lötsimulation weitestgehend aufgelöst wurden und sich das Material im weichen Zustand befindet. Im Vergleich zu weichem Reinaluminium mit einem  $R_{p0,2}$  zwischen 10 MPa und 24 MPa bleibt überwiegend die Mischkristallverfestigung durch die Legierungselemente bestehen. Je nach Legierungszusammensetzung liegt der Kennwert  $R_{p0,2}$  bei den AlMn-Legierungen (3000er-Serie) im weichen Zustand zwischen 40 MPa und 70 MPa [Kam09], was mit dem gemessenen Wert von  $R_{p0,2} = 58 \text{ MPa}$  über-

einstimmt. Wie der Tabelle 3.2 zu entnehmen ist, liegt auch die Zugfestigkeit im Bereich einer weichgeglühten AlMn-Legierung. Jedoch weicht die Bruchdehnung der geprüften 0,6 mm Bleche erheblich von den Literaturwerten einer weichen Al 3000er-Legierung ab.

**Tabelle 3.2:** Vergleich der Festigkeitswerte vor und nach der Lötsimulation mit Werten aus der Literatur, gemessen bei Raumtemperatur

Blech Zustand	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]
Al 3000er-Legierung O/H111 [Kam09]	40 - 70	110 - 180	25 - 40
lotplattiert nicht lösiniert [Nov17]	155	190	18
lotplattiert lösiniert	58	154	16

Prinzipiell lassen sich die gemessenen Kennwerte an den nicht proportionalen dünnen Blechen nicht auf Versuche an genormten proportionalen Zugprüfkörpern der DIN 50125 Form E übertragen. Bei den proportionalen Prüfkörpern ist das prozentuale Volumen der Körner, die eine freie Oberfläche besitzen wesentlich geringer als bei sehr dünnen Blechen. Somit steigt die Dominanz der freien Körner im Randbereich des Prüfkörpers mit sinkender Dicke der Prüfkörper, da das relative Volumen der Körner an den Oberflächen im Vergleich zum Gesamtvolumen steigt [Rau+01]. Die Körner an der Probenoberfläche besitzen eine geringere Widerstandskraft gegen Deformation als die innenliegenden Körner, da die inneren Körner vollständig von anderen umgeben und mit ihnen verbunden sind [Fü+06; Suh+10]. Bedingt durch die höheren Freiheitsgrade der Oberflächenkörner und den fehlenden Korngrenzen in den Randbereichen können die Versetzungen ungehinderter gleiten [Pen+07]. Das führt dazu, dass an der Oberfläche eine geringere Verfestigung stattfindet und sich die Oberflächenkörner leichter deformieren lassen als die innen liegenden Körner. Daraus folgt, dass es bei gleicher Korngröße mit zunehmender Reduzierung der Probendicke zu geringeren Festigkeiten, niedrigeren Fließspannungen und einer herabgesetzten Bruchdehnung kommt [Fü+06; Jan+06; Rau+01]. Mit sinkender Dicke und gleicher Korngröße ändert sich das Bruchverhalten des Prüfkörpers. Da bei dünnen Prüfkörpern das Verhalten der Oberflächenkörner immer dominanter wird, sinkt die plastische Verformung und es kommt zum Scherbruch [Suh+10]. Dieses Phänomen konnte bei den geprüften Blechen beobachtet werden. Es bildet sich nur eine minimale Einschnürung, bevor die Prüfkörper innerhalb eines der entstehenden Gleitbänder versagen (Abb. 3.17). Die Entstehung der Gleitbänder und deren Bewegung während des Versuchs wird in Kapitel 3.3.2 näher erläutert.



**Abbildung 3.17:** Versagen des Prüfkörpers bei Raumtemperatur innerhalb eines Gleitbandes durch Scherbruch, ohne signifikante Einschnürung

### 3.3.2 Diskussion lokales Dehnungsfeld

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, bildet sich bei Raumtemperatur ab einer globalen Dehnung von ca. 1 % ein „sägezahnartiger“ Spannungsverlauf aus, der bei Temperaturen ab 150 °C nicht mehr detektiert werden konnte. Mittels der optischen Dehnungsmessung lassen sich mit dem Einsetzen des rauen Spannungs-Dehnungsverlaufs wandernde lokale Dehnungsüberhöhungen korrelieren. Diese Ausprägung sogenannter Fließfiguren bei plastischer Verformung ist eine in der Literatur bekannte Eigenschaft bei Aluminium-Legierungen und lässt sich durch die dynamische Reckalterung bzw. den Portevin-Le Chatelier-Effekt (PLC) erklären [Jia+05; Wag+99]. Die beiden auffälligsten Merkmale des PLC-Effekts liegen in der Lokalisierung der Dehnung im Prüf-/Belastungsbereich des Prüfkörpers und in der Bewegung der lokalisierten Verformungen mit zunehmender Spannung [Yil11]. Das Einsetzen des PLC-Effekts erfolgt in Abhängigkeit der Prüftemperatur, der Verformungsgeschwindigkeit, der Legierungszusammensetzung und Vorbehandlung des Materials ab einem kritischen Dehnungsgrad [Hu+11; Ost14]. Bei den geprüften AlMn-Legierungen in Kombination mit der vorher durchgeführten Lötplattierung und Lötsimulation liegt die kritische Verformung bei 1 % (Kap. 3.2.2).

Das sägezahnartige Profil setzt langsam ein, wobei mit steigender Verformung die Intensität der Spannungsausschläge zunimmt (Abb. 3.13). Diese Spannungsausschläge sind

auf streifenförmige lokale Dehnungskonzentrationen zurück zu führen. Die streifenförmigen Dehnungslokalisierungen entstehen durch das Wandern von beweglichen Versetzungen, die auf blockierte Versetzungen oder einen „Versetzungswald“ treffen, was zu einer Blockade der Bewegung führt. Somit kommt es zu einem Anstieg der Spannung bis zu einem kritischen Betrag, ab dem sich die verankerten Versetzungen lösen und die Spannung abfällt. Jeder Spannungsabfall entspricht einer makroskopisch beobachteten plastischen Lawine der lokalisierten Bänder [Yil11]. Bedingt durch die höheren Temperaturen steigt die Mobilität der Versetzungen, was bei geringen Verformungsgeschwindigkeiten zu einem stabilen plastischen Fließen führt und somit der PLC-Effekt ab 150 °C bei konstanter geringer Dehnrage nicht auftritt (Abb. 3.11). Dasselbe Phänomen wurde von Abbadi et al. an Aluminiumlegierungen der 5000er-Legierung nachgewiesen. Dabei trat der PLC-Effekt bei Temperaturen ab 120 °C und geringen Verformungsgeschwindigkeiten bzw. bei Raumtemperatur und hohen Verformungsgeschwindigkeiten nicht auf [Abb+02; Pic+05].

## **Kapitel 4**

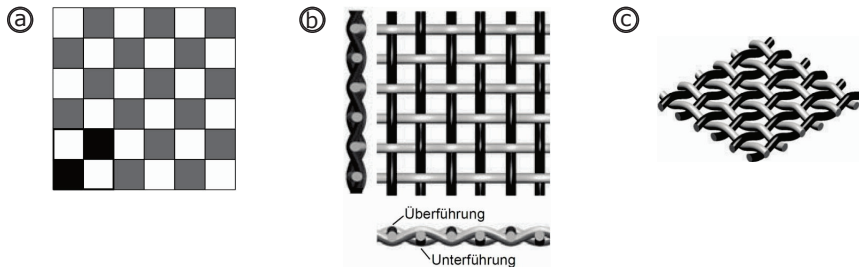
# **Schädigungsverhalten eines eigenverstärkten Polypropylen Komposites**

### **4.1 Material und Probenpräparation**

#### **4.1.1 Material**

Zur Herstellung von PURE Textilgeweben wird Polypropylengranulat durch einen Extrusionsprozess zu Folien verarbeitet. Während der Verarbeitung im Extruder erfolgt eine Orientierung der Makromoleküle durch Zug- und Scherdeformationen in der Polymer-schmelze. Dieser Vorgang ist die Grundvoraussetzung, damit die Makromoleküle nicht sphärolithisch, sondern nadelförmig kristallisieren [Gei+64; Pas09]. Eine nachgeschaltete schnelle Abkühlung der Schmelze bei definiertem Druck fixiert die orientierten Makromolekülketten und die gerichteten teilkristallinen Strukturen [Mon01]. Nach dem Extrusionsprozess werden die Folien in Bändchen geschnitten. Eine nachträgliche Erhöhung des Orientierungszustands der amorphen Phase durch eine Kaltver Streckung der Bändchen, führt zu einer weiteren Steigerung der Eigenverstärkung [Por90]. Diese gestreckten Bändchen werden zu Gewebetextilen verarbeitet. Bei den verwendeten Textilhälbezeugen handelt es sich um zweidimensionale Gewebe, die aus einer Kett- (in Fertigungsrichtung laufend) und Schussrichtung (quer zur Fertigungsrichtung) gebildet werden und sich rechtwinklig kreuzen. Als Bindungsart wird eine Leinwandbindung verwendet, die sich durch eine hohe Kreuzungsdichte und Dimensionsstabilität auszeichnet. Die typische

schachbrettartige Textur ist bedingt durch einen streng alternierenden Verlauf der Bändchen in Kett- und Schussrichtung (Abb. 4.1). Somit weisen die Leinwandgewebe eine hohe Welligkeit der Bändchen auf, was zu einem erheblichen Festigkeits- und Steifigkeitsverlust führt [Kow+11; Rie15].



**Abbildung 4.1:** (a) Schematische Darstellung des Schachbrettmusters einer Pure-Leinwandbindung, (b) Schnittansicht in Kett- und Schussrichtung, (c) dreidimensionale Prinzipdarstellung [Kow+11]

In einem Pressvorgang (Heißkompaktierung) werden geschichtete Lagen der Thermo- plasttextilien unter Druck und Temperatur zu einem eigenverstärkten Komposit verpresst. Die Vorgänge im Inneren des Verbundmaterials ähneln bei der Heißkompaktierung einem Schweißprozess [CP79]. Beim Kompaktierprozess erfolgt ein selektives Anschmelzen der ko-extrudierten Bändchenoberflächen, wodurch eine verbindende Matrixphase generiert wird [Pas09]. Das anschließende rasche Abkühlen fixiert die hochorientierte Polymerphase in der aufgeschmolzenen Matrix (Abb. 4.2). Die Relevanz von eigenverstärkten Polypropylen Kompositen wird in den Dissertationen [Pas09; Rie15] näher erläutert.

Zusammenführung von Bändchen durch Schichtung einzelner Gewebelagen

Selektives Anschmelzen der Randbereiche während der Heißkompaktierung

Fixierung der orientierten Polymerphase in der aufgeschmolzenen Matrix durch Kühlen



**Textillagen**



**eigenverstärkter Komposit**

**Abbildung 4.2:** Schematische Darstellung der einzelnen Phasen des Heißkompaktierprozesses

Somit lässt sich die Struktur des Komposits in drei Bereiche unterteilen:

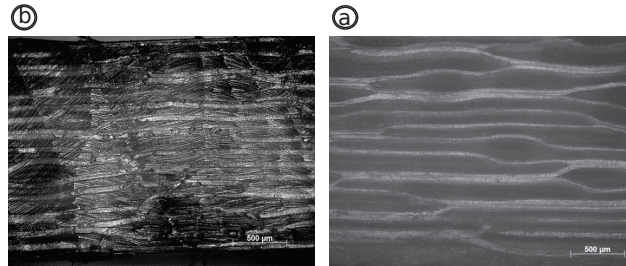
- Makrostruktur: miteinander „verschweißte“ Gewebelagen
- Mesostruktur: Bändchen mit Kern und angeschmolzener Randfläche (Verschweißung)
- Mikrostruktur: teilkristalline Bändchen

### **4.1.2 Probenpräparation**

Ziel der Untersuchungen ist es, das Verformungs- und Schädigungsverhalten von kompaktierten PURE-Geweben auf der Mikro, Meso- und Makroskala zu erfassen, wobei wesentliche Informationen mittels der digitalen Bildkorrelation (DIC) gewonnen werden sollen. Dies erfordert eine besondere Sorgfalt bei der Probenpräparation, da sonst beim Herausschneiden der Prüfkörper bereits eine Vorschädigung eintritt. Dazu kommt, dass insbesondere Proben mit relativ wenigen Gewebelagen zur Welligkeit neigen, was die Ergebnisse wesentlich verfälschen würde. Die Zuordnung von Verformungen bzw. Schädigung zum Gewebeaufbau, also der Mesostruktur, ist nur möglich, wenn das Gewebe während des Verformungsversuchs sichtbar bleibt. Dies betrifft diejenigen Experimente, bei denen die Beziehung der Gewebelagen zueinander betrachtet wird (Kap. 4.2.2.1). Bei denjenigen Zugprüfkörpern, die in der Draufsicht mittels DIC untersucht werden (Kap. 4.2.2) wird ein Speckle-Muster verwendet, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, jedoch mit dem Unterschied, dass bei dieser Kodierung nur eine dünne einschichtige weiße Grundierung verwendet wird.

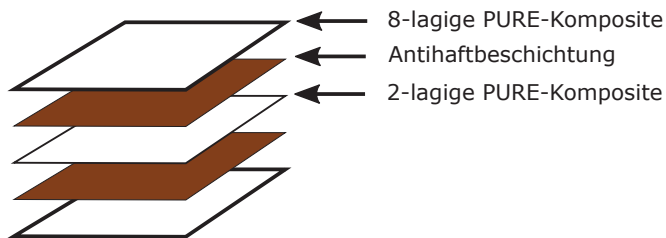
Aus 2- und 16-lagigen Pure-Kompositen werden speziell definierte Zugprüfkörper, die in Kapitel 4.1.3 beschrieben werden, ausgefräst. Da Polypropylen aufgrund der Temperaturentwicklung beim Fräsen sehr stark zu schmieren beginnt und es durch die Bearbeitung an den Schnittkanten schnell zu Delaminationen kommt, wurde eine spezielle Fräsmethode entwickelt. Vorgefertigte Komposithalbzeuge aus den heißkompaktierten Platten werden für den Fräsprozess in einer eigens entwickelten Spannvorrichtung fixiert, die auf die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Prüfkörper angepasst ist. Die vorgefertigten Halbzeuge werden in der Spannvorrichtung ausgerichtet, sodass die Bändchen der obersten Gewebelage in 0° (parallel) und 90° zur späteren Belastungsrichtung verlaufen. Während der Bearbeitung wird mit kalter Druckluft gekühlt, um unerwünschte Aufschmelzungen zu vermeiden und die Späne aus dem Fräsbereich abzutransportieren. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass das Material sehr sauber geschnitten wird und somit schädigungsfrei

Werkstoffoberflächen an den Schnittkanten entstehen (Abb. 4.3).



**Abbildung 4.3:** Gegenüberstellung der Fräsflächen ohne Kühlung (a) und mit geeigneter Kühlung (b)

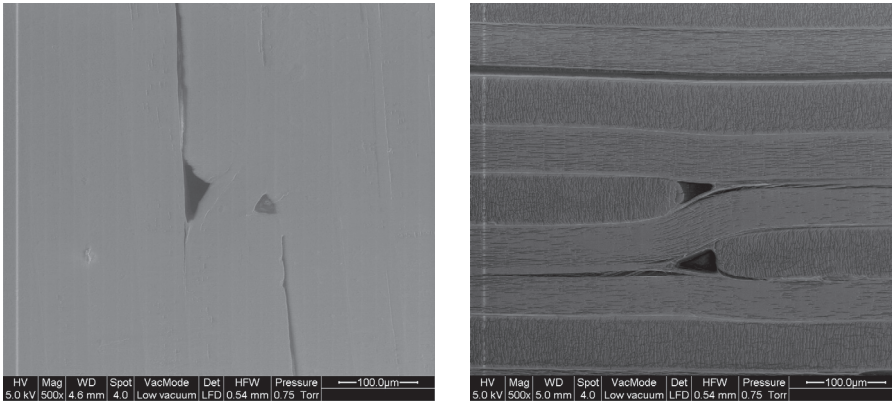
Die Verwendung eines Sandwichaufbaus (Abb. 4.4) verhindert nicht nur Delaminationen an den Bearbeitungsflächen, sondern ermöglicht es, trotz der geringen Steifigkeit des 2-lagigen Materials, definierte Prüfkörpergeometrien zu fräsen. Als obere und untere Decklage des Sandwiches wird ein Material gleicher oder geringerer Festigkeit des PURE-Komposits verwendet, in diesem Fall ein 8-lagiger PURE-Verbund, damit die Oberfläche des Prüfkörpers während der Bearbeitung durch die Späne der Decklagen nicht beschädigt wird.



**Abbildung 4.4:** Sandwichaufbau zur Herstellung von Zugprüfkörpern aus 2-lagigem PURE-Komposit

Um die Schädigung an belasteten Prüfkörpern im Rasterelektronenmikroskop (REM) zu analysieren, sind Oberflächen mit einer noch höheren Qualität erforderlich. Dazu werden aus den vorbelasteten Prüfkörpern gezielt Bereiche entnommen, und die vorher gefräste Kontur wird mit einem Mikrotom bearbeitet. Bei der Mikrotombearbeitung werden die Schnitte bei tiefen Temperaturen nahe der Glasübergangstemperatur des Materials durchgeführt, da sonst die weichen Anteile des heterogenen Aufbaus nicht geschnitten, sondern abgeschabt werden, wodurch es zur Materialverschmierung an der Schnittfläche käme (Abb. 4.5). Bei den Schnitten nahe der Glasübergangstemperatur des Komposits

ist die Struktur des Werkstoffs, die Defektstruktur und die unterschiedliche Orientierung der Bändchen deutlich sichtbar, wohingegen die Schnitte bei Raumtemperatur nur eine einheitlich graue Oberfläche mit einzelnen Defekten aufweist (Abb. 4.5).

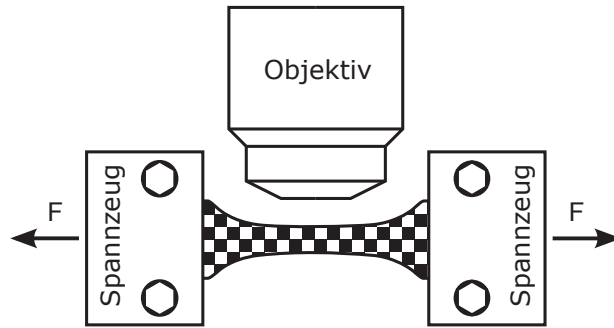


**Abbildung 4.5:** Vergleich zweier Mikrotomschnitte an einem 200 MPa belasteten Pure-Verbund; links bei Raumtemperatur und rechts gekühlt nahe der Glasübergangstemperatur geschnitten

Um keine weitere Schädigung der Prüfkörper während der Kryobearbeitung mit dem Mikrotom zu erhalten, werden die zu bearbeitenden Präparate in einem speziellen Medium eingefroren, was sich nach dem Auftauen rückstandsfrei entfernen lässt. Durch diese Präparationsmethode können gezielt detaillierte REM-Aufnahmen von versagenskritischen Bereichen aufgenommen werden.

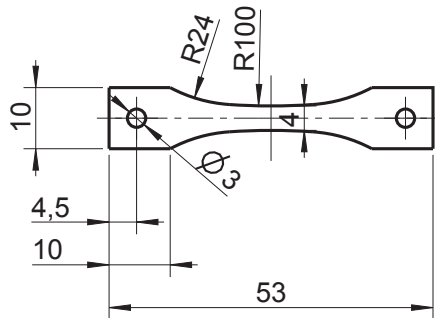
### 4.1.3 Probendefinition

Bei den verwendeten Probengeometrien zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von PURE-Verbundwerkstoffen wird zwischen zwei Varianten differenziert. Für die Experimente mit hoher lokaler Auflösung wurde eine spezielle Geometrie entwickelt, um In-situ-Versuche mit einem Zug-Druck-Modul der Firma Kammrath & Weiss unter einem Zeiss AxioPlan Auflichtmikroskop durchzuführen. Durch die begrenzten Verfahrensweg des Zug-Druck-Moduls von 60 mm ist die Gesamtlänge des Prüfkörpers eingeschränkt. Aufgrund des geringeren Arbeitsabstandes des Zeiss-Mikroskops muss das Objektiv während des Versuchs zwischen die Spannbacken der Prüfmaschine gefahren werden, wodurch der Prüfkörper nicht beliebig kurz ausfallen darf (Abb. 4.6).



**Abbildung 4.6:** Schematische Darstellung des Prüfaufbaus mit eingespanntem Prüfkörper zur Analyse der Verschiebung in der Seitenansicht

Darüber hinaus darf der Prüfkörper nicht in den Übergängen von den Schultern zum mittigen Prüfbereich versagen, da hier keine definierten Prüfbedingungen vorliegen. Ein weiterer Punkt, weshalb das Versagen im mittleren Bereich des Prüfkörpers erfolgen muss, ist, dass, bedingt durch den Versuchsaufbau, nur dort der Schädigungsvorgang mikroskopisch aufgezeichnet werden kann (Abb. 4.6). Um die Schädigungsentstehung und das spätere Versagen des Prüfkörpers in den mikroskopisch betrachteten Bildausschnitt zu festzulegen, bei möglichst homogener Spannungsverteilung im Prüfbereich, wird dieser Bereich nicht gerade, sondern in einem großen Radius ausgeführt. Aus diesen genannten Vorgaben resultiert die in Abbildung 4.7 dargestellte Probengeometrie.



**Abbildung 4.7:** Mikrozugprobengeometrie zur Charakterisierung der Kompositverbunde mit hoher Ortsauflösung

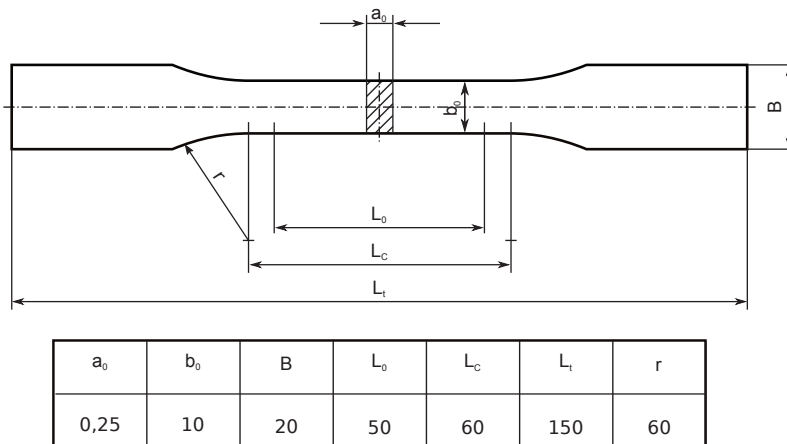
Die eingebrachten Passbohrungen in den Schultern dienen zur Ausrichtung und gleichmäßigen Positionierung des Prüfkörpers im Zug-Druck-Modul. Über Passstifte werden die Prüfkörper in den Spannzeugen aufgenommen und zusätzlich über eine kraftschlüssige Verbindung fixiert. Somit wird eine wiederholgenaue und parallele Ausrichtung des

Prüfkörpers zum Objektiv gewährleistet. Durch die eingebrachten Bohrungen mussten die Spannflächen auf den Schultern vergrößert werden, um ein Rausrutschen des Prüflings aus den Spannzeugen oder einen Bruch innerhalb der Spannzeuge zu vermeiden (Abb. 4.8). Randbedingung ist, dass die verbleibende Querschnittsfläche im Bereich der Bohrung größer als der kleinste Prüfquerschnitt ist, da sonst ein Versagen in der Einspannung erfolgt.



**Abbildung 4.8:** links: Delamination der Spannflächen; rechts: optimierte Probengeometrie nach Abb. 4.7 mit mittigem Versagen des Prüfkörpers

Zusätzlich zu den Experimenten mit hoher lokaler Auflösung, bei denen sowohl die Draufsicht auf das Gewebe als auch die Seitenansicht auf den Lagenaufbau (Abb. 4.6) im Detail analysiert wird, soll eine großflächige Charakterisierung der Verformungen im Verbundwerkstoff in der Draufsicht durchgeführt werden. Dazu wird die in Abbildung 4.9 dargestellte Probengeometrien nach DIN EN ISO 527-4 [Dinb] für isotrope und anisotrope faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe verwendet.



**Abbildung 4.9:** Zugprobengeometrie zur Charakterisierung von Kompositverbunden nach DIN EN ISO 527-4 [Dinb]

#### 4.1.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche an den Normprüfkörpern (Abb. 4.7) werden auf einer MTS-Criterion Zugprüfmaschine durchgeführt, wobei die optische Verformungsmessung mit einem ARAMIS-Messsystem der Firma GOM erfolgt. Das kalibrierte Messfeld beträgt  $95 \times 65 \text{ mm}^2$ . Für die Experimente an den Mikrozugproben wird ein Mikrozugmodul der Firma Kammrath & Weiss verwendet in Kombination unter einem Zeiss Axioplan Mikroskop 4.10. Die Auflösung bei diesen Versuchen beträgt  $485,44 \text{ px/mm}$  bei einem Messfeld von  $2,86 \times 2,14 \text{ mm}^2$ . Zur Auswertung der Bilddaten mittels digitaler Bildkorrelation wird die Software DaVis der Firma LaVision verwendet. Zur Vergleichbarkeit der Messdaten, wird in beiden Fällen eine Prüfgeschwindigkeit von  $1,2 \text{ mm/min}$  verwendet.

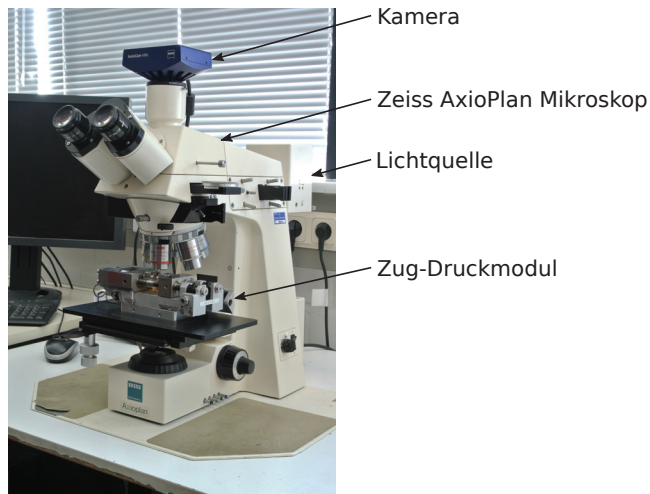


Abbildung 4.10: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Mikrozugproben

## 4.2 Versuchsergebnisse

Die Versuche dienen der Charakterisierung des vorliegenden PURE-Werkstoffverbundes auf makro-, meso- und mikroskopischer Skala. Ziel der makroskopischen Analyse ist es herauszufinden, ob das Versagensverhalten prinzipiell durch lokale Schwachstellen oder gemittelte Größen bestimmt wird, woraus sich die Vorgehensweise auf mesoskopischer und mikroskopischer Ebene ableitet. Die Skala der mesoskopischen Analyse wird durch das Gewebe bestimmt. Hier sollen über die digitale Bildanalyse kritische Verformungslö-

kalisierungungen identifiziert werden, die sich dann auf der mikroskopischen Ebene einzelnen Gefügebestandteilen wie Bändchen, Verschweißungen usw. zuordnen lassen.

### 4.2.1 Makroskopische Analyse

Die Analyse der Festigkeitswerte beruht auf 12 Experimenten, die mit einem 16-lagigen Pure-Kunststoffverbund und der entwickelten Zugprobengeometrie (Kap. 4.1.3) durchgeführt wurden. Der Übersicht geschuldet sind in Abbildung 4.11 nur 3 der 12 Spannungs-Dehnungs-Diagramme dargestellt. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Proben 3 und 12 in Abbildung 4.11 stellen die beiden Grenzwerte bezüglich der beobachteten Bruchfestigkeit dar. Alle weiteren Verläufe liegen zwischen den beiden Kurven (Probe 6 in Abb. 4.11).

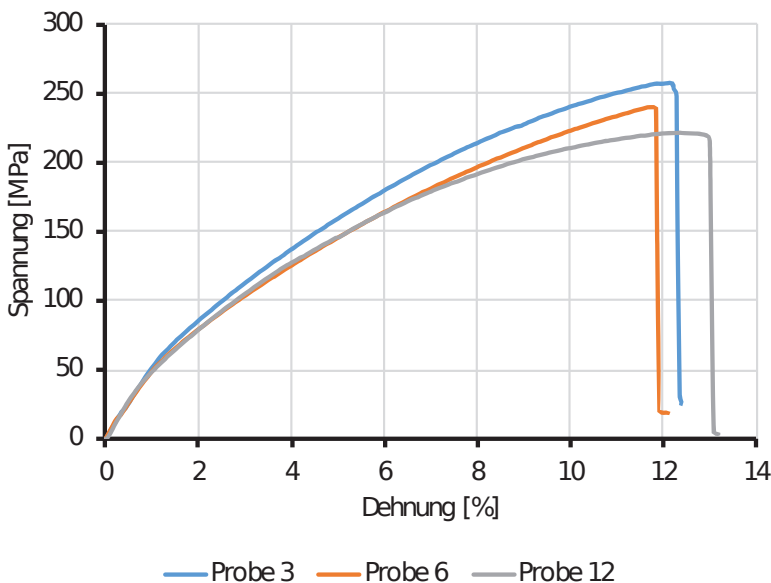
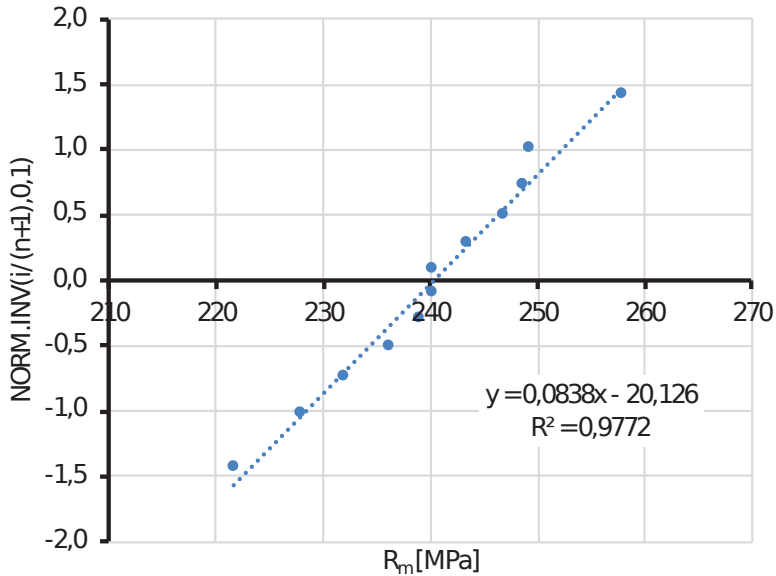


Abbildung 4.11: Spannungs-Dehnungs-Verläufe der entwickelten Mikrozugprobe (Abb. 4.7)

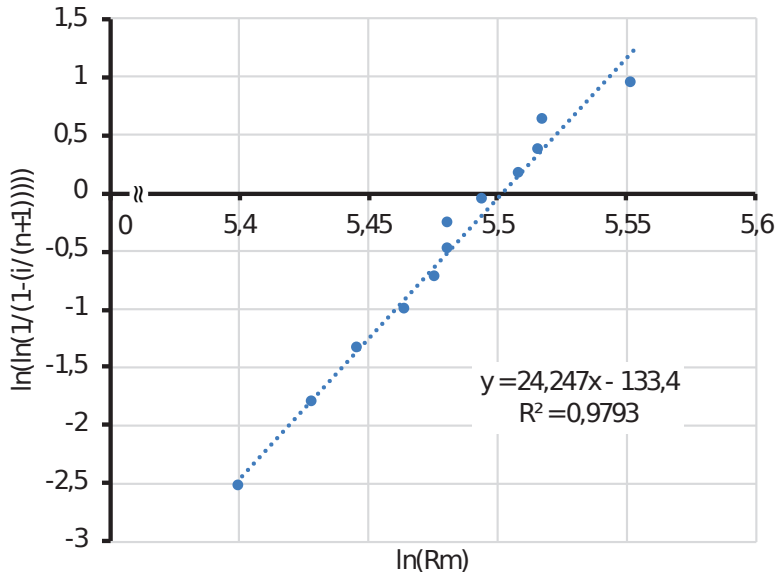
Der anfängliche linear elastische Bereich unterscheidet sich nicht. Jedoch kommt es zu recht starken Streuungen in der Bruchfestigkeit. Die gemittelte Bruchfestigkeit über die 12 Experimente beträgt 236 MPa bei einer Standardabweichung von 15 MPa.

Mit einer statistische Auswertung der Bruchfestigkeit soll versucht werden zwischen unterschiedlichen Versagensmodellen zu unterscheiden.



**Abbildung 4.12:** Wahrscheinlichkeitsplot der Zugfestigkeiten  $R_m$  von 12 Versuchen basierend auf einer Normalverteilung

Zur Klassifizierung der Güte von den Versagensmodellen dient das Bestimmtheitsmaß. Dieses Maß, welches auch als  $R - Wert$  bezeichnet wird, gibt die Übereinstimmung der Messwerte in den Wahrscheinlichkeitsplots (Abb. 4.12 und 4.13) mit der Ausgleichsgeraden wieder [SH06]. Wenn alle Messpunkte auf der Geraden verlaufen, beträgt  $R^2 = 1$ . Je großflächiger sich die Messpunkte um die Gerade verteilen, desto kleiner wird der  $R - Wert$ . Daraus folgt, dass je größer das Bestimmtheitsmaß ist, umso besser folgt das Schädigungsverhalten der statistischen Verteilung. Als Verteilungsmodelle wurden die Weibull- und Normalverteilung untersucht. Mit einem  $R^2 = 97,9 \%$  liefert die Weibull-Verteilung eine sehr gute Deckung mit der Ausgleichsgeraden. Jedoch zeigt der  $R - Wert$  von  $97,7 \%$  der Normalverteilung auch eine gute Übereinstimmung. Aufgrund der zu kleinen Stichprobe kann keine genaue Aussagen getroffen werden, ob das Schädigungsverhalten durch eine Weibull- oder Normalverteilung beschrieben werden kann, da in beiden getesteten Fällen das Bestimmtheitsmaß  $R^2 > 90 \%$  ist.



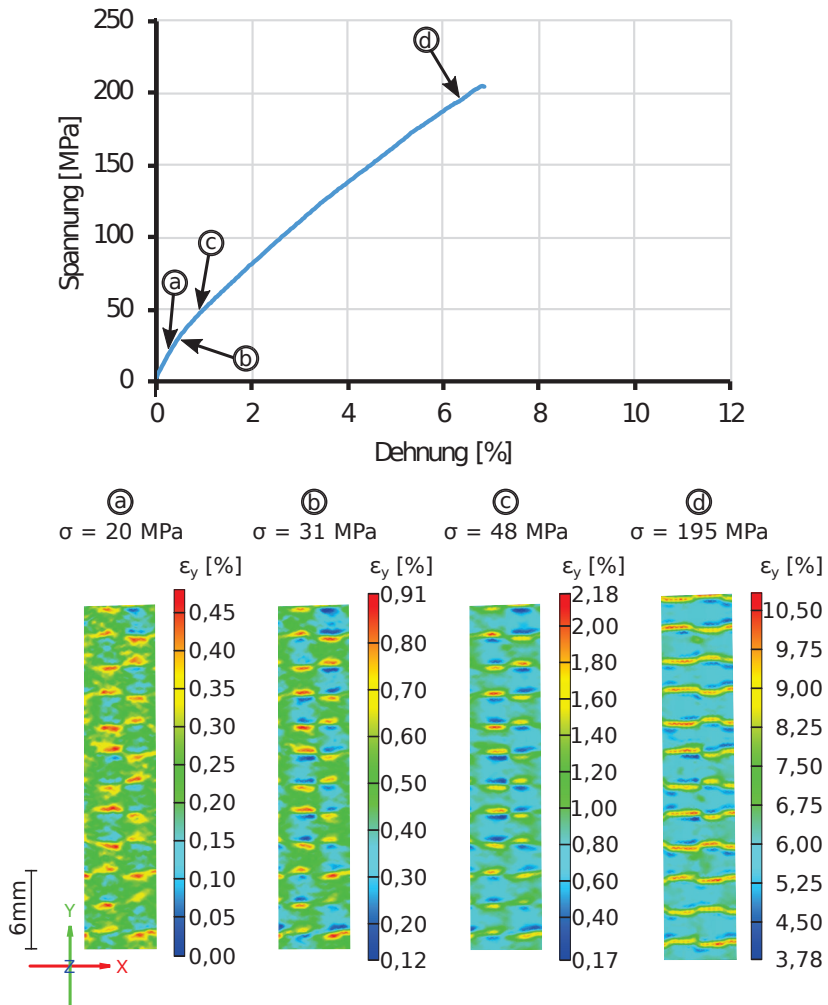
**Abbildung 4.13:** Wahrscheinlichkeitsplot der logarithmierten Zugfestigkeiten  $R_m$  von 12 Versuchen basierend auf einer linearisierten Weibull-Verteilung

Aus wahrscheinlichkeitstechnischen Überlegungen folgt, dass sich eine Normalverteilung ergibt, wenn viele kleine Effekte zusammen wirken und das Werkstoffverhalten bestimmen. Ein typisches Beispiel dafür wäre ein Duktilbruch, bei dem einzelne Poren bei zunehmender Belastung immer weiter wachsen und somit für einen stetigen Schädigungsfortschritt sorgen. Die Weibull-Verteilung ist die Verteilung des schwächsten Gliedes, bei der der größte Fehler versagensentscheidend ist. Ein klassisches Beispiel dieser Verteilungsform ist der Spröbruch bei Keramiken. Übertragen auf den vorliegenden eigenverstärkten mehrschichtigen Werkstoffverbund bedeutet das, dass alle Bändchen dieselben Eigenschaften aufweisen und keine Orientierungsabweichungen auftreten. Sobald ein Bändchen bricht, wird die Last von anderen Bändchen übernommen. Das führt zu einem allmählichen Versagen des Werkstoffsystems. Anders ist es bei Verbundwerkstoffen, wenn schlecht angebundene Bändchen oder Bändchen mit unterschiedlichen Eigenschaften im Komposit enthalten sind. Kommt es auf Grund einer fehlerhaften Bändchenanbindung oder eines besonders schwachen Bändchens im Verbund zum vollständigen Versagen, entspricht dieses Verhalten der Weibull-Verteilung. Nur durch mesoskopische Untersuchungen kann entschieden werden, welches Versagensmodell und somit welche Verteilung auf den mehrlagigen eigenverstärkten PURE-Kunststoffverbund zutrifft.

## 4.2.2 Mesoskopische Analyse

Es wird das Verformungsverhalten eines 2-lagigen und eines 16-lagigen Verbundes betrachtet. Der 2-lagige Verbund liefert Informationen über den Einfluss des Gewebes auf das Verformungsverhalten, während mit den 16-lagigen Kompositen die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Lagen untersucht werden kann.

Abbildung 4.14 setzt das lokale Verformungsverhalten des 2-lagigen Verbunds mit der Spannungs-Dehnungs-Kurve in Beziehung.



**Abbildung 4.14:** Darstellung von Dehnungslokalisierungen an 2-lagigen Pure Kompositen auf der Gewebeoberfläche

Mit Beginn der Belastung des Kompositverbundes bilden sich anfänglich in Belastungsrichtung quadratische Bereiche mit lokalen Verformungsmaxima und -minima. Die roten Verformungsmaxima an den Randbereichen der quadratischen Dehnungslokalisierungen (Abb. 4.14 Punkt (a)) werden mit zunehmender Verformung dominanter, wobei die quadratische Form mit steigender Belastung rückläufig ist.

Als Gegenspieler zu den roten Randbereichen in den „Dehnungsquadraten“ entstehen dunkel blaue Bereiche, die Verformungsminima (Abb. 4.14 Punkt (b)). Die Verformungsminima bleiben auch bei fortschreitender Belastung direkter Gegenpart zu den Verformungsmaxima. Mit der Auflösung der quadratischen Dehnungslokalisierungen entstehen quer zur Belastungsrichtung linienförmige Bereiche hoher Deformation. Die bereits zuvor vorhandenen hohen lokalen Dehnungen bleiben weiterhin bestehen und liegen mittig in den zeilenartigen Verformungserhöhungen. Bei kontinuierlicher Belastung gewinnen die geschwungenen linienförmigen Deformationserhöhungen an Dominanz. Darüber hinaus weisen sie eine über die Messlänge wiederholende Struktur auf. Das gleiche Phänomen lässt sich über die Dehnung in Dickenrichtung darstellen (Abb. 4.15). Anfänglich bildet sich auch hier ein quadratisches Verformungsmuster an der Oberfläche aus. Dabei senken sich die blau/grünen Bereiche stärker ab als die gelb/roten. Diese Darstellung spiegelt die Gewebestruktur an der Oberfläche wieder. Mit steigender Belastung wird diese Verformungsstruktur immer ausgeprägter und es kommt zu einer starken Zunahme der Oberflächentopographie.

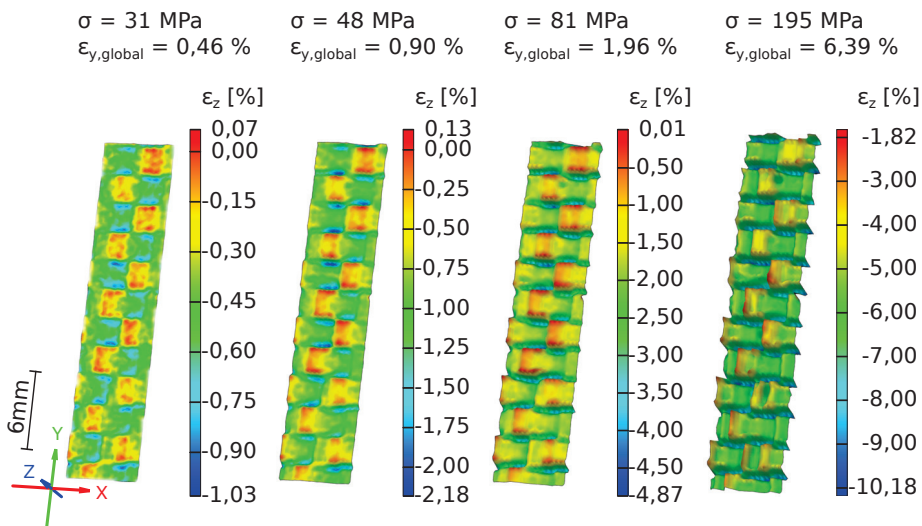
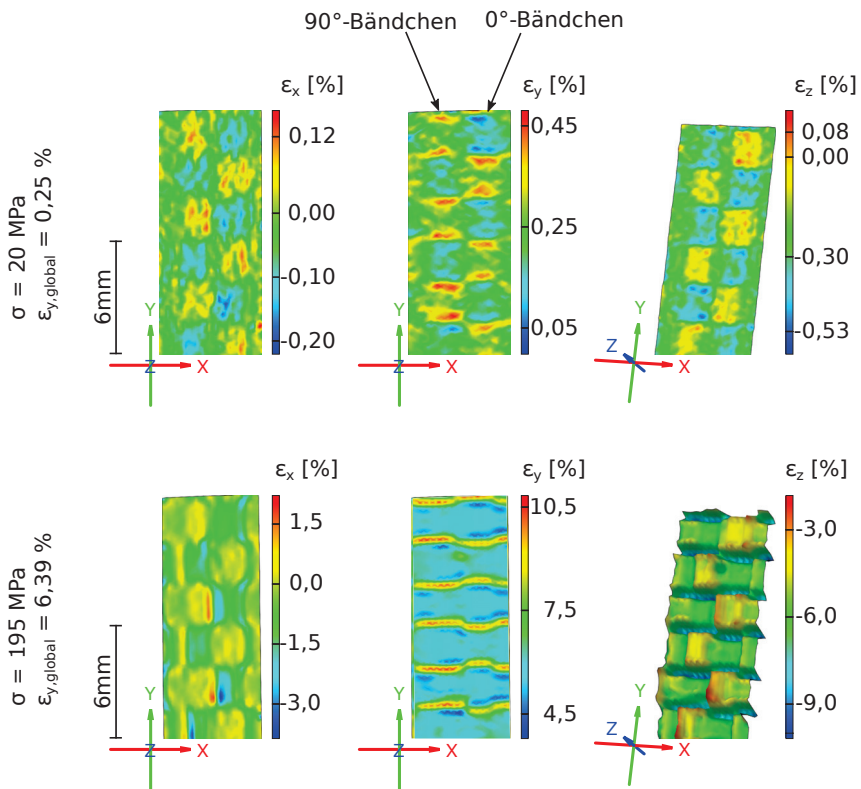


Abbildung 4.15: Bildung von quer zur Belastungsrichtung liegenden linearen lokalen Vertiefungen

An den Grenzen der höher liegenden Bereiche liegen kleine lokale Vertiefungen (Abb. 4.15). Diese Vertiefungen breiten sich mit zunehmender Belastung immer weiter aus. Entlang dieser Minima entstehen Täler, die quer zur Belastungsrichtung verlaufen. Bei höherer Belastung entstehen aus diesen Tälern schlängelinienförmige durchgehende Linien großer Verformung. Im Gegensatz zu den Dehnungen in y-Richtung bleiben die quadratischen Segmente über den gesamten Dehnungsverlauf bestehen, verändern sich jedoch zu einer eher rechteckigen Form.

Der Abbildung 4.16 ist deutlich zu entnehmen, dass die wiederholende Struktur der lokalen Dehnungserhöhungen in y-Richtung mit den gemessenen geschlängelten Vertiefungen in z-Richtung übereinstimmen. Somit resultieren aus den hohen  $\epsilon_y$ -Werten örtlich stärkere Querschnittsveringerungen, und die Minima der y-Dehnung korrelieren mit den lokalen Erhöhungen auf der Oberfläche.



**Abbildung 4.16:** Korrelation lokaler Verformungskonzentrationen in Belastungsrichtung mit lokalen Vertiefungen in Dickenrichtung und Visualisierung der entsprechenden Querdehnung eines 2-lagigen Komposites

Wie der Vergleich in Abbildung 4.16 zeigt, sind auch bei den x-Dehnungen die quadratischen Dehnungslokalisierungen messbar, die sich synchron zu denen der y-Verformung und konträr zu denen in z-Richtung verhalten. Die in allen drei Dehnungsrichtungen messbaren gewebetopologischen Verformungsmuster beschreiben die Gewebestruktur.

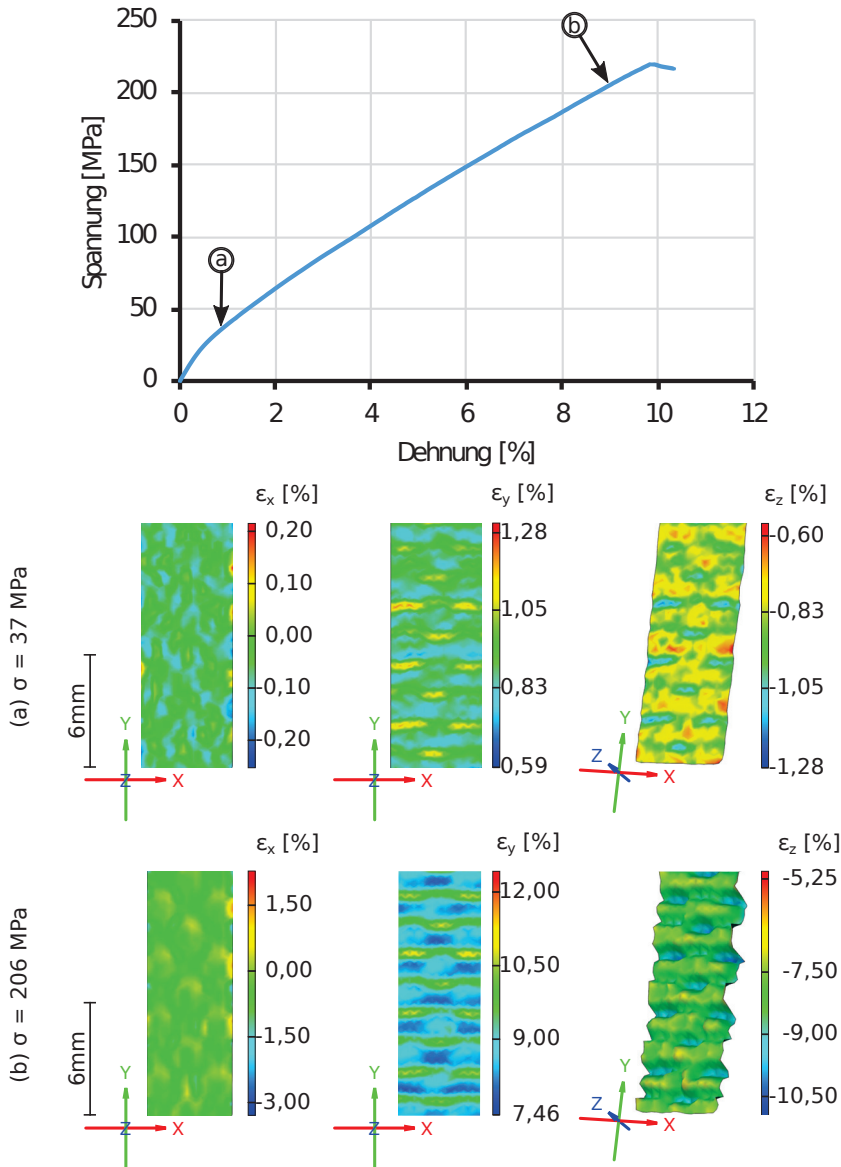
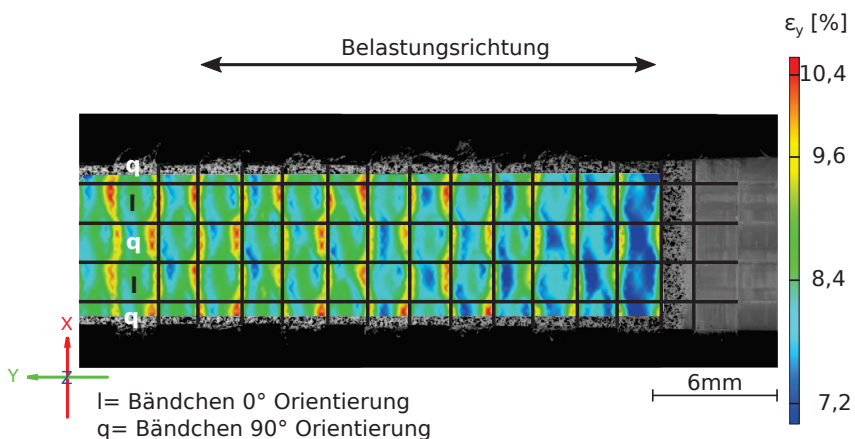


Abbildung 4.17: Darstellung von Dehnungslokalisierungen an 16-lagigen Pure Kompositen auf der Gewebeoberfläche

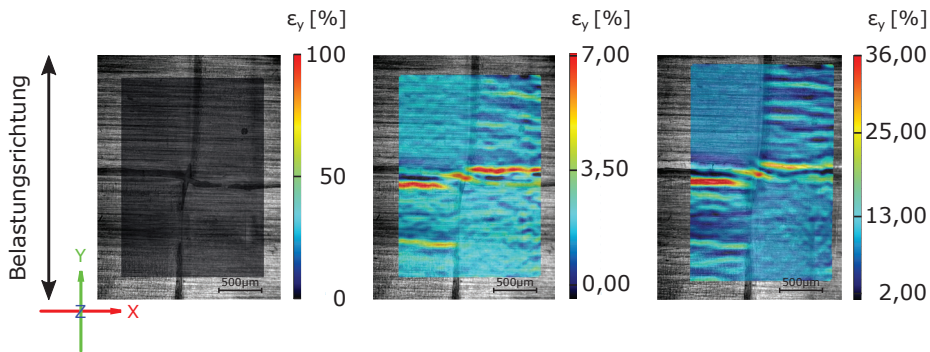
Die 16-lagigen Verbunde zeigen prinzipiell das gleiche Verhalten, wie es ausführlich für die 2-lagigen Composite beschrieben wurde. Es bilden sich linienartige lokale Verformungskonzentrationen sowohl in Dickenrichtung als auch in y-Richtung aus, die quer zur Lastrichtung verlaufen. Im Vergleich zu den 2-lagigen Kunststoffverbunden entstehen anfänglich keine quadratischen Verformungsmuster. Mit fortschreitender Belastung zeigen sich bei der Querdehnung schwache Quadrate lokaler Dehnungskonzentrationen. Diese sind bei weitem nicht so ausgeprägt wie bei den 2-lagigen Verbunden. Die abgeschwächte Ausprägung bzw. das Fehlen der quadratischen Verformungskonzentrationen lässt sich durch den mehrlagigen Aufbau begründen. Da die einzelnen Gewebelagen bei der Verarbeitung nicht exakt übereinander geschichtet sind, kommt es zur Überlagerung der einzelnen Effekte, wodurch sie nicht mehr bzw. nicht so prägnant auftreten.

In Abbildung 4.18 wird das vorhandene gekreuzte Gewebemuster in idealisierter Form von der Oberfläche auf den Bereich der Dehnungsauswertung übertragen. Für diese Auswertung wird ein mehrlagiger Prüfkörper verwendet, bei dem die in 90° zur Belastungsrichtung liegenden Bändchen, bedingt durch eine fehlende obere Deckschicht (Abb. 4.4), nicht sauber geschnitten wurden. Dadurch ist es möglich die Bändchenorientierung in den einzelnen Webquadraten zu bestimmen. Wie bei den Untersuchungen an einem Kreuzungspunkt (Abb. 4.19) wird in Abbildung 4.18 deutlich, dass die lokalen Dehnungserhöhungen sich in den Randbereichen der Bändchen gleicher Orientierungsrichtung befinden. Durch die Bestimmung der Bändchenausrichtung in den Webquadraten lassen sich die lokalen Dehnungserhöhungen den quer belasteten 90°-orientierten Bändchen zuordnen.



**Abbildung 4.18:** Lokalen Dehnungskonzentrationen in 90°-orientierten Bändchen bei einer Spannung von 225 MPa und einer Dehnung von 8,46 %

Um den Verlauf der linearen Verformungsmaxima in y-Richtung näher zu beschreiben, wurden In-situ-Versuche mit der Mikrozugprobe aus einem 16-lagigen Werkstoffverbund durchgeführt, die lokale Informationen der Gewebeerformung eines Kreuzungspunktes liefern. Sie zeigen eine frühe Lokalisierung der Dehnung quer zur Lastrichtung, die versetzt neben den Bändchengrenzen verlaufen. Durch diesen Versatz entsteht auch hierbei ein abgewinkelter Verlauf der lokalen Dehnungserhöhung. Die geschwungene Dehnungskonzentration deckt sich mit den Verläufen in Abbildung 4.14 und 4.17. Somit entstehen die größten Verformungen in Lastrichtung nicht in der koextrudierten Schicht, sondern im Übergangsbereich von der hoch orientierten Gefügestruktur zur Verschweißung.



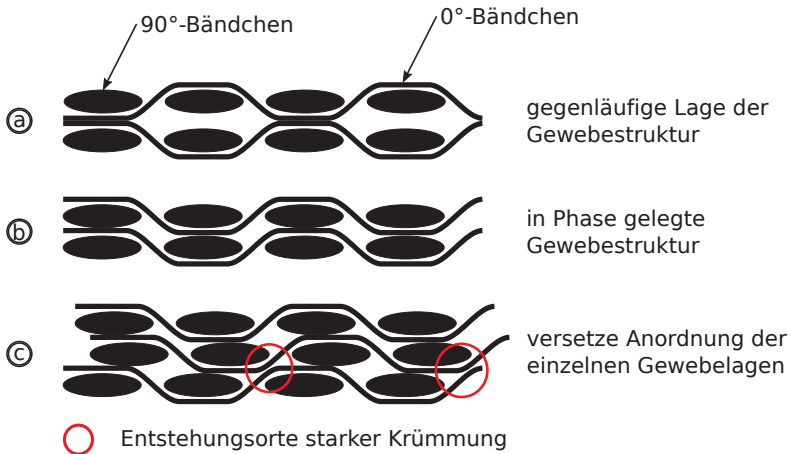
**Abbildung 4.19:** Bildung von lokalen Dehnungskonzentrationen neben der Verschweißung der Bändchen an einem Kreuzungspunkt des Gewebes bei einem 16-lagigen PURE-Verbundwerkstoff

Basierend auf der Gewebestruktur weisen der erste und dritte Quadrant im ausgewerteten Kreuzungspunkt (Abb. 4.19) die gleiche Bändchenorientierung auf. Daraus wird gefolgert, dass die lokalen Dehnungserhöhungen in Bändchen gleicher Orientierung auftreten. Darüberhinaus zeigt die Abbildung 4.19, dass sich im ersten und dritten Quadranten weitere längliche Dehnungsextrema bilden, wohingegen im zweiten und vierten Quadranten eine homogenere Dehnungsverteilung vorliegt.

#### 4.2.2.1 Verformungsanalyse der Gewebelagen

Die Bestimmung der lokalen Verformungen im Probenquerschnitt erfolgt mit der Mikrozugprobe an 16-lagigen PURE-Kompositverbunden. In der Seitenansicht ist der strukturelle Aufbau des 16-lagigen Komposits ersichtlich. Dieser Aufbau besteht aus teilweise verschweißten Bändchen benachbarter Gewebelagen (Abb. 4.20). Das Verschweißen entsteht durch lokales Anschmelzen der koextrudierten Schicht der einzelnen Bändchen,

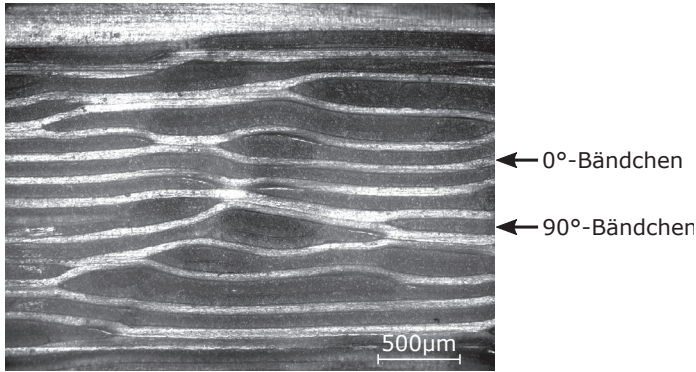
wie in Kapitel 4.1.1 näher beschrieben. Charakteristisch für diese Ansicht sind die langen verschweißten Bereiche der hell dargestellten Bändchen, die parallel zur Belastungsrichtung verlaufen (Abb. 4.21).



**Abbildung 4.20:** Schematischer Aufbau des Komposits und Entstehung stark gekrümmter Bändchen durch Missorientierung der Gewebelagen

Abbildung 4.20 zeigt die grundsätzlichen Unterschiede im Aufbau des Verbundes, die durch die Verschiebung der Gewebelagen gegeneinander entstehen können. Der Vergleich mit Abbildung 4.21 zeigt, dass in einzelnen Bereichen die Gewebelagen nahezu gegenläufig ausgerichtet sind (Abb. 4.20 (a)), was durch waagrecht verlaufende kompaktierte Bändchen erkennbar ist. Es treten aber auch deutliche Verschiebungen auf (Abb. 4.20 (c)), in denen dann schräg zur Oberfläche verlaufende Verschweißungen mit verstärkten Bändchenkrümmungen entstehen.

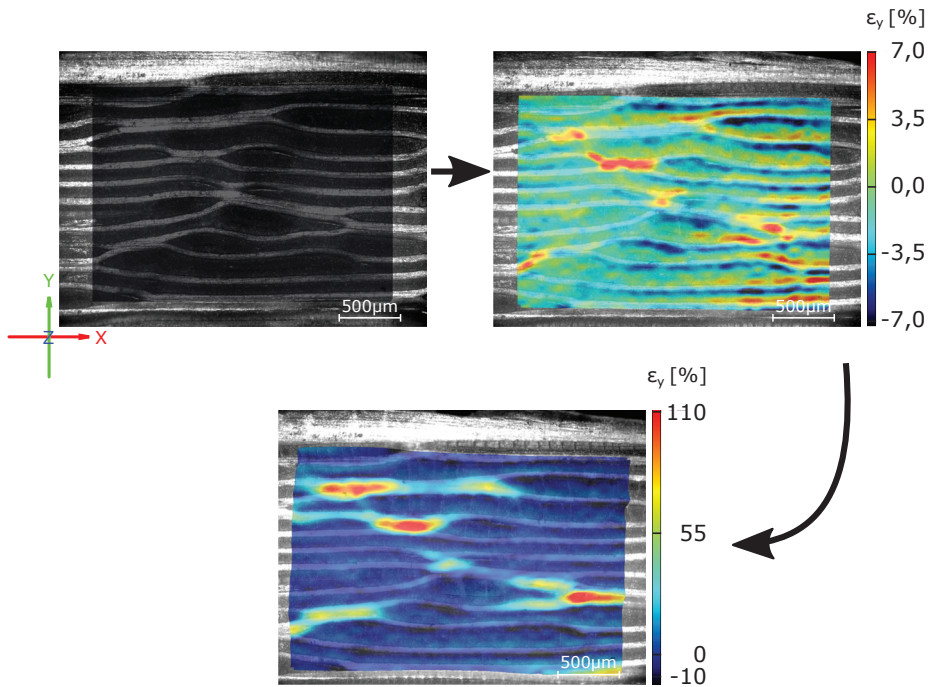
Zusätzlich führen Webfehler, gekrümmte oder verdrehte Bändchen in den Textilhalbzeugen zu Unregelmäßigkeiten im Kompositaufbau, die beim Heißkompaktieren zu starken Missorientierungen der Bändchen im Verbund führen.



**Abbildung 4.21:** Gewebelagen Aufbau eines 16-lagigen PURE-Komposits in der Seitenansicht

Abbildung 4.22 zeigt schon im Ausgangszustand eine große Unregelmäßigkeit in der Anordnung der einzelnen Gewebelagen. Es sind lange schräge, aber auch sehr kurze verschweißte 0°-Bändchen vorhanden. Gerade an den kurzen Verschweißungen weisen die Bändchen einen ausgeprägten welligen Verlauf auf. Einhergehend mit dem Verlauf der 0°-Bändchen ist die unsaubere Ausrichtung der 90°-orientierten Bändchen. Wie der Abbildung 4.22 zu entnehmen ist, resultieren aus der fehlerhaften Anordnung zweier 90°-Bändchen (dicker dunkler Bereich) eine lange schrägverlaufende Verschweißung zweier 0°-Lagen.

Mit Beginn der Belastung des Komposits entstehen zunächst lokale Konzentrationen der Querdehnung an den Bändchengrenzen. Dabei liegen die unter Zug belasteten Bereiche immer an der Oberseite der Bändchen und die Druckbereiche auf der Unterseite. In einigen schrägverlaufenden 0°-Lagen entstehen auch innerhalb der Bändchen lokale Dehnungskonzentrationen. Unter fortlaufender Belastung bilden sich mehrere Bereiche hoher Dehnung in  $y$ -Richtung, jeweils an den Übergängen von zwei verschweißten 0°-Bändchen.

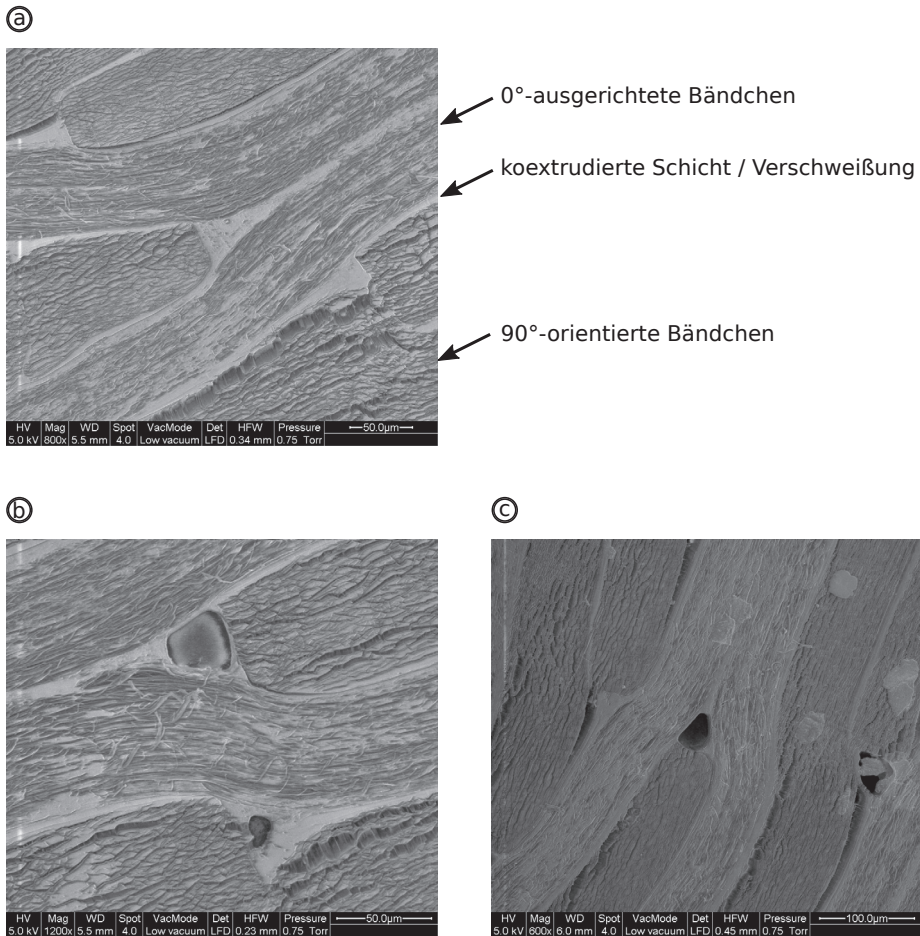


**Abbildung 4.22:** Anfängliche Dehnungslage an den Bändchengrenzen und mit zunehmender Belastung starke Dominanz von Dehnungserhöhungen an den Anfangs- und Endpunkten verschweißter 0°-Lagen (horizontale Belastungsrichtung)

## 4.2.3 Mikroskopische Analyse

### 4.2.3.1 REM-Untersuchung unbelasteter Prüfkörper

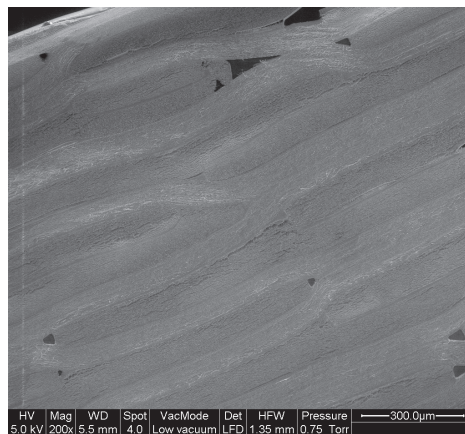
Um mögliche Schwachstellen des Grundmaterials zu identifizieren, werden Dünnschnitte vom unbelasteten Verbundwerkstoff angefertigt. Die REM-Analyse der 20 µm dünnen Schnitte zeigt, dass sich dreieckige Bereiche bilden, in denen kein Material vorhanden ist. Diese Dreiecke entstehen an den Übergangsbereichen, wo 90°-orientierte Bändchen auslaufen und auf 0°-Bändchen treffen. Im weiteren Verlauf werden die Dreiecke an den Übergangsbereichen als Zwickel bezeichnet.



**Abbildung 4.23:** Übersicht der Zwickel im Bereich der Zusammenführung zweier gleich orientierter Bändchen; (a) vollständig gefüllte Zwickel; (b) teilweise gefüllte Zwickel; (c) gefüllte, nicht gefüllte und teilweise gefüllte Zwickel

Die Detailaufnahmen in Abbildung 4.23 zeigen die drei möglichen Zustände der Zwickel. Unter Punkt (a) sind die Zwickel vollständig durch die koextrudierte Schicht gefüllt, was den idealen Materialzustand beschreibt. Bei (b) sind die Dreiecke nur teilweise gefüllt, sodass kleine Hohlräume vorhanden sind. Der Punkt (c) veranschaulicht alle drei möglichen Varianten, von vollständig, über teilweise bis gar nicht gefüllte Zwickel. Durch den fehlenden Materialzusammenhalt der nicht gefüllten Zwickel und der dreieckigen Ausbildung der Poren, die zum Teil spitz zulaufen (Abb. 4.25), bilden diese Fehler im Komposit die erste mögliche Schwachstelle. Diese Hohlräume wurden auch von Alcock et. al [Alc+07b]

detektiert und es wird darauf hingewiesen, dass die nicht gefüllten Zwickel einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Dies ist besonders dann der Fall, wenn mehrere nicht gefüllte Zwickel an schräg verlaufenden Bändchen, bzw. an Bändchen mit sehr ausgeprägter „S-Krümmung“ vorhanden sind. Eine solch starke Krümmung in Kombination mit der Zwickelkonzentration ist in Abbildung 4.24 zu sehen. Auffällig ist, dass es sich um keine regelmäßige Krümmung handelt und dass die Verschweißung der zwei 0°-Lagen sehr kurz ist. Diese kurze Verschweißung entsteht durch den Gewebefehler eines abgelenkten 90°-orientierten Bändchen, links neben dem linken großen keilförmigen Zwickel (Abb. 4.24). Um die Auswirkung der nicht gefüllten Zwickel zu klären werden in Kapitel 4.2.3.2 belastete Prüfkörper untersucht.



**Abbildung 4.24:** Konzentration von drei nicht gefüllten Zwickeln an einer kurzen schrägen Verschweißung zweier 0°-Lagen

Eine weitere mögliche Schwachstelle bilden Risse zwischen den Gewebelagen, die dadurch entstehen können, dass der Heißkompaktierprozess nicht zur Verschweißung ausreicht. Derartige Risse treten folglich in einzelnen Bereichen gehäuft auf (Abb. 4.25).

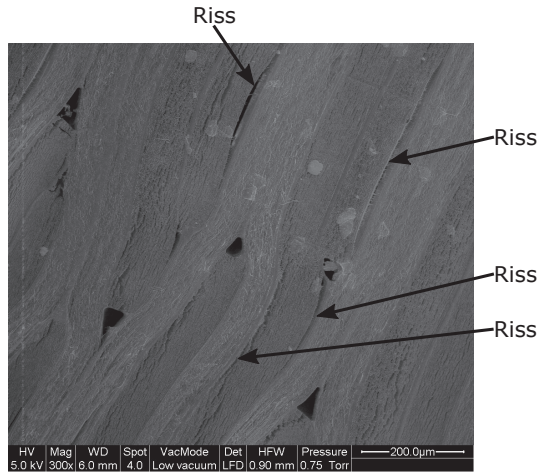
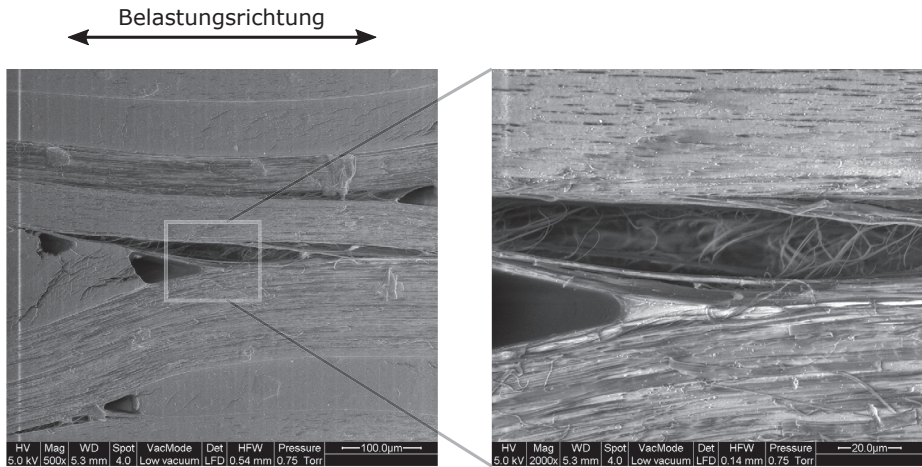


Abbildung 4.25: Längsrisse entlang der 0°-Lage, außerhalb der Verschweißung

#### 4.2.3.2 REM-Untersuchung belasteter Prüfkörper

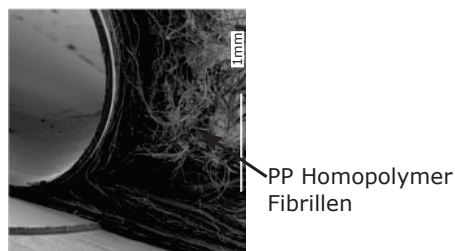
Nachdem im vorherigen Kapitel mögliche Schwachstellen des Komposits im unbelasteten Zustand beschrieben wurden, werden im Folgenden Ausschnitte aus einem mit 200 MPa belasteten Prüfkörper beschrieben, um die identifizierten Schwachstellen auf ihre Wirkung zu überprüfen. Die zu analysierenden Prüfkörper werden mittig aus den belasteten Mikrozugproben entnommen und die Seitenansicht (Abb. 4.6) mit einem Kryomikrotom präpariert, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben.

In Abbildung 4.26 ist eine deutliche Konzentration von nicht gefüllten Zwickeln an einem Übergang zweier in 0°-Richtung liegenden verschweißten Bändchen zu erkennen. Durch die Lasteinleitung möchten sich die primär lasttragenden 0°-orientierten gekrümmten Bändchen gerade ausrichten. Daraus folgt eine spiegelsymmetrische Schädigung im Bereich der „S-Krümmung“. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt, dass die koextrudierte Schicht erhalten bleibt und das Band über der Verschweißung abreißt. Beim Ablösevorgang fächert das Bändchen auf, so dass die PP-Fibrillen zum Vorschein kommen. Die REM-Aufnahmen bestätigen die Vermutung, sodass sich eine Ansammlung von nicht gefüllten Zwickeln an Schrägen von 0°-Lagen als Schwachstelle identifizieren lässt (vgl. Abb. 4.24).



**Abbildung 4.26:** Schädigung an einer kurzen schrägen Verschweißung zweier 0°-Lagen mit nicht gefüllter Zwickelkonzentration nach einer Belastung von 200 MPa

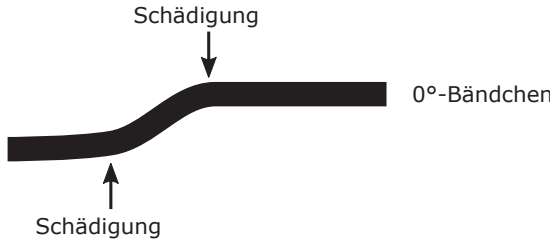
Das gleiche Schädigungsverhalten zeigten Peeltests an verschweißten Bändchen von Alcock et al [Alc+07a]. Dabei verlief die Schädigung auch oberhalb der koextrudierten Schicht durch das hoch orientierte Monopolymer [Alc+07a]. Das Verhalten lässt sich auf die hohe Orientierung des Monopolymers zurückführen, der durch den Streckprozess eine starke anisotrope, fibrilläre Struktur ausbildet [Per71]. Somit nimmt die Menge an isotropen Molekülen mit steigendem Streckgrad ab. Daraus resultiert, je stärker die Bändchen verstreckt sind, desto geringer ist deren Festigkeit quer zur Orientierungsrichtung [Alc+07a].



**Abbildung 4.27:** Kohäsives Versagen verschweißter Bändchen im Scherversuch/Peeltest [Alc+07a]

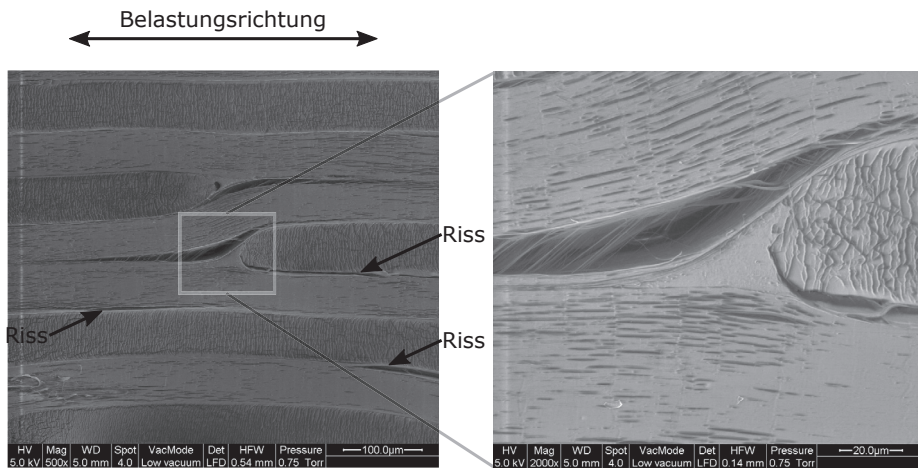
Abbildung 4.29 zeigt, dass neben ungefüllten auch gefüllte Zwickel einen Beitrag zum Schädigungsverhalten leisten können. In dem betrachteten Fall hat sich ein Bändchen im Kreuzungsbereich beidseitig abgelöst. Allerdings weisen diese Risse, die sich parallel

zur Belastungsrichtung gebildet haben daraufhin, dass es sich hier um einen Bereich mit vergleichsweise schlechter Kompaktierung handelt (Abb. 4.28).



**Abbildung 4.28:** Schematische Darstellung einer symmetrischen Schädigung an einem 0°-orientierten Bändchen in einem Gewebeverbund

Ein Hinweis darauf, dass in diesem Bereich eine Vorschädigung vorgelegen haben kann, liefert der vergrößerte Ausschnitt in Abbildung 4.29, in dem vergleichsweise wenige Fibrillen sichtbar sind.

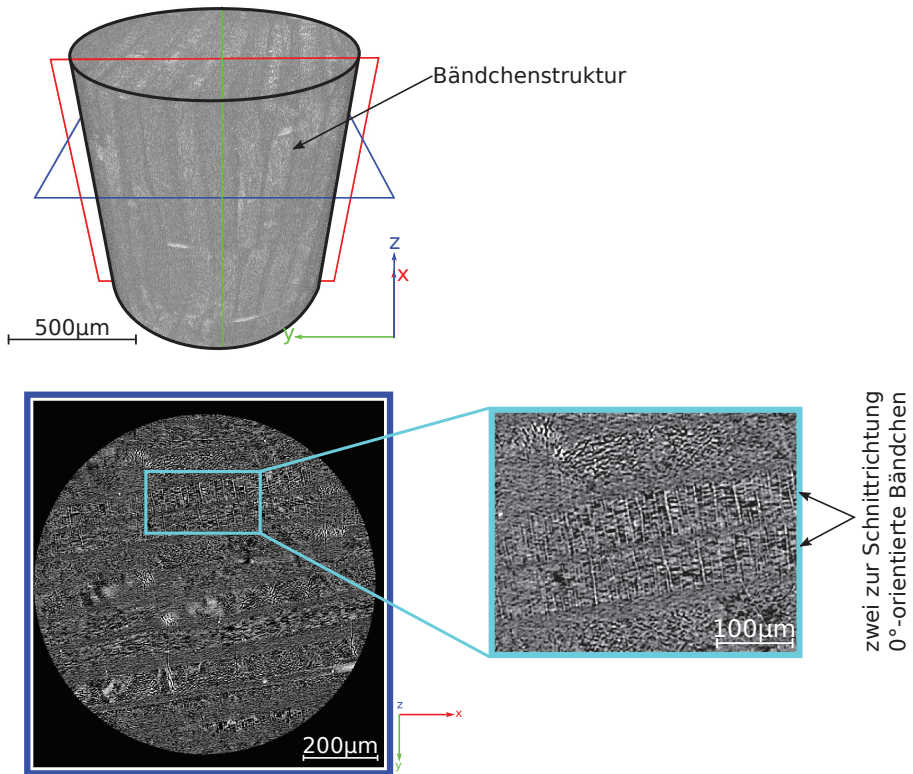


**Abbildung 4.29:** Schädigung eines gefüllten Zwickels nach einer Belastung von 200 MPa

### 4.2.3.3 Tomographie

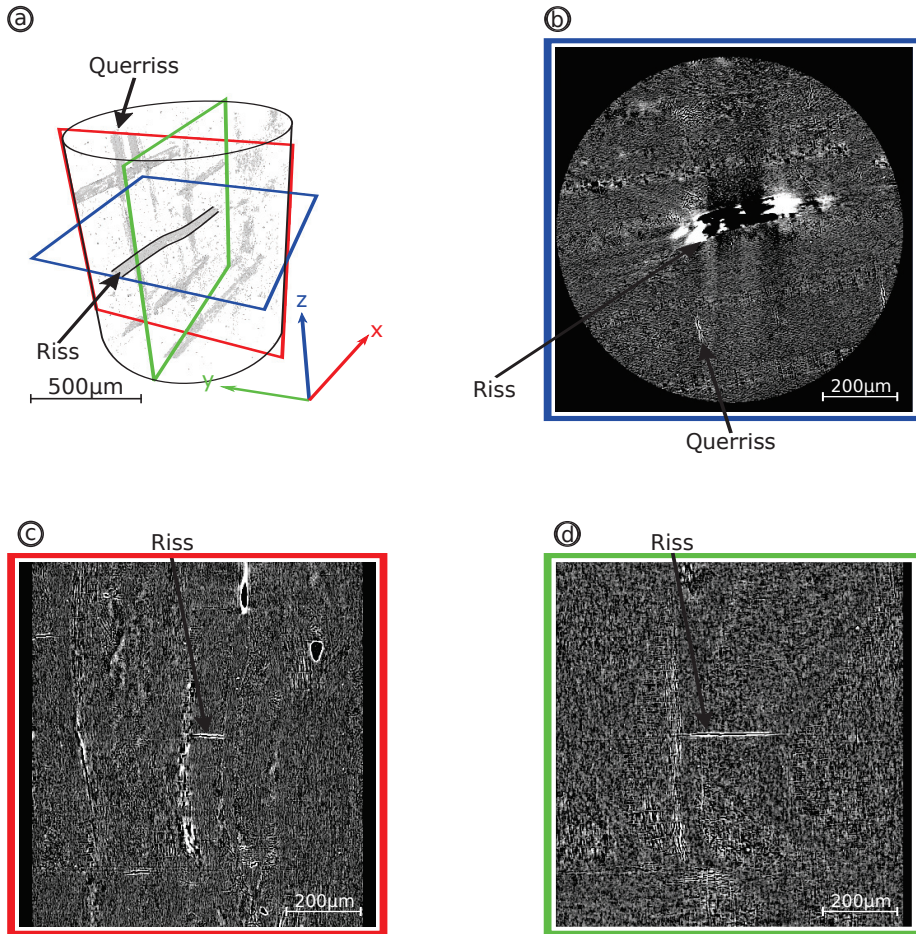
Aufgrund der komplexen dreidimensionalen Struktur des Kompositaufbaus, dienen  $\mu$ CT-Aufnahmen an einem 16-lagigen unbelasteten PURE-Verbundwerkstoff zur Detektion weiterer möglicher Schwachstellen. Die verwendeten Aufnahmen basieren auf Messungen im X Radia Demolabor mit einem Zeiss Xradia 520 Versa. Es wurde ein zylindrisches

Messfeld mit einem Durchmesser von 0,8 mm und einer Höhe von 0,8 mm bei einer Spannung von 40 kV in einer Scanzeit von 7 h durchstrahlt. Die Kantenlänge des Voxels beträgt 0,8  $\mu\text{m}$ . Abbildung 4.30 zeigt, dass die im Ätzverfahren festgestellte Strukturierung der Bändchen [Roh13] auch in der Tomographie sichtbar ist. Diese Strukturierung entspricht den kristallinen Bereichen, die eine höhere Dichte aufweisen.



**Abbildung 4.30:** Darstellung der einzelnen Bändchenlagen im Volumen und teilkristalliner Strukturen in einem 16-lagigen PURE-Komposit

In einzelnen Schnitten sind Risse zwischen den Bändchenlagen erkennbar. Diese sind vor allem im Probeninneren zu finden, was auf eine mangelhafte Heißkompaktierung hinweist. Neben diesen Rissen sind rissartige Strukturen quer zur Bändchenrichtung erkennbar (Abb. 4.31 (a) und (b)), die nicht mit den Zwickeln aus Kap. 4.2.3.1 und 4.2.3.2 übereinstimmen können. Das bedeutet, dass hier der Materialzusammenhalt durch Fehler im Bändchen gestört wird.

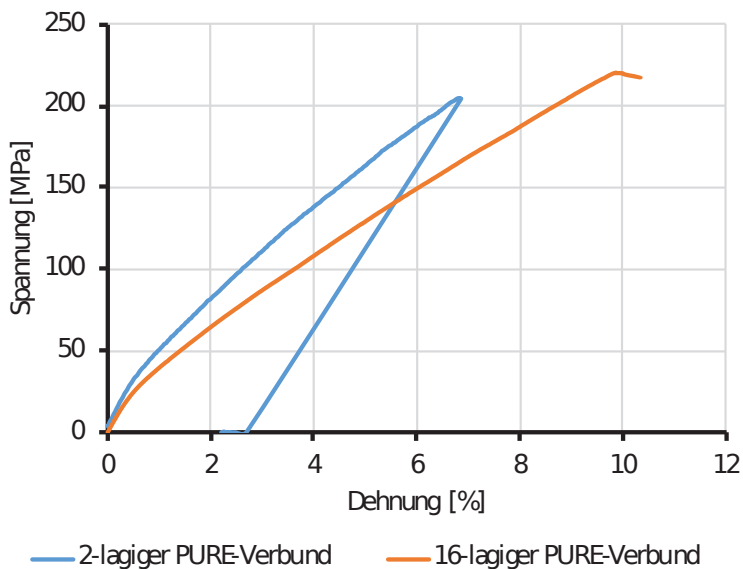


**Abbildung 4.31:** Defektstrukturen im Inneren eines unbelasteten 16-lagigen Pure-Komposits

Darüber hinaus lassen sich linienartige Defektstrukturen in dem Volumenmodell detektieren (Abb. 4.31 (a)). Exemplarisch dafür wurde einer dieser linienartigen Defekte hervorgehoben, der sich basierend auf den Ergebnissen aus den drei Schnittebenen (Abb. 4.31 (b), (c), (d)) als Riss beschreiben lässt. Somit korrelieren die länglichen Strukturen im Volumenmodell mit Defekten in den Schichtaufnahmen der drei Ebenen.

### 4.3 Diskussion

Die Verformungs- und Schädigungsanalyse des PURE-Verbundwerkstoffs zeigt, dass das mechanische Verhalten wesentlich durch das Bändchengewebe bestimmt ist. Das Dehnungsfeld, das sich unter monotoner Belastung ausbildet, folgt primär der geometrischen Anordnung der Bändchen in der obersten Gewebelage. Diesser Effekt ist bei 2-lagigen Verbunden von Anfang an vorhanden, während bei 16-lagigen Verbunden sich erst bei höheren Lasten entsprechende Dehnungskonzentrationen ausbilden. Die beobachteten Bereiche hoher Dehnungskonzentration liegen senkrecht zur Lastrichtung und befinden sich in den Bereichen, in denen die Bändchen aufgrund des Leinwandgewebes relativ stark gekrümmt sind. Bemerkenswert ist, dass der 16-lagige Verbund deutlich weicher ist als der 2-lagige (Abb. 4.32), obwohl ein mehrlagiger Verbund eigentlich steifer sein sollte. Dies lässt schließen, dass der 16-lagige Verbund einige schwächere Lagen enthält, die im Inneren des Verbundes liegen.



**Abbildung 4.32:** Gegenüberstellung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme eines zwei- und 16-lagigen PURE Komposits; deutliche Reduktion der Steifigkeit des 16-lagigen Verbundes

Die Analyse der Bändchenanordnung in Dickenrichtung zeigt, dass Bändchen durch den Versatz der Gewebelagen zueinander teilweise schräg zur Lastrichtung angeordnet sind, woraus sich aufgrund ihrer Anisotropie bereits eine Reduktion der Steifigkeit ergibt. Eine

zusätzliche Minderung der Steifigkeit entsteht durch innere Risse bedingt durch mangelnde Wirkung des Heißkompaktierprozesses.

Das Versagensverhalten wird ebenfalls durch die Bändchenarchitektur bestimmt. In Bereichen, in denen die Bändchen schräg zur Lastrichtung liegen, können sich durch die lokalen Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften positive Querdehnungen ausbilden, die zum Abschälen der Bändchen parallel zu den Verschweißungen führen. Dieser Effekt wird durch Hohlräume verstärkt, die sich an den Kreuzungsstellen des Gewebes bilden können, wenn beim Heißkompaktieren nicht ausreichend Material aus der amorphen koextrudierten Schicht in diese Übergangsbereiche gelangt. Dominierende Schwachstellen mit sehr hohen positiven Querdehnungen entstehen dadurch, dass mehrere ungefüllte Kreuzungspunkte übereinander liegen, was durch die Gewebelagengeometrie stets mit einer deutlichen Schrägstellung und Krümmung von Bändchen verbunden ist. Das Versagen entsteht dadurch, dass sich die Bändchen im Bereich hoher positiver Querdehnung von einander lösen. Innerhalb des Messfeldes befinden sich eine Reihe von derartigen Dehnungslokalisierungen, die, wie Abbildung 4.22 zeigt, auch vereinzelt miteinander in Wechselwirkung stehen können. Damit liegt weder Weakest-Link-Verhalten noch ein „mittleres“ Bruchverhalten vor, das durch die Normalverteilung beschrieben werden kann. Dies steht im Einklang mit der statistischen Analyse der Festigkeitswerte, die keinen eindeutigen Befund bezüglich der Verteilungsfunktion lieferte.

Die Gemeinsamkeit der Schwachstellen in Kapitel 4.2 liegt darin, dass durch die Krümmungen der in Lastrichtung liegenden Bändchen lokal große Querkräfte bzw. Querdehnungen auftreten, deren Ausprägung am stärksten im Bereich der Zwickel ist. Entlang der Bändchengrenzen treten auch Zug- und Druckkräfte quer zur Belastungsrichtung auf, jedoch dominieren mit fortschreitender Belastung die Verschiebungen an den Zwickeln (Abb. 4.22). Dabei spielt die Füllung der Zwickel nur eine untergeordnete Rolle, da die Schädigung im Randbereich zwischen hochorientierter Struktur und koextrudierter Schicht entsteht, wodurch die Kontur des Zwickels erhalten bleibt, oder aber im Bereich der koextrudierten Schichten, wenn der Heißkompaktierprozess nicht seine vollständige Wirkung erbracht hat (Abb. 4.29). Die Schädigungsmechanismen lassen sich mittels der lokalen Dehnungsanalyse aufklären, wobei die Betrachtungsrichtung eine bedeutende Rolle spielt. Zur Bestimmung der Dehnungslokalisierungen ist der Probenquerschnitt zu wählen, da nur dieser die versagenskritischen Bereiche darstellt und somit zum Verständnis des Werkstoffsystems führt. Mittels röntgenographischer Verfahren ist es möglich die Bändchen abzubilden und einzelne Defektstrukturen im Inneren des PURE-Verbundes zu detektieren. Somit können an gezielt belasteten Prüfkörpern Defekte in ihrer Dreidimensionalität zu untersuchen und deren Verlauf analysiert werden.

## Kapitel 5

# Eigenschaften der Verbundzonen bei Einpresskontakten (Press-Fit-Kontakten)

Im Bereich der Antriebstechnik bietet die Einpresstechnik eine interessante Alternative zu anderen gängigen Kontaktierverfahren, wie z.B. Löt-, Schraub-, und Klemmverbindungen. Diese Verbindungstechnik zeichnet sich aus durch minimalen Platzbedarf, gute Reparierbarkeit und eine bis zu hundertfach geringere Ausfallrate als die genannten Alternativen [Sie04]. Im Gegensatz zu den Lötverfahren handelt es sich bei der Einpresstechnik um eine Kaltkontaktiertechnik, bei der Pins mit ausgeformten Federelementen in eine Leiterplatte eingepresst werden [Kim14].

Ⓐ

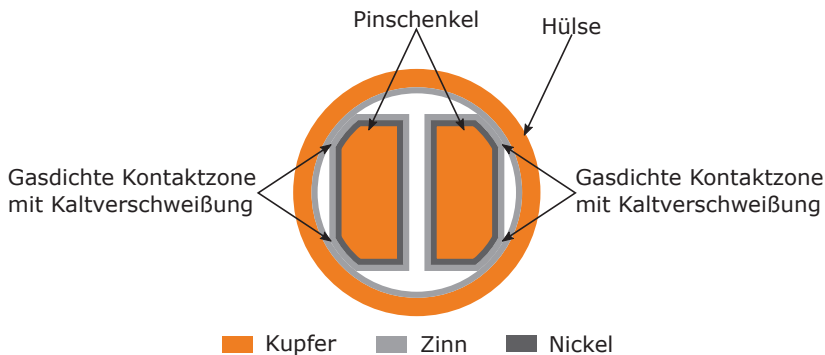


Ⓑ



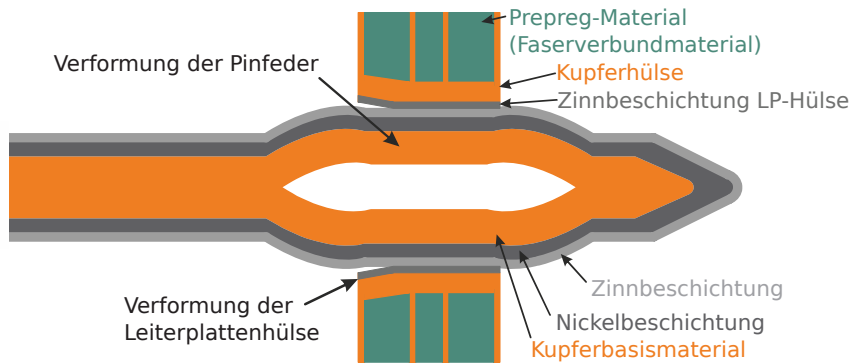
**Abbildung 5.1:** Darstellung der beiden geprüften Pin geometrien; (a) FlexPin mit offener Pinspitze, (b) EloPin mit geschlossener Pinspitze

Im Verlauf des Einpressvorgangs, der in diesem Falle mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/min abläuft, kommt es zur plastischen Verformung des Pins und der Hülse. Während des Fügevorgangs entsteht eine gasdichte Verbindung zwischen den beiden Kontaktpartnern [Hei09]. In den vier Anlagepunkten zwischen Pin und Hülse bildet sich unter dem vorhandenen Druck nach ca. 24 Stunden eine Kontaktzone, die sich als Kaltverschweißung zwischen beiden Kontaktpartnern beschreiben lässt [BA14] (5.2).



**Abbildung 5.2:** Schematische Darstellung eines Querschliffs der Press-Fit-Verbindung und Kennzeichnung der 4 Kontaktbereiche

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Pins betrachtet. Das ist zum einen ein Pin mit geöffneter Pinspitze (FlexxPin) und zum anderen eine Geometrie mit geschlossener Pinspitze (EloPin) (Abb. 5.1). Beide Pins haben eine flexible Zone durch die Federwirkung eines elastischen Auges („eye of the needle“), und es wird in beiden Fällen das selbe Materialsystem verwendet (Abb. 5.2). Der einzupressende Pins besteht aus einer CuNiSi-Kupferlegierung als Grundwerkstoff, der mittels eines galvanischen Prozesses mit 1 - 3  $\mu\text{m}$  Nickel und darauf 0,8 - 2  $\mu\text{m}$  Zinn beschichtet wird (Abb. 5.3) [Pot+17]. Als Basiswerkstoff für die Platinen dient der isolierende glasfaserverstärkte Verbundkunststoff Isola IT 180 von Goettle in Form von Gewebeprepreps, die zu 1,6 mm dicken Platinen mit 6 gleichmäßig verteilten dünnen Kupferleitern, die als Leitbahnen fungieren, verarbeitet werden. Durch einen galvanischen Prozess wird in die Bohrungen für die Hülsen eine min. 25  $\mu\text{m}$  dicke Cu-Schicht abgeschieden, worauf durch einen chemisch-physikalischen Prozess eine weitere ca. 1 - 2  $\mu\text{m}$  dünne Sn-Schicht aufgetragen wird [Pot+17]. Diese beschichtete Bohrung wird als Hülse bezeichnet. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 5.3 dargestellt.



**Abbildung 5.3:** Schematischer Aufbau eines eingepressten Pins inkl. dem Schichtaufbau des Multimaterialsystems am Beispiel eines Pins mit geschlossener Pinspitze [Kim14]

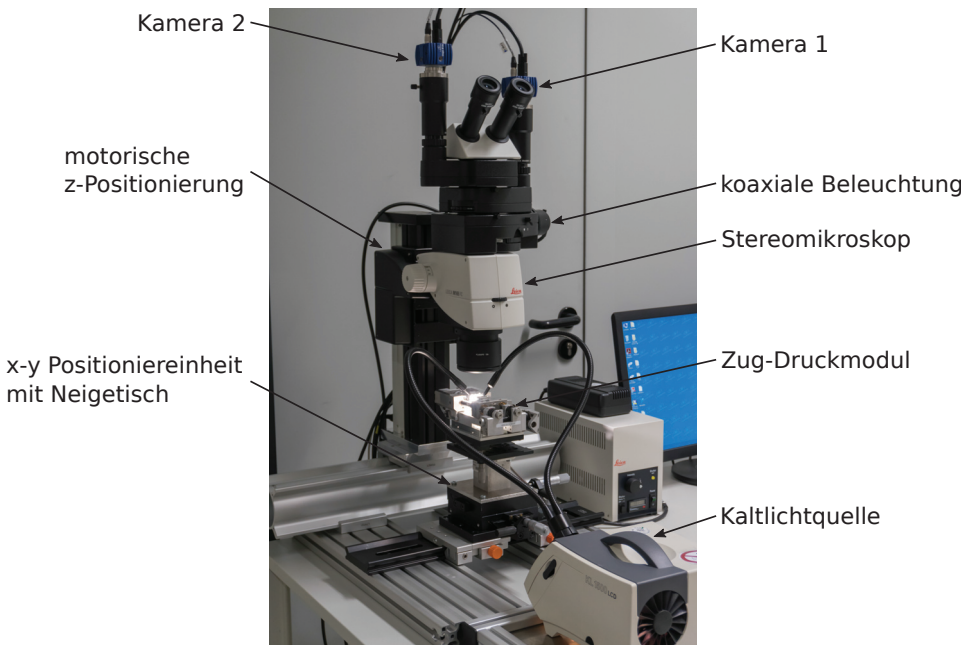
Die lokalen Materialeigenschaften eines Press-Fit-Kontakts, in Kombination mit einer Cu-Hülse und der daraus resultierenden Kaltverschweißung, wurden bereits von Manninen et. al mittels eines Nanoindenters bestimmt [Man+07]. Jedoch gestaltete sich bisher die mechanische Modellierung der Kontaktzone als schwierig, da kein direkter Vergleich zwischen der Simulation und den tatsächlich vorliegenden Deformationen möglich war. In dieser Arbeit sollen die mechanischen Eigenschaften der Kontaktzone mit der digitalen Bildkorrelation bestimmt werden. Dabei ist eine Charakterisierungsmethode zu erarbeiten, um die experimentellen Daten mit den Ergebnissen der Simulation zu korrelieren. Aus dieser Methode muss eine Früherkennung der Schädigung innerhalb der Kontaktzone, also das Aufreißen der Kaltverschweißung, ersichtlich sein.

## 5.1 Versuchsmethodik

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und den lokalen Verformungen einer Press-Fit-Verbindung sollte anfänglich ein Prüfkörper konzipiert werden, der es ermöglicht, dass die reale Kontaktzone auch in der Prüfmaschine optisch zugänglich ist. Darüber hinaus muss der Prüfkörper definiert und reproduzierbar belastet werden können, um die Last gezielt in die Kaltverschweißung einzuleiten. Somit wurde in Betracht gezogen, die Probengestaltung in Analogie zur Pure Mikrozugprobe (Kap. 4.1.3) durchzuführen. Das bedeutet, dass der Prüfkörper aufgeschnitten wird und die Oberfläche sehr gut zu präparieren ist, um die einzelnen Elemente der Verbindung (Hülse, Kaltverschweißung und Pin) darzustellen. Als mögliche Schnittvarianten kämen ein Längs- oder Querschnitt

(Abb. 5.2 und 5.3) durch den Press-Fit-Verbund in Frage. Jedoch verändert das Aufschneiden die Kontaktbedingungen und spiegelt somit nicht den realen Verbund wieder. Daraus folgt, dass der Pin im eingepressten Zustand mit geschlossener Hülse geprüft werden muss. Aufgrund des geschlossenen Verbundes ist die Kaltverschweißung optisch nicht zugänglich, und die Schädigung der Kontaktzone muss über die Antwort des äußeren Systems erfasst werden. Dabei laufen die Schädigungsvorgänge auf mikroskopischer Ebene bei kleiner  $1\ \mu\text{m}$  ab, wohingegen die Pinspitze und die Hülse in Größendimensionen von ca.  $0,1 - 1,5\ \text{mm}$  liegen. Die Bewegung von Pinfahne bzw. Pinspitze relativ zur Hülse kann als Indikator dafür verwendet werden, ob die Kaltverschweißung noch intakt ist, da eine vollständig ausgeprägte kaltverschweißte Zone eine höhere Steifigkeit liefert als eine vorgeschädigte Zone. Dementsprechend besteht die experimentelle Herausforderung darin, eine Versuchsmethodik zu entwickeln, die diese Relativverschiebungen mit hoher Genauigkeit messen kann.

### 5.1.1 Messaufbau mit Leica Mikroskop



**Abbildung 5.4:** Prüfaufbau zur Bestimmung der Verschiebungen an eingepressten Press-Fit-Verbindungen

Das Ziel des Prüfaufbaus ist es, die Pinspitze inkl. dem umgebenden Werkstoffsystem optisch zu erfassen und gleichzeitig kleinste Bewegungen mittels DIC an dem Verbundsystem zu messen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird ein eigens konzipierter Versuchsstand verwendet (Abb. 5.4).

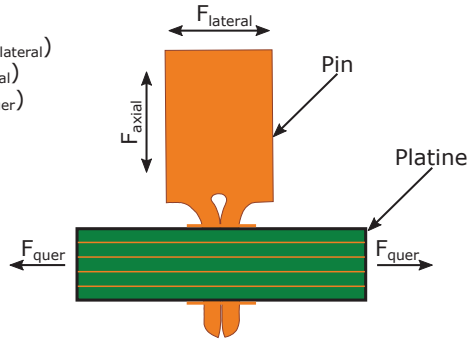
Die Erfassung der notwendigen Bilddaten erfolgt mit einem optische Stereomikroskop M165 FLC der Firma Leica, welches in Zusammenarbeit mit der Firma LaVision speziell für den Einsatz der DIC erweitert wurde. Zur gezielten und gleichmäßigen Ausleuchtung der Prüfkörper wird eine koaxiale Beleuchtung in Kombination mit einer externen Kaltlichtquelle verwendet.

Zur Belastung der Prüfkörper kommt ein Zug-Druckmodul der Firma Kamrath & Weiss zum Einsatz. Um eine wiederholgenaue Ausrichtung des Moduls unter dem Mikroskop zu gewährleisten, findet ein x-y-Positioniertisch Verwendung, der auf einem speziellen Profilsystem geführt und manuell fixiert wird. Durch Mikrometerschrauben am Positioniertisch lässt sich die exakte Platzierung des Zug-Druckmoduls bzw. des Prüfkörpers vornehmen. Über ein Distanzelement wird ein Neigetisch auf dem Positioniertisch befestigt. Dieser dient dazu die Oberfläche der Prüfkörper zum Objektiv auszurichten und erlaubt es Lichtreflexionen, die von der koaxialen Beleuchtung ausgehen, auf ein Minimum zu reduzieren. Das Zug-Druckmodul wird formschlüssig auf dem Neigetisch befestigt, so dass eine Reproduzierbarkeit der Versuche gewährleistet ist.

Die Belastung des Pin-Hülse-Systems kann axial, quer oder lateral erfolgen (Abb. 5.5). Bei der axialen Belastung liegt im kaltverschweißten Bereich eine Scherbeanspruchung vor, die bei einer kritischen Auslenkung zum Versagen führt. Es ist zu erwarten, dass die Kaltverschweißung an allen vier Anlageflächen (Abb. 5.2) aufreißen muss, bevor sich die Steifigkeit des Pin-Hülse-Systems wesentlich ändert. Darüber hinaus kann es beim Versagen einzelner Verschweißung zur Verkippung des Pins kommen, woraus schlecht zu definierende Randbedingungen resultieren. Deshalb wird diese Versuchsführung nicht weiter thematisiert.

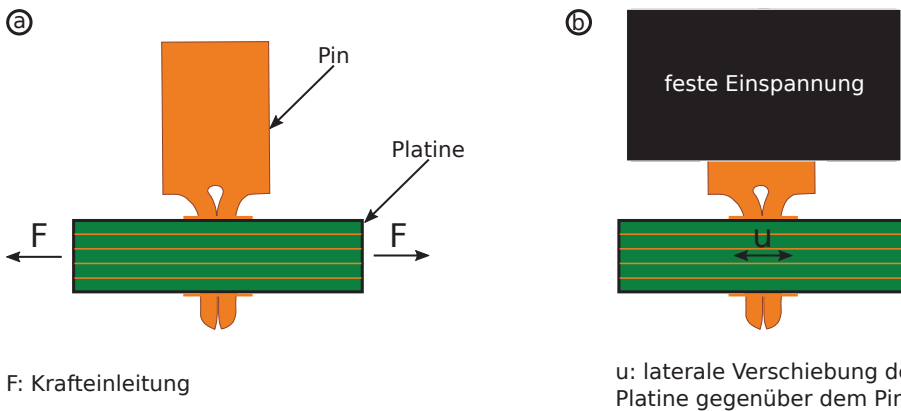
**Belastungsszenarien**

1. Laterale Belastung des Pins ( $F_{lateral}$ )
2. Axiale Belastung des Pins ( $F_{axial}$ )
3. Querbelastung der Platine ( $F_{quer}$ )



**Abbildung 5.5:** Mögliche Belastungsszenarien der Press-Fit-Verbindung

Bei einer Belastung quer zum Pin werden die kaltverschweißten Zonen im wesentlichen unter konstantem Zug belastet. Erfolgt die Einleitung der Verschiebungen über die Platine, so werden die Kaltverschweißungen über die Hülse belastet und eine teilweise Ablösung kann stattfinden. Dies ist von Vorteil, wenn die Entwicklung der Schädigung beobachtet werden soll. Die Bewegung an der Pinspitze relativ zur Hülse gibt Aufschluss über den Zustand des Systems. Den realitätsnahen Belastungsfall spiegelt die laterale Belastung wieder. Diese Belastungsart ist sehr gut für eine Zug-Druck-Wechselbeanspruchung geeignet. Allerdings ist damit zu rechnen, dass die Risseinleitung in der kaltverschweißten Zone sehr stark von der Geometrie des Übergangs zwischen verschweißtem und nicht verschweißtem Bereich abhängt. Auf Basis dieser Überlegungen wird die quer und laterale Belastung des Press-Fit-Verbunds für die folgenden Versuche ausgewählt. Abbildung 5.6 zeigt die schematische Darstellung beider Versuchsführungen.

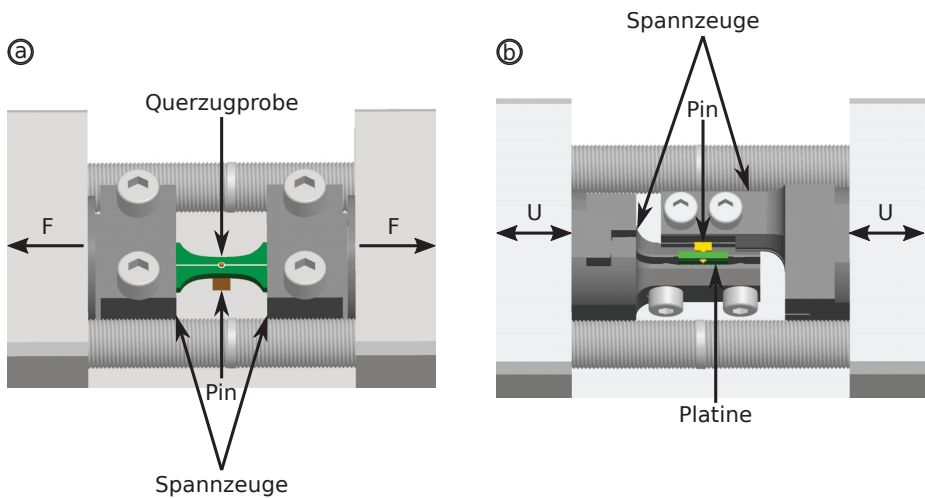


F: Krafteinleitung

u: laterale Verschiebung der Platine gegenüber dem Pin

**Abbildung 5.6:** Belastungsarten der Press-Fit-Verbindung; (a) Zugversuch mit Querzugprobe, (b) laterale Belastung der Kontaktierung

Bedingt durch die differierenden Lasteinleitungen in den Press-Fit-Verbund sind auch zwei separate Spannzeuge notwendig. Für die Querkzugproben wurde ein Standardflächspannzeug der Firma Kammrath & Weiss verwendet während für die laterale Belastung ein eigens entwickeltes Spannzeug eingesetzt wurde (Abb. 5.7). Da zu erwarten ist, dass die Kräfte, die zur Risseinleitung in der Kaltverschweißung führen, sehr klein sind, muss gewährleistet sein, dass beim Einspannen keine Schädigung auftritt. Die Auslenkung des Pins muss über eine feste Einspannung mit hoher Steifigkeit erfolgen, da Nachgiebigkeiten im System zu undefinierten Belastungszuständen führen würden. Daneben muss die Vorrichtung eine querkräftfreie Einleitung der Verschiebung erlauben und der eingepresste Pin muss optisch zugänglich sein.



**Abbildung 5.7:** CAD-Modell der Probeneinspannung für (a) die Zugversuche und (b) die laterale Belastung im Zug-Druckmodul

### 5.1.2 Probengeometrien

Als Grundgeometrie des Prüfkörpers wurde auf eine modifizierte 3-Radien-Probe von Wessel [Wes11] zurückgegriffen, deren Abmaße in Abbildung 5.8 gegeben sind. Eine FEM-Rechnung in [Wes11] zeigt einen relativ großen mittleren Prüfbereich mit homogener Spannungsverteilung. Um eine gleichmäßige Kräfteinleitung in die vier Kontaktzonen zwischen Pin und Hülse zu gewährleisten, befindet sich die Hülse mit eingepresstem Pin mittig im Prüfbereich.

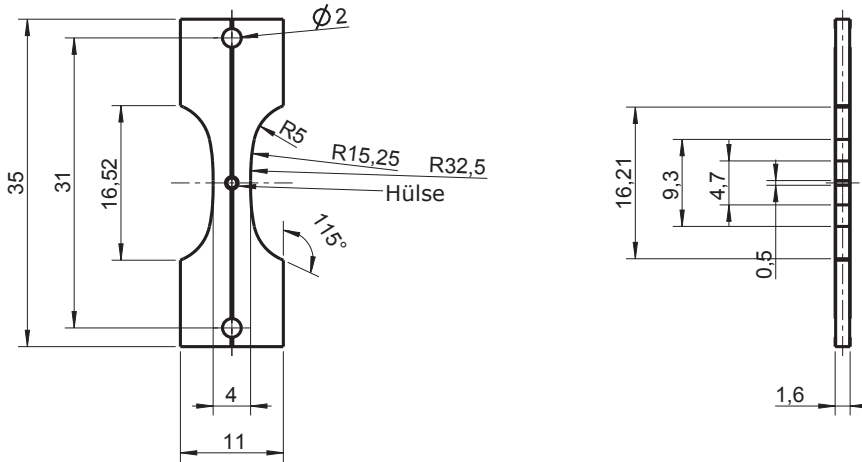


Abbildung 5.8: Probengeometrie der Querkzugprobe

Die in Abbildung 5.8 dargestellte Querkzugprobe wird aus bereits bestückten Platinenhalbzügen entnommen (Abb. 5.9). Damit beim Ausfräsen der Prüfkörper aus den Leiterplatten der Pin auch mittig im Prüfbereich sitzt, muss der eingepresste Pin in jeder Platine angetastet werden, um den Mittelpunkt zu bestimmen, von dem aus die Kontur symmetrisch gefräst wird. Nur so lässt sich eine mittige Positionierung und somit gleichmäßige Belastung der Kaltverschweißung sicherstellen.

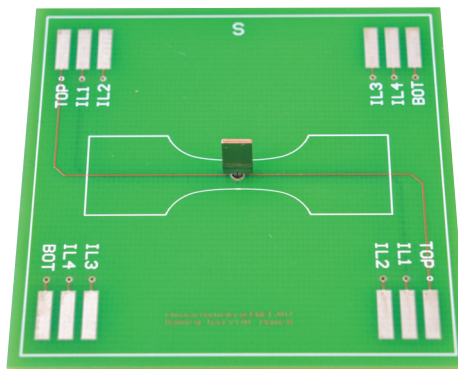
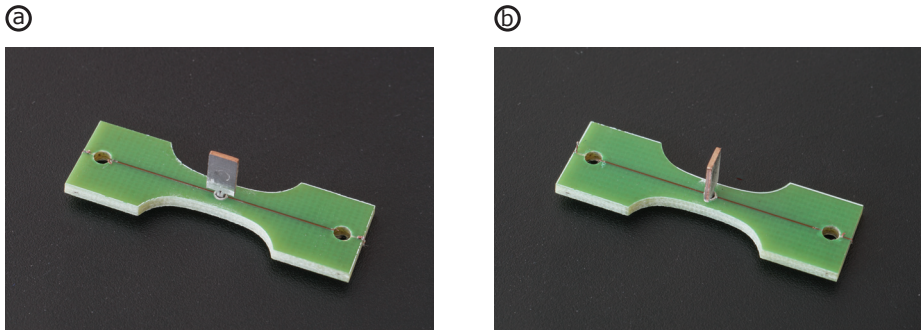


Abbildung 5.9: Leiterplattenhalbzug mit eingepresstem Pin, aus der die Querkzugprobe (weiß markiert) ausgefräst wird

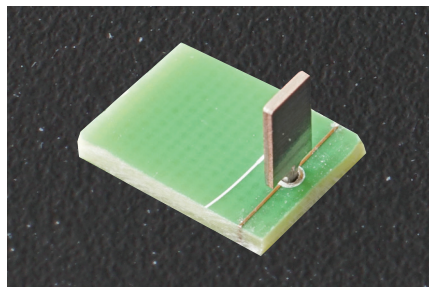
Aufgrund der kleinen Abmaße des Prüfkörpers und der nach unten überstehenden Pin-  
spitze wurde eine Spannvorrichtung gebaut, um die bestückten Leiterplatten über die  
zwei 2 mm-Bohrungen in der Fräsmaschine aufzunehmen. Mit dieser Spannvorrichtung

wurde eine vibrationsarme Bearbeitung sichergestellt, so dass durch den Fräsprozess keine Schädigung der Kaltverschweißung erfolgt und die Kontur des Prüfkörpers sauber geschnitten wurde.



**Abbildung 5.10:** Querzugprobe mit (a) längs und (b) quer zur Lastrichtung eingepresstem Pin

Bei der Orientierung der Pins in der Querzugprobe wird zwischen zwei Varianten unterschieden (Abb. 5.10). Das ist zum einen der längs eingepresste Pin, bei dem die Belastung längs zur Fahne bzw. längs zum needle eye erfolgt und zum anderen der quer eingepresste Pin, bei dem die Last quer zur Fahne bzw. quer zum elastischen Auge in die Kontaktzone eingeleitet wird. Für die lateralen Versuche wird die in Abbildung 5.11 gezeigte Probengeometrie verwendet. Dabei erfolgt die Lasteinleitung längs zur Fahne.



**Abbildung 5.11:** Prüfkörper zur lateralen Belastung der Press-Fit-Verbindung

### 5.1.3 Präparation für Längs- und Querschliffe

Um die Kaltverschweißung zwischen Pin und Hülse sowohl im Ausgangszustand als auch im belasteten/geschädigten Zustand zu analysieren, müssen die Proben geeignet präpariert werden. Dazu sind Längs- und Querschliffe von der Press-Fit-Verbindung

anzufertigen. Während der Präparation dürfen keine zusätzlichen Schädigungen in Folge von mechanischer Belastung oder einer großen Wärmezufuhr in das Verbundsystem erfolgen. Das Multimaterialsystem stellt eine weitere Herausforderung dar, weil sowohl harte Materialien wie die Glasfaser als auch sehr weiche Werkstoffe wie Zinn und Kupfer gleichzeitig bearbeitet werden müssen. Deswegen wird die Präparation des Press-Fit-Verbunds in zwei Schritten durchgeführt. Als erstes wird mit dem Zielpräparationsgerät Leica TXP die Probe bis kurz vor der Kaltverschweißung mit einem 1200er Schleifpapier geschliffen und anschließend mit Diamantläppfilmen bis zur Körnung von 0,5 µm an die Kaltverschweißung geläppt. Vor dem Schleifen werden die eingepressten Pins zusätzlich mit dem Kleber CA 2905 der Firma Delo fixiert, um eine Schädigung der Kontaktzonen zu vermeiden. Eine Mikroskopoptik an der TXP bietet die Möglichkeit gezielte Schliffe der Kaltverschweißung anzufertigen. Als zweiter Präparationsschritt erfolgt die Bearbeitung mit dem Ionenstrahlätzsystem EM TIC 3X der Firma Leica. Mit diesem System wird anfänglich ein Cleaning mit anschließender Ionenpolitur durchgeführt, um zum einen die Verschmierungen weicher Materialien zu entfernen und um die Struktur des Multimaterialsystems herauszuarbeiten.

Wie die Abbildungen 5.12 und 5.13 zeigen, lassen sich mit dieser Präparationsmethode Längsschliffe und Querschliffe des Kontaktsystems ohne Schädigung erzeugen. Dabei wird beim Längsschliff parallel zur Fahne poliert, so dass der gesamte Kontaktbereich zwischen zwei Pinschenkeln und der Hülse ersichtlich ist. Diese Schnittansicht ermöglicht es, die Kaltverschweißung zweier Kontaktstellen über die gesamte Länge zu analysieren. Die Vergrößerung in Abbildung 5.12 zeigt eine sehr saubere und klare Zone der Kaltverschweißung ohne Verschmierungen, was eine detaillierte Analyse der verschweißten Schicht im Rasterelektronenmikroskop zulässt.

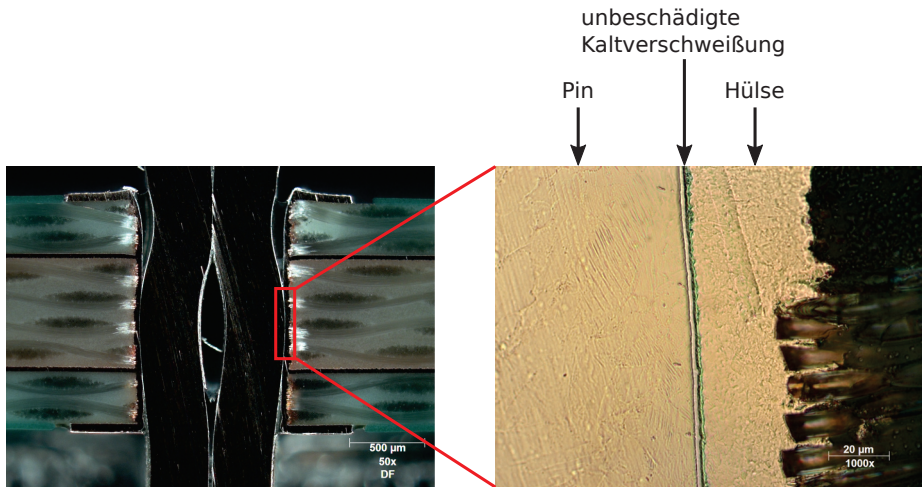


Abbildung 5.12: Längsschliff eines Press-Fit-Kontakts

Bei den Querschliffen sind alle vier Kontaktpunkte zwischen Pin und Hülse zu sehen (Abb. 5.13), womit die Breite der einzelnen Kaltverschweißungen abgebildet wird. In dieser Schnittdarstellung sind deutliche Deformationen und ein Ausbeulen der Hülse im Kontaktbereich zu erkennen, was auf eine hohe Kontaktspannung hinweist. Wie bei dem Längsschliff sind auch bei den Querschliffen die Kaltverschweißungen nach der Präparation unbeschädigt.

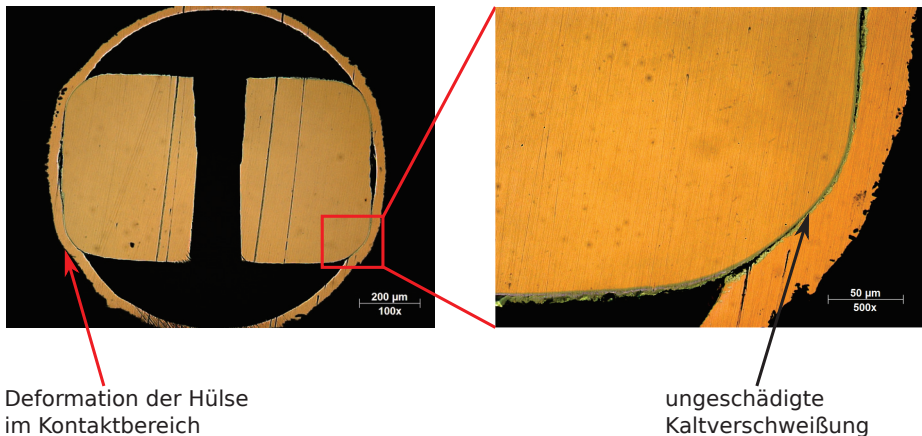


Abbildung 5.13: Querschliff eines Press-Fit-Kontakts

Mit dem Längsschliff sind nicht nur die Kontaktbereiche zwischen Pin und Hülse darstell-

bar, sondern auch die Kontaktzonen zwischen den beiden Pinschenkeln. Das ist zum einen eine feste Kontaktierung an der Pinspitze und zum anderen eine kurz unterhalb der Fahne. Die Abbildung 5.14 zeigt, dass die Verbundschicht zwischen den Pinschenkeln an der Pinspitze eine hohe Porosität aufweist, wohingegen im Pressbereich kurz unterhalb der Fahne eine kontinuierlichere Anbindung besteht. Somit haben auch die Pinschenkel an den gegenseitigen Anlagepunkten einen festen Verbund, wobei der Kontakt an der Pinspitze, bedingt durch seine hohe Porosität, nicht so ausgeprägt ist. Diese Befunde sind wesentlich, wenn das mechanische System in einem Simulationsmodell abgebildet wird (Kap. 5.4.2) [Mar19], da sie die Systemantwort unter äußerer Beanspruchung wesentlich verändern.

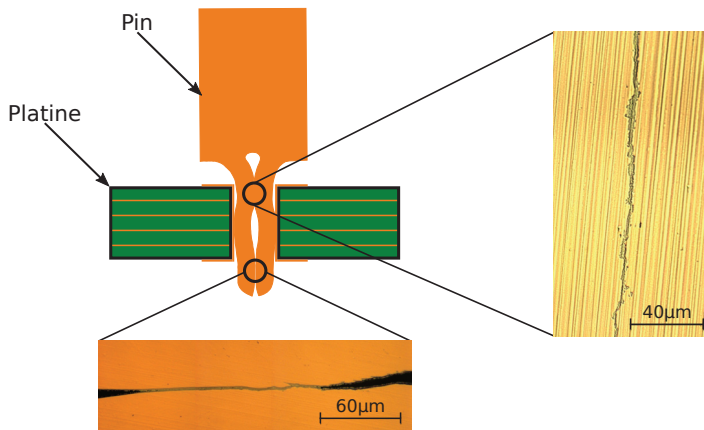


Abbildung 5.14: Feste Kontaktpunkte zwischen den Pinschenkeln nach dem Einpressen

### 5.1.4 Methodik Verformungsanalyse

Die in Kapitel 5.1.2 beschriebene Querkzugprobe ermöglicht eine gute optische Zugänglichkeit des mittleren Prüfbereichs. Um das Verhalten der Schädigung innerhalb der Kontaktzone über das äußere mechanische System beschreiben zu können, werden während dem Zugversuch Verschiebungen an der Pinspitze und auf der Platine gemessen. Je nach Pingeometrie und Einpressrichtung (quer oder längs) variiert die Auswertung der Verschiebungen zwischen Pinspitze und der Hülse (Kap. 5.2 und 5.3). Das Wichtige bei der Platzierung der Messpunkte ist, dass sie definiert gesetzt werden können, um den Abgleich zwischen Simulation und Experiment und den Vergleich der Experimente untereinander zu gewährleisten.

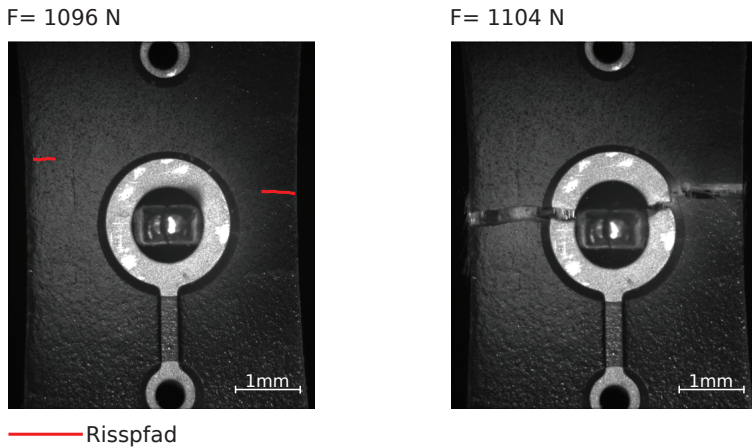
Da die Pinspitze im eingepressten Zustand nicht bündig mit der Platine abschließt, wird

ein Objektiv mit hoher Tiefenschärfe verwendet, um sowohl die Verschiebung auf der Platine als auch auf der Pinspitze zu messen. Zur Verbesserung der Tiefenschärfe bei gleichzeitig möglichst hoher Vergrößerung wird die Blende halb geschlossen. In Kombination mit einer 2 Megapixel-Kamera resultiert aus dieser Einstellkombination eine Auflösung von 271,3 Pixel/mm bei einem Messfeld von 4,48 mm x 7,14 mm. Die Fokusebene liegt bei den Zugversuchen mittig zwischen der Platinenoberfläche und der Pinspitze, um beide Messbereiche scharf abbilden zu können.

Wie bei der Analyse der Seitenansicht im Zugversuch von den PURE-Verbundkunststoffen wird bei diesen Zugversuchen mit der vorhandenen Oberflächenstruktur der Platine und des Pins als Muster für die DIC gearbeitet. Durch die verwendete koaxiale Beleuchtung wird die stochastische Textur der Oberflächen deutlich hervorgehoben, welche ein gutes Muster mit ausreichend Kontrast für Berechnung der digitalen Bildkorrelation liefert. Eine zweite Kaltlichtquelle sorgt für eine gleichmäßigere Ausleuchtung des Prüfbereichs, wodurch der Schattenwurf der Pinspitze reduziert wird. Es ist sehr wichtig, den Schattenwurf der Pinspitze im Messbereich zu unterbinden, da sich der Schatten während dem Versuch bewegt und dadurch Verschiebungen in der Platine gemessen werden, die gar nicht vorhanden sind. Dementsprechend lassen sich mit dieser Messmethode sowohl flächige als auch punktuelle Verschiebungen an der Platine und gleichzeitig am Pin auswerten.

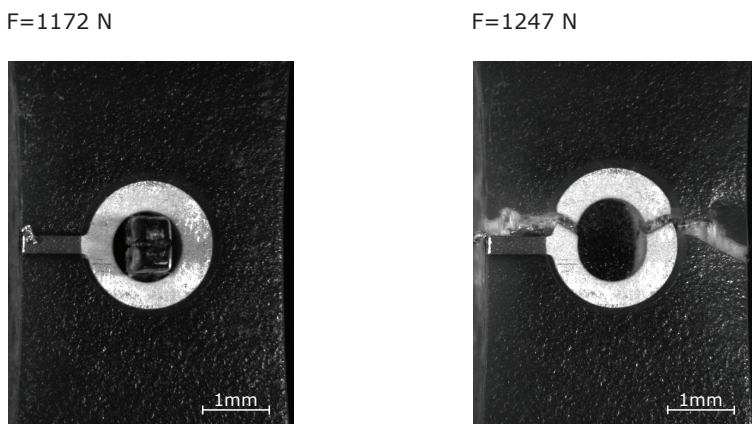
### **5.1.5 Vorversuche**

Die Funktionsfähigkeit der Querkzugprobe wird zu Beginn an Testplatinen mit 4 Kupfer-Layern und sowohl quer als auch längs zur Lastrichtung eingepressten Pins untersucht. Ab einer Kraft von 830 N entstehen Risse in der Platine, die quer zur Belastungsrichtung verlaufen (Abb. 5.15). In Abbildung 5.15 ist deutlich zu erkennen, dass bei einem quer eingepressten Pin der Riss abgelenkt wird und in Richtung Kontaktstelle zwischen Pin und Hülse läuft. Durch den eingepressten Pin entstehen Spannungsüberhöhungen im Kontaktbereich von Pin und Hülse, in die der Riss läuft. Dieses Verhalten zeigt, dass die Last gezielt in die Kaltverschweißungen eingeleitet wird.



**Abbildung 5.15:** Risse in der Platine laufen in die Kaltverschweißung

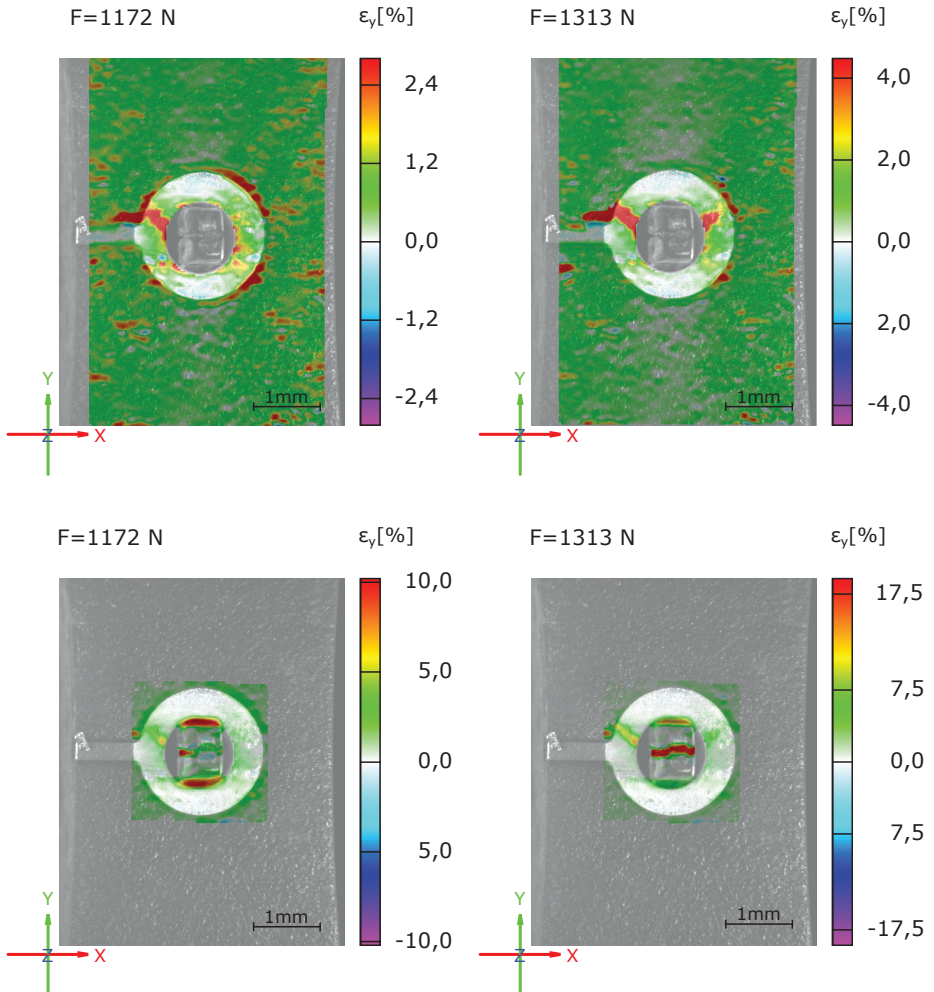
Wie schon bei dem quer eingepressten Pin kommt es auch beim längs eingepressten Pin zum mittigen Versagen der Querkzugprobe. Dabei wird der Riss nicht in eine der Kaltverschweißungen abgelenkt, sondern verläuft mittig durch die Hülse (Abb. 5.16). Somit wird bei längs eingepressten Pins mittels der Querkzugprobe die Last in alle 4 Kontaktzonen eingeleitet. Mit dem Bruch des Prüfkörpers fällt der Pin aus beiden Hülsehälften.



**Abbildung 5.16:** Mittiger Bruch der Querkzugprobe bei längs eingepresstem Pin

Wie in Kapitel 5.1.4 beschrieben, werden die Verschiebungen basierend auf den realen Oberflächen der Platine und des Pins gemessen. Um eine Probenoberfläche mit einer für die DIC geeigneten Grauwertstruktur zu erzeugen, mussten mit dem Leiterplatten-

hersteller verschiedene Lötstopplacke, die eine abschließende Schicht auf den Leiterplattenhalbzeugen bilden, getestet werden.

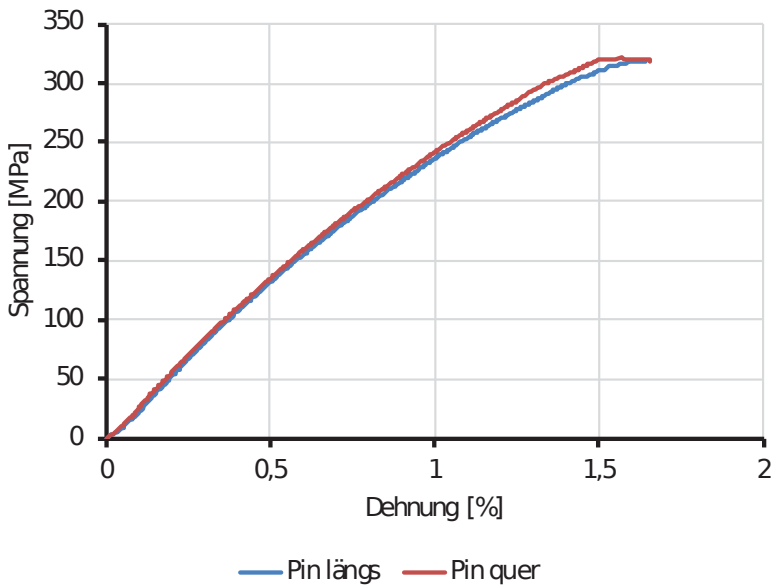


**Abbildung 5.17:** Messung des Dehnungsfelds an der Pinspitze bei gleichzeitiger Verformungsmessung der Platine

Der Abbildung 5.17 ist zu entnehmen, dass mittels der DIC lokale Dehnungsüberhöhungen detektiert werden können (Abb. 5.16). Diese gemessenen lokalen großen Verformungen beschreiben den späteren Verlauf des Risspfades. Die Auswertung der Dehnungen an der Pinspitze des gleichen Prüfkörpers liefert ab einer Kraft von 1172 N eine Dehnungszunahme zwischen den Spitzen der beiden Pinschenkel (Abb. 5.16). Von diesem

Moment an wird die flexible Pinspitze bis zum Bruch der Querkzugprobe immer weiter geöffnet. Die lokalen Dehnungserhöhungen an der Hülse aus Abbildung 5.16 sind durch die Auswertung der Dehnungen an der Pinspitze nur schwach erkennbar, da ein anderer Maßstab gewählt werden musste.

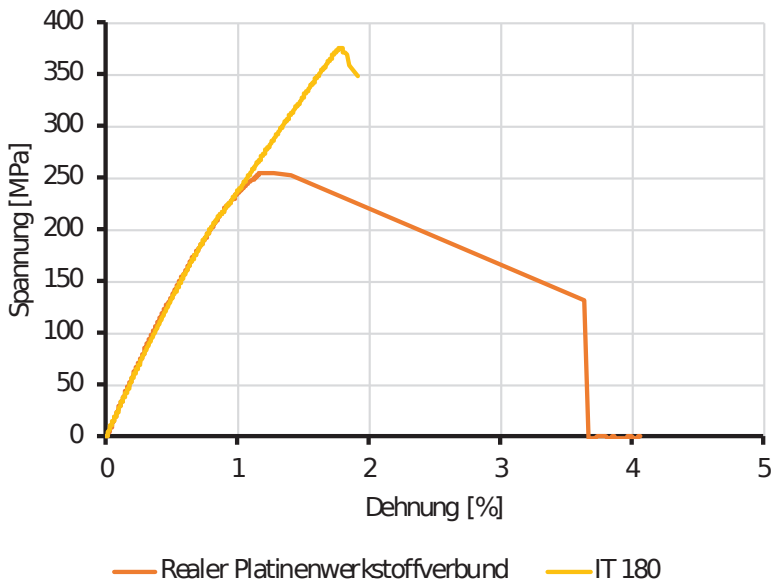
Der Vergleich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens zwischen Querkzugproben mit längs und quer eingepressten Pins weisen keinen signifikanten Unterschied auf (Abb. 5.18). Dabei zeigen die Versuche mit beiden Einpressrichtungen die gleiche maximale Festigkeit. Das bedeutet, dass das globale Verformungsverhalten nicht von der Einpressrichtung abhängt und in beiden Fällen im Messbereich vergleichbare Verhältnisse vorliegen.



**Abbildung 5.18:** Einfluss der Einpressrichtung des Pins auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Querkzugprobe

Im Rahmen der Vorversuche wurden die Materialdaten der Platine und des galvanisierten Pinbasmaterials im Zugversuch auf einer Universalzugprüfmaschine bestimmt, um das reale mechanische Verhalten der einzelnen Komponenten simulativ abbilden zu können (Kap. 5.4.2). Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der galvanisierten CuNiSi-Pinbasislegierung wurden mit Normzugstäben (Abb. 3.1) gemessen und sind dem Anhang B zu entnehmen (Abb. B.1). Gleiches Vorgehen erfolgte für das Grundmaterial der Platinen dem IT 180 der Firma Göttle, wobei der gleiche Normprüfkörper wie bei den PURE Versuchen in Kapitel 4.1.3 (Abb. 4.9) Verwendung fand (Anhang B; Abb.

B.2 und B.3). Da es sich bei den Querkzugproben nicht um den reinen Grundwerkstoff der Platinen handelt, sondern um einen Verbund aus Faserverbundwerkstoff und linienartigen Kupferlayern mit einer mittig liegenden Bohrung, wird auch das Materialverhalten des tatsächlich verwendeten mehrschichtigen Aufbaus untersucht. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe des realen Platinenaufbaus (Abb. 5.19) werden mit Querkzugproben aus den 6-lagigen Leiterplattenhalbbeugen (Abb. 5.9) bestimmt. Jedoch sind in diesen Querkzugproben keine Pins eingepresst, da das mechanische Verhalten der Platine charakterisiert werden soll. Diese Versuche wurden mit dem Versuchsaufbau aus Kapitel 5.1.1 durchgeführt.



**Abbildung 5.19:** Vergleich des Platinenbasismaterials Isola IT 180 (Normprüfkörper) mit dem realen Platinenwerkstoffverbund (Querkzugprobe)

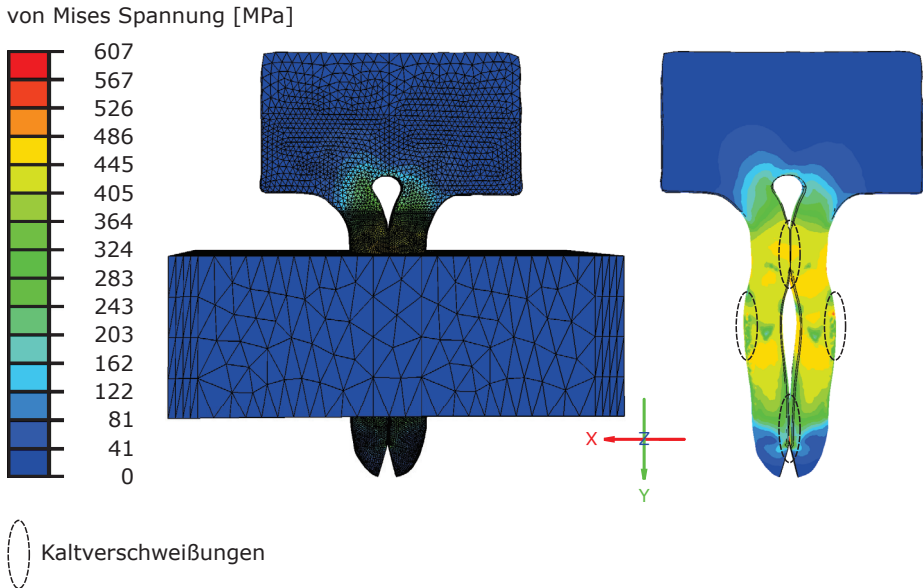
Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe mit den Normprüfkörpern an dem Platinenbasismaterial und die mit den Querkzugproben weisen bis zu einer Spannung von ca. 240 MPa den identischen Verlauf auf. Das bestätigt die Funktionalität der optischen Messung basierend auf dem Grauwertmuster der Oberflächenstruktur und stellt die Wirksamkeit der Querkzugprobe bei quasistatischer Belastung unter Beweis. Der frühere Bruch der Querkzugprobe lässt sich durch die große Kerbwirkung der mittigen Bohrung erklären.

Zusätzlich wurden Kriechversuche mit dem mehrschichtigen Platinenaufbau und an dem galvanisierten Grundmaterial der Pins durchgeführt, um das Relaxationsverhalten der

Fügepartner nach dem Einpressen in der Simulation abbilden zu können. Die Kriechversuche an den Leiterplattenhalbzeugen ohne eingepresstem Pin wurden mit der Querkzugprobe bei einer Spannung von 250 MPa durchgeführt und die an der galvanisierten Kupferlegierung mit einem Normzugprüfkörper (Abb. 3.1) bei einer Spannung von 540 MPa. Die Spannungswerte für die Kriechversuche resultieren aus den simulierten Spannungen in der Platine bzw. Hülse und dem Pin im Bereich der Kontaktzone nach dem Einpressen (Anhang B; Abb. B.4) [Mar19].

### 5.1.6 Simulationsmodell

Das in Kapitel 5 der vorliegenden Arbeit beschriebene Projekt wurde im Rahmen eines AiF-Projekts in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet iaf-nt (Prof. Rienäcker, Sachbearbeiter K. Markstädter) durchgeführt. Aufgabe des Projektpartners war es, ein Simulationsmodell zu erstellen, das das mechanische Verhalten eines eingepresstem Pins wiedergibt. Da die Verzahnungen zwischen Experiment und Simulation sehr eng sind, werden in diesem Abschnitt die Grundzüge des Simulationsmodells kurz vorgestellt. Einzelheiten sind in [Mar19] zu finden. Im ersten Schritt wird eine dynamische FE-Rechnung (ohne Berücksichtigung der Dehnungsgeschwindigkeit) durchgeführt, die den Einpressvorgang simuliert. Eingangsgrößen sind dabei die in Abschnitt 5.1.5 bestimmten Materialeigenschaften und die geometrischen Abmaße von Hülse und Pin. Dazu wurde die Pin-geometrie mittels Computertomographie bestimmt und der Hüsendurchmesser optisch ausgemessen (Kap. 5.2.2). Danach wird in den Kontaktflächen eine Kohäsivzone eingefügt, die die Kaltverschweißung simuliert. Diese Kohäsivzone hat eine verschwindende Dicke, kann aber mechanische Beanspruchungen übertragen und trägt somit wesentlich zum mechanischen Verhalten des Gesamtsystems bei. Im Kohäsivzonenmodell ist ein Schädigungsansatz implementiert, der Werte für einen Schädigungsparameter  $D$  liefert. Dabei durchläuft der Schädigungsparameter den Wertebereich von 0 bis 1, wobei nach der üblichen Konvention bei  $D = 1$  Versagen eintritt, d.h. die Kaltverschweißung löst sich ab. Abbildung 5.20 zeigt den schematischen Aufbau. Zu beachten ist, dass im Pressbereich zwischen den beiden Pinschenkeln kurz unterhalb der Pinfahne und an der Pinspitze ebenfalls eine Kohäsivzone eingeführt wurde, da auf der Basis der mikroskopischen Befunde (Abb. 5.14) davon ausgegangen werden kann, dass hier eine kaltverschweißte Zone vorliegt.

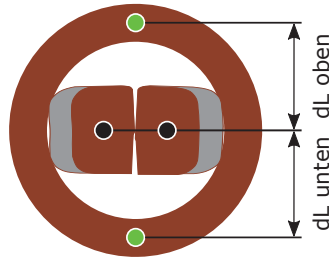


**Abbildung 5.20:** Schematischer Aufbau des Simulationsmodells; Darstellung der kaltverschweißten Zonen nach der Relaxation und der Spannungsverteilung im eingepressten Zustand

## 5.2 Versuchsergebnisse Flexx-Pin mit offener Pinspitze

### 5.2.1 Abhängigkeit des Messsignals der Querkzugprobe von der Einpressrichtung des Pins

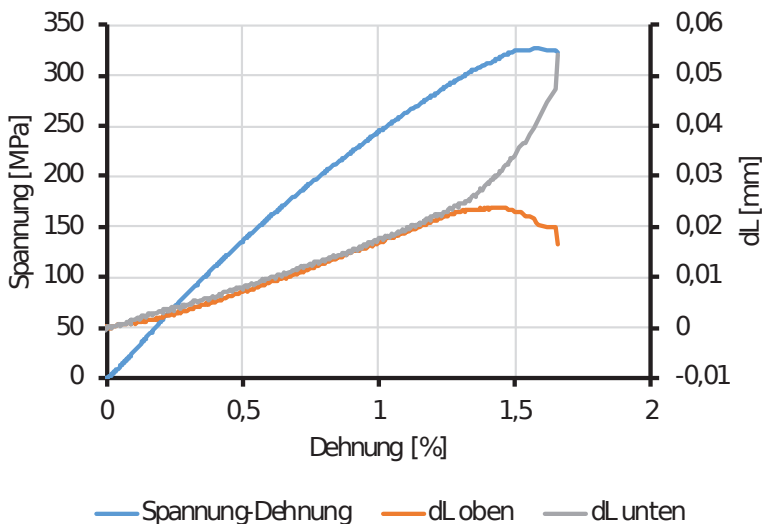
Da sich die Pinspitze in Abhängigkeit der Einpressrichtung zur Belastungsrichtung unterschiedlich verhält, müssen für die längs und quer eingepressten Pins verschiedene Auswertungen der Verschiebungen vorgenommen werden. Bei den quer eingepressten Pins werden die Abstände zwischen dem linken und rechten Pinschenkel zur Hülse gemessen (Abb. 5.21).



- : Messpunkte Hülse
- : Messpunkte Pinspitze

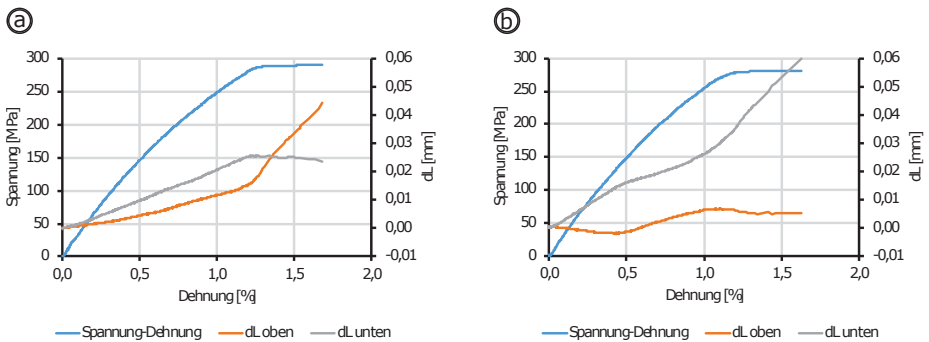
**Abbildung 5.21:** Messpunkte zur Bestimmung der Verschiebungen zwischen quer eingepresstem Pin und der Hülse

Die gemessenen Verschiebungen werden zur Auswertung gegenüber der globalen Dehnung der Platine aufgetragen. Wie der Abbildung 5.22 zu nehmen ist, verändern sich die Steigungen der Verschiebungen zwischen Pin und Hülse ab einer globalen Dehnung von 1,2 %. Bei dieser kritischen Dehnung ist von einer Schädigung der Kaltverschweißung auszugehen. Da sich der Abstand  $dL$  oben verringert und sich  $dL$  unten vergrößert, lässt dieses Verhalten auf ein Kippen des Pins schließen, was die Kaltverschweißung schädigt. Dem Kurvenverlauf ist zu entnehmen, dass es sich um ein langsames und stetiges Versagen der Kaltverschweißung handelt, bis es am Ende zum schlagartigen Bruch der Querkzugprobe kommt.



**Abbildung 5.22:** Verschiebungen an der Pinspitze mit quer eingepresstem Pin in Korrelation mit dem globalen Spannungs-Dehnungs-Verlauf

Es zeigt sich jedoch, dass dieses Verhalten der Pins nicht reproduzierbar ist. Die Abbildung 5.23 zeigt zwei weitere Verläufe der Abstände zwischen Pin Spitze und Hülse, die sich signifikant unterscheiden. Beide Diagramme weichen von Anfang an von den Verschiebungsverläufen aus Abbildung 5.22 ab. Dieses Verhalten lässt sich durch unterschiedlich stark ausgeprägte Kaltverschweißungen, z.B. durch schiefes oder außermitriges Einpressen des Pins, aber auch durch geometrische Abweichungen am Pin und Hülse erklären. Hinzu kommt noch das erwähnte Kippen des Pins unter Belastung. An den Verschiebungsverläufen in Abbildung 5.23 (a) ist bei einer Dehnung von ca. 1,2 % ein deutliches Abknicken zu erkennen, was auf ein Ablösen der Kaltverschweißung hinweist. Dabei hält der Pin an der unteren Hülsehälfte fest, da die Verschiebung zwischen Hülse und Pin konstant bleibt, wohingegen sich der Pin von der oberen Hülsehälfte entfernt. Aus Abbildung 5.23 (b) lässt sich hingegen kein eindeutiger Punkt ableiten, der einer Schädigung zugeordnet werden kann, obwohl es im Bereich von 1,2 % Dehnung eine Änderung der Steifigkeit zu geben scheint. Dieses unklare Verhalten des quer eingepressten Pins lässt sich dadurch erklären, dass die Entspannung des Pins nach dem Ablösen der Kaltverschweißungen im Prinzip quer zur Lastachse erfolgt, da sich die Pinspitzen nur in diese Richtung bewegen können.

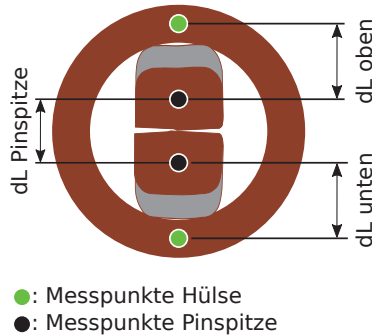


**Abbildung 5.23:** Signifikant unterschiedliche Verschiebungsverläufe zwischen der Pin Spitze und der Hülse bei quer eingepresstem Pin

Somit liefern die Messungen mit dem quer eingepresstem Pin kein eindeutiges Signal, womit sich die Schädigung der Kaltverschweißung charakterisieren lässt.

Im Folgenden werden Quersugproben mit längs zur Belastungsrichtung eingepresstem Pin analysiert. Durch die geänderte Einpressrichtung des Pins ändert sich auch die mechanische Belastung des elastischen Auges, woraus andere Verschiebungen an der Pin Spitze resultieren. Dementsprechend wird die Auswertung der Verschiebungen an der Pin Spitze angepasst. Wie bei dem quer eingepresstem Pin werden die Relativbewegun-

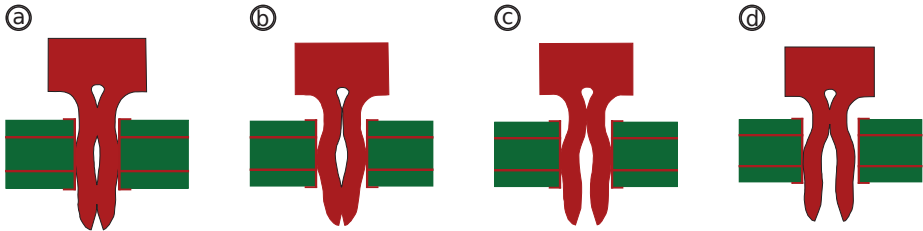
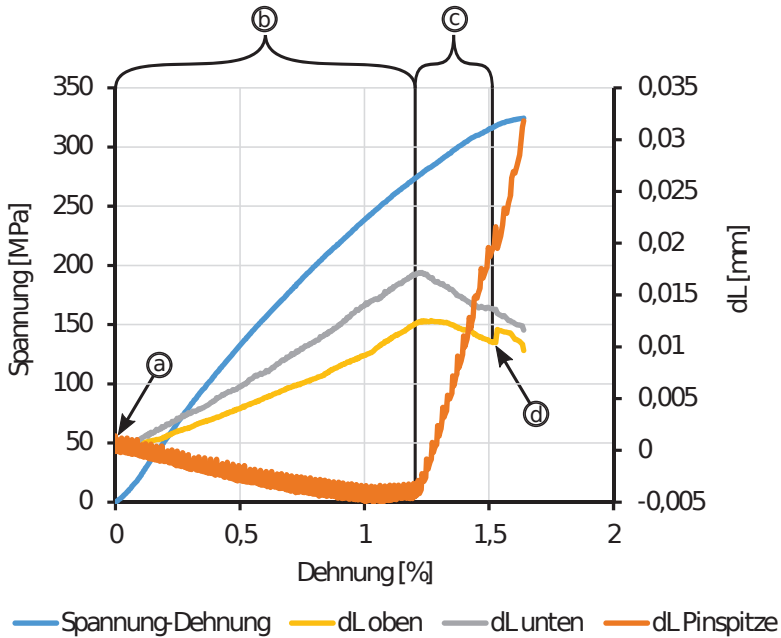
gen zwischen dem unteren Pinschenkel und der unteren Hülsehälfte sowie dem oberen Pinschenkel und der oberen Hülsehälfte gemessen. Hinzu kommt noch, dass die Verschiebung zwischen den beiden Pinspitzen gemessen wird, die jetzt in Lastrichtung liegen (Abb. 5.24).



**Abbildung 5.24:** Messpunkte zur Bestimmung der Verschiebungen zwischen längs eingepresstem Pin und der Hülse, sowie die Spitzen der Pinschenkel zueinander

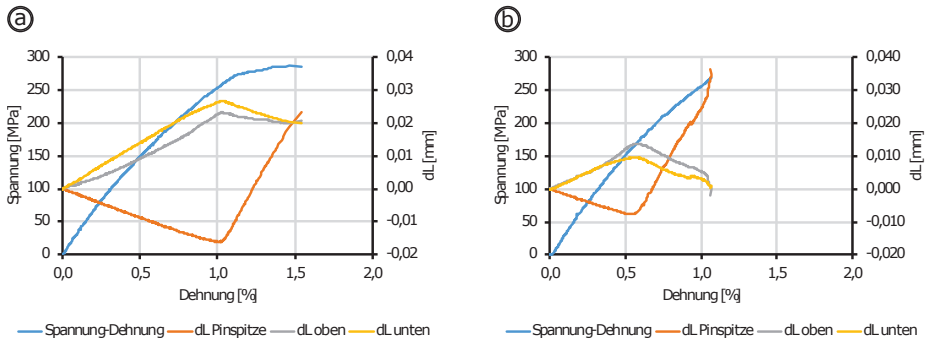
Genauso wie zuvor werden die gemessenen Verschiebungen über der globalen Dehnung aufgetragen und mit der globalen Spannung im Messquerschnitt korreliert (Abb. 5.25). Bei den längs eingepressten Pins kommt es bei einer globalen Dehnung von ca. 1,2 % bzw. einer Spannung von 272 MPa zu einem Abknicken des Verschiebungsverlaufs zwischen den beiden Spitzen der Pinschenkel und der Hülse. Gleiches lässt sich anhand der Verschiebung zwischen den beiden Schenkelspitzen messen. Dieses Messsignal zeigt mit seinem anfänglich negativen Verlauf, dass zu Beginn der Belastung ein Schließen der Pinspitze bis zu einer globalen Dehnung von 1,2 % erfolgt. Dabei wird das eingepresste flexible Auge des Pins entspannt und die Kontaktspannung reduziert. Ab dem Umkehrpunkt des Verschiebungsverlaufs an der Pinspitze setzt das Öffnen der Pinspitze ein. Dadurch werden beide Pinschenkel auseinander gezogen. Im Verlauf der Öffnungsbewegung kommt es zu einer Zugbelastung der Kontaktzone. Der exakte Punkt ab dem die Druck- in Zugspannung wechselt, kann über die Simulation der Kontaktnormalspannung in Kapitel 5.4.2 ermittelt werden.

Die beiden Verschiebungen zwischen der Pinspitze und Hülse zeigen nach der Dehnung von 1,2 % eine stetige Abnahme. Diese Verläufe entstehen einerseits durch die vollständige Relaxation der Kontaktspannungen, andererseits durch die Schädigung der Kontaktzone. Bei einer Dehnung von 1,6 % ist in Abbildung 5.25 an der gelben Messkurve ein kleiner steiler Anstieg von 2  $\mu\text{m}$  zu sehen, der das schlagartige Reißen der Kaltverschweißung und somit das Ablösen des oberen Pinschenkels von der Hülse beschreibt.



**Abbildung 5.25:** Verschiebungen an der Pinspitze mit längs eingepresstem Pin in Korrelation mit dem globalen Spannungs-Dehnungs-Verlauf

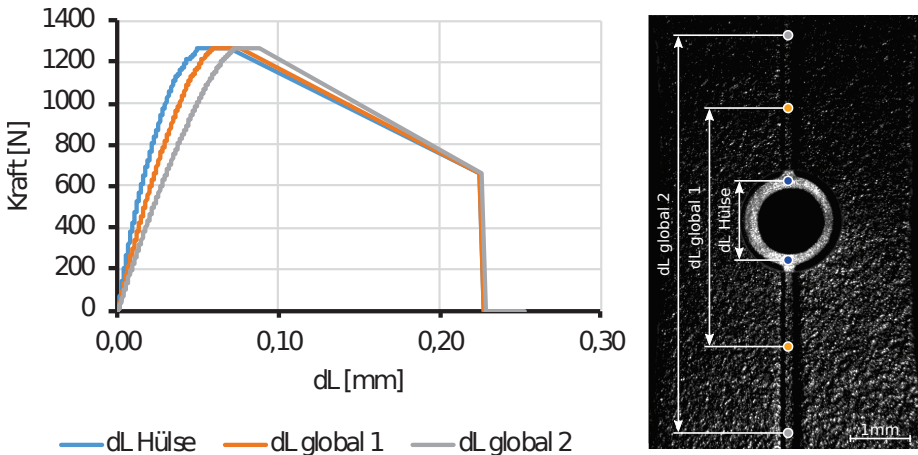
Die Auswertung weiterer Versuche zeigt, dass die Relativbewegungen zwischen der Pinspitze und der Hülse bei den längs eingepressten Pins sich für verschiedene Proben signifikant unterscheiden (Abb. 5.26), dass aber der grundsätzliche Charakter der Kurven erhalten bleibt. Dies bedeutet, dass der in Abbildung 5.25 dargestellte Ablauf der Pinbewegung sich in allen Fällen wiederfinden lässt. Dabei charakterisiert der absteigende Ast der Pinöffnung das intakte Pin-Hülse-Platine System, während der aufsteigende Ast der lastinduzierten Pinöffnung zuzuordnen ist.



**Abbildung 5.26:** Prinzipiell gleichbleibender Verschiebungsverlauf an der Pinspitze mit längs eingepresstem Pin bei unterschiedlichen Verschiebungsverläufen zwischen Pin und Hülse

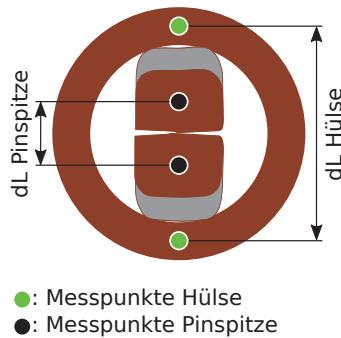
## 5.2.2 Reproduzierbarkeit der Messung mit der Querkzugprobe

Für wiederholgenaue Ergebnisse sind sowohl eine definierte Herstellung der Prüfkörper als auch eine definierte Belastung kombiniert mit einer eindeutigen Auswertung der Messdaten vonnöten. Wie dem Diagramm in Abbildung 5.27 zu entnehmen ist, variieren die Kraft-Weg-Verläufe je nach Messlänge und Position zur mittigen Buchse. Wird die Verschiebung direkt an der Hülse gemessen, ist die Steifigkeit wesentlich geringer als bei der Messung mit der Ausgangslänge dL global 2 (Abb. 5.27).



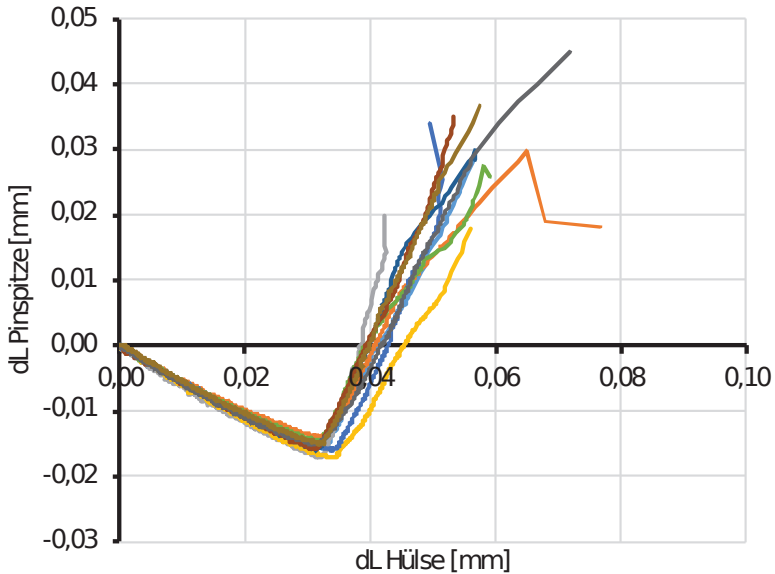
**Abbildung 5.27:** Abweichung der Kraft-Weg-Verläufe in Abhängigkeit der unterschiedlichen Ausgangsmesslängen

Den in den vorherigen Abbildungen angegebenen Dehnungen liegt der Wert  $dL$  global 2 zugrunde. Der Unterschied von  $dL$  Hülse zu den beiden anderen Verschiebungsmaßen zeigt, dass die Verlängerung, die in einem gewissen Abstand von der Hülse gemessen wird, vom Gesamtsystem und damit auch den Platineneigenschaften bestimmt ist. Die Kaltverschweißung erfordert aber ein Verlängerungsmaß, das wesentlich von Pin und Hülse abhängt. Aus diesem Grund wird die Verschiebung mittig auf dem Hülsenring gemessen, da der Hülsenring auf der Platine eindeutig definiert ist und somit sowohl in der Simulation als auch im Versuch die Messpunkte wiederholgenau platziert werden können (Abb. 5.28).



**Abbildung 5.28:** Eindeutig definierte Relativverschiebungen auf längs eingepresstem Pin und Hülse

Die Reproduzierbarkeit der Messungen wurde anhand von 10 Zugversuchen mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad nachgewiesen. Die Basis für diese Messungen legte das Ausmessen der 10 Bohrungen in den Leiterplattenhalbzeugen und das Einscannen von 10 Flexx-Pins in einem CT. Die Bohrungen wurden optisch vermessen und es wurde jeweils ein Mittelwert aus 5 Messwerten gebildet. Daraus ergab sich eine sehr geringe Streuung der Mittelwerte des Durchmessers von  $1,055 \text{ mm} \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ . Nach dem Scannen der Pins wurden diese in die vermessenen Bohrungen gepresst. Der Einpressvorgang erfolgte bei der Firma Walter Söhner unter Zuhilfenahme einer Ausrichtvorrichtung, um die Pins möglichst reproduzierbar zentrisch in den Bohrungen zu platzieren.



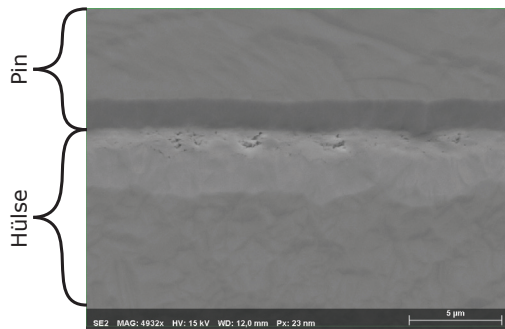
**Abbildung 5.29:** Reproduzierbare Messergebnisse bei definierter Versuchsführung und eindeutiger Auswertung

Die Versuchsergebnisse in Abbildung 5.29 zeigen eine sehr geringe Streuung der Messkurven. Die Schließbewegung an der Pinspitze variiert zwischen 14  $\mu\text{m}$  und 17  $\mu\text{m}$ . Die höheren Schließbewegungen lassen sich durch eine etwas größere Zone der Kaltverschweißung im Bereich der Pinspitze erklären, die maßgeblich für diese Bewegung verantwortlich ist. Bedingt durch die sehr geringen Streuungen der Hülse ist eine solche Streuung z.B. auf Fertigungsgenauigkeiten des Pins zurück zu führen. Die anschließende Steigung der Öffnungsbewegung zwischen den beiden Schenkelspitzen ist ebenfalls bei allen Versuchen annähernd identisch. Der etwas geschwungene und gezackte Öffnungsverlauf gegen Ende des Versuchs lässt auf ein vorzeitiges Ablösen des Pin aus der Hülse und somit ein Versagen der Kaltverschweißung vermuten, bevor die Querkzugprobe vollständig bricht. Diese geringe Streuung der Bewegung an der Pinspitze bzw. der gesamten Verschiebungsverläufe bestätigen die sehr gute Reproduzierbarkeit der Versuchs- und Auswertemethode.

## 5.2.3 Nachweis von Rissen in der Kaltverschweißung

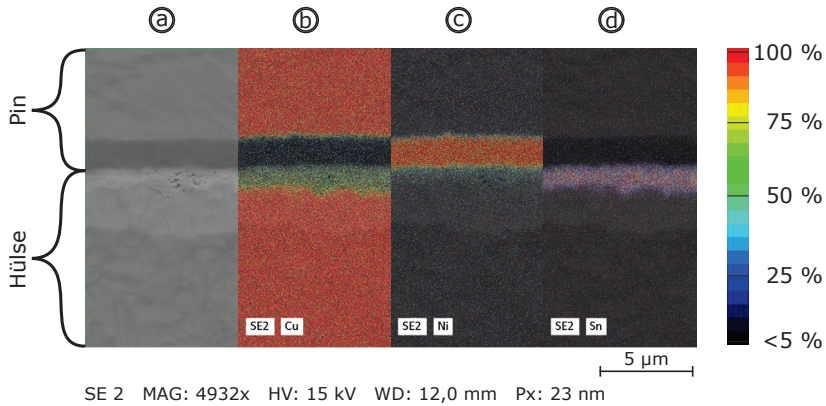
### 5.2.3.1 Beschreibung der Kaltverschweißung

Zur näheren Beschreibung der tatsächlich vorliegenden Kaltverschweißung zwischen Pin und Hülse werden Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt. Die Analyse erfolgt an Längsschliffen der Press-Fit-Verbindung, die nach der in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Präparationsmethode angefertigt wurden. Wie die Abbildung 5.30 zeigt, ist die kaltverschweißte Zone stark mit Poren durchsetzt, was zur Reduktion der Festigkeit des Kontaktbereichs führt.



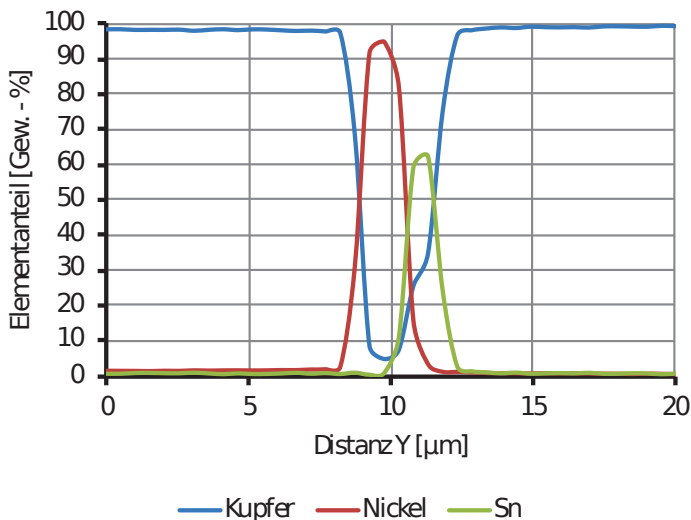
**Abbildung 5.30:** Starke Porosität in der Kontaktzone zwischen Pin und Hülse

Um den Kontaktbereich bzw. den Verbund zwischen Pin und Hülse näher zur beschreiben, wurde eine EDX-Analyse durchgeführt. Mit Hilfe dieser Analysemethode lassen sich die chemischen Elemente im Bereich der Kaltverschweißung bestimmen. Die Auswertung in Abbildung 5.31 zeigt, dass alle Elemente im Kontaktbereich aufgelöst und den einzelnen Schichten des Verbundes zugeordnet werden können. Daraus ist ersichtlich, dass die vorher beschriebenen Poren im Bereich der aufeinander gepressten Zinnschichten liegen.



**Abbildung 5.31:** Darstellung der chemischen Elemente (b) Kupfer, (c) Nickel und (d) Zinn im Bereich der porösen Kaltverschweißung (a)

Sowohl bei der bildlichen (Abb. 5.31) als auch bei der graphischen Auswertung der EDX-Analyse (Abb. 5.32) wird deutlich, dass Kupfer in die Zinnschicht zwischen den beiden Kontaktpartnern diffundiert. Die Zinnschicht weist einen Kupferanteil von bis zu ca. 40 % auf. Im Gegensatz dazu ist in der Nickelschicht nur ein sehr geringer Anteil an Kupfer  $< 5\%$  vorhanden, sodass diese Schicht eine Diffusion des Kupfers vom Pin in die Zinnschicht verhindert.



**Abbildung 5.32:** Quantitative Auswertung der EDX-Analyse im Bereich der Kaltverschweißung zwischen Pin und Hülse

Wie in Kapitel 5.1.5 beschrieben, fallen die Pins mit dem Versagen der Querkzugprobe aus der Bohrung. Anhand dieser Pins lassen sich im REM die 4 Kontaktflächen zwischen Pin und Hülse darstellen (Abb. 5.33). Der Vorteil bei den rausgefallenen Pins ist, dass die Kontaktflächen nach dem Versuch komplett erhalten bleiben und nicht durch einen Auspressvorgang verfälscht oder beschädigt werden. Wie der Abbildung 5.33 zu sehen ist, bilden sich ungleichmäßige ellipsenförmige Kontaktflächen aus. Diese Flächen hängen maßgeblich von der Pin und Hülsegeometrie, aber auch von der Positionierung des Pins in der Hülse ab. Basierend auf einer Vermessung der 2D-Bilddaten lassen sich durch Aufsummieren aller 4 Kontaktflächen die gesamte Anlagefläche von  $0,32 \text{ mm}^2$  abschätzen. Dabei liegen die einzelnen Flächen zwischen  $0,072 \text{ mm}^2$  und  $0,096 \text{ mm}^2$ .

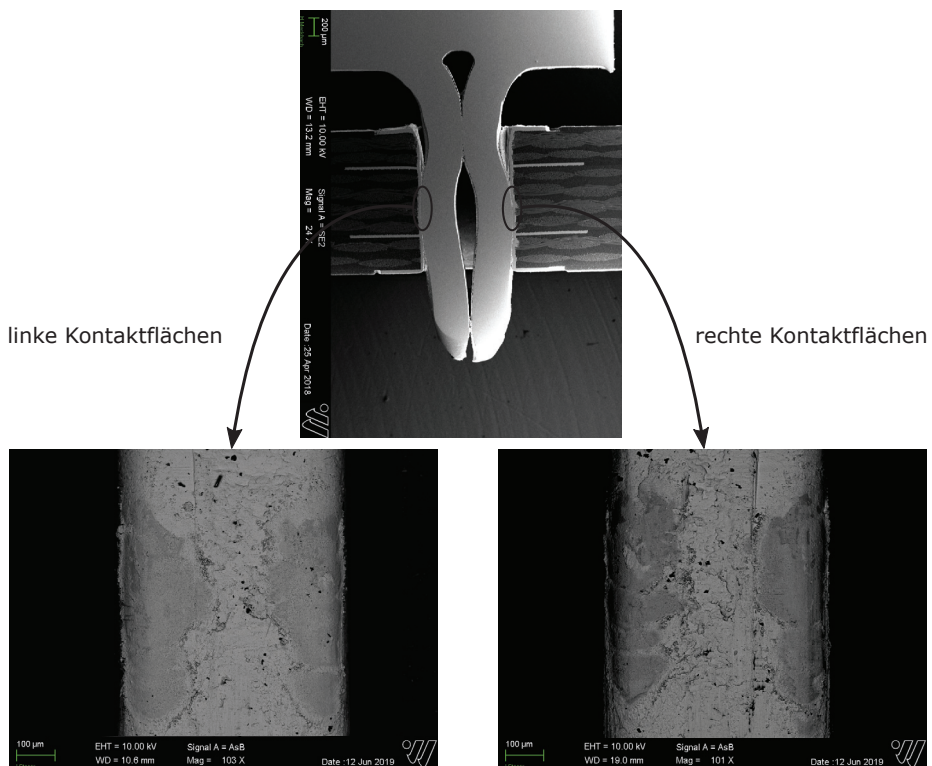


Abbildung 5.33: Ausprägung der ovalen Anlageflächen an einem Flex-Pin

### 5.2.3.2 Verfahren und Probenpräparation

Um Risse in der Kaltverschweißung zu erzeugen wird der Press-Fit-Verbund mittels der Querkzugprobe bei längs eingepresstem Pin gezielt belastet. Dabei wird die Querkzugprobe mit einer Last von 1100 N beaufschlagt. Während der Belastung werden die Verschiebungen an der Hülse und der Pinspitze, wie Kapitel 5.2.2 beschrieben, gemessen, damit der Belastungszustand des Press-Fit-Systems genau definiert ist. Die Abbildung 5.34 zeigt, dass sich die Pinspitze nach dem anfänglichen Schließen bei einer Kraft von 1100 N in der Öffnungsbewegung befindet. Bei dieser Kraft ist die Pinspitze bereits um ca. 7  $\mu\text{m}$  geöffnet (Abb. 5.34).

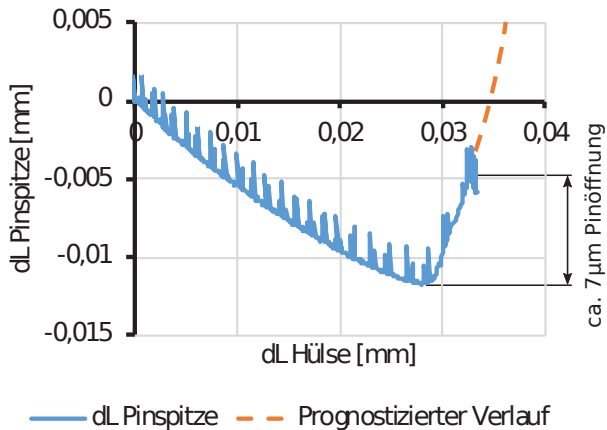


Abbildung 5.34: Pinspitzenverschiebung zur Schädigungsanalyse der Kaltverschweißung

Nach dem Erreichen der gewünschten Last bzw. der gewünschten Pinöffnung, wird der Belastungszustand der Press-Fit-Verbindung fixiert (Abb. 5.35). Dazu wird die Bohrung mit dem Kleber CA 2905 der Firma Delo gefüllt. Dieser Klebstoff ist so dünnflüssig, dass er in die sehr feinen Risse fließt und somit ein Schließen nach der Entlastung verhindert. Dementsprechend bleibt die Querkzugprobe während des Klebvorgangs unter Last im Zug-Druck-Modul eingespannt. Die Entlastung erfolgt erst nach einer Trocknungszeit des Klebers von ca. 12 h. Im Anschluss werden Längsschliffe von der eingeklebten Verbindung angefertigt (siehe Kap. 5.1.3), um die Schädigung der Kaltverschweißung zu analysieren.

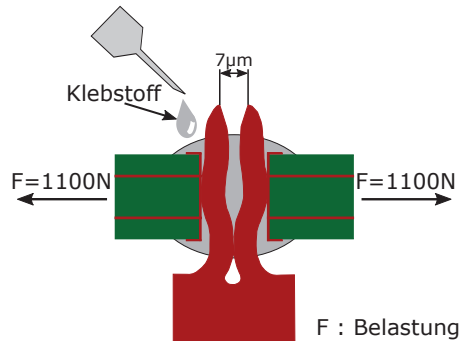


Abbildung 5.35: Schematische Darstellung des Einklebens

Die Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop zeigt deutliche Risse in der Kaltverschweißung. Dabei reißt die Kontaktzone sowohl von links als auch von rechts ein (Abb. 5.36). Die Vergrößerung verdeutlicht, dass der Riss durch die poröse Zinnschicht läuft und in einer Ansammlung von Poren endet. Jedoch ist die Kaltverschweißung nicht komplett abgerissen. In der Mitte existiert noch ein 179 µm langer ungeschädigter Bereich. Dieses Ergebnis bestätigt das langsame, stetige Versagen der Kaltverschweißung unter quasistatischer Belastung und das Aufreißen der Kontaktzone beim Öffnen der Pinnsitzen.

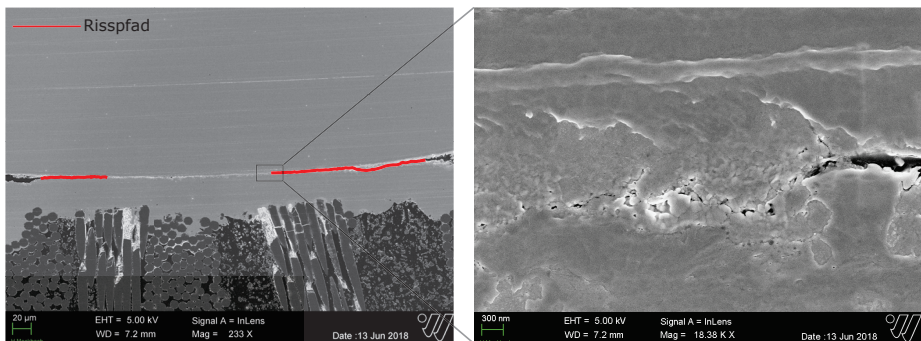
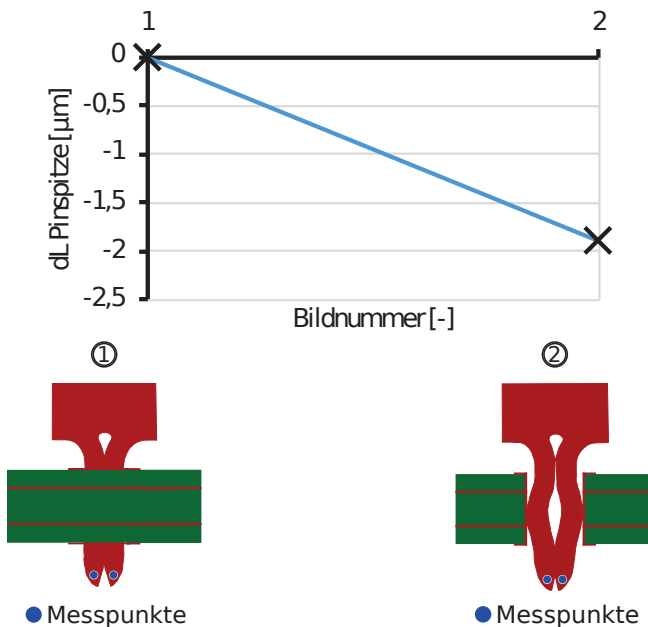


Abbildung 5.36: Risse in der porösen Kaltverschweißung bei einer Pinnsitzenöffnung von ca. 7 µm

## 5.2.4 Aufgeschnittene Querzugprobe

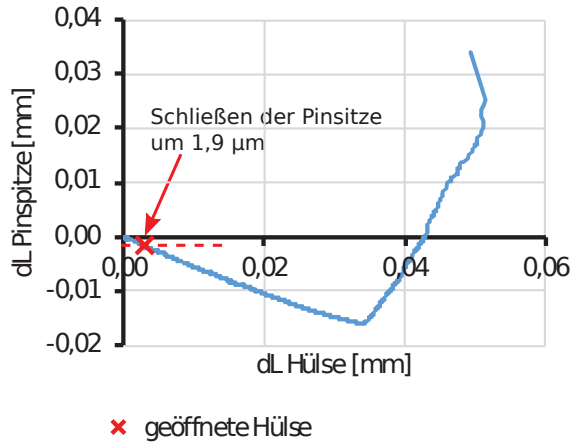
Beim Auftrennen der Hülse eines Press-Fit-Verbundes kommt es zur Relaxation des Verbundsystems. Um diese Veränderung zu quantifizieren, werden die relativen Verschie-

bungen an der Pinspitze vor und nach dem Anfertigen eines Längsschliffs gemessen. Jedoch wird der Pin nicht mit Kleber in der Hülse fixiert, da die reale Veränderung des Systems beschrieben werden soll. Durch die Präparation bis zur Kaltverschweißung, wird auch der Pin abgetragen, was zu Veränderungen der Oberfläche an der Pinspitze führen kann. Resultierend aus diesen Veränderungen können keine reproduzierbaren Verschiebungsmessungen durchgeführt werden. Damit eine Vergleichbarkeit und ein simulativer Abgleich dieses Zustands möglich ist, muss zusätzlich zur Pinspitzenbewegung noch die Verschiebung an der Hülse gemessen werden. Dazu ist es notwendig, dass die Verschiebungsmessungen nicht in der Ansicht des Längsschliffs/Seitenansicht, sondern von unten (siehe Abb. 5.28) gemessen werden. Die Auswertung der relativen Verschiebung an der Pinspitze in Abbildung 5.37 zeigt, dass es zu einem Schließen der Pinspitze nach dem Öffnen der Hülse kommt.



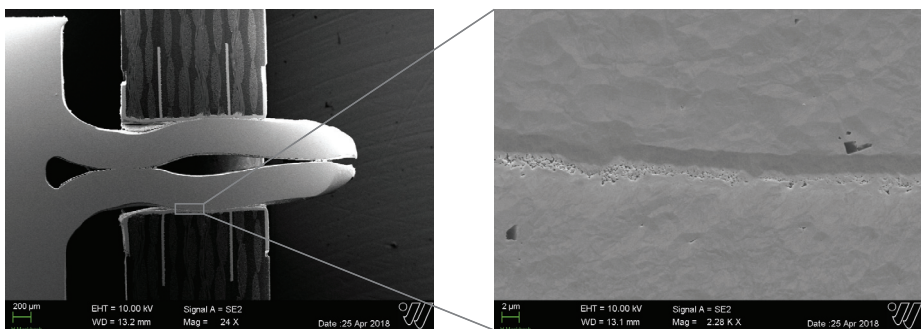
**Abbildung 5.37:** Schließen der Pinspitze nach dem Öffnen der Hülse

Diese Verschiebungen lassen sich mit der Pinspitzenbewegung während dem Zugversuch korrelieren (Abb. 5.38). Daraus wird deutlich, dass der Präparationsprozess zu einer Reduktion der Kontaktspannung zwischen Pin und Hülse führt. Der Betrag der verringerten Spannung lässt sich individuell je nach Pin-Geometrie und Hülse-Durchmesser anhand der gemessenen Daten aus dem Simulationsmodell [Mar19] bestimmen.



**Abbildung 5.38:** Korrelation des Schließens der Pinspitze nach dem Öffnen der Hülse mit dem Verschiebungsverlauf von Pinspitze und Hülse in einem Zugversuch

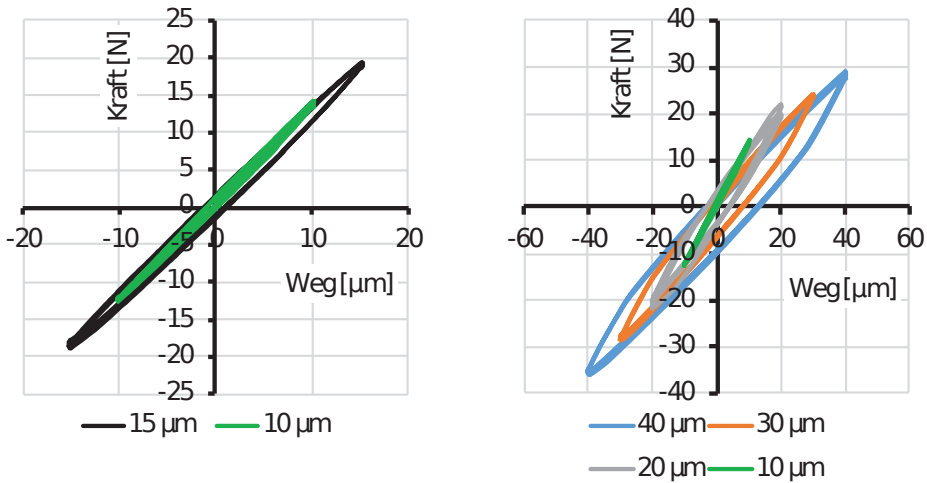
Begleitende Analysen im REM zeigen, dass die Kaltverschweißung trotz dieser vorgenommenen Veränderungen nicht beschädigt wird. Diese Versuchsmethode bietet eine zusätzliche Möglichkeit der Kontaktmodellierung und die Schädigung direkt zu detektieren. Allerdings sind hier nur Versuche im REM möglich, da sonst die sehr feinen Risse (Abb. 5.36) nicht eindeutig bestimmt werden können. Da das Simulationsmodell [Mar19] die zur Schädigungsbestimmung kritischen Verschiebungen sowohl an der Pinspitze als auch auf der Hülse liefert, wurde diese aufwendige Methode nicht weiter verfolgt. Die für das rechnerische Modell benötigten Daten können mit der geschlossenen Querszugprobe ermittelt werden (Kap. 5.4.2).



**Abbildung 5.39:** Ungeschädigte poröse Kaltverschweißung nach dem Öffnen der Hülse und der Zielpräparation bis zur Kontaktzone

### 5.2.5 Laterale Belastung

Die Querkzugprobe charakterisiert zwar das Gesamtverhalten des Pin-Hülse-Systems sehr gut, liefert aber über Minimum der Pinöffnung nur eine untere Grenze für das Einsetzen der Schädigung der Kaltverschweißung. Deshalb werden laterale Belastungsversuche mit dem Prüfkörper aus Abbildung 5.11 und dem in Abbildung 5.7 (b) dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt. Die Verschiebungsmessung erfolgte in diesem Fall über den Maschinenweg. Durch die starre Verbindung zwischen Pinfahne und Kraftaufnahme ist sichergestellt, dass keine Störsignale z.B. durch die Platinenverformung auftreten. Der Versuch wird mit Auslenkungen symmetrisch zur Pinachse durchgeführt, wodurch sich eine Biegewechselbelastung in der Kaltverschweißung ergibt.



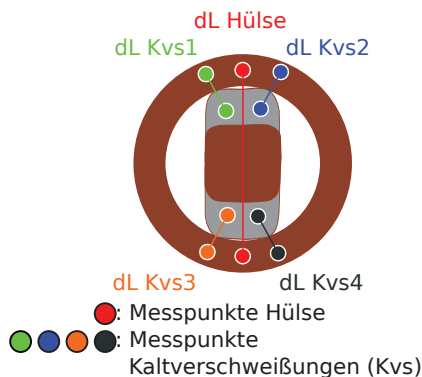
**Abbildung 5.40:** Kraft-Weg-Hysteresen bei lateraler Belastung, bei Auslenkungen von  $\pm 10 \mu\text{m}$  -  $\pm 40 \mu\text{m}$  mit jeweils drei 3 Zyklen

Die Kraft-Weg-Hysteresen in Abbildung 5.40 unter lateraler Belastung zeigen das mechanische Verhalten der Press-Fit-Verbindung. Durch die Öffnung der Hysteresen bei einer Auslenkung von 15  $\mu\text{m}$  wird eine Schädigung des Systems direkt abgebildet. Die Öffnung der Hysterese beschreibt, dass bei der Belastung des Press-Fit-Systems Reibarbeit verrichtet wird, die durch das Aufeinanderreiben zweier Rissflächen resultieren. Mit dem Fortschreiten der Auslenkung öffnen sich die Hysteresen immer weiter und die Steigung der linearen Bereiche der Hysteresen nimmt ab, was eine Reduktion der Steifigkeit in Abhängigkeit des Schädigungsfortschritts beschreibt.

## 5.3 Versuchsergebnisse EloPin mit geschlossener Pin- spitze

### 5.3.1 Definition Messprozedur

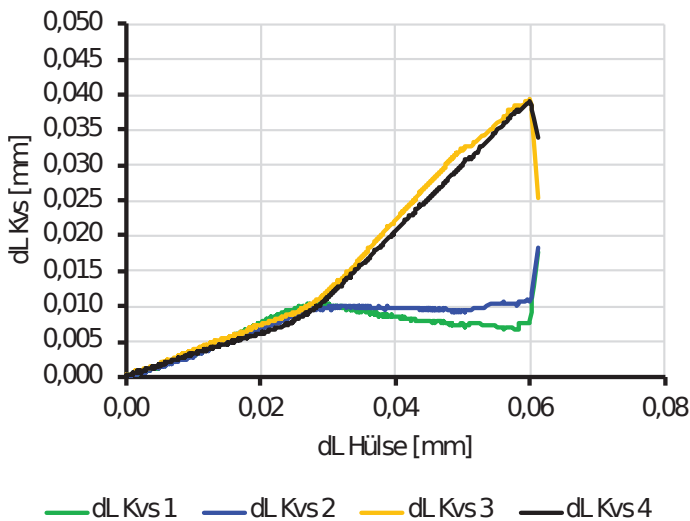
Um eine Übertragbarkeit der Messmethode auch auf andere Pin-geometrien zu überprüfen, wurde ein zweiter Pin mit geschlossener Pinspitze (Abb. 5.1 (b)) untersucht. Dabei wurden Zugversuche mit den Quersugproben und längs zur Belastungsrichtung eingepresstem EloPin durchgeführt. Da der EloPin im Gegensatz zum FelxxPin eine geschlossene Pinspitze aufweist, kann nicht die gleiche Messprozedur verwendet werden. Dementsprechend ist es nicht zielführend Verschiebungen an der Spitze zu messen. Stattdessen wird die Relativbewegung zwischen Pin und Hülse an allen vier Kontaktzonen bzw. Kaltverschweißungen gemessen (Ksv1-Ksv4). Wie der Abbildung 5.41 zu entnehmen ist, werden die Verschiebungen über 4 virtuelle Extensometer gemessen, die mittig durch die jeweilige Kaltverschweißung laufen und in einem Winkel von 20° zur vertikalen Mittelachse angeordnet sind. Dementsprechend können Veränderungen an einzelnen Kaltverschweißungen bestimmt werden. Die Messpunkte sind hülsennah auf den Schenkeln zu platzieren und nicht an der Pinspitze, um den Einfluss eines eventuellen Kippens des Pins auf ein Minimum zu reduzieren. Darüber hinaus wird die Hülsenverschiebung auch über ein virtuelles Extensometer gemessen, welches auf der vertikalen Mittelachse liegt.



**Abbildung 5.41:** Virtuelle Extensometer zwischen den Pinschenkeln des EloPins und der Hülse, sowie auf der Hülse

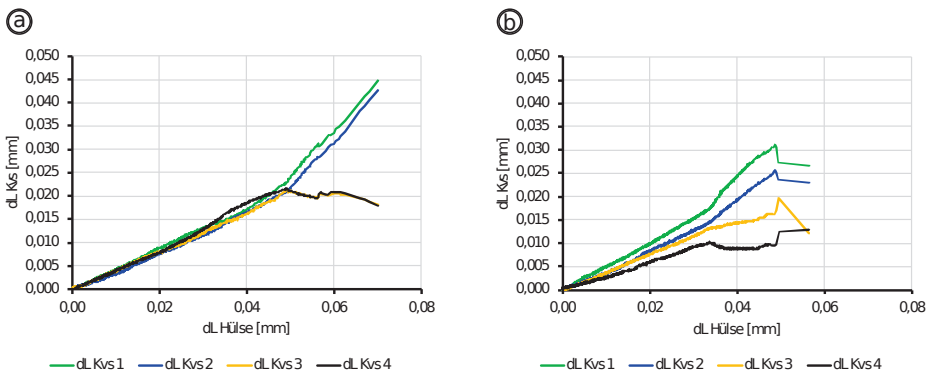
### 5.3.2 Versuchsergebnisse

Zur Auswertung und Analyse der Zugversuche erfolgt in Analogie zur Vorgehensweise für die FlexxPins, wie sie in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurde. Der Unterschied besteht nur darin, dass nicht die Pinspitzenbewegung sondern die Verschiebung an allen vier Kaltverschweißungen (Kap. 5.3.1) über der Hülsenverschiebung aufgetragen werden (Abb. 5.42). Die in Abbildung 5.42 dargestellten Verschiebungsverläufe weisen zunächst einen linearen Anstieg auf, bis es bei einer Hülsenverschiebung von ca. 28  $\mu\text{m}$  zu einer signifikanten Steigungsänderung kommt. Genau wie bei dem FlexxPin beschreibt die anfängliche lineare Zunahme der Verschiebungen die Entspannung des elastischen Auges und die Reduktion der Kontaktspannung zwischen dem Pin und der Hülse. Ab dem Punkt, an dem sich die Steigungen signifikant ändern, sind zwei unterschiedliche Effekte zu beobachten. Die Steigung der Verschiebungen von Ksv3 und Ksv4 wird deutlich größer. Der steilere Anstieg hat zur Folge, dass sich der obere Pinschenkel schneller von der Hülse entfernt und somit die Kaltverschweißung stark beschädigt wird. Im Gegensatz dazu bleibt der Abstand von Ksv2 ab einer Hülsenverschiebung von 28  $\mu\text{m}$  konstant und Ksv1 zeigt sogar eine leichte negative Steigung, was eine Annäherung des Pins zur Hülse bedeutet. Somit lösen sich Ksv3 und Ksv4 schneller als Ksv1 und Ksv2. Kurz vor dem Versagen der Querkzugprobe bei einer Hülsenverschiebung von 0,06 mm lösen sich alle Kaltverschweißungen und der Pin fällt aus der Querkzugprobe.



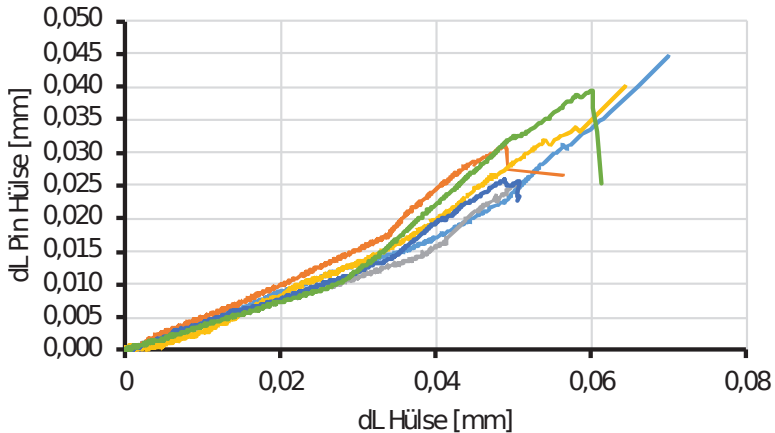
**Abbildung 5.42:** Verschiebungsverläufe zwischen längs eingepresstem EloPin und Hülse im Bereich der Kaltverschweißungen

Die Auswertung weiterer Versuche zeigt, dass Verschiebungen an den einzelnen Kaltverschweißungen alle ein ähnliches Verhalten aufweisen, obwohl die anfänglichen linearen Bereiche sich etwas unterscheiden können. Zwei typische Beispiele sind in Abbildung 5.43 zu sehen. In Abbildung 5.43 (a) ist im Prinzip das gleiche Verhalten wie in Abbildung 5.42 erkennbar, wobei die Ablösung etwas später einsetzt und sich der obere Pinschenkel ablöst. In Abbildung 5.43 (b) unterscheiden sich die Messkurven von anfang deutlich, so dass von einem geometrischen Effekt, z.B. durch schiefes Einpressen, ausgegangen werden kann. Es ist aber erkennbar, dass die Ablösung bei einer Hülßenöffnung von ca. 33  $\mu\text{m}$  erfolgt. Beide Diagramme weisen deutliche Steigungsänderungen nach der beginnend linearen Zunahme der Verschiebung zwischen Pin und Hülse auf, wodurch eine direkte Belastung der Kaltverschweißungen erfolgt. Der anschließende kontinuierliche Verschiebungsverlauf beschreibt das stetige Versagen der Kontaktzone.



**Abbildung 5.43:** Grundsätzlich gleiches Verhalten der Verschiebungen an den Kaltverschweißungen bei längs eingepresstem EloPin, trotz anfänglicher Abweichungen

Um das Versagensverhalten mehrerer Querzugproben zu veranschaulichen, wird in Abbildung 5.44 pro Versuch nur ein Verschiebungsverlauf abgebildet. Diese Verläufe repräsentieren die Messkurven mit der höheren Steigung nach dem Knickpunkt. Daraus ist ersichtlich, dass der Punkt, ab dem eine Schädigung der Kaltverschweißung erfolgt, von ca. 28  $\mu\text{m}$  bis 48  $\mu\text{m}$  variiert und somit eine relativ große Streubreite aufweist. Das lässt sich durch die zum Teil schief eingepressten Pins und die in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Punkte, wie z.B. geometrische Toleranzen von Pin und Hülse, begründen.

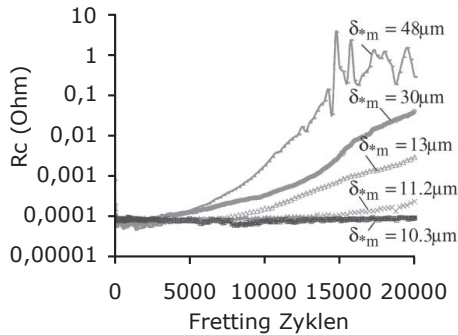


**Abbildung 5.44:** Variation des kritischen Punktes der Steigungsänderung von ca. 28  $\mu\text{m}$  bis 48  $\mu\text{m}$  bei längs eingepresstem EloPin

## 5.4 Diskussion

### 5.4.1 Optische Messung im Vergleich mit anderen Prüfverfahren

Die anfänglichen Ergebnisse in Kapitel 5.1.5 zeigen Risse und große Verformungen an der Hülse, die die Funktionalität des Prüfkörpers beschreiben, jedoch nicht das Verhalten des Verbundsystems. Das mechanische Verständnis für das Verbundsystem liefern Versuche mit der Querkzugprobe und die Analyse der Verschiebungen an der Pin Spitze, aufgetragen über der Hülsenverschiebung (Kap. 5.2.2). Bei dieser Art der Auswertung wird deutlich, dass es zu Beginn der Belastung zu einem Schließen der Pin Spitze kommt und ab einem markanten Punkt bei einer Hülsenverschiebung von ca. 32  $\mu\text{m}$  ein Öffnen der Pin Spitze erfolgt. Die mit der Öffnungsbewegung verbundene Belastung der Kaltverschweißung sorgt für eine Rissbildung in der porösen Kontaktzone (Kap. 5.2.3.2). Dieses Verhalten lässt sich basierend auf mechanischen Versuchen sehr gut beschreiben, jedoch kann der Schädigungsablauf elektrisch nicht abgebildet werden. Fretting-Versuche mit einem abstrahierten Prüfstand für Kupfer Steckkontakte von Hannel et al. [Han+01] liefern das elektrische Verständnis für die erschwerte Messung des Schädigungsablaufs.



**Abbildung 5.45:** Änderung des Widerstands im Fretting-Versuch bei unterschiedlichen Verschiebungen von  $\pm 10,3 \mu\text{m}$  bis  $\pm 48 \mu\text{m}$  [Han+01]

Wie der Abbildung 5.45 zu entnehmen ist, bleibt der Widerstand bei einer Verschiebung von  $\pm 10,3 \mu\text{m}$  und 20.000 Lastwechseln näherungsweise konstant. Erst ab einer Verschiebung von  $\pm 11,2 \mu\text{m}$  kommt es zu einem Anstieg des Widerstandes bei ca. 15.000 Lastwechseln. Einhergehend mit der Erhöhung der Verschiebungsamplituden ist ein früherer Anstieg des Widerstandes. Durch Verschleißprozesse während den Verschiebungen entstehen Ablagerungen, die oxidieren und somit eine zusätzliche Schicht zwischen den Reibpartnern bilden. Als Folge der zusätzlichen Oxidschichten resultiert die Widerstandserhöhung [Han+01]. Dementsprechend ist für die elektrische Messung der vollständige Abriss der Kaltverschweißung entscheidend, da nur dann eine Oxidation entstehen kann und es somit zur Reibkorrosion kommt.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Befunden eines Projektpartners. Trotz hochauflösender Messtechnik konnte keine Verbindung zwischen der elektrischen Messung und dem Schädigungszustand im Pin-Hülse-System zugeordnet werden. Die entstandenen Haarrisse (Abb. 5.36) induzieren also keine messbaren Änderungen der elektrischen Eigenschaften.

Darüber hinaus sollte in Kooperation mit einem Industriepartner das Schädigungsverhalten des Press-Fit-Verbunds mittels Ultraschallmessungen beschrieben werden, leider vergebens. In den Messungen konnte ein eindeutiger Signalverlauf aufgezeichnet werden, der das Versagensverhalten eines Faserkunststoff-Verbundes beschreibt. Jedoch ist das Verhalten des Platinenwerkstoffs so dominant, dass sich der langsame Schädigungsfortschritt der Kaltverschweißung nicht separieren lässt. Das bedeutet, dass die Messmethode nicht sensitiv genug ist, um die Schädigung der Kontaktzone zwischen Pin und Hülse zu messen. Somit ist die optische Versuchstechnik in Kombination mit einer geeigneten Prüfkörpergeometrie die zielführende Versuchsmethodik zur frühzeitigen

Schädigungserkennung an Press-Fit-Kontakten und Beschreibung des gesamten Verbundsystems. Zudem untermauern die Experimente in Kapitel 5.3, eine Übertragbarkeit der Messmethode auf andere Pingeometrien.

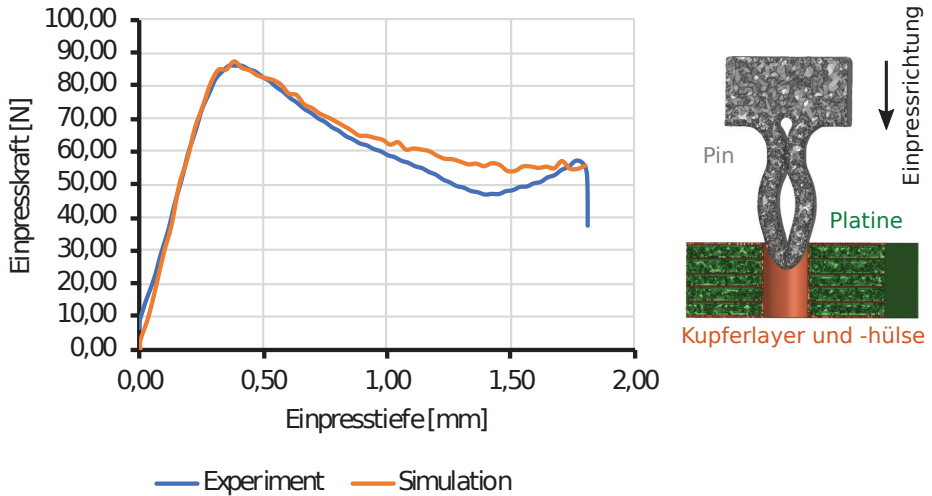
## **5.4.2 Vergleich Experiment-Simulation**

### **5.4.2.1 Materialparameter**

Das untersuchte Materialsystem bestehend aus Platine, Hülse, Pin und Kaltverschweißung enthält eine Reihe von Materialparametern, die entweder im Versuch bestimmt werden müssen oder durch Anpassung von Simulation und Experiment zu ermitteln sind. Im Fall des Platinenwerkstoffs konnten einfache Prüfkörper entnommen werden. Die im Kapitel 5.1.5 beschriebenen Versuche lieferten eine Datenbasis, die die vollständige Bestimmung aller notwendigen Parameter erlaubten. Das Grundmaterial des Pins ist die CuNiSi-Kupferlegierung, für die ein Datenblatt (Anhang 5.4.2.1; Abb. C.1) vorliegt, das allerdings nicht den galvanisierten Zustand beschreibt und das elastoplastische Materialverhalten nur unvollständig charakterisiert. Die Hülse ist ein galvanisch abgeschiedenes Schichtsystem mit dem Grundwerkstoff Kupfer. Alle weiteren Materialparameter werden durch Ein- bzw. Auspressversuche sowie mit Zugversuchen an der Querkzugprobe und den lateralen Belastungsversuchen bestimmt.

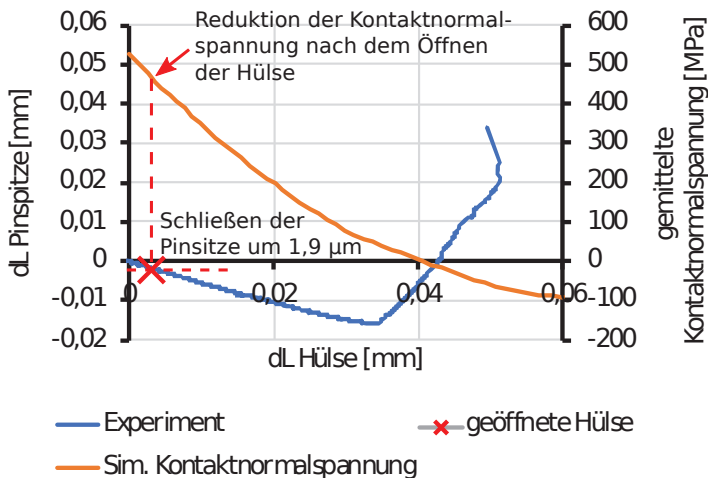
### **5.4.2.2 Kontaktspannung**

Um das mechanische Verhalten im Kontaktbereich abbilden zu können, muss zunächst der Kontaktdruck, der sich während des Einpressvorgangs aufbaut, bestimmt werden, da dieser der äußeren mechanischen Belastung entgegenwirkt. Dies erfolgt durch den Abgleich des elastoplastischen Materialverhaltens von Pin und Hülse mit den Einpressversuchen [Mar19]. Abbildung 5.46 zeigt, dass sowohl die maximale Einpresskraft als auch der grundsätzliche Verlauf der Einpresskurve sehr gut wiedergegeben wird.



**Abbildung 5.46:** Verifizierung der simulativen Einpressverläufe an den realen Einpresskurven [Mar19]

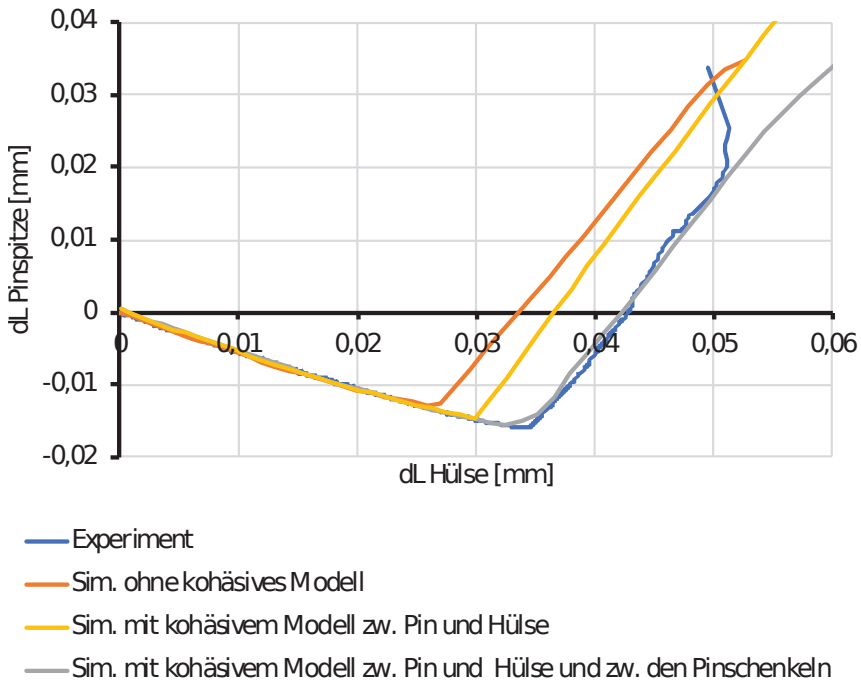
Die Abweichung im abfallenden Ast der Kurve sind auf die Modellierung des Reibvorgangs während des Einpressens zurückzuführen [Mar19]. Nach der Relaxation des Verbundsystems liegen die ermittelten Kontaktspannungen bei ca. 525 MPa. Abbildung 5.47 zeigt, dass sich beim Aufschneiden der Hülse (Kap. 5.2.4) die Kontaktspannung nur geringfügig reduziert. Dieses Verhalten steht im Einklang mit der intakten Kaltverschweißzone.



**Abbildung 5.47:** Reduktion der gemittelten Kontaktspannung nach dem Öffnen der Hülse [Mar19]

### 5.4.2.3 Kohäsivzone

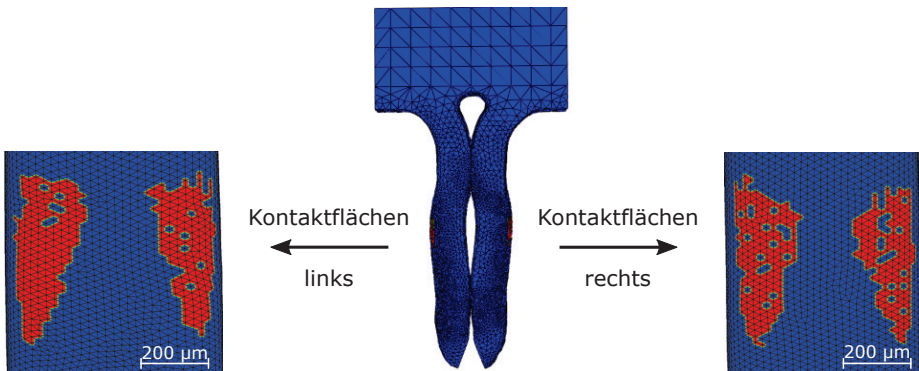
In der Abbildung 5.20 sind die Bereiche dargestellt, in denen im Simulationsmodell nach dem Einpressen eine Kohäsivzone mit verschwindender Dicke eingefügt wird. In diesen Kohäsivzonen kann sich zunächst eine Spannung aufbauen. Nach dem Überschreiten eines kritischen Wertes setzt Schädigung, gemessen durch einen Schädigungsparameter  $D$ , ein. Erreicht  $D$  den Wert 1, löst sich die Kontaktzone ab. Das Kohäsivzonenmodell enthält insgesamt 8 freie Parameter, die an das Experiment angepasst werden. Entscheidend für das mechanische Verhalten ist allerdings auch die Größe der Kontaktzone, die aufgrund der Fertigungstoleranzen variiert. Die in Kapitel 5.2.2 beschriebene Vermessung der Hülsen und der Pins im CT erwies sich hier als essentiell. Abbildung 5.48 zeigt den Einfluss der Kohäsivzone auf das Verhalten des Pin-Hülse-Systems im Zugversuch mit der Querszugprobe. Die Übereinstimmung ist hervorragend, wenn neben den eigentlichen kaltverschweißten Kontaktflächen von Pin und Hülse auch die Kaltverschweißung zwischen den Pinschenkeln (oben und unten) berücksichtigt wird. Jedoch haben die Kaltverschweißungen zwischen den Pinschenkeln andere mechanische Eigenschaften als die Verschweißungen zwischen Pin und Hülse.



**Abbildung 5.48:** Einfluss des kohäsiven Modells auf die simulative Verschiebungsbewegung an der Pinspitze im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen [Mar19]

#### 5.4.2.4 Kontaktflächen und Schädigungsentwicklung

Die Ausprägung der Kontaktzone im Bereich Pin-Hülse ergibt sich im Simulationsmodell aus den Einpressversuchen. Abbildung 5.49 zeigt ein Beispiel der Anlageflächen des Pins, wobei die unregelmäßige Form zum einen auf die Diskretisierung zurückzuführen ist und zum anderen mit den im CT bestimmten Fertigungsungenauigkeiten zusammenhängt. Diese Anlageflächen können mit denjenigen verglichen werden, die im REM bei herausgefallenen Pins gefunden wurden (Abb. 5.33). Der Vergleich beider Abbildungen veranschaulicht, dass es zwar Unterschiede gibt, dass aber eine qualitative Übereinstimmung durchaus vorhanden ist. Das Ausmaß einer Anlagefläche liegt im Experiment bei  $0,072 \text{ mm}^2$  und  $0,096 \text{ mm}^2$ , was bei 4 Anlageflächen zu einer Gesamtfläche von  $0,32 \text{ mm}^2$  führt, wobei noch die Verzerrung durch die REM-Aufnahme zu berücksichtigen ist. Auf der Basis der realen Pingeometrien bildet sich in der Simulation eine Gesamtanlagefläche von  $0,26 \text{ mm}^2$  aus [Mar19], was als sehr gute Übereinstimmung gewertet werden kann.



**Abbildung 5.49:** Simulierte Anlageflächen an den Pinschenkeln im eingepressten Zustand [Mar19]

Der Abbildung 5.47 ist zu entnehmen, dass die Kontaktnormalspannung in der Simulation bei einer Hülsenverschiebung von  $0,04 \text{ mm}$  bei  $0 \text{ MPa}$  liegt. Dies entspricht einem Zustand, in dem der Pressverbund aufgehoben ist. Da die angegebene Kontaktspannung ein gemittelter Wert ist, kann die Kaltverschweißung trotzdem lokal intakt sein. Genau so können bereits vor dem Erreichen des Nulldurchgangs Ablösevorgänge stattgefunden haben, wie z.B. in Kap. 5.2.3.2 beschrieben. Das bedeutet, dass die gemittelte Kontaktspannung als Versagenskriterium nur bedingt geeignet ist.

Die Abbildung 5.50 stellt die Ausprägung der Schädigungsvariablen  $D$  in den Anlageflä-

chen dar. Daraus ist ersichtlich, dass erste kleine Ablösungen der kaltverschweißten Zone bereits vor dem Erreichen des Minimums der Relativverschiebung zwischen den beiden Pinspitzen einsetzt. Die Qualität des Simulationsmodells wird dadurch bestätigt, dass bei zunehmender Belastung die Schädigung vom Rand der Anlageflächen nach innen fortschreitet. Bei einer Hülseöffnung von 0,044 mm ist eine Kontaktfläche fast vollständig abgelöst. Dieser Wert ist im Einklang mit den Ergebnissen aus Abbildung 5.29, wo eine deutliche Aufspaltung der Messkurven bei Hülseöffnungen im Bereich von 0,044 mm zu beobachten ist.

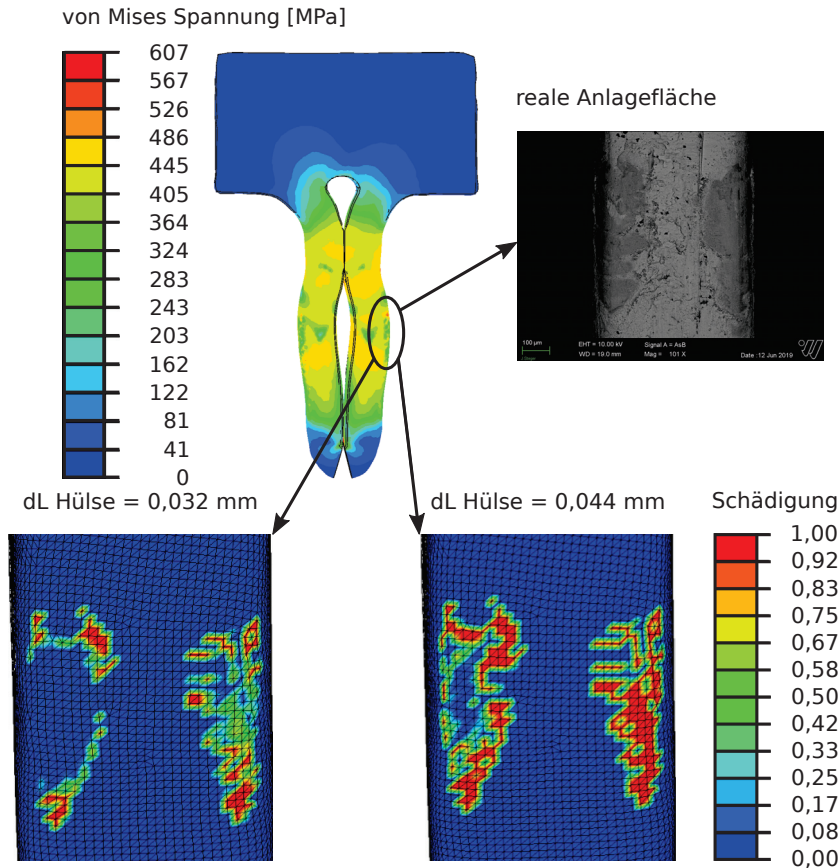


Abbildung 5.50: Ausprägung der Schädigung an den Kontaktflächen des rechten Pinschenkels bei unterschiedlichen Belastungszuständen [Mar19]

#### **5.4.2.5 Schlussbemerkung**

Das mechanische Verhalten der Einpresskontakte lässt sich mit den Methoden der digitalen Bildkorrelation sehr gut untersuchen, da virtuelle Extensometer an interessanten Punkten platziert werden können, mit denen sich die Entwicklung der Antwort des Systems auf die einzelnen Bestandteile zurückführen lässt. Allerdings müssen bei einem solchen indirekten Vorgehen die experimentellen Randbedingungen sehr genau kontrolliert werden, da äußere Störeffekte wie Fertigungsungenauigkeiten bei den Prüfkörpern häufig einen ebenso großen Einfluss auf einen lokalen Effekt haben können wie die eigentlichen physikalischen Vorgänge. Eine vollständige Interpretation des mechanischen Verhaltens ist bei einer derartigen indirekten Messung faktisch nur möglich, wenn gleichzeitig ein Simulationsmodell aufgebaut wird, mit dem auch Hypothesen getestet werden können.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

In allen drei ausgewählten Fällen konnten durch den Einsatz der digitalen Bildkorrelation grundlegende Erkenntnisse bzgl. des werkstoffmechanischen Verhaltens gewonnen werden, wobei die Zuordnung charakteristischer Verformungen zu physikalischen Phänomenen ohne eine präzise und reproduzierbare Versuchsführung nicht möglich gewesen wäre. Die wesentlichen beobachteten Phänomene sind:

- 1 Aluminium Blech: Beim PLC-Effekt kommt es nicht nur zu einer Dehnungslokalisierung, sondern diese Lokalisierungen bewegen sich mit zunehmender Spannung und können auch ihre Richtung ändern. Dadurch entstehen „Hot-Spots“ im Dehnungsfeld, in denen eine besonders hohe plastische Verformung herrscht. Das Versagen geht von dem ausgeprägtesten Dehnungsband aus und verläuft entlang dessen Ausrichtung.
- 2 PURE: Das Versagensverhalten wird dadurch bestimmt, dass Fehler im Gewebe und im Schichtverbund auftreten. Solche Fehler sind relativ häufig und treten unter Belastung in Wechselwirkung miteinander. Aus diesen Gründen ist die statistische Verteilung der Zugfestigkeiten nicht eindeutig durch ein einfaches stochastisches Modell beschreibbar.
- 3 Einpresskontakt: Die Analyse des optisch nicht zugänglichen Kontaktbereichs ist nur möglich, wenn gleichzeitig ein entsprechendes Simulationsmodell aufgebaut wird. Die optische Verformungsmessung liefert dann die Datenbasis für die Parameterbestimmung des Modells. Da an allen kritischen Stellen virtuelle Extensometer angebracht werden können, kann auch ein komplexes Modell mit einer Vielzahl an Parametern durch einfache Versuche vollständig bestimmt werden.

# Anhang A

## Anhang zu Kapitel 3.2

**Tabelle A.1:** Übersicht der einzelnen Messwerte für die in Kapitel 3.2.1 beschriebene Aluminiumlegierung

Temperatur °C	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{50}$ [%]
22	155	190	18
150	58	154	16
250	58	154	16
350	58	154	16

## Anhang B

### Anhang zu Kapitel 5.1.5

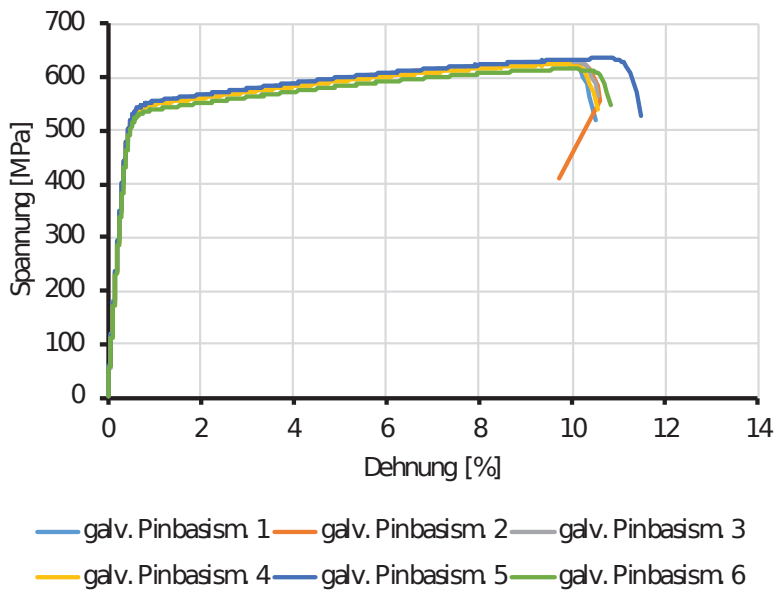
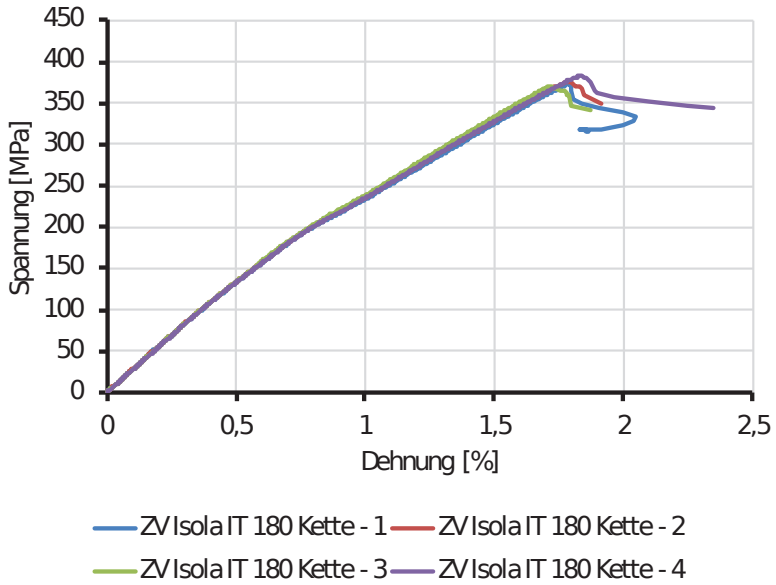
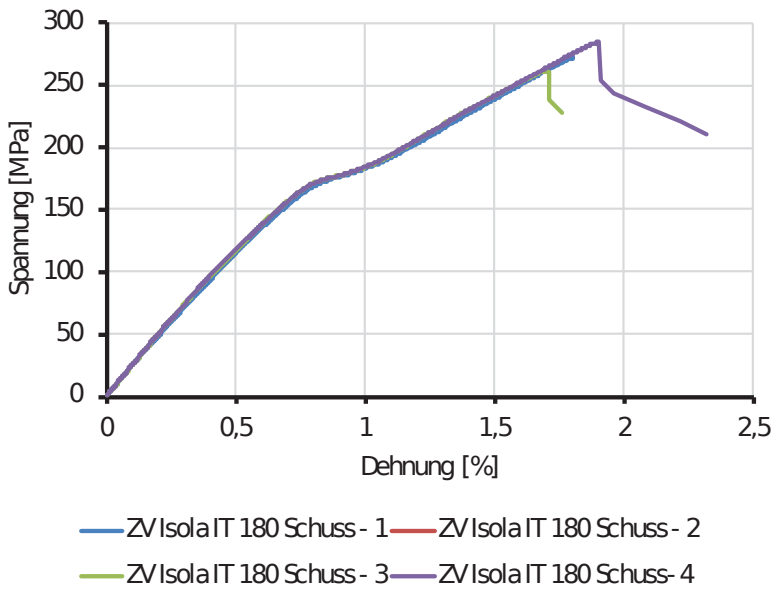


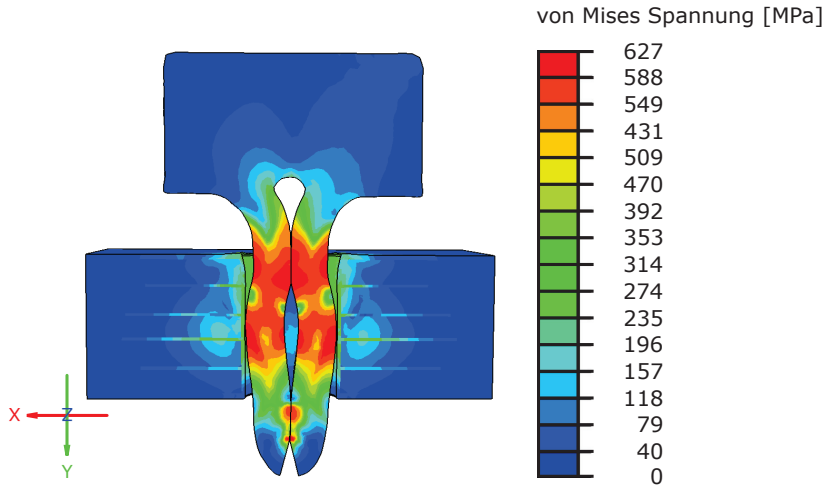
Abbildung B.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des galvanisierten Pinbasismaterials



**Abbildung B.2:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Platinengrundmaterials IT 180 von Göttle in Kettrichtung



**Abbildung B.3:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Platinengrundmaterials IT 180 von Göttle in Schussrichtung



**Abbildung B.4:** Spannungsverteilung im Pin und in der Platine nach dem Einpressvorgang ohne Berücksichtigung der Relaxation

# Anhang C

## Anhang zu Kapitel 5.4.2.1


Halbzeug									
		<b>KHP<sup>®</sup>102 (CuNiSi)</b>							
Normbezeichnungen									
EN	nicht genormt			UNS Alloy-No.	C19010				
Chemische Zusammensetzung									
<b>Cu</b>	<b>Ni [%]</b>		<b>Si [%]</b>		<b>P [%]</b>				
Rest	0,80 - 1,80		0,15 - 0,35		0,01 - 0,05				
Mechanische Eigenschaften									
Zustand	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Streckgrenze Rp0,2 [MPa]	Dehnung A50 [%]	Härte <sup>1)</sup> HV	Biegebarkeit <sup>1)</sup>				
					90° r/t <sup>2)</sup>		180° r/t <sup>2)</sup>		
					L <sup>3)</sup>	<sup>4)</sup>	L <sup>3)</sup>	<sup>4)</sup>	
R360	360 - 430	min. 250	min. 12	100 - 130	0	0	0	0	
R410	410 - 480	min. 360	min. 10	130 - 150	0	0	0,5	1,5	
R460	460 - 530	min. 430	min. 8	140 - 160	0,5	1	2	2,5	
R520	520 - 580	min. 490	min. 5	150 - 170	1	1,5	3,5	4	
R580 <sup>5)</sup>	580 - 650	min. 540	min. 6	175 - 205	1	1,5	1,5	2	
<sup>1)</sup> Die r/t-Werte gelten für eine Banddicke bis zu 0,6 mm (ohne Rissbildung). Die Angaben beziehen sich auf eine Breite der Biegekante von 5 mm Biegefest nach ISO 7438 im V-Gesenk <sup>2)</sup> r = innerer Radius, t = Banddicke <sup>3)</sup> ⊥ = Biegekante senkrecht zur Walzrichtung <sup>4)</sup>    = Biegekanten parallel zur Walzrichtung <sup>5)</sup> ausgehärteter Zustand Die Angaben in diesem Datenblatt sind ausschließlich zur allgemeinen Information bestimmt. Sie entsprechen dem Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Herausgabe und können die Prüfungen unserer Kunden nicht ersetzen. Eine Haftung kann aus den Angaben nicht abgeleitet werden. Stand: 04/2013 <a href="http://www.kemper-olpe.de">www.kemper-olpe.de</a> Gebr. Kemper GmbH + Co KG Metallwerke Harkortstr. 5, 57462 Olpe Tel. 02761 891 0 Fax. 02761 891 175 info@kemper-olpe.de									

Abbildung C.1: Auszug aus dem Datenblatt des Pinbasismaterials

# Literatur

- [Abb+02] M. Abbadi, P. Hähner und A. Zegloul. „On the characteristics of Portevin-Le Chatelier bands in aluminum alloy 5182 under stress-controlled and strain-controlled tensile testing“. *Materials Science and Engineering* 337 (2002), S. 194–201.
- [Alc+07a] B. Alcock, N. O. Cabrera, N.-M. Barkoula, J. Loos und T. Peijs. „Interfacial properties of highly oriented coextruded polypropylene tapes for the creation of recyclable all-polypropylene composites“. *Journal of Applied Polymer Science* 104 (2007), S. 118–129.
- [Alc+07b] B. Alcock, N.O. Cabrera, N.-M. Barkoula, A.B. Spoelstra, J. Loos und T. Peijs. „The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38 (2007), S. 147–161.
- [AE72] E. Archbold und A.E. Ennos. „Displacement measurement from double-exposure laser photographs“. *Optica Acta* 19 (1972), S. 253–271.
- [BA14] J. Bornemann und T. Ahrens. „Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL“. In: DVS Media GmbH, 2014. Kap. Prüfung der Qualität von Einpressverbindungen, S. 166–171.
- [Bur+17] M. Burger, F. Neitzel und R. Lichtenberger. „Einsatzpotential der digitalen Bildkorrelation zur Bauwerksüberwachung“. *Conference: Ingenieurvermessung 17* (2017).
- [Cas+09] L. Casarotto, H. Dierke, R. Tutsch und H. Neuhäuser. „On nucleation and propagation of PLC bands in an Al–3Mg alloy“. *Materials Science and Engineering: A* 527.1-2 (2009), S. 132–140.
- [Cho+17] P. Chowdhury, H. Sehitoglu und R. Rateick. „Damage tolerance of carbon-carbon composites in aerospace application“. *Carbon* (2017).
- [Chu+85] T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton und W. H. Peters. „Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics“. *Experimental Mechanics* 25 (1985), S. 232–244.

- [CP79] R. J. Crawford und D. Paul. „Solid phase compaction of polymers“. *Journal of Materials Science* 14 (1979), S. 2693–2702.
- [Dina] *DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. 2009.
- [Dinb] *DIN EN ISO 527-4: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*. 1997.
- [Dinc] *DIN EN ISO 6892-2: Metallische Werkstoffe-Zugversuch- Teil2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur*. 2011.
- [DP70] A. J. Durelli und V. J. Parks. „Moir analysis of strain“. *Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall* (1970).
- [Fra+91] E. A. Franke, D. J. Wenzel und D. L. Davidson. „Measurement of Microdisplacements by machine vision photogrammetry (DISMAP)“. *Review of Scientific Instruments* 62 (1991), S. 1270–1279.
- [FK16] H. Friebe und M. Klein. „Optische Bewegungs- und Verformungsanalyse auf Basis applizierter Muster und Marken“. 5. *VDI Fachtagung optische Messung von Funktionsflächen* (2016), S. 47–60.
- [Fü+06] T. Fülöp, W.A.M. Brekelmans und M.G.D. Geers. „Size effects from grain statistics in ultra-thin metal sheets“. *Journal of Materials Processing Technology* 174 (2006), S. 233–238.
- [Gab49] D. Gabor. „A New Microscope Principle“. *Nature* 161 (1949), S. 177–178.
- [Gei+64] P. H. Geil, F. R. Anderson, B. Wunderlich und T. Arakawa. „Morphology of polyethylene crystallized from the melt under pressure“. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers* 2 (1964), S. 3707–3720.
- [Gmb16] GOM GmbH. *GOM Testing, Technische Dokumentation ab V8 SR1, Grundlagen der digitalen Bildkorrelation und Dehnungsberchnung*. 2016.
- [Gmb17a] LaVision GmbH. *Product-Manual Davis 8.4 Software*. 2017.
- [Gmb17b] LaVision GmbH. *Product-Manual StrainMaster*. 2017.
- [Gor13] B. Gorny. „Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen der digitalen Bildkorrelation zur Frühdetektion struktureller und funktioneller Schädigungen und Versagensvorhersage in metallischen Werkstoffen, Werkstoffverbunden und Verbundwerkstoffen“. Diss. Universität Paderborn, 2013.
- [Gru85] A. W. Grün. „Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique“. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* 14 (1985), S. 175–187.
- [Han+01] S. Hannel, S. Fouvry, Ph. Kapsa und L. Vincent. „The fretting sliding transition as a criterion for electrical contact performance“. *Wear* 249 (2001), S. 761–770.

- [Hei09] T. Heinisch. *Einpresstechnik: Entwicklung, Anwendung, Qualifizierung*. 1. Auflage. Eugen G. Leuze Verlag KG, 2009.
- [H.H+07] H.Halim, D. S. Wilkinson und M. Niewczas. „The Portevin–Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy“. *Acta Materialia* 55 (2007), 4151–4160.
- [Hu+11] Q. Hu, Q. Zhang, S. Fu, P. Cao und M. Gong. „Influence of precipitation on the Portevin-Le Chatelier effect in Al-Mg alloys“. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 1 (Jan. 2011).
- [Hun82] Y.Y. Hung. „Shearography: A New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing“. *Optical Engineering* 21 (1982), S. 391–395.
- [Jan+06] P.J.M. Janssen, T.H. de Keijser und M.G.D. Geers. „An experimental assessment of grain size effects in the uniaxial straining of thin Al sheet with a few grains across the thickness“. *Materials Science and Engineering: A* 419 (2006), S. 238–248.
- [Jia+05] Z. Jiang, Q. Zhang, H. Jiang, Z. Chen und X. Wu. „Spatial characteristics of the Portevin-Le Chatelier deformation bands in Al-4at%Cu polycrystals“. *Materials Science and Engineering: A* 403 (2005), S. 154–164.
- [Jä05] B. Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [Kam09] C. Kammer. *Aluminium Taschenbuch Band 1*. 16 Auflage. Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, 2009.
- [Kim14] T. Kimpel. „Entwicklung eines Verfahrens zur betriebsfesten Bemessung von Einpressverbindungen in Leiterplatten für elektronische Steuergeräte der Fahrzeugtechnik“. Diss. TU Darmstadt, 2014.
- [Kow+11] C. Kowtsch, G. Hoffmann und R. Kleicke. *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken – Verfahren – Materialien – Eigenschaften*. Hrsg. von C. Cherif. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [Lan03] H. P. Langtangen. *Computational Partial Differential Equations*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [Lee+04] J.-R. Lee, J. Moimard, A. Vautrin und Y. Surrel. „Application of grating shearography and speckle shearography to mechanical analysis of composite material“. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35 (2004), S. 965–976.
- [Lee70] J.A. Leendertz. „Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect“. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 3 (1970), S. 214–218.

- [Luc+18] P. G. Luccarelli, S. Rabbolini, S. Beretta und S. Foletti. „Crack-closure simulations of Ni-based super-alloy polycrystal, a comparison between experiments and crystal plasticity“. *Materials Science & Engineering A* 740-741 (2018), S. 368–380.
- [Man+07] T. Manninen, K. Kanervo, A. Revuelta, J. Larkiola und A. S. Korhonen. „Plastic deformation of solderless press-fit connectors“. *Materials Science and Engineering: A* 460-461 (2007), S. 633–637.
- [Mar19] K. Markstädter. „Geraffte Alterung von Press-Fit-Kontakten bei mechanischer Mikrobewegung“. Diss. Universität Kassel, 2019.
- [Mat18] B. Matheis. „Hochtemperaturversuche an dünnen Aluminiumblechen“. Magisterarb. Universität Kassel, 2018.
- [Men81] F. T. Mendenhall. „Computer-aided analysis of photoelastic images“. Diss. University of Illinois, Champaign (USA), 1981.
- [Mon01] M. Moneke. „Die Kristallisation von verstärkten Thermoplasten während der schnellen Abkühlung und unter Druck“. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [Nov17] Novelis. *Certificate of Conformance*. 2017.
- [Ost14] F. Ostermann. *Anwendungstechnologie Aluminium*. 3. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [Pan+09] B. Pan, K. Qian, H. Xie und A. Asundi. „Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review“. *Measurement Science and Technology* 20 (2009).
- [Pas09] D. Paßmann. „Prozessinduzierte Gradierung eigenverstärkter Polypropylen-Faserverbunde beim Heißkompaktieren und Umformen“. Diss. Universität Kassel, 2009.
- [Pen+07] L. Peng, F. Liu, J. Ni und X. Lai. „Size effects in thin sheet metal forming and its elastic–plastic constitutive model“. *Materials & Design* 28 (2007), S. 1731–1736.
- [Per71] A. Pertlin. „Molecular Model of Drawing Polyethylene and Polypropylene“. *Journal of Material Science* 6 (1971), S. 490–580.
- [PR82] W. H. Peters und W. F. Ranson. „Digital imaging techniques in experimental stress analysis“. *Optical Engineering* 21 (1982), S. 427–431.
- [Pic+05] R.C. Picu, G. Vincze, F. Ozturk, J.J. Gracio, F. Barlat und A.M. Maniatty. „Strain rate sensitivity of the commercial aluminum alloy AA5182-O“. *Materials Science and Engineering: A* 390 (2005), S. 334–343.
- [Por90] B. Pornnimit. „Eigenverstärkung von Polyethylen in der Extrusion, Verfahrenseigenschaften-Struktur“. Diss. Universität Kassel, 1990.

- [Pot+17] P. Pottiez, A. Gaus und T. Betz. *Produktdatenblatt Einpresskontakt SF063-100*. Walter Soöhner GmbH & Co.KG. 2017.
- [Rau+01] L.V. Raulea, A.M. Goijaerts, L.E. Govaert und F.P.T. Baaijens. „Size effects in the processing of thin metal sheets“. *Journal of Materials Processing Technology* 115 (2001), S. 44–48.
- [Rie15] A. Ries. „Thermo-mechanische Gradierung eigenverstärkter Polypropylen-Composite“. Diss. Universität Kassel, 2015.
- [Roh13] B. Rohde. „Morphologische Untersuchungen an heißkompaktierten eigenverstärkten Polypropylenverbunden zur Bestimmung der Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge“. Magisterarb. Universität Kassel, 2013.
- [SH06] L. Sachs und J. Hedderich. *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R (German Edition)*. 12. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [Sch+03] T. Schmidt, J. Tyson und K. Galanulis. „Full-field dynamic displacement and strain measurement using advanced 3D image correlation photogrammetry“. *Experimental Techniques* 27 (2003), S. 47–50.
- [SW17] M. Schuth und W.Buerakov. *Handbuch Optische Messtechnik*. Carl Hanser Verlag, 2017.
- [Sch12] A. Schäfer. „Werkstoffwissenschaftliche Untersuchung zur Bildung und Wachstum von Martensit in NiTi-Formgedächtnislegierungen unter Spannung“. Diss. Ruhr-Universität Bochum, 2012.
- [Sie04] Siemens. *Ausfallraten, Bauelemente: Erwartungswerte von elektrischen Verbindungsstellen, elektrischen Steckverbindern und Steckfassungen, Part 5*. 2004.
- [Suh+10] C. H. Suh, Y.-C. Jung und Y. S. Kim. „Effects of thickness and surface roughness on mechanical properties of aluminum sheets“. *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (2010), S. 2091–2098.
- [Sun+97] Z. Sun, J. S. Lyons und S. R. McNeill. „Measuring Microscopic Deformations with Digital Image Correlation“. *Optics and Lasers in Engineering* 27 (1997), S. 409–428.
- [Sut+83] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson und S. R. McNeill. „Determination of displacements using an improved digital correlation method“. *Image and Vision Computing* 1 (1983), S. 133–139.
- [Sut+00] M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helm und Y. J. Chao. „Advances in Two-Dimensional and Three Dimensional Computer Vision“. *Topics in Applied Physics* 77 (2000), S. 323–372.
- [Sut+09] M. A. Sutton, J. J. Orteu und H. Schreier. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Springer Verlag-US, 2009.

- [The69] P. S. Theocaris. *Moire fringes in strain analysis*. Hrsg. von J. Sved. 1. Auflage. Pergamon Press Oxford, 1969.
- [VK98] G. Vendroux und W. G. Knauss. „Submicron Deformation Field Measurements: Part 2. Improved Digital Image Correlation“. *Experimental Mechanics* 38 (1998), S. 86–92.
- [Wag+99] M. Wagenhofer, M. A. Erickson-Natishan, R. W. Armstrong und F. J. Zerilli. „Influences of strain rate and grain size on yield and serrated flow in commercial Al-Mg alloy 5086“. *Scripta Materialia* 41 (1999), S. 1177–1184.
- [Wes11] W. Wessel. „Mikrostrukturelle Untersuchungen der Rissinitiierung und -ausbreitung in intermetallischen TiAl-Legierungen unter zyklischer und quasistatischer Belastung“. Diss. Universität Kassel, 2011.
- [Wio01] G. Wiora. „Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren“. Diss. Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg, 2001.
- [YP07] S. Yaofeng und J. H. L. Pang. „Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images“. *Optics and Lasers in Engineering* 45 (2007), S. 967–974.
- [Yil11] A. Yilmaz. „The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings“. *Science and Technology of Advanced Materials* 12 (2011).
- [Zei13] F. Zeismann. „Mikroanalytische Verfahren zur Untersuchung verschiedener Aspekte der Rissinitiierung und Rissausbreitung“. Diss. Universität Kassel, 2013.
- [Zha+08] Z. Zhao, M. Ramesh, D. Raabe, A.M. Cuitino und R. Radovitzky. „Investigation of three-dimensional aspects of grain-scale plastic surface deformation of an aluminum oligocrystal“. *International Journal of Plasticity* 24 (2008), 2278–2297.

ISBN 978-3-7376-0822-0



9 783737 608220 >