

Masterarbeit

zum Thema

Ermüdungsverhalten von Leitklebern

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Engineering (M. Eng.)

Verfasser: Christian Werner
geboren am 10.08.1986 in Erfurt

Studiengang: Maschinenbau, Mechatronik, Physiktechnik

Studienrichtung: Maschinenbau

Matrikel: 19776

Eingereicht am: 22.01.2015

Betreuer im Unternehmen: M. Eng. Matthias Pander
Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik
Otto-Eißfeldt-Str.12, 06120 Halle (Saale)

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing Rolf Kademann
Hochschule Merseburg (FH)
Geusaer Straße, 06217 Merseburg

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	IV
Eigenständigkeitserklärung	V
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	VI
Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1 Einleitung	- 12 -
2 Motivation und Aufgabenstellung	- 13 -
3 Theoretische Grundlagen	- 17 -
3.1 Werkstofftechnik des Leitklebers	- 17 -
3.2 Mechanische Charakterisierung.....	- 22 -
3.2.1 Zugversuch und Scherzugversuch	- 22 -
3.2.2 Ermüdungsversuche	- 29 -
3.3 Leitfähigkeitsmessung.....	- 33 -
3.4 Recherchen zum Proben- und Versuchsaufbau	- 37 -
3.4.1 Herstellung der Scherzugproben.....	- 37 -
3.4.2 Scherversuchsaufbau.....	- 41 -
4 Konzeptfindung	- 44 -
4.1 Entwicklung der Vorrichtung und der Probenkörper.....	- 45 -
4.1.1 Technische Anforderungen	- 45 -
4.1.2 Variantenentwurf und Analysen.....	- 46 -
4.1.3 Variantenvergleich.....	- 55 -
4.1.4 Konzeptlösung und Konstruktion.....	- 58 -
4.2 Entwicklung Scherzugversuchsaufbau.....	- 61 -
4.2.1 Das Spannzeug.....	- 62 -
4.2.2 Dehnungsmessung	- 63 -
4.2.3 Messung elektrischer Widerstand	- 70 -
4.2.4 Konzeptlösung und Konstruktion.....	- 74 -

5	Mechanische Charakterisierung.....	- 79 -
5.1	Ausmessen der Fügeteile	- 79 -
5.2	Herstellung der Probekörper	- 81 -
5.3	Quasistatischer Scherzugversuch.....	- 82 -
5.3.1	Testlauf und Versuchsanpassung	- 82 -
5.3.2	Versuchsergebnisse quasistatischer Scherzugversuch	- 85 -
5.3.3	Auswertung und Diskussion	- 89 -
5.4	Zyklischer Ermüdungsversuch	- 99 -
5.4.1	Testlauf und Versuchsanpassung	- 99 -
5.4.2	Versuchsergebnisse zyklischer Ermüdungsversuch ..	- 103 -
5.4.3	Auswertung und Diskussion	- 106 -
6	Bewertung und Weiterentwicklung der Versuche	- 115 -
7	Zusammenfassung	- 118 -
8	Literaturverzeichnis.....	- 118 -
9	Anhang	- 124 -
	Anhang 1: Morphologischer Kasten.....	- 124 -
	Anhang 2: Kostenstückliste und Variantenvergleich.....	- 125 -
	Anhang 3: Zeichnungsunterlagen und Stückliste Klebevorrichtung.....	- 126 -
	Anhang 4: Zeichnungsunterlagen und Stückliste Scherversuchsaufbau-	133 -
	Anhang 5: Diagramme quasistatischer Scherzugversuch	- 138 -
	Anhang 6: Bruchbilder quasistatischer Scherzugversuch.....	- 140 -
	Anhang 7: Diagramme zyklischer Ermüdungsversuch	- 145 -

Aufgabenstellung



Aufgabenstellung für eine Masterarbeit

Thema: “Ermüdungsverhalten von Leitklebern“

Die in der Photovoltaik am weitesten verbreitete Variante zur Verschaltung von Solarzellen stellt das Löten dar. Nachteilig an dieser Technologie erweisen sich insbesondere die hohen Fügetemperaturen, welche aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu hohen mechanischen Spannungen und Rissen in der Solarzelle führen können. Der Wechsel zu bleifreien Loten, um die Umweltbelastung zu verringern, führt zu einer weiteren Erhöhung der Prozesstemperaturen und damit zur Notwendigkeit alternative Verbindungstechniken zu untersuchen. Eine vielversprechende Alternative zum Löten ist das Leitkleben, welches sich bereits in der Mikrosystemtechnik bewährt hat. Hierbei handelt es sich um Polymere, die mit elektrisch leitenden Partikeln gefüllt sind. Diese Materialien sind allerdings hinsichtlich ihres Wechsellastverhaltens nur unzureichend charakterisiert.

In dieser Arbeit sollen Leitkleber hinsichtlich ihrer Ermüdungseigenschaften charakterisiert werden. Mit geeigneten Probekörpern sollen zyklische Versuche durchgeführt werden um die Lebensdauer einer Leitklebeverbindung zu bestimmen. Als Indikator für das Versagen der Verbindung soll sowohl das Kraftsignal als auch die Änderung des elektrischen Widerstands über die Zyklen verfolgt werden. Aufgrund des stark zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens sollen zusätzlich Untersuchungen bei unterschiedlichen Temperaturen und Belastungsfrequenzen durchgeführt werden. Die experimentellen Befunde sollen anschließend phänomenologisch modelliert werden. Durch gezielte Untersuchungen der Mikrostruktur soll der Fehlermechanismus identifiziert werden.

Teilaufgaben:

- Recherche zur Ermüdung von Werkstoffen, mechanischer Charakterisierungsverfahren von Klebern und deren Anwendung in der Photovoltaik
- Auswahl geeigneter mechanischer Prüfverfahren und Versuchsaufbauten
- Entwicklung geeigneter Prüfkörper für die gewählten Methoden
- Fertigung der Prüfkörper und Durchführung der Versuche
- Identifizierung des Fehlermechanismus
- Auswahl eines geeigneten Modells zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Zitate sind sinngemäß übernommene Passagen und im Einzelnen unter genauer Angabe des Fundortes gekennzeichnet.

Ort, Datum

Unterschrift

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien /BMWI14/	- 12 -
Abbildung 2: Aufbau eines Solarmoduls /QUA08/	- 13 -
Abbildung 3: Verschaltung eines Standardsolarmoduls der Firma Q CELLS /QC14/	- 14 -
Abbildung 4: Zusammensetzung Leitkleber /WON10, S.122/	- 15 -
Abbildung 5: TEM-Bild eines Leitklebers /WON10, S.106/	- 17 -
Abbildung 6: Elektrischer Widerstand einer Partikelverknüpfung /WON10, S.175/	- 18 -
Abbildung 7: Vernetzung von Polymerwerkstoffen: Amorpher Thermoplast (a), teilkristalliner Thermoplast (b), Elastomer (c), Duroplast (d) /MACH11, S.526/	- 19 -
Abbildung 8: Chemischer Aufbau einer Polymerverbindung /MACH11, S.518/	- 20 -
Abbildung 9: Schematisches Bild einer Fließzone /MACH11, S.539/	- 21 -
Abbildung 10: Entstehung eines Scherbandes durch Streckung und Scherung /RÖS08, S.279/	- 21 -
Abbildung 11: Spannungs-Dehnungsdiagramm Polymerwerkstoff /MW14/	- 22 -
Abbildung 12: Querkontraktion einer Schubstanzprobe /TL14/	- 23 -
Abbildung 13: Kenngrößen im Kraft-Verlängerungsdiagramm DIN EN ISO 527-1 /BS12, S.468/	- 24 -
Abbildung 14: Geometrisches Element der Scherung /POW14/	- 25 -
Abbildung 15: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm bis Bruch (1) und Entlastung vor Bruch (2) /REIL98, S.21/	- 26 -
Abbildung 16: Zweidimensionales Element unter Schub, Links: unbelastet, Mitte: belastet, Rechts: belastet und gedreht /REIL98, S.20/	- 27 -
Abbildung 17: : Isotherme Spannungs-Dehnungskurven Polyamid /MACH11, S.537/	- 28 -
Abbildung 18: Spannungs-Dehnungsdiagramm PVC bei verschiedenen Zuggeschwindigkeiten /MACH11, S. 538/	- 28 -
Abbildung 19: Größen der schwingenden Beanspruchung /BS12, S.133/	- 29 -
Abbildung 20: Schema zur Ermittlung der Wöhler-Kurve /BS12, S.134/	- 30 -
Abbildung 21: Schwingversuch bis zum Bruch unter Variation der Spannungsamplitude /BS12, S.135/	- 31 -
Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf von Wechselverfestigung und Wechselentfestigung /BS, S.141/	- 31 -
Abbildung 23: Mechanische Hystereseschleife unter Wechsellastverhalten /BS, S.140/ ..	- 32 -
Abbildung 24: Widerstandsmessung spannungsrichtig /POW14/	- 34 -
Abbildung 25: Vierpunktversuchsaufbau zur Messung der Leitfähigkeit /KER08/	- 35 -
Abbildung 26: Ersatzschaltbild Vierleitermessung /POW14/	- 35 -
Abbildung 27: Überlappungsklebung /DIN1, S.4/	- 37 -
Abbildung 28: mehrachsiger Spannungszustand /HAB08, S. 380/	- 38 -
Abbildung 29: Prüfkörperaufbau nach DIN EN 14869-2 /DIN2, S.5/	- 39 -
Abbildung 30: Formabweichungen nach spanender Bearbeitung von Stahl /REIL98, S.79/	- 40 -
Abbildung 31: Vorrichtung zur Herstellung einer Scherzugprobe /REIL98, S.57/	- 41 -
Abbildung 32: Einspannung mittels Kardangelenk /DIN2, S.9/	- 42 -
Abbildung 33: Kardanische Gelenkkopflagerung /ALT10, S.13/	- 43 -
Abbildung 34: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren /BEI07, S.22/	- 44 -
Abbildung 35: einfach überlappende Scherprobe maßstäblich /POW14/	- 47 -

Abbildung 36: gestufte Scherprobe maßstäblich /POW14/.....	- 48 -
Abbildung 37: Absolute Verschiebung Probenaufbau: überlappend (oben), gestuft (unten) /CAT Analysis/.....	- 49 -
Abbildung 38: Vergleichsspannung nach Mises im Klebespalt: überlappend (oben), gestuft (unten) /CAT Analysis/.....	- 50 -
Abbildung 39: Variante 1 /CAT/.....	- 52 -
Abbildung 40: Variante 2 /CAT/.....	- 53 -
Abbildung 41: Variante 3 /CAT/.....	- 54 -
Abbildung 42: Variante 4 /CAT/.....	- 54 -
Abbildung 43: Stärke-Diagramm der Lösungsvarianten	- 58 -
Abbildung 44: Fertigung der Füge Teile /CAT /	- 59 -
Abbildung 45: Scherprobenaufbau nach Klebung /CAT/	- 59 -
Abbildung 46: Zusammenbau der Klebevorrichtung /CAT/.....	- 60 -
Abbildung 47: MTS Landmark 370.02 /MTS10/.....	- 61 -
Abbildung 48: Fehler beim Einspannen: Fluchtungsfehler (links), Exzentrizität (mitte), Winkelfehler (rechts) /FLE11/.....	- 62 -
Abbildung 49: Kugelgelenkkopf RBID10 /MISUMI14/.....	- 63 -
Abbildung 50: Induktiver Messwertempfänger /DIN2, S.8/	- 65 -
Abbildung 51: Versuchsaufbau Kameravergleich	- 66 -
Abbildung 52: Pixelauflösung Kameravergleich	- 67 -
Abbildung 53: Amplitudenverlauf zweier Punktmuster.....	- 68 -
Abbildung 54: Abweichung Bildkorrelation zweier Punktemuster	- 69 -
Abbildung 55: Genauigkeitsuntersuchung Bildkorrelation	- 70 -
Abbildung 56: Mikroohmmeter der Firma Isabellenhütte	- 71 -
Abbildung 57: Widerstandsmessung Prüf Widerstand 100 $\mu\Omega$	- 72 -
Abbildung 58: Relativer Fehler Widerstandsmessung.....	- 73 -
Abbildung 59: Standardabweichung thermisches Rauschen.....	- 74 -
Abbildung 60: Einspannung: einachsiger Zugversuch (links), Wechsellast (rechts)	- 75 -
Abbildung 61: Schaltungsplan LED /POW14/	- 77 -
Abbildung 62: „Triggern“ der Signale /POW14/	- 78 -
Abbildung 63: Scherzugversuchsaufbau	- 78 -
Abbildung 64: Ausmessen der Stufenhöhe	- 79 -
Abbildung 65: Klebdicke der zugeordneten Probenpaare	- 80 -
Abbildung 66: Probenherstellung in der Vorrichtung	- 81 -
Abbildung 67: Nachbearbeitung Klebespalt	- 82 -
Abbildung 68: Spannungs-Gleitungs-Diagramm	- 83 -
Abbildung 69: Kraftverlauf und elektrischer Widerstand	- 84 -
Abbildung 70: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm.....	- 86 -
Abbildung 71: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm (plastisch).....	- 86 -
Abbildung 72: Gleitung in Abhängigkeit der Zeit.....	- 87 -
Abbildung 73: Kraftverlauf und elektrischer Widerstand	- 88 -
Abbildung 74: Kraftsignal, Wegsignal MTS	- 89 -
Abbildung 75: Bewegung der Füge Teile in X- und Y-Richtung	- 90 -
Abbildung 76: Bewegung Füge Teil1 in Y-Richtung	- 91 -
Abbildung 77: Bewegung Füge Teil1 in X-Richtung	- 92 -
Abbildung 78: Bruchfläche Probe_C2	- 93 -
Abbildung 79: Bruchbild seitlich Probe_H2	- 94 -
Abbildung 80: Einfluss Fertigungsfehler der Klebefläche und Klebdicke	- 96 -

Abbildung 81: relativer Fehler durch Klebefläche und Klebdicke	- 97 -
Abbildung 82: Zyklen bis Bruch (* Versuchsabbruch).....	- 100 -
Abbildung 83: Probe_J1 Amplitudenverlauf Traverse, elektrischer Widerstand.....	- 101 -
Abbildung 84: Probe_H1 Amplitudenverlauf Traverse, elektrischer Widerstand	- 102 -
Abbildung 85: Anfangsamplituden Traverse (* Versuchsabbruch).....	- 103 -
Abbildung 86: Zyklen bis Bruch (* Adhäsionsbruch).....	- 104 -
Abbildung 87: Hystereseschleife	- 105 -
Abbildung 88: Kraftsignal, elektrisches Signal.....	- 106 -
Abbildung 89: elektrischer Widerstand unter Wechsellast	- 107 -
Abbildung 90: Verformung Leitkleber	- 108 -
Abbildung 91: Verformung Kleber Δx	- 109 -
Abbildung 92: Bruchbild frontal Probe_H3	- 110 -
Abbildung 93: Bruchbild seitlich Probe_H3	- 110 -
Abbildung 94: horizontale Auslenkung der Scherprobe.....	- 111 -
Abbildung 95: Verformungseinfluss Klebefläche und Klebdicke als systematischer Fehler.....	- 113 -
Abbildung 96: Modell Ermüdungsversuch (LCF).....	- 114 -

Tabelle 1: Anforderungsliste "Vorrichtung Leitkleber"	- 45 -
Tabelle 2: Teilfunktionen der Gesamtlösung	- 46 -
Tabelle 3: Parameter FEM-Analyse	- 49 -
Tabelle 4: Matrix zur Variantenaufstellung ("Morphologischer Kasten")	- 51 -
Tabelle 5: Bewertungsvorschrift nach VDI 2225-1	- 55 -
Tabelle 6: Bewertungskriterien.....	- 55 -
Tabelle 7: Paarweisevergleich zur Wichtung der Vergleichsmerkmale.....	- 56 -
Tabelle 8: Vorzugsvarianten mit Bewertung	- 56 -
Tabelle 9: Kenngrößen im Zugversuch	- 64 -
Tabelle 10: Messergebnisse Scherzugversuch	- 88 -
Tabelle 11: Messergebnisse Scherzugversuch normiert und weitere Einflussgrößen	- 95 -
Tabelle 12: Experimentelle Ermittlung Klebdicke	- 98 -
Tabelle 13: Messergebnisse	- 105 -
Tabelle 14: Messergebnisse zyklischer Ermüdungsversuch	- 112 -

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Scherfläche	mm
a	Kantenlänge Quader (Fügeteil)	mm
A_t	Berührungsfläche	mm ²
b	Breite Quader (Fügeteil)	mm
c_T	Traversensteifigkeit	MPa
b	Klebdicke	mm
d_0	Dicke Zugprobe	mm
d_k	Klebdicke korrigiert	mm
c	Ermüdungsfaktor	-
E	Elastizitätsmodul	MPa
e	Exzentrizität	mm
F	Kraft	N
f	Schwingungsfrequenz	Hz
F_b	Bruchkraft	N
F_{ext}	Exzentrisch angreifende Zugkraft	N
$F_{p0,2}$	Kraft bei 0,2% plastischer Dehnung	N
G	Schubmodul	MPa
G_{el}	Elastischer Schubmodul	MPa
H	Fügeteilhöhe	mm
h	Stufenhöhe Fügeteil	mm
I	Elektrischer Strom	A
I_{ges}	Eingprägter elektrischer Strom	A
I_p	Elektrischer Strom Probe	A
I_V	Elektrischer Strom Voltmeter	A
K	Herstellkosten	€
l	Bauteillänge elektrischer Leiter	mm
l_0	Ausgangslänge Zugprobe	mm
M_b	Biegemoment	Nm
N_b	Zahl der Zyklen bis zum Bruch	-
P_i	Bewertungspunktzahl	-

PosX1	Horizontale Auslenkung Scherprobe	mm
R_{σ}	Spannungsverhältnis	-
R	Elektrischer Widerstand	Ω
R_{Ag}	Elektr. Widerstand Füllstoff (Silber)	Ω
R_c	Kontaktwiderstand	Ω
R_{cr}	Engwiderstand (engl.:constriction resistance)	Ω
R_m	maximale Zugfestigkeit	MPa
R_p	Elektrischer Widerstand Probe	Ω
R_{part}	Elektr. Widerstand Partikelverknüpfung	Ω
$R_{p0,2}$	Festigkeit bei 0,2% Dehnung	MPa
R_t	Fremdschichtwiderstand (engl.:Tunneling resistance)	Ω
R_v	Elektrischer Innenwiderstand Voltmeter	Ω
s_0	Probenquerschnitt	mm ²
s_t	Fremdschichtdicke	mm
t	Zeit	s
T	Periodendauer	s
U	Elektrische Spannung	V
V_i	Variante	-
W_b	Axiales Widerstandsmoment	mm ³
W_i	Wichtung	-
W_T	Technische Wertung	-
W_{Tn}	Normierte Technische Wertung	-
W_W	Wirtschaftliche Wertung	-
W_{Wn}	Normierte Wirtschaftliche Wertung	-
γ	Scherwinkel	°
$\dot{\gamma}$	Gleitgeschwindigkeit	s ⁻¹
γ_b	Bruchgleitung	%
Δd	Dickenänderung Zugprobe	mm
Δl	Längenänderung Zugprobe	mm
Δl_T	Längenänderung Traverse	mm
Δt	Zeitliche Differenz	s
Δx	Verformung Scherprobe	mm
ΔT_{pl}	Spannungsamplitude plastischer Dehnung	MPa
ε	Dehnung	%

ε_b	Bruchdehnung	%
ε_m	Dehnung bei maximaler Zugfestigkeit	%
ϑ	Temperatur	°C
κ	Elektrische Leitfähigkeit	S/m
ρ_{spez}	Spezifischer elektrischer Widerstand	Ωm
σ	Spannung	N/mm ²
σ_b	Bruchspannung	MPa
σ_o	Oberspannung	N/mm ²
σ_u	Unterspannung	N/mm ²
σ_v	Normalspannung	N/mm ²
τ	Schubspannung	MPa
τ_m	maximale Scherfestigkeit	MPa
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹

Abkürzungen	Bedeutung
CSP	Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EVA	Ethylenvinylacetat
F	Forderung an die Konstruktion
ISO	Lichtempfindlichkeit Bildsensor
LCF	Low Cycle Fatigue (niedrigzyklisch)
PET	Polyethylenterephthalat
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
PVC	Polyvinylchlorid
TEM	Transmissionen-Elektronenmikroskopie
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolettstrahlung
W	Wunsch an die Konstruktion

1 Einleitung

Die Erfindung der Umwandlung von Sonnenenergie in elektrischen Strom zählt zu den wichtigsten und nachhaltigsten Nutzenwendungen des zwanzigsten Jahrhunderts. Der Begriff der Photovoltaik ist eine Zusammensetzung aus dem griechischen Wort „photos“, dem Licht, und dem Namen des italienischen Physikers Alessandro Volta. Dieser erfand Ende des achtzehnten Jahrhunderts die erste funktionstüchtige elektrochemische Batterie. Die Einheit Volt der elektrischen Spannung wurde nach ihm benannt. „Eine Übersetzung des Wortes Photovoltaik könnte daher heißen Lichtbatterie oder auch Lichtenergiequelle“ /MER13, S.29/. Heutzutage ist die Photovoltaik-Industrie eine der am schnellsten wachsenden Energietechnologien und wird zukünftig eine Hauptquelle der Stromerzeugung sein /PVM13/. Die überproportionalen Wachstumsraten der deutschen Photovoltaikbranche in vergangenen Jahren sind vorrangig auf das staatlich geförderte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zurückzuführen, welches die Abnahme und Vergütung von aus erneuerbaren Energien gewonnenen Strom reguliert /OEK14/. Aus diesem Grund hat sich die Photovoltaik in den letzten Jahren von einem Nischen- zu einem Massenprodukt entwickelt.

Strombereitstellung in Milliarden Kilowattstunden

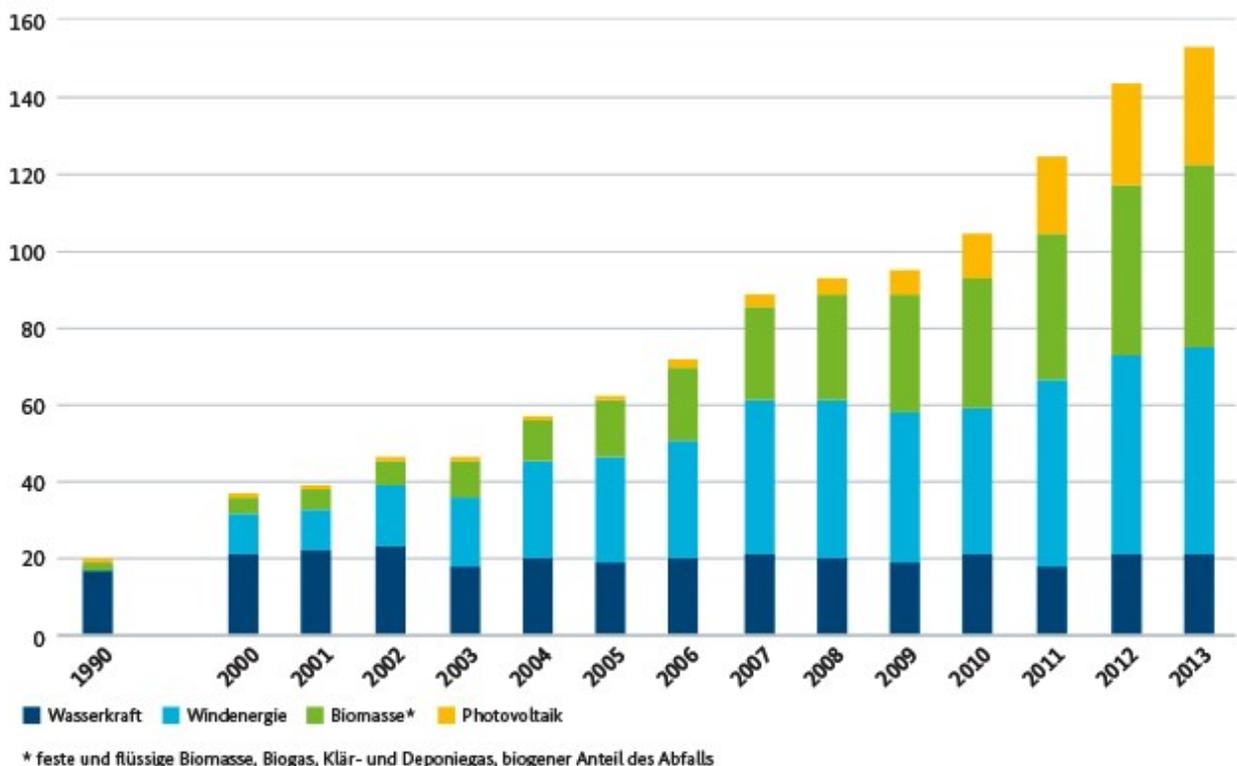


Abbildung 1: Entwicklung der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien /BMW14/

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung erneuerbarer Energieerzeugung vergangener Jahre. Im Vergleich zu anderen alternativen Energien hat die Solarbranche zuletzt ein stetiges Wachstum vorzuweisen. Insbesondere seit dem Jahr 2010 stiegen die

Investitionen in erneuerbare Energien um etwa 30 Prozent gegenüber dem Vorjahr und erreichten damit einen neuen Höchststand. Diese Investitionen machen den Solarstrom zunehmend konkurrenzfähig und tragen zur angestrebten Netzparität bei, das heißt gleiches Preisniveau für Solarstrom und Strom aus fossilen Energieträgern. Bei moderaten Wachstumsraten der Photovoltaik-Industrie könnten im Jahr 2020 bereits 15 Millionen deutsche Haushalte mit Solarstrom versorgt werden.

2 Motivation und Aufgabenstellung

Um die Photovoltaik auch gegenüber anderen Methoden der Energiegewinnung wirtschaftlicher und konkurrenzfähiger zu machen, erfordert diese Technologie ein hohes Maß an Forschung in der Optimierung der Materialkomponenten und den damit zusammenhängenden Herstellungsprozessen. Abbildung 2 zeigt ein typisches Siliziumphotovoltaikmodul im Schnitt. Mehrere Schichten bilden eine sogenannte Sandwich-Struktur. Hierbei werden neben der stromproduzierenden Schicht aus den einzelnen Solarzellen weitere Schichten für Stabilität und Schutz gegen Umwelteinflüsse miteinander gefügt. Die Modulvorderseite ist eine thermisch vorgespannte Glasscheibe aus eisenoxidarmen Weißglas, welche nicht nur die Stabilität gewährleistet, sondern vor allem ein Großteil des Lichtes transmittiert. Darunter liegt, in einem Verkapselungsmaterial Ethylenvinylacetat (EVA) eingebettet, die stromproduzierende Schicht der Solarzellen.

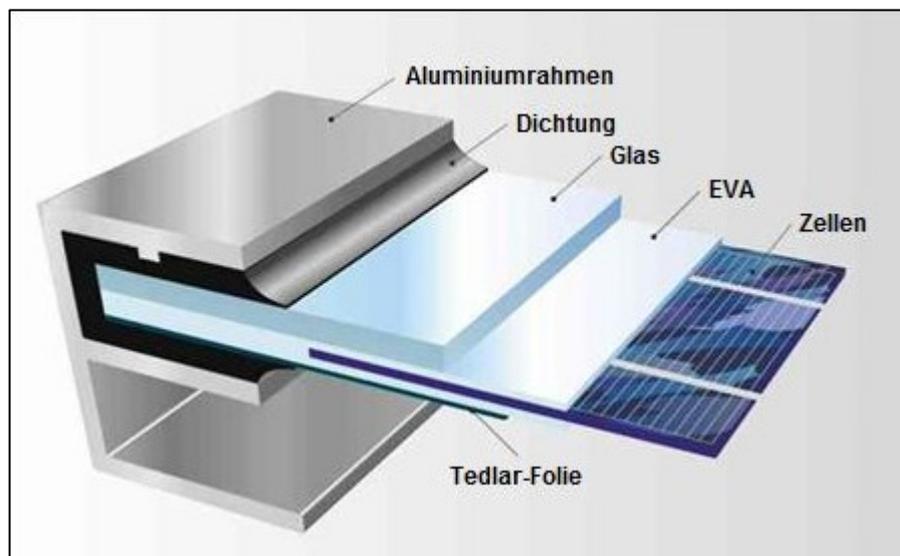


Abbildung 2: Aufbau eines Solarmoduls /QUA08/

Standardmodule mit monokristallinen Solarzellen erreichen in der Praxis einen Wirkungsgrad von bis zu 20 %. Mit der Weiterentwicklung der Technologie verzeichnete der Hersteller Sanyo Panasonic einen Rekordwirkungsgrad von über 25 %. Nach

dem Laminieren bei ca. 150 °C sind die Zellen wasserdicht und elektrisch isoliert. Den Modulabschluss bilden ein Folienverbund aus Polyvinylfluorid (Tedlar) und Polyethylenterephthalat (PET), der sehr witterungs- und UV-beständig ist. In der Regel bringt der Aluminiumrahmen zusätzliche Stabilität und Montagemöglichkeiten. Die Abbildung 3 zeigt ein Standardsolarmodul mit 60 Zellen und drei Busbarzellen.



Abbildung 3: Verschaltung eines Standardsolarmoduls der Firma Q CELLS /QC14/

Um die Ausgangsspannung eines Moduls zu erhöhen, werden die einzelnen Zellen in Reihe miteinander kontaktiert /WES09/. Bei der elektrischen Verschaltung der einzelnen Solarzellen handelt es sich um einen der aufwendigsten und teuersten Prozessschritte bei der Solarmodulproduktion, da der konventionelle Verschaltungsprozess einen geringen Automatisierungsgrad besitzt. Dieser Verschaltungsprozess erfolgt bei den kristallinen Solarzellmodulen in zwei Arbeitsgängen. Hierfür wird zunächst der metallisierte Frontseitensammel-Kontakt mit einem Zellverbinder stoffschlüssig verbunden. Anschließend wird dieser Zellverbinder mit dem Rückseitenkontakt der folgenden Zelle verschaltet. Die in der Photovoltaik verwendeten Zellverbinder bestehen in der Regel aus einem rechteckigen Kupferkern mit einer umgebenden Lotschicht. In der Vergangenheit zeigte sich, dass die Solarzellenverbinder mit zu den anfälligsten Komponenten des Solarmoduls gehören und häufig in Folge von Materialermüdung versagen. Momentan setzen Photovoltaik-Hersteller im Lötprozess zur Verschaltung der Solarzellen innerhalb der Photovoltaikmodule toxische und umweltschädliche Stoffe ein, wie beispielsweise das Schwermetall Blei in handelsüblichen Lötverbindungen. Im Jahr 2003 verabschiedete das europäische Parlament neue Umweltrichtlinien „zur Beschränkung der Verwendung bestimmter

gefährlicher Stoffe in Elektrogeräten“ /EG02, S.19/. Bezogen auf die Solartechnologie gibt es noch eine befristete Ausnahmeregelung, da sich die Europäische Union eine Anpassung des Geltungsbereiches an den technischen und wissenschaftlichen Fortschritt vorbehalten hat.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz beziehungsweise den Ertrag elektrischer Energie hat die Güte dieser Verschaltung. Aus technischer Sicht und im Rahmen der Modultechnologie und Modulzuverlässigkeit ist die Optimierung des Lötprozesses und die Entwicklung alternativer Verbindungsmöglichkeiten ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. Während des Lötprozesses entstehen thermomechanische Spannungen, bedingt durch die unterschiedliche thermische Ausdehnung der verschiedenen Werkstoffe. Durch die Einbettung der Komponenten während der Lamination werden weitere innere Spannungen erzeugt. Im Betrieb entstehen auf ähnliche Weise Belastungen in Folge von Temperaturschwankungen im Tag-Nacht-Zyklus. Diese inneren Spannungen können durch äußere Belastungen, wie Wind- oder Schneelasten überlagert werden, was zu Zellbruch und damit Leistungsverlust führen kann.

Eine Alternative zu den Lotkontakten stellen die Leitklebstoffverbindungen dar. Im Wesentlichen besteht der Leitkleber aus einer Polymermatrix angereichert mit Füllstoffpartikeln, die für die elektrische Leitfähigkeit sorgen (Abbildung 4).

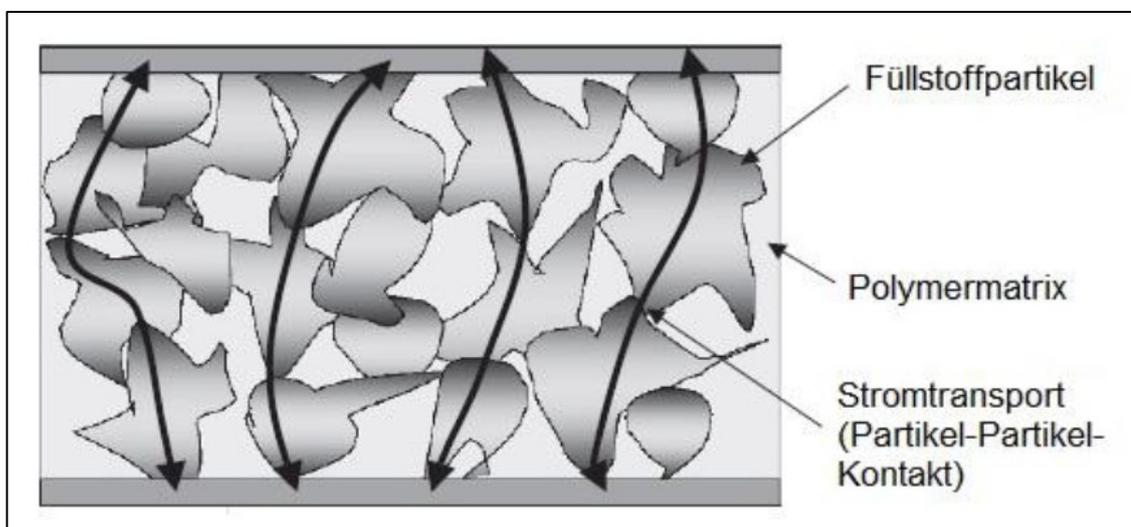


Abbildung 4: Zusammensetzung Leitkleber /WON10, S.122/

Bisher sind industrielle Leitklebstoffe bezüglich ihres Verhaltens bei mechanischer Beanspruchung unzureichend charakterisiert, vor allem die in der Praxis relevante Langzeitzuverlässigkeit. Die Eigenschaft der elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit mechanischer Spannungen sowie Verformungen sind ein wichtiger Gegenstand aktueller Forschungen. Für Versuchszwecke steht der Leitklebstoff Elecolit 3653 der Firma Panacol zur Verfügung.

Ziel dieser Masterarbeit ist die Konzeptfindung und Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahrens zur Bestimmung der mechanischen sowie elektrischen Eigenschaften eines Leitklebstoffes im Ermüdungsversuch. Grundlegend zur Konzeptfindung ist die Konstruktion eines geeigneten Probenkörpers und einer Vorrichtung zur reproduzierbaren Herstellung der Klebungen. Die gefertigten Proben sind in einem Versuchsaufbau unter der Einwirkung einer periodisch wiederholenden Beanspruchung bis zum Materialversagen zu testen und in einem Modell aufzustellen. Unter Beachtung der Funktionalität und Durchführung sind die dem Prüfverfahren wesentlichen Einflussgrößen beziehungsweise Abhängigkeiten zu erfassen und einzuschätzen. Für die Proben ist der Versagensmechanismus im Versuchsaufbau zu identifizieren. Ergebnisse und Auswertungen sind mit mikroskopischen Untersuchungen zu vergleichen. Der Schwerpunkt der folgenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines funktionierenden Prüfverfahrens samt Komponenten und der Korrelation zwischen der mechanischen Größe der Scherfestigkeit und der elektrischen Größe, dem Leitungswiderstand.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Werkstofftechnik des Leitklebers

Elektrisch leitfähige Klebstoffe bestehen im Wesentlichen aus zwei Werkstoffgruppen, dem Polymerwerkstoff und einem metallischen Füllstoffpartikel. In diesem Fall handelt es sich um einen Kleber auf Epoxidharzbasis, dessen elektrische Leitfähigkeit auf der statistischen Verteilung der Silber-Flakes in der organischen Matrix beruht. Unterschieden werden Leitkleber nach ihrem metallischen Füllstoffgehalt, da dieser die elektrischen Größen festlegt. So leiten isotrope Klebstoffe durch den direkten Partikel-Kontakt innerhalb der Klebeschicht den elektrischen Strom zwischen den gefügten Kontaktflächen /HAB08, S.154/. Der hohe Füllstoffanteil von bis zu 30% des Gesamtvolumens, der 80% des gesamten Gewichts darstellt, ermöglicht die elektrische Leitung in alle Raumrichtungen. Die Abbildung 5 zeigt eine Aufnahme mit dem Transmissionen-Elektronenmikroskop.

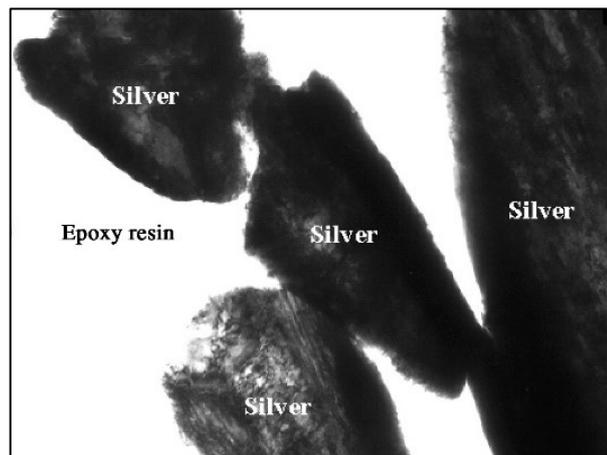


Abbildung 5: TEM-Bild eines Leitklebers /WON10, S.106/

Beträgt der Anteil der Partikel-Flakes wenige Volumenprozent, so wird der elektrische Stromfluss ausschließlich in vertikaler Richtung zwischen den geklebten Bauteilen aufrechterhalten. Man spricht vom anisotropen Leitklebstoff. Da sich die Füllstoffpartikel zu weit auseinander befinden und kein direkter Kontakt besteht, wird durch den Einfluss von Wärme beim Aushärtvorgang und Druck zur Deformation der Partikel die eigentliche elektrische Verbindung hergestellt. Betrachtet man den Fluss des Stromes im Werkstoffverbund, so durchläuft dieser eine Reihe von elektrischen Widerständen, die zu unterscheiden sind. Wie in der Abbildung 6 zu sehen, setzt sich der Widerstand einer einzelnen Partikelverknüpfung R_P aus dem elektrischen Widerstand des Silbers R_{Ag} und dem Kontaktwiderstand R_C zusammen. Der Kontaktwider-

stand einer Berührungsfläche setzt sich aus dem sogenannten Engewiderstand R_{cr} und dem Fremdschichtwiderstand R_t zusammen.

$$R_{part} = 2 * R_{Ag} + R_{cr} + R_t$$

Die Einengung des Strompfades auf Grund von mikroskopischen Unebenheiten an den Berührungsflächen der einzelnen Partikel hat den sogenannten Engewiderstand zur Folge. Der Fremdschichtwiderstand beschreibt die Bildung einer Isolationsschicht an der Partikeloberfläche, zum Beispiel durch Korrosion (Oxidation). In der Summe der Widerstände stellt dieser den größten Anteil dar, da Fremdschichtdicke s_t und Berührungsfläche A_t die Leitfähigkeit beeinflussen.

$$R_t = \frac{\rho_t * s_t}{A_t}$$

Abbildung 6 veranschaulicht die Veränderung der einzelnen Lastwiderstände. Mit der Einwirkung einer äußeren Kraft reduziert sich der Partikelwiderstand (Kontaktwiderstand). Abstände, Flächen beziehungsweise die Anzahl der anliegenden Partikel entscheiden über die Qualität der elektrisch leitfähigen Klebung. Dieser Mechanismus ist bekannt aus dem Härtingsprozess. In Folge des Vernetzungsschrumpfes der Polymermatrix werden die Partikel auf ein kleineres Volumen gezwungen und verbessern ihre Kontaktbedingungen.

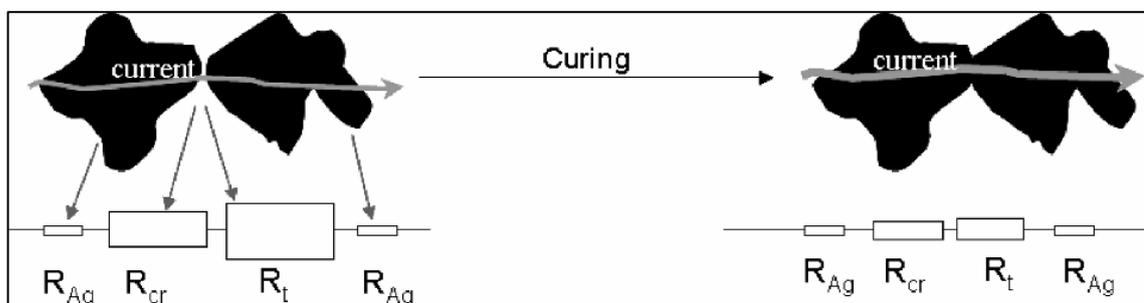


Abbildung 6: Elektrischer Widerstand einer Partikelverknüpfung /WON10, S.175/

Die mechanischen Eigenschaften des Leitklebers werden bestimmt durch den Polymerwerkstoff und der Güte seiner Vernetzung nach dem Aushärteprozess. Auf Grund des hohen Vernetzungsgrades und den kurzen Quervernetzungen eignet sich die Polymergruppe der Duomere für den Einsatz als Matrixmaterial.

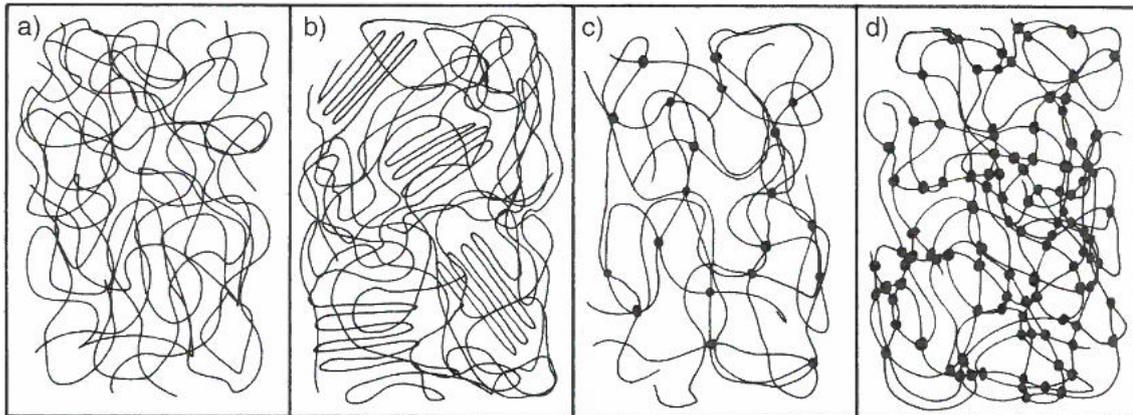


Abbildung 7: Vernetzung von Polymerwerkstoffen: Amorpher Thermoplast (a), teilkristalliner Thermoplast (b), Elastomer (c), Duroplast (d) /MACH11, S.526/

Die Abbildung 7 zeigt die Erscheinungsformen verschiedener Polymerwerkstoffe schematisch. Im Gegensatz zu den Duroplasten zeichnen sich die Elastomere und vor allem die Thermoplasten durch eine lineare oder wenig verzweigte Molekülstruktur aus. Mit dieser Anordnung und der damit zusammenhängenden niedrigen Glas-temperatur lassen sich solche Kunststoffe durch Erwärmung erweichen und verformen. Das vorliegende Duroplast ist ein Epoxidharz, welches sich durch hohe Alterungsbeständigkeit auszeichnet, sehr guten Adhäsionseigenschaften und guten mechanischen Festigkeiten. Die Aushärtung erfolgt bei diesem Ein-Komponenten-Kleber durch die Zuführung von Aktivierungsenergie in Form von Wärme. Dabei durchlaufen die Duromere chemische Reaktionen, sodass sich aus den linearen Molekülketten ein dreidimensional hoch vernetztes stabiles Polymer bildet. Es entsteht ein dreidimensionales Netzwerk aus Primärbindungen und Sekundärbindungen. In der Abbildung 8 ist der chemische Aufbau einer Molekülkette dargestellt.

Die Hauptvalenzbindungen (primär) sind die Elektronenpaarbindungen zwischen den C-Atomen, die sich zu einem wahrscheinlichen Zustand eines Knäuelmoleküls anordnen. Die schwächeren Sekundärbindungen oder Nebervalenzbindungen sind die Kräfte und Energien zwischen den Fadenmolekülen /WEIß11, S. 251/. Die unterschiedlichen Eigenschaften zwischen den Polymeren, wie Dichte, mechanische Eigenschaften oder das Verhalten bei Erwärmung lassen sich anhand der Strukturordnung der Ketten erklären. Die Abbildung 9 zeigt das Verhalten einer Polymermatrix im Augenblick einer Zugverformung. Charakteristisch für amorphe Polymerwerkstoffe sind sogenannte Fließzonen (Crazes), die sich bereits unter kleinen Beanspruchungen ausbilden. Man versteht darunter lokal begrenzte Deformationserscheinungen, wobei sich örtlich polymere Kettenstränge parallel zur Zugrichtung orientieren (b).

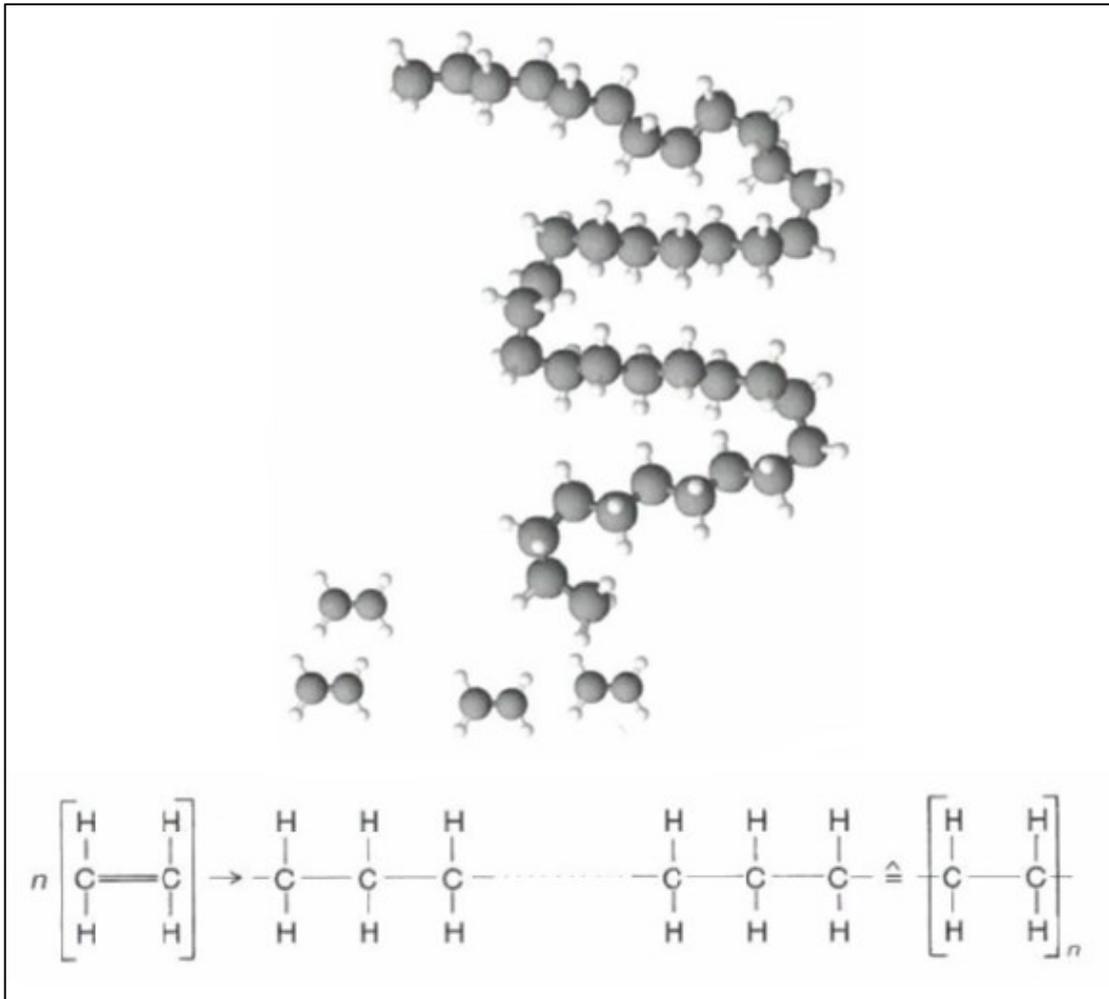


Abbildung 8: Chemischer Aufbau einer Polymerverbindung /MACH11, S.518/

Die Dichteverminderung gegenüber der übrigen Matrix (a) beträgt in dieser Zone bis zu 60%. Mit wachsender Beanspruchung weitet sich die Fließzone auf und es entstehen Risse (c). Das Polymer verformt sich plastisch, wobei einzelne Kettenmoleküle über größere Strecken aneinander abgleiten. Dieser Effekt ist besonders bei Thermoplasten ausgeprägt. Elastomere und Duromere verformen sich plastisch deutlich geringer, da die Nebervalenzverbindungen zwischen den Ketten ein Abgleiten verhindern. Es zeigt sich das spröde Verhalten, da die kovalenten Bindungen zwischen den Molekülketten aufgebrochen werden müssen.

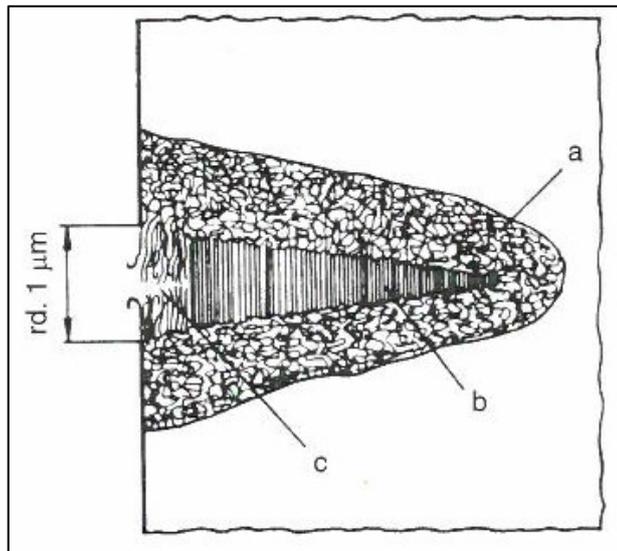


Abbildung 9: Schematisches Bild einer Fließzone /MACH11, S.539/

Ein Polymer kann sich durch die Bildung von Scherbändern verformen. Unter einem Winkel von 45° bis 60° zur Belastungsrichtung treten lokalisierte große plastische Verformungen zwischen den Scherbändern auf. Dabei reagieren Molekülketten je nach Orientierung durch Streckung oder die Bildung zweier Knicke auf eine Scherbeanspruchung, sodass ein Bereich geordneter Molekülketten entsteht. Laufen mehrere Scherbänder zusammen, kann ein Riss initiiert werden (Abbildung 10).

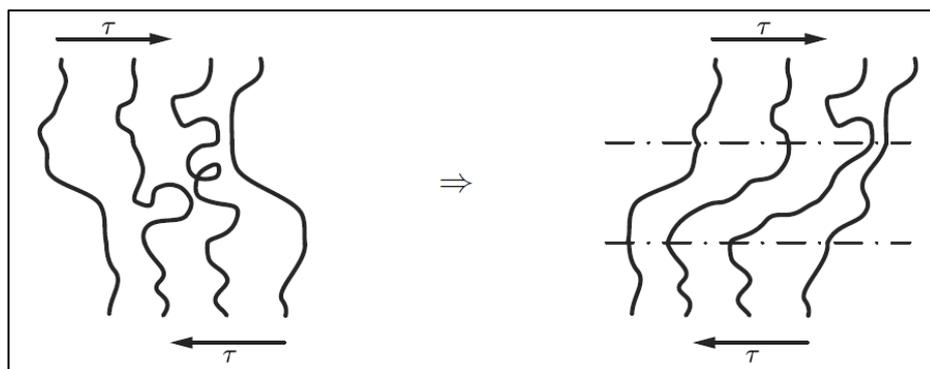


Abbildung 10: Entstehung eines Scherbandes durch Streckung und Scherung /RÖS08, S.279/

3.2 Mechanische Charakterisierung

Der Probenkörper, zusammengesetzt aus zwei geklebten Fügeteilen, soll mit mechanischen Prüfverfahren untersucht werden. Die charakteristischen Eigenschaften der Festigkeit und Verformbarkeit lassen sich im einachsigen quasistatischen Zugversuch bestimmen. Die Ermüdungseigenschaften werden unter Wechsellast experimentell ermittelt.

3.2.1 Zugversuch und Scherzugversuch

Im Zugversuch entsteht eine über dem Querschnitt einer Schubstanzprobe eine gleichmäßig verteilte Zugbeanspruchung, die mit kontinuierlich ansteigender Zugkraft und Längenänderung in axialer Richtung als Kraft-Verlängerungs-Kurve aufgenommen wird. Für einen quantitativen Werkstoffvergleich werden die Zugkraft F auf den Anfangsquerschnitt S_0 und die Verlängerung Δl auf die unbelastete Anfangslänge l_0 der Probe bezogen.

Die auf die Ausgangsgeometrie normierte Spannungs-Dehnungs-Kurve gibt grundlegende Informationen über das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Werkstoffen. Am Beispiel eines einachsigen Zugversuches sind die wichtigsten Größen in Abbildung 11 erklärt.

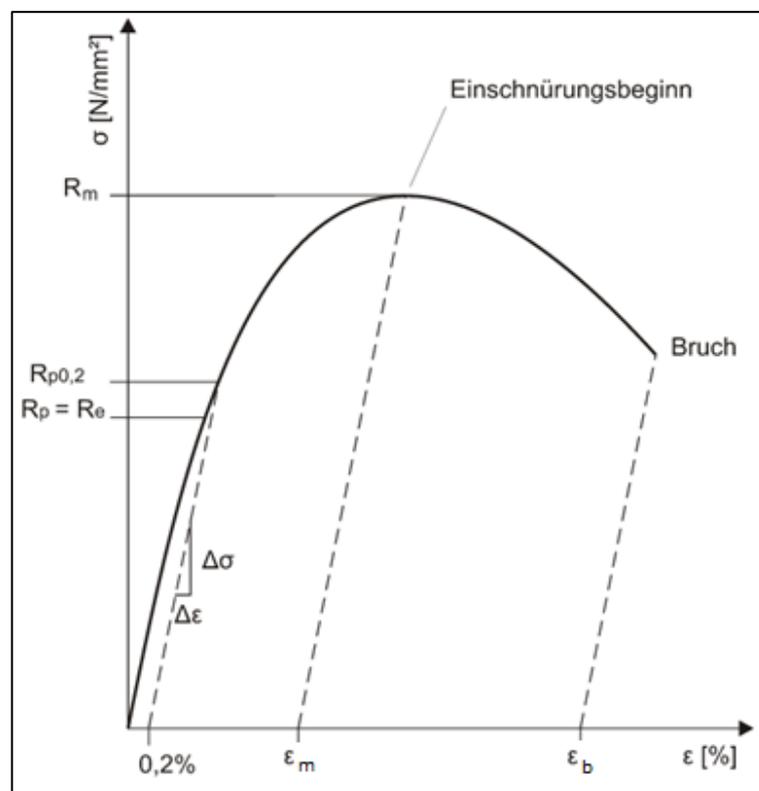


Abbildung 11: Spannungs-Dehnungsdiagramm Polymerwerkstoff /MW14/

- R_m maximale Zugfestigkeit
- $R_{p0,2}$ Festigkeit bei 0,2% plastischer Dehnung
- ε_b Bruchdehnung
- ε_m Dehnung maximale Zugfestigkeit

Der Anstieg der meisten Werkstoffe verläuft zunächst linear und zeigt das Stadium der elastischen Verformung. Die Beschreibung erfolgt durch das Hookesche Gesetz mit dem Elastizitätsmodul E als Proportionalitätsfaktor. Die mechanische Spannung σ ergibt sich aus Kraft F pro Fläche s_0 und die Dehnung ε aus Längenänderung Δl pro Ausgangslänge l_0 . Die Querkontraktion ν ist eine dimensionslose Größe und beschreibt die Verringerung der Querschnittsfläche senkrecht zur Krafrichtung, denn die relative Abnahme des Durchmessers $\Delta d/d_0$ ist proportional der relativen Längsdehnung $\Delta l/l_0$ unter konstantem Volumen (Abbildung 12).

Hauptspannung	$\sigma = \frac{F}{s_0}$
Hookesches Gesetz	$\sigma = \varepsilon * E$
Dehnung	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$
Querkontraktion	$\frac{\Delta l}{l_0} = -\nu * \frac{\Delta d}{d_0}$

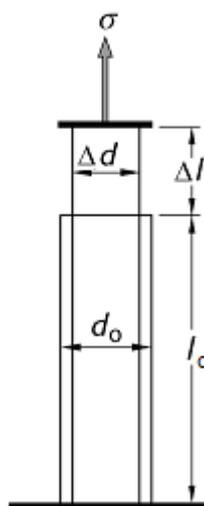


Abbildung 12: Querkontraktion einer Schubstanzprobe /TL14/

Je nach Werkstoffeigenschaft unterscheidet sich der Kurvenverlauf bis zum Bruch. So verhält sich ein Polymerwerkstoff, insbesondere die Thermoplaste, auf Grund

seines viskoelastischen Anteils kontinuierlich oder diskontinuierlich im Übergang zum plastischen Bereich. Nach Erreichen des Spannungsmaximums kommt es zum Zähbruch. Für Polymerstoffe gelten die Bestimmungen der Zugeigenschaften von Kunststoffen nach DIN ISO 527-1.

Die Abbildung 13 zeigt das Ergebnis zweier Kraft-Verlängerungskurven unterschiedlicher Kunststoffproben unter verschiedenen Prüfbedingungen. Die zu den Spannungsgrößen zugehörigen Verformungen tragen dieselben Indexe der nicht normierten Kenngrößen. Die Zugfestigkeit σ_M ist die maximale Spannung, die der Prüfkörper beim Zugversuch erreicht. Die Zugspannung beim Bruch des Prüfkörpers ist die Bruchspannung σ_B . Die Streckspannungen σ_M und σ_S sind die Zugspannungen, bei der im Kraft-Verlängerungsdiagramm die Steigung der Kurve erstmalig gleich Null wird durch das Auftreten des Verstreckens.

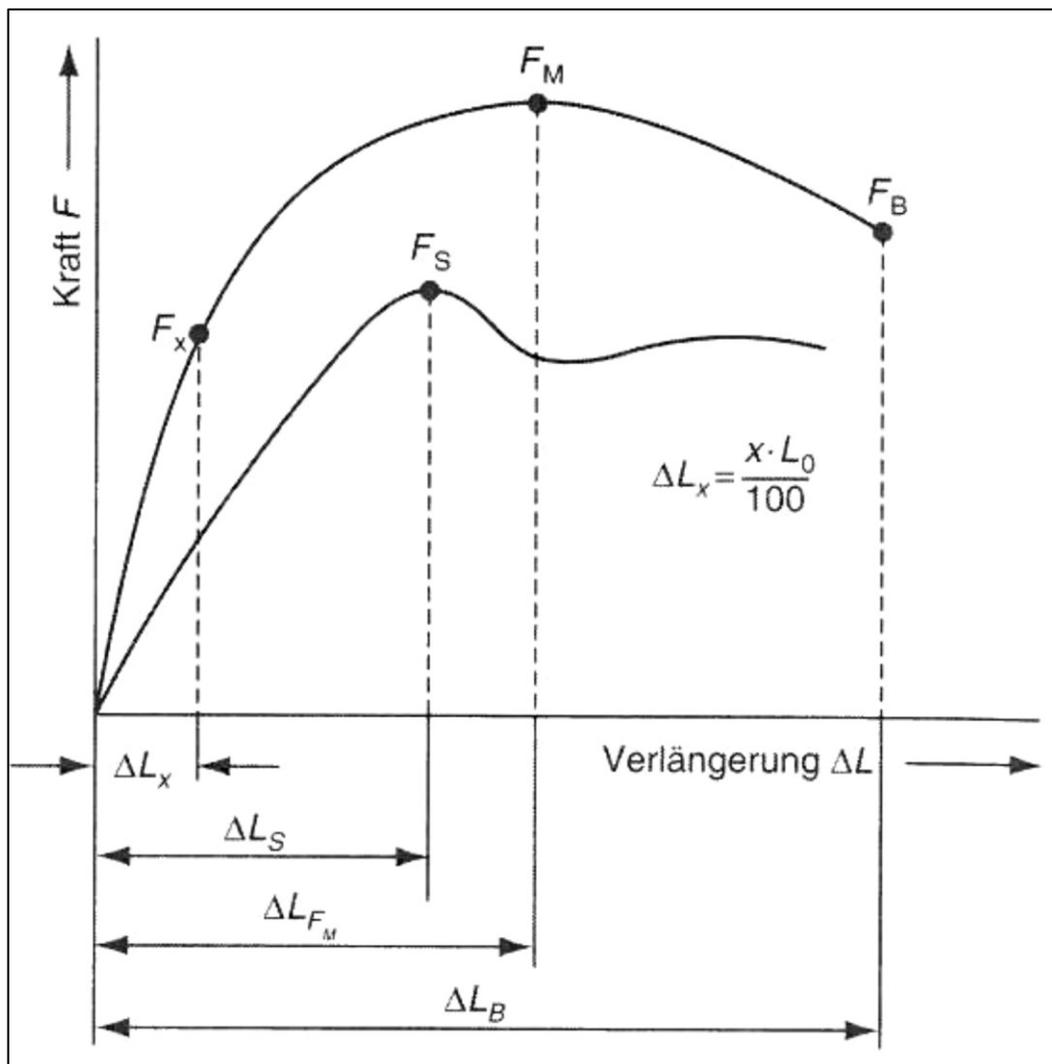


Abbildung 13: Kenngrößen im Kraft-Verlängerungsdiagramm DIN EN ISO 527-1 /BS12, S.468/

Analog dem einachsigen Zugversuch können die Kenngrößen auch dem Scherverversuch zugeordnet werden. Dabei entsteht die Verformung beziehungsweise Scherung des Körpers unter Einwirkung einer Kraft tangential zur Querschnittsfläche. Damit entspricht die Verformung des Körpers dem geometrischen Element der Abbildung 14. Es ergibt sich die Schubspannung oder Scherspannung τ aus dem Verhältnis der angreifenden Kraft F und der Fläche A /REIL98, S.19/.

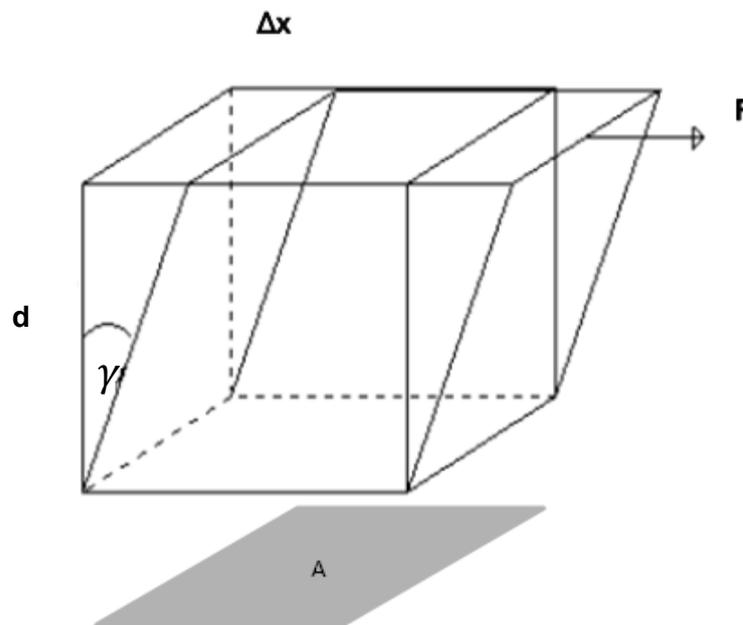


Abbildung 14: Geometrisches Element der Scherung /POW14/

Das Proportionalitätsgesetz gilt durch die Entstehung des Scherwinkels γ und der Einführung des Schubmoduls G . Der Scherwinkel wird bestimmt durch die entstandene Trigonometrie aus Längenänderung Δx und Höhe d in Folge der Schubverformung. Mit der Annahme eines ideal isotropen Materials steht der Schubmodul mit dem Elastizitätsmodul und der Querkontraktionszahl in einer Beziehung. Aus dem Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm (Abbildung 15) können die Schubfestigkeit $\tau_{\max} = \tau_m$, die Bruchspannung $\tau_{\text{Bruch}} = \tau_b$ und die zugehörigen Gleitungen γ abgelesen werden. Der Schubmodul G kann entweder als Sekante zwischen zwei definierten Punkten oder als Tangente beginnend im Ursprung bestimmt werden. Belastungsmodul (1) und Entladungsmodul (2) sind zu unterscheiden. Auf Grund des stark zeitabhängigen Verhaltens von Kunststoffen ist die Bestimmung des Elastizitätsmoduls nur im Bereich sehr kleiner Verformungen unter konstanten Verformungsgeschwindigkeiten möglich. Die Norm empfiehlt zur Berechnung die Dehnungen zwischen $\gamma_1 = 0,05\%$ und $\gamma_2 = 0,25\%$ und die dazugehörigen Spannungen.

Schubspannung $\tau = G * \tan \gamma = \frac{F}{A}$

Gleitung $\tan \gamma = \frac{\Delta x}{d}$

Schubmodul $G = \frac{E}{2*(1+\nu)}$

$G = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - \gamma_1}$

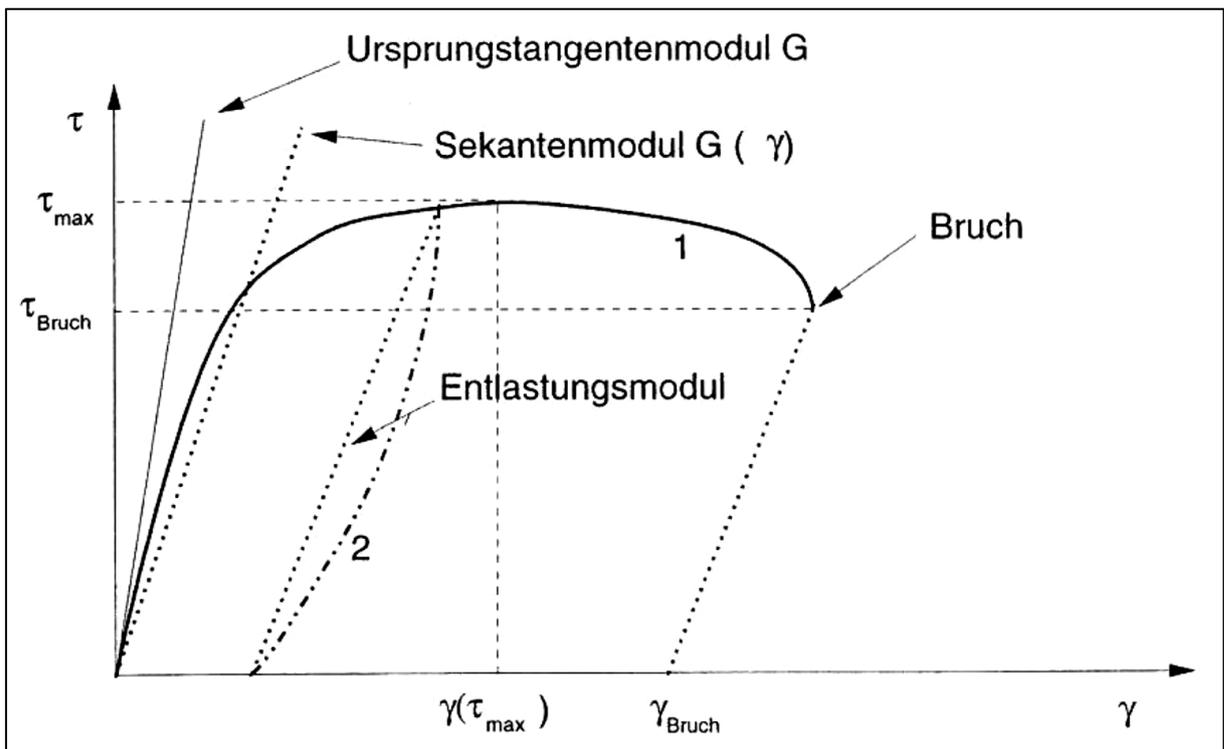


Abbildung 15: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm bis Bruch (1) und Entlastung vor Bruch (2)
/REIL98, S.21/

Diese Definition der Gleitung ist eine idealisierte Vereinfachung der realen Verhältnisse in einem auf Schub beanspruchten Element. Bei exakter Betrachtung verformt sich ein ebenes Element unter Schub in zwei Achsen zu einem Parallelogramm mit gleichen Seitenlängen. Die Abbildung 16 zeigt, dass sich das durch eine tangential angreifende Kraft belastete Element in beide Achsrichtungen verformt. Im letzten Abschnitt der Bilderreihe ist zu erkennen, dass die Klebschichtdicke während des Versuches kleiner werden muss oder dass durch die starre Position der gescherten Füge-teile eine Verformungsbehinderung entsteht und Spannungen aufgebaut werden /REIL98, S.20/. In allen Auswertungen wird daher eine Nenngleitung berechnet, die die Dickenabnahme vernachlässigt.

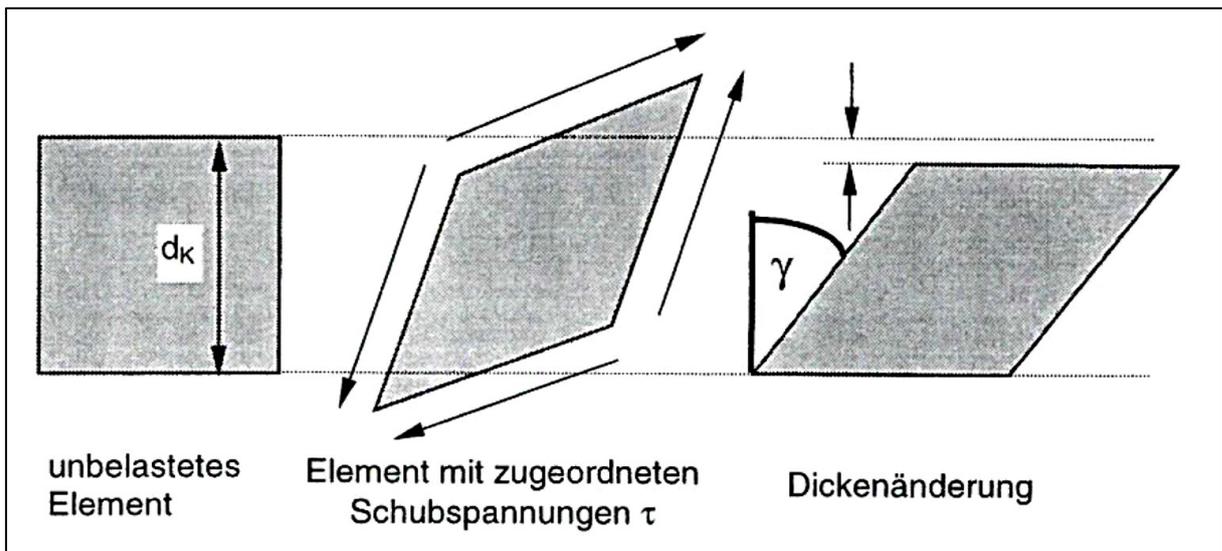


Abbildung 16: Zweidimensionales Element unter Schub, Links: unbelastet, Mitte: belastet, Rechts: belastet und gedreht /REIL98, S.20/

Wie bereits in Abbildung 13 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Verläufe der Kurven, da sie unter verschiedenen Bedingungen erfasst wurden. Die in Erscheinung tretenden Abhängigkeiten von der Prüfgeschwindigkeit und der Prüftemperatur sind sorgfältig zu beachten. In Abbildung 17 ist exemplarisch das stark veränderte Verhalten eines Kunststoffes unter dem Einfluss der Temperatur dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich mit Zunahme der Temperatur die Dehnfähigkeit steigert, aber die Zugfestigkeit abnimmt. Grund dafür ist der Einfluss der Temperatur auf die Werkstoffeigenschaft von Polymerstoffen, denn die Viskoelastizität ist eine Kombination aus zeitgleich auftretenden reversiblen und irreversiblen Prozessen /MACH11 S.85/. Der elastische Anteil ist dabei reversibel und der viskose Anteil irreversibel. Zu unterscheiden ist die Entropieelastizität als reversible Verformung, die das Bestreben der Makromoleküle zum Ausdruck bringt, in den entropisch günstigeren Zustand zurückzukehren. Kann das Abgleiten der Molekülketten durch die Vernetzung beim Ausrichten in einem Spannungsfeld verhindert werden, streben die Makromoleküle bei Entlastung den Knäuelzustand an. Mit Annäherung an die Glasstemperatur verstärkt sich dieser Effekt des Kriechens und Verstreckens der Makromoleküle. Umgekehrt führen sehr niedrige Temperaturen zu einem eher spröden weniger elastischen Verhalten, kleineren Dehnungen bis zum Bruch und somit zu rasch ansteigenden höheren Spannungsmaxima /BS12, S.468/. Ein ebenso großer Effekt auf das charakteristische Verhalten viskoelastischer Werkstoffe stellt die Zeitabhängigkeit dar. Bei sehr langsamen Zuggeschwindigkeiten treten zunehmend plastische Erscheinungen wie Relaxation und Retardation auf.

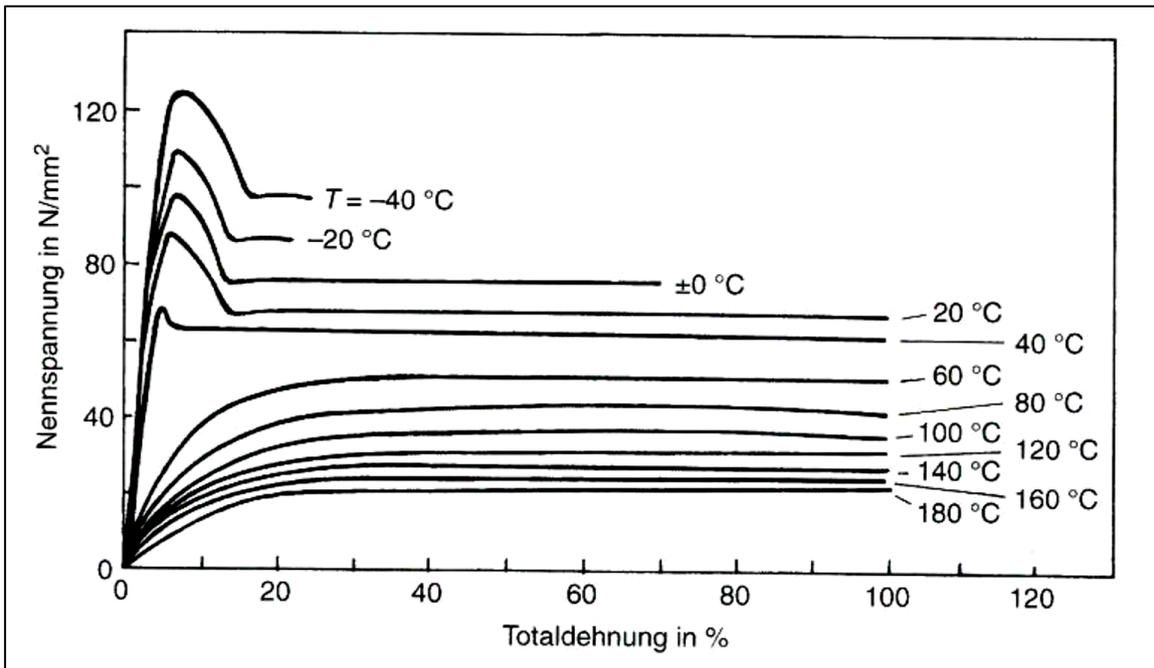


Abbildung 17: : Isotherme Spannungs-Dehnungskurven Polyamid /MACH11, S.537/

Die Kurven des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes aus Abbildung 18 zeigen, dass mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit die vom PVC maximal aufnehmbare Spannung stark anwächst und sich die Bruchdehnung gleichzeitig drastisch reduziert.

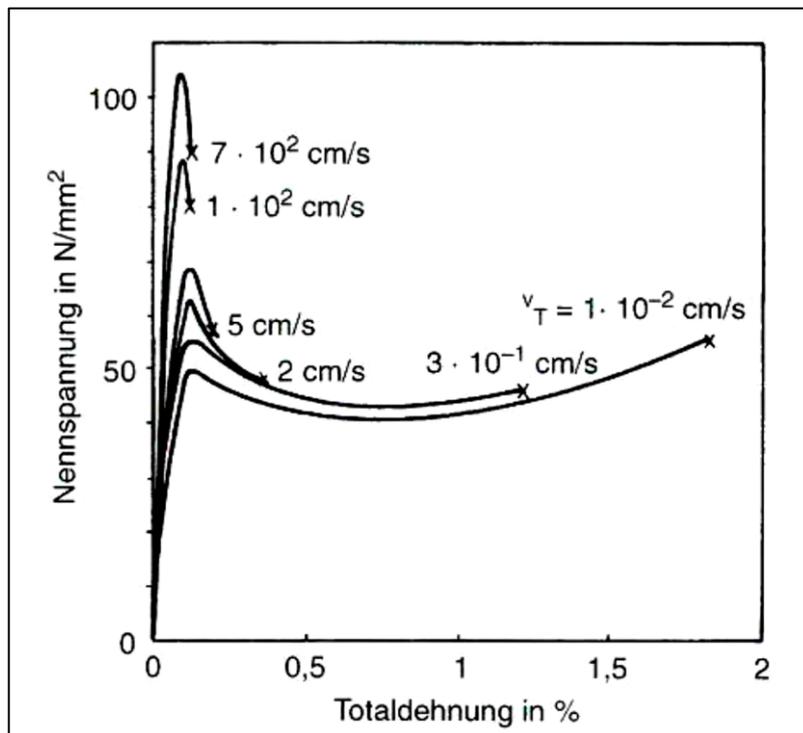


Abbildung 18: Spannungs-Dehnungsdiagramm PVC bei verschiedenen Zuggeschwindigkeiten /MACH11, S. 538/

3.2.2 Ermüdungsversuche

Die aus statischen Prüfverfahren ermittelten Festigkeitskennwerte sind alleine nicht ausreichend zur Charakterisierung des Klebstoffes. Vielmehr sind Kennwerte für die Schwingfestigkeit beziehungsweise die Anzahl der Lastwechsel bis zum Schwingbruch erforderlich. Der zeitliche Ablauf der zyklischen Beanspruchung kennzeichnet die Art des Schwingversuches. Im sogenannten Einstufenversuch erfolgt die Beanspruchung der Probe nach einem Zeitablauf, der periodisch ist und in seinen Beanspruchungsgrenzen konstant gehalten wird. Die Abbildung 19 zeigt den Schwingauschlag beziehungsweise die Amplituden σ_a bzw. ε_a . Der Höchstwert der Spannung wird als Oberspannung σ_o , der kleinste als Unterspannung σ_u bezeichnet. Eine volle Schwingung mit der Periodendauer T ist ein Schwingspiel. Die Schwingfrequenz f ist der Reziprokwert der Periodendauer.

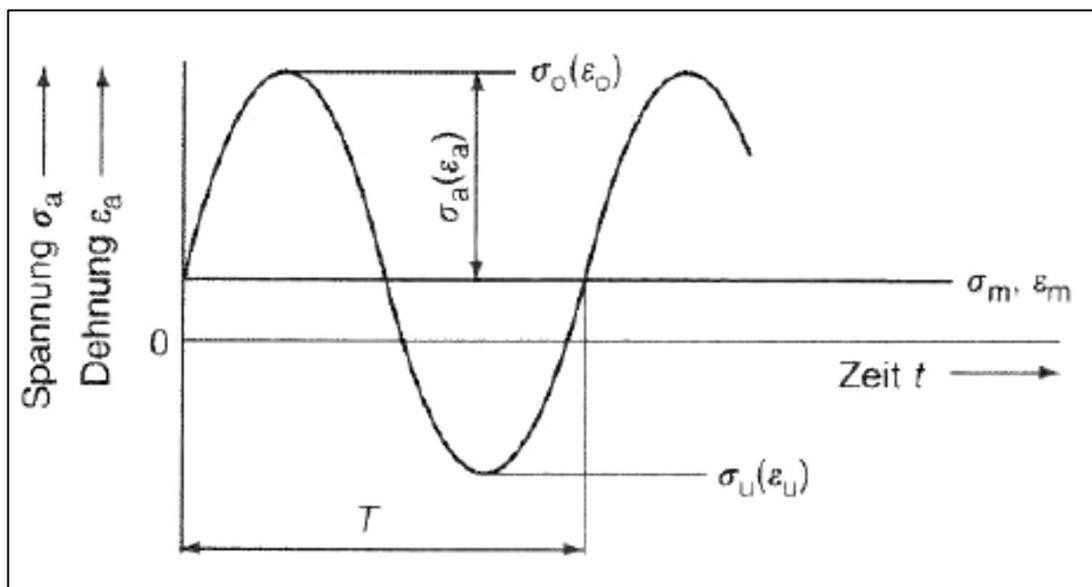


Abbildung 19: Größen der schwingenden Beanspruchung /BS12, S.133/

$$f = \frac{1}{T}$$

Das Spannungsverhältnis ist der Quotient aus Unterspannung und Oberspannung und gibt eine Aussage über die Art der zyklischen Beanspruchung.

$$R_\sigma = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

Für $-1 < R_\sigma < 1$ gelten folgenden Fälle:

- $R_\sigma < 0$ Wechselbeanspruchung
- $R_\sigma = -1$ reine Wechselbeanspruchung
- $R_\sigma > 0$ schwellende Beanspruchung
- $R_\sigma = 0$ reine Schwellbeanspruchung

Proben mit der gleichen Mittelspannung σ_m aber mit verschiedenen Spannungsamplituden werden bis zum Bruch geprüft und ihre Lebensdauer durch Zählen ihrer Bruchschwingzahlen N ermittelt. Bekannt ist dieses Modell mit dem Abbilden der Spannungsamplitude über die Lebensdauer als Wöhlerkurve /BS12, S.134/. Zu unterscheiden ist hierbei die Kurzzeitfestigkeit bis 10^4 und die Dauerfestigkeit ab 10^5 Schwingspielzahlen. Die Abbildung 20 zeigt schematisch die Ermittlung eines Wöhler-Schaubildes.

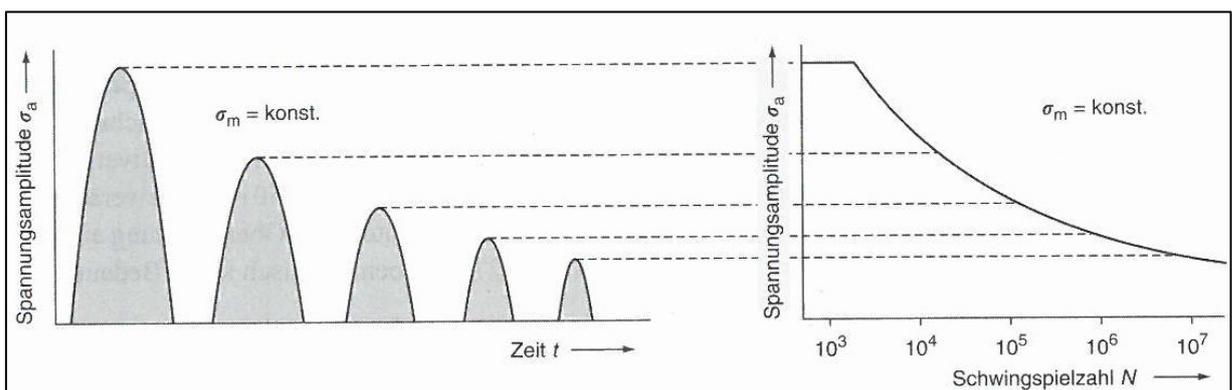


Abbildung 20: Schema zur Ermittlung der Wöhler-Kurve /BS12, S.134/

Eine größere Bedeutung bei Bauteilprüfungen haben mehrstufige Beanspruchungen, denn sie entsprechen den betrieblichen Belastungen. Durch Ermüdungsversuche mit verschiedenen Amplituden oder Spannungen wird festgestellt, ob eine Vorbeanspruchung mit anderen Belastungen zu einer Erhöhung oder Verringerung der Lebensdauer führt. Die Abbildung 21 zeigt ein Zeitfestigkeitsschaubild mit verschiedenen Belastungen bis zum Bruch. Die nicht zu vermeidenden Streuungen der Ergebnisse erfordern eine Regression aus mehreren Versuchen unter gleichen Bedingungen.

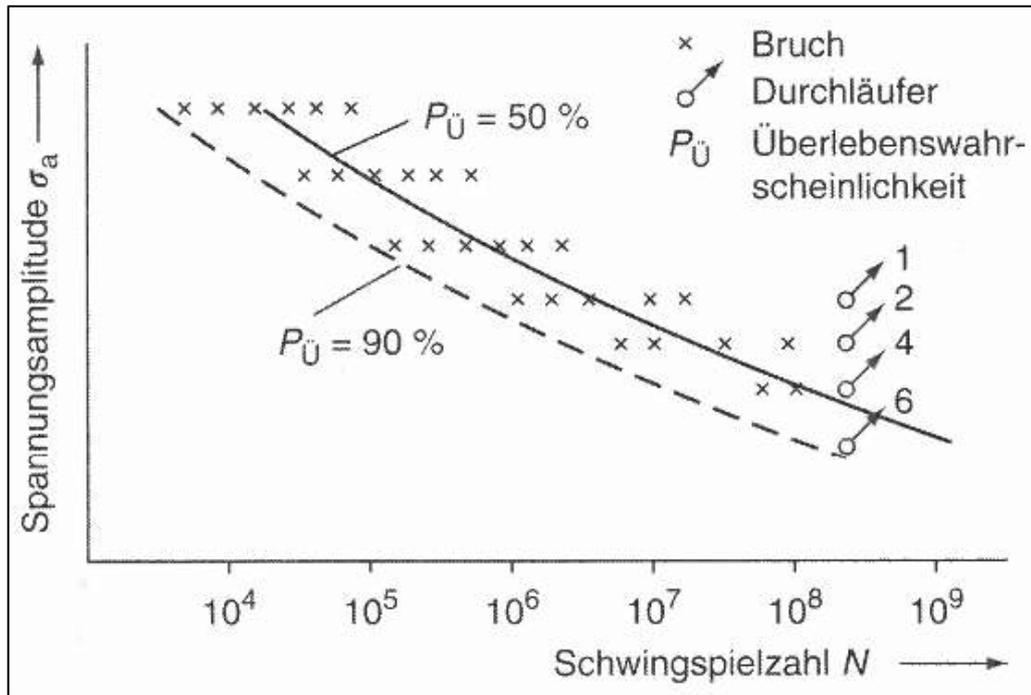


Abbildung 21: Schwingversuch bis zum Bruch unter Variation der Spannungsamplitude /BS12, S.135/

Unter Einfluss der Wechsellast treten insbesondere zu Beginn der Schwingungsbeanspruchung Mechanismen der Verfestigung und Entfestigung auf. Zur Veranschaulichung sind mögliche Kurvenverläufe in Abbildung 22 dargestellt.

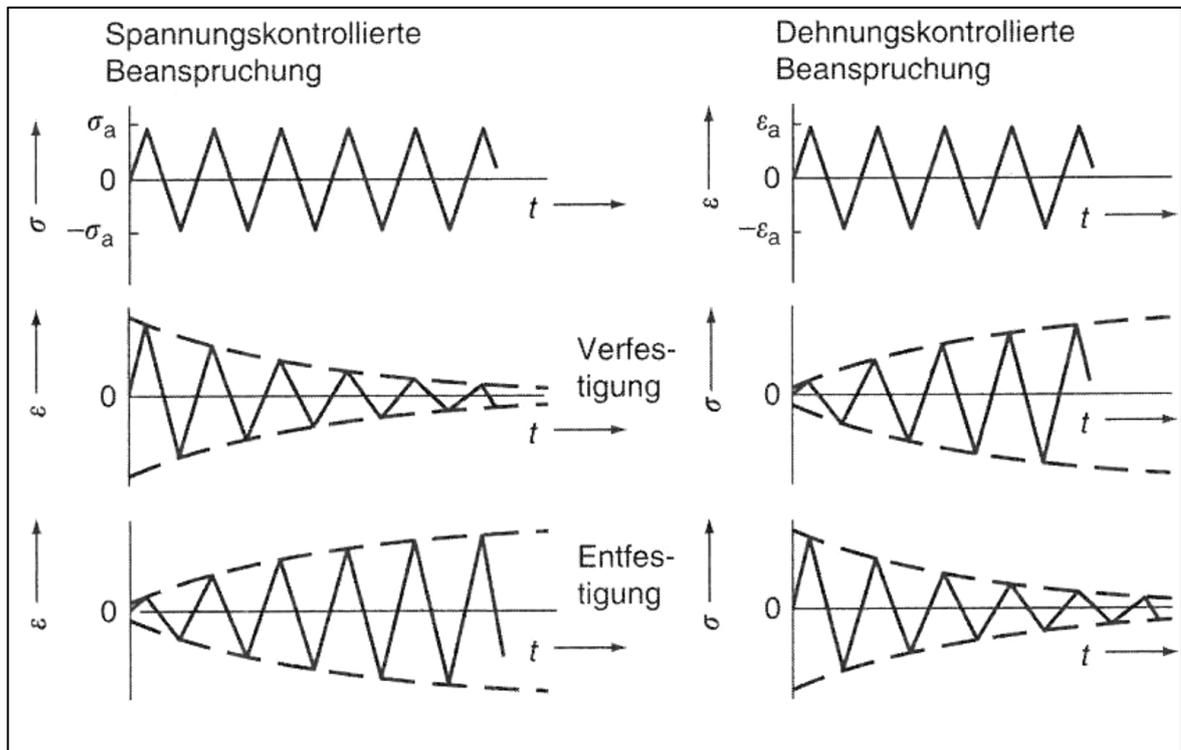


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf von Wechselverfestigung und Wechselentfestigung /BS, S.141/

Das vollständige Schwingenspiel einer Spannung-Dehnung-Kurve mit Durchlauf der Maximal- und Minimalspannung ergibt die mechanische Hystereseschleife. Die in Abbildung 23 eingeschlossene Fläche entspricht der spezifischen Umformarbeit beziehungsweise dem Anteil der plastischen Verformung /BS12, S.241/.

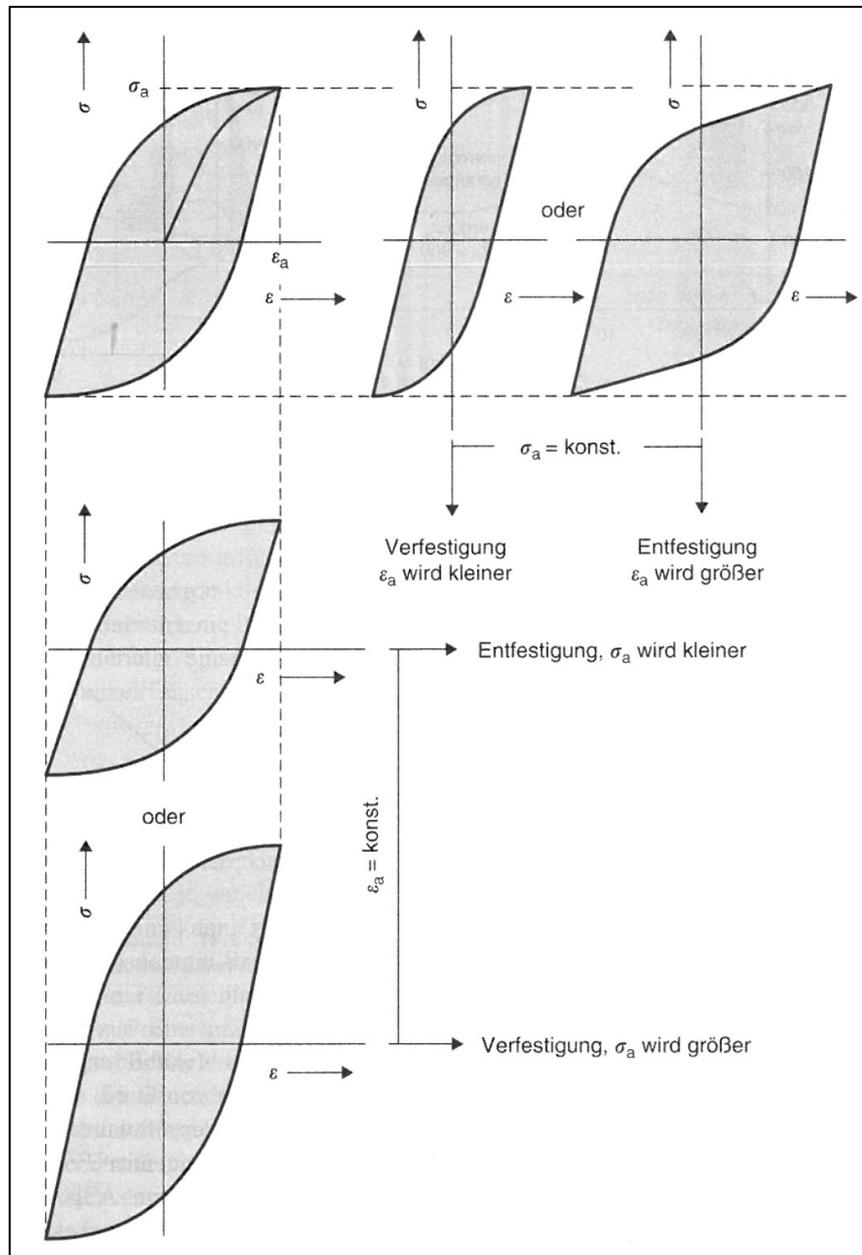


Abbildung 23: Mechanische Hystereseschleife unter Wechsellastverhalten /BS, S.140/

Wird bei weiteren Schwingspielen und angenommener konstanter Spannungsamplitude die Dehnungsamplitude kleiner, so liegt eine Verfestigung vor. Demzufolge führt eine Dehnungssteigerung je Wechsellast zu einer Entfestigung. Analog bedeutet unter dem Einfluss einer konstanten Verformungsamplitude, dass eine Zunahme der Spannungen eine Verfestigung und eine Abnahme dieser Spannungen eine Entfestigung bewirken.

3.3 Leitfähigkeitsmessung

Parallel zur Festigkeitsmessung erfolgt in Echtzeit die Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit, denn der Kleber soll die Funktion der Kontaktierung von Elektroden erfüllen. Die elektrische Leitfähigkeit κ ist der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ_{spez} .

$$\kappa = \frac{1}{\rho_{\text{spez}}}$$

Der elektrische Widerstand R des Prüfkörpers ist bestimmt durch das ohmsche Gesetz aus angelegter Spannung U und durchfließenden Strom I . Der elektrische Widerstand und die Leitfähigkeit sind dabei abhängig von der Geometrie des Körpers, das heißt von der Länge d und seinem Querschnitt A .

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \rho_{\text{spez}} * \frac{l}{A}$$

Der elektrische Widerstand der metallischen Füllstoffpartikel wird hauptsächlich durch Stöße der Leitungselektronen mit den Phononen (Gitterschwingungen) der Atome verursacht. Hierbei haben höhere Temperaturen eine größere Schwingungsamplitude der Atome in dem Kristallgitter zur Folge. Dies führt zu einer höheren Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen zwischen den sich frei bewegenden Elektronen und den Gitteratomen. Aus diesem Grund handelt es sich bei dem elektrischen Widerstand R um eine temperaturabhängige Materialkonstante von Metallen, welche mit steigender Temperatur zunimmt. Die Bestimmung des elektrischen Widerstandes einer Probe erfolgt über Strom- und Spannungsmessung unter Zuhilfenahme des ohmschen Gesetzes.

Es gibt mehrere Methoden, um einen Widerstandswert zu ermitteln. Man unterscheidet zwischen der indirekten und der direkten Messung. Bei der indirekten Messung erfolgt eine anschließende Berechnung, denn die am Widerstand anliegende Spannung U und der dadurch fließende Strom I werden gleichzeitig gemessen. Bei der direkten Widerstandsmessung wird nicht der Widerstand, sondern der Strom durch eine Reihenschaltung aus einem unbekanntem Widerstand und einem bekannten Vorwiderstand gemessen.

Für die indirekte Widerstandsmessung eignet sich zur Messung kleiner Widerstandswerte der spannungsrichtige Schaltungsaufbau. Die Abbildung 24 zeigt den Schaltungsaufbau mit Amperemeter zur Messung des Stromes I_{ges} und mit Voltmeter

zur Messung der abfallenden Spannung U_P über der Probe. Durch den Spannungsmesser fließt ein Strom I_V , der den zu messenden Strom I_P verfälscht. Der Strom I_{ges} ist also um den Strom I_V zu groß. Da der Innenwiderstand des Spannungsmessers sehr groß ist, wird die Messung sehr wenig beeinflusst insbesondere bei kleinen Widerstandswerten R_P .

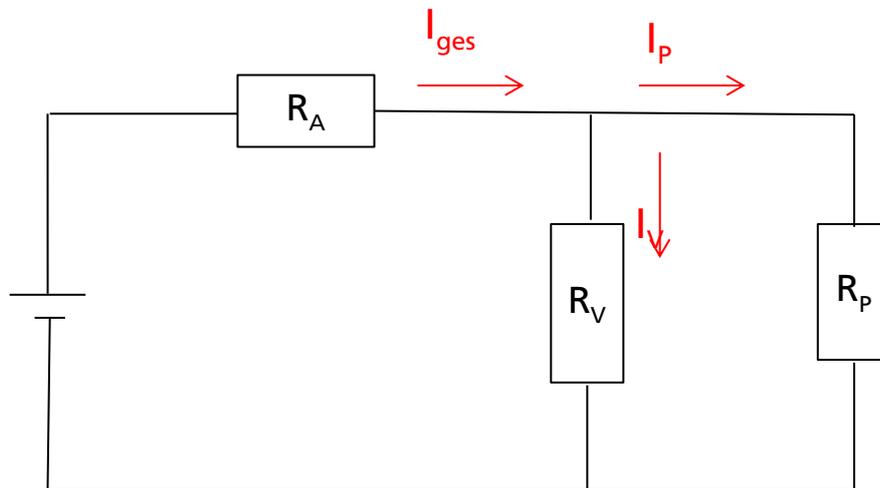


Abbildung 24: Widerstandsmessung spannungsrichtig /POW14/

$$R = \frac{U_P}{I_P} = \frac{U_V}{I_{ges} - I_V} = \frac{U_V}{I_{Ges} - \frac{U_V}{R_V}}$$

$$R_P \ll R_V$$

Die Lösungsgleichung zum Schaltungsaufbau der spannungsrichtigen Widerstandsmessung zeigt, dass im Falle eines deutlich kleineren zu messenden Prüfwiderstandes R_P , gegenüber dem hochohmigen Vorwiderstand des Voltmeters R_V mit einem vernachlässigbar kleinen Fehler zu rechnen ist. Eindeutig bestimmt ist der Widerstandswert des Prüfkörpers mit diesem Messaufbau nicht, da die Kontaktwiderstände und Leitungswiderstände der angeschlossenen Elektroden in Reihe geschaltet sind.

Die Vierleitermessung eignet sich zur Bestimmung sehr niedriger Widerstände einer Probe mit genügend hoher Genauigkeit, da sich die Zuleitungswiderstände nicht auf das Messergebnis auswirken. Unter sehr kleinen Widerständen versteht man hierbei Widerstände mit Werten in der Größenordnung der Zuleitungswiderstände. In der Literatur wird das Messprinzip auch als Vierpunkt-, Vierspitzen-, Vierdraht- oder Kelvinmessung bezeichnet.

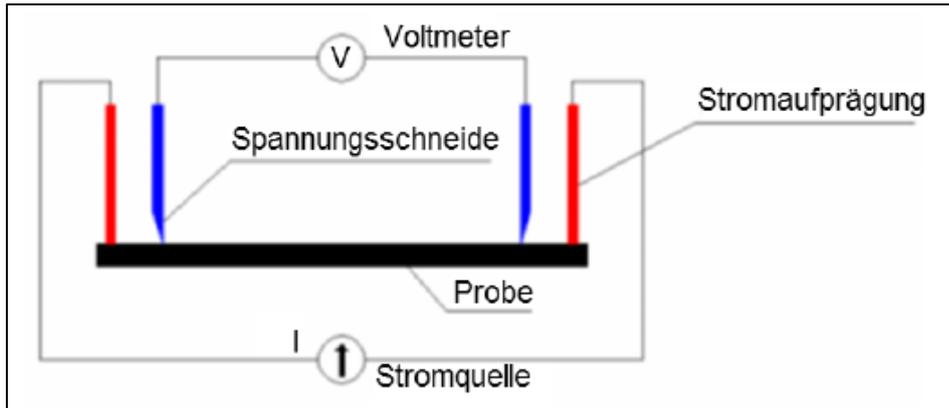


Abbildung 25: Vierpunktversuchsaufbau zur Messung der Leitfähigkeit /KER08/

Abbildung 25 stellt die Messanordnung der Vierleitermessung dar. Das Messprinzip beruht auf einer Trennung der Zuleitungen der Stromführung von denen der Spannungsmessleitungen. Dafür wird bei der linearen Vierleitermethode die Oberfläche des Prüfkörpers mit 4 Messspitzen in Reihe kontaktiert. Über die äußeren Kontakte fließt ein eingepprägter, konstanter Strom I_P über den zu bestimmenden Probenwiderstand R_P . Der eingepprägter Strom ist hierbei so niedrig zu wählen, dass er nicht zu einer Temperatur- und damit Widerstandserhöhung führt. Die inneren Kontakte dienen zur Messung des Spannungsabfalls über der Probe mittels eines Spannungsmessgerätes (Voltmeter).

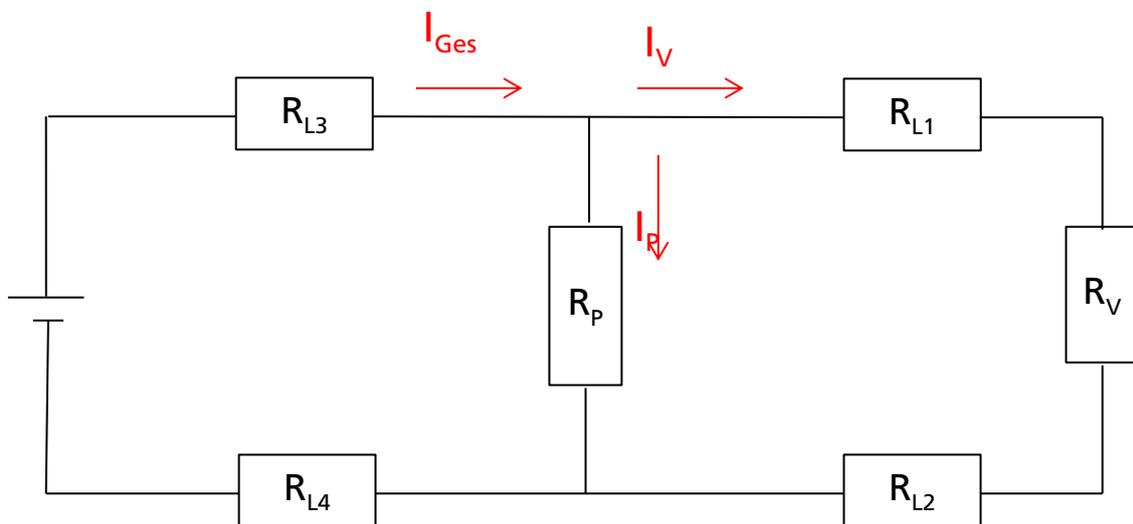


Abbildung 26: Ersatzschaltbild Vierleitermessung /POW14/

Die Ersatzschaltung der Vierleitermessung in Abbildung 26 zeigt die Berechnung des Spannungsabfalls an der Probe. Die Komponenten R_{L1} bis R_{L4} kennzeichnen die

Zuleitungswiderstände der Spannungsmessung und der Stromeinspeisung. Der eingepreßte Strom I_{ges} teilt sich am Knotenpunkt auf in Richtung der Probe I_P und Richtung des Voltmeters I_V . Das Voltmeter hat eine im Idealfall unendlich großen Innenwiderstand R_V , sodass der deutlich größere Strom durch die Probe R_P fließt. Dabei entsteht ein Spannungsabfall U_P .

$$I_{ges} = I_P + I_V$$

$$U_P = R_P * I_P = U_{L1} + U_{L2} + U_V$$

$$U_P = R_P * (I_{ges} - I_V) = I_V * (R_{L1} + R_{L2} + R_V)$$

Der Spannungsabfall am Spannungsmessgerät ergibt sich durch Anwendung des Ohmschen Gesetzes aus dem Innenwiderstand R_V und dem verbleibenden Strom durch das Voltmeter I_V .

$$U_V = I_V * R_V$$

$$I_V = \frac{I_{ges} * R_P}{R_{L1} + R_{L2} + R_V + R_P}$$

$$U_V = \frac{I_{Ges} * R_P * R_V}{R_{L1} + R_{L2} + R_V + R_P} = \frac{I_{ges} * R_P}{\frac{R_{L1}}{R_V} + \frac{R_{L2}}{R_V} + 1 + \frac{R_P}{R_V}}$$

Betrachtet man die Gleichung der Spannungsmessung anhand ihrer Parameter, lässt sich schlussfolgern, dass der resultierende Messfehler verschwindend gering ist. Hierzu wird die Spannungsgleichung einer Grenzwertbetrachtung unterzogen unter der Annahme, dass der zu messende Probenwiderstand deutlich kleiner ist als der Innenwiderstand des Messgerätes.

$$R_P \ll R_V$$

$$U_V = \lim_{R_V \rightarrow \infty} f(R_V)$$

$$U_V = \lim_{R_V \rightarrow \infty} \frac{I_{Ges} * R_P}{\frac{R_{L1}}{R_V} + \frac{R_{L2}}{R_V} + 1 + \frac{R_P}{R_V}} = I_{Ges} * R_P$$

Grundlegend lässt sich der Probenwiderstand bestimmen aus dem eingepreßten Strom und der am Voltmeter gemessenen Spannung.

$$R_P = \frac{U_V}{I_{ges}}$$

3.4 Recherchen zum Proben- und Versuchsaufbau

3.4.1 Herstellung der Scherzugproben

Beim Scherzugversuch wird nach DIN EN 1465 die Klebfestigkeit einschnittig überlappender Klebverbindungen bei Beanspruchung der Fügeteile durch Zugscherkräfte in Richtung der Klebfläche ermittelt /DIN1/. Das Verfahren der Scherzugprüfung wird vorwiegend zur Beurteilung der Brauchbarkeit und Güte von Klebstoffen, zur Qualitätssicherung und zur vergleichenden Beurteilung von Klebstoffen verwendet.

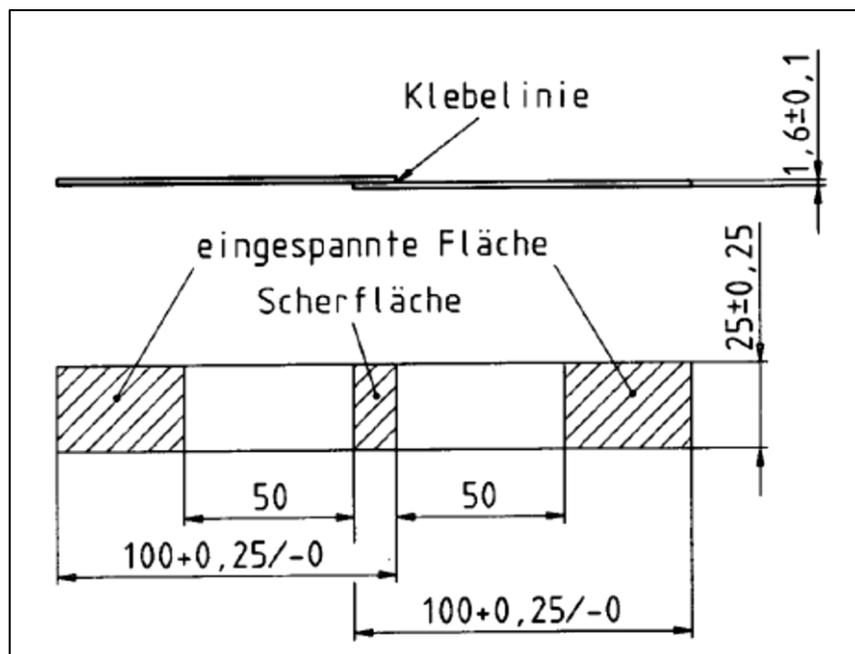


Abbildung 27: Überlappungsklebung /DIN1, S.4/

Nachteil dieser Methode ist der seitliche Versatz der Angriffspunkte der wirkenden Zugkraft F . Er verursacht, dass zu der gewünschten reinen Schubspannung τ_v das Biegemoment M_b wirkt und somit die Normalspannung σ_z , die von der Verformung der Fügeteile hervorgerufen wird (Abbildung 28). Da dieser Spannungszustand von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes der Fügeteile und deren Dicke abhängt, können Verbundfestigkeiten verschiedener Überlappungsklebungen nur verglichen werden, falls die Fügeteile gleich beschaffen sind. Der Ort des Verbundversagens der Klebung befindet sich an einer der beiden Stirnflächen, da dort auf Grund der Überlagerung aller Spannungsanteile sich eine örtliche Spannungsüberhöhung ausbildet.

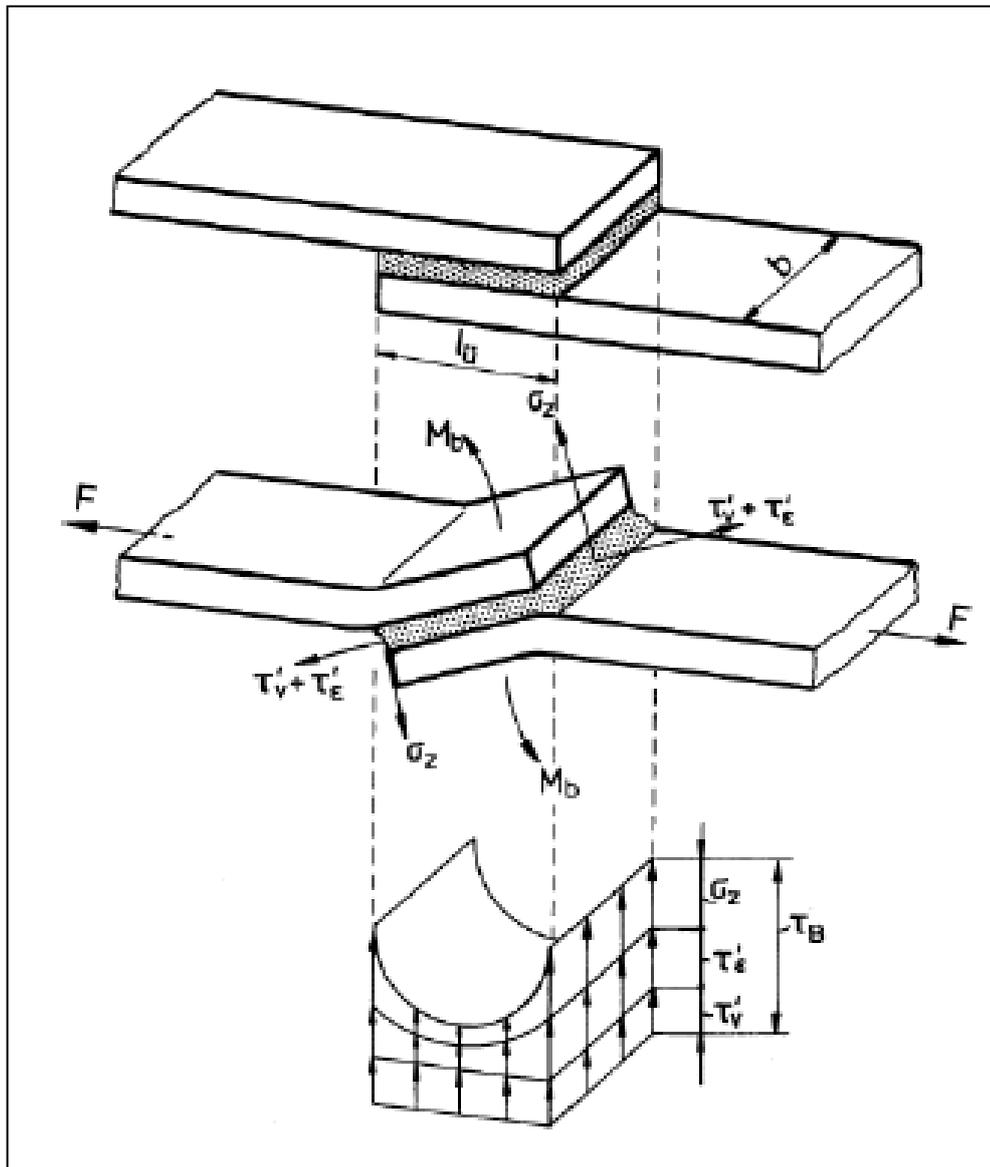


Abbildung 28: mehrachsiger Spannungszustand /HAB08, S. 380/

Um den mehrachsigen Spannungszustand zu verringern, gibt es nach der Norm DIN EN 14869-2 die Bestimmung des Scherverhaltens von Klebungen für dicke Fügeteile /DIN2/. Hier wird die Kraft möglichst zentrisch eingeleitet durch die Klebung der vorgesehenen Absätze. Mit der Vergrößerung der geometrischen Abmaße und einer relativ zur Breite kürzeren Überlappungslänge wird das Widerstandsmoment gegen Biegung erhöht, sodass sich die Fügeteile nur sehr gering verformen und dem Schälfeffekt entgegengewirkt werden kann.

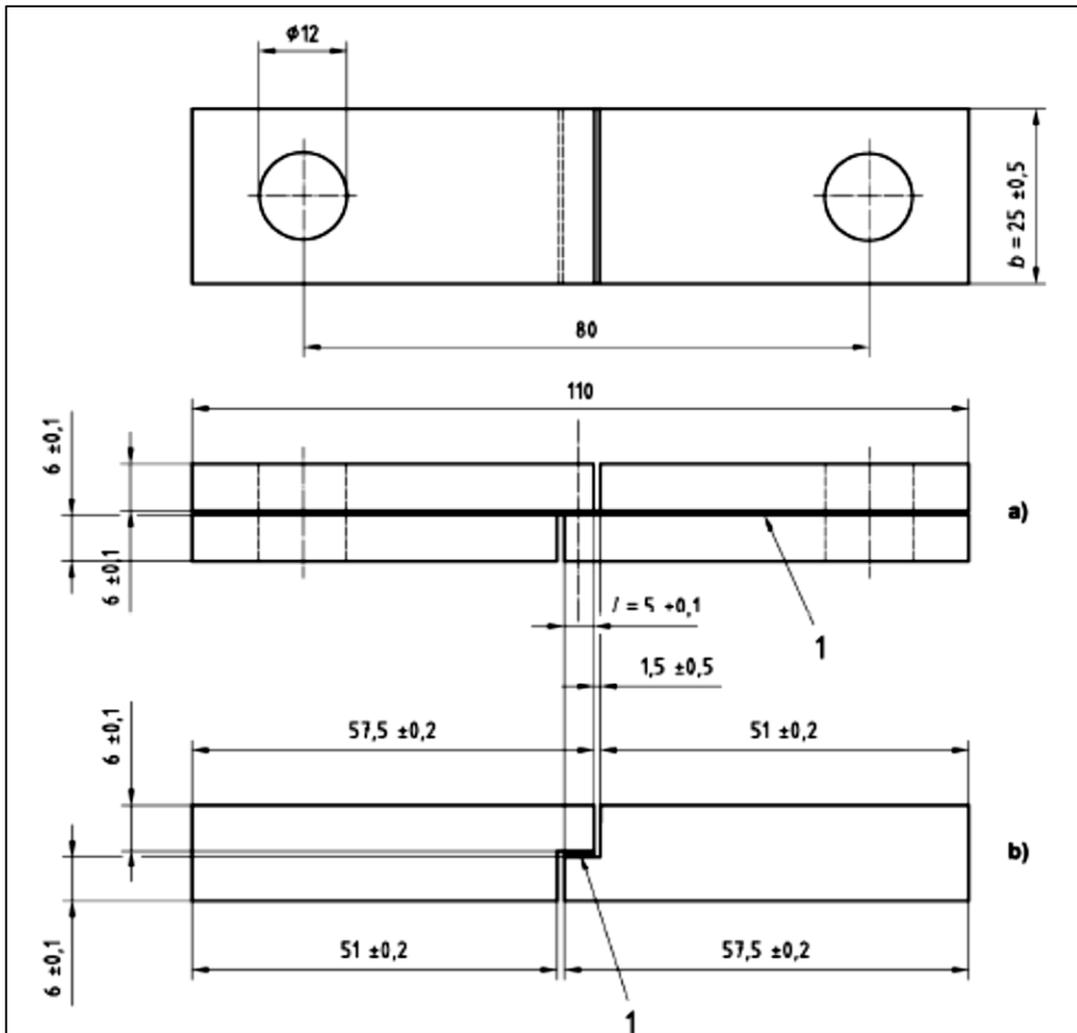


Abbildung 29: Prüfkörperaufbau nach DIN EN 14869-2 /DIN2, S.5/

Der Gebrauch des Klebstoffes unterscheidet sich hinsichtlich der Klebschichtdicken. In diesem Zusammenhang spricht man vom elastischen Kleben bei einer dicken Klebschicht und vom strukturellen Kleben bei einer dünnen Klebschicht /FLE11, S.80/. Wichtig dabei ist der Einfluss der Klebdicke auf die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Bruchdehnung. Fest steht, dass bei gleicher Kraft, sich der dünnere Klebstofffilm weniger als der dickere Klebstofffilm eines Klebstoffes verformt. In der Werkstoffprüfung bedeutet eine dünne Klebschicht eine geringere Bruchdehnung bei höherer Festigkeit. Ist der Kleber dicker, so ist die Dehnung bis zum Bruch größer bei einer geringeren Festigkeit /FLE11, S82/. Eine klare Unterscheidung zwischen struktureller und elastischer Klebung mittels Grenzwert ist nicht möglich, da der Übergang von einer mittelfesten zu einer hochfesten Klebung fließend ist. In entsprechenden Norm- und Prüfberichten zum Testen struktureller Klebungen wird eine Klebschichtdicke von 0,05 mm bis 0,2 mm empfohlen /DIN2, S.6/. Durch sorgfältige Fügeteilherstellung und Klebung an den korrekt gefertigten und vermessenen Vorrichtungsposten könnte eine maximale Abweichung von 0,02 mm vom gewünschten Wert erreicht werden. Erfahrungsgemäß wird deutlich, dass

mit der in der Norm beschriebenen einfachen Fertigung und Versuchsdurchführung nur mit großem Aufwand reproduzierbare Probekörper hergestellt werden können /REIL98, S.59/. Die Abbildung 30 zeigt schematisch die anzutreffenden Fehler nach der spanenden Bearbeitung eines Stahlkörpers.

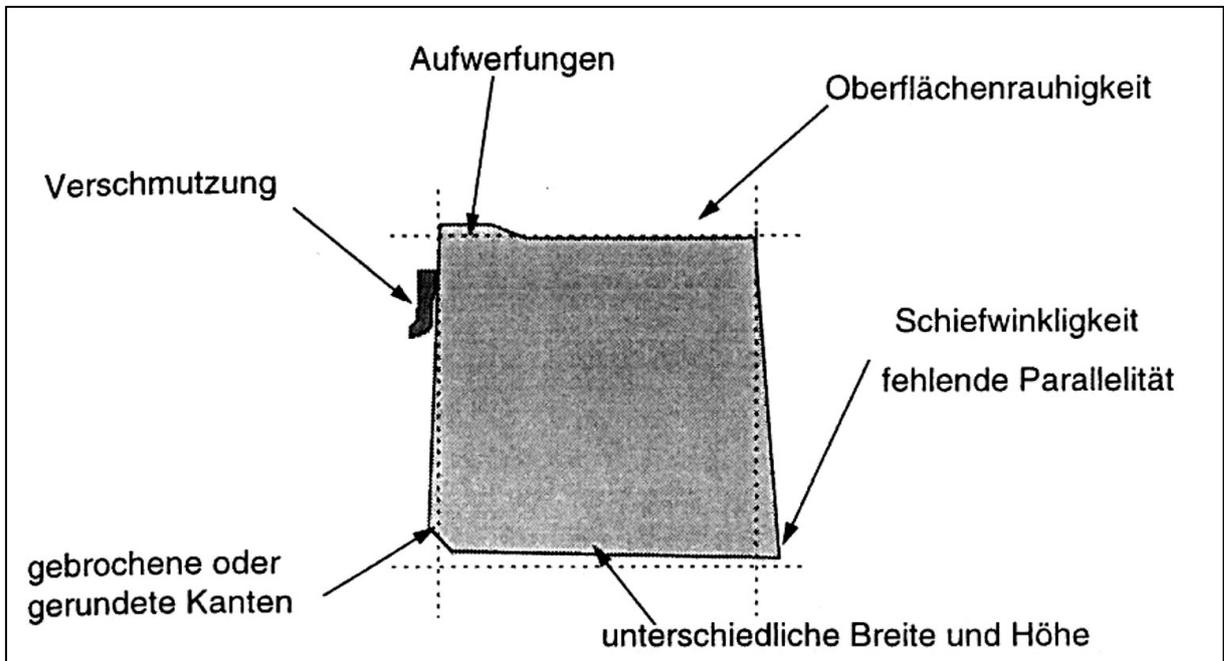


Abbildung 30: Formabweichungen nach spanender Bearbeitung von Stahl /REIL98, S.79/

Da die Klebschichtdicke einen großen Fehleranteil in der Klebstoffprüfung darstellt, sollten alle gefertigten Fügeteile vor dem Kleben einzeln vermessen und anschließend klassiert werden. Dadurch können jeweils zwei Fügeteile mit beispielsweise gleicher Stufenhöhe kombiniert werden. Eine exaktere Klebepaltherstellung entsteht mit einfachen überlappenden aber weniger tragfähigen Fügeteilen. Die Abbildung 31 zeigt eine Vorrichtung zur Klebung von dünnen, einfach überlappenden Fügeteilen. Theoretisch ist nicht nur die Überlappungslänge, sondern auch die Klebschichtdicke variabel einstellbar. Eine Distanzfolie sorgt für den gewollten Höhenversatz bei jeder Probenkombination. In der Industrie erhältliche Halbzeuge weisen bereits eine gute bis sehr gute Maß- und Formgenauigkeit auf. Begrenzt wird die Klebeschicht mit PTFE-Blöcken, da dieses Material für sein Antihafverhalten bekannt ist.

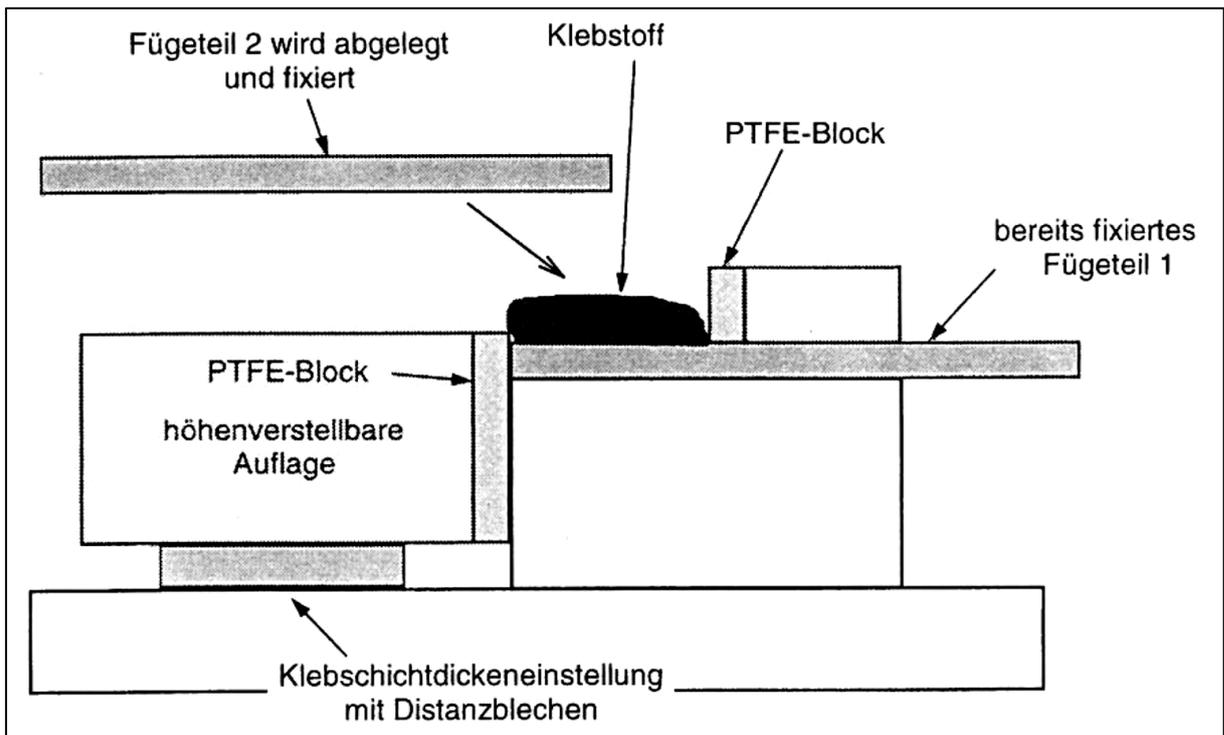


Abbildung 31: Vorrichtung zur Herstellung einer Scherzugprobe /REIL98, S.57/

Vor der eigentlichen Klebung werden die Fügeteile von Fetten, Ölen und Spänen mit Aceton gereinigt. Um eine sehr gute Adhäsion zu erreichen und mit Sicherheit ein Kohäsionsbruch zu erzeugen, ist eine Oberflächenrauheit für die Klebeflächen erwünscht.

3.4.2 Scherversuchsaufbau

Die durch eine Klebung verbundene Probe wird einer Zugkraft so ausgesetzt, dass der Klebstoff auf Schub beansprucht wird. Die Prüfmaschine verfügt über eine Kraft- und Wegmessung. Die Elektronik übernimmt die Messung, Steuerung und Regelung der Maschine. Ein speziell angefertigter Messwertgeber misst die relative Verschiebung der Fügeteile. Diese Anforderungen sind Stand der Technik und gehören zur Standardeinrichtung einer jeden Prüfmaschine. Die Erzeugung eines homogenen Schubspannungszustandes im Überlappungsbereich einer Scherzugprobe erfordert die definierte Krafteinleitung in Richtung der Probenkörperlängsachse. Zur Einspannung darf die Klebschicht weder belastet noch geschädigt werden. Damit die Probeneinspannung eine hohe Steifigkeit aufweist, sollte die Verbindung mit der Prüfmaschine kraftschlüssig sein. Ein nachgiebiges Spannsystem kann die Entfestigung des Klebstoffes schlagartig beeinflussen und somit die Regelung der Gleitgeschwindigkeit erschweren /REIL98, S.132/. Ein Versatz der Befestigungspunkte an den Transversenenden muss ausgeglichen werden. Untauglich sind die üblichen kraftschlüssig schließenden Spannbacken, denn gerade bei sehr dünnen Klebstoffen reichen

kleinste Verschiebungen im Einspannbereich, um große Kräfte zur relativ dazu kleinen Fläche zu erzeugen und die Probe somit zu zerstören. Spannt man eine strukturelle Klebung im kraftgeregelten Betrieb ein, erzeugt die Bewegung beim Schließen des Spannzeuges sofort eine Querkraft. Nach DIN Norm empfiehlt sich der Einsatz von Kardangelenken, sodass ein vernachlässigbares Drehmoment in der Probe entsteht, wenn die Kraft aufgebracht wird. Ein weiteres Problem entsteht durch die Bolzeneinführung in den Gabeln des Kardangelenkes. Liegt die Probe an einer Seite der Gabel außerhalb der Schubachse an, wird bei Belastung ein Biegemoment durch die nicht zentrische Krafteinleitung erzeugt.

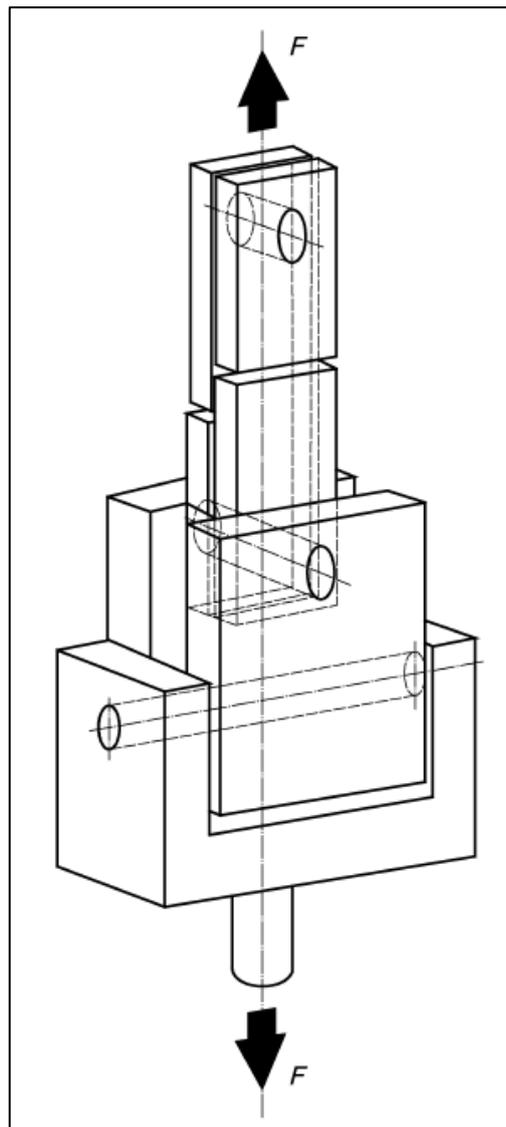


Abbildung 32: Einspannung mittels Kardangelenk /DIN2, S.9/

Am besten eignen sich vier kardanische Gelenkeinheiten, denn dann kann die Probe zwischen oberer und unterer Traverse frei beweglich hängen. Der Einrichtbetrieb ist deutlich einfacher zu betreiben. Nachteilig ist eine erhöhte Nachgiebigkeit des

Aufbaus, die von der Regelung der Prüfmaschine ausgeglichen werden muss. In der Abbildung 33 ist der für die Einspannung notwendige Aufbau zu sehen. Die Kardan-gabeln verfügen zusätzlich über eine Gelenkkopffunktion, sodass die Scherzugprobe nach allen Seiten kippen kann. Ein Extensometer misst die relative Füge-teilverfor-mung. Diese Anordnung ist allerdings nur für die Belastung in Zugrichtung geeignet.



Abbildung 33: Kardanische Gelenkkopflagerung /ALT10, S.13/

4 Konzeptfindung

Die Entwicklung des Probenkörpers samt Vorrichtung und dem Scherversuchsaufbau erfolgt in mehreren Phasen in Anlehnung an die VDI-Richtlinie VDI 2225 /BEI07, S.21/. Nachdem in Phase 1 die Aufgabenstellung geklärt und deren Anforderungsliste erarbeitet wird, kommt es im Anschluss zum methodischen Teil der Konstruktion. Das ermittelte Konzept wird in seine Teilfunktionen gegliedert. In der Konzeptphase werden die Wirkprinzipien näher betrachtet und Lösungsansätze ermittelt. Mit dem Ordnungsschema nach dem Prinzip des „Morphologischen Kasten“ /BEI07, S.159/ werden alle Teillösungen aufgenommen und nach anwendungsspezifischen Kriterien bewertet. Das Schema der Abbildung 34 soll zur optimalen Lösung beitragen und die Aufgabenstellung zur Entwicklung eines Probenkörpers samt Vorrichtung und dem Scherversuchsaufbau leiten.

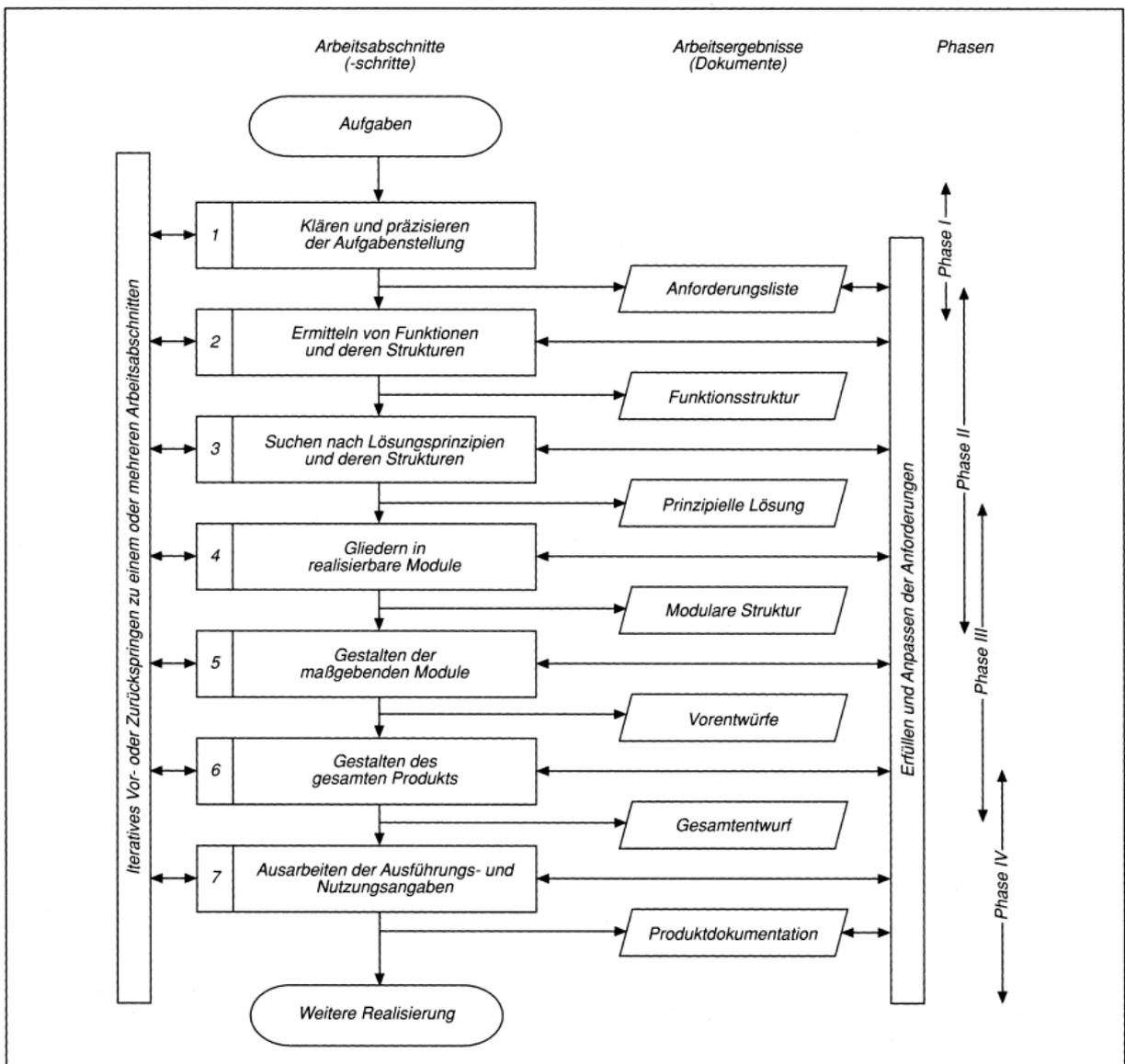


Abbildung 34: Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren /BEI07, S.22/

4.1 Entwicklung der Vorrichtung und der Probenkörper

4.1.1 Technische Anforderungen

Vor der Konzeptphase werden die Ziele und technischen Rahmenbedingungen, unter denen sie erreicht werden sollen, klar herausgearbeitet. Zur Ermittlung der technischen Anforderungen fließen Recherchen ein, sowie einfache Voruntersuchungen. Für die Gruppe Modulzuverlässigkeit des Fraunhofer CSP lautet das Projekt „Charakterisierung Leitkleber“. Das Datum zur Erfassung und Formulierung der Anforderungen ist der 20.04.2014, wobei leichte Veränderungen im Verlauf der Entwicklungsphase vorbehalten bleiben. Das Dokument beinhaltet die Forderungen (F) und Wünsche (W) an das Konstrukt und die Technik.

Tabelle 1: Anforderungsliste "Vorrichtung Leitkleber"

Fraunhofer CSP		Vorrichtung Leitkleber Projekt 632007	Seite 1
Änderung	F/W	Anforderung	Abteilung
28.04.2014	W	1. Werkstofftechnik	Gruppe Modulzuverlässigkeit
	F	hoher Verformungswiderstand $E > 210.000 \text{ MPa}$	
	F	gute elektrische Leitfähigkeit $\kappa > 1 \cdot 10^6 \text{ S/m}$	
	F	gute Spanbarkeit	
	W	Korrosionsbeständigkeit	
	F	Temperaturbereich $-40 < \vartheta < 85 (150) \text{ }^\circ\text{C}$	
		2. Konstruktion Vorrichtung	
	W	wartungsarm	
	W	einfache Fügung im Klebevorgang	
	F	hohe Positionier-, Wiederholgenauigkeit $< 10 \text{ } \mu\text{m}$	
		3. Klebspalt	
	F	Reproduzierbarkeit	
02.05.2014	W	variable Klebdicke $d > 50 \text{ } \mu\text{m}$	
02.05.2014	W	variable Überlappungslänge l_0	
		4. Dimensionierung Fügeteil	
	F	vernachlässigbar kleines Biegemoment	
29.04.2014	F	Klebefläche nach DIN 14689 $A = 5 \times 25 \text{ mm}^2$	
	F	Kontaktierung Elektroden	
		5. Wirtschaftlichkeit	
	F	Herstellungskosten $< 500 \text{ €}$	
		6. Termin	
	F	Fertigstellung Entwurf zum 01.06.2014	
		Ausgabe 20.04.2014	

4.1.2 Variantenentwurf und Analysen

Da die Gesamtfunktion zur Probenkörperherstellung in der Aufgabenstellung und in der Voruntersuchung analysiert worden ist, folgt die Aufgliederung der Funktionsstruktur in ihren Teilfunktionen niedriger Komplexität. Die aufgeschlüsselten Wirkprinzipien dienen der weiteren Lösungsfindung. In der Tabelle 2 sind die resultierenden Wirkprinzipien in einer Übersicht aufgelistet erklärt.

Tabelle 2: Teilfunktionen der Gesamtlösung

Teilfunktion	Beschreibung
Werkstoff Fügeteile	Probenkörper mit hoher Steifigkeit und Leitfähigkeit
Geometrie Fügeteile	Form und Maße der Probe für maßhaltige Fertigung
Anbindung an Prüfmaschine	Krafteinleitung der Zugkraft und Wechsellast
Biegemomenteinfluss	Verformung der Probe vernachlässigbar klein halten
Positioniervorrichtung	Reproduzierbarkeit, Verstellmöglichkeiten
Kontaktierung	fehlerfreie Anbindung der Vierpunktmessung

Nachdem die Gesamtfunktion in ihre Teilfunktionen aufgegliedert ist, werden diese nach VDI 2225 nach dem Prinzip des „Morphologischen Kasten“ gelöst. Im Rückblick auf die untersuchten technischen Anforderungen und dem aktuellen Stand der Technik wird nach theoretisch denkbaren Lösungen gesucht /BS12, S.162ff./.

Im Anhang 1 sind die gesammelten Lösungsansätze bildhaft und nach ihrem technischen Wirkprinzip dokumentiert. Hierzu sind Lösungsansätze vergleichend aufgeführt. Das erste Unterscheidungsmerkmal ist der Werkstoff der Fügeteile. Im Zugversuch sollten diese Körper im Bereich der Klebung eine vernachlässigbar kleine Verformung zeigen, damit die Prüfbedingungen über die gesamte Breite und Länge des Klebspaltes konstant sind. Im Kontrast steht die mechanische Eigenschaft mit der elektrischen Leitfähigkeit. Dabei ist anzumerken, dass im Versuch der signifikante Spannungsabfall während der Widerstandsmessung der des Leitklebstoffes sein soll. Demzufolge sollte die Leitfähigkeit der Fügeteile deutlich größer sein, als die des Klebstoffes. Wie aus Kapitel 3.3 bekannt, spielt die Geometrie für den Betrag des Leitungswiderstandes eine wesentliche Rolle. Der erfahrungsgemäß große Kontaktwiderstand zwischen Fügeteil und Klebstoff macht eine Auslegung der Parameter zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit schwierig. Bekannt sind Größenordnungen von $R_t = (10 - 100) \text{ m}\Omega$. Größere Beachtung gilt der mechanischen Eigenschaft, sodass Stahl mit einem hohen Elastizitätsmodul von $E = 210000 \text{ MPa}$ und einer Leitfähigkeit von $\kappa_{St} = 1,4 * 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ eine ausreichend gute Lösung darstellt. Kupfer und Aluminium sind weniger steif und auch unwirtschaftlicher. Eine grobe Überschlags-

rechnung mit den geometrischen Gegebenheiten aus DIN 14689 zeigt analytisch den geringen Widerstandswert durch das Füge­teil aus Stahl.

$$R_{St} = \frac{1}{\sigma_{St}} * \frac{l}{A} = \frac{1}{1,4 * 10^6 \frac{N}{m^2}} * \frac{0,015m}{0,000125m^2} = 1,14 * 10^{-5} \Omega$$

$$R_{St} \ll R_t$$

Die Grundgeometrie der Füge­teile kann sowohl für einfach überlappende, als auch für stufige Klebungen ein Quader sein. Die Außenmaße können als Bezugsflächen in einer Klebevorrichtung genutzt werden. Eine andere Möglichkeit zur Herstellung stufiger Klebungen bieten zylindrische Körper, die besonders präzise beim Außenrundschleifen gefertigt werden können und eine sehr gute Zentrierung im eingespannten Zustand ermöglichen. Entscheidend für die Formgebung und Dimensionierung der Füge­teile sind das Widerstandsmoment gegen Biegung beziehungsweise der Biegemomenteinfluss, der durch die Deformation der Füge­teile hervorgerufen wird. Hierzu wird die Krafteinleitung einer einfach überlappenden und stufig geklebten Probe untersucht und miteinander verglichen. Die Abbildungen 35 und 36 zeigen den Einfluss der exzentrisch eingeleiteten Zugkraft F auf den Klebespalt und das daraus resultierende Biegemoment M_b . Für diese Untersuchung wird ein Vierkantstab $a = 20 \text{ mm}$ mit einer Klebefläche von $A = 20 \times 5 \text{ mm}^2$ und einen Klebespalt­dicke von $d = 0,1 \text{ mm}$ angenommen. Eine maximale Scherfestigkeit von $\tau = 25 \text{ MPa}$ bedeutet eine Zugkraft von $F = 2500 \text{ N}$.

$$F = \tau * A = 25 \text{ MPa} * 100 \text{ mm}^2 = 2500 \text{ N}$$

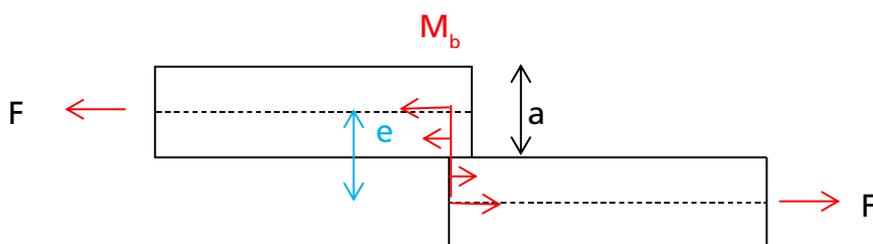


Abbildung 35: einfach überlappende Scherprobe maßstäblich /POW14/

Das auftretende Biegemoment ergibt sich aus der eingeleiteten Kraft F und der Exzentrizität e .

$$M_b = F * e$$

Das Biegemoment M_b teilt sich auf beide Fügeteile auf, sodass die Biegespannung σ_b aus dem axialen Widerstandsmoment W_b resultiert. Wie man an der Gleichung erkennen kann, hat die Querschnittsabmessung a und somit das Widerstandsmoment den größten Einfluss auf die Biegespannung.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{2 * W_b} = \frac{6 * M_b}{2 * a^3} = \frac{3 * F * e}{a^3}$$

In Abbildung 36 werden die gestuften Fügeteile miteinander verklebt. Durch die Stufe verringert sich die Exzentrizität der Krafteinleitung annähernd um die Hälfte. Das Biegemoment halbiert sich im Überlappungsbereich.

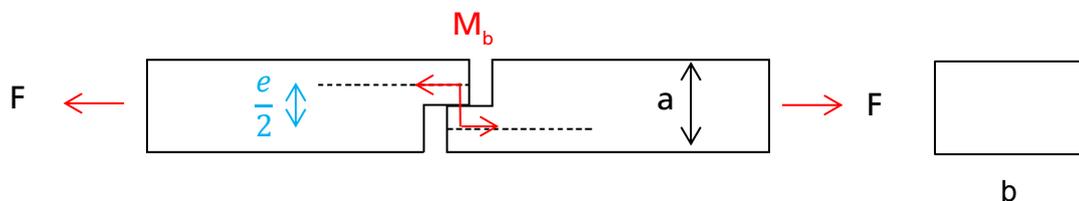


Abbildung 36: gestufte Scherprobe maßstäblich /POW14/

Der Stufenabschnitt hat ein deutlich geringeres Widerstandsmoment als die restliche Länge des Körpers, sollte aber dennoch möglichst kurz gehalten werden. Um das Widerstandsmoment in diesem Abschnitt zu verbessern, ist ein rechteckiger Querschnitt zu wählen dessen Breite b größer ist als Kante a . Theoretisch vergrößert sich dadurch die für die Klebefläche notwendige Zugkraft.

$$W_b = \frac{b * \left(\frac{a}{2}\right)^2}{6}$$

$$b > a$$

$$\sigma_b = \frac{M_b}{2 * W_b} = \frac{6 * M_b}{2 * b * \left(\frac{a}{2}\right)^2} = \frac{3 * F * \left(\frac{e}{2}\right)}{b * \left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

Der restliche Längenabschnitt des Fügeteils erfährt im Idealfall keine weiteren Biegemomente, da die Zugkraft in diesem Bereich zentriert angreift. Dennoch bewirkt das Längenmaß der Fügeteile einen weiteren Indikator für ungewollte Verschiebungen in Folge einer Querkraft. In der Finiten-Element-Analyse mit CATIA V5 R19 lassen sich die Spannungs- und Verformungskomponenten numerisch berechnen. In den folgenden Abbildungen 37 und 38 zeigen sich die Vorteile einer gestuften Scherpro-

be, da der Klebspalt nachweislich einem kleineren Biegemoment ausgesetzt wird. Hierzu wird der Aufbau einseitig eingespannt und mit einer Zugkraft belastet. Im Vergleich zur realen Einspannung in die Zugmaschine sind die festgelegten Randbedingungen idealisiert. Das der Zugkraft ausgesetzte Fügeteil ist am Traversenende der Maschine befestigt und wird durch dessen Biegesteifigkeit in seinen Freiheitsgraden wesentlich beeinflusst. Für die Analyse gelten die in der Tabelle 3 verwendeten Parameter. Angenommen wird eine Scherzugfestigkeit von 25 N/mm², woraus sich eine Zugkraft von 2500 N für eine Fläche von 100 mm² ergibt.

Tabelle 3: Parameter FEM-Analyse

Parameter	Wert
E-Modul Stahlkörper	210 000 MPa
E-Modul Kleber	3000 MPa
Kleberdicke	0,2 mm
Zugkraft	3125 N

In Abbildung 37 sind die maximalen Verschiebungen der Probengeometrien unter derselben Zuglast dargestellt. Das größere Biegemoment erfährt die einfach überlappende Probe, sodass sich diese nicht nur durch die Normalbeanspruchung verformt, sondern vielmehr durch die auftretenden Querkräfte.

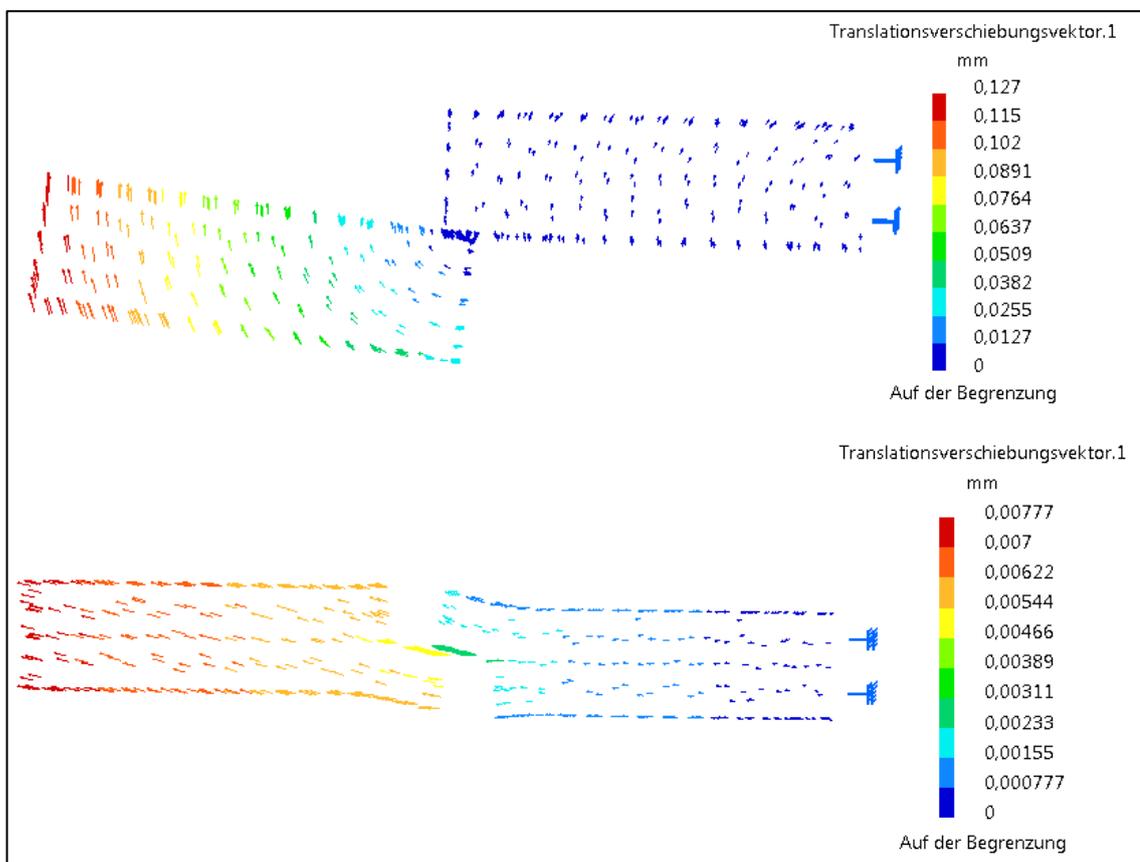


Abbildung 37: Absolute Verschiebung Probenaufbau: überlappend (oben), gestuft (unten) /CAT Analysis/

Die deutlich größere Verformung wirkt sich auf die Vergleichsspannung im Klebespalt aus. Während sich innerhalb des gestuft geklebten Klebespalt ein gleichmäßiges Spannungsfeld aufbaut, zeigt sich in der überlappenden Klebung ein signifikant mehrachsiger Spannungszustand. Insbesondere in der vom Biegemoment beeinflussten Randzone ist die Vergleichsspannung doppelt so groß gegenüber der gestuften Lösungsvariante.

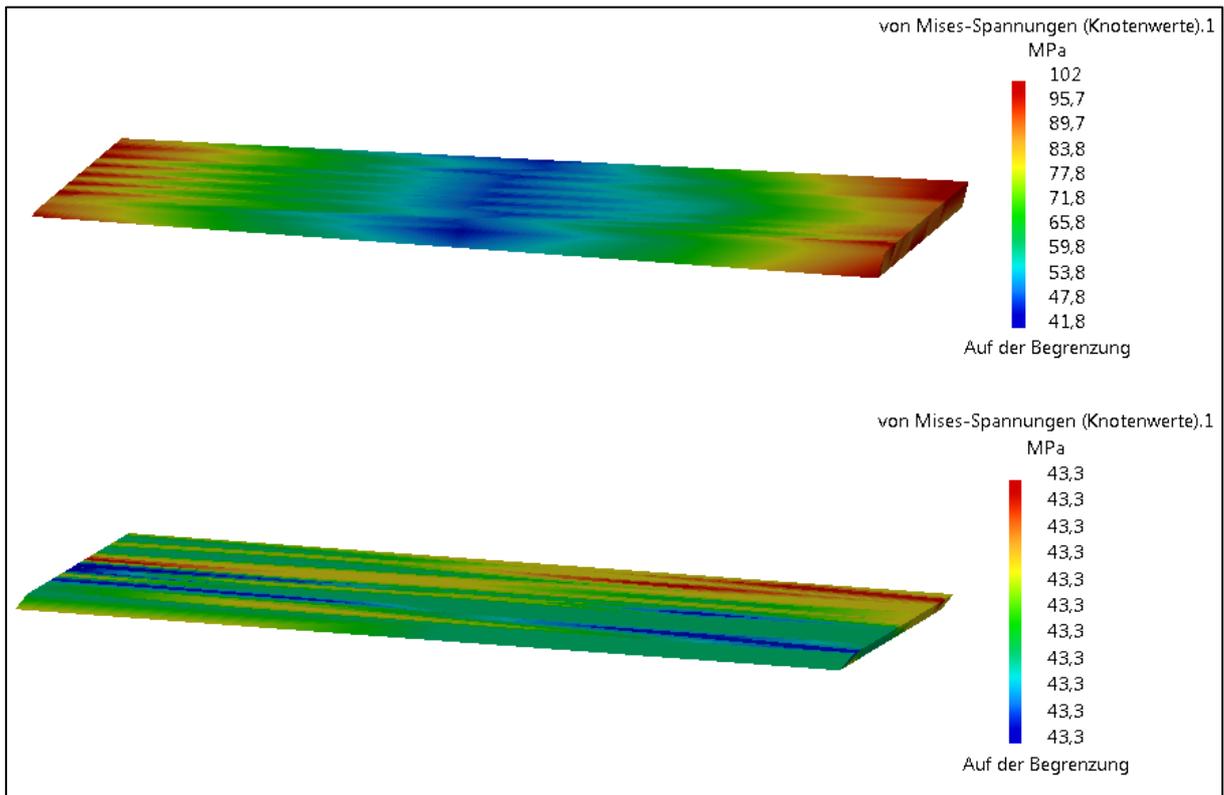


Abbildung 38: Vergleichsspannung nach Mises im Klebespalt: überlappend (oben), gestuft (unten) /CAT Analysis/

Eine Begünstigung der reinen Schubbeanspruchung entsteht durch die Führung mit einer Lagereinheit. Für die zylindrischen Körper eignen sich im Handel erhältliche Linearlager mit Kugelumlaufeinheiten. Mit einer einstellbaren Vorspannkraft gestaltet sich diese Lagerung spielfrei und wirkt somit einer Fügeteilverformung in Querrichtung entgegen. Nach demselben Prinzip, aber mit größerem Aufwand verbunden, können Bolzenführungen die quadratischen Proben seitlich führen.

Aus der Analyse des Biegemomenteinflusses geht hervor, dass die fehlerfreie Einspannung ein ebenso wichtiger Indikator für eine korrekte Messung darstellt. Zur Auswahl stehen kraftschlüssige und formschlüssige Mechanismen, um die Probe im Versuch an den Traversen zu fixieren. Demzufolge muss die Scherprobe über eine gleichmäßige Mantelfläche zum Spannen oder einem Gewinde zum Einschrauben verfügen. Weitere Überlegungen gelten der notwendigen Kontaktierung zur Leitfähigkeitsmessung. Die Elektroden dürfen während der Messung keine Irritation erfah-

ren, sei es durch mechanische Kräfte, Magnetismus oder thermisch zugeführter Energie. Mit einem definierten Anpressdruck ist die Aufrechterhaltung der Leitfähigkeitsmessung am stabilsten. Ein weiteres Funktionsmerkmal zur Herstellung der Scherprobe ist die Positioniervorrichtung. Ein reproduzierbarer Klebspalt ist nur dann möglich, wenn alle Form- und Maßtoleranzen nicht nur der Fügeteile, sondern ebenso der Komponenten der Vorrichtungskonstruktion unter einem zulässigen Grenzwert liegen. Eine Prismenaufnahme für zylindrische Prüfkörper eignet sich ebenso wie eine ebene Bezugsfläche für flache quadratische Körper. Der Vorteil eines Prismas liegt darin, dass mit zwei Anschlagpunkten mehrere Freiheitsgrade gleichzeitig bestimmt werden. Die einfache Bezugsebene zum Ausrichten der Körper verlangt zusätzliche Fixiereinheiten und somit auch weitere Fehlerquellen in der Addition einer Toleranzkette. Aus der Konstruktionslehre bekannte präzise gefertigte Normteile wie Passfedern und Passstifte ergänzen die Konzeptfindung zur Herstellung der Probenkörper. Eine Klebdickeneinstellung sollte vorgesehen werden. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die vier Vorzugsvarianten dargestellt, deren Lösungen und Funktionen sich farblich unterscheiden.

Tabelle 4: Matrix zur Variantenaufstellung ("Morphologischer Kasten")

Teilfunktion	Lösungen			
Werkstoff	Stahl ● ● ● ●	Al-Legierung	Cu-Legierung	
Geometrie	Zylinder ●	Quader ● ● ●		
Anbindung	kraftschlüssig mit Spannbacken ● ●	formschlüssig mit Gewindestange ● ● ●		
Biegemoment-einfluss	einfach überlappend	mit Absatz ● ● ● ●	Linearführung ●	Bolzenführung ●
Positionier-vorrichtung	Grundplatte mit Passstifte ●	Grundplatte mit Exzenterschraube und Arretierbolzen	Grundplatte mit Passfeder ●	Prisma ●
Kontaktierung	Auflöten	Schraubenklemme ● ● ●	Klemmen ●	

Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Variante 1

Die Abbildung 39 zeigt die Klebevorrichtung zweier zylindrischer Fügeteile mit Absatz. Die Prismen-Aufnahme zentriert die Körper auf die Manteloberfläche. Alle Freiheitsgrade bis auf die Translation in Achsrichtung und die Rotation um eben diese Achse werden eingeschränkt. Eine hier dargestellte Deckelbaugruppe klemmt die Zylinder mittels D-Cut in das Prisma, sodass die Klebefläche sich parallel zueinander ausrichten. Die Stirnseiten erfahren ebenfalls eine Spannkraft in Achsrichtung, sodass die Klebefläche eine definierte Überlapplänge erzielt. Das Einstellen definierter Klebdicken erreicht man mit einer Erhöhung der Auflagefläche eines Fügekörpers, macht aber eine im Zugversuch unterstützende Linearführung nicht mehr möglich. Die Elektroden zur Leitfähigkeitsmessung werden auf die Proben geklemmt.

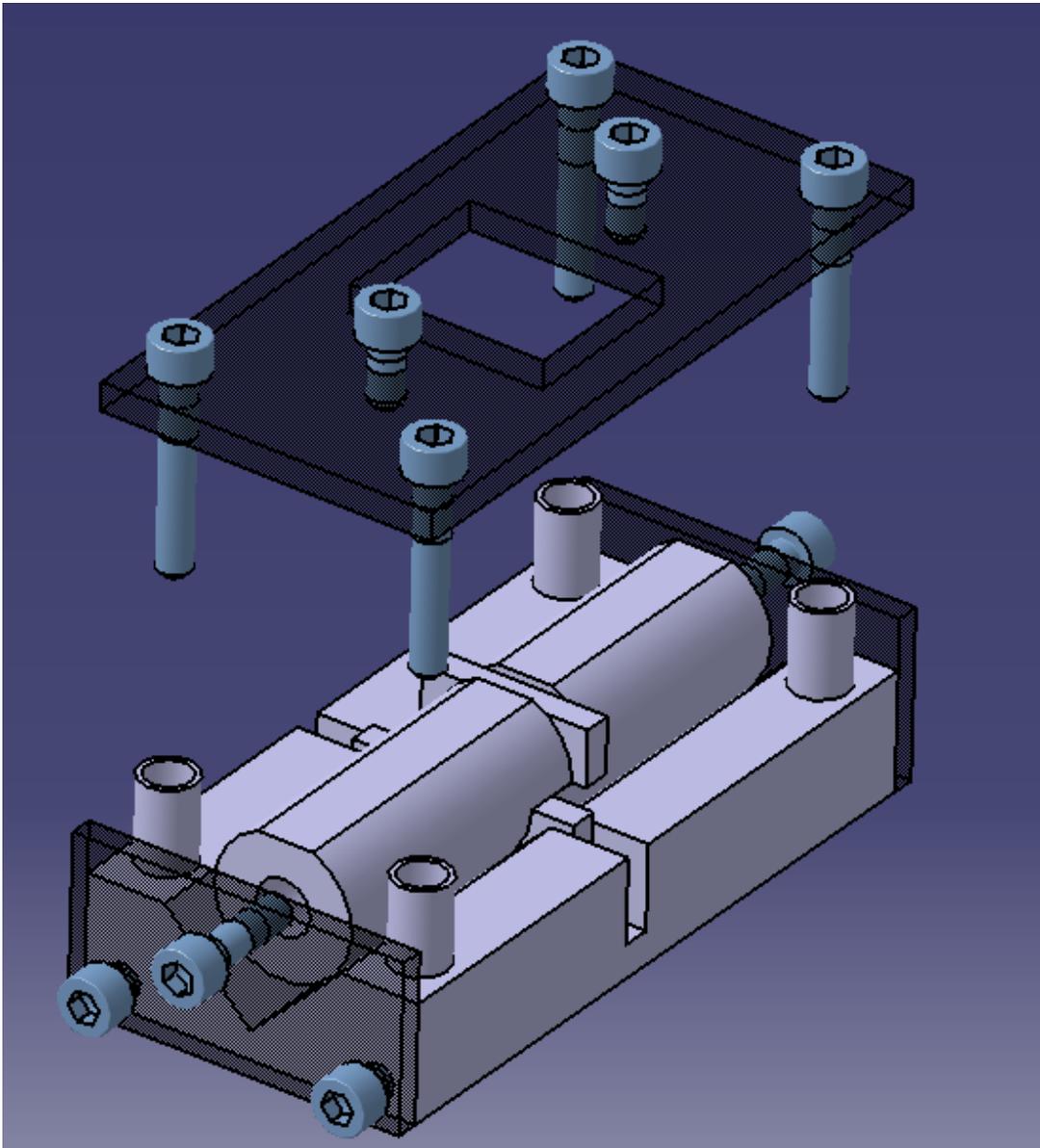


Abbildung 39: Variante 1 /CAT/

Variante 2

Ein anderes Konzept aus geklebten Quaderstücken zeigt Abbildung 40. Hier ist die Bezugsfläche eine gefaste Grundplatte, auf der die Körper geschraubt werden. Die Proben haben auf ihrer Auflageseite eine Nut. Sie dient als Führung für eine in der Grundplatte befindliche Passfeder. Die Überlapplänge wird durch die Breite des Distanzstückes aus Teflon bestimmt, denn die Spanneinheit an den Stirnseiten sorgt für die notwendige Vorspannung. Die Klebdicke kann hier ebenfalls mit einer zusätzlich untergelegten Schicht realisiert werden. Im Falle, dass der Spannungszustand in Folge des Biegemomentes sich nicht als vernachlässigbar klein erweist, sind Bohrungen zur Teillösung einer parallel zum Probenaufbau justierten Bolzenführungseinheit vorgesehen. Die Kontaktherstellung zur Vierpunktmessung erfolgt mittels Klemmschrauben für einen festen Anpressdruck.

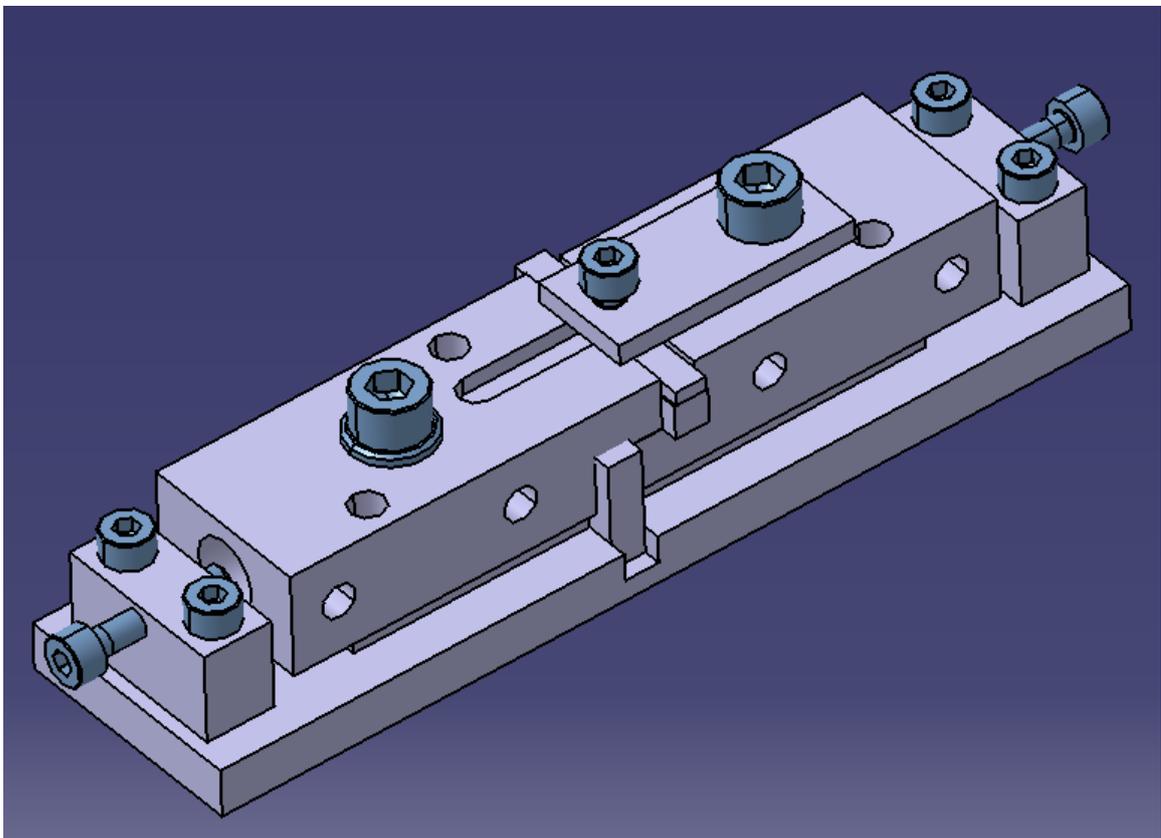


Abbildung 40: Variante 2 /CAT/

Variante 3

Eine dritte Variante zur Positionierung der quaderförmigen Fügeteile setzt auf die Positioniergenauigkeit der Passstifte. Die Schrauben pressen die Körper auf die Grundplatte. Dieses Konzept ist sehr einfach, ermöglicht jedoch nicht die Verände-

zung der Überlappungslänge. Die elektrischen Kontakte zur Leitfähigkeitsmessung werden am Aufbau geklemmt.

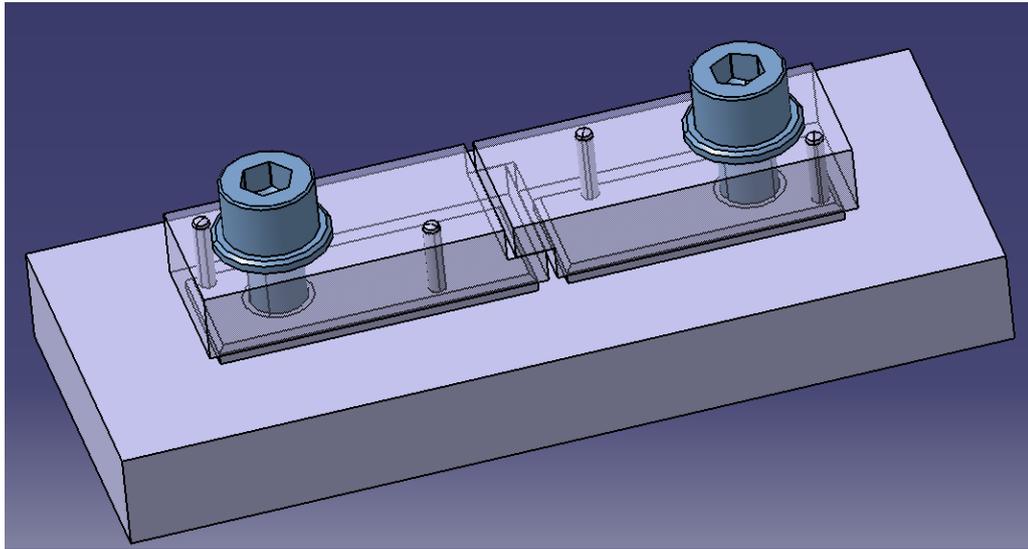


Abbildung 41: Variante 3 /CAT/

Variante 4

Eine weitere Lösung wird in Abbildung 42 umgesetzt. Die Freiheitsgrade der zu fügenden Teile werden durch Vorspannkräfte bestimmt. Die Exzentrerschrauben drücken die Werkstücke auf die in der Grundplatte eingepressten Arretier-Bolzen. Die Variation der Überlappungslänge und Kleberdicke ähnelt der Variante 2. Die elektrisch leitfähigen Kontakte werden geschraubt.

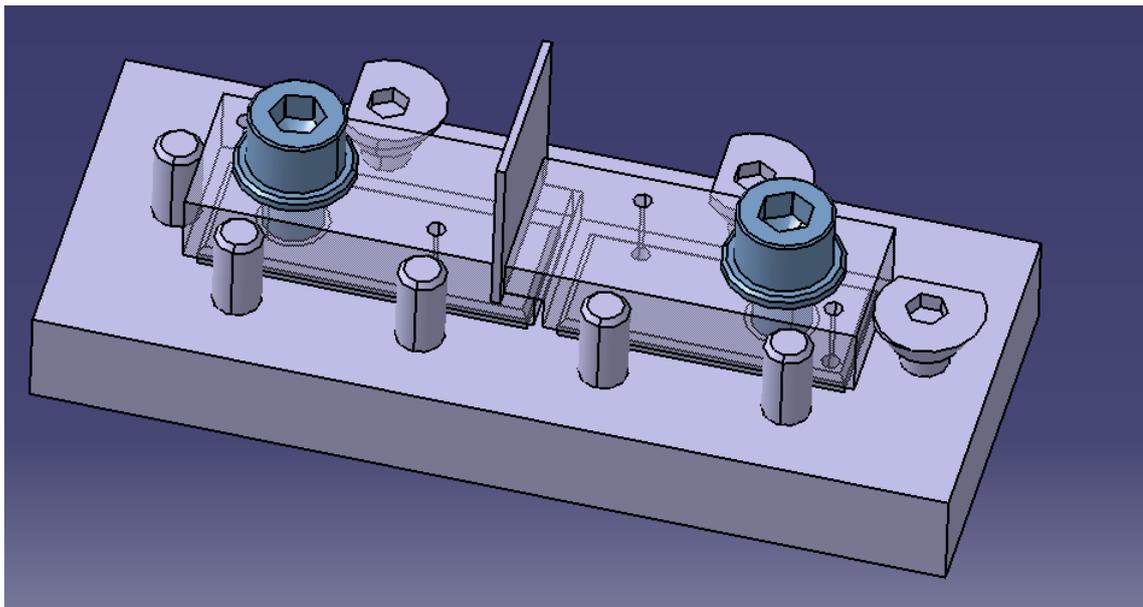


Abbildung 42: Variante 4 /CAT/

4.1.3 Variantenvergleich

Im Anschluss werden die Vorzugsvarianten nach unterschiedlichen anwendungsspezifischen Merkmalen untersucht und rechnerisch oder durch den Eindruck mehrerer Personen aus verschiedenen Aufgabenbereichen bewertet. Als Grundlage dient die Tabelle 5 mit einer Bewertung nach VDI- Richtlinie 2225-1.

Tabelle 5: Bewertungsvorschrift nach VDI 2225-1

Allgemeine Wertskalen							
Konkurrenzbew.		Stiftung Warentest		Richtl. VDI 2225 /1/		Nutzwertanalyse /9/	
Pkt.	Bedeutung	Symb	Bedeutung	Pkt	Bedeutung	Pkt	Bedeutung
0	schlecht	--	unbefriedigend	0	unbefriedigend	0	praktisch unbrauchbare Lösung
						1	sehr mangelhafte Lösung
		-	noch tragbar	1	gerade noch tragbar	2	schwache Lösung
						3	tragbare Lösung
1	gut	0	Ausreichend zufriedenstellend	2	ausreichend	4	Ausreichende Lösung
						5	Befriedigende Lösung
		+	gut	3	gut	6	gute Lösung mit geringen Mängeln
						7	gute Lösung
		++	sehr gut	4	sehr gut (Ideal)	8	sehr gute Lösung
						9	über die Zielvorstellung hinausgehende Lösung
10	Ideallösung						

Nicht jedes Merkmal ist gleich bedeutend, sodass sich mit der Vorgehensweise des paarweisen Vergleiches Wichtungen für jedes Kriterium ergeben. Die Kriterien werden vergleichend gegenübergestellt und mit dem Wert 1 bis 3 versehen. Die Auswahl der einflussreichsten Kriterien zur Einschätzung der Vorzugsvarianten sind in Tabelle 6 näher erläutert und werden in Tabelle 7 verglichen.

Tabelle 6: Bewertungskriterien

Merkmal	Erläuterung
Fertigungsgenauigkeit	Einhaltung Form- und Lagetoleranz
Reproduzierbarkeit	wiederholbare Abmessungen Klebspalt
Biegemomentenausgleich	Maßnahme gegen Verformung im Zugversuch
Kontaktierung	Aufrechterhaltung des konstanten Stromflusses
Einfachheit Klebevorgang	Montageaufwand und Justage
Variation Klebergeometrie	Verstellbarkeit der Klebdicke und Überlapplänge

Tabelle 7: Paarweisenvergleich zur Wichtung der Vergleichsmerkmale

Nr.	Merkmal	1	2	3	4	5	6
1	Fertigungsgenauigkeit	-	2	1	1	1	1
2	Reproduzierbarkeit	2	-	1	1	1	1
3	Biegemomentenausgleich	3	3	-	2	1	1
4	Kontaktierung	3	3	2	-	1	2
5	Einfachheit Klebevorgang	3	3	3	3	-	3
6	Variation Klebergeometrie	3	3	3	2	1	-
Σ		14	14	10	9	5	8
W		0,23	0,23	0,17	0,15	0,08	0,13

1 - weniger wichtig

2 - gleichwertig

3 - wichtig

Die eigentliche Bewertung wird im nächsten Arbeitsschritt durch Vergabe von Werten durchgeführt. Die technisch ermittelten Eigenschaftsgrößen bekommen in Abhängigkeit einer mathematischen Wertfunktion eine Bewertung oder eine einfache subjektive Wertvorstellung. Nach VDI Richtlinie wird ein kleines Wertspektrum für eine Punktzahl von 0 bis 4 empfohlen.

Tabelle 8: Vorzugsvarianten mit Bewertung

Nr.	Merkmal	Wichtung	V 1	V 2	V 3	V 4
1	Fertigungsgenauigkeit	0,23	4	3	2	2
2	Reproduzierbarkeit	0,23	1	3	3	3
3	Biegemomentenausgleich	0,17	4	3	2	2
4	Kontaktierung	0,15	1	4	3	4
5	Einfachheit Klebevorgang	0,08	2	3	4	2
6	Variation Klebergeometrie	0,13	2	4	2	4
Bewertung			2,42	3,28	2,55	2,80
Normierter Wert			0,6	0,82	0,64	0,7

$$W_T = \sum_{i=1}^n f(x) = \sum_{i=1}^n W_i * P_i$$

$$W_{Tn} = \frac{W_T}{P_{\max}}$$

Die Ergebnisse der technischen Untersuchung der Varianten sind mit ihren erreichten Punktzahlen in Tabelle 8 abgebildet. Für einen korrekten Vergleich wird die technische Bewertung über der wirtschaftlichen Bewertung, in einem Diagramm normiert, auf die beste Wertung abgetragen (Abbildung 43). Für die Wirtschaftlichkeit werden die Herstellungskosten der Vorrichtungsvarianten aufgelistet zusammengefasst. Im Anhang 2 finden sich die Einzelteilkosten einer Variante, die sich aus Angebotsanfragen, Einkaufspreisen oder Schätzungen ergeben. Dabei werden die tatsächlichen Herstellkosten jeder Lösung auf die idealen Kosten der günstigsten Variante bezogen.

$$W_{Wn} = \frac{K_{\text{ideal}}}{K_i} = \frac{0,8 * K_{\min}}{K_i}$$

Die Vorteile und Nachteile der Lösungsvarianten spiegeln sich in Bewertungsdiagramm der Abbildung 43 wider. Entlang der linearen Funktion verläuft das Optimum zwischen der technischen Lösung und der Wirtschaftlichkeit. Daraus geht hervor, dass eine technisch bessere Lösung einen größeren Kostenaufwand nach sich zieht und umgekehrt. Je näher eine Lösung zum Idealpunkt liegt, umso besser ist sie. Ausgewogene Lösungen mit annähernd gleicher wirtschaftlicher und technischer Wertigkeit finden sich auf der Hauptdiagonale. Abschließend lässt sich sagen, dass die Variante 2 aus technischer Sicht mit einer Bewertung von 0,82 den Vorzug bekommt. Im Rahmen einer möglichen Lösung ist die Variante 3 auch ausreichend, sofern auf Veränderung der Klebefläche und deren Passgenauigkeit verzichtet werden kann. Die Variante 4 ist etwas kostenaufwendiger auf Grund vieler Einzelteile. Am ungeeignetsten zeigt sich die Variante 1 mit der Fügung zylindrischer Probenkörper in einem Prisma. Wegen Ungenauigkeiten in der Fertigung der Stufen und der Positionierung in der Vorrichtung über die D-Cuts ist eine ideale Reproduzierbarkeit nicht gewährleistet.

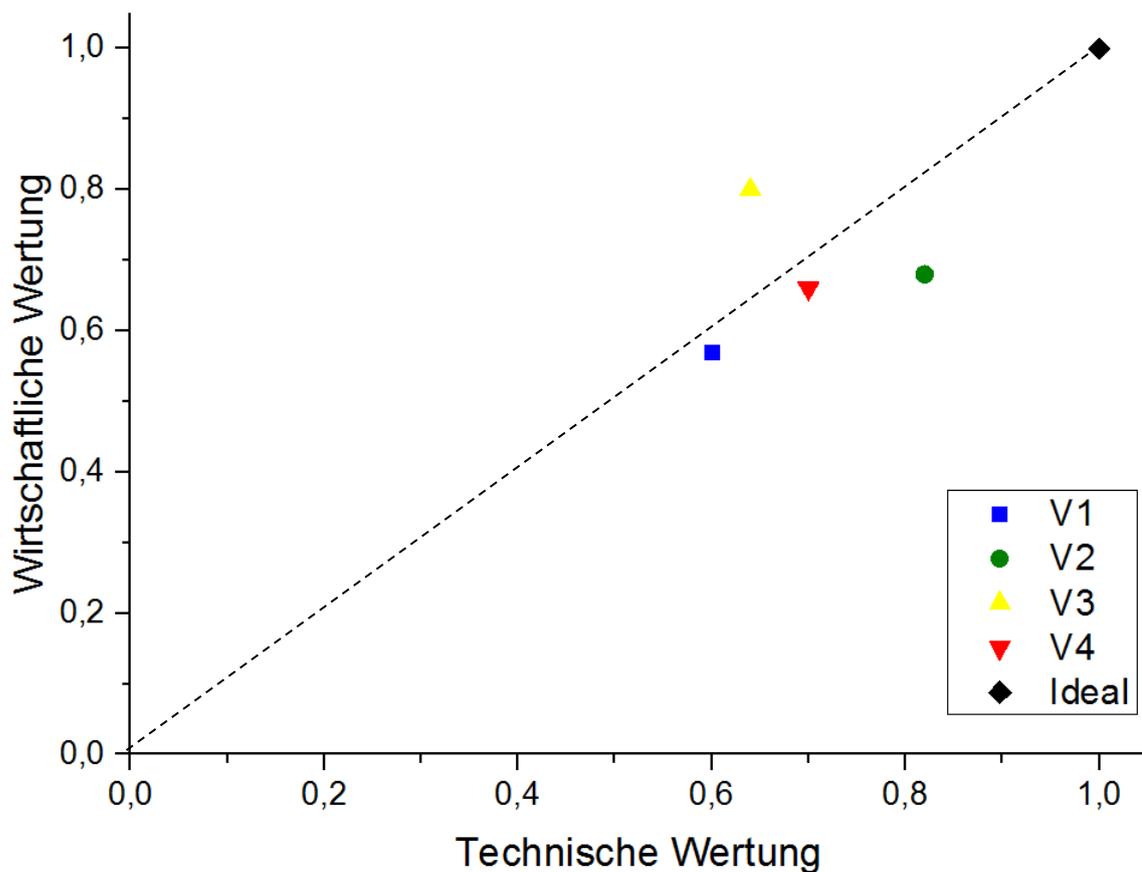


Abbildung 43: Stärke-Diagramm der Lösungsvarianten

4.1.4 Konzeptlösung und Konstruktion

Die konstruktive Umsetzung der Lösungsvariante zwei erfolgt mit CATIA V5 R19. Sie besteht aus zwei Unterbaugruppen: Dem Probenaufbau mit zwei Fügeteilen samt Kleber und dem Vorrichtungsaufbau. Die Fügeteile verlangen ein hohes Maß an Genauigkeit. Um die Form- und Lagetoleranzen der quaderförmigen Fügeteile so klein wie möglich zu halten, bedarf es einer bestimmten Fertigungsstrategie. Als Halbzeug liegt ein Präzisionsstahl oder Flachstab vor. Sind die Außenmaße und Oberflächenansprüche gegeben, wird im ersten Schritt der Absatz gefräst. Im zweiten Schritt werden die einzelnen Teile in Querrichtung zugeschnitten und im weiteren Fertigungsprozess nachbearbeitet. Im Idealfall entstehen somit nahezu identische Fügeteile, die als Paar ineinander gesetzt konstante geometrische Bedingungen für den Klebespalt liefern.

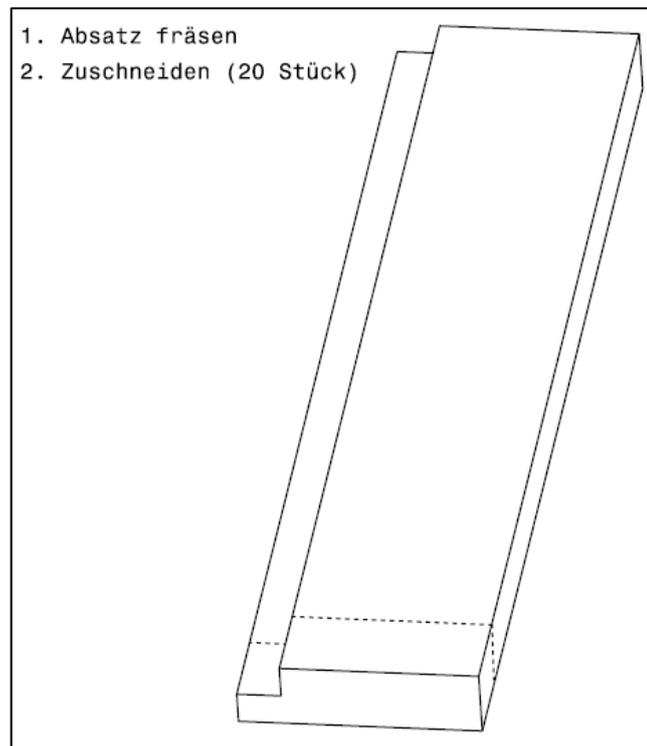


Abbildung 44: Fertigung der Fügeteile /CAT /

Der geklebte Probenaufbau ist in Abbildung 45 zu sehen. Auf Ober- und Unterseite befinden sich die Passfedernuten, die die Funktion einer Führung im Klebevorgang erfüllen und eine Durchgangsbohrung zum Klemmen. Die Enden können in den Spannsatz der Zugmaschine sowohl eingeschraubt als auch geklemmt werden. Zusätzliche Gewindebohrungen werden zur Kontaktierung der Elektroden verwendet und können im Falle einer zu großen Verformung im Zugversuch der Justage einer Führungseinheit (siehe Anhang 1: Morphologischer Kasten) dienen.

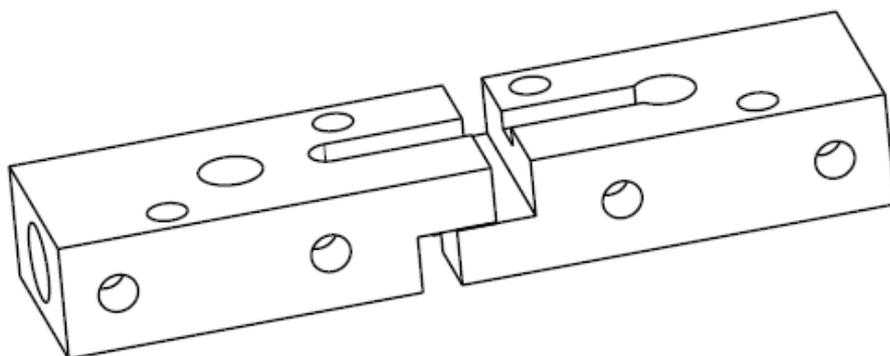


Abbildung 45: Scherprobenaufbau nach Klebung /CAT /

Die Maße zur Auslegung der Probenkörper stimmen bezüglich der Klebefläche aus DIN EN 14869 zur Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen überein. Die Vorrichtungskonstruktion besteht aus einer Grundplatte und der darauf befindlichen Teile zur Positionierung und Klemmung der Proben. Die Lösungsvariante

zwei galt bisher nur für die Herstellung einer Scherprobe. Mit der Vergrößerung der Grundplatte bei gleichzeitiger Vervielfältigung ist die Konstruktionsänderung problemlos durchführbar. Im Anhang 3 befinden sich die zur Abbildung 46 gehörigen Einzelteilzeichnungen mit der Stückliste.

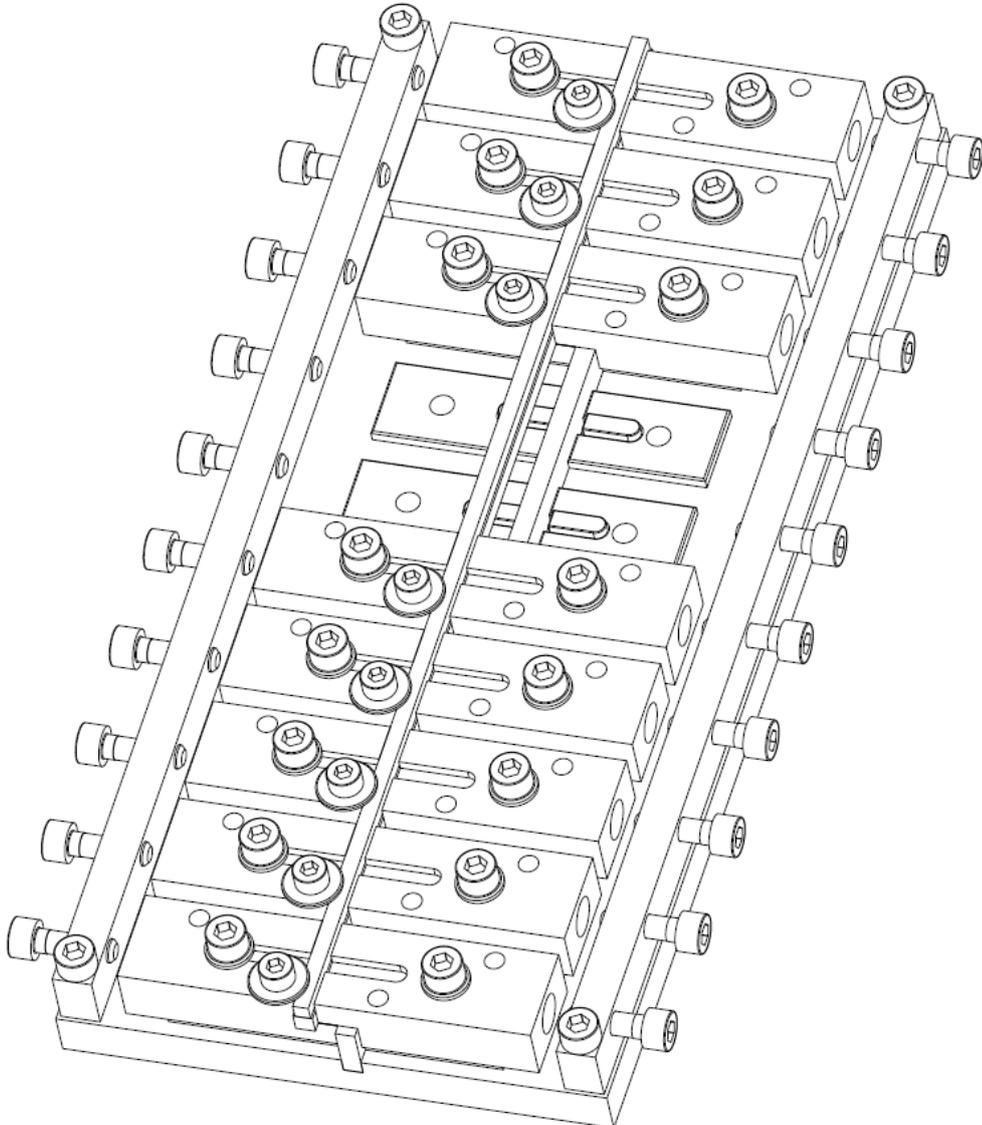


Abbildung 46: Zusammenbau der Klebevorrichtung /CAT/

Gleichzeitig wird die Klemmfunktion ebenfalls aus wirtschaftlicher Sicht optimiert. Die gefaste Grundfläche mit eingepresster Passfeder dient als Bezugsfläche und Führungselement zur Ausrichtung der Fügeteile. In Längsrichtung werden die Körper stirnseitig gegen einen Block aus Teflon gedrückt. Er bestimmt die Geometrie der Klebefläche und kann variiert werden, wie auch die Klebedicke durch Unterlegen eines gedachten Stahlstreifens. Der eingelegte Teflon-Block hat etwas Übermaß, so dass der Zwischenraum ausgefüllt und die Klebefläche begrenzt wird. Spannschrauben und Vierkantstab fixieren den Aufbau für den folgenden Aushärteprozess.

4.2 Entwicklung Scherzugversuchsaufbau

Zur Durchführung der Ermüdungsversuche steht eine servohydraulische Tischprüfmaschine Landmark® der Firma MTS Testing Solutions zur Verfügung. Für die Versuche, die kraft- und weggesteuert ablaufen können, ist eine maximale Kraft bis 25 kN messbar. Der Aktuator ist dabei in der oberen Traverse, die Kraftmessdose gegenüberliegend auf der Tischseite montiert. Die Positionsbestimmung erfolgt sowohl über den Kolbenhub als auch über ein direkt an der Probe angebrachtes Extensometer. Sehr gut eignet sich diese Prüfmaschine für hochdynamische zyklische Ermüdungsbeanspruchungen. Das Lastumkehrspiel und die Trägheit mechanischer Antriebselemente, wie beispielsweise in einer Spindereinheit, werden durch das hydraulische Antriebskonzept vermieden. Je nach Steifigkeit der Probe und der Traversenanbindung ist ein Arbeitsbereich bis zu 80 Hz möglich. Verantwortlich für die Versuchsplanung und Steuerung sowie Datenerfassung steht die Hard- und Software der MTS Systems GmbH. Analoge beziehungsweise digitale Ein- und Ausgänge können den Messaufbau ergänzen. Der modulare Anbau einer geschlossenen Kammer ermöglicht die Einstellung der Prüftemperatur. Hierzu sind die Traversensäulen an eine integrierte Wasserkühlung anzuschließen.



Abbildung 47: MTS Landmark 370.02 / MTS10/

4.2.1 Das Spannzeug

Wie bereits in Kapitel 3.4.2 erklärt, sind geklebte Proben auf ungewollte Querkräfte durch ein fehlerhaftes Einspannen sehr anfällig. Eine Vorschädigung der Klebung bedingt eine große Streuung der Versuchsergebnisse. Die Abbildung 48 zeigt drei fehlerhafte Einspannungen, die den Ermüdungsverlauf einer Probe beeinflussen. Nicht exakt fluchtende Traversen, exzentrisch eingespannte Proben und Winkelfehler im gesamten Systemaufbau beschreiben schematisch das Hervorrufen einer zur Normalspannung induzierten Biegebeanspruchung.

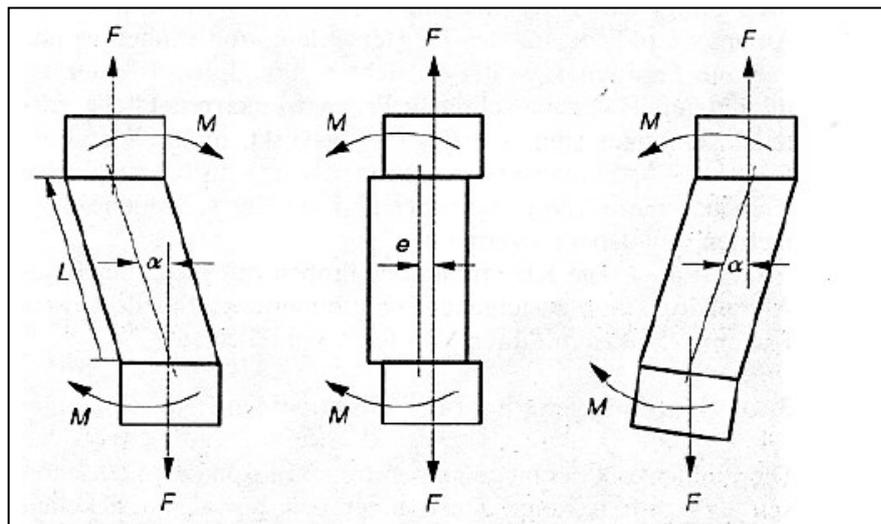


Abbildung 48: Fehler beim Einspannen: Fluchtungsfehler (links), Exzentrizität (mitte), Winkelfehler (rechts) /FLE11/

Die MTS verfügt über ein hydraulisches Spannzeug zum Fixieren einer flachen Probe durch Kraftschluss. In der Regel werden sogenannte Schubstanzproben zuerst am unteren Ende eingespannt, die bestehende Gewichtskraft als Ausgangsgröße über die Kraftmessdose erfasst und danach die oberen Spannbacken geschlossen. Dabei richtet sich die obere Spanneinheit aus und kann mittels zweier Klemmscheiben verspannt werden, ohne dass ein Drehmoment in der Einspannung entstehen kann. Für die geklebten Scherproben ist diese Art der Einspannung nicht geeignet, da beim Ausrichten kurzzeitig Kräfte wirken, die die Klebung erheblich vorschädigen. Die bessere Lösungsmöglichkeit bietet das Einschrauben der Proben an den Traversen. Sowohl in der Probe, als auch im Traversenende sind Innengewinde vorgesehen. Aus Kapitel 3.4.2 ist die Gelenkfunktion bekannt, mit der ungewollte Drehmomente vermieden werden können. Umsetzen lässt sich diese Funktion mit dem Einsatz eines kostengünstigen Kugelgelenkkopfes. Das sphärische Gelenk verhindert beim Verschrauben der Gewindeachsen mit einer Kontermutter die Übertragung des Anzugsmomentes. Das Produkt RBID10 der Firma Misumi hält einer zulässigen

radialen Traglast von 16,8 kN stand. In Axialrichtung sollten 8,43 kN Last nicht übertraffen werden.

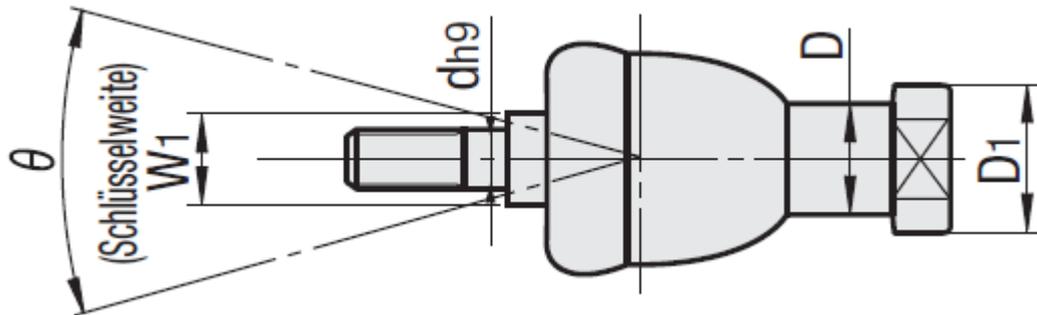


Abbildung 49: Kugelgelenkkopf RBID10 /MISUMI14/

Auf Grund des Lagerspiels im Gelenk ist diese Komponente in dem Versuch zur Wechselastbeanspruchung nicht geeignet, da ein schlagartiger Kraftabfall und Kraftanstieg im Umkehrspiel für Regelschwierigkeiten sorgt und stoßartige Impulse verursacht. Für diesen Fall ist es erforderlich, die Scherprobe direkt über eine Gewindestange in das Traversenende einzuschrauben und mit Muttern zu kontern. Ein zu großes Anziehdrehmoment kann die Probe schädigen. Da das Ermüdungsverhalten unter einer kleinen Wechsellast erfolgt, kann mit einem schwach eingestellten Drehmomentschlüssel die Kontermutter angezogen werden. Erfahrungen an vergleichbar fixierten Bauteilen haben gezeigt, dass das Ausrichten und Korrigieren eines Winkelfehlers mit einer Gewindeachse in einer Gewindebohrung minimal möglich ist. Erst durch das Anziehen der Mutter wird das Spiel überwunden und der Formschluss ist gegeben.

4.2.2 Dehnungsmessung

Eine für die Messung relevante Größe ist die Längenänderung oder Verformung der Scherprobe. Die MTS-Prüfmaschine verfügt über ein Wegmesssystem, das sich am Austritt der oberen Traverse befindet und misst somit nicht nur die Längenänderung der Scherprobe, sondern auch die der Halterung und Spannkompone. Für die Wahl eines geeigneten Extensometers sind die technischen Anforderungen zu untersuchen. Laut technischem Datenblatt des Herstellers hat der Leitkleber Elecolit 3653 eine Zugscherfestigkeit von $\tau = 16,7 \text{ MPa}$ und einen Elastizitätsmodul von $E = 2210 \text{ MPa}$. Analytisch berechnet werden die verbleibenden Kenngrößen eines Zugversuches mit den aus Kapitel 3 eingeführten Formelgrundlagen. Angenom-

men wird eine aus der Literatur entnommene Querkontraktionszahl /HAB08, S.284/ für Epoxidharze. Die Geometrie des Klebspaltes entspricht der Konzeptlösung.

Tabelle 9: Kenngrößen im Zugversuch

Scherfestigkeit	E-Modul	Poissonzahl Epoxid	Schubmodul	Fläche	Zugkraft	Kleberdicke	Verformung
τ	E	ν	G	A	F	d	Δx
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[mm ²]	[N]	[mm]	[μ m]
16,7	2210	0,42	778,17	125	2087,5	0,1	2,15

Bei einer zu erwarteten maximalen Scherkraft von rund $F = 2088 \text{ N}$ verformt sich der Kleber um $\Delta x = 2,15 \mu\text{m}$. Dieser Wert ist eine Näherung für eine elastische Anfangsdehnung. Im realen quasistatischen Scherversuch ist mit einer größeren Deformation bis zum Bruch zu rechnen, denn der Klebstoff neigt zu plastischem Verhalten beziehungsweise Kriechen. Die Zugmaschine hat nach Herstellerangaben eine Traversensteifigkeit von $c_T = 345 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ und bedeutet unter der in Tabelle 9 angenommenen Last F eine elastische Längsdehnung des Stahls von $6,05 \mu\text{m}$.

$$\Delta l_T = \frac{1}{c_T} * F = \frac{1}{345 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}} * 2088 \text{ N} = 6,05 \mu\text{m}$$

$$\Delta l_T > \Delta x$$

Mit diesem Berechnungsansatz lässt sich schlussfolgern, dass eine zusätzliche Dehnungsmessung benötigt wird, die die Relativbewegung im Klebspalt mit ausreichend großer Genauigkeit messen kann. Nach DIN EN 14869 wird eine induktive Extensometerausführung beschrieben, die in diesem Bereich bereits erfolgreich zur Dehnungsmessung angewendet wurde. Das Extensometer (Abbildung 50) besteht aus einem starrem Rahmen und einem inneren Teil, das mit Blattfedern parallel zu diesem Rahmen bewegt werden kann. Das Gehäuse eines Messwertgebers wird an dem inneren beweglichen Teil befestigt, während der Kern des Messwertgebers starr zum Rahmen ist. An einer Seite des Extensometers sind drei Messstifte angebracht, einer am starren, die anderen am beweglichen Teil. Wenn die Probe beansprucht wird, bewegen sich die beiden Hälften der Probe voneinander fort. Die relative Bewegung dieser beiden Probenhälften führt zu einer relativen Bewegung der Stifte zueinander, was zu einer Bewegung einer Tauchspule in der elektrischen Spule des Messwertgebers führt. Verbunden über einen Messwertverstärker wird proportional der Relativbewegung ein elektrisches Signal ausgegeben. Zwei Extensometer dieser Art sind mit einer Spezialhalterung an der Probe befestigt.

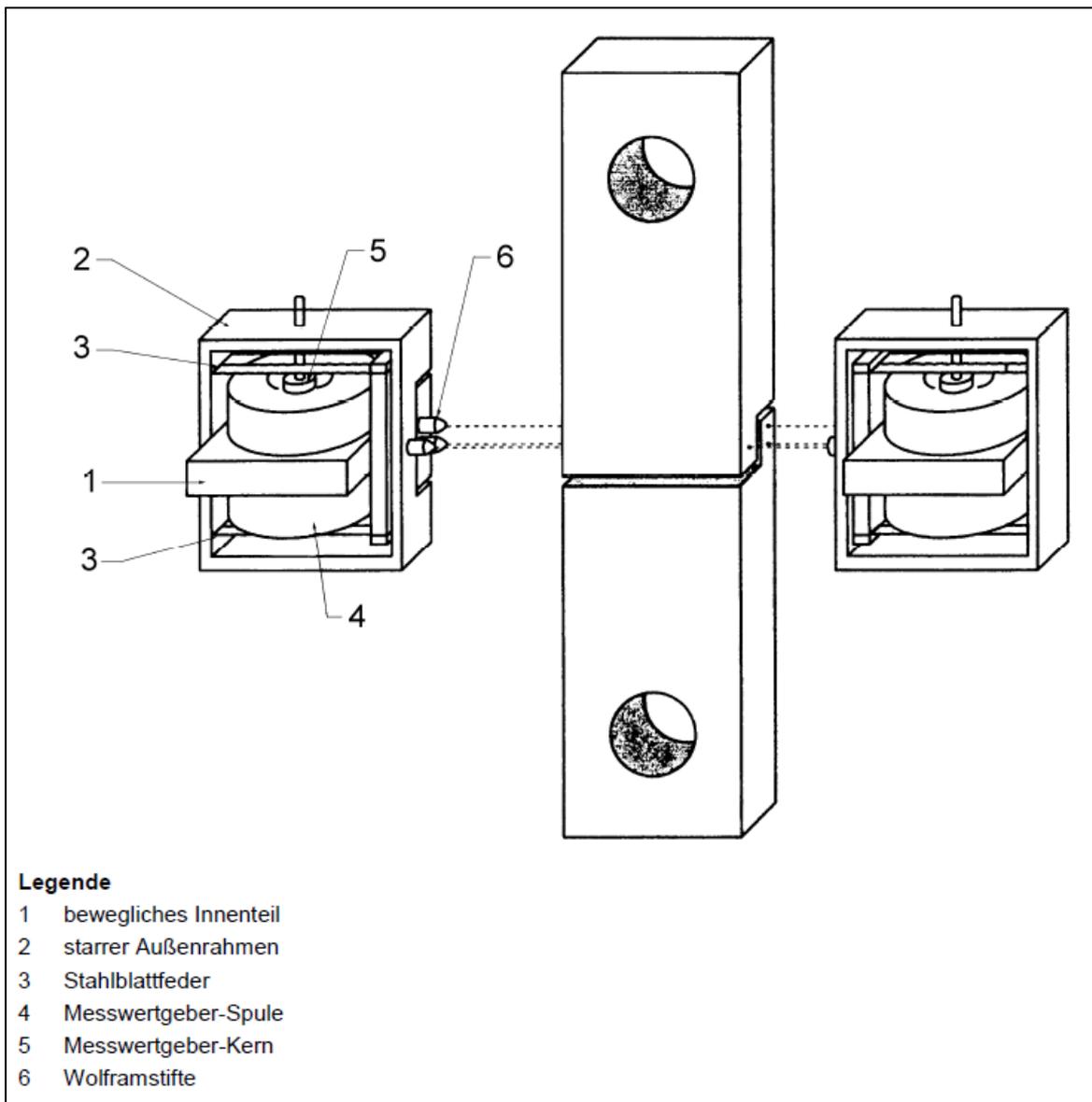


Abbildung 50: Induktiver Messwertaufnehmer /DIN2, S.8/

Der Induktionsmesser hat ein Auflösungsvermögen von ungefähr 1 μm . Da der Funktionsaufbau aus mehreren Komponenten besteht, die mechanisch angeregt werden und somit Trägheits- und Reibungskräften ausgesetzt sind, ist das Messprinzip weniger geeignet für frequenz-angeregte Scherversuche.

Ein in der Materialforschung modernes System zur Deformationsmessung ist das Videoextensometer. Die berührungslose Bestimmung der Deformation basiert auf präzisen Bildverarbeitungsalgorithmen von Kanten oder Markierungen an der Oberfläche einer Zugprobe. Voraussetzung sind Kontrastunterschiede zum Detektieren eines einzigartigen Musters beziehungsweise einer Hell-Dunkel-Abdeckung über eine Fläche abgelegter Pixel. Entscheidend für die Genauigkeit dieses Messverfahrens ist die Optik der Kamera. Die richtige Einstellung der Lichttechnik, Zoom und Schärfe müssen Störungen wie zum Beispiel das Bildrauschen auf ein Minimum

halten. Ein größtmöglicher Zoomfaktor bedeutet zwar eine große Anzahl von Pixel pro Längeneinheit auf dem Bild oder Video, jedoch verliert diese Vergrößerung auch an Tiefenschärfe und verstärkt ein mögliches Bildrauschen. Im Fraunhofer CSP steht eine Software zur digitalen Bildkorrelation auf Basis von LabVIEW zur Verfügung. Ausgangspunkt und Eingabe für die Bildkorrelation ist die zuvor mit einem Image-Converter in Bilder geschnittene Videoaufzeichnung. Die übliche Bildabtastung oder Framerate liegt bei 30 Bildern je Sekunde. Die Abbildung 51 zeigt den Aufbau der Benutzeroberfläche. Die eingelesene Bildfolge wird schrittweise erfasst. Dessen Muster wird erkannt und mit dem Referenzbild verglichen. Aus den gemessenen Pixelkoordinaten des Musters werden die Verschiebungen berechnet. Um die gemessene Pixelgröße einer Längeneinheit zuordnen zu können, muss die Verformung an Hand einer bekannten Bewegung oder eines bekannten Längenabschnittes kalibriert werden.

In einem Versuchsaufbau werden drei verschiedene Kameraaufbauten getestet. Die aufgenommenen Videos haben die Pixel-Auflösung 1920 x 1080 und unterscheiden sich durch ihre Wechselobjektive, welche unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe ermöglichen. Wie in Abbildung 51 veranschaulicht, filmt die an einem stabilen Stativ befestigte Kamera die Bewegung einer induktiv angetriebenen Tauchspule. Die Bewegung ist bekannt, da der Glasmaßstab mit einer Auflösung 0,1 μm genau misst.

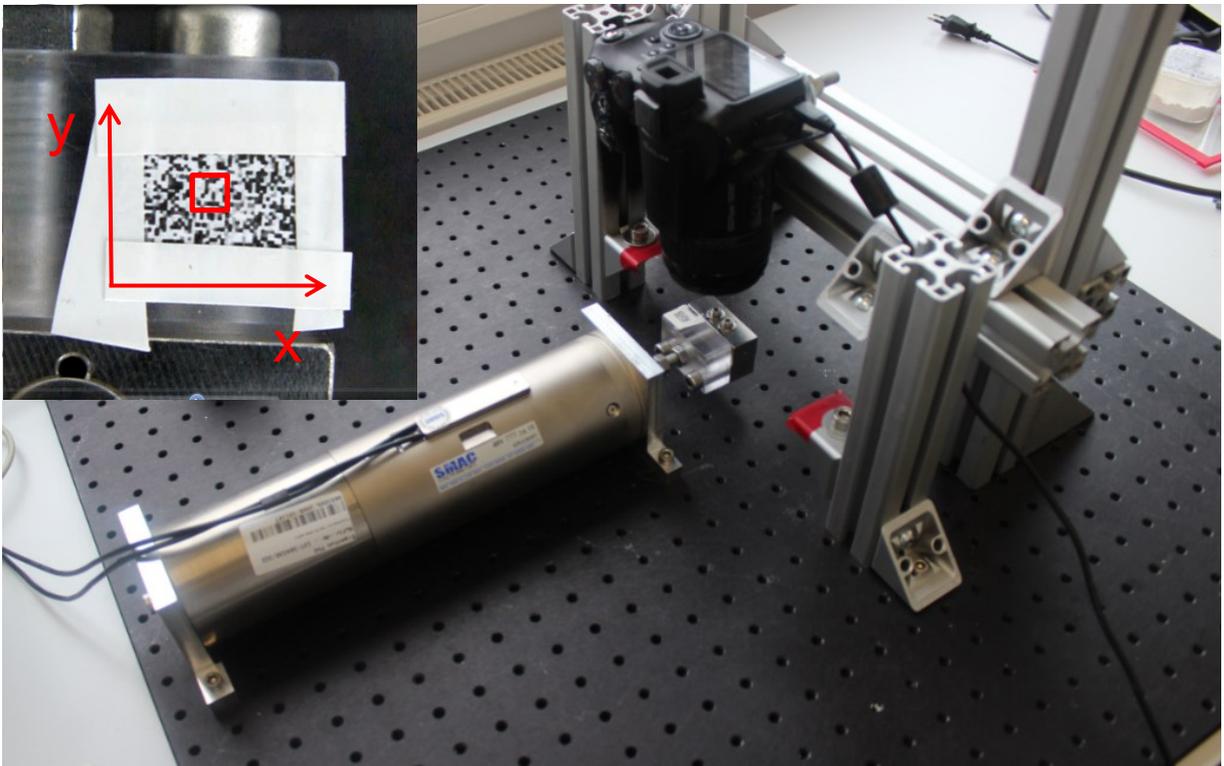


Abbildung 51: Versuchsaufbau Kameravergleich

Das mit der Kamera aufgenommene Video hat sein eigenes ebenes Koordinatensystem. Da eine exakte Ausrichtung des Fahrweges der Tauchspule und Koordinatenachse der Kamera nicht möglich ist, wird der Betrag aus beiden Fahrtrichtungen berechnet. Die Kameras sind auf diese Weise vergleichbar.

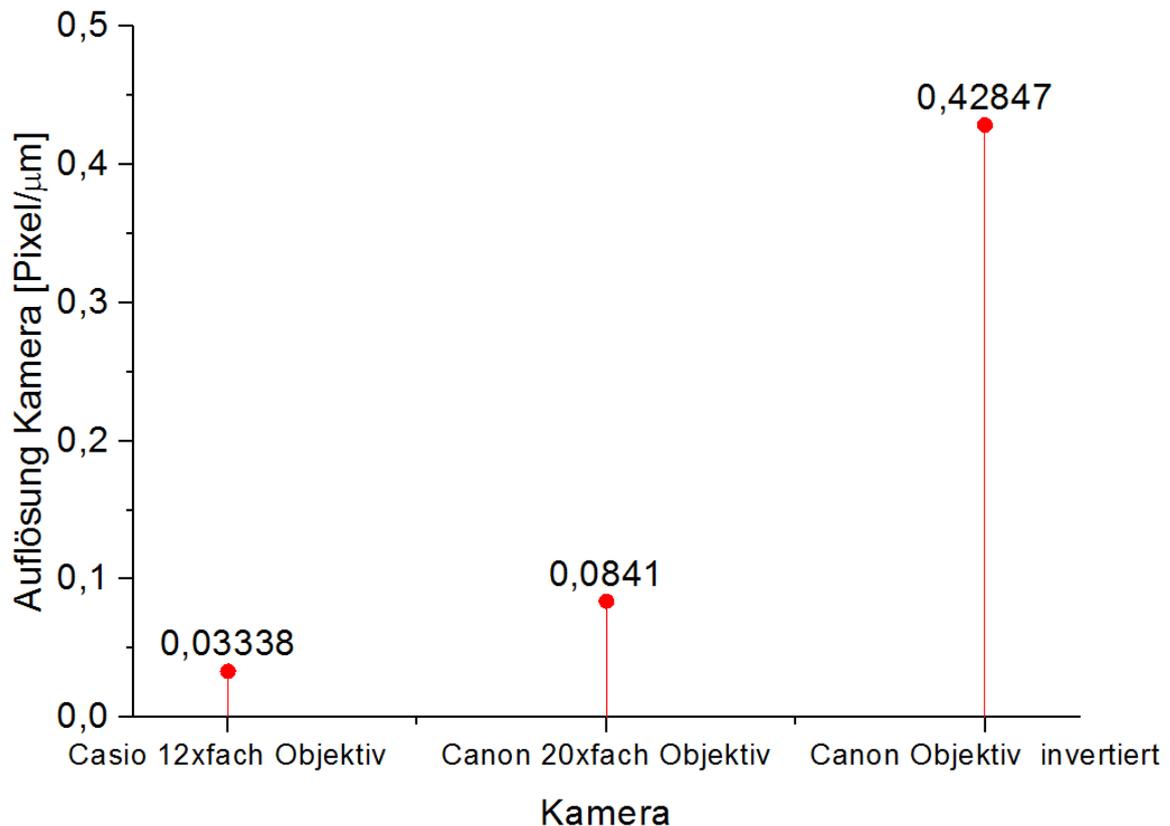


Abbildung 52: Pixelauflösung Kameravergleich

$$\text{Auflösung} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\text{Weg Tauchspule}} = \frac{[\text{Pixel}]}{[\mu\text{m}]}$$

Als Ergebnis liegt die größtmögliche Pixelauflösung vor, die einer Längenänderung von 1 μm entspricht. Die Canon mit einer invertierten Makrolinse im Objektiv hat eine mindestens fünffach größere Auflösung als die anderen beiden.

Um eine Aussage über die Genauigkeit der Kameras zu treffen, wird der bestehende Aufbau für einen zweiten Versuch benötigt. Aufgenommen wird ein Standbild, ohne dass die Tauchspule verfährt. Dazu werden die geschnittenen Videos in diesem Fall von der Bildkorrelationssoftware mit zwei gesetzten Punktmustern vermessen. Im Idealfall sollten die Verläufe beider Punkte identisch sein.

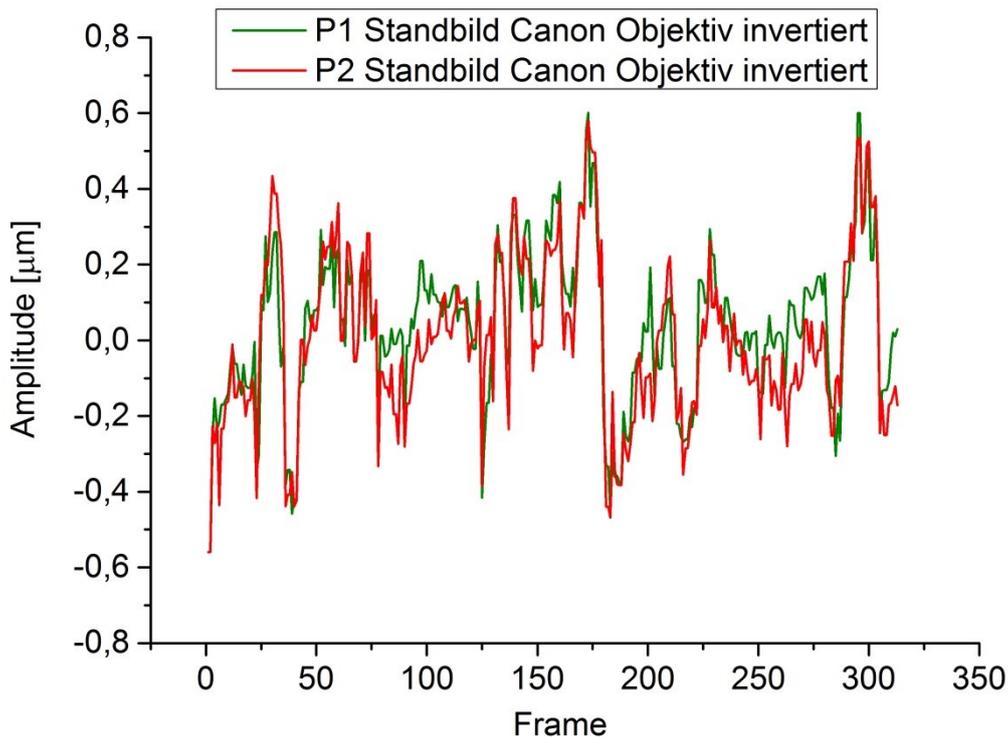


Abbildung 53: Amplitudenverlauf zweier Punktmuster

Das Diagramm der Abbildung 53 zeigt den Amplitudenverlauf der ausgewählten Muster auf dem in Ruhe befindlichen Körper. Beide Muster haben die Koordinatenwerte bezogen auf ihr Referenzbild. Die grüne und rote Kurve hat über den gesamten Beobachtungsbereich einen ähnlichen Amplitudenverlauf. Dies veranschaulicht die Empfindlichkeit einer Extensometermessung. Die Messungen konnten unter natürlichen Lichteinfall mit einer Lichtempfindlichkeit von ISO300 durchgeführt werden. Der scheinbar still stehende Körper führt Bewegungen aus durch den Einfluss einer von außen angreifenden mechanischen Schwingung oder Vibration. Der Grund dafür könnte eine Relativbewegung zwischen Kamera und Objekt sein. Die instabilsten Komponenten sind das geklemmte Objektiv an der Kamera und der Tisch, auf dem der verhältnismäßig schwere Messaufbau samt Stahlplatte steht. Eine Aussage über die Genauigkeit dieses Messverfahrens lässt sich treffen, indem die absolute Abweichung der Amplitudenverläufe gebildet wird.

$$\text{rel. Abweichung} = \sqrt{|x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2}$$

In der Abbildung 54 ist die absolute Abweichung der Bildkorrelation dargestellt. Das im Kurvenverlauf auftretende Maximum ergibt den Größtfehler der Messung.

Eine Maßzahl für das Rauschen oder die Streuung der Messergebnisse kann mit Hilfe der Standardabweichung bewertet werden.

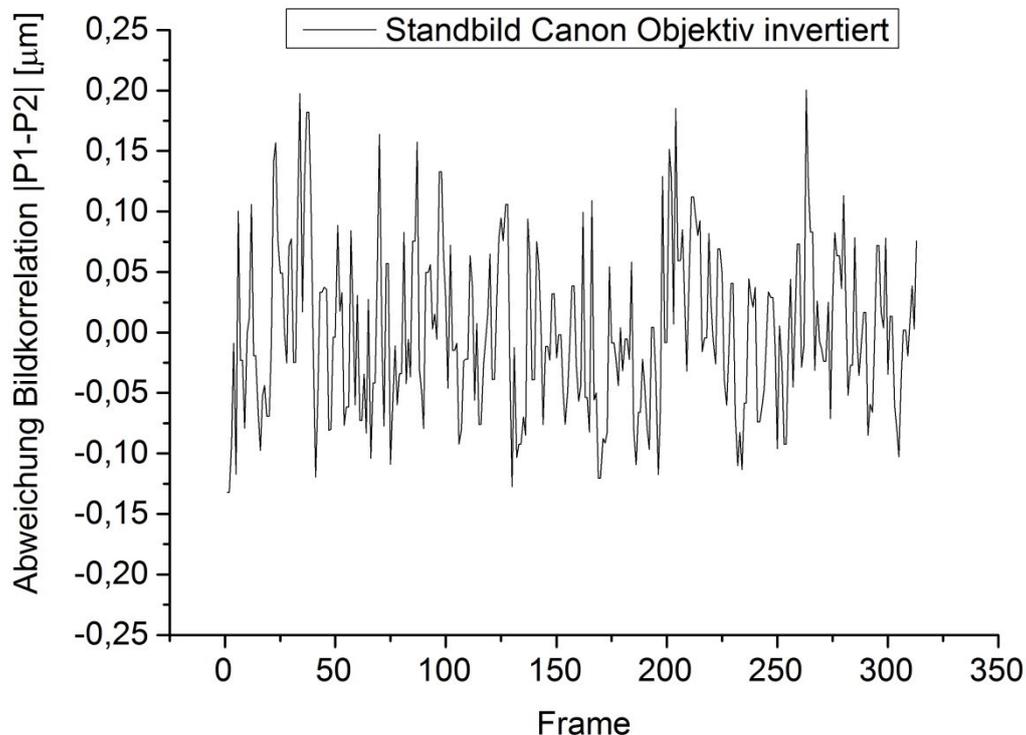


Abbildung 54: Abweichung Bildkorrelation zweier Punktemuster

Die Untersuchungen der Kameras sind in Abbildung 55 zu sehen. Aus der Genauigkeitsuntersuchung geht hervor, dass die Kamera Canon EOS 50D mit einem invertiert angebrachten Objektiv eine Auflösung von weniger als $0,2 \mu\text{m}$ möglich macht. Diese Abweichung entspricht dem Größtfehler und kann nachträglich gemittelt werden. Unter sich wechselnden Zuständen beziehungsweise Punktwerten ist der funktionale Verlauf durch Regression nachzubilden. Mit der mathematischen Anpassung der kontinuierlichen oder periodisch ablaufenden Dehnung ist eine Steigerung in der Genauigkeit der optischen Dehnungsmessung zu erwarten. In Bezug auf den Messwert ist die Standardabweichung ein Maß für die relative Abweichung durch das Bildrauschen, der in diesem Fall rund $0,07 \mu\text{m}$ beträgt.

Da die berührungslose optische Messung zur Erfassung von Deformationen von Vorteil ist, wird diese im Versuchsaufbau umgesetzt. Eine konstruktive Anpassung der geometrischen Form des zu messenden Objektes ist nicht notwendig. Mit einem Stativ kann die Kamera in allen 4 vertikalen Ebenen ausgerichtet werden. Eine Verdrehung der Probe wird relativ zum Koordinatensystem der Kamera erfasst und kann in die Messung mit einbezogen werden.

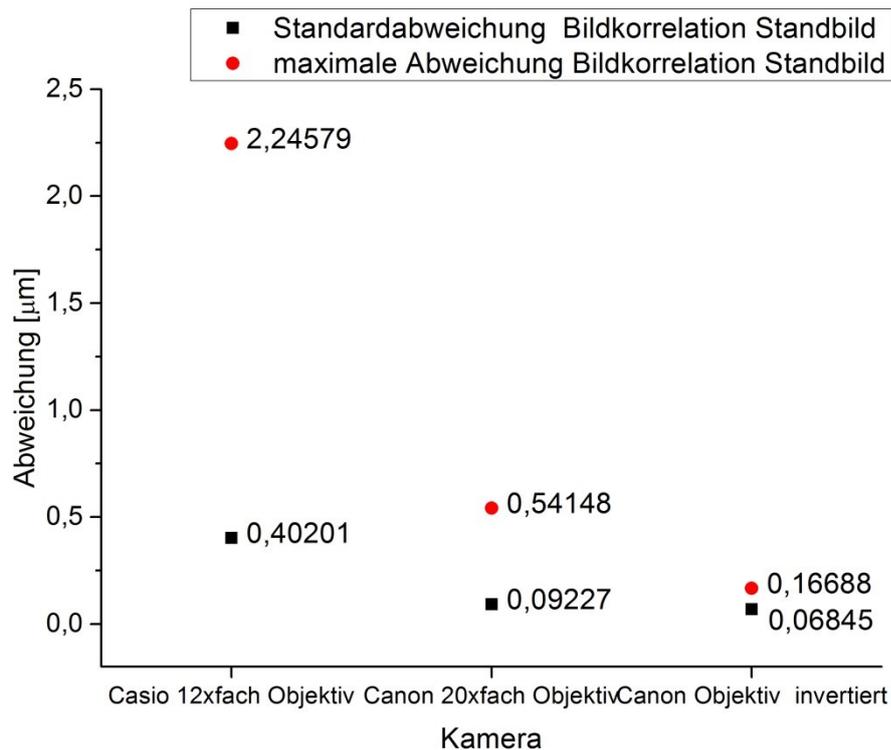


Abbildung 55: Genauigkeitsuntersuchung Bildkorrelation

4.2.3 Messung elektrischer Widerstand

Aus der Vorbetrachtung zur Leitfähigkeitsmessung in Kapitel 3.3 ist die Vierleitermessung bekannt. In Bezug auf die zu untersuchende Korrelation zwischen der Größe des elektrischen Widerstandes und den Kenngrößen des Ermüdungsversuches sollte eine zeitliche Änderung des Leitklebers aufgelöst werden können. Eine erste Näherung ergibt der Leitungswiderstand des Klebstoffgemisches. Die Herstellerangaben geben eine spezifische Leitfähigkeit von $\rho_{\text{spez}} = 0,002 \Omega\text{cm}$ vor.

$$R_{\text{kleber}} = \rho_{\text{spez}} * \frac{l}{A} = 0,01\Omega\text{cm} * \frac{0,01\text{cm}}{12,5\text{cm}^2} = 0,008\mu\Omega$$

Mit den geometrischen Maßen des Probenaufbaus ergibt sich ein Messwert im Nanoohmbereich. Gegenüber dem in Reihe befindlichen Kontaktwiderstand zwischen Leitkleber und Stahlkörper ist dieser sehr klein. Durch Recherchen ist bekannt, dass der Gesamtwiderstand eines mit leitfähigen Partikeln gefüllter Klebstoff einen elektrischen Widerstand von wenigen Milliohm besitzt. Auch der Stahlkörper beeinflusst den zu erwarteten Messwert theoretisch nur geringfügig.

$$R_{\text{Stahl}} = \rho_{\text{spez}} * \frac{l}{A} = 0,13 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} * \frac{0,015}{125\text{mm}^2} = 15,6\mu\Omega$$

Für diese Arbeit wurde das USB-Mikro-Ohm-Meter IMR-B-R020 von Isabellenhütte verwendet, das zur Messung von niederohmigen Widerstandswerten im Bereich von 1 $\mu\Omega$ bis 3 k Ω geeignet ist. Das Gerät (Abbildung 56) besteht aus einer Messeinheit mit vier 4 mm Federstecker zur Kontaktierung der Spannungs- und Strommessung und einer Lemosa-Steckverbindung zur externen Temperaturmessung. Über eine USB-Schnittstelle kommuniziert das Gerät mit einem angeschlossenen PC. Die Spannungsversorgung erfolgt über das USB-Kabel, dennoch hält die Energieversorgung ein integrierter Akku aufrecht.



Abbildung 56: Mikroohmmeter der Firma Isabellenhütte

In der Praxis ist bekannt, dass elektrische Widerstände rauschen. Eine Ursache ist das sogenannte thermische Rauschen ohmscher Widerstände. Liegt die Temperatur über dem absoluten Nullpunkt, sind die freien Elektronen in einem elektrischen Leiter immer in Bewegung. Diese Bewegung der zahlreichen Elektronen ist zufällig und ist mit dem Stromfluss identisch. So tritt je nach Bewegungsrichtung des mittleren Anteils der Elektronen ein positiver oder negativer Strom auf, der die Messung in die-

sem Moment beeinflusst. Der Rauschstrom nimmt mit der Temperatur zu. Deswegen ist es wichtig, den eingespeisten Gleichstromanteil in der Vierleitermessung so niedrig wie möglich zu halten. Begrenzt wird das Minimum durch die Bitauflösung der Signalverarbeitung beziehungsweise der Analog-Digital-Umwandlung. Analoge Signale nehmen in ihrem Wertebereich alle denkbaren Zwischenwerte an. Im Gegensatz dazu können digitale Signale nur diskrete Werte in bestimmten Stufen durchlaufen. Je höher die Auflösung des Wandlers (Bit), desto feinstufiger, aber auch unruhiger der digitale Messwert. Zu Untersuchung dieses Messverhaltens am vorhandenen Gerät wird ein Prüfwiderstand von $100\ \mu\Omega$ mittels Vierleitungsmesstechnik angeschlossen. In Abhängigkeit des elektrischen Stromes ist der elektrische Widerstand in Abbildung 57 dargestellt. Berechnet ist der Mittelwert einer Messreihe von mehr als 300 Messpunkten.

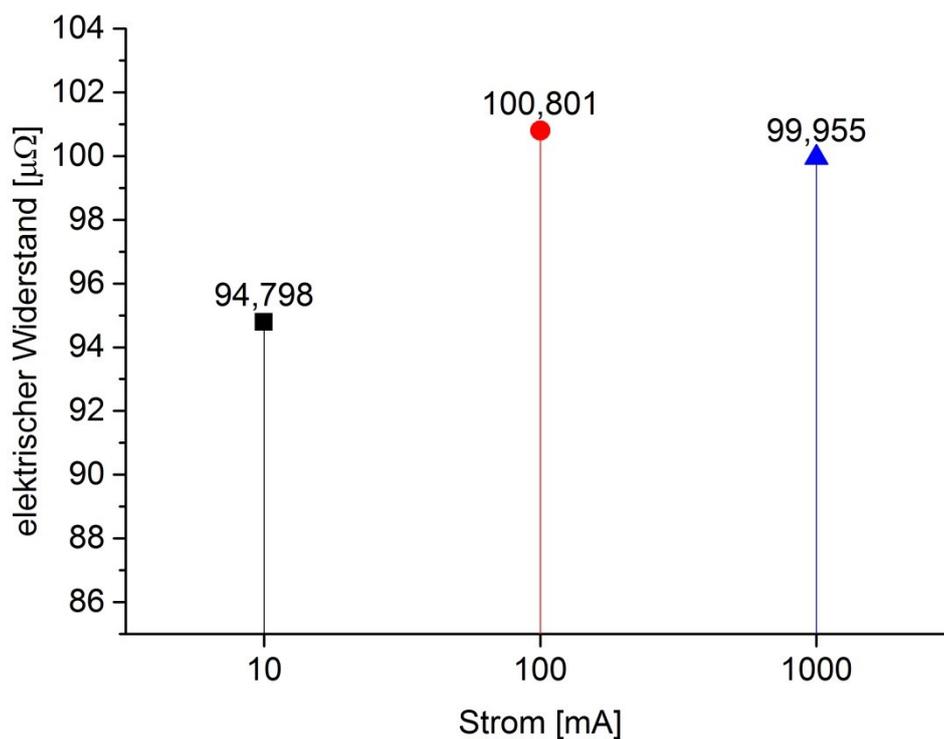


Abbildung 57: Widerstandsmessung Prüfwiderstand $100\ \mu\Omega$

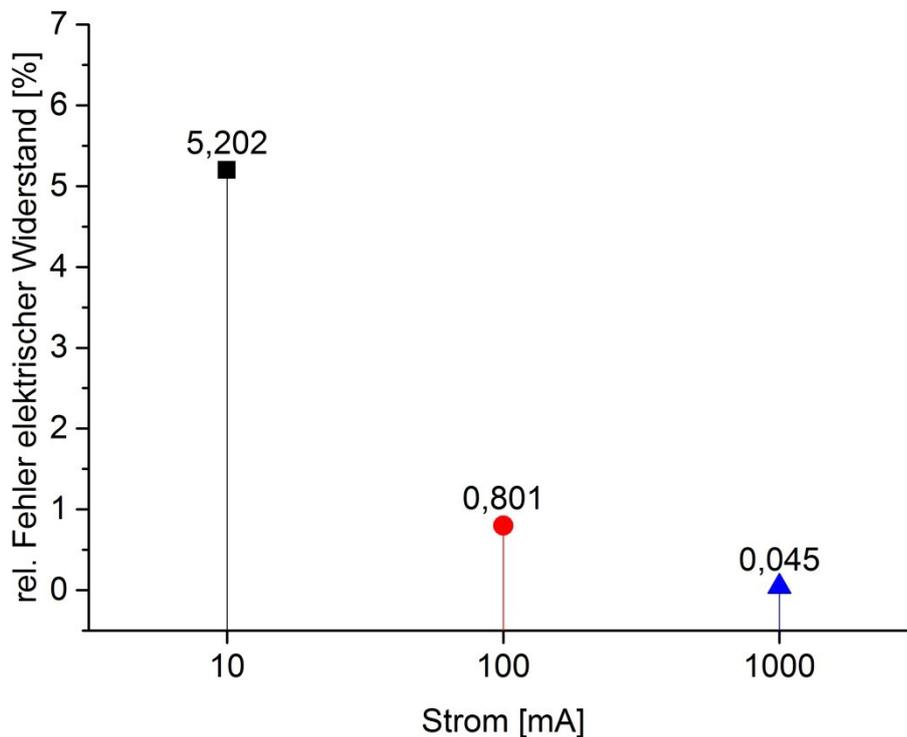


Abbildung 58: Relativer Fehler Widerstandsmessung

Die Prozentuale Abweichung des Ist-Wertes vom Sollwert $100 \mu\Omega$ kann der Abbildung 58 entnommen werden. Mit Abnahme des eingepprägten Stroms steigt der relative Fehler. Diese Tatsache ist auf die Empfindlichkeit des Analog-Digital-Wandlers zurückzuführen. Die Bit-Auflösung ist zu grob, um die dem kleinen Strom I_{grenz} proportionale Spannung U_{mess} wandeln zu können.

$$U_{mess} = I_{grenz} * R$$

Um das Rauschen des ohmschen Widerstandes in Abhängigkeit des Stromes untersuchen zu können, wird die Standardabweichung aller Messpunkte gebildet. Das zeigt die Darstellung in Abbildung 59. Bei dem niedrigsten Strom begrenzt die Technik des Gerätes die Genauigkeit der Messung. Starke Schwankungen unterliegen der Auflösung des Systems. Geringeres Rauschen entsteht während der Messung ab 100mA. Bei weiter zunehmendem Strom steigt die Temperatur und das thermische Rauschen tritt verstärkt auf. Besonders bei längerer Messdauer sollte darauf geachtet werden, den eingepprägten Strom zu begrenzen.

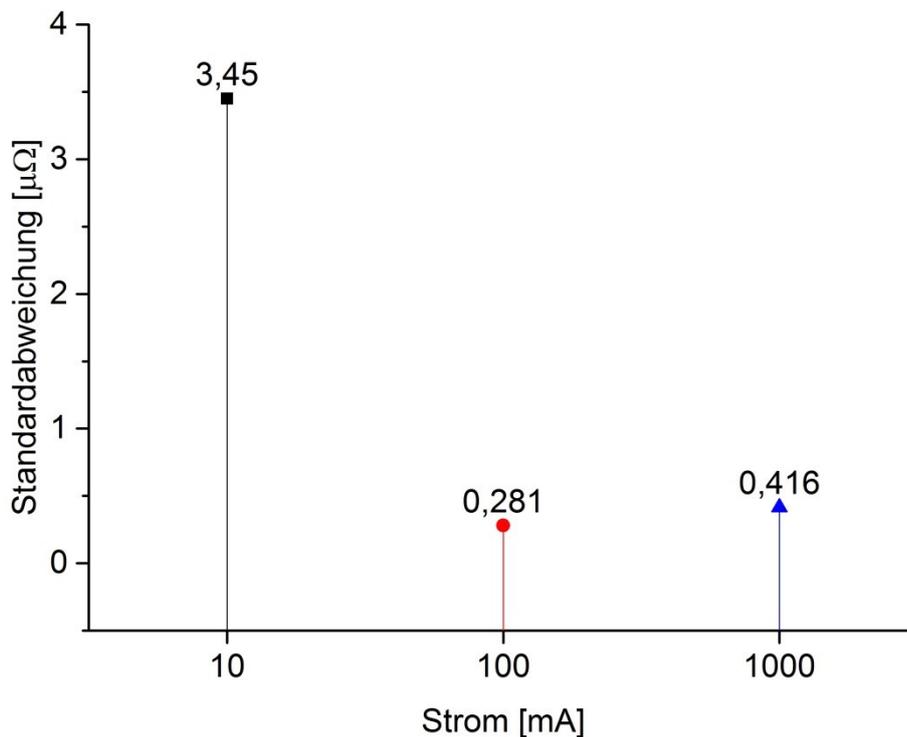


Abbildung 59: Standardabweichung thermisches Rauschen

4.2.4 Konzeptlösung und Konstruktion

Die Konzeptlösung des Versuchsaufbaus zur Materialermüdung von Schertestproben umfasst die konstruktive Umsetzung einer Einspannung in der Zugmaschine, die Dehnungsmessung zur Aufnahme der relativen Verformung der Fügeteile, die Messung des elektrischen Widerstandes zur Überwachung der Leitfähigkeit und die Messwerterfassung und das Triggern aller Messsignale und Kenngrößen. Für die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens des Klebers wird die Probe zum einen einer einachsigen Zugbeanspruchung und zum anderen einer sich zyklisch wiederholenden Wechsellast bis zum Bruch ausgesetzt. Das Konstrukt zur Realisierung einer möglichst fehlerfreien Einspannung der Proben in die Zugmaschine unterscheidet sich nach dem Anwendungsfall. In der Abbildung 60 ist der Konzeptaufbau dargestellt. Für den quasistatischen Zugversuch werden in Anlehnung an die in der Norm empfohlenen Kardan-Gelenke zwei Kugelgelenkköpfe an die Traversenverbindung über ein Gewindestück oben und unten angebracht.

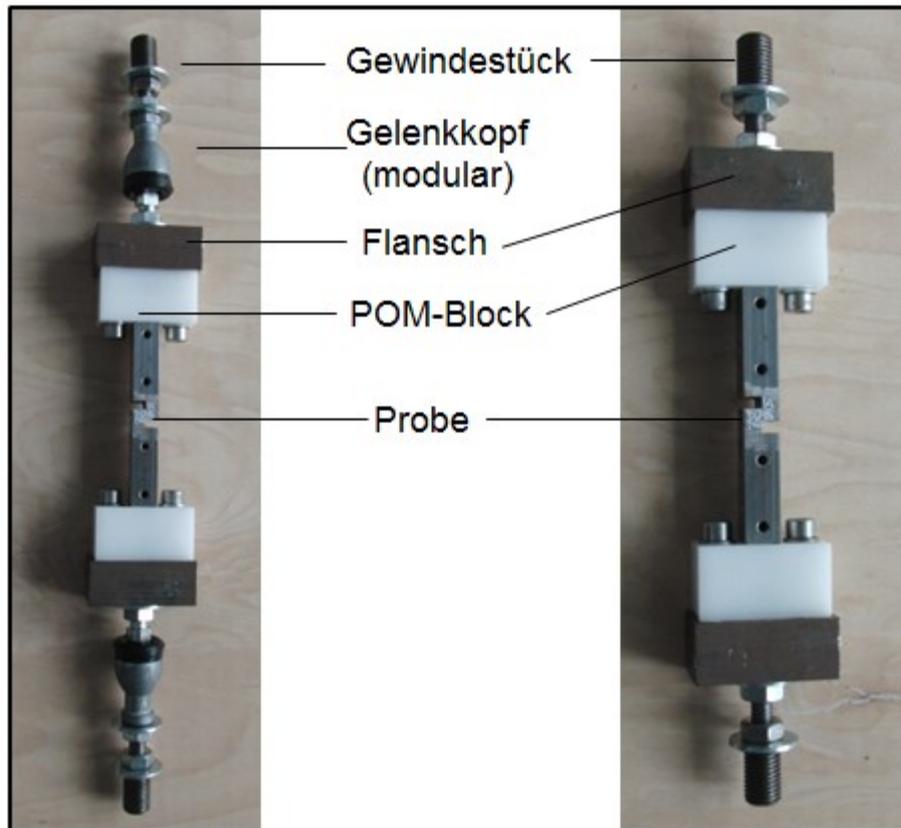


Abbildung 60: Einspannung: einachsiger Zugversuch (links), Wechsellast (rechts)

Die Ankopplung der Probe erfolgt über einen Flansch aus Stahl und einen Block aus Kunststoff. Der POM-Block dient der Isolation für die Leitfähigkeitsmessung, da die Zugmaschine den Stromkreislauf durch den Leitkleber irritieren kann. Der Kunststoff-Block stellt auch eine Art plastisches Gelenk zum Ausgleich von Winkelfehlern im Zusammenbau aller Komponenten dar. Er ist in Verbindung mit der Scherprobe nach Einstellung der Traversenabstände zunächst unterhalb und dann oberhalb einzuschrauben. Mit der Vorgabe eines voreingestellten Sollwertes reagiert die Steuerung der Zunahme einer Zugkraft mit einer Änderung des Weges entgegen, sodass die Probe beim Einschrauben keiner permanenten Belastung ausgesetzt ist. Der Fluchtungsfehler der Traversenenden wird durch einen einstellbaren Versatz der POM-Blöcke ausgeglichen, denn diese sind jeweils mit zwei Durchgangsbohrungen und einer Senkbohrung versehen. Da der Kunststoff bei Druck- und Zugkräften überwiegend durch Flächenpressungen beansprucht wird, treten keine kritischen Festigkeitsprobleme auf. Die Komponente des Kugelgelenkes wird für den zyklischen Ermüdungsversuch weggelassen, da das Gelenkspiel eine kurzzeitige Kraftunterbrechung bedeutet. Der Zusammenhalt aller Einzelteile entsteht durch das Fügen mittels Schraubverbindungen. Mit einer auf dem Gewindezapfen befindlichen Mutter werden die Verbindungen gekontert beziehungsweise angezogen. Dabei verhindern die Freiheitsgrade der Gelenke durch Übertragen eines Anziehdrehmomentes eine ungewollte Vorbelastung. Aus diesem Grund ist beim Weglassen der Gelenke mit be-

sonderer Vorsicht zu agieren. Mit dem Anzug der Kontermuttern als letzten Arbeitsschritt zur Einspannung der Probe richten sich die Schraubverbindungen im Gewindegang geringfügig aus, sodass im Idealfall vernachlässigbar kleine Querkräfte in dem Klebespalt entstehen. Die ausgearbeiteten Fertigungsunterlagen mit Stückliste befinden sich im Anhang 4. Einen Großteil der Dehnung verursachen die Einzelteile zum Einspannen der Probe. Für die exakte Bestimmung der Verformung des Klebers wird die Kamera zur Videoaufzeichnung nahe dem Klebespalt montiert. Ein Gestell aus Aluminium-Profilen und Verbindern ermöglicht eine ausreichend stabile höhenverstellbare Anbindung. Ein X-Y-Tisch kann in der Ebene in die Axialrichtungen manuell nachjustiert werden, sodass sich das Objekt im optimalen Fokus befindet. Eine ausreichend genaue und scharfe Aufnahmequalität erfordert eine zusätzliche Belichtung, sodass eine möglichst kleine Lichtempfindlichkeit (niedriger ISO-Wert) erforderlich ist. Das Video wird auf dem lokalen Speicher der Kamera hinterlegt und mit einer Infrarot-Fernbedienung ausgelöst und beendet. Nach Versuchsdurchführung wird die Videoaufnahme zur Bildkorrelationsberechnung auf einen PC per USB übertragen. Bevor die Kamerafunktion angebracht wird, müssen die Elektroden zur Widerstandsmessung mit dem Gerät von Isabellenhütte kontaktiert werden. Die zwei Zuleitungen und abgeführten Leitungen für den eingepprägten Strom und der Spannungsmessung sind mit einer Schraube in den vorgesehenen Gewindebohrungen im oberen und unteren Fügeteil zu klemmen, sodass der Klebespalt in Reihe geschaltet ist. Die Kontaktflächen zwischen den Elektroden sollten von Rost und Fremdpartikeln gereinigt und nicht zu kleinflächig sein. Das Widerstandsmessgerät wird mit einer vom Hersteller bereitgestellten Software bedient und ist mit demselben Rechner in Verbindung wie auch die Steuerung der Zugmaschine.

Für die Aufbereitung und Auswertung der Messsignale und Kenngrößen der insgesamt drei Messgeräte muss der zeitliche Bezug zueinander bekannt sein. Da die Daten der Zugmaschine und des Widerstandsmessgerätes mit derselben Hardware erfasst werden, ist die System-Taktzeit eine Möglichkeit zum „Triggern“ der Signale. Der Zusammenhang zwischen der Videoaufzeichnung der Dehnung und dem zeitlichen Verlauf der im Ermüdungsversuch aufgezeichneten Daten der Zugmaschine kann mit Hilfe eines optischen Reizes und zeitgleich parallel erfassten Eingangssignals von der Steuerung der MTS realisiert werden. Zur Anwendung kommt eine externe Spannungsversorgung mit einer Parallelschaltung zur Stromversorgung einer LED-Leuchte und eines Spannungssignals zum Signaleingang der MTS. Das Trigger-Signal wird per Knopfdruck zu einem beliebigen Zeitpunkt ausgelöst. Die Abbildung 61 zeigt den Schaltungsaufbau samt Leistungselektronik.

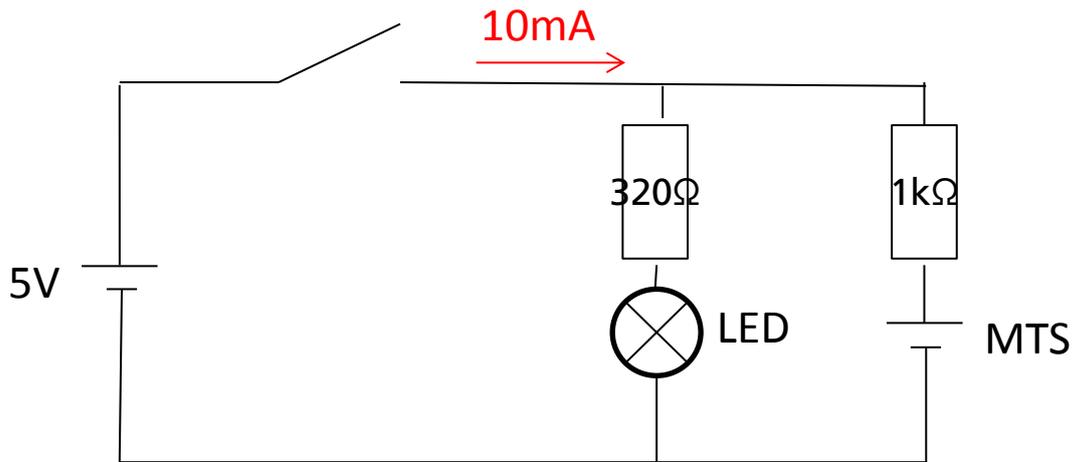


Abbildung 61: Schaltungsplan LED /POW14/

Für die Inbetriebnahme der LED-Leuchte sind die Leistungsparameter anzupassen. Die optimale Betriebsleistung wird bei einer Spannung von 1,8 V und einem Strom von 10 mA erreicht. Mit einer Quellspannung von 5 V ist der Vorwiderstand auszulegen. Der Signaleingang der MTS ist aus Sicherheitsgründen hochohmig.

$$R = \frac{5V - 1,8V}{0,01A} = 320\Omega$$

Das Diagramm der Abbildung 62 zeigt den zeitlichen Verlauf aller zu messenden Signale. Die Systemzeit oder Tageszeit von der MTS und dem Ohmmeter ist identisch. Für die zeitliche Übereinstimmung der Videoaufzeichnung ist nach dem Zuschneiden mittels Converter die Bildnummer bekannt, auf dem die LED erstmalig aufleuchtet. Zu dieser Laufzeit erfährt die MTS am Eingang einen Voltausschlag. Ausgehend von diesem Zeitpunkt kann mit Hilfe der Bildrate die Abtastfrequenz für jedes Bild beziehungsweise für jede Dehnung errechnet werden. Die Bildrate wurde mit diesem Versuchsaufbau exakt ermittelt und beträgt $30 \frac{\text{Bilder}}{\text{s}}$.

$$t_{\text{Bild}} = \text{Bildnummer} * \frac{1}{30 \frac{\text{Bilder}}{\text{s}}}$$

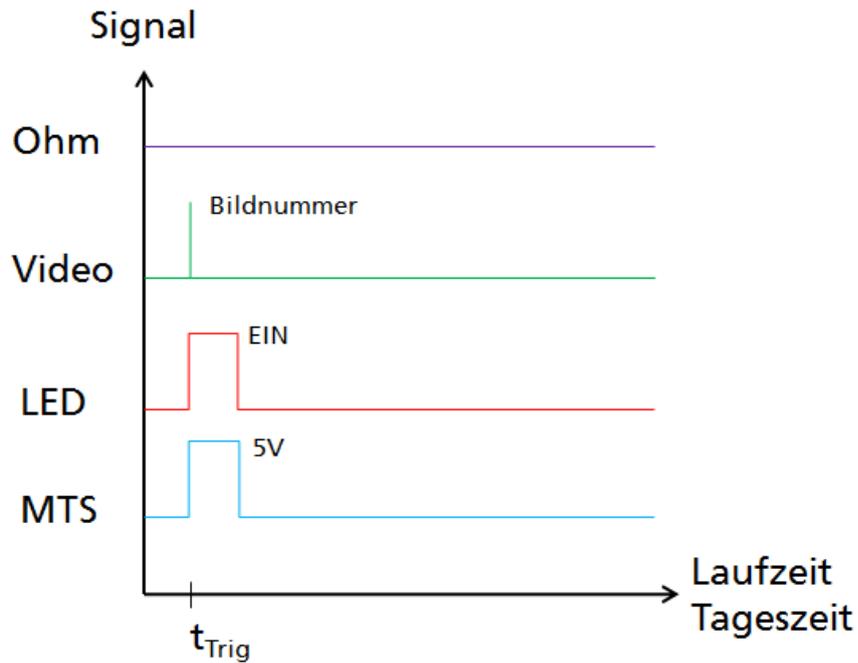


Abbildung 62: „Triggern“ der Signale /POW14/

Die Abbildung 63 zeigt das in der Praxis umgesetzte Konzept zur Ermüdungsbelastung der Scherprobe. In der vergrößerten Aufnahme ist die kontaktierte Probe zu sehen. Die LED-Signalleuchte ist nahe dem Klebespalt fixiert. Eine präzise Ausrichtung der Koordinatenachsen der Kamera ist nur bedingt möglich.

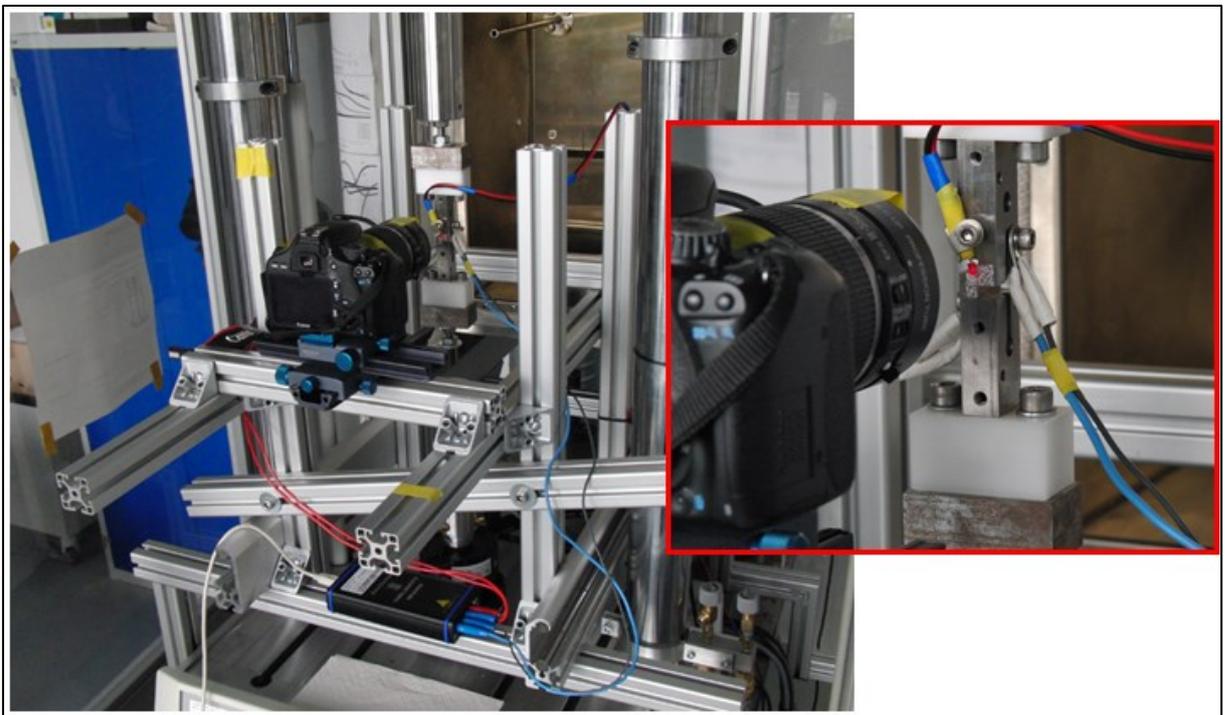


Abbildung 63: Scherzugversuchsaufbau

5 Mechanische Charakterisierung

Die folgenden Kapitel beschreiben die Durchführung und Vorgehensweise von der Herstellung der Proben bis zur Dokumentation der Versuchsergebnisse. Die methodisch angelegte Untersuchung ist so genau wie möglich aufzuzeichnen, da jeder Arbeitsschritt eine Beweisgrundlage für mögliche Fehleinflüsse darstellt und Informationen zur Analyse und Auswertung der Versuchsergebnisse liefert.

5.1 Ausmessen der Fügeteile

Im ersten Schritt sind die gefertigten Fügeteile auf ihre Maß- und Formgenauigkeit zu überprüfen. Laut Zeichnungsvorgabe sind nur sehr feine Toleranzen zulässig, insbesondere für die Maße zur Entstehung des Klebespaltes. Das Konzept gibt vor, dass die Stahlkörper aus demselben Halbzeug geschnitten werden, nachdem der gestufte Absatz mit dem einmalig auftretenden Fehler gefräst wurde. Nach Absprache mit dem Fachmann für spanende Bearbeitung empfiehlt dieser aus Erfahrung die Einzelherstellung eines jeden Stahlkörpers, da bei kürzeren Verfahrenswegen und Bearbeitungsstrecken des Werkzeuges in der Werkzeugmaschine die Genauigkeitsanforderung am besten eingehalten werden kann. Das für die mechanische Prüfung einflussreichste Maß ist die Absatzhöhe der bearbeiteten Stufe mit einer Sollwertvorgabe von 7,5 mm. Mit einem Messtaster wird die Stufe eines jeden Fügeteils zur aufgelegten Bezugsfläche an fünf ausgewählten Punkten (Abbildung 64) vermessen und gemittelt notiert.

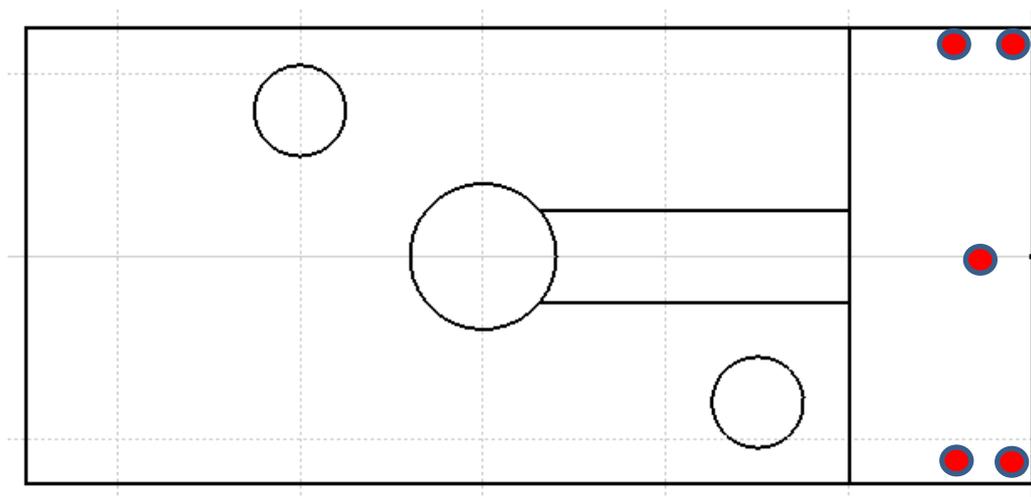


Abbildung 64: Ausmessen der Stufenhöhe

Signifikante Abweichungen zum Sollwert ergeben sich in Kantennähe. Eine Ursache für diese Aufwerfungen im Randzonenbereich können vorhandene Eigenspannungen sein, die durch das herstellungsbedingte Walzen des Stahls entstanden sind. Wird

der Stahl spanend bearbeitet, sorgen thermische Einflüsse und unzureichende Kühlung für ein Entspannen der Metallstruktur und das Material verzieht sich. Das gemessene Maximum und Minimum ergibt eine Abweichung der Stufenhöhe von knapp 30 µm. Für die Einhaltung der Klebedicke von 100 µm stellt diese Toleranz eine Ungenauigkeit dar, sodass die Füge­teile stochastisch zugeordnet werden müssen. In der Abbildung 65 sind die Probenpaare mit ihren Klebedicken dargestellt. Eine maximale mittlere Abweichung von weniger als 5 % wird mit dieser Methode erzielt. Kritisch ist der Randzonenbereich, denn dort kann der Klebspalt eine Dicke von unter 50µm unterschreiten. Die Berechnung der Klebdicke ergibt sich aus der mittleren Füge­teilhöhe H abzüglich der kombinierten Stufenhöhen h1 und h2 der Probenpaare. Keine Beachtung findet die in der Toleranzkette vorhandene Bezugsfläche der Vorrichtung, die ebenfalls einen Fehler enthält.

$$\text{Klebdicke} = H - (h1 + h2)$$

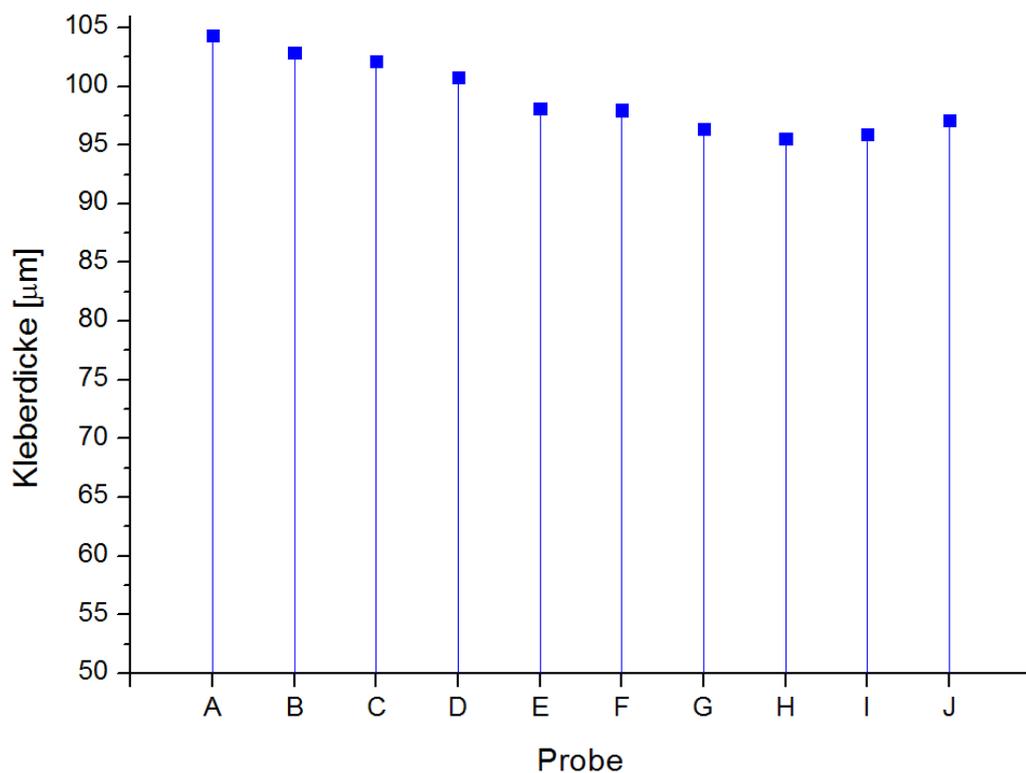


Abbildung 65: Klebdicke der zugeordneten Probenpaare

Weiterhin ist zu berichten, dass nach Reinigung und Aufbereitung der zerstörten Füge­teile diese wiederverwendbar sind, jedoch unter Abnahme der Stufenhöhe. Für eine zweite Klebung ergibt sich eine mittlere Klebedicke von 124 µm. Das Abziehen durch Schleifen der mit Epoxidharz benetzten Fläche verschleißt ebenso den Stahl und es entstehen Kantenradien.

5.2 Herstellung der Probekörper

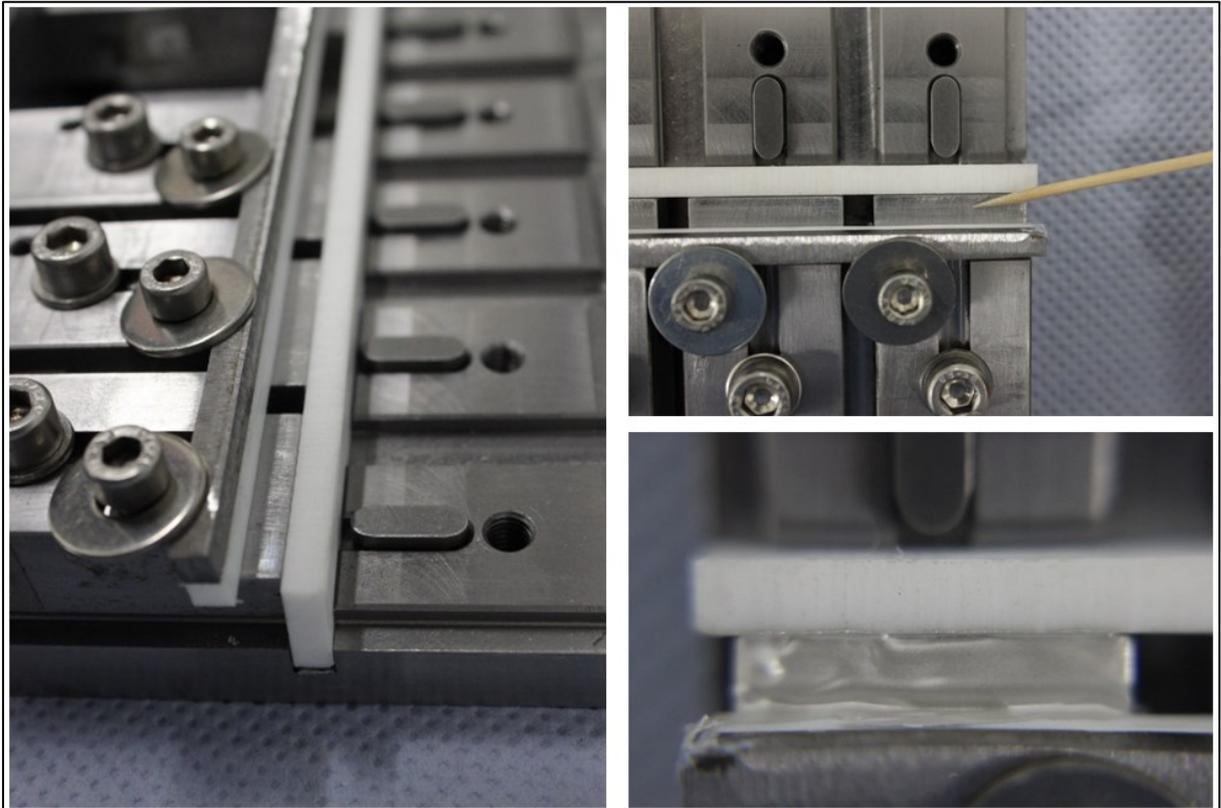


Abbildung 66: Probenherstellung in der Vorrichtung

Bevor die Probenpaare mit dem Leitkleber Elecolit 3653 in der Vorrichtung verklebt werden, müssen die Klebeflächen aufgeraut und mit Aceton gereinigt werden. Die Oberflächenvergrößerung bewirkt eine verbesserte Adhäsion zwischen Leitkleber und Stahl, sodass die nachlassenden Kohäsionseigenschaften des Epoxidharzes zum Ermüdungsbruch beitragen. Die Passgenauigkeit von Nut und Passfeder, sowie die Ebenheit zwischen Fügeteil und Bezugsfläche sollte auf Fremdkörper, Schäden oder Grate überprüft werden. Zur Positionierung der Komponente Teflon_unten ist das korrekte Übermaß gegenüber der Klebefläche mit Hilfe von untergelegtem Kupferdraht einzustellen. In der Vorrichtung der Abbildung 66 ist ein Fügeteil fest eingespannt. Stirnseitig wird dieses auf den vorstehenden Anschlag aus Teflon gespannt und von oben mit der einer Schraube fixiert. Ein zweiter Stab aus Teflon wird mit weiteren Schrauben und einem Vierkant platziert. Die Klebefläche ist nun an zwei Seiten begrenzt und das Epoxidgemisch kann mit einem Spatel oder spitzem Gegenstand aufgetragen werden. Der Elecolit 3653 ist in einer Tiefkühltruhe eingefroren und sollte nach dem Auftauen gründlich gerührt werden, damit sich die Silberpartikel homogen verteilen. Das zweite Fügeteil lässt sich problemlos von oben auf die Passfeder schieben und mit den vorgesehenen Spansschrauben fixieren. Für eine gute Vernetzung des Polymerwerkstoffes wird der Vorrichtungsaufbau für eine Dauer von einer

Stunde bei 150°C in den Ofen gelegt. Nach dem langsamen Abkühlen können die Probenpaare vorsichtig entnommen werden. Ein zu rascher Abkühlvorgang könnte thermischen Verzug und eine Rissbildung provozieren. Sollte beim Lösen der Proben zu viel Kraft aufgewandt werden, ist eine Vorschädigung nicht auszuschließen und sollte markiert oder vermerkt werden.

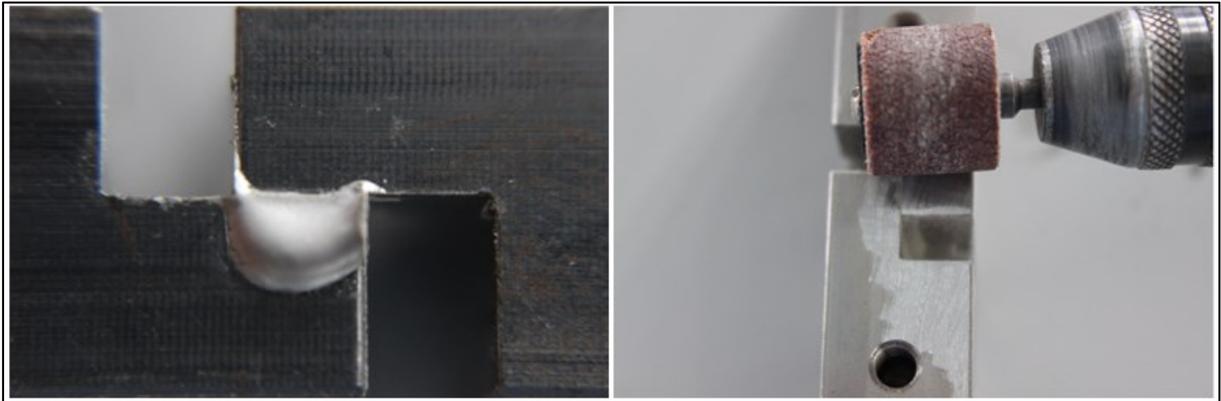


Abbildung 67: Nachbearbeitung Klebespalt

In der nächsten Herstellungsphase wird der überstehende Anteil des vernetzten Leitklebers behutsam mit einem Dremel entfernt. Die Füge­teile werden in der Nähe des Klebespaltes mit einem 5 x 5 mm² großen Flecken-Muster beklebt, das für die Bildkorrelation genutzt wird.

5.3 Quasistatischer Scherzugversuch

5.3.1 Testlauf und Versuchsanpassung

Die für die Versuchsdurchführung geklebten Scherproben stehen einem ersten Test des Scherversuchsaufbaus zur Verfügung. In einem Zugversuch mit konstanter Traversengeschwindigkeit soll der Leitklebstoff exemplarisch zeigen, wo die Grenzen und Möglichkeiten der mechanischen und elektrischen Eigenschaften liegen. Ziel ist eine Quantifizierung der zu messenden Größen und eine Fehlerabschätzung in Hinblick auf die Messergebnisse. Die ersten Durchläufe werden in die Praxis umgesetzt und dienen weiterführenden Schritten, die zur Verbesserung der Messtechnik beitragen. Nachdem die einflussreichsten Störgrößen herausgefunden und auf ein Minimum zu reduzieren sind, kann mit einer größeren Stückzahl von Prüfkörpern eine Angabe zur Genauigkeit der Messergebnisse gemacht werden. Das Verfahren zur Untersuchung von Zugverformungsverhalten von Kunststoffen wird in Anlehnung der DIN ISO 527 durchgeführt. Der Probenkörper wird entlang seiner größten Hauptachse bei konstanter Traversengeschwindigkeit gedehnt, bis er bricht oder bis die Span-

nung oder Dehnung einen vorgegebenen Wert erreicht. Die vom Probenkörper getragene Belastung und die Längenänderung werden gemessen und normiert in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm abgebildet. Mit den ersten zerstörten Proben ergeben sich zwei Kurven mit unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten. Aus der Dissertation von Dr.-Ing. Reiling ist bekannt, dass gestufte Scherzugproben unter einachsiger Belastung eine starke Streuung aufweisen /REIL98, S.164/. Der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von Polymerwerkstoffen ist bekannt. In der Literatur finden sich unterschiedlichste Geschwindigkeiten zur Scherung von Klebungen. Die Abbildung 68 zeigt die Ergebnisse und den Einfluss zwei verschieden gewählter Traversengeschwindigkeiten auf das mechanische Verhalten des Klebers.

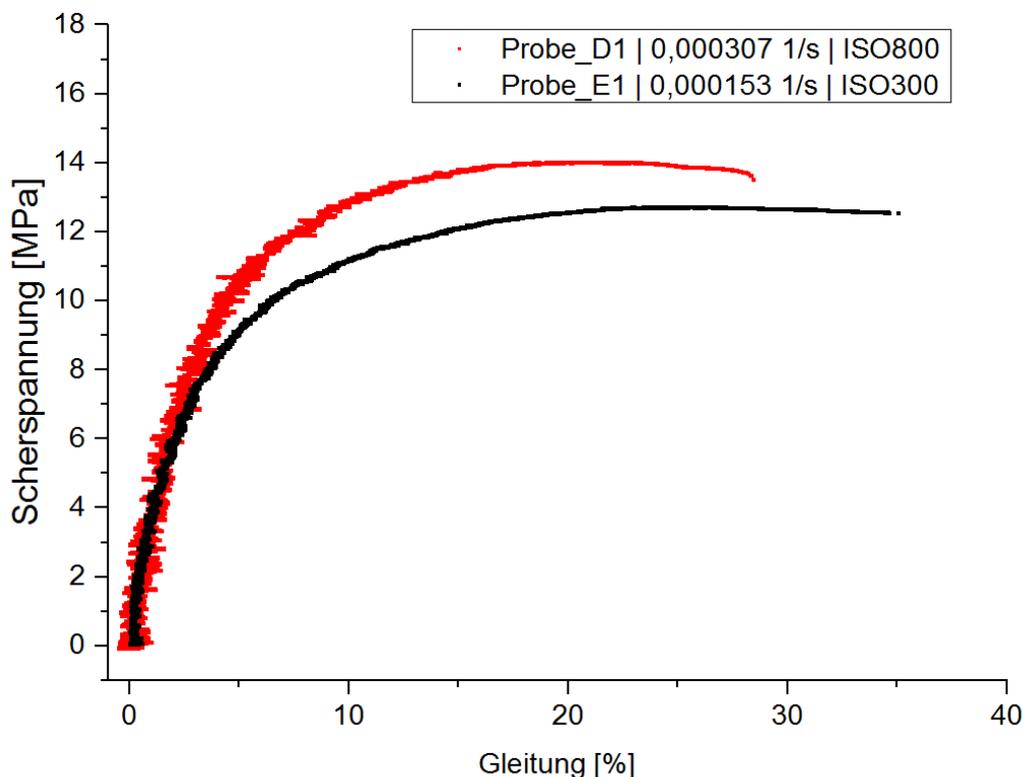


Abbildung 68: Spannungs-Gleitungs-Diagramm

Die Probe_D1 wird mit einer Traversengeschwindigkeit von 2 $\mu\text{m/s}$ gezogen. Zum Vergleich erfährt die Probe_E1 eine Zuggeschwindigkeit von 5 $\mu\text{m/s}$ und eine doppelt so große Gleitgeschwindigkeit. Die Spannungsmaxima der Kurven bestätigen bei größer werdender Geschwindigkeit einen Anstieg der Scherfestigkeit. Unterschiede zeigen sich in der Bruchdehnung, denn die langsam gezogene Probe verhält sich deutlich viskoser in ihrem Materialverhalten und enthält einen größeren irreversiblen Verformungsanteil in Bezug auf die Viskoelastizität. Über die Prüfzeit ist die Gleitge-

schwindigkeit nicht konstant, sondern exponentiell ansteigend bis zum Bruch. Unter Annahme einer konstant reproduzierten Klebefläche und Klebdicke wird eine vom Hersteller vorgegebene Zugscherfestigkeit von 16,7 MPa mit diesen Parametern nicht erreicht. Ein weiterer signifikanter Unterschied zeigt sich in der Güte der Dehnungsmessung. Das Bildrauschen der roten Kurve macht eine Bestimmung des Schubmoduls unter sehr kleinen Anfangsdeformationen unmöglich. Der Grund dafür ist die nicht ausreichende Belichtung des Prüfspaltes in der Zugmaschine. Mit einem Strahler, aufgestellt außerhalb des Sicherheitsbereiches der MTS, ist eine Videoaufzeichnung mit einem Lichtempfindlichkeitswert von ISO 300 möglich. Für weitere Versuchsreihen wird eine Beleuchtung mit größerer Lichtintensität eingebaut und die Traversengeschwindigkeit für eine größere Gleitgeschwindigkeit des Klebers angepasst.

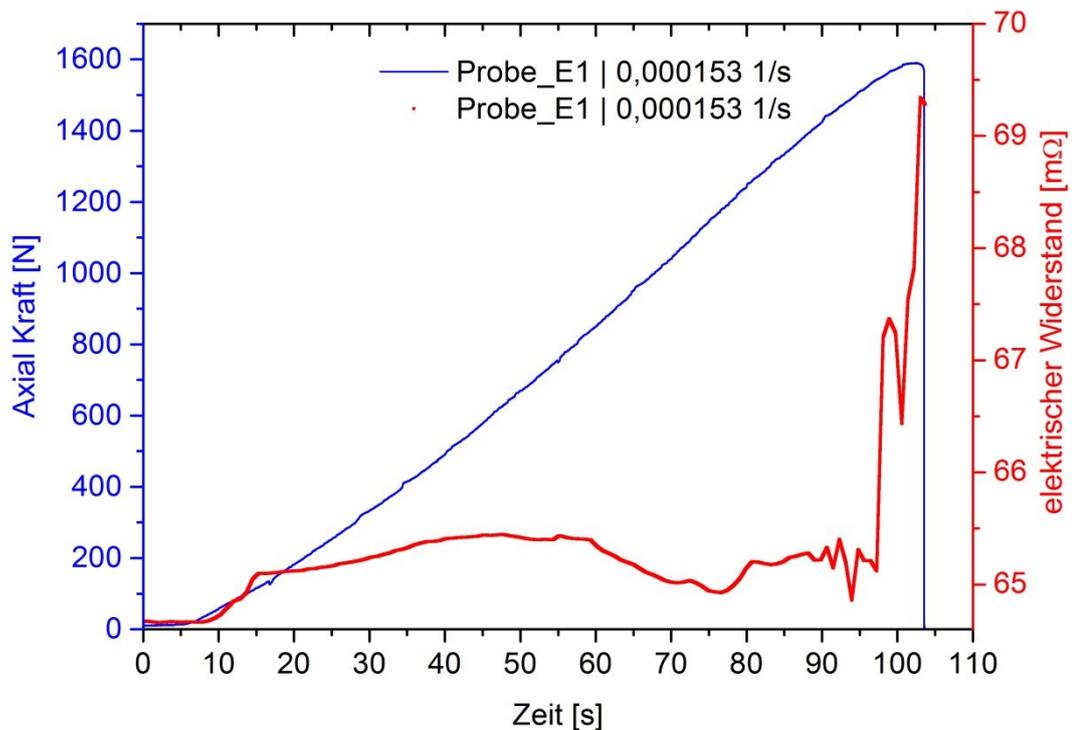


Abbildung 69: Kraftverlauf und elektrischer Widerstand

Eine Größe zur Überwachung der Konstanz der Prüfbedingung im Klebespalt ist das Kraftsignal. Da die Gleitgeschwindigkeit des Klebers nicht konstant ist, nicht nur in Folge von Relaxation des Klebstoffes, sondern auch durch Entspannung des Isolators aus POM und der schlagartigen Ausrichtung der Gelenke, kann es zu kurzzeitigen Regelproblemen der Steuerung kommen. Beim Einspannen der Probe ist die gesamte Traverse unbelastet. Nach Auslösen des konstanten Längenzuwachses wird anfänglich das Spiel in den Gelenken überwunden, ehe die Belastung in der Traverse beginnt, anzusteigen. Wie in Abbildung 69 zu sehen, zeigt das Kraftsignal

keine verstärkten Anzeichen von regelabhängigen Störgrößen. Das elektrische Signal erfährt nach der ersten Belastung eine Änderung. Geht man davon aus, dass die Kontaktwiderstände zwischen den Silberpartikeln den elektrischen Widerstandswert am meisten beeinflussen, so steht die Kontaktfläche zwischen den leitfähigen Partikeln im proportionalen Zusammenhang mit dem elektrischen Signal. Eine Schädigung der Klebstoffstruktur im fortschreitenden Ermüdungsprozess würde einen Anstieg des elektrischen Signals bedeuten. Betrachtet man in Abbildung 69 den Zeitraum zwischen Sekunde 60 und 75, so ist dieser kurzzeitige Abfall mit einer Verbesserung der Kontakte zwischen den Silber-Partikeln durch theoretisch auftretende Volumenkontraktion zu begründen. Im Bereich der größten Dehnungen ist eine Verschlechterung der Leitfähigkeit gegeben.

Die Widerstandsmessung zeigt sich hinsichtlich mechanischer Erschütterungen anfällig. Nicht ausreichend befestigte Steckverbindungen und zu lange sich kreuzende Kabel können zu Irritationen führen und sind zu verbessern.

5.3.2 Versuchsergebnisse quasistatischer Zugversuch

Nach Umsetzung der notwendigen Optimierungen am Versuchsaufbau ist eine Steigerung der Güte aller Messergebnisse zu erwarten. Eine LED-Leuchte mit direkter Wirkung auf den Klebspalt sorgt für die notwendige Lichtintensität und reduziert das Bildrauschen während der Dehnungsmessung. Für eine Versuchsreihe, bestehend aus 5 Scherproben, wird eine zweite Klebeserie im Ofen hergestellt. Die mechanische Nachbearbeitung zur Reinigung der Bruchflächen verkleinert das Maß der Stufenhöhe um wenige Mikrometer. Auch die Bezugsflächen sind von Korrosion zu befreien und bedeuten eine Abnahme der Fügeteilhöhen. Die durchschnittliche Klebdicke für die zweite Probenherstellung beträgt 124 μm . Die Abbildung 70 zeigt das Schaubild der Spannungs-Dehnungs-Kurven der 5 Proben aus dem Scherversuch. Daraus ableiten lassen sich die maximalen Scherfestigkeiten und die Schubmodule. Zwar entfällt in dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Einfluss der Zeitachse, dennoch ist der Schnittpunkt der Kurven mit der Y-Achse zu korrigieren, sodass der Koordinatenursprung als Absolutwert immer Null ist. Die Anpassung erfolgt über eine Sekante in einem Dehnungsbereich von $\gamma_1 = 0,0025$ bis $\gamma_2 = 0,005$, denn unterhalb dieser Dehnung oder Gleitung, bezogen auf einer Klebdicke von 100 μm , ist das Bildrauschen der Kamera zu groß. Die Anpassung erfolgt über eine lineare Funktion. Der elastische Schubmodul oder Speichermodul wird ebenfalls in diesem Bereich aus Schubspannung und Anfangsdehnung ermittelt.

$$G_{el} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - \gamma_1}$$

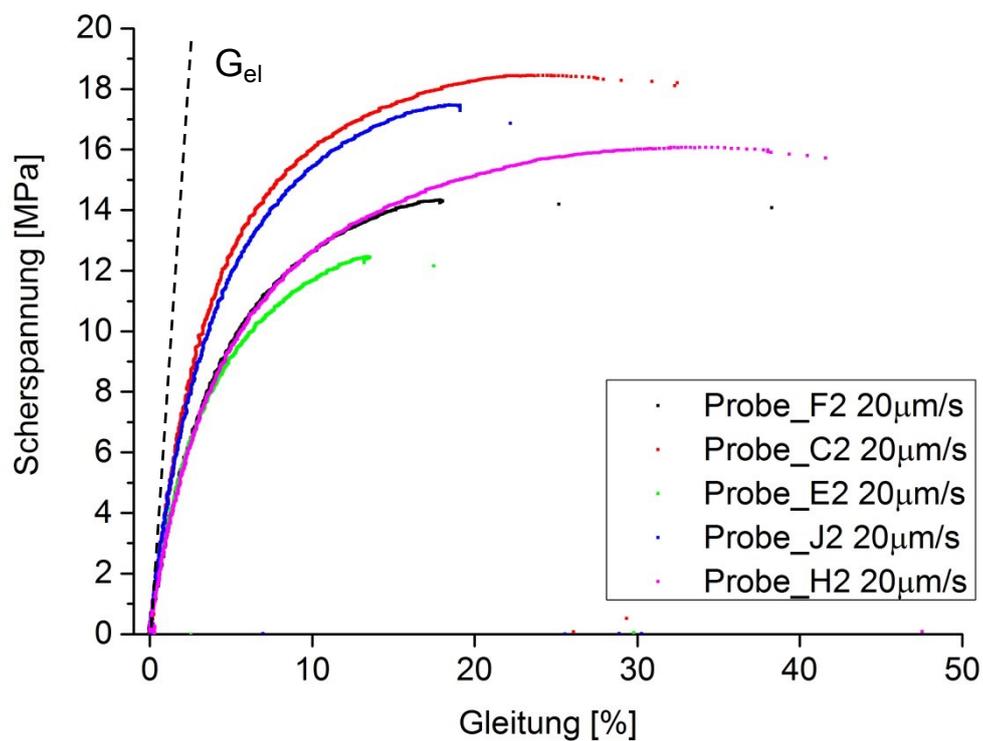


Abbildung 70: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm

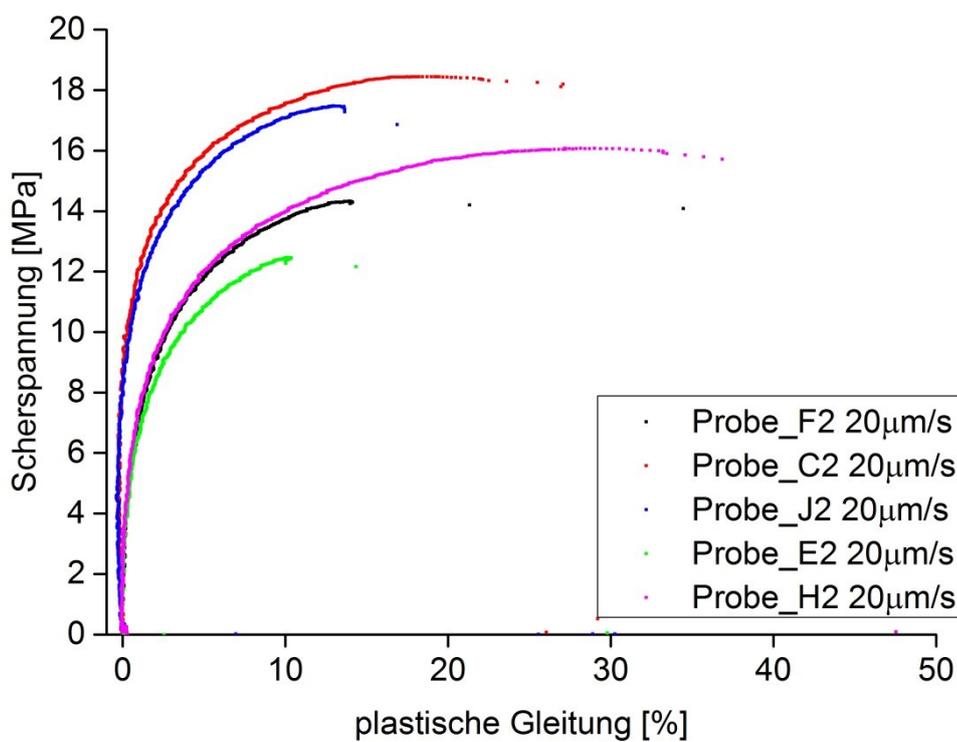


Abbildung 71: Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm (plastisch)

Die Gesamtdehnung des Polymerwerkstoffes teilt sich bekanntlich in einen elastischen und einen plastischen Anteil. Von Interesse ist der plastische irreversible Verformungsanteil γ_{pl} für die Ermittlung der Scherfestigkeit $\tau_{p0,2}$ mit einer irreversiblen Verformung von 0,2 %. In der Abbildung 71 entsteht der Spannungsverlauf durch die Berechnung der plastischen Gleitung mit der folgenden Formel:

$$\gamma_{pl.} = \gamma - \gamma_{el.} = \gamma - \frac{\tau}{G_{el}}$$

Ein weiterer Kennwert des Scherversuches ist die Abhängigkeit der Verformung des Klebers von der Zeit. Die Gleitgeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ lassen sich aus den Kurven der Abbildung 72 durch Regression der Anfangsdehnung bestimmen. Der Anstieg der Regressionsgerade ergibt den Betrag der Verformungsgeschwindigkeit.

$$m = \dot{\gamma} = \frac{dy}{dt}$$

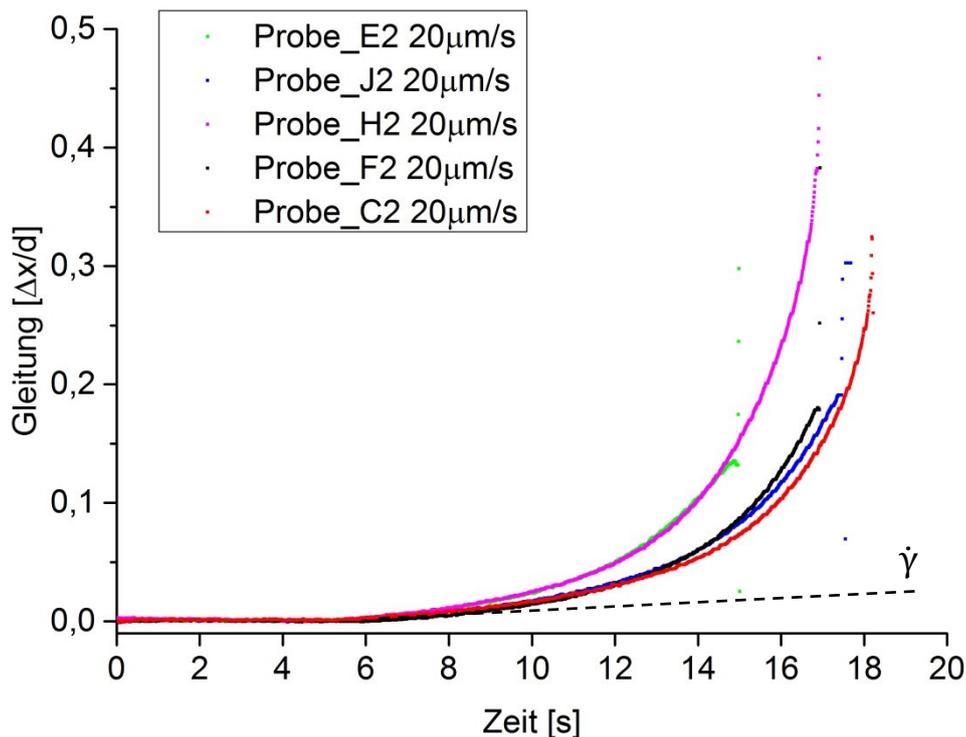


Abbildung 72: Gleitung in Abhängigkeit der Zeit

Zur Versuchsauswertung sind die Ergebnisse des Scherversuches in der Tabelle 10 zusammengetragen. Die Proben wurden bis zum Bruch mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von 20 $\mu\text{m/s}$ gezogen. Erfasst werden die Kraft- und Verformungsgrößen wie die relative Verlängerung des Klebspaltes Δx in Schubrichtung und

die Veränderung der Klebdicke Δd zum Bruchzeitpunkt. Ergänzt wird die Tabelle mit der Bruchkraft F_b und der Kraft $F_{p0,2}$ bei einer plast. Dehnung von 0,2 %.

Tabelle 10: Messergebnisse Scherzugversuch

Probe	F_b	$F_{p0,2}$	Δx	Δd
[-]	[N]	[Mpa]	[μm]	[μm]
C2	2305	618	40,41	4,29
E2	1559	534	16,78	2,37
J2	2184	679	26,38	2,52
H2	2009	546	42,57	4,39
F2	1795	635	22,54	2,57

Durch die Aufarbeitung der Kontaktierungen für die Messung des elektrischen Widerstandes ist ein zumeist exponentiell ansteigender Wert zu verzeichnen. Dargestellt sind die Kraft und das elektrische Signal der Probe_H2 in Abbildung 73. Die verbleibenden Diagramme finden sich im Anhang 5.

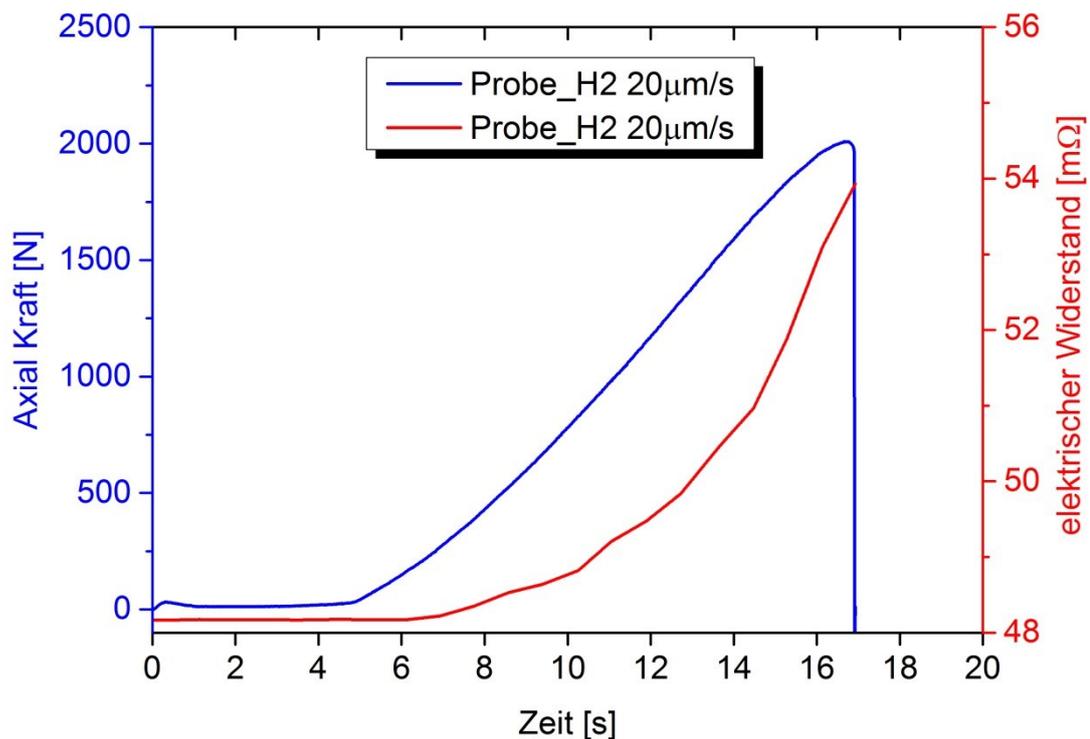


Abbildung 73: Kraftverlauf und elektrischer Widerstand

5.3.3 Auswertung und Diskussion

Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung sind die Proben bereits 35 Tage alt seit Entnahme der Klebevorrichtung aus dem Ofen. Die Prüfbedingungen im Labor der Werkstoffmechanik sind im Protokoll erfasst mit einer Temperatur von 24,5 °C und einer Luftfeuchte von 31 %.

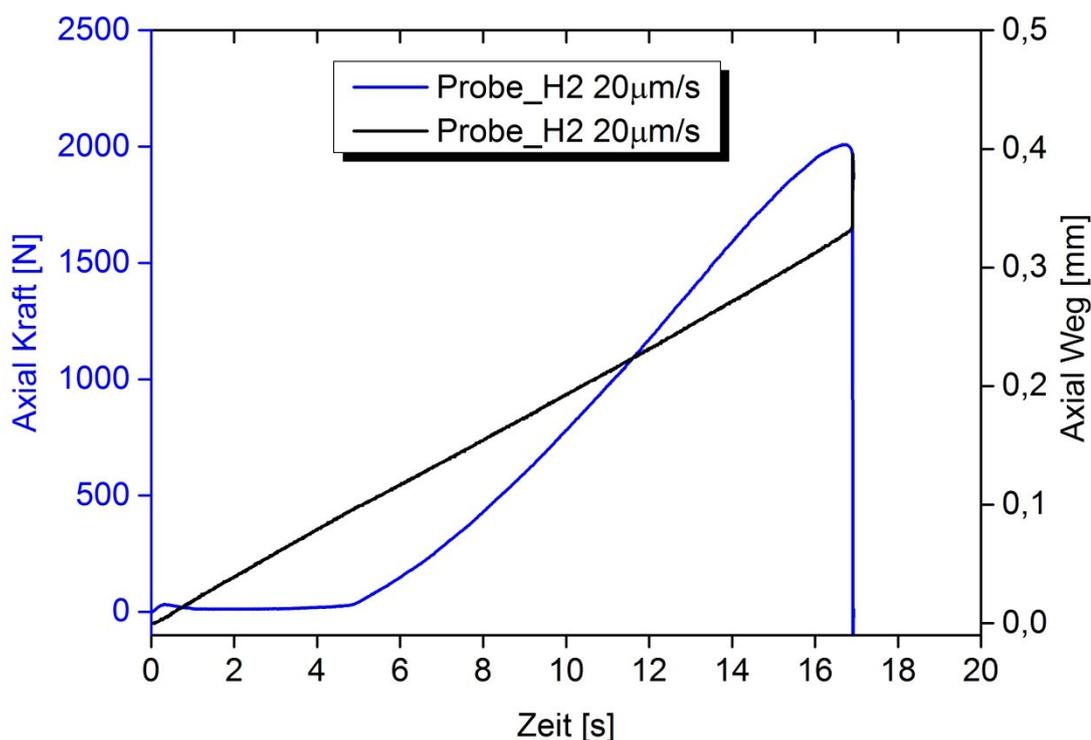


Abbildung 74: Kraftsignal, Wegsignal MTS

In Abbildung 74 ist das zeitliche Verhalten des konstant ansteigenden Weges und der Zugkraft als Antwort abgebildet. Nach dem unmittelbaren Start der Prozedur des Zugversuches ist ein anfänglicher Kraftausschlag von 30 N zu erkennen, bedingt durch die Haftkraft beim Heben der Gelenkköpfe aus den geschmierten Gelenkpfannen. Der Lastanstieg erfolgt mit einer Verzögerungszeit von ungefähr 5 Sekunden. Zu diesem Zeitpunkt hat die Traverse der Zugmaschine eine Strecke von 0,1 mm zurückgelegt, die der Distanz zur Überwindung des Gelenkspiels entspricht. Ein annähernd linearer Verlauf der Kraft ist zu erkennen. Im Endstadium ist der Kleber am stärksten deformiert, denn das plastische Verhalten des Polymerwerkstoffes ist zu diesem Zeitpunkt fortgeschritten. Die Bindungskräfte zwischen den Polymerketten, insbesondere die Nebervalenzverbindungen heben sich auf und es entstehen die sogenannten Scherbänder. Die Entfestigung der Polymerstruktur bewirkt ein Nachlassen des Kraftsignals, denn die Deformationsgeschwindigkeit des Klebers nimmt rasch zu bis zum Bruch.

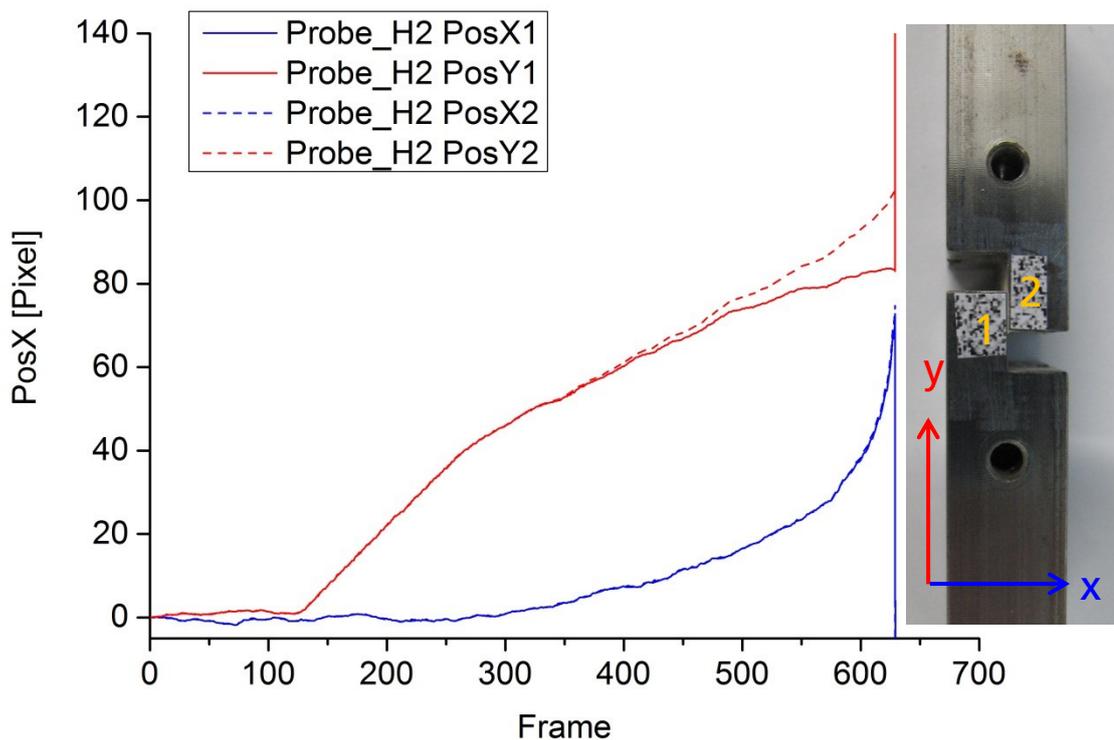


Abbildung 75: Bewegung der Füge­teile in X- und Y-Richtung

Die Grafik der Abbildung 75 zeigt das räumliche Verhalten der gesamten Scherprobe und der Füge­teilverschiebungen zueinander. Dargestellt ist die Pixel-Verschiebung in Abhängigkeit der Bildnummer am Beispiel der Probe_H2 aus der Messung mittels Bildkorrelationsverfahren. Die Verschiebungen in X- und Y-Richtung sind die jeweiligen der horizontalen und vertikalen Achsrichtung des Klebspaltes zum Kamera-Koordinatensystem. Sie unterscheiden sich farblich und tragen die Indexe des Füge­teils der geklebten Probe. Betrachtet man die Relativverschiebungen der Kurven einer Farbe, so ist eine größer werdende Differenz in Y-Richtung zu verzeichnen, entsprechend der gewünschten Beanspruchung des Klebers. Sie ist in der zweiten Hälfte des Zugversuches messbar und zum Zeitpunkt des Bruches am größten. Eine Relativbewegung der Füge­teile in X-Richtung an Hand der blauen Kurven ist fast über dem gesamten Bereich der Messung nicht nachzuweisen. Erst kurz vor dem Bruchereignis ist eine minimale Differenz beider Verläufe messbar, die in der Grafik kaum in Erscheinung tritt. Die Genauigkeit der Messung der axialen Verschiebung ist abhängig von der Ausrichtung des Koordinatensystems der Kamera zur Traversenachse der Zugmaschine. Mit der Bildung des Betrages der Verschiebungswerte beider Achsrichtungen ist die Gesamtverformung des Klebstoffes berechenbar. Da die Messfehler beider Bewegungsrichtungen in die Rechnung einfließen und das Bildrauschen einen signifikant größeren Einfluss auf das Ergebnis hat als ein annähernd

kleiner Winkelfehler beim Ausrichten der Kamera, wird zur Berechnung der Scherung die Vertikalachse PosY in Betracht gezogen.

Eine weitere Erkenntnis ist das räumliche und zeitliche Verhalten der Bewegungen relativ zur Ausgangsposition der Scherprobe. Verglichen werden in Abbildung 76 die Bewegungen der Traversen auf Höhe des Scherprobenkörpers mit dem Index 1. Diese Scherproben befinden sich an der unteren Traverse. Die fünf Zugproben haben über die gesamte Versuchszeit den gleichen Charakter. Unterschiede zeigen sich in der zurückgelegten Strecke bis zum Bruch. Alle Traversenkomponenten zur Befestigung der Probe tragen zu der Gesamtverformung bei. Einen großen Anteil daran hat der Isolator aus POM, denn er wird durch Verschraubung auf Druck belastet und erfährt während des Versuches ebenfalls den Lastanstieg. Ebenso wie der Klebstoff verhält sich der POM-Block viskoelastisch und neigt zum Kriechen. Die unterschiedlichen Vorspannungen bewirken verschieden große Flächenpressungen und somit unterschiedliche Verformungen insbesondere in Abhängigkeit von der Zeit.

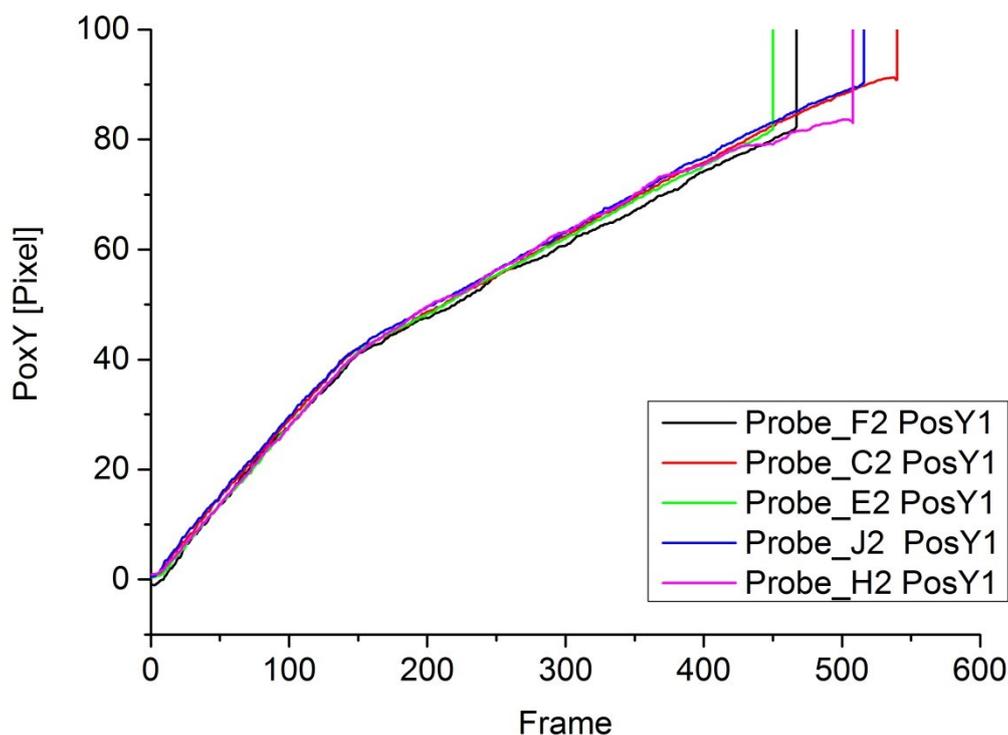


Abbildung 76: Bewegung Fügeteil1 in Y-Richtung

Auffällig ist eine Änderung des Anstieges nach dem ersten Drittel der Messung. Es besteht die Möglichkeit, dass dieser Zeitpunkt den Beginn der Entfestigung des POM-Blockes nachweist. Eine andere Möglichkeit ist ein Kippen oder Verdrehen der Scherprobe in der Ebene durch die Freiheitsgrade der Gelenke. Dabei teilt sich der resultierende Betrag der Bewegung in vertikaler und horizontaler Richtung auf. Dar-

gestellt und gemessen wird jedoch nur der Vertikalanteil, der ab Bildnummer 150 sich verlangsamt. Bemerkbar macht sich dieser Effekt mit signifikanten Unterschieden bei Beobachtung der horizontalen Bewegungen in der Abbildung 77. Bis auf die Probe_E2 ist die tendenzielle Richtung dieselbe. Der Wert der Richtungsänderung ist ein Maß für die Ausgleichbewegung in Folge eines entstehenden Biegemomenteinflusses. Die Gelenke, aber auch der POM-Block lassen diesen Bewegungsausgleich zu. Je größer der Einspannfehler, beispielsweise durch eine zur Traversenhalterung exzentrische Lage, desto größer die Verschiebung des Probenkörpers. Nur so können zusätzliche, zur Schubspannung hervorgerufene Spannungen auf ein Minimum gehalten werden. Ohne Gelenkfunktion werden unter fehlerhafter Einspannung bereits beim Fixieren der Probe an den Traversen Querkräfte eingeleitet, die zur vorzeitigen Zerstörung der Probe führen.

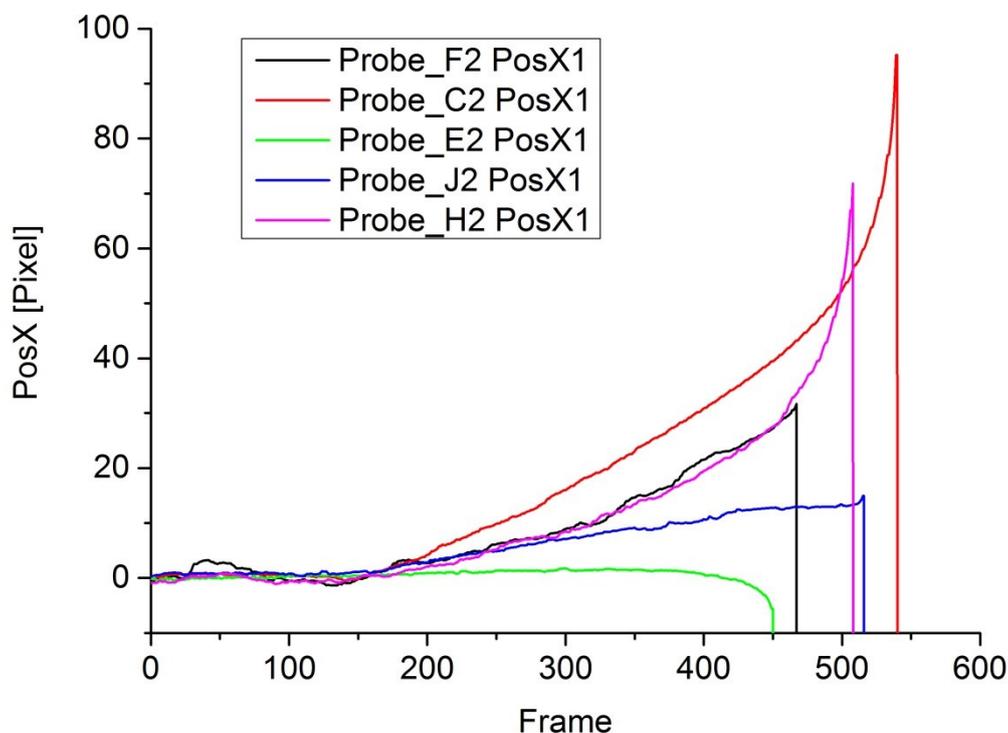


Abbildung 77: Bewegung Fügeteil1 in X-Richtung

Bevor alle Ergebnisse im Zusammenhang ausgewertet werden können, ist das Bruchbild zu veranschaulichen. Mit einem Auflichtmikroskop werden die Bilder erstellt und sind nicht nur ein Nachweis für den entstandenen Schaden, sondern lassen auch Rückschlüsse auf die Qualität der vernetzten Struktur des Klebstoffes zu. Zur Auswertung dürfen nur Proben mit überwiegendem Kohäsionsbruch herangezogen werden. In der Praxis wird von einem klebstoffseitigen Bruch gesprochen, wenn Klebstoffreste die Fügeteiloberfläche gänzlich bedecken. Von einem Adhäsionsbruch ist die Rede, wenn sich der Klebstoff durch den Bruch vollständig von der Klebfläche

trennt und der Bruch entlang der Phasengrenze verläuft. Im strengen Sinne ist dieser Bruch höchst selten anzutreffen und auf metallischen Klebflächen selten zu beobachten. Einen fließender Übergang zwischen diesen Arten ist der Mischbruch, das heißt, das Bruchbild zeigt auf der Fügeiteiloberfläche sowohl Bereiche mit Klebstoffresten als auch mit scheinbar saubereren Bereichen.



Abbildung 78: Bruchfläche Probe_C2

Die Scherbrüche der Zugversuche ähneln einem überwiegenden Kohäsionsbruch wie in Abbildung 78. Auffallend sind in Zugrichtung ausgerichtete Adhäsionsbrüche. Ob deren Kontur bedingt durch einen Härtingriss verläuft, ist im Nachhinein nicht nachweisbar. Bei den sich seitenverkehrt gegenüberliegenden Bruchflächen sind zwei Lufteinschlüsse zu erkennen, die die Struktur und Haftung des Polymers lokal aufheben. Auch in der Seitenansicht (Abbildung 79) ist die ungefähr mittig liegende Bruchlinie zu erkennen, die durch Aufhebung der kohäsiven Eigenschaften entstand. Alle Bruchbilder sind im Anhang 6 hinterlegt. Um den Bruch vergleichen zu können, wird der Anteil des Mischbruches prozentual geschätzt und fließt in die Wertung mit ein.

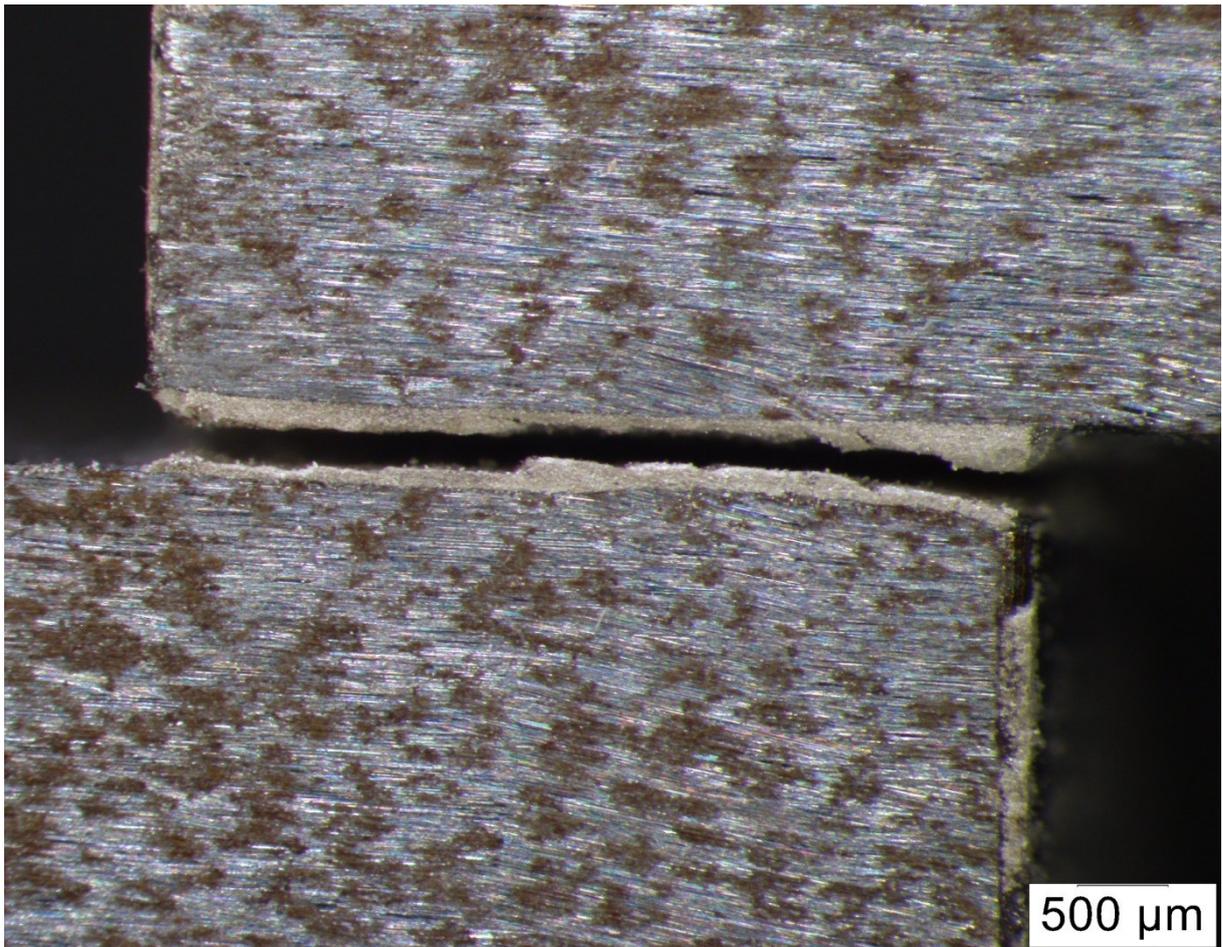


Abbildung 79: Bruchbild seitlich Probe_H2

Für eine abschließende Auswertung sind alle möglichen Einflussgrößen vor und während des Zugversuches zu berücksichtigen. Mit der Klebdicke d aus der Messung mittels Messtaster und der Scherfläche werden die Spannungs- und Gleitungswerte normiert. Aus den Schubspannungs-Gleitungs-Kurven wird der elastische Schubmodul G_{el} ermittelt. Erweitert wird die Ergebnistabelle mit dem Adhäsionsanteil des Mischbruches und der Bewegung der Scherprobe in vertikaler Richtung $PosX1$ bis zum Erreichen des Bruches, sowie mit der Bruchdehnung γ_b und Gleitgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$. In Tabelle 11 werden die Proben gegenübergestellt und verglichen, um Zusammenhänge im Bruchverhalten erkennen zu können.

Die Probe_E2 ist auf Grund ihres großflächigen adhäsiven Bruchanteils aus der Wertung zu nehmen. Für eine Genauigkeitsuntersuchung werden die Ergebnisgrößen gemittelt und als Maß für die Streuung die Standardabweichung berechnet.

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{Standardabweichung} \quad S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Tabelle 11: Messergebnisse Scherzugversuch normiert und weitere Einflussgrößen

Probe	τ_m	G_{el}	$\tau_{p0,2}$	γ_b	d	Δx	Δd	$\dot{\gamma}$	$A_{Adhäsion}$	PosX1
[-]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[\Delta x/d]	[μm]	[μm]	[μm]	[ν/s]	[%]	[μm]
C2	18,44	337,37	4,94	0,225	124,1	40,41	4,29	0,00243	5	221,45
E2	12,47	388,88	4,27	0,105	128,6	16,78	2,37	0,00155	40	-11,05
J2	17,47	317,55	5,43	0,136	126,5	26,38	2,52	0,00194	5	32,33
H2	16,07	330,98	4,37	0,341	131,5	42,57	4,39	0,00296	10	155,81
F2	14,36	367,52	5,08	0,142	112,6	22,54	2,57	0,00257	15	71,86

Für die verbleibenden Proben ergibt sich eine durchschnittliche Scherfestigkeit von $\tau_m = 16,6$ MPa mit einer Abweichung von $S_\tau = 1,78$ MPa, beziehungsweise einem relativen Fehler von circa 10 %. Ein etwas geringerer Fehlerbetrag von circa 6 % ergibt sich mit der Bestimmung des elastischen Schubmoduls. Er liegt im Mittel bei $G_{el} = 338,36$ MPa mit einer Standardabweichung von $S_{G_{el}} = 21,16$ MPa. Je länger der Zugversuch oder die Materialbelastung bis zum Bruch dauert, umso größer sind die Abweichungen im werkstoffabhängigen Verformungsverhalten. Nicht nur Fehlstellen in der Struktur des Klebstoffes, sondern auch unterschiedliche Vernetzungsqualitäten zwischen den Polymerketten nach dem Aushärten haben Einfluss auf das Deformationsvermögen. Ebenso wie die Gestalt der Klebung ist die geometrische Form maßgeblich verantwortlich für das Verhalten der Probe bei Belastung. Beispielsweise verformt sich bei gleicher Kraft ein Scherkörper mit zunehmender Höhe deutlich stärker, relativ zum entlastenden Zustand. Für den Zugversuch im Ausgangszustand des Leitklebstoffes sind die Parameter Klebefläche und Klebdicke ausschlaggebend. Im Diagramm der Abbildung 80 ist der relative Fehler des Schubmoduls in Abhängigkeit der abweichenden Fläche und Dicke des Klebstoffes dargestellt. Die durch die Metallverarbeitung entstandenen Abweichungen der Konturmaße zeigen, dass der Fehler in der Fertigung der Klebdicke einen deutlich größeren Einfluss auf den Schubmodul hat, als eine fehlerhafte Fertigung der Konturmaße der Fläche. Die zur Berechnung herangezogenen Parameter entsprechen den Dimensionen des Konzeptes, das heißt Kraft und Verformung sind dem linearelastischen Bereich entnommen.

$$\text{Fehler durch Fläche} \quad G(\Delta A) = \frac{F \cdot d}{\Delta x \cdot A} = \frac{F \cdot d}{\Delta x \cdot (\Delta \dot{\gamma} \cdot \Delta b)}$$

$$\text{Fehler durch Klebdicke} \quad G(\Delta d) = \frac{F \cdot \Delta d}{\Delta x \cdot A}$$

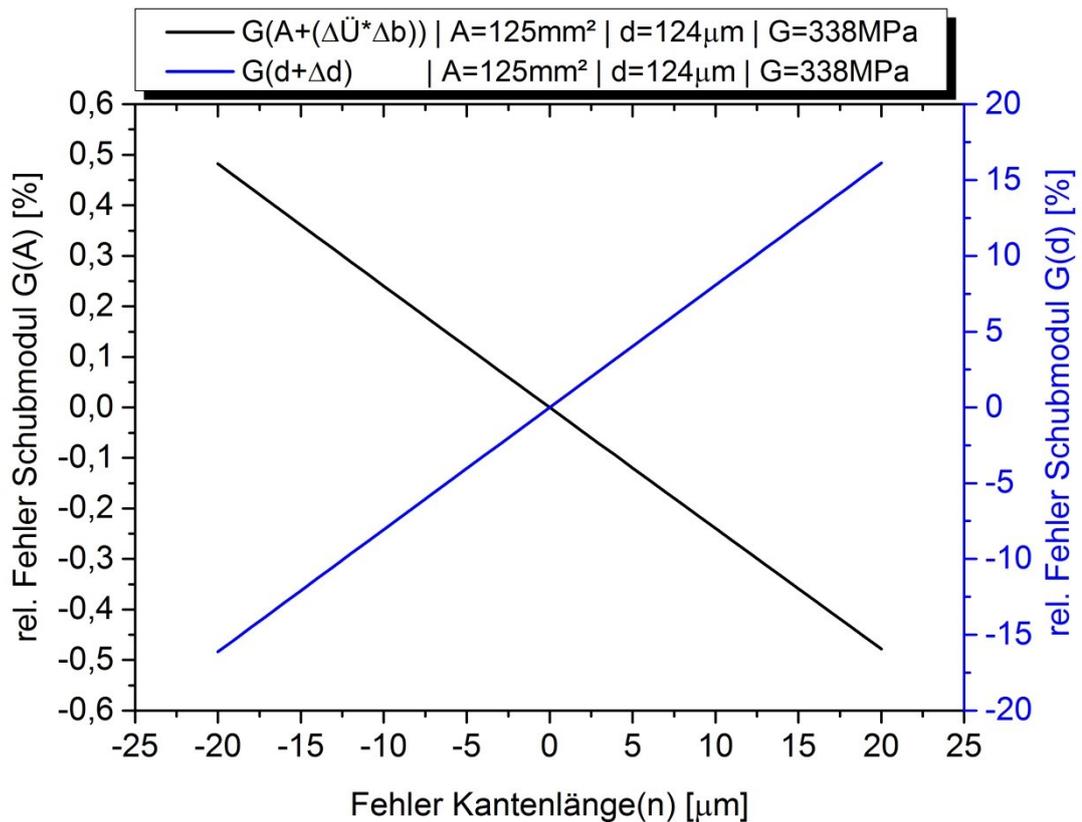


Abbildung 80: Einfluss Fertigungsfehler der Klebefläche und Klebdicke

Da alleine die Konturmaße der Klebefläche nicht ausreichen, um die Gleichmäßigkeit und Vollständigkeit eines benetzten Klebespalts zu beschreiben, ist in Abbildung 81 der relative Fehler des Schubmoduls in Abhängigkeit der systematischen Fehler durch falsch angenommene Fläche und Klebdicke dargestellt. Eine geringere Klebefläche durch eine nicht vorhandene Adhäsionsbindung zwischen Klebstoff und Grenzfläche verringert den Schubmodul und mindert das Modulergebnis. Für die Probe_E2 mit einem Adhäsionsbruchanteil von 40 % bedeutet dies einen relativen Fehler in der Berechnung des Schubmoduls von über 50 %. Die Bruchfläche schien im Bereich zur Bestimmung des elastischen Moduls noch intakt, da der ermittelte Schubmodul dem Mittelwert entspricht. Ebenso groß kann sich der Systemfehler durch die falsch angenommene Klebdicke zeigen. Die Berechnungsvorschrift enthält zwei nicht eindeutig bestimmte Parameter, die gleichzeitig auftreten, sich entgegengesetzt gleichermaßen bedingen und das Messergebnis stark beeinträchtigen.

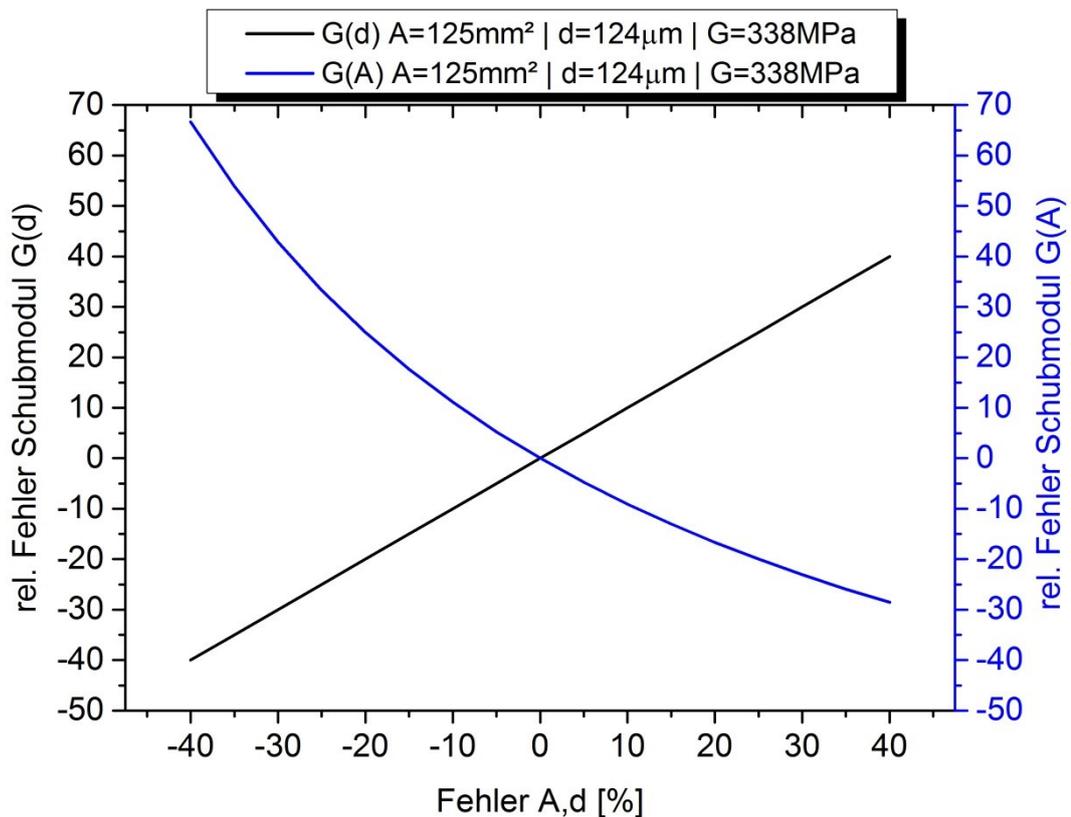


Abbildung 81: relativer Fehler durch Klebefläche und Klebdicke

Vergleicht man die Bruchdehnungen mit den Klebdicken aus Tabelle 11, so bestätigt die Probe_H2 den theoretischen Zusammenhang. Eine Tendenz ist zu erkennen, dass mit kleiner werdenden Klebdicken die Dehnungen abnehmen. Ein weiterer denkbarer Zusammenhang besteht zwischen der Gleitgeschwindigkeit und der Dehnung. Die Proben C2 und H2 haben sowohl große Verformungen, als auch große Gleitgeschwindigkeiten. Die rasche Scherung führt in der Regel zu hohen Scherfestigkeitswerten. Die Scherraten der Versuchsdurchführungen zeigen, dass keine konstanten Bedingungen vorliegen, um die Ergebnisgrößen vergleichbar machen zu können. Die Proben E2 und H2 unterscheiden sich um den Faktor zwei. Grund dafür könnte nicht nur eine abweichende Klebdicke sein, sondern auch die viskoelastische Eigenschaft des POM-Blockes. Die Vorspannung der Schrauben zum Spannen der POM-Blöcke ist nicht ideal konstant zwischen den Versuchsdurchführungen, sodass die Belastungsgeschwindigkeit folglich nicht als konstant angenommen werden kann. Eine Lösung bietet sich an mit einer dehnungsgeregelten Steuerung durch die Anschaffung eines industriell üblichen Videoextensometers.

Die Verformung des Klebstoffes in Zugrichtung verhält sich annähernd proportional mit der Veränderung der Klebdicke, in der Tabelle 11 dargestellt, zum Bruchzeitpunkt. Je größer die Längenänderung, desto stärker verformt sich die Dicke des Klebstoffes. Dies lässt darauf schließen, dass die Probe_H2 einen deutlich größer

gefertigten Klebespalt hat, als die Probe_F2. Ein letztendlicher Nachweis für einen reproduzierbaren Klebespalt kann nicht erbracht werden. Theoretisch und unter Annahme einer vollständig benetzten Klebefläche ist die Klebdicke im linear elastischen Dehnungsbereich berechenbar. Zur Ergebniskontrolle der Schubmodule sollten die Klebdicken in Abhängigkeit der experimentell ermittelten Module der Proben einen Sollwert von $d(G)=124 \mu\text{m}$ erzielen. Eine Abweichung der Klebdicken zeigt die Spalte $d_k(338\text{MPa})$ der Tabelle 12 und ergibt sich mit dem mittleren Schubmodul.

$$d_k(0,25\% \dots 0,5\%) = \frac{G_{el} * (\Delta x_2 - \Delta x_1) * A}{(F_2 - F_1)}$$

Tabelle 12: Experimentelle Ermittlung Klebdicke

Probe	τ_m	G_{el}	$d_k(G_{el})$	$d_k(338\text{MPa})$
[-]	[Mpa]	[Mpa]	[μm]	[μm]
C2	18,44	337,37	126,04	126,28
E2	12,47	388,88	124,01	107,79
J2	17,47	317,55	123,34	131,28
H2	16,07	330,98	123,83	131,81
F2	14,36	367,52	125,45	114,41

Das Maß für die Auslenkung oder Ausgleichbewegung des Biegemomenteinflusses im belasteten Zustand zeigt sich an Hand der Spalte PosX1. Auffällig ist, dass eine große Auslenkung zu einer hohen Scherfestigkeit unter großer Bruchdehnung führt. Im Anhang 5 ist der elektrische Widerstand der fünf Proben als ein Indikator für den Fortschritt des Materialversagens abgebildet. Der Ausgangswiderstand kann die Ergebnisse der Festigkeit nicht bestätigen. Ein geringer Widerstandswert ist nicht gleich bedeutend mit einer besonders festen oder gut vernetzten Polymerstruktur, wodurch die leitfähigen Silberpartikel am besten kontaktiert werden. Mit Zunahme der Belastung und Steigerung der Verformung fällt der elektrische Widerstand der Proben F2 und E2 zwischenzeitlich ab. Wenn man mögliche Fehleinflüsse von außerhalb ausschließt, ist diese Messung ein Hinweis für eine Neuordnung der Polymerstruktur, bei der sich zuvor in Folge der Entfestigung aufgebrochene Verbindungen zwischen den Silber-Partikeln und somit Kontaktstellen zur Leitfähigkeit durch Verstrecken der Molekülstruktur wieder neu kontaktieren.

Abschließend und in Bezug auf die geforderten Messergebnisse wird der quasistatische Scherzugversuch den technischen Anforderungen gerecht. Die Gelenkfunktion zur Reduzierung des Biegemomentes und die hohe Steifigkeit der Fügebauteile erfüllen ihren Zweck einer idealen Schubbeanspruchung im Klebespalt. Zur Verbesserung einer konstanten Gleitung kann diese entweder geregelt werden oder man ersetzt diese durch einen kraftgesteuerten Lastanstieg. Mit einer konstant zunehmenden

Belastung ist die Verformung des Klebers zeitlich unabhängig von allen elastischen Komponenten, die zur Einspannung der Scherprobe dienen. Eine verhältnismäßig große Streuung der Materialkennwerte zeigt, dass für gesicherte Aussagen der Ergebnisgrößen und des Materialverhaltens eine größere Stückzahl von Proben getestet werden muss.

5.4 Zyklischer Ermüdungsversuch

5.4.1 Testlauf und Versuchsanpassung

Ein Teil der hergestellten Proben aus der ersten und zweiten Klebereihe werden für einen Testlauf des zyklischen Ermüdungsversuches verwendet. Für diesen Aufbau werden die Gelenke im Scherprobenaufbau weggelassen, um den Kraftfluss zwischen den Zug- und Druckphasen nicht zu unterbrechen. Zudem kann sich die Probe durch sich ständig ändernde Belastungsrichtungen verdrehen und die Einspannung erfährt eine zufällige Änderung. Die Lastaufbringung über die obere Traverse erfolgt über das Bewegungsprofil einer kraftgeregelten Dreiecksfahrt. Nur so kann von konstanten Ermüdungsverhalten ausgegangen werden, denn das Kraftsignal ist über die gesamte Länge der Traverse und auch der Probe gleich groß. Die Antwort auf den Kraftanstieg liefert der Abstand zwischen den maximalen Auslenkungen der Wegamplituden, beziehungsweise die Relativverschiebung der Fügeteile mittels Extensometermessung. Im Idealfall nimmt die Verschiebung oder Gleitung des Klebstoffes bis zum Bruch zu. Aus den Ergebnissen des quasistatischen Zugversuches ergaben sich gleiche Dehnungen im niedrigen Kraftbereich. Für den folgenden Zyklusversuch werden die Proben einer Wechsellast von $F = 500 \text{ N}$ bei einer Frequenz von $f = 0,5 \text{ Hz}$ ausgesetzt. Die ersten Ergebnisse fallen ernüchternd aus und bieten keine Möglichkeit einer Gegenüberstellung beziehungsweise Auswertung, dennoch ist der Fehlermechanismus zu verfolgen und einzuschränken. Die Abbildung 82 zeigt sehr große Abweichungen bezüglich der Lebensdauer unter Wechsellast.

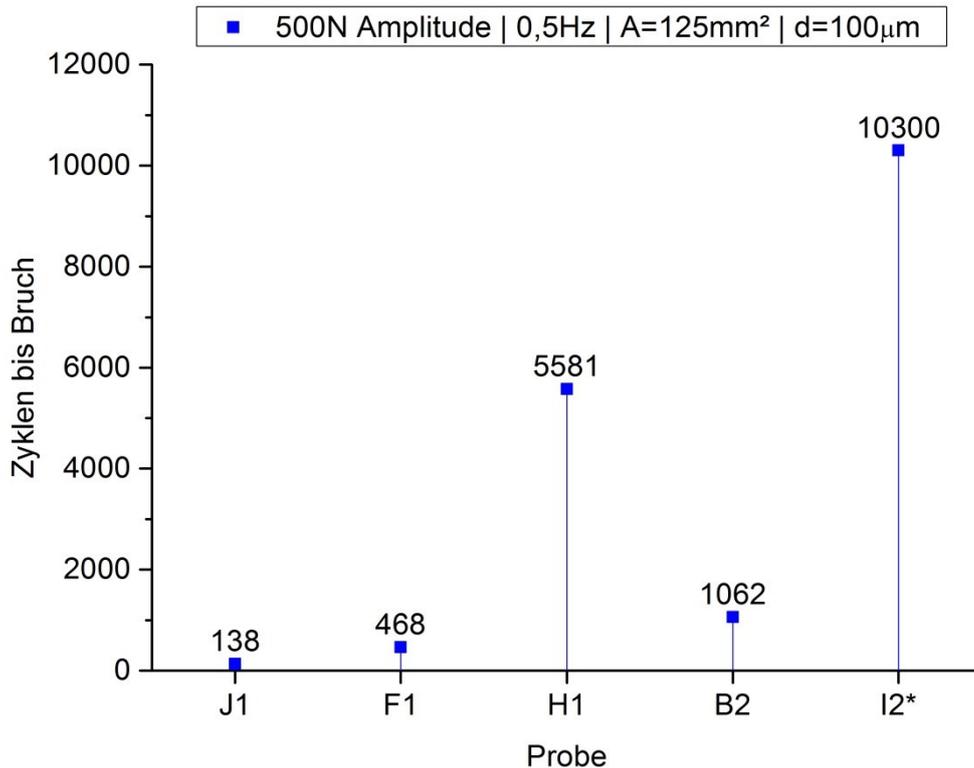


Abbildung 82: Zyklen bis Bruch (* Versuchsabbruch)

Eine Dehnungsmessung mit Kamera war zu diesem Zeitpunkt aus sicherheitstechnischen Gründen nicht möglich, da eine Auslösung per Hand durch eine Infrarot-Fernbedienung ersetzt werden wird. Um Rückschlüsse auf einen möglichen Fehleinfluss schließen zu können, werden die Systemantworten nach ihrem Verhalten näher untersucht. In den nachfolgenden Diagrammen der Abbildungen 83 und 84 sind die Amplitudenverläufe der Traversen und der elektrische Widerstand in Abhängigkeit der Zeit abgebildet. Die Proben J1 und H1 sind zu vergleichen, denn deren Lebensdauer unterscheidet sich um den Faktor 40 unter gleicher Belastung. Nicht nur zeitlich, sondern auch örtlich verschiedenartig zeigt sich der zurückgelegte Traversenweg der MTS. Die Probe_J1 zeigt einen konstanten Verlauf unter größer werdenden Auslenkungen bis zum Bruch. Die Probe_H1 weist zu Beginn denselben Verlauf des Traversenwegs auf, erfährt aber dann eine Traversenverschiebung in Zugrichtung. Da die auf die POM-Blöcke wirkende Flächenpressung in Zugrichtung größer ist als in Druckrichtung, reagiert der Isolator nach einer Vielzahl von zyklischen Wiederholungen mit plastischem Verhalten. Ein Amplitudenverlauf ist auch im elektrischen Signal zu erkennen, welches jedoch nicht in Echtzeit abgetastet werden kann. Zu verzeichnen ist ein stetiger Wechsel zwischen Maximum und Minimum, deren Änderung eine Hüllkurve ergibt.

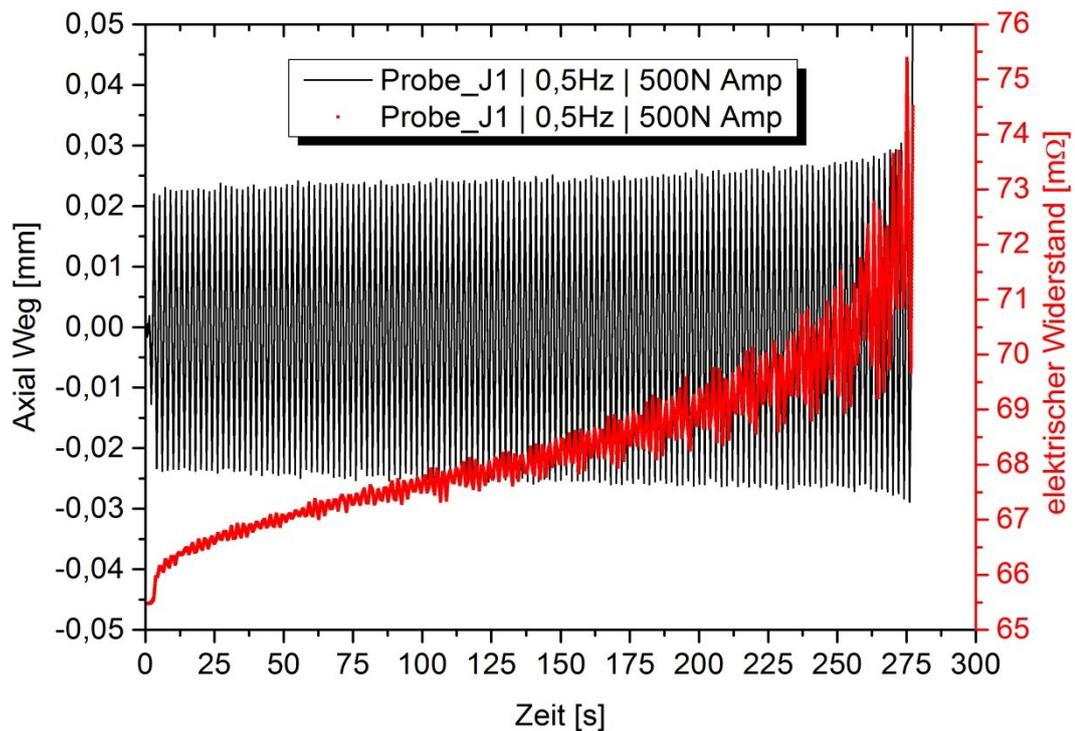


Abbildung 83: Probe_J1 Amplitudenverlauf Traverse, elektrischer Widerstand

Das unterschiedliche mechanische Verhalten der Klebstoffe kann mit der Hüllkurve des elektrischen Widerstandes nachempfunden werden. Während des Versuches kommt es bei der Probe_H1 (Abbildung 84) durch die Bewegung der Silber-Partikel in der Polymermatrix zu sich lokal ändernden Kontaktbedingungen und somit während der Ermüdung zu einer signifikanten Änderung der elektrischen Größe innerhalb der Auslenkungsgrenzen. In der Zeit, in der die Probe_J1 bereits den Bruch erreicht hat und das elektrische Signal sich vergrößerte, zeigt die Probe_H1 kaum eine Änderung zwischen Maximal- und Minimalwert. Denkbar ist eine kleinere Scherung des Klebers auf Grund einer besser vernetzten Polymerstruktur oder einer deutlich kleineren Klebdicke. Anhand des Verlaufs des elektrischen Widerstandes heben sich drei Phasenentwicklungen und Tendenzen hervor. Im ersten Abschnitt beginnt das Einlaufen der Messwerte unter den Lastzyklen. Danach schließt sich ein linear konstanter Anstieg an. Im letzten Abschnitt treten deutliche Schädigungen im Kleber auf mit größer werdenden elektrischen Widerstandsausschlägen.

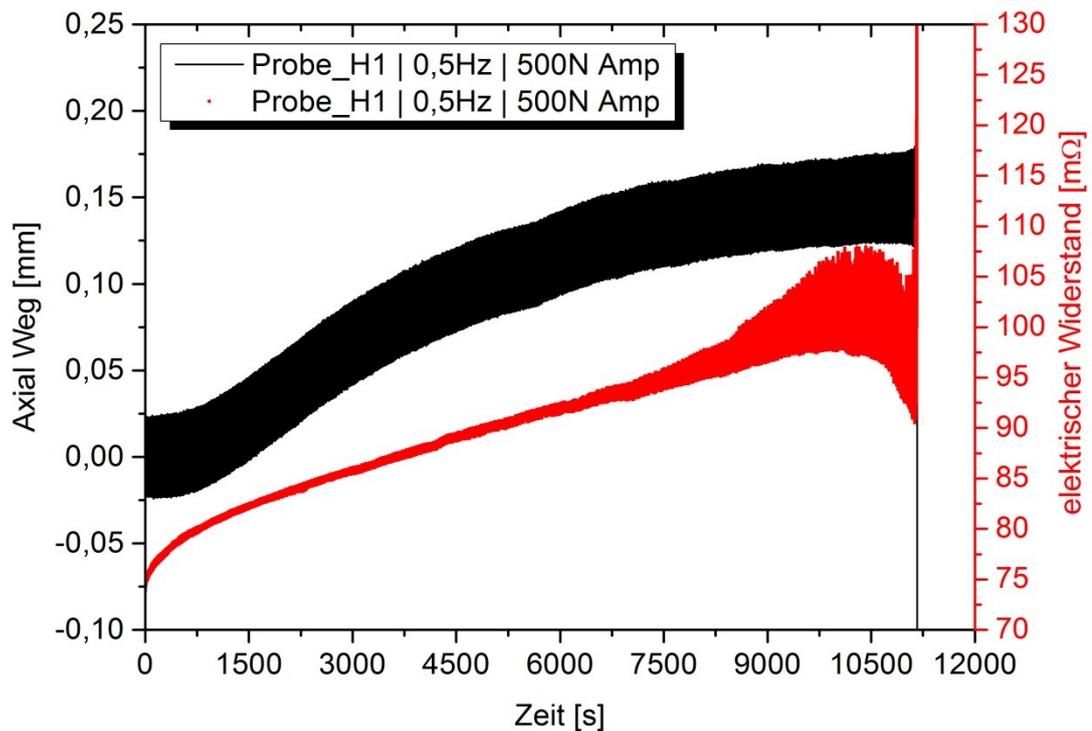


Abbildung 84: Probe_H1 Amplitudenverlauf Traverse, elektrischer Widerstand

Offensichtlich hat der Isolator aus Kunststoff Einfluss auf das Verformungsverhalten der Probe. Dies belegen die unterschiedlichen Anfangsdeformationen der Traverse aus Abbildung 85. Die geringere Steifigkeit unter wechselnden Lastrichtungen kann zu ungewollten Freiheitsgraden führen, die zu der in Schubrichtung wirkenden Belastung zusätzliche Spannungen induzieren. Für weitere zyklische Versuche ist der Isolator aus POM wegzulassen oder auszutauschen, auch wenn die direkte Anbindung an die Zugmaschine die Messung des elektrischen Signals stören würde.

Ein weiterer Fehlermechanismus entsteht bei der Einspannung der Probe. Mit dem Anzug der Kontermutter wird ein Drehmoment eingeleitet. Eine Vorschädigung der Kleberstruktur kann nicht ausgeschlossen werden, auch wenn eine Gegenkraft mit einem zweiten Drehmomentschlüssel erzeugt wird. Die Traversenhalterung der MTS verfügt über Spannscheiben, die durch Verdrehung in entgegengesetzter Richtung eine Vorspannung in Zugrichtung erzeugen. Ein induziertes Drehmoment kann damit verhindert werden, jedoch nicht ein aus der Fertigung möglicher Winkelfehler aller Komponenten im Systemaufbau.

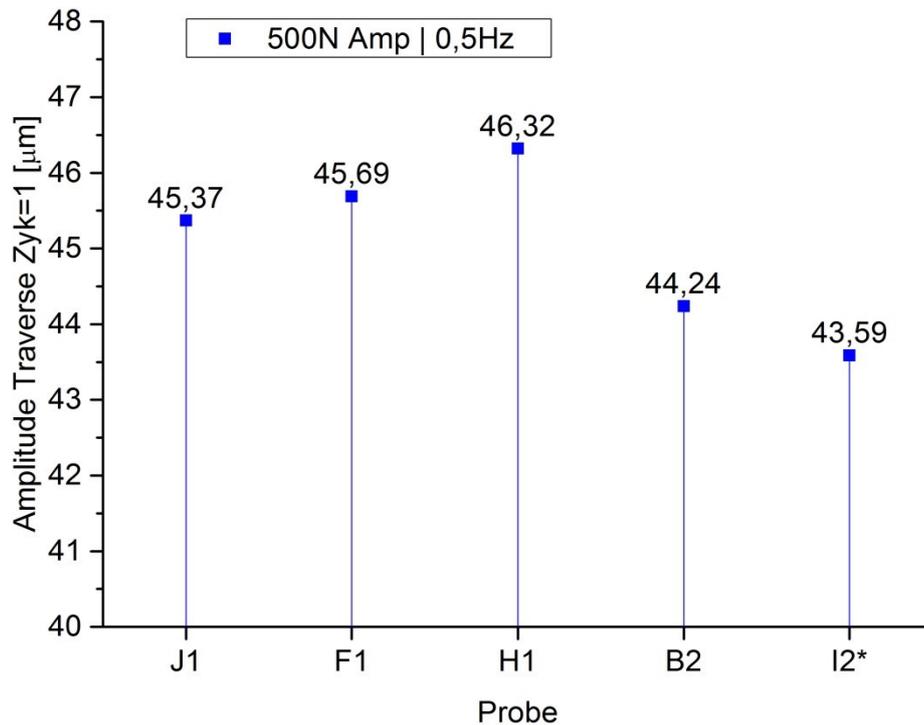


Abbildung 85: Anfangsamplituden Traverse (* Versuchsabbruch)

5.4.2 Versuchsergebnisse zyklischer Ermüdungsversuch

Für die weitere Durchführung der Ermüdungsversuche wird die Scherprobe, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, nach einer anderen Vorgehensweise eingespannt. Beim Versuch, die Spannscheiben ineinander zu verdrehen, kommt es durch Haftreibung zu einer Übertragung eines Drehmomentes auf die zylindrischen Halterungen. Da diese Spanneinheit als Letztes zum Fixieren der geklebten Probe fungiert, bricht diese unmittelbar. Auch das direkte Einschrauben der Scherprobe ohne Flansch und POM-Block erweist sich als nicht geeignet. Ungenauigkeiten in der Ausrichtung der Traversenhalter bewirkt einen Versatz in der Horizontalebene und führt somit zu nicht koaxial liegenden Achsen zur Anbindung der Scherprobe. Auch die Fügeteile und deren gegenüberliegenden Innengewinde haben in der Praxis nicht dieselbe Flucht, sodass beim Anziehen der Befestigungspunkte Querkräfte einwirken, die die Klebung zerstört. Ohne den Einsatz einer Komponente zum Ausgleich des Versatzes ist die Einspannung der Proben nicht möglich. Aus diesem Grund wird mit dem bisherigen Scherprobenaufbau für den zyklischen Wechsellastversuch weitergearbeitet. Dabei wird darauf geachtet, dass die sich gegenüberliegenden Flansche planparallel liegen und unter einer aufgetragenen Druckkraft von

100 N an die Traversenhalter verschraubt werden. Gegenüber der Vorgehensweise im Testlauf werden nicht die drehmomentstarken Kontermuttern als letztes angezogen, sondern die vier Zylinderkopfschrauben zum Anziehen der POM-Blöcke, die sich bereits im Verbund mit der Probe befinden. Über ein kraftgeregeltes Verhalten der MTS stellt sich der erzwungene Abstand der Traversen ein und die Probe ist in einem unbelasteten Zustand.

Die Ermüdungsergebnisse der verbliebenen Proben einer dritten Klebreihe sind im Diagramm der Abbildung 86 veranschaulicht. Um das Versagen zu beschleunigen, wurde die Amplitude auf 1000 N erhöht. Die durchschnittlich gemessene Klebdicke beträgt 128 µm.

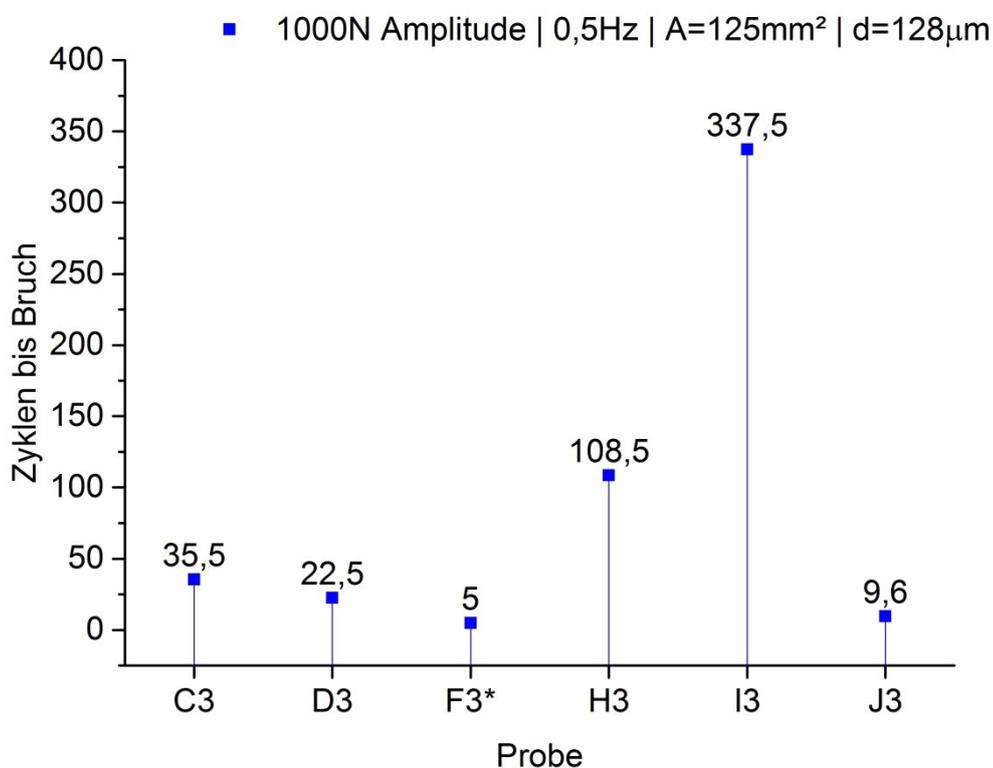


Abbildung 86: Zyklen bis Bruch (* Adhäsionsbruch)

Mit Hilfe der Videoaufzeichnung und anschließender Bildkorrelation können die Füge­teilverformungen erfasst werden. Die Relativverformungen des Klebers ermöglichen die Darstellung und Berechnung weiterer Größen. Den Grafen einer Hystereseschleife zeigt die Abbildung 87. Dabei konnte die Probe_F3 bis zum Bruch aufgezeichnet werden. Nach dem ersten Halbzyklus stellt sich eine konstant wiederholende Schubbeanspruchung ein. Die Deformationsantwort in Schubrichtung ändert sich mit zunehmender Zyklenzahl gegenüber dem unbelasteten Zustand, denn ein Vorranschreiten der Ermüdung beziehungsweise die Entfestigung des Klebstoffes macht

sich dadurch bemerkbar. Die Beträge der Gleitungen in Zug- und Druckrichtung sind gleich groß aber abhängig von ihrem vorigen Ausgangszustand. Eine große Rolle spielt beim Durchlaufen einer Hystereseschleife die bleibende Dehnung, die nach jedem Spannungsmaximum am stärksten hervorgerufen wird. Je größer die eingeschlossene Fläche eines Zyklus, umso größer ist die verrichtete Formänderungsarbeit.

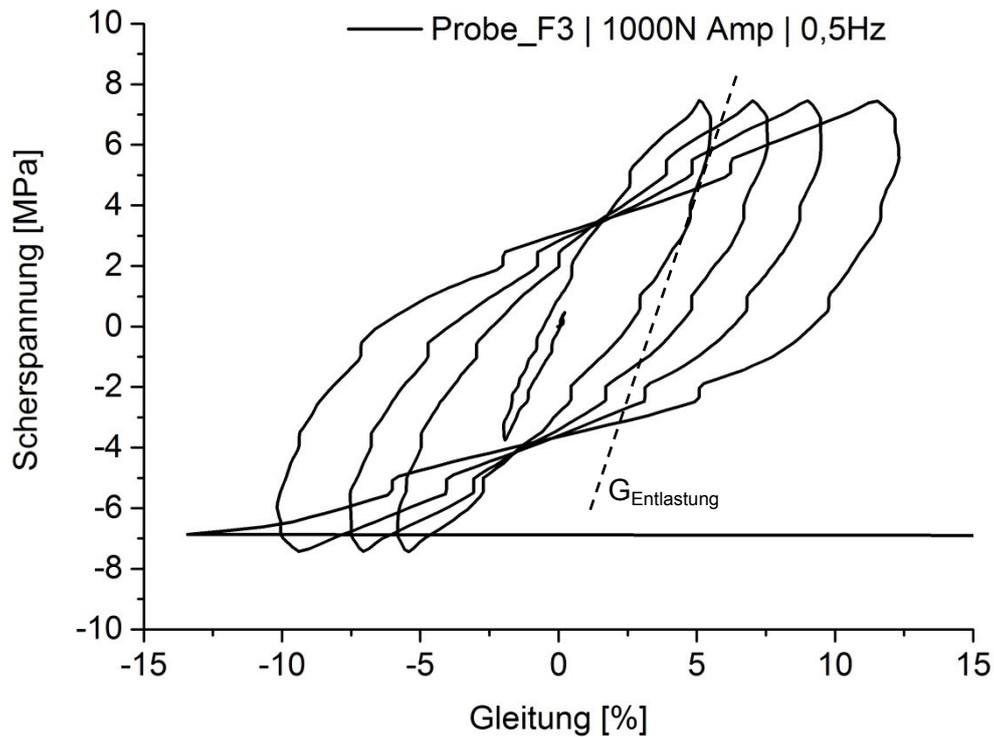


Abbildung 87: Hystereseschleife

Da zu Beginn der Entlastung der elastische Dehnungsanteil am größten ist, wird dieser zum Vergleich der elastischen Schubmodule G_{el} herangezogen. Die Tabelle 13 enthält die ersten Ergebnisgrößen aus dem Zyklenversuch der Scherproben. Die Verformung des Klebers Δx setzt sich aus dem ersten Zyklus des Verformungsanteils beider Schubrichtungen zusammen.

Tabelle 13: Messergebnisse

Probe	Zyklen	G_{el}	d	Δx 1. Zykl
[-]	[-]	[MPa]	[μm]	[μm]
C3	35,5	421,79	125,6	5,83
D3	22,5	428,37	123,7	9,41
F3*	5	431,41	122,5	14,48
H3	108,5	551,21	128,0	5,82
I3	337,5	591,28	133,7	5,48
J3	9,6	382,53	136,7	8,66

Das Kraftsignal und das elektrische Signal zur Überwachung des Versagens der Verbindung werden in Abbildung 88 über die Zeit verfolgt. Wie zu erwarten, nimmt der Widerstandswert zu und zeigt mit zunehmender Entfestigung einen größer werdenden Unterschied zwischen den lokalen Maxima und Minima. In den ersten Sekunden der Dreiecksfahrt wird nicht ganz die vorgesehene Belastungsamplitude von 1000 N erreicht, da die Regelungstechnik eine allmähliche zyklische Näherung berechnet, um eine kurzzeitige Überlast zu vermeiden. Die Diagramme der restlichen Proben befinden sich im Anhang 8.

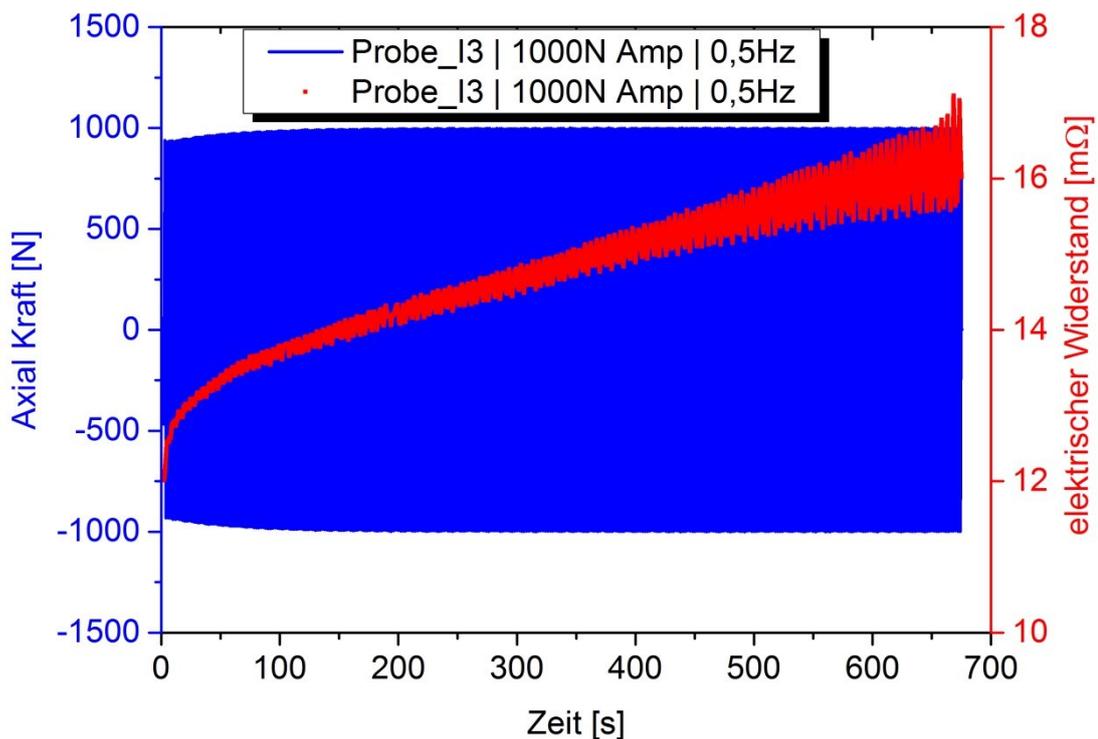


Abbildung 88: Kraftsignal, elektrisches Signal

5.4.3 Auswertung und Diskussion

Der Verlauf des elektrischen Widerstandes ist als Indikator für die Schädigung des Leitklebers zu verstehen. Aus Kapitel 3.1 ist bekannt, dass sich der Widerstand einer Probe aus einer Reihe von Widerstandsarten zusammensetzt. Den größten Einfluss stellt der Kontaktwiderstand zwischen den leitfähigen Silber-Partikeln und der Grenzfläche zum Stahl dar. Eine Verformung des Klebstoffes und sich aufhebende Kontaktierungen zwischen den leitfähigen Partikeln und, separat betrachtet, zur Grenzfläche aus Stahl haben einen unterschiedlich hohen Einfluss auf den gemessenen elektrischen Widerstand. Bekannt ist, dass der Kontaktwiderstand zwischen den Phasengrenzen Silber und Stahl den deutlich größeren Messwert bildet. Es ist nicht zu iden-

tifizieren, ob nun eine lokale Dehnung innerhalb der Matrixstruktur Ursache für eine Änderung des Messwertes ist oder eine gleichzeitige Unterbrechung der Kontaktflächen zur Systemgrenzfläche Stahl.

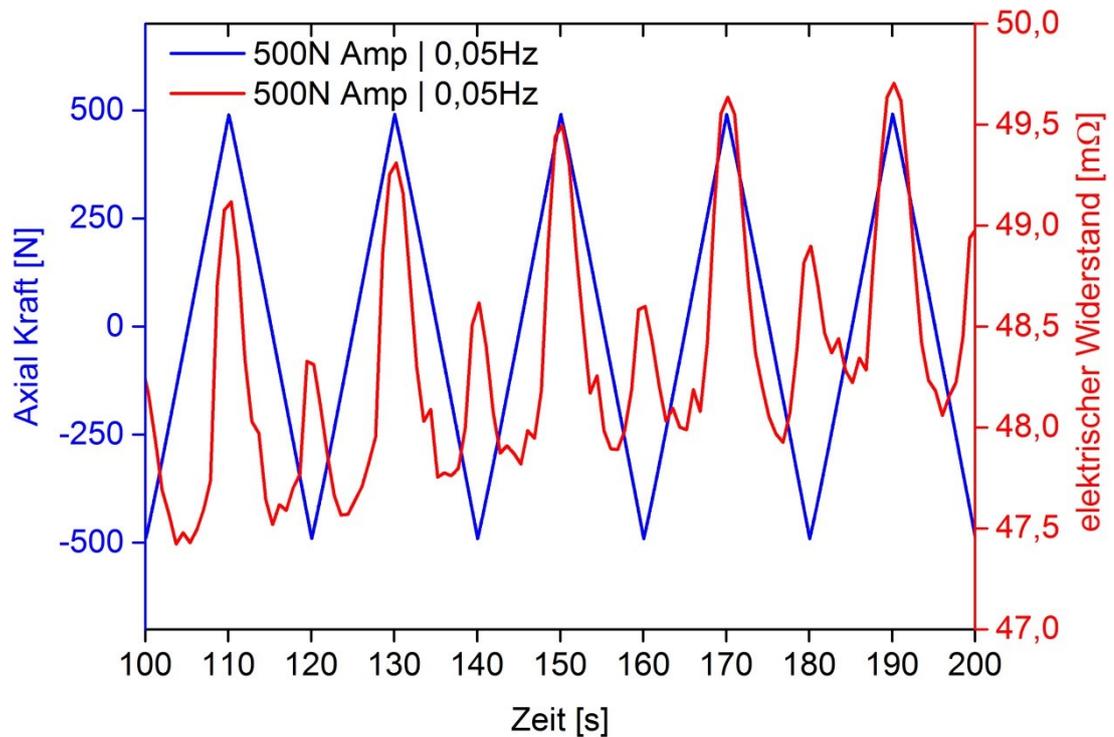


Abbildung 89: elektrischer Widerstand unter Wechsellast

Das Messgerät zur Leitfähigkeit von Isabellenhütte mit integrierter Vierleiter-Messtechnik hat eine Abtastrate von 700 ms. Um das Abtast-Theorem ausreichend einhalten zu können, wird der Zyklenversuch langsamer gefahren, um die Phasen der Wechsellast und des elektrischen Signals besser auflösen zu können. Dazu wird eine Scherprobe, wie in Abbildung 89 dargestellt, einer Amplitude von 500 N unter einer Frequenz von 0,05 Hz ausgesetzt. Der stetige Anstieg des Widerstandes beziehungsweise die Abnahme der Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Zyklenzahl ist aus den vorangegangenen Messungen bekannt. Neu dagegen ist die Unterscheidung des Kurvenverlaufes der Druck- und Zugphase in Echtzeit. Mit der größer werdenden Zugkraft erreicht der Widerstand sein Maximum im Umkehrpunkt der Schubrichtung. Beim Nulldurchgang der Kraft ist der gemessene elektrische Widerstandswert am kleinsten. Zu diesem Zeitpunkt nimmt der Kleber seine ursprüngliche Ausgangsgeometrie wieder ein, jedoch mit ersten Ermüdungs-Anzeichen. Mit Beginn der Druckkraft nimmt der elektrische Widerstand wieder zu und erreicht im Umkehrpunkt der eingeleiteten Kraft sein lokales Maximum. Das lokale Maximum der größten Druckkraft ist kleiner als das Maximum der im selben Zyklus befindlichen Zugkraft. Ursache

dafür könnte eine geringere Gleitung des Klebstoffes in Druckrichtung sein oder eine Querkraft, die senkrecht zur Schubrichtung angreift. Die verklebten Füge­teile werden aufeinander gedrückt und vergrößern die Kontaktkraft und damit die Leitfähigkeit.

Der mit einer konstanten Wechsellast beanspruchte Kleber erfährt nicht nur eine Ver­längerung in axialer Richtung der Zugmaschine, sondern auch eine Dickenänderung des Klebspaltes senkrecht zur eingeleiteten Kraft. In der Abbildung 90 ist das Ver­formungsverhalten der Geometrie des Klebers erfasst. Die Verlängerung des Klebers in Schubrichtung verhält sich entsprechend der Richtung der Belastung. Der Betrag der Auslenkung in Zugrichtung ist ebenso groß wie die in Druckrichtung. Ein stetiger Anstieg der Verformung des Klebers ist in Abhängigkeit der Zyklenzahl zu verzeichnen, denn die Materialermüdung schreitet voran. Anders als gedacht, verhält sich die Änderung der Klebdicke. Unter Zugbeanspruchung vergrößert sich die Dicke und sorgt für einen weiteren Dehnungsanteil zur Schubverformung. Die Klebdicke ver­jüngt sich unter den Einfluss der folgenden Druckkraft, wie zu erwarten. Im Rückblick auf das Diagramm der Abbildung 90 erklärt sich das unter einer Druckkraft kleinere lokale Maxima des elektrischen Widerstandes. Die Verjüngung der Klebdicke kann als eine Art Querkontraktion verstanden werden.

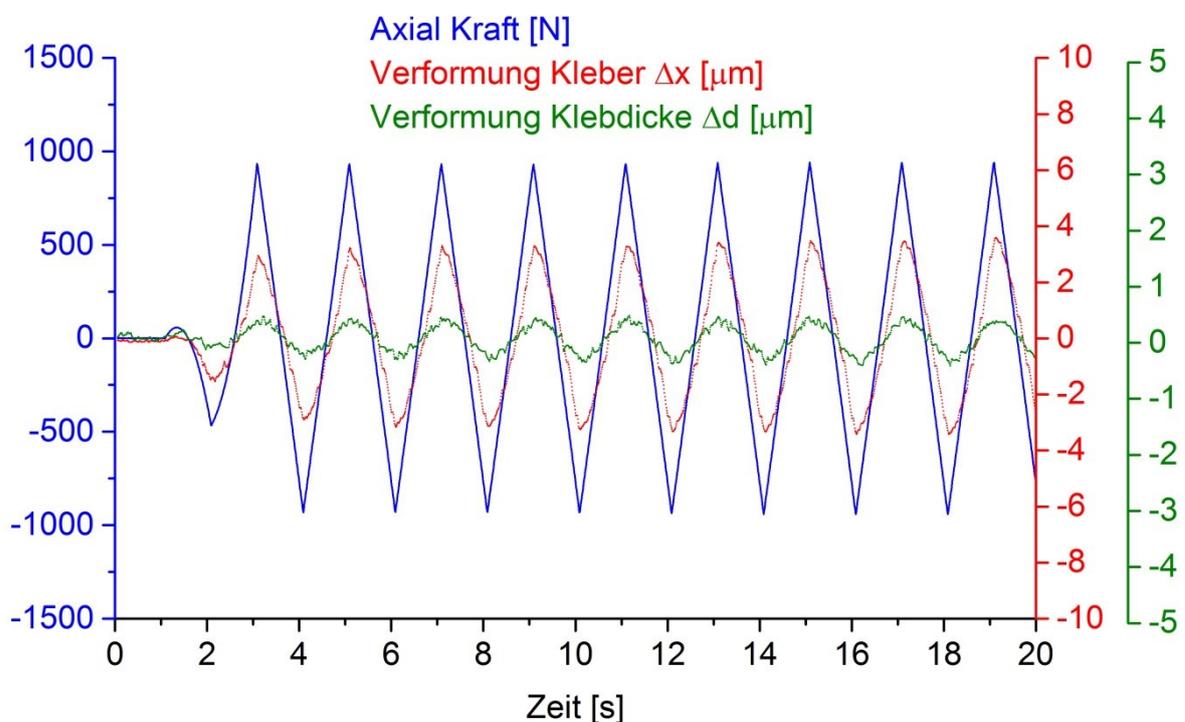


Abbildung 90: Verformung Leitkleber

Zur Veranschaulichung der Relativverformungen der Füge­teile beziehungsweise der Verlängerung des Klebers dient die Abbildung 91. Gemessen wurden die Beträge

der maximalen Auslenkungen des ersten und zehnten Zyklus. Die Unterschiede sind klar sichtbar, denn die Anfangsdeformationen unterscheiden sich um den Faktor zwei. Geringe Abweichungen und auf den ersten Blick miteinander vergleichbar, erweisen sich die Proben C3, H3 und I3. Der zehnte Zyklus lässt feststellen, inwieweit die Entfestigung und die mehr oder weniger plastische Dehnung vorangeschritten ist. Zu verzeichnen ist ein Zusammenhang zwischen der Deformation und der Materialermüdung. Je größer die Deformation Δx unter konstanter Last, umso schneller schreitet die Ermüdung des Klebers voran. Proportional dazu verhält sich die Gleitgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$.

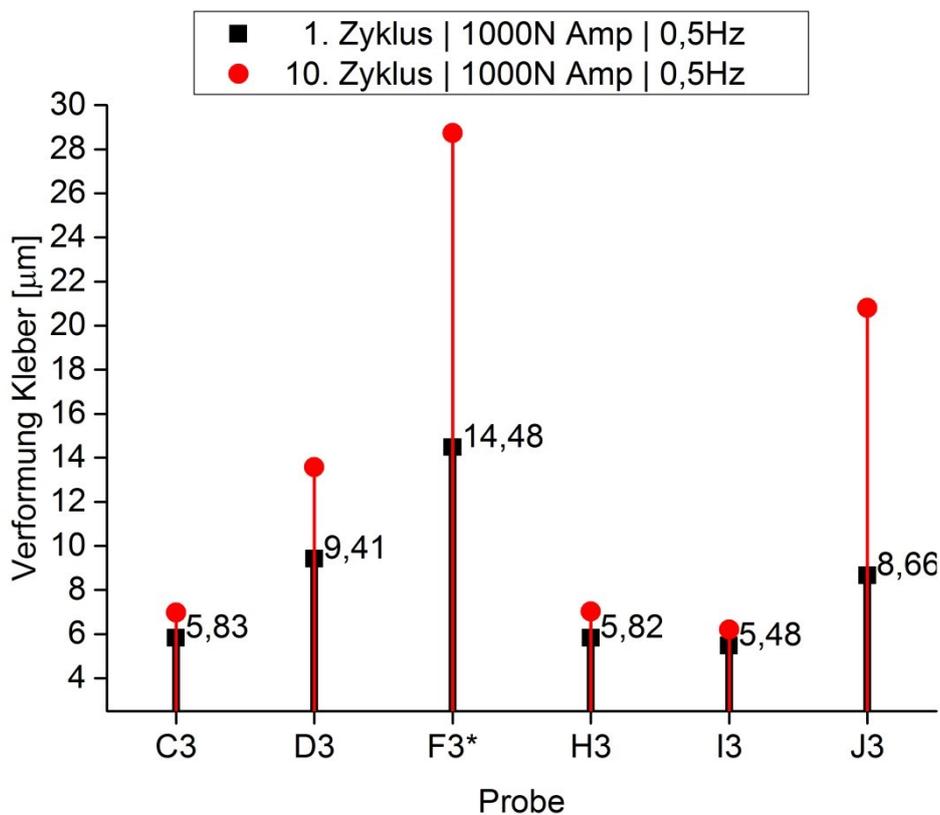


Abbildung 91: Verformung Kleber Δx

Die folgenden Bilder zeigen die Bruchfläche frontal und von der Seite aufgenommen mit dem Auflichtmikroskop. Alle Proben, außer die F3, weisen einen Kohäsionsbruch auf. Im Gegensatz zum einachsigen Zugversuch ist die Bruchfläche ebener und enthält keine in Belastungsrichtung ausgerichteten Spuren.

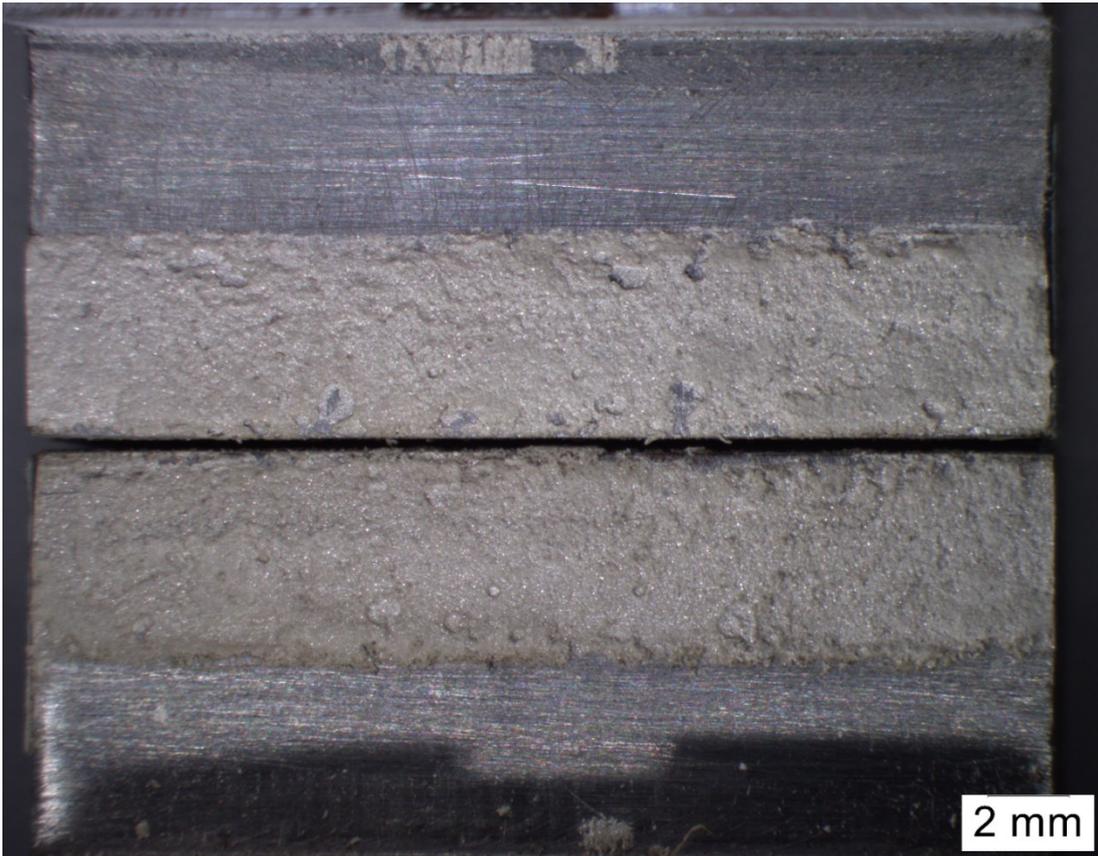


Abbildung 92: Bruchbild frontal Probe_H3



Abbildung 93: Bruchbild seitlich Probe_H3

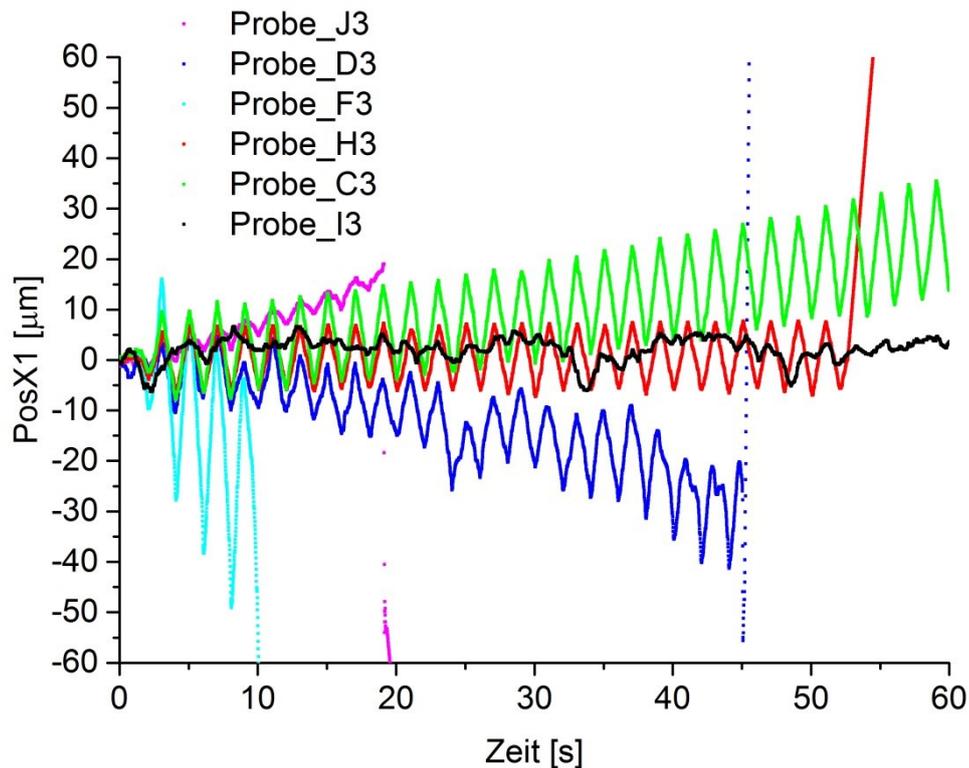


Abbildung 94: horizontale Auslenkung der Scherprobe

Aus dem quasistatischen Zugversuch bekannt, wird zur Bewertung der Güte der Einspannung der Scherprobe die Bewegung des Fügeteil 1 in der Horizontalen gemessen. Im Idealfall sollte unter fehlerfreier Einbaulage der Probe nur der mechanische Einfluss der Zugmaschine messbar sein. Diesen Idealfall erfüllt laut Abbildung 94 die Probe_I3. Die hochauflösenden Verschiebungen können nicht über den gesamten Ermüdungsverlauf von der Kamera erfasst werden, da der interne Speicher begrenzt ist. Alle anderen Proben schwanken unter der Wechsellast um wenige Mikrometer und verlassen mehr oder weniger ihre Ausgangsposition. Aus diesen Messergebnissen geht hervor, dass eine Biegung der gesamten Traverse unvorhergesehene mechanische Spannungen im Klebspalt hervorrufen kann. Der in Kapitel 3.4.1 angesprochene mehrachsige Spannungszustand verkürzt die Lebensdauer der Klebung durch die senkrecht zur Kräfteinleitung angreifende Zugkraft. Weiterhin untersucht werden sollte der Verlauf der Biegelinie, ob die theoretisch größte Biegung sich auf Höhe der Klebefläche befindet. Auf Grund der geringen Steifigkeit des Polymerwerkstoffes sollte dies der Fall sein.

In der Tabelle 14 befinden sich die wichtigsten Teilergebnisse zur abschließenden Bewertung des zyklischen Ermüdungsversuches. Im Vergleich zum Zugversuch sind die Gleitgeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$ der Proben um mindestens das zehnfache größer. Bemerkbar macht sich die Geschwindigkeitsabhängigkeit im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit einem steileren Anstieg und größeren Schubmodul G_{el} . Der Schubmodul wird aus der Entlastungskurve ermittelt. Die erhöhten Steifigkeiten der Module der Proben H3 und C3 machen sich in der Lebensdauer bemerkbar und führen zu einer langsameren Entfestigung. Eine Gegenüberstellung der Verlängerung der Klebung Δx und der Änderung der Klebdicke Δd macht deutlich, dass ein linearer Zusammenhang besteht. Die Proben C3, H3 und I3 verhalten sich in ihrer Deformationsantwort im ersten Zyklus gleichwertig. Erst mit Zunahme der Biegemomentbeanspruchung schreitet die Ermüdung unterschiedlich stark ausgeprägt voran. Mit Ergänzung der maximalen Auslenkung PosX1 der Scherproben im Prüfspalt ist dieser Fehleinfluss im zehnten Zyklus erkennbar. Die Probe_F3 bricht bereits nach fünf Zyklen, nicht nur, weil diese die größte horizontale Auslenkung erfahren hat, sondern eine schlechte Haftung hatte, nachweisbar durch einen großflächigen Adhäsionsbruch. Es ist offensichtlich, dass mit zunehmender Auslenkung die Kurzzeitfestigkeit und Lebensdauer der Klebungen stark herabgesetzt wird.

Tabelle 14: Messergebnisse zyklischer Ermüdungsversuch

Probe	Zyklen	G_{el}	d	Δx 1. Zykl	Δd 1. Zykl	$\dot{\gamma}$ 1. Zykl	$A_{Adhäsion}$	PosX1 10. Zykl
[-]	[-]	[Mpa]	[μm]	[μm]	[μm]	[ν/s]	[%]	[μm]
C3	35,5	421,79	125,6	5,83	0,61	0,0455	5	14,53
D3	22,5	428,37	123,7	9,41	1,21	0,0735	5	-15,17
F3*	5	431,41	122,5	14,48	1,33	0,1131	45	-55,25
H3	108,5	551,21	128,0	5,82	0,69	0,0454	5	7,09
I3	337,5	591,28	133,7	5,48	0,69	0,0428	5	4,86
J3	9,6	382,53	136,7	8,66	2,07	0,0677	10	9,6

Schließt man den Biegemomenteinfluss aus und betrachtet aus analytischer Sicht die Antwort der Gleitung beziehungsweise Verlängerung der Klebergeometrie, so fließen im Wesentlichen zwei Parameter in das Messergebnis ein. Die Klebefläche kann Lunker, Härtingsrisse und nicht ausreichend gut vernetzte Strukturbereiche beinhalten. Falsch angenommene oder lokal unterschiedliche Klebdicken können die Ergebnisse verfälschen. In Anlehnung an die Normierung der Spannung auf eine Fläche von $A = 125 \text{ mm}^2$ und der Gleitung auf eine Klebdicke von $d = 100 \mu m$ ist diese Fehlerrechnung in Abhängigkeit der Fläche und Klebdicke in der Abbildung 95 dargestellt. Bezogen auf den Zyklenversuch wird von einer Kraft von $F = 2000 \text{ N}$ mit dem ermittelten Schubmodul $G_{el} = 338 \text{ MPa}$ ausgegangen.

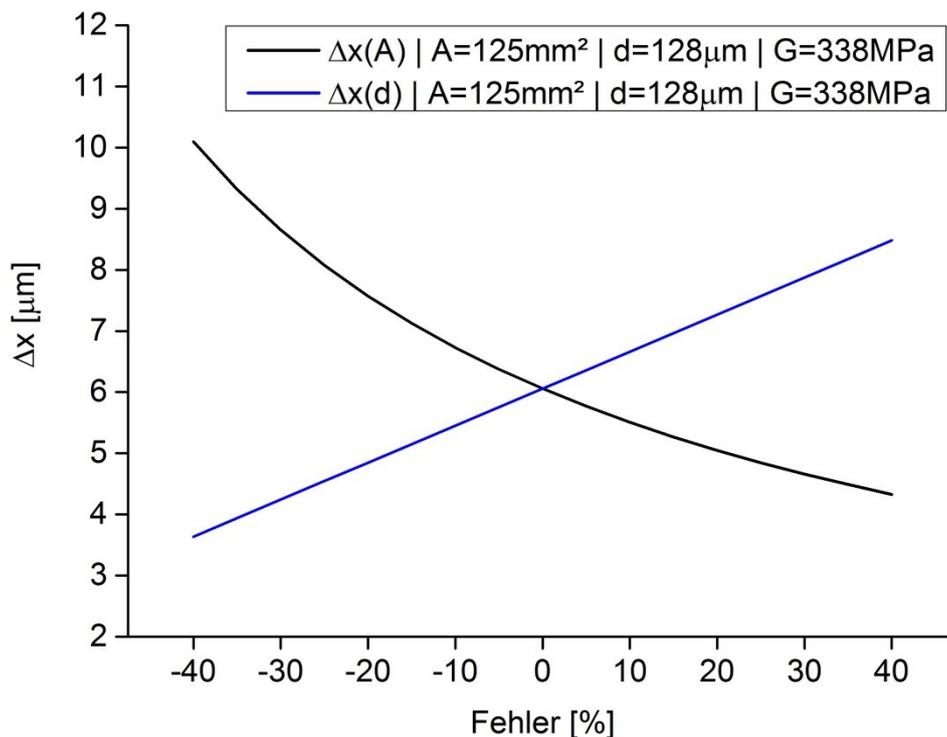


Abbildung 95: Verformungseinfluss Klebefläche und Klebdicke als systematischer Fehler

Fehler durch Fläche $\Delta x(A) = \frac{F \cdot d}{G \cdot \Delta A}$

Fehler durch Dicke $\Delta x(d) = \frac{F \cdot \Delta d}{G \cdot A}$

Am Beispiel der Fehlergleichung ist deutlich, dass eine kleine Klebefläche und große Klebdicke zu größeren Deformationen in Schubrichtung führen und umgekehrt. Eine theoretisch größere Fläche als 125 mm² ist nicht denkbar, demzufolge nimmt mit der Zyklenzahl die Deformation zu. Undurchsichtig wird der Sachverhalt, wenn beide Fehler gleichzeitig Einfluss auf die Verformung haben. Stark vereinfacht betrachtet, heben sie sich im günstigen Falle auf oder verstärken den Fehler. Geht man davon aus, dass die Struktur des Klebstoffes, die Werkstoffeigenschaft und die Klebdicke im ersten Zyklus konstant sind, so ist die Klebdicke als systematischer Fehler zu verzeichnen. Der Fehler trägt sich fort in der Normierung der zu berechnenden Gleitung und hat ebenfalls Einfluss auf die Kurzzeitfestigkeit, denn große Deformationen führen zu größeren Reibungen zwischen den Makromolekülen und Schädigungen in der Struktur des Werkstoffes. Eine eindeutige Bestimmung beziehungsweise Herstellung der Klebdicke ist nach der Fehlercharakterisierung erforderlich, ebenso wie ein steiferer Scherversuchsaufbau im Wechsellastverhalten.

Die Modellaufstellung der niedrigzyklischen Schwingfestigkeitsversuche (LCF) erfolgt mit der Durchführung mehrstufiger Beanspruchungen. Die Abbildung 96 zeigt die Schadenskurve bis zum Bruch unter den konstant gefahrenen Spannungsamplituden. Die Messdaten zweier Beanspruchungsstufen beweisen prinzipiell kein eindeutig stimmiges Versuchsergebnis, soll aber die Tendenzen von Fehleinflüssen aufzeigen.

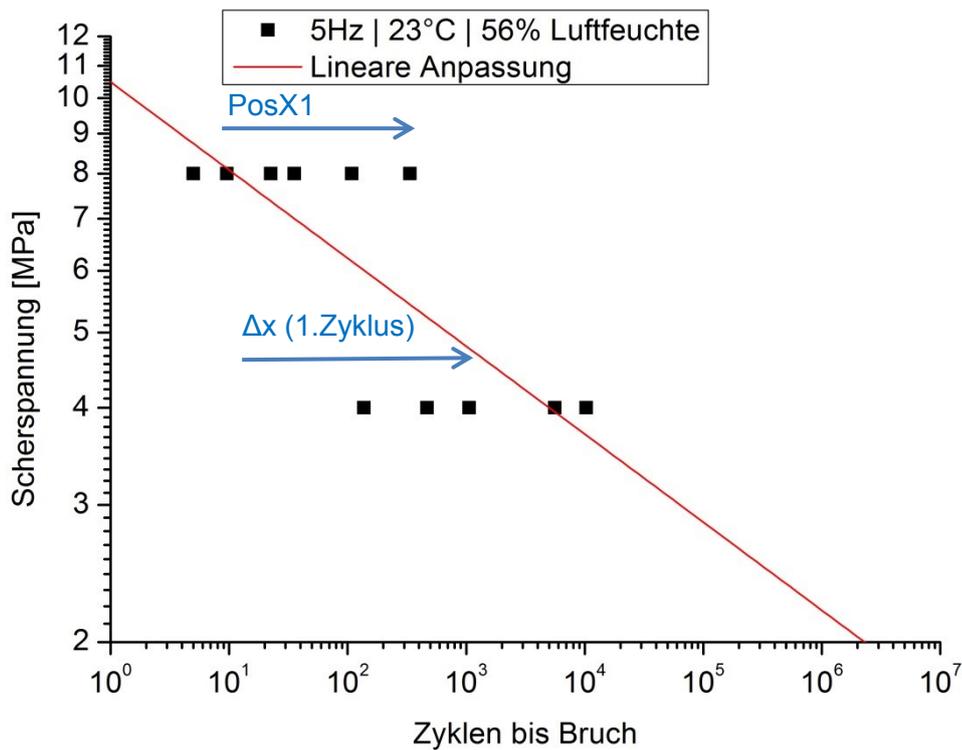


Abbildung 96: Modell Ermüdungsversuch (LCF)

Der größte Fehlermechanismus entsteht durch die horizontale Auslenkung PosX1 der Proben aus der vertikalen Richtung des Schubes. Je instabiler und somit größer die Auslenkung durch nicht zentrisches Einspannen der Proben, desto größer sind die Biegespannungen und desto schneller schreitet die Ermüdung voran. Ein ebenso signifikant nachweisbarer Einfluss zeigt sich mit der Verformung des Klebers in Schubrichtung Δx nach dem ersten Zyklus unter Einwirkung eines vollständigen Lastwechsels. Demnach führen größere Deformationen zu Beginn des Ermüdungsversuches zu einem zeitigen Versagen des Klebstoffes. Wie man aus Tabelle 15 am Beispiel der Probe_F3 erkennen kann, besteht ein Zusammenhang zwischen horizontaler Auslenkung und Deformation. Die ungewollt induzierten Spannungsspitzen in der Kleberstruktur sorgen für eine unverzügliche Entfestigung und somit eine im Vergleich zu den anderen Proben größere Verformung.

Die Lebensdauerbestimmung im LCF-Bereich zwischen 1 bis 10^5 Schwingspielen lässt sich mit der Coffin-Manson-Beziehung beschreiben. In diesem Bereich werden die Werkstoffe so stark durch Mitteldehnungen oder Mittelspannungen beansprucht, dass der Prozess der plastischen Verformung untersucht werden kann /BLU94, S.140/.

$$\frac{\Delta\tau_{pl}}{2} = \tau_f * N_b^c$$

$$\log \frac{\Delta\tau_{pl}}{2} = \log \tau_f + \log N_b^c$$

$$\log \frac{\Delta\tau_{pl}}{2} = \log \tau_f + c * \log N_b$$

$$y = a + b * x$$

$$\Delta\tau_{pl} = 2 * [10,5 + (-0,11) \log N_b]$$

6 Bewertung und Weiterentwicklung der Versuche

Voraussetzung für die Genauigkeit und Güte der Scherversuche und der Entstehung vergleichbarer Messergebnisse aus den Ermüdungsversuchen ist die reproduzierbare Herstellung der Klebverbindungen. Nach der Fertigung der gestuften Fügeteile stellte sich heraus, dass sich nach der spanenden Bearbeitung durch das Schlichten des Stahls eine Stufenhöhe h mit einer Abweichung von $10 \mu\text{m}$ bis $20 \mu\text{m}$ einstellt. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Form- und Maßgenauigkeit von weniger als $2 \mu\text{m}$ Toleranz ist die Nachbearbeitung der Fläche mit dem Fertigungsverfahren des Umfangs-Planschleifens oder des Senk-Erodierens. Die Ebenheiten der Klebeflächen sind nicht ideal, insbesondere nach Entfernung der Materialrückstände der Klebung zur Wiederverwendung der Fügeteile. Durch das Abziehen der Bruchflächen mit Schleifpapier nimmt nicht nur die Stufenhöhe ab, sondern auch die Randzonen werden stark beeinträchtigt und es bilden sich Kantenradien. Die Folge ist eine sich ändernde Klebdicke, die auch durch gezielt zugeordnete Fügeteilpaarungen nicht konstant gehalten werden kann. Zur Wiederverwendung der gestuften Probenkörper sollte die Entfernung des Restklebstoffes im Muffelofen bei $350 \text{ }^\circ\text{C}$ erfolgen. Die Klebstoffe zersetzen sich und es verbleibt die Asche. Anschließend werden die Fügeteile mit einer weichen Bürste gereinigt und im Ultraschallbad in einer Aceton-Lösung weiterbehandelt, um die verbleibende Zunderschicht schnell und gründlich zu entfernen. Nachteilig ist der hohe Zeitaufwand für die Herstellung der Scherproben, der in dem genauen Vorgehen zur Positionierung der Fügeteile in der Vorrich-

tung begründet liegt. Unreinheiten, kleine Verletzungen der Bezugsflächen oder Aufwerfungen an der Metalloberfläche führen zu Abweichungen in der Entstehung der Klebdicke von 100 μm .

Der Messaufbau mit seinen messtechnischen Komponenten funktioniert grundsätzlich. Die hydraulische Prüfmaschine MTS ermöglicht einen geregelten Ablauf der mechanischen und kinematischen Größen. Die Dehnungsmessung mit der Kamera Canon 550D und anschließenden Bildkorrelation ermöglicht eine Auflösung von 0,2 μm . Für Langzeitversuche ist die Videoaufzeichnung nicht geeignet, da der interne Speicher begrenzt ist. Notwendig, aber aufwendig ist die Triggerung der Extensometermessung mit den Signalen der MTS über ein manuell ausgelöstes optisches Signal mit einer zeitgleich abfallenden Spannung am Analogeingang der MTS. Das Mikroohmmeter der Firma Isabellenhütte zur Überwachung der Leitfähigkeit misst die abfallende Spannung unter dem Einfluss eines kleinen Stromes und reduziert die Vorwiderstände und Leitungswiderstände auf ein vernachlässigbares Minimum. Leider ist die Abtastrate begrenzt auf 700 ms, sodass hochfrequente Belastungsversuche nicht ausreichend aufgelöst werden können. Es hat sich herausgestellt, dass der elektrische Widerstand der Scherprobe zu Beginn und kurz vor Aufhebung der Klebeverbindung einen Wert von 1 m Ω bis 100 m Ω einnimmt. Denkbar und zur verbesserten Abtastung ist die Entwicklung einer elektrischen Schaltung mit Funktionsgenerator zur Spannungsversorgung und einem Amperemeter zur Messung des Stromes. Demnach kann über einen bekannten Referenzwiderstand der eingepreßte Strom erfasst werden und die abfallende Spannung speist den Analogeingang der MTS in Abhängigkeit der Zeit. Da der eingepreßte Strom sehr klein gehalten werden muss, ist nur eine kleine Eingangsspannung realisierbar. Zwischen der Schnittstelle MTS und der abfallenden Spannung über der Probe ist ein Operationsverstärker zu schalten. Der komplette Versuch und die Nachbearbeitung der Messsignale von drei Messstationen erfolgen an verschiedenen Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen Softwareprogrammführungen und sind nur mit mathematischen Berechnungsschritten auszuwerten. Für einen automatisierten Versuchsablauf und zur Beschleunigung des Auswertung ist ein Videoextensometer anzuschaffen und die Implementierung aller Gerätschaften und Instrumente auf einer Hardware umzusetzen. Dafür spricht auch, dass mit der bestehenden Kamera zur optischen Messung der Dehnungen die Einbeziehung der Klimakammer der MTS nicht möglich ist.

Für die Charakterisierung des Leitklebers wurden zwei Versuchsarten durchgeführt. Die Ergebnisse des quasistatischen Scherzugversuches ergeben aussagefähige Messungen. Grund dafür ist die Einspannung der Proben über ein Gelenksystem in den Prüfspalt der Zugmaschine. Der Biegemomentausgleich verhindert einen früh-

zeitigen Bruch durch Minimierung von Spannungseinflüssen quer zur Schubrichtung. Weiterhin Einfluss auf die Gleitgeschwindigkeit des Klebers haben die POM-Blöcke mit einem hohen elastischen und plastischen Verhalten, denn der Traversenweg wird mit einer konstanten Rate gesteuert. Dieser Versuch sollte mit einem kraftgeregelten Anstieg verglichen werden. Unter Ausschluss von Adhäsionsbrüchen ergeben sich eine Scherfestigkeit von 16,6 MPa und ein elastischer Schubmodul von 338 MPa. Problematischer zeigt sich der zyklische Ermüdungsversuch. Die Anbindung der Scherprobe an die Traversenenden erfordert eine exakte Ausrichtung aller Fluchtpunkte. Eine Fixierung der Proben durch das Anziehen von Kontermuttern oder das Verdrehen von Spannscheiben führt zur Vorschädigung und sofortigem Bruch der Klebung. Um dies zu verhindern, kann mit dem Anziehen des POM-Blockes als letzte Spanneinheit im Systemaufbau ein axialer Versatz ausgeglichen werden. Theoretisch erfüllt der leicht verformbare Block die Funktion eines plastischen Gelenkes und gleicht Winkelfehler aus. Die Messergebnisse fallen ernüchternd aus, denn unterschiedlich große Dehnungen führen zu einem zeitigen oder späterem Versagen der Klebstoffstruktur. Die möglichen Einflüsse, die zu einer Streuung der Ergebnisse führen, sind bekannt, aber quantitativ nicht nachweisbar. Durch die Wahl einer langen Zykluszeit und konstanten Temperatur wurden möglichst gleichmäßige Prüfbedingungen geschaffen. Die relativen Fehler der Klebeflächen und Klebdicken können die Verformungen des Klebers gleichermaßen beeinflussen. Ebenso können Inhomogenitäten in der Klebstoffstruktur auftreten. Der Vernetzungsgrad kann mit Hilfe der dynamischen Differenzkalometrie (DSC) bewertet werden. Auffällig nachgiebig und nicht vergleichbar zeigt sich der Scherspalt unter der sich periodisch wiederholenden Last, sodass der Scheraufbau eine schwankende Bewegung in der horizontalen Achse ausführt. Dies bedeutet ungewollt induzierte Spannungsspitzen. Je größer die Auslenkung, desto zeitiger erfolgt der Bruch. Zum Nachteil trägt das plastische Verhalten des POM-Blockes als schwächstes Glied im Traversenaufbau bei. Ein Ermüdungsmodell ist nur unter einer großen Anzahl von Ausschüssen möglich. Um diesen Fehlermechanismus zu vermeiden, ist eine Führungseinheit für die Fügeteile denkbar, wodurch die Deformationen im Prüfspalt konstant und mit hoher Wiederholgenauigkeit bewerkstelligt werden kann. Für diesen Fall sieht das Konzept eine externe Bolzenführung zur Führung der quaderförmigen Fügeteile vor. Eine einfache Konstruktionslösung bietet die Vorzugsvariante 1 aus der Konzeptphase zur Klebung zylindrischer Fügeteile. Sie verspricht keine Variation der Klebdicke, aber eine Biegemomentstütze mit der Wälzlager-Führung durch ein Linearlager. Beeinträchtigt wird dabei die Messung der Leitfähigkeit, da sich eine Parallelschaltung ergibt. Außerdem verfälscht der Effekt der Reibung das Kraftsignal.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung von Leitklebern hinsichtlich mechanischer und elektrischer Ermüdungseigenschaften. Grundidee ist die Erfassung der Lebensdauer von Leitklebstoffverbindungen unter Durchführung zyklischer Wechsellast-Versuche und der gleichzeitigen Beobachtung der Leitfähigkeit als Indikator für das Versagen der Strukturverbindung. Der untersuchte elektrisch leitfähige Klebstoff ist ein Verbundwerkstoff auf Epoxidharzbasis, in dem feste leitende Füllstoffpartikel aus Silber in der Polymermatrix verteilt sind.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Konzeptfindung und Entwicklung eines Scherversuchsaufbaus zum Testen von in-situ-Klebstoffverbindungen mit einer Klebspaltdicke kleiner 200 μm , beginnend von der Probenherstellung bis zum Entwurf und der Installation der Messtechnik und sonstigen Komponenten des Prüfsystems.

Nachdem die theoretischen Grundlagen und technischen Anforderungen erschlossen wurden, bestand der erste Teil der Konzeptlösung darin einen reproduzierbaren Klebspalt von 100 μm herstellen zu können. In einer Vorrichtung konnten die gestuften Fügeteile an ihrem Absatz verklebt werden. Die Fügeteile aus gering verformbarem dickem Stahl sind für eine möglichst zentrische Kraffteinleitung und damit die Minimierung eines mehrachsigen Spannungszustands ausgelegt. Der relativ kurz gehaltene Überlappungsbereich relativ zur Breite vermeidet Spannungsspitzen in den Randzonen. Durch das exakte Vermessen der Stufenhöhen konnten die Fügeteile paarweise zugeordnet werden, sodass ein Klebdicke mit einer maximalen Abweichung von 5 % erzielt wurde.

Der zweite Teil der Konzeptphase befasste sich mit der Entwicklung des Scherversuchsaufbaus. Der auf Scherung beanspruchte Kleber hat auf Grund seiner kleinen Dimensionen ebenso proportional kleine Deformationen von wenigen Mikrometern. Die Dehnungsmessung erfolgt berührungslos mit der optischen Aufnahme des Scherspalt. Mittels Bildkorrelationsverfahren kann die relative Verformung der Fügeteile auf 0,2 μm genau gemessen werden. Der elektrische Widerstand wird mit einem Mikroohmmeter mittels Vierleitermessung bestimmt. Von entscheidender Bedeutung ist der Aufbau zum Einspannen der Proben. Verschiedene Vorgehensweisen zum Fixieren und Spannen haben gezeigt, dass kleinste Ungenauigkeiten im Traversenaufbau zu unvermeidbaren Querkraffteinflüssen und Biegemomenten führen, die die Probe sofort zerstören. Das Spannzeug muss folglich die Funktion des Ausgleiches eines axialen Versatzes erfüllen. Im Scherzugversuch reduzieren modular anschaubare Gelenkverbindungen den Biegemomenteinfluss. Ein Isolator aus POM ist für die Entkopplung der Leitfähigkeitsmessung von elektrischen Ein-

flüssen der Prüfmaschine vorgesehen und sorgt für den Ausgleich der nicht exakt fluchtenden Anbindungspunkte. Das Wechsellastverhalten ist zur Vermeidung von Kraftunterbrechungen und Stößen nur ohne Gelenke möglich. Positiv zeigte sich der Isolator aus POM, der auf Grund seiner großen Elastizität Einspannfehler ausglich.

Mit der Durchführung des quasistatischen Scherzugversuchs wurden die ersten Kennwerte ermittelt. Mit einer experimentell festgelegten konstanten Zugeschwindigkeit von 20 $\mu\text{m/s}$ ergaben fünf Proben eine Scherfestigkeit von 16,6 MPa und einen elastischen Schubmodul von 338 MPa mit einer Genauigkeit von weniger als 10%. Bei Verlassen des linearelastischen Bereiches ergaben sich signifikant größer werdende Unterschiede. Es wurden Bruchdehnungen von 20 % bis 40 % erreicht unter gleichzeitiger minimaler Vergrößerung der Klebdicken. Unterschiedliche Gleitgeschwindigkeiten um den Faktor 2 zeigen, dass der Isolator aus POM im Zugmodus einen Einfluss auf das zeitlich verzögerte Verhalten des Klebstoffes hat. Die Untersuchung der horizontalen Auslenkung der Probe aus der Schubachse zeigt die Wirkung der Gelenkfunktion. Große Ausgleichsbewegungen führen zu großen Spannungsspitzen im Klebstoff und somit zu größeren Dehnungen bis zum Bruch. Das elektrische Signal steigt mit Beginn der Last exponentiell an bis zum Bruch in einem Messwertbereich von 50 m Ω bis 120 m Ω . Als Brucherzeugnis liegt ein überwiegender Kohäsionsbruch vor mit auffälligen in Schubrichtung ausgerichteten Riefen. Die Untersuchung des Schubmoduls in Abhängigkeit der Klebdicke und Klebefläche ergibt einen theoretisch möglichen systematischen Fehler von bis zu 50 %, der durch Inhomogenität im Klebstoffverbund oder Unstetigkeit im Klebspalt entstehen kann. Je kleiner die Klebefläche und je größer die Klebdicke, desto größer der systematische Fehler des Schubmoduls und der Verformung. Geht man davon aus, dass im linearelastischen Bereich die Klebeflächen vollständig benetzt sind, ergibt sich aus dem mittleren Schubmodul eine experimentell ermittelte Abweichung der Klebdicken von knapp 5 % bis 40 %. Anhand der konstanten Ergebnisse im linearelastischen Bereich sind diese Fehler nachweislich nicht ausschlaggebend gewesen.

Die maximale Zugfestigkeit von 16,6 MPa ist der Ausgangspunkt für die Parametrisierung des zyklischen Wechsellastversuches. Die Schubbeanspruchungen wurden unter einer Kraftamplitude von 500 N und 1000 N durchgeführt. Es ergaben sich große Streuungen in den Ergebnissen der Kurzzeitfestigkeit. Unter großen Ausschuss und Zeitaufwand ist ein Stufen-Modell ähnlich der Bildung einer Wöhlerkurve aufstellbar. Der in dem Zusammenhang größte Fehler wird durch den Messaufbau selbst verursacht. Während der Wechsellast zeigt sich die nicht ausreichende Steifigkeit der Komponenten zum Spannen der Proben, denn der formschlüssig eingeschraubte Probenaufbau führt Bewegungen senkrecht zur Schubachse aus und es

kommt zu kurzzeitig auftretenden Spannungsspitzen in der Struktur und zu einer kürzeren Lebensdauer. Im Hinblick auf eine fehlerhaft hergestellte Klebefläche und Klebdicke gilt für beide Parameter, dass bereits ein relativer Fehler von 20 % eine um 2 μm (circa 30 %) abweichende Deformation nach dem ersten Zyklus bedeutet. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine größere Dehnung zu Beginn der Belastungen einen schnelleren Versagensmechanismus hervorruft, gleichbedeutend und im unmittelbaren Zusammenhang mit der horizontalen Auslenkung.

Der elektrische Widerstand erfüllt die Aufgabe des Indikators für das Materialversagen der Polymerstruktur mit der Überprüfung der elektrischen Leitung durch die Silber-Partikel. Die gemessenen Ausgangswiderstände liegen in einem Bereich von 8 m Ω bis 45 m Ω und steigen mit dem Anlauf der ersten Zyklen an. Nach dem Anlaufen kommt es zu einem linearen Anstieg und einem signifikanten Unterschied durch die Schubrichtungsänderungen. Bei der zyklischen Last kommt es zwischen Zug- und Druckphasen zu Auslenkungen im elektrischen Signal beziehungsweise der Aufhebung elektrischer leitfähiger Kontaktflächen. Größer werdende Deformationen führen zu einer größeren Auslenkung des Widerstandsverlaufes. In der Druckphase kommt es zu einer Verjüngung der Klebdicke, wodurch sich im Gegensatz zur Zugphase der etwas geringere Widerstandwert begründet. Wiederverwendung

Im Rückblick auf die praktisch durchgeführten Versuche ist der Fehlermechanismus eine Funktion aus mehreren gleichzeitig wirkenden Parametern. Abweichungen in den geometrischen Gegebenheiten des Klebspaltes, Inhomogenitäten in der Polymerstruktur und Verteilung der Silber-Partikel, sowie kleinste Unstetigkeiten in der Einspannung der Proben führen zu unterschiedlichen Verhaltensweisen und Mechanismen. Zur Verbesserung der Versuche ist es zwingend notwendig die Kenngrößen der Klebdicke genauer vorzugeben. Bei der Herstellung der gestuften Fügeteile ist auf eine Nachbearbeitung der Stufenhöhen mittels Schleifen ein exakteres und ebeneres Ergebnis zu erzielen. In Hinblick auf den zyklischen Ermüdungsversuch sollte der Bereich des Prüfspaltes unterstützt werden. Die Vorzugsvariante 1 der Konzeptphase sieht zylindrische Proben vor, die in einer vorgespannten Linearlagereinheit geführt werden. Nach der Bewertung dieser Variante ist keine Überprüfung der Leitfähigkeit möglich und das Fügen der Teile in der Vorrichtung erweist sich als fehlerbehaftet, da der Zylinder in der Prismenaufnahme sich verdrehen kann. Doch theoretisch ist nur so eine konstante Belastungsfahrt im Zyklenversuch möglich, um die mechanischen Größen Kraft und Verformung beherrschbar zu machen. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung der Einspannung bietet eine Mehrkraftmessdose. Weiterführend ist der Einfluss der Temperatur- und Zeitabhängigkeit des Leitklebstoffes als Parameter zu berücksichtigen.

8 Literaturverzeichnis

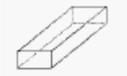
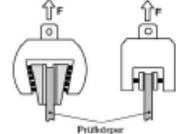
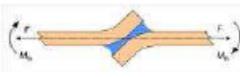
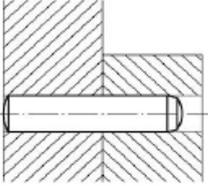
- /ALT10/ F. Altenwegner, F. Reiling
Schulungsmaterial, Kleben von Composites
Hochschule Landshut, 2010
- /BEI07/ G. Pahl, W. Beitz, J. Feldbusen, K.H. Grote
Konstruktionslehre: Methoden und Anwendungen
7.Auflage, Springer Verlag, 2006
- /BLU94/ Horst Blumenauer
Werkstoffprüfung
6. Auflage, Deutscher Verlag, 1994
- /BMW114/ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-reform,did=645884.html>, 26.07.2014
- /BS12/ Bargel, Schulze
Werkstoffkunde
11. Auflage, Springer Verlag, 2012
- /CAT/ Konstruktionssoftware CATIA V5 R19
- /DIN1/ DIN EN 1465
Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebung
Juli 2007
- /DIN2/ DIN EN 14869
Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen-Teil 2:
Scherprüfung für dicke Fügeteile, Juli 2011
- /EG02/ Amtsblatt Europäische Union
Richtlinie 2002/95/EG
- /EK14/ Elektronik Kompendium
URL: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0306091.htm>
12.08.2014
- /FLE11/ Wolfgang Fleischmann
Vorlesung und Schulungsunterlagen Fügetechnologie Kleben
Fraunhofer Institut IFAM, Bremen 2011
- /GRE11/ Grellmann, Seidler
Kunststoffprüfung
Hanser Verlag, 2011

- /HAB08/ Gerd Habenicht
Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen
6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2008
- /KER08/ Kerschenbauer, P
Widerstandsbestimmung von metallischen Proben mit der
Vier-Punkt-Methode Diplomarbeit Technische Universität Graz, März 2008
- /MACH11/ Macherrauch, Zoch
Praktikum in Werkstoffkunde
11. Auflage, Vieweg Teubner Verlag, Bremen 2011
- /MER13/ Konrad Mertens
Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis
Carl Hanser Verlag, 2013
- /MISUMI14/ MISUMI Europa GmbH
Produktkatalog 2014, Winkelgelenke
- /MTS10/ MTS Systems GmbH
Informationsmaterial 2010, Model 370.10
- /MW14/ Maschinenbau-Wissen
URL: [http://www.maschinenbau-wissen.de/bilder/skripte/werkstofftechnik/
spannungs-dehnungs-diagramm-06.png](http://www.maschinenbau-wissen.de/bilder/skripte/werkstofftechnik/spannungs-dehnungs-diagramm-06.png), 08.10.2014
- /OEK14/ Interpolitische Bedeutung der Photovoltaik
URL: http://www.oekonews.at/index.php?mdoc_id=1016479
27.05.2014
- /POW14/ Eigenanfertigung Microsoft PowerPoint 2010
- /PVM13/ pv magazine Deutschland Solarpraxis AG
URL: [http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/
zweistelliges-wachstum-fr-photovoltaik-weltweit-100010730/](http://www.pv-magazine.de/nachrichten/details/beitrag/zweistelliges-wachstum-fr-photovoltaik-weltweit-100010730/), 10.04.2013
- /QC14/ Hanwha Q CELLS GmbH, Bitterfeld-Wolfen
Produktinformation Q.PEAK-G3 , 2014
- /QUA08/ Quaschnig, V.
Erneuerbare Energien und Klimaschutz
1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2008
- /REIL98/ Karl Reiling
Der Zugscherversuch zur Ermittlung von in-situ-Klebstoffkennfunktionen
Verlag Karl Reiling, Dachau 2000
- /RÖS08/ Rösler, Harders, Bäker
Mechanisches Verhalten der Werkstoffe
3. Auflage, Vieweg Teubner Verlag, Braunschweig 2008

- /TL14/ Technik Lexikon
URL: http://www.techniklexikon.net/images/d1109_dehnung.gif
08.10.2014
- /WES09/ Wesselak, Schabbach
Regenerative Energietechnik
1.Auflage Springer Verlag, Berlin 2009
- /WIEß11/ Wolfgang Weißbach
Werkstoffkunde
18. Auflage, Vieweg Teubner, Flensburg 2011
- /WON10/ Wong, C. P.
Electrical Conductive Adhesives with Nano-technologies
1. Auflage, New York, Springer-Verlag, 2010

9 Anhang

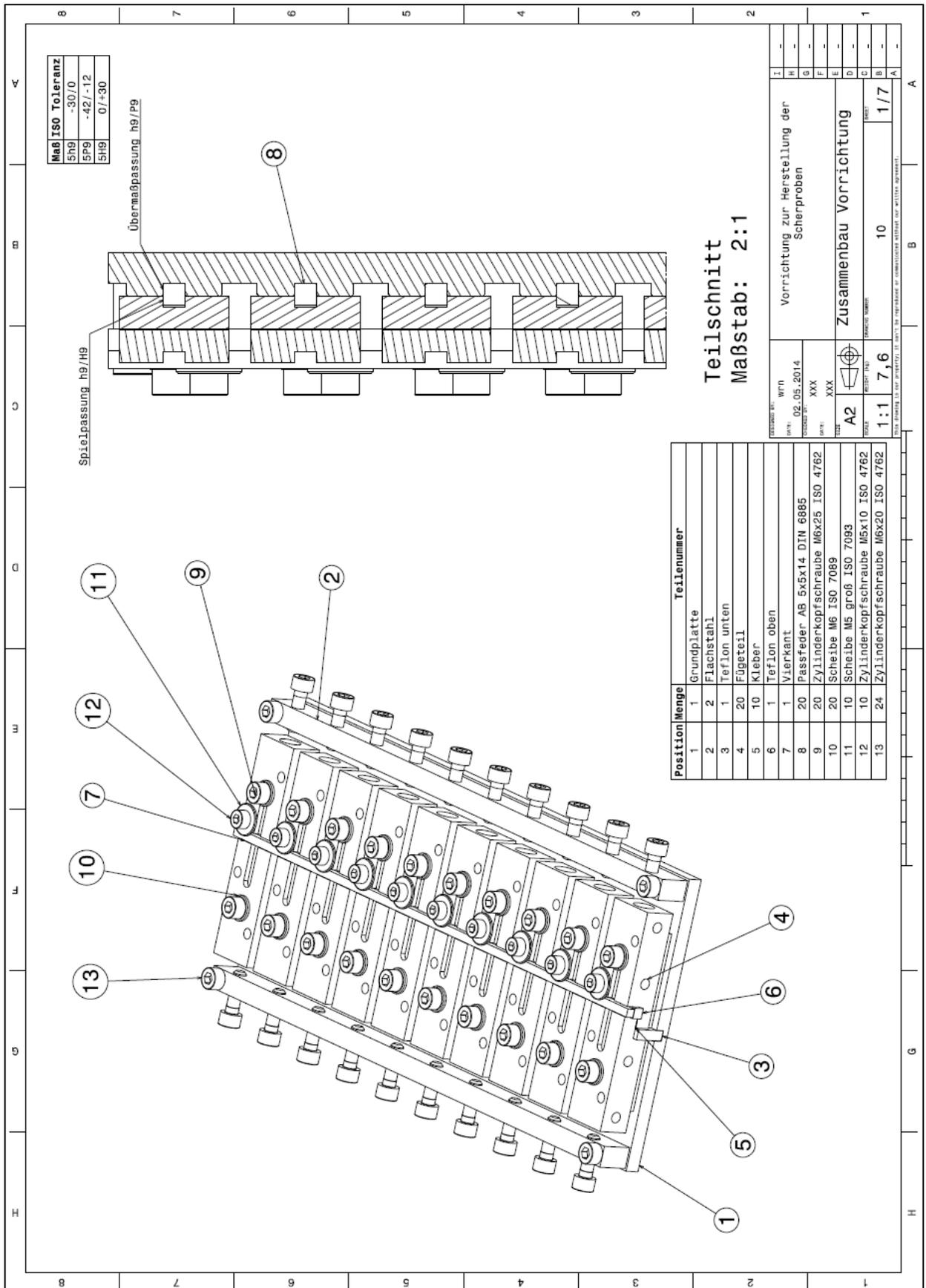
Anhang 1: Morphologischer Kasten

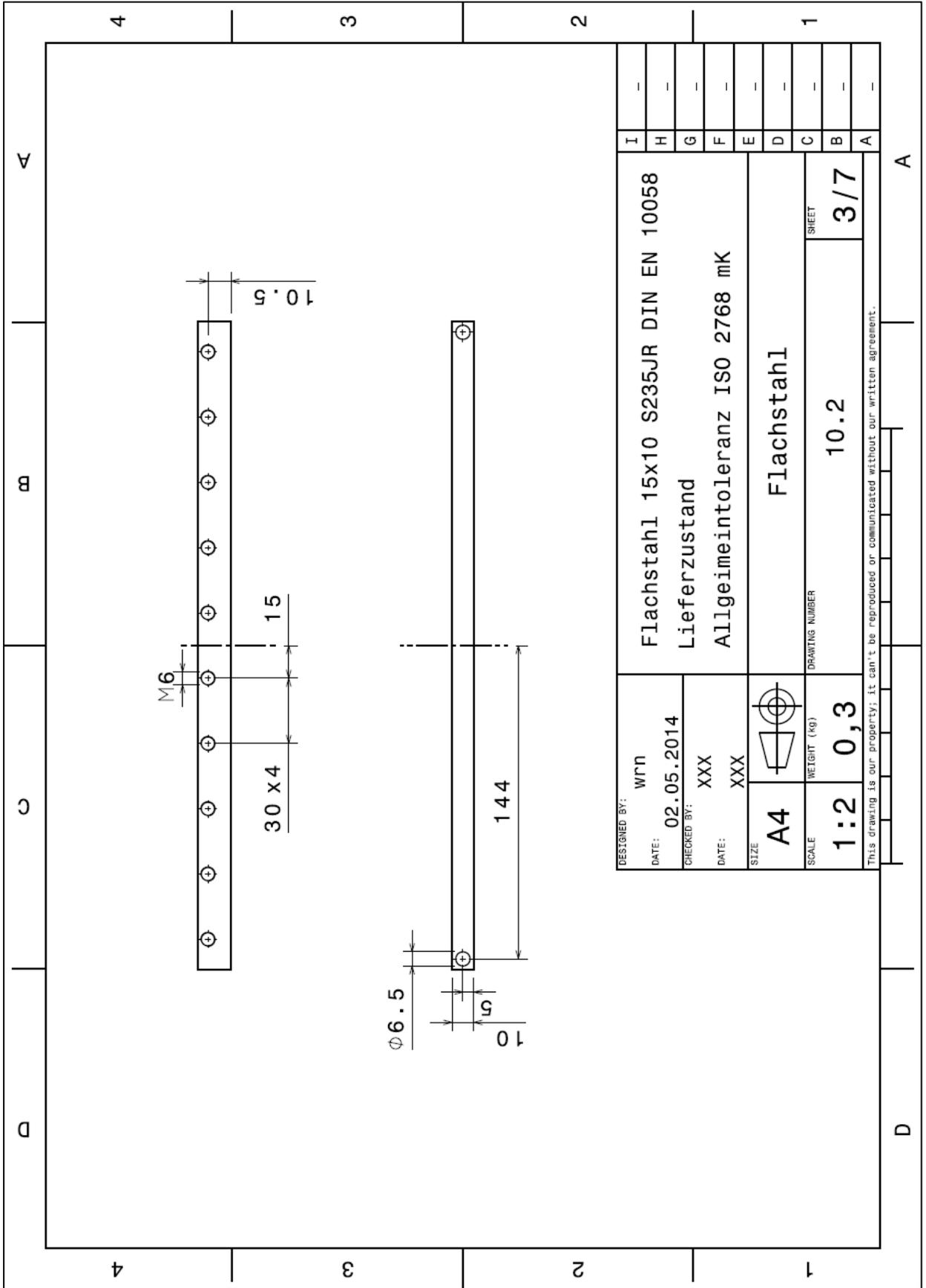
Teilfunktion	Lösungen			
	Stahl	Al-Legierung	Cu-Legierung	
Werkstoff	$E = 210\,000\text{ MPa}, \kappa = 1,4 \cdot 10^6\text{ S/m}$	$E = 72\,000\text{ MPa}, \kappa = 36,59 \cdot 10^6\text{ S/m}$	$E = 130\,000\text{ MPa}, \kappa = 58 \cdot 10^6\text{ S/m}$	
Geometrie	Zylinder	Quader		
	 Toleranz < 1µm	 Toleranz < 25µm		
Anbindung	Spannbacken	Einschraubgewinde		
	 kraftschlüssig mit Spannsatz Piezokörper	 formschlüssig: Gewindestange gekontert		
Biegemomenteinfluss	einfach Überlappend	gestuft	Linearführung	Bolzenführung
	 exzentrische Krafteinleitung	 zentrische Krafteinleitung	 Lagerung der zylindrischen Füge­teilverformung	 externe Lagerung der quadratischen Füge­teilverformung
Positionier­vorrichtung	Pass­verbindung	Klemm­verbindung	Grund­platte + Pass­feder	Prisma
	 Pass­stifte in Grund­platte	 Exzenterschraube und Arretierbolzen in Grund­platte	 Pass­feder­steck­verbindung in Grund­platte	 prismatische Aufnahme für Zylinderkörper
Kontaktierung	Auflöten	Schrauben­klemme	Klemmen	
	 stoff­schlüssige Verknüpfung	 Schraube klemmt Elektrode	 Iemmung mit Federkraft	

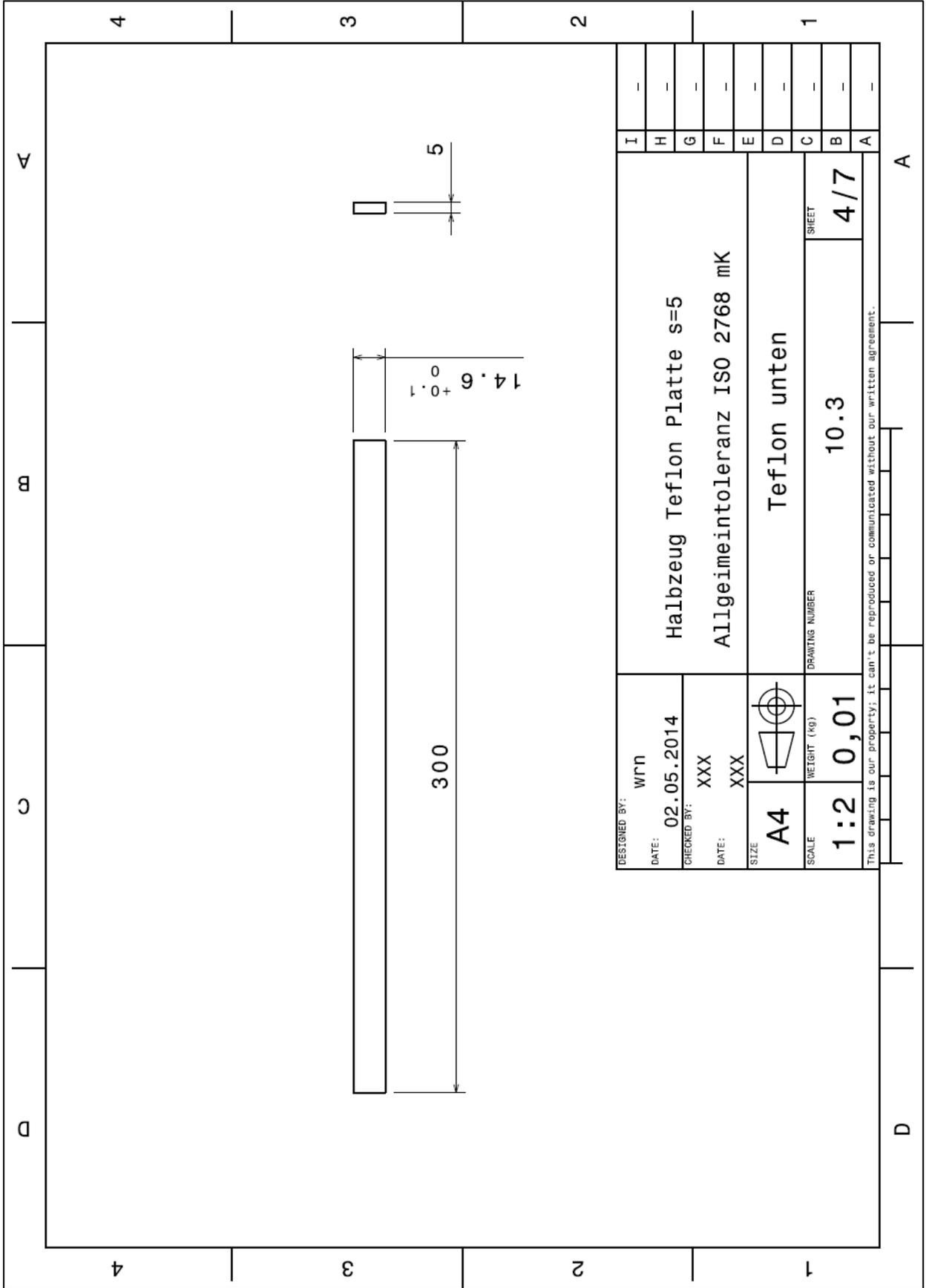
Anhang 2: Kostenstückliste und Variantenvergleich

Variante	Bezeichnung	Menge	Herstellkosten Einkaufspreis	Gesamtkosten
V1	Prisma	1	175,00 €	
	Deckel	1	35,00 €	
	Hülsen	4	2,90 €	
	Fügeteile	2	25,00 €	
	Flachstahl	2	12,00 €	
	Teflon unten	1	10,00 €	
	Teflon oben	1	10,00 €	
	Normteile	12	0,19 €	317,88 €
	V2	Grundplatte	1	135,00 €
	Flachstahl	2	15,00 €	
	Teflon unten	1	10,00 €	
	Fügeteil	2	19,50 €	
	Teflon oben	1	10,00 €	
	Druckplatte	1	15,00 €	
	Niederhalter	1	22,00 €	
	Passfeder	2	0,30 €	
	Normteile	10	0,19 €	263,50 €
V3	Grundplatte	1	175,00 €	
	Fügeteil	2	24,00 €	
	Normteile	8	0,19 €	224,52 €
V4	Grundplatte	1	175,00 €	
	Teflon	1	9,00 €	
	Fügeteil	2	18,50 €	
	Passstifte	5	0,35 €	
	Excenterschraube	3	16,85 €	
	Normteile	4	0,19 €	274,06 €

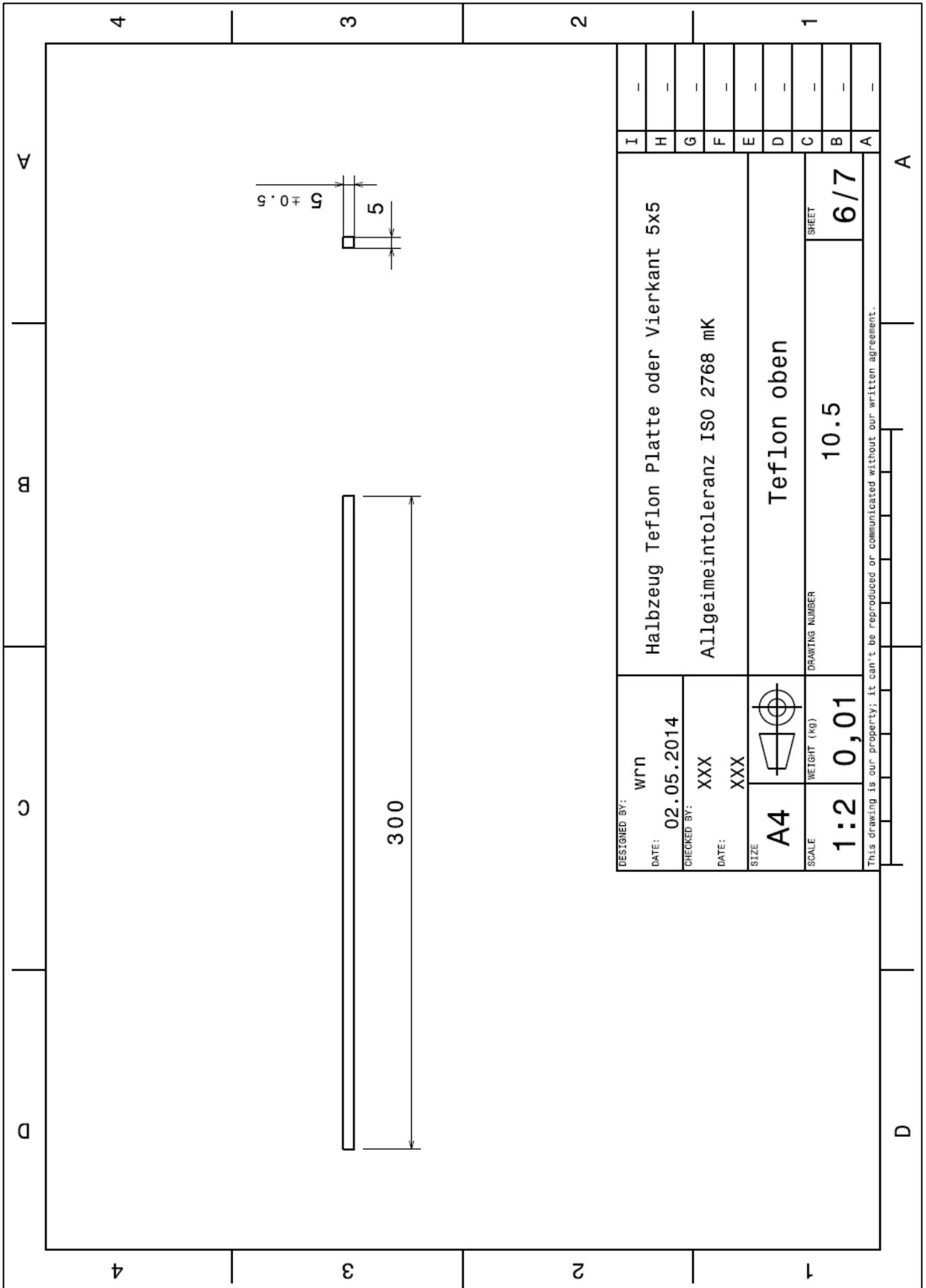
Anhang 3: Zeichnungsunterlagen und Stückliste Klebevorrichtung



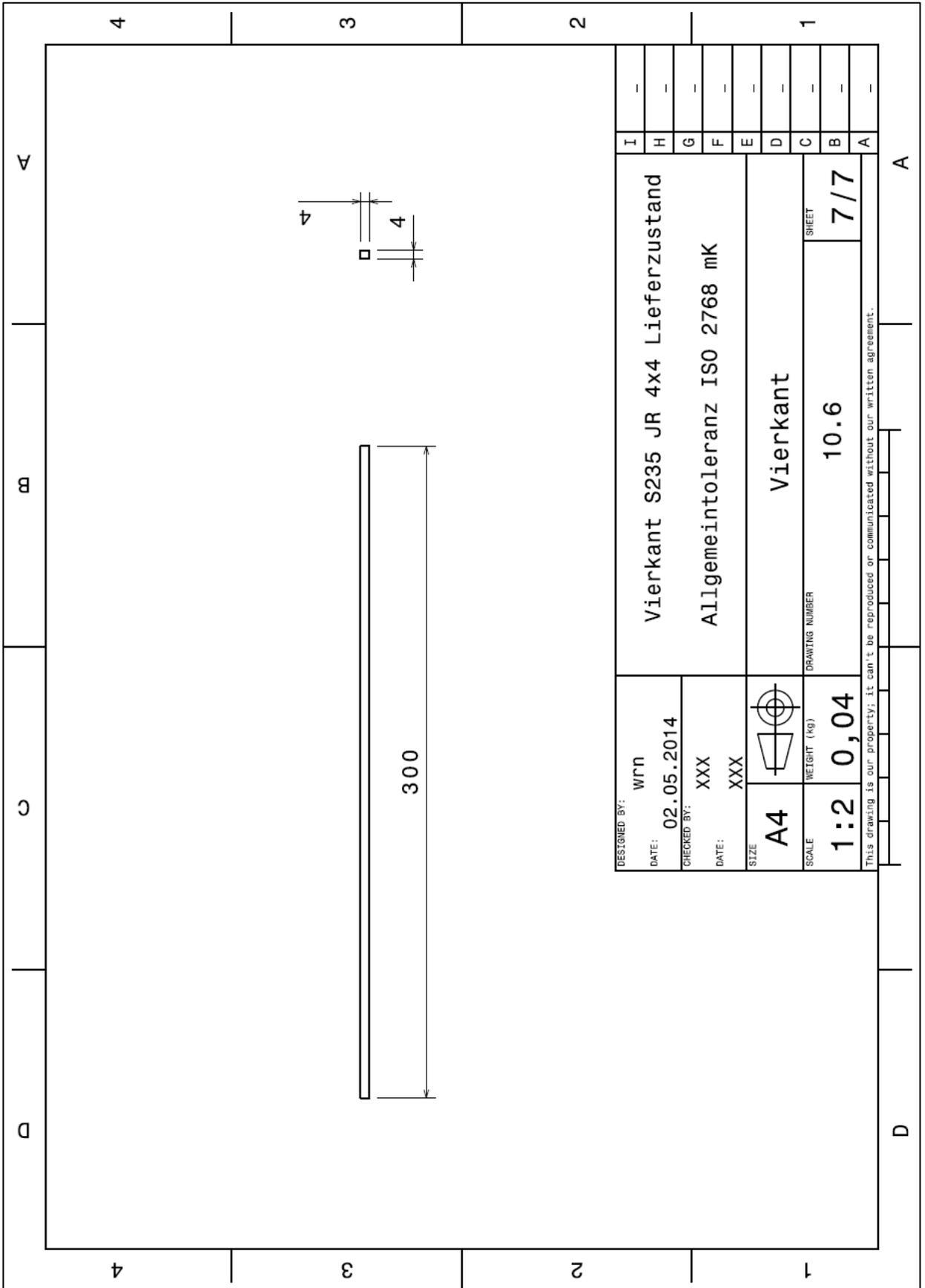




DESIGNED BY:	WRN	Halbzeug Teflon Platte s=5		I	-
DATE:	02.05.2014	Allgemeintoleranz ISO 2768 mK		H	-
CHECKED BY:	XXX	Teflon unten		G	-
DATE:	XXX			F	-
SIZE	A4	DRAWING NUMBER		E	-
SCALE	1:2			D	-
WEIGHT (kg)	0,01	SHEET		C	-
				B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.		10.3		A	-
		4/7			



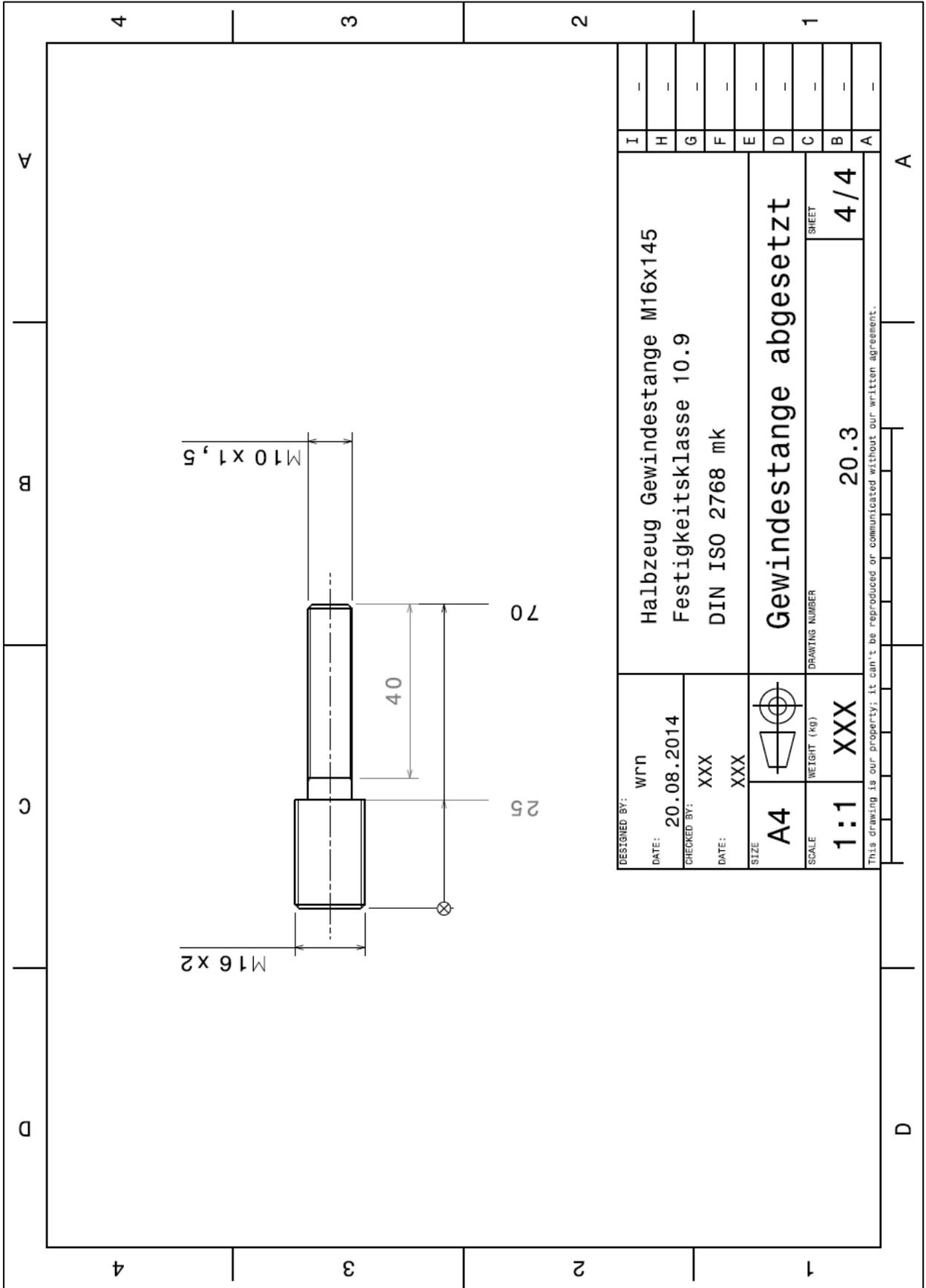
DESIGNED BY:	WRN	Halbzeug Teflon Platte oder Vierkant 5x5		I	-
DATE:	02.05.2014	Allgemeintoleranz ISO 2768 mK		H	-
CHECKED BY:	XXX	Teflon oben		G	-
DATE:	XXX			F	-
SIZE	A4	DRAWING NUMBER		E	-
SCALE	1:2	WEIGHT (KG)		D	-
		DRAWING NUMBER		C	-
		SHEET		B	-
		10.5		A	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				6/7	



DESIGNED BY:	WRN	Vierkant S235 JR 4x4 Lieferzustand		I	-
DATE:	02.05.2014	Allgemeintoleranz ISO 2768 mK		H	-
CHECKED BY:	XXX	Vierkant		G	-
DATE:	XXX	10.6		F	-
SIZE	A4	DRAWING NUMBER		E	-
SCALE	1:2	SHEET		D	-
	0,04	7/7		C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				B	-
				A	-

Anhang 4: Zeichnungsunterlagen und Stückliste Scherversuchsaufbau

4	3	2	1	V	B	C	D	E	F	G	H																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Position</th> <th style="width: 15%;">Menge</th> <th style="width: 70%;">Teilenummer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>Scherprobe</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>Gelenkkopf</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>Isolator</td></tr> <tr><td>4</td><td>4</td><td>Scheibe M10 ISO 7089</td></tr> <tr><td>5</td><td>2</td><td>Zylinderkopfschraube M10x40 ISO 4762</td></tr> <tr><td>6</td><td>2</td><td>Flansch</td></tr> <tr><td>7</td><td>4</td><td>Scheibe M8 ISO 7089</td></tr> <tr><td>8</td><td>4</td><td>Zylinderkopfschraube M8x50 ISO 4762</td></tr> <tr><td>9</td><td>6</td><td>Mutter M10 ISO 4032</td></tr> <tr><td>10</td><td>2</td><td>Gewindestange abgesetzt</td></tr> </tbody> </table>											Position	Menge	Teilenummer	1	1	Scherprobe	2	2	Gelenkkopf	3	2	Isolator	4	4	Scheibe M10 ISO 7089	5	2	Zylinderkopfschraube M10x40 ISO 4762	6	2	Flansch	7	4	Scheibe M8 ISO 7089	8	4	Zylinderkopfschraube M8x50 ISO 4762	9	6	Mutter M10 ISO 4032	10	2	Gewindestange abgesetzt
Position	Menge	Teilenummer																																									
1	1	Scherprobe																																									
2	2	Gelenkkopf																																									
3	2	Isolator																																									
4	4	Scheibe M10 ISO 7089																																									
5	2	Zylinderkopfschraube M10x40 ISO 4762																																									
6	2	Flansch																																									
7	4	Scheibe M8 ISO 7089																																									
8	4	Zylinderkopfschraube M8x50 ISO 4762																																									
9	6	Mutter M10 ISO 4032																																									
10	2	Gewindestange abgesetzt																																									
DESIGNED BY: WRN DATE: 28.08.2014 CHECKED BY: XXX DATE: XXX		Zusammenbauteilzeichnung: einachsiger Zugversuch: Einspannung gelenkig zyklischer Versuch: Einspannung starr																																									
SIZE: A3 SCALE: 1:2 WEIGHT (kg): 1,35		Scherversuchsaufbau DRAWING NUMBER: 20 SHEET: 1/4																																									
THIS DRAWING IS OUR PROPERTY; IT CAN'T BE REPRODUCED OR COMMUNICATED WITHOUT OUR WRITTEN AGREEMENT.																																											
H	G	F	E	D	C	B	A	H	G	F	E																																

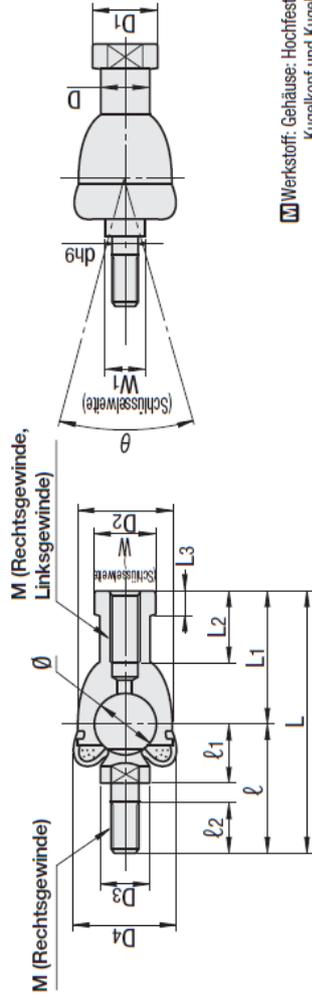


DESIGNED BY: WFN	Halbzeug Gewindestange M16x145		I	-
DATE: 20.08.2014	Festigkeitsklasse 10.9		H	-
CHECKED BY: XXX	DIN ISO 2768 mk		G	-
DATE: XXX	Gewindestange abgesetzt		F	-
SIZE A4	DRAWING NUMBER		E	-
WEIGHT (kg) XXX	20.3		D	-
SCALE 1:1	SHEET 4/4		C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			B	-
			A	-

Gelenkkopf RBIDL10

Kugelkopf, gerade

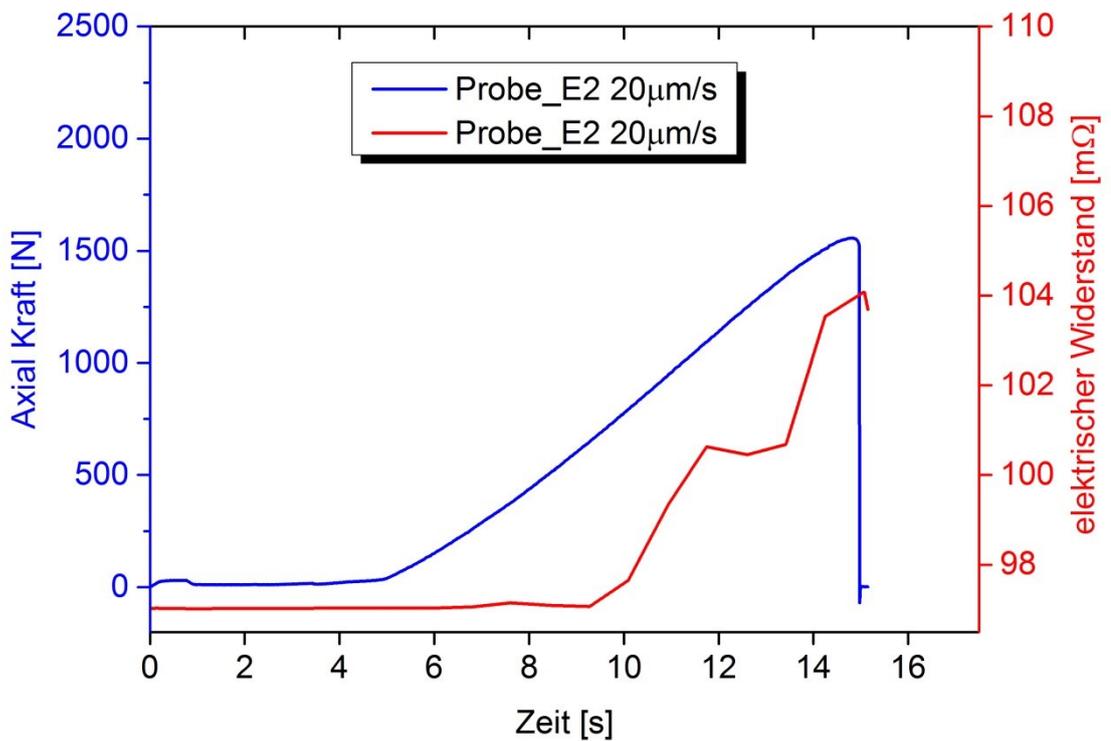
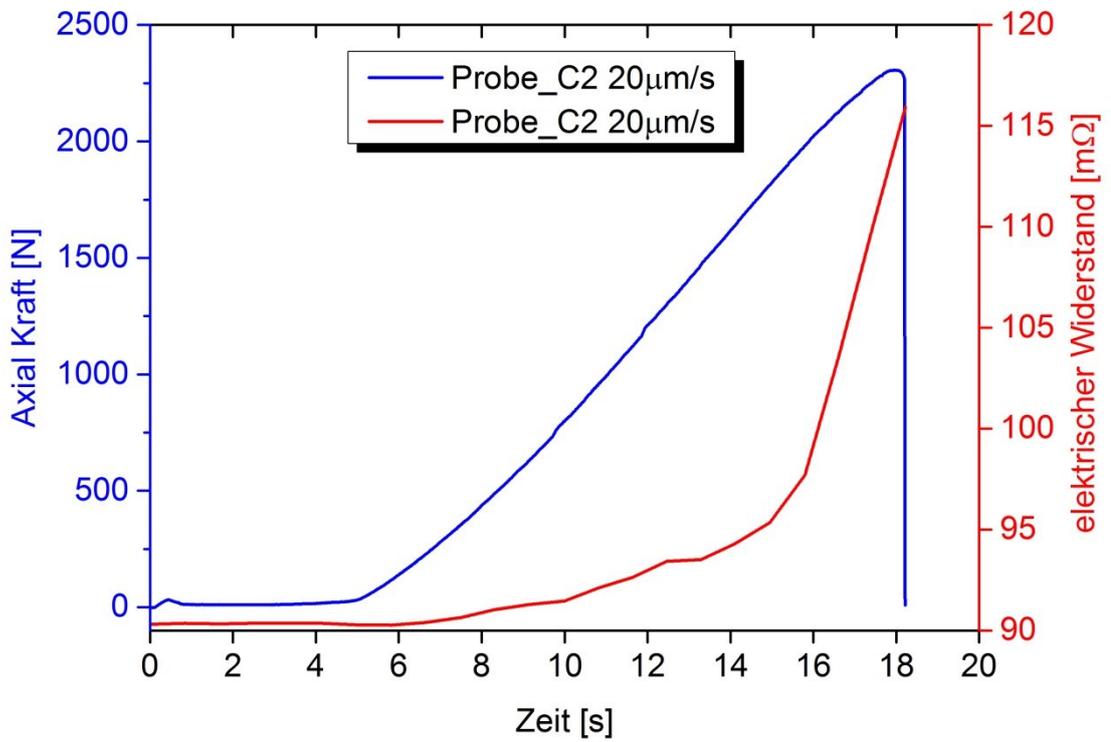
RBID
(Rechtsgewinde)
RBIDL
(Linksgewinde)

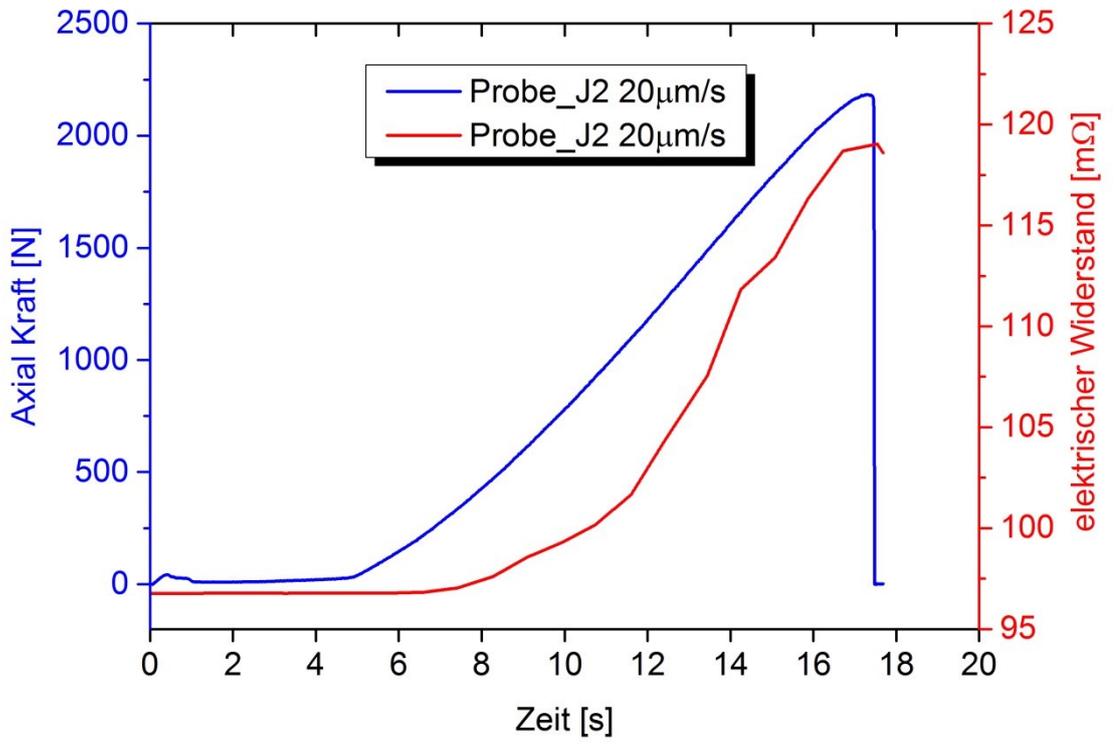
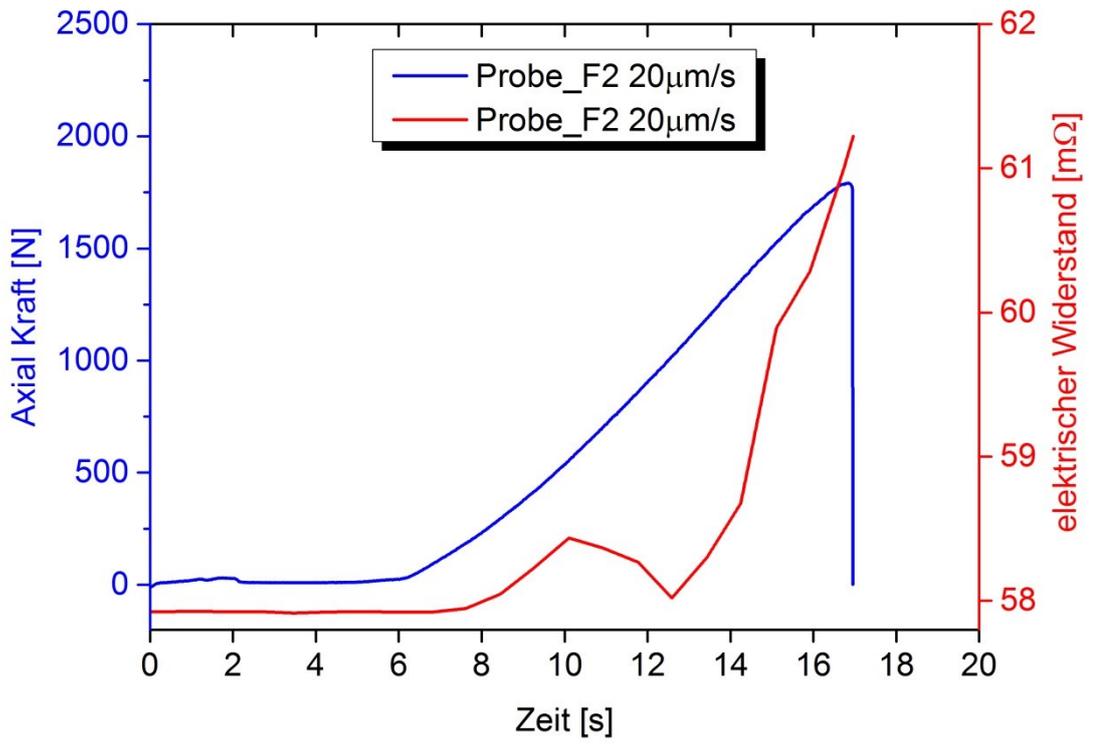


Werkstoff: Gehäuse: Hochfeste Zink-Legierung
Kugelkopf und Kugel: 1.1181/C35E (20~28HRC)
Manschette: Nitrilkautschuk, spezieller Synthetikgummi
Härte: Kugel 650HV~

Teilenummer	Halter										Kugelkopf und Kugel							Zulässige Neigung Spannhel θ	Stärke der Fließgrenze Pk (N)	Statische Traglast Radial Cs (N)		Gewicht (g)	€ Stückpreis	Mengenrabatt
	Ausführung	M	D	D1	D2	L	L1	L2	L3	MXP	W	dh9	l	l1	l2	W1	D3			D4	Kugel-Ø			
RBID (Rechtsgewinde)	5	9	11	17	46	24	12	M5x0.8	4	9	5	0	22	11	8	7	9	20	11.112	5690	11400	25		
	6	10	13	20	55.2	28	15	M6x1.0	5	11	6	-0.030	27.2	12.2	11	8	10	12.7	7450	14900	40			
RBIDL (Linksgewinde)	8	12.5	16	24	65	32	16	M8x1.25		14	8		33	16	12	10	12	24	15.875	11700	23200	75		
	10	15	19	28	80.5	35	18	M10x1.5		17	10	0	45.5	19.5	15	11	14	30	19.05	16800	33500	123		
RBIDL (Linksgewinde)	10A				74.5			M10x1.25	6.5				39.5						120	22800	45600	190		
	12	17.5	22	32	91	40	20	M12x1.75		19	12		51	21	17	19	32	22.225	190	22800	185			
M16A nur für RBID verfügbar.	12A				84			M12x1.25					44	17					185	29800	59600	370		
	14	20	25	36	109	45	25	M14x2.0				0	64	28					280	29800	59600	275		
	14A				103			M14x1.5	8	22	14	-0.043	58	23.5	22				275	29800	59600	370		
	16	22	27	40	118	50	27	M16x2.0			16		68	25.5	23				360	29800	59600	370		
	16A				112			M16x1.5					62						360	29800	59600	370		

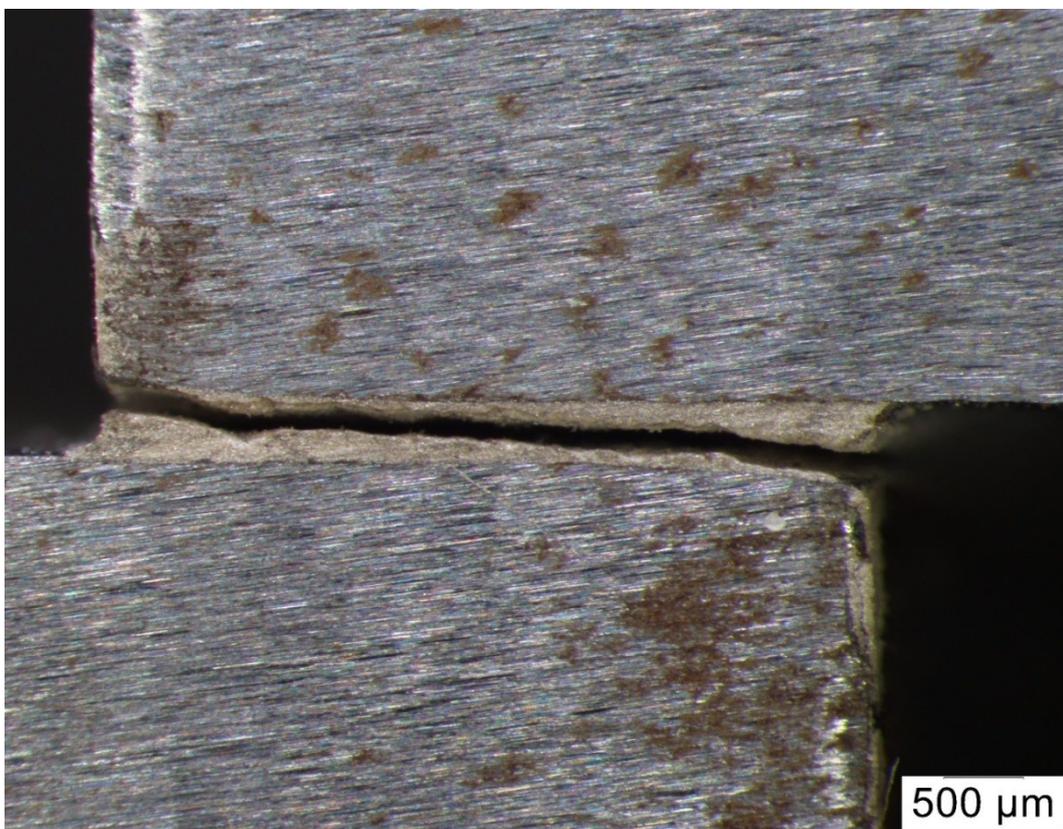
Anhang 5: Diagramme quasistatischer Scherzugversuch





Anhang 6: Bruchbilder quasistatischer Scherzugversuch

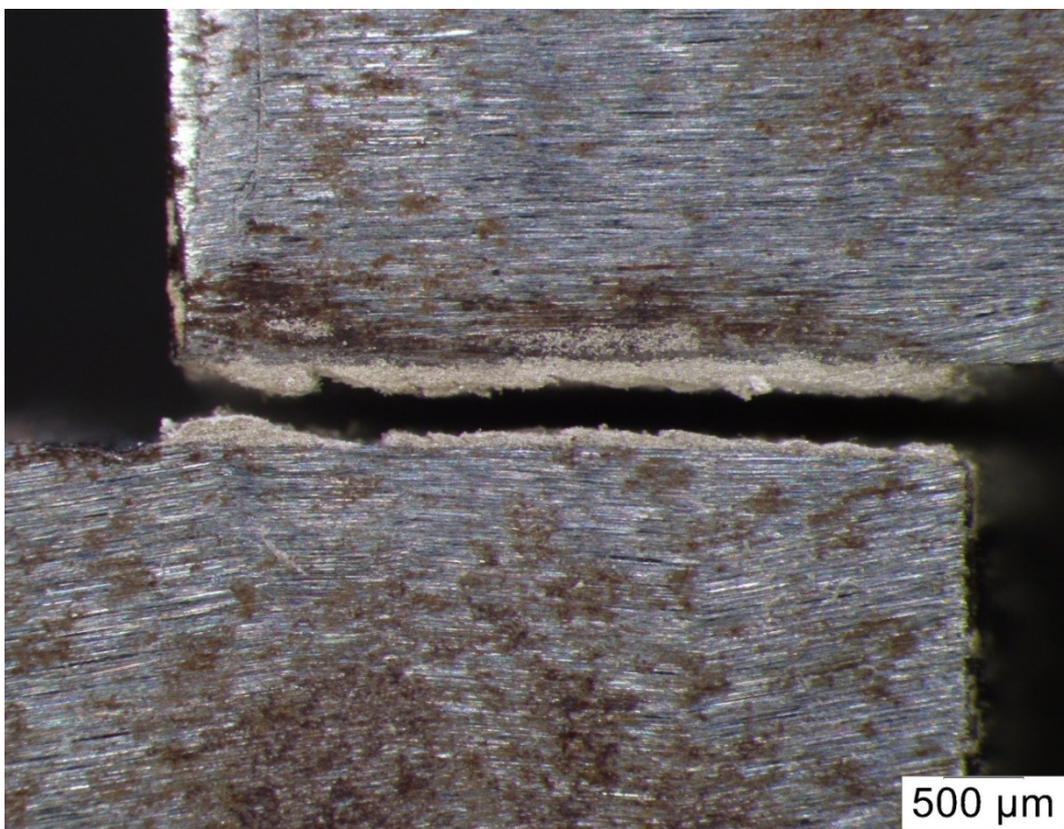
Probe_C2



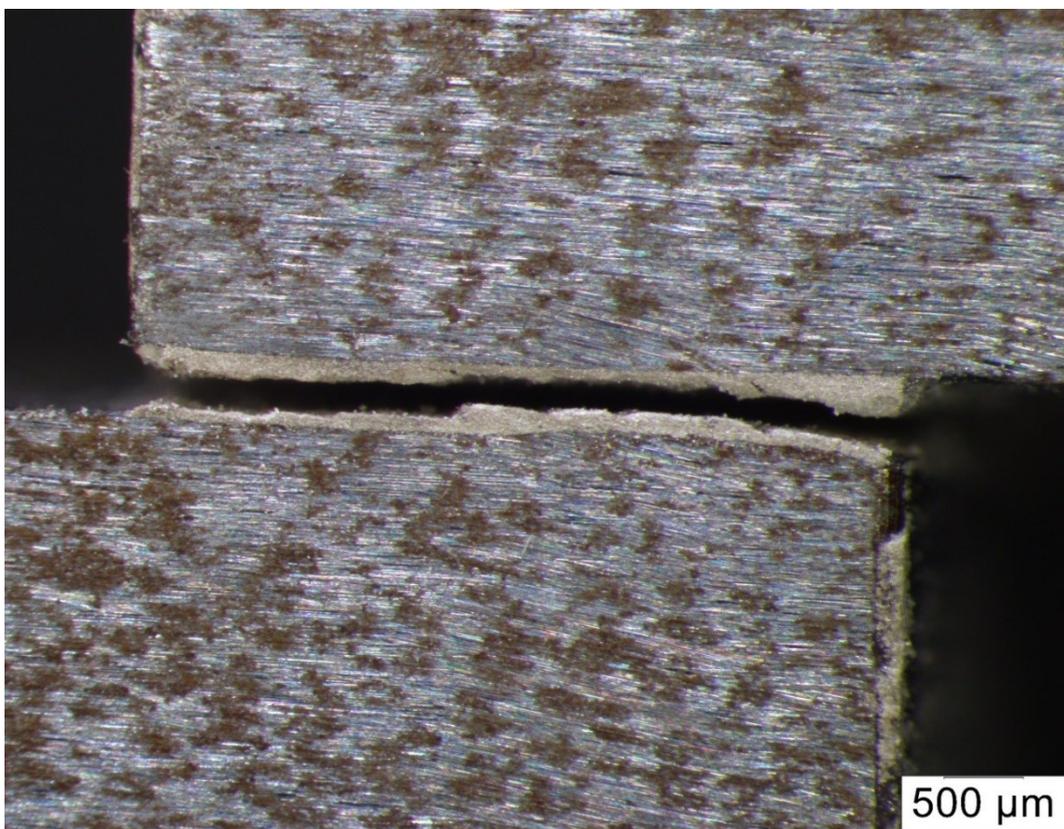
Probe_E2



Probe_F2



Probe_H2



Probe_J2



Anhang 7: Diagramme zyklischer Ermüdungsversuch

