Universität Rostock Traditio et Innovatio

Beitrag zur Bewertungsgruppenentwicklung von Imperfektionen in geklebten hochsteifen Aluminiumverbindungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
der Universität Rostock

vorgelegt von

Christopher Wald,

geboren am 25.08.1993 in Greifswald

Rostock, 2025
https://doi.org/10.18453/rosdok_id00005916

Lehrstuhl Fertigungstechnik
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Gutachter / Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen

Professur für Fügetechnik und Montage

Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. habil. Knuth-Michael Henkel

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Fügetechnik

Prof. Dr.-Ing. Philipp Weißgräber

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Leichtbau

Prof. Dr.-Ing. habil. János Zierath

Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Lehrstuhl Technische Mechanik / Dynamik

Datum der Einreichung: 14.08.2025

Datum der Verteidigung: 06.05.2026

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe *Klebtechnik* der Abteilung *Neue Werkstoffe und Verfahren* am Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP und im Rahmen des Forschungsvorhabens Klebschichtinspektionsmethoden. Das Forschungsvorhaben wurde über die *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen* (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der *Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung* (IGF) vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz* (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge für die fachliche Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die Bereitstellung jeglicher Ressourcen für meine Forschungstätigkeiten am Fraunhofer IGP. Zudem möchte ich Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale für das Interesse am Thema der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Für den fundierten fachlichen Austausch, die zeitintensive inhaltliche Überarbeitung und die gewissenhaften Korrekturen danke ich Linda Fröck, Nele Kayser, Luzie Lemmrich, Viktoria Nikolova, Robert Jahnke, Johannes Kuhlmey, Matthias Lang, Daniel Leingang und Julius Magritz. Euer Wissen und die motivierenden Worte haben mich immer angetrieben. Zusätzlich wurde ich bei der Durchführung und Entwicklung der Versuche von zahlreichen Studierenden unterstützt. Ich danke euch vielmals dafür.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Meinen Großmüttern Inge und Lore, meinen Eltern Silke und Simon sowie meiner Schwester Josephine und meinem Schwager Sebastian danke ich für die Inspiration, sich im Leben stetig weiterzuentwickeln und immer nach vorne zu blicken. Nur eure durchgehende Unterstützung hat es mir überhaupt ermöglicht, diesen Weg beschreiten zu dürfen. Gleiches gilt für meine Freundin Jessy, der ich zudem dafür danke, dass sie vollstes Verständnis für die knapp bemessene gemeinsame Zeit in dieser Phase aufgebracht und mich stets weiter motiviert hat. Erst ihr liebevoller Rückhalt hat die Anfertigung dieser Dissertation ermöglicht.

Rostock, 14.08.2025 Christopher Wald

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden Schädigungsarten von Klebverbindungen identifiziert, die im Herstellungsprozess und während des Betriebs entstehen können. Daraus werden drei generische Schadensformen (Adhäsions-, Kohäsionsfehler, Fehlbildungen der Klebfugengeometrie) abgeleitet, die hinsichtlich ihres Schädigungspotenzials mechanisch bewertet werden. Für die Schadensbewertung werden zunächst Verfahren erarbeitet, um die genannten Imperfektionsarten mit variierenden Größen und Positionen in die Klebverbindung einzubringen. Anschließend können Prüfkörper, welche der Probengeometrie des Zugscherversuchs nach DIN EN 1465:2009-07 mit angepassten Abmessungen hinsichtlich der Klebschicht und Fügepartner entsprechen, mit definierten Fehlern reproduzierbar hergestellt werden. Die fehlerfreien und fehlerbehafteten Probekörper werden verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt (statische oder zyklische Last, Temperatur- und Medieneinfluss), um zu ermitteln, welchen Einfluss die Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindungen haben. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden zusätzlich mit numerischen Berechnungen gegenübergestellt und verglichen. Abschließend wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse in Substrukturversuchen mit erhöhten Bauteildimensionen und einem vergleichbaren Klebstoffsystem überprüft und bestätigt. Für die Untersuchungen an strukturellen Aluminiumklebverbindungen lässt sich als Fazit festhalten, dass Adhäsions- und größere Volumenfehler (≥ 13 % verdrängtes Klebstoffvolumen) vermieden werden sollten, welche insbesondere bei zyklischer Beanspruchung ein hohes Schadenspotenzial aufweisen. Weiterhin sind sie vor Alterungseinflüssen zu schützen, da diese die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindungen zusätzlich maßgeblich beeinträchtigen können. Anhand dieser Erkenntnisse wird ein Vorschlag für eine Bewertungsgruppe von Imperfektionen in geklebten Aluminiumverbindungen entwickelt, welche zukünftig in Anlehnung an die schweißtechnische Norm DIN EN ISO 5817:2023-07 in die Standards der Klebtechnik Einzug erhalten soll.

Summary

This thesis identifies types of damage to bonded joints that can occur during the manufacturing process and during operation. From this, three generic forms of damage (adhesion and cohesion defects, malformations of the adhesive joint geometry) are derived, which are mechanically evaluated with regard to their damage potential. For the damage assessment, methods are first developed to introduce the imperfection types mentioned with varying sizes and positions into the bond line. Subsequently, samples with defined defects can be produced in a reproducible manner. The tensile shear test according to DIN EN 1465:2009-07 with adapted dimensions with regard to the adhesive layer and joining partners is used for this purpose. The defect-free and defective test specimens are subjected to various stresses (static, cyclic, temperature and media influence) in order to determine the influence of imperfections on the mechanical properties of the bonded joints. The results of the experimental investigations are also compared and contrasted with numerical calculations. Finally, the transferability of the findings is checked and confirmed in substructure tests with increased component dimensions and a comparable adhesive system. For the investigations on structural bonded joints, it can be concluded that adhesion and larger volume defects (≥ 13 % displaced adhesive volume) should be avoided, which have a high damage potential, especially under cyclic stress. Furthermore, they must be protected from ageing influences, as these can also significantly impair the mechanical properties of the bonded joints. Based on these findings, a proposal for an evaluation group for imperfections in bonded aluminum joints is developed, which is to be incorporated into the standards of adhesive bonding technology in the future based on the welding standard DIN EN ISO 5817:2023-07.

Veröffentlichungen

1. Wald, C.; Fröck, L.; Flügge, W.; Klapp, O.: Inspektionsmethoden für die wiederkehrende Prüfung hochelastischer Dickschicht- und Strukturklebungen in Schiffbauanwendungen –Teil 1 (Schadensidentifikation und Herstellung von Proben mit definierten Schäden); Werkstoffe in der Fertigung 4/2020
2. Wald, C.; Fröck, L.; Flügge, W.; Klapp, O.: Inspektionsmethoden für die wiederkehrende Prüfung hochelastischer Dickschicht- und Strukturklebungen in Schiffbauanwendungen – Teil 2 (Ermittlung von Abminderungsfaktoren); Werkstoffe in der Fertigung 5/2020
3. Wald, C.; Fröck, L.; Flügge, W.; Klapp, O.: Inspektionsmethoden für die wiederkehrende Prüfung hochelastischer Dickschicht- und Strukturklebungen in Schiffbauanwendungen – Teil 3 (Fehlstellendetektion mithilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren); Werkstoffe in der Fertigung 6/2020
4. Wald, C.; Fröck, L.; Flügge, W.: Imperfektionen in strukturellen Klebverbindungen; adhäsion KLEBEN & DICHTEN 9 | 22
5. Wald, C.; Fröck, L.; Flügge, W.: Zerstörungsfreie Prüfung schiffbaulicher struktureller Klebverbindungen; adhäsion KLEBEN & DICHTEN 11 | 22
6. Wald, C.; Fröck, L.; Düreth, C.; Tittmann, K.; Koch, I.; Flügge, W.; Gude, M.: Lebensdaueranalyse für Klebverbindungen in großen FKV-Strukturen mit variierenden Klebschichtdicken; Schweißen und Schneiden 76 (2024) Heft 3

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis XIII

1 Einleitung 1

1.1 Problemstellung 1

1.2 Zielstellung und Lösungsweg 2

2 Stand der Technik und Forschung 3

2.1 Aufbau einer Klebverbindung 3

2.2 Morphologie der Klebschicht 4

2.3 Fertigung von Klebverbindungen und Fehlerpotenziale 5

2.3.1 Oberflächenbehandlung der Fügeteile 8

2.3.2 Einstellung des Mischungsverhältnisses und Vermengen des Klebstoffs 11

2.3.3 Klebstoffauftrag 11

2.3.4 Füge- und Fixierprozess 12

2.4 Alterung von Kunststoffen 12

2.5 Zerstörende Prüfung von Klebverbindungen 14

2.5.1 Theoretische Grundlagen des Zugscherversuchs 16

2.5.2 Digitale Bildkorrelation 18

2.6 Numerische Simulation 19

2.7 Einbringung und Einfluss von Imperfektionen in Klebverbindungen 21

2.8 Zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen 26

2.9 Umgang mit Imperfektionen in der Normung 36

3 Materialien und Methoden 42

3.1 Verwendete Materialien 42

3.2 Standardprüfverfahren zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Klebverbindungen 43

3.3 Probekörperherstellung 44

3.4 Verfahrensentwicklung zur Erzeugung generischer Schadenstypen in hochsteifen Klebverbindungen 44

4 Untersuchung des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von hochsteifen Klebverbindungen 49

4.1 Versuchsgegenstand 49

4.2 Statische Versuche an ungealterten hochsteifen Klebverbindungen 49

4.2.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in statischen Versuchen an ungealterten Klebverbindungen 50

4.2.2 Untersuchung ausgewählter Prüfkörper mit der *GOM*-Messtechnik 54

4.2.3 Vergleich und Interpretation der experimentellen statischen Untersuchungen an ungealterten Klebverbindungen 57

4.3 Numerische Untersuchung von statischen Versuchen an ungealterten Zugscherproben 67

4.3.1 Berechnung von Spannungs- und Verformungswerten einer fehlerfreien Klebverbindung 70

4.3.2 Vergleich und Interpretation der FEM-Simulationen 72

4.3.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus experimentellen Versuchen und numerischen Untersuchungen 81

4.4 Statische Versuche an gealterten hochsteifen Klebverbindungen 88

4.4.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in statischen Versuchen an gealterten Klebverbindungen 91

4.4.2 Vergleich und Interpretation der experimentellen statischen Untersuchungen an gealterten Klebverbindungen 93

4.5 Zyklische Versuche an ungealterten hochsteifen Klebverbindungen 99

4.5.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in zyklischen Versuchen an ungealterten Klebverbindungen 100

4.5.2 Vergleich und Interpretation der experimentellen zyklischen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben 103

4.6 Statische Versuche an ungealterten hochsteifen Klebverbindungen auf Substrukturebene 108

4.6.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in statischen Versuchen an ungealterten Klebverbindungen auf Substrukturebene 110

4.6.2 Vergleich und Interpretation der experimentellen statischen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben auf Substrukturebene ... 112

5 Bewertungsgruppenentwicklung zu den Auswirkungen von Imperfektionen in hochsteifen Klebverbindungen ... 115

6 Abschließende Betrachtungen ... 120

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse ... 120

6.2 Ausblick ... 122

Literaturverzeichnis ... 124

Anhang ... A-1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines Klebverbunds 3
Abbildung 2: Auswahl an Prozessschritten bei der Fertigung von Klebverbindung 6
Abbildung 3: Generische Schadensformen in Klebverbindungen 7
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Aluminiumoxid-Struktur 9
Abbildung 5: Einteilung der Beanspruchungsarten für Kunststoffalterung 13
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Zugscherprobe nach DIN EN 1465:2009-07 und auftretende Spannungen und Momente während einer Belastung 16
Abbildung 7: Spannungsverlauf in der Klebschicht beim Zugscherversuch 17
Abbildung 8: Schubspannungsverlauf beim Zugscherversuch in der Klebschicht 17
Abbildung 9: Anwendung der DIC bei der Verfolgung eines Specklemusters einer belasteten Probe 18
Abbildung 10: Element mit an den sichtbaren Flächen wirkenden Schub- und Normalspannungen 19
Abbildung 11: 2D- und 3D-Geometrien als Imperfektionen in Klebverbindungen ... 22
Abbildung 12: PTFE-Folie zur Herbeiführung von Adhäsionsfehlern in einer Klebverbindung 23
Abbildung 13: Klebverbindung mit Hohlkehlen 25
Abbildung 14: Röntgenaufnahmen mit Imperfektionen innerhalb der Klebschicht (helle Bereiche) 27
Abbildung 15: C-Scan der Ultraschalluntersuchungen an fehlerbehafteten Proben 28
Abbildung 16: Thermogramm eines Klebverbunds mit Imperfektionen (dunkle Bereiche) 30
Abbildung 17: Shearogramme der fehlstellenbehafteten Stahl-Kautschuk-Klebverbindungen bei thermischer (a) und mechanischer (b) Belastung 32
Abbildung 18: Kraft-Weg-Diagramm mit Schadensarten, die während der zerstörenden Prüfung anhand der Schallwellen im Bauteil ermittelt werden konnten 35
Abbildung 19: Bewertungsgruppen von Imperfektionen in Schweißverbindungen . 39

Abbildung 20: Beispiele für Qualitätsstandards in der Schweißtechnik 40
Abbildung 21: Zugscherprobe mit vergrößerten Dimensionen (Explosionsdarstellung) 43
Abbildung 22: VK in der 2x3-, 3x4-, 4x6- und 6x6-Anordnung (v. l. n. r.) in der Klebschicht 45
Abbildung 23: HK in der 2x3-, 3x4-, 4x6- und 6x6-Anordnung (v. l. n. r.) auf dem Fügeteil 46
Abbildung 24: PTFE-Folie in der 10 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %-Ausprägung auf der gesamten Klebfläche 47
Abbildung 25: Platzierung der Aluminiumeinleger, um Abweichungen der Klebfugengeometrie herzustellen 47
Abbildung 26: Schematische Übersicht der eingebrachten Imperfektionen 48
Abbildung 27: Prüfaufbau des Zugscherversuchs in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07 51
Abbildung 28: Kraft-Weg-Diagramm der fehlerfreien Zugscherproben (Referenzserie) 52
Abbildung 29: Verschiedene Bereiche der gesamten Bruchfläche bei einer Zugscherprobe ohne Imperfektionen 53
Abbildung 30: Prüfaufbau des Zugscherversuchs in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07 unter Zuhilfenahme der *GOM*-Messtechnik 54
Abbildung 31: Darstellung der Gleitung beim Zugscherversuch 55
Abbildung 32: Specklemuster auf Zugscherprobe (links) und Auswerteparameter (rechts) 55
Abbildung 33: Ausrichtung des Koordinatensystems und Platzierung der Extensometer in *GOM Correlate* an einer unbelasteten (links) und belasteten Probe (rechts) 56
Abbildung 34: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von Fehlern in der Kohäsionszone (VK) und Abweichungen der Klebfugengeometrie (Aluminiumeinleger) 57
Abbildung 35: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von Fehlern in der Kohäsions- und Adhäsionszone (HK) und Fehlern in der Adhäsionszone (PTFE-Folie) 58
Abbildung 36: Auswirkungen des verdrängten Klebstoffvolumens durch VK auf die Durchschnittsfestigkeit (blau: Referenz | orange: VK) 61

Abbildung 37: Vergleich verschiedener Rissverläufe bei Zugscherproben mit VK .. 61
Abbildung 38: Auswirkungen der verdeckten Klebfläche durch HK und PTFE-Folie auf die Durchschnittsfestigkeit (blau: Referenz | gelb: HK | grau: PTFE-Folie) 63
Abbildung 39: Schematischer Rissverlauf bei Zugscherproben mit hohen Ausprägungen von PTFE-Folie 64
Abbildung 40: Verminderte Klebschichtbreite der Zugscherproben mit Abweichungen der Klebfugengeometrie (links) im Vergleich zu Proben mit VK (rechts) 65
Abbildung 41: Bruchbild einer Referenzprobe mit kleinem CF-Bereich (links) und Bruchbild einer Probe mit keilförmiger Einschnürung quer zur Zugrichtung (rechts) 65
Abbildung 42: Veränderung des Übergangs vom Fügeteil zur Klebschicht bei Referenz (links) und den Abweichungen der Klebfugengeometrie Keil (mittig) und Radius (rechts) 65
Abbildung 43: Unterschied des Rissbeginns bei fehlerfreien Proben (links) und Proben mit Abweichungen der Klebfugengeometrie (Keil, rechts) ... 66
Abbildung 44: Spannungsverteilung in der Klebschicht beim Zugscherversuch in Abhängigkeit von der Überlappungslänge 66
Abbildung 45: Modell einer in definierte Elemente unterteilten Zugscherprobe 68
Abbildung 46: Modell einer Zugscherprobe mit Übergangsradius zur Vermeidung von Singularitäten 68
Abbildung 47: Zugscherversuch in numerischen Berechnungen (links) und experimentellen Versuchen (rechts) 70
Abbildung 48: Idealisierte Abgrenzung des linear-elastischen Bereichs im Kraft-Weg-Diagramm 70
Abbildung 49: Schubspannungsmaxima an den Überlappungsenden der Modelle der Zugscherproben 77
Abbildung 50: Gaseinschlüsse innerhalb einer realen Klebverbindung 78
Abbildung 51: Spannungsmaxima am Übergang zu HK 78
Abbildung 52: Normalspannungsmaxima an den Überlappungsenden der Modelle der Zugscherproben ohne Imperfektionen (links) und mit radiusförmigen Klebfugengeometrien quer zur Zugrichtung (rechts) 80

Abbildung 53: Schubspannungsmaxima innerhalb der Klebschicht mit einem Adhäsionsfehler von 75 % 80
Abbildung 54: Vergleich der experimentell ermittelten Abminderungsfaktoren und numerisch berechneten Kehrwerte 82
Abbildung 55: CF bei Bruchbild aus experimentellem Versuch (links) und Bereich hoher Spannungen aus FEM-Simulation (rechts) 83
Abbildung 56: Grenzschichtnahe Spannungsmaxima verschiedener Modelle (v. o. n. u. Referenzserie, 6x6 HK und 50 %) mit Adhäsionsfehlern 84
Abbildung 57: Grenzschichtnahe Spannungsmaxima verschiedener Modelle (v. o. n. u. 4x6 VK, Keil/l und Radius/l) mit Kohäsionsfehlern 85
Abbildung 58: Bereich höherer Spannungen (Ellipse) auf Klebschichtseite ohne Imperfektion bei Modell mit PTFE-Folie 75 % 86
Abbildung 59: Deformation der Klebschicht in den experimentellen Untersuchungen (links) und in den FEM-Simulationen (rechts) 87
Abbildung 60: Prüfzyklus des Klimawechseltests nach PV1200 90
Abbildung 61: Kraft-Weg-Diagramm der im Salzsprühnebel gealterten fehlerfreien Referenzserie 92
Abbildung 62: Kraft-Weg-Diagramm der im Klimawechseltest gealterten fehlerfreien Referenzserie 92
Abbildung 63: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von ungealterten und gealterten Zugscherproben 93
Abbildung 64: Auswirkungen des Salzsprühnebeltests auf das Bruchbild der Zugscherproben 96
Abbildung 65: Versuchsaufbau der zyklischen Untersuchungen nach DIN EN ISO 9664:1995-08 unter Zuhilfenahme der DIN 50100:2016-12 101
Abbildung 66: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Referenzserie ... 102
Abbildung 67: Durchschnittliche LW bei einer Maximalspannung von 2,36 MPa .. 105
Abbildung 68: Durchschnittliche LW bei einer Maximalspannung von 3,21 MPa .. 105
Abbildung 69: Durchschnittliche LW bei einer Maximalspannung von 4,37 MPa .. 106
Abbildung 70: Abmessungen der Zugscherproben für die Substrukturversuche (Explosionsdarstellung) 109
Abbildung 71: HK in der 18x18-Anordnung auf dem Fügeteil des Prüfkörpers auf Substrukturebene 110

Abbildung 72: Prüfaufbau der Zugscherversuche auf Substrukturebene in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07 110
Abbildung 73: Kraft-Weg-Diagramm der fehlerfreien Zugscherproben (Referenzserie) auf Substrukturebene 111
Abbildung 74: Verschiedene Bereiche des Bruchbilds bei der Referenzserie auf Substrukturebene 112
Abbildung 75: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von Imperfektionen in der Kohäsions- und Adhäsionszone (HK) auf Substrukturebene 113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter zerstörender Prüfverfahren für Klebverbindungen 15
Tabelle 2: Zusammenfassung der Eignung ausgewählter zfP-Verfahren 36
Tabelle 3: Technische Informationen zum Scotch-Weld 7271 B/A 42
Tabelle 4: Verdrängtes Klebstoffvolumen durch die Einbringung von VK in verschiedenen Anordnungen 45
Tabelle 5: Verdeckte Klebfläche und verdrängtes Klebstoffvolumen durch die Einbringung von HK in verschiedenen Anordnungen 46
Tabelle 6: Verdeckte Klebfläche durch die Einbringung von PTFE-Folie in verschiedenen Ausprägungen 47
Tabelle 7: Versuchsmatrix der ungealterten statischen Versuche Teil 1 50
Tabelle 8: Versuchsmatrix der ungealterten statischen Versuche Teil 2 50
Tabelle 9: Parameter der statischen Zugscherversuche..... 51
Tabelle 10: Ergebnisse der Referenzserie..... 53
Tabelle 11: Ergebnisse der *GOM*-Messtechnik für HK in der 2x3-Anordnung.... 56
Tabelle 12: Zusammenfassung der statischen Zugscherversuche Teil 1 59
Tabelle 13: Zusammenfassung der statischen Zugscherversuche Teil 2 60
Tabelle 14: Materialparameter für numerische Berechnungen 69
Tabelle 15: Berechnung der Steigung des Funktionsgraphen der ungealterten Referenzserie aus den statischen Versuchen bei verschiedenen Kraftniveaus 71
Tabelle 16: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Referenzserie bei einer Kraft von 10 kN 72
Tabelle 17: Ergebnisse der FEM-Simulation für die Geometrieänderungen der Referenzserie..... 72
Tabelle 18: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Spannung) Teil 1..... 73
Tabelle 19: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Geometrie) Teil 1 74
Tabelle 20: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Spannung) Teil 2..... 75
Tabelle 21: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Geometrie) Teil 2 76
Tabelle 22: Parameter der Alterungsverfahren 89
Tabelle 23: Versuchsmatrix der gealterten statischen Versuche 91
Tabelle 24: Ergebnisse der im Salzsprühnebel gealterten fehlerfreien Referenzserie..... 93

Tabelle 25: Ergebnisse der im Klimawechseltest gealterten fehlerfreien Referenzserie 93
Tabelle 26: Zusammenfassung der im Salzsprühnebeltest gealterten statischen Zugscherversuche 94
Tabelle 27: Zusammenfassung der im Klimawechseltest gealterten statischen Zugscherversuche 95
Tabelle 28: Versuchsmatrix der ungealterten zyklischen Versuche 100
Tabelle 29: Prüfparameter der zyklischen Versuche 101
Tabelle 30: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Referenzserie 102
Tabelle 31: Zusammenfassung der zyklischen ungealterten Untersuchungen . 104
Tabelle 32: Verdeckte Klebfläche und verdrängtes Klebstoffvolumen durch die Einbringung von HK bei den Proben auf Substrukturebene 109
Tabelle 33: Parameter der statischen Zugscherversuche auf Substrukturebene 111
Tabelle 34: Ergebnisse der Referenzserie auf Substrukturebene 112
Tabelle 35: Zusammenfassung der statischen Zugscherversuche auf Substrukturebene 113
Tabelle 36: Bewertungsgruppen für Imperfektionen in hochsteifen Aluminiumklebverbindungen hinsichtlich der Sicherheitsklasse 117
Tabelle 37: Bewertungsgruppen für Imperfektionen in elastischen (A) und steifen (B) Aluminiumklebverbindungen hinsichtlich der Sicherheitsklasse 118

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AF	Adhäsionsbruch
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CF	Kohäsionsbruch
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DCB	Double-Cantilever-Beam
DIC	digitale Bildkorrelation
E-Modul	Elastizitätsmodul
EoDT	Ensembles of Decision Tree
EoD	Effect of Defect
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen
FEM	Finite-Elemente-Methode
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HK	Polystyrolhalbkugeln
IR	Infrarot
KmU	kleine und mittelständische Unternehmen
LW	Lastwechsel
MEK	Methylethylketon
PVC	Polyvinylchlorid
PTFE	Polytetrafluorethylen
rel. LF	relative Luftfeuchtigkeit
RT	Raumtemperatur
SCF	substratnaher Kohäsionsbruch
VK	Polystyrolvollkugeln
WEA	Windenergieanlage
zfP	zerstörungsfreie Prüfung

Nomenklatur

Große Buchstaben

Zeichen	**Bedeutung**	**Einheit**
A	Klebfläche	mm^2
F	Kraft	N
F_{max}	Maximalkraft	N
K	Element- / Struktursteifigkeit	$\frac{N}{mm^2}$
M_b	Biegemoment	Nm
T_G	Glasübergangstemperatur	K

Kleine Buchstaben

Zeichen	**Bedeutung**	**Einheit**
d	Klebschichtdicke	mm
u	Knotenverschiebung	mm
v	Verschiebung	mm

Griechische Buchstaben

Zeichen	**Bedeutung**	**Einheit**
tan γ	Gleitung	-
σ	Normalspannung	$\frac{N}{mm^2}$
τ	Schubspannung	$\frac{N}{mm^2}$
$\tau_{Verbund}$	Zugscherfestigkeit	$\frac{N}{mm^2}$

1 Einleitung

Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Einführung neuer innovativer Materialien sowie der steigende Anspruch an die Ästhetik führen zu einer zunehmend komplexen Gestaltung von Strukturen. Der Einsatz von neuartigen Verbundwerkstoffen und -strukturen nimmt infolgedessen in verschiedenen Industriebereichen kontinuierlich zu. Um unterschiedlichste Komponenten qualitativ hochwertig zu verbinden, sind geeignete Fügeverfahren notwendig. Die Umsetzung fortschrittlicher Konstruktionen ist mit konventionellen Methoden (wie z. B. dem Schweißen oder Nieten) jedoch oft nicht vollständig möglich. Daher ist die Integration neuartiger Technologien zur Verbindung unterschiedlichster Materialien unerlässlich. In diesem Zusammenhang gewinnt die Klebtechnik als Fügeverfahren zunehmend an Bedeutung und bietet zahlreiche Vorteile. So entfallen beispielsweise die Bohrungen, die oftmals für Schrauben- und Nietverbindungen notwendig sind. Zudem ermöglicht die Klebtechnik als wärmearmes Fügeverfahren, verschiedene Werkstoffe zusammenzufügen, ohne deren spezifische Eigenschaften zu beeinträchtigen. Den vielen Vorteilen stehen jedoch erhebliche Vorbehalte gegenüber, welche die großflächige Integration dieser Fügetechnologie in den Produktionsprozess vieler Industriebranchen bisher verhindern.

1.1 Problemstellung

Dem großen Potenzial der Klebtechnik stehen in vielen Anwendungsbereichen fehlende Langzeiterfahrungen, mangelnde Akzeptanz und ein daraus resultierendes Misstrauen gegenüber. Das Vertrauen in eine Technologie ist u. a. neben der technischen Notwendigkeit und dem wirtschaftlichen Vorteil jedoch einer der Hauptgründe für den Einsatz dieser in der Industrie. Fehlendes Vertrauen relativiert die technische Notwendigkeit. Das wirtschaftliche Risiko erscheint zu hoch, wodurch das Fügeverfahren Kleben häufig vernachlässigt wird. Um eine dauerhafte Zuverlässigkeit von Klebverbindungen im Betrieb gewährleisten und Schadensfälle vermeiden zu können, sind neben einer sorgfältigen Planung und Durchführung auch präventive Überwachungs- und Inspektionsmaßnahmen erforderlich. Gemäß der DIN EN ISO 9000 ff. ist das Kleben ein spezieller Prozess. Dies impliziert, dass der Fertigungsprozess nicht vollumfänglich zerstörungsfrei prüfbar ist, da er komplexen Randbedingungen unterliegt und Fertigungsfehler zudem nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Trotz der Bestrebungen, die Klebtechnik für verschiedenste Branchen weiterzuentwickeln, sind praktische Anwendungsfälle in vielen Bereichen eher rar. Dies ist u. a. auf das Fehlen

einheitlicher Richtlinien für klebtechnische Anwendungen zurückzuführen, die festlegen, wie Schäden frühzeitig erkannt und ihre Auswirkungen bewertet werden können. In einigen Industriezweigen, wie z. B. dem Schienenfahrzeugbau, ist das Kleben als Fügeverfahren für sicherheitsrelevante Verbindungen schon langjährig etabliert. Hier existieren bereits Erfahrungen und Richtlinien (z. B. DIN 6701-1:2004-11 und DIN EN 17460:2022-10), die sich auf die Qualitätssicherung klebtechnischer Anwendungen beziehen. Diese thematisieren vor allem den Auslegungs- und Herstellungsprozess, jedoch nicht, wie bei Auftreten von Fehlstellen mit diesen umzugehen ist und welche Auswirkungen zu erwarten sind. Ohne Richtlinien, die bei einem speziellen Prozess Vorgaben über den Umgang mit Imperfektionen und deren Auswirkungen enthalten, wird der großflächige Einsatz der Klebtechnik verhindert. Ein wesentlicher Grund dafür ist das befürchtete Risiko vor erheblichen Sach- und Personenschäden, die durch ein unvorhersehbares Versagen von Klebverbindungen entstehen könnten. Solche Versagensfälle können auf Fehler zurückzuführen sein, die entweder während der Herstellung oder im späteren Betrieb auftreten. Aus diesem Grund wird in vielen Anwendungen weiterhin auf konventionelle Fügeverfahren zurückgegriffen, deren Zuverlässigkeit durch langjährige Erfahrungen abgesichert ist [1] [2] [3] [4, p. 71].

1.2 Zielstellung und Lösungsweg

Um die Anwendung der Klebtechnik zu fördern, muss das Vertrauen in dieses Fügeverfahren gestärkt werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Beitrag zur Entwicklung von Bewertungsgruppen für Imperfektionen in geklebten Aluminiumverbindungen zu leisten. Dafür sind die Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von strukturellen Klebverbindungen durch vergleichende experimentelle und numerische Untersuchungen zu ermitteln. Zur optimalen Vergleichbarkeit der experimentellen Ergebnisse wird ein Standardverfahren (DIN EN 1465:2009-07) hinzugezogen. Zunächst werden charakteristische Fehler klebtechnischer Anwendungen definiert. Anschließend erfolgt eine Verfahrensauswahl zur realitätsnahen Simulation der Schadenstypen in Laborprüfkörpern. Im weiteren Verlauf werden mithilfe der hergestellten Proben experimentelle Untersuchungen sowie numerische Analysen durchgeführt. Dabei werden sowohl fehlerfreie als auch fehlerbehaftete Proben bzw. Modelle berücksichtigt und gegenübergestellt. Im Anschluss daran wird das Schädigungspotenzial der untersuchten Imperfektionen ermittelt, indem ausgewählte mechanische Kennwerte miteinander verglichen und Abminderungsfaktoren berechnet werden.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel wird zunächst auf den grundlegenden Aufbau einer Klebverbindung sowie den Herstellungsprozess eingegangen. Anschließend werden negative Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften einer Klebverbindung, wie z. B. das Einbringen von Fehlstellen und Alterungseinflüsse, detailliert erläutert. Darüber hinaus werden verschiedene klebtechnisch relevante zerstörende Prüfverfahren aufgeführt und ein zusätzliches Messverfahren, mit welchem beispielsweise Verschiebungen der Fügeteile und Klebschichten beim Zugscherversuch erfasst werden können. Weiterhin wird auf die Grundlagen der numerischen Simulation von Klebverbindungen eingegangen. Im Anschluss daran wird der aktuelle Kenntnisstand bezüglich des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen sowie deren Einbringung in die Klebschicht thematisiert. Darüber hinaus werden zerstörungsfreie Prüfungen (zfP) vorgestellt, mit denen charakteristische klebtechnische Imperfektionen detektiert werden können. Abschließend wird der gegenwärtige Stand geltender Normen in Bezug auf den Umgang mit Fehlstellen in gefügten Verbindungen sowohl in der Kleb- als auch in der Schweißtechnik beleuchtet.

2.1 Aufbau einer Klebverbindung

Das Kleben ist ein stoffschlüssiges Verfahren, welches in Anlehnung an die DIN EN 923:2016-03 als das Verbinden von Fügeteilen mithilfe eines Klebstoffs definiert wird. Ein Klebstoff ist ein „[…] nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt“. Der beim Klebprozess entstehende Verbund aus Fügeteilen und Klebstoff ist auf Abbildung 1 dargestellt [5, pp. 5, 28].

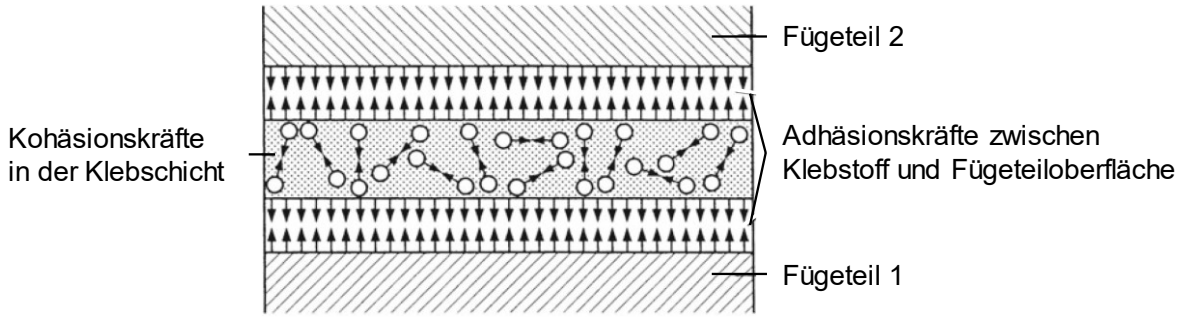


Abbildung 1: Aufbau eines Klebverbunds [6, p. 60]

Die in der Klebschicht vorliegenden Kohäsionskräfte wirken zwischen den Polymerketten, welche je nach Klebstoffsystem bereits beim Auftrag vorliegen (physikalisch abbindende Klebstoffe) oder sich in einem chemischen Prozess während der Aushärtung bilden (chemisch härtende Klebstoffe). Die Kohäsionskräfte beruhen vorwiegend auf chemischen Bindungen. Anteilig wirken zudem physikalische Wechselwirkungen und mechanische Verschlaufungen zwischen den Polymerketten. Der in dieser Arbeit verwendete Klebstoff zählt zu den chemisch härtenden Klebstoffen und bildet ein sehr engmaschiges Netz aus Polymerketten mit vielen chemischen Bindungen. Die Adhäsionskräfte ergeben sich größtenteils aus den physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Polymerketten im Klebstoff und der Fügeteiloberfläche. In seltenen Fällen können zusätzlich chemische Bindungen (z. B. bei Klebstoff-Kunststoff-Verbindungen, die einen ähnlichen chemischen Aufbau haben) und mechanische Verklammerungen (hauptsächlich bei porösen Materialien) auftreten. Bei Belastung mit einer Kraft sorgt beispielsweise die Gesamtheit der Kohäsions- und Adhäsionskräfte dafür, dass der Verbund einen Widerstand gegen die vorliegende Beanspruchung leistet. Sobald der Betrag der angreifenden Kraft zu groß wird, versagt der Verbund im Bereich des schwächsten Glieds und wird zerstört. Das Versagen kann zum einen in der Kohäsionszone des Klebstoffs bzw. des Fügeteils und zum anderen in der Adhäsionszone zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche auftreten [6, pp. 55-57, 59-60, 126].

2.2 Morphologie der Klebschicht

Im Allgemeinen wird die Klebschicht bei makroskopischer Betrachtung als homogen in ihrer Struktur und isotrop in ihren Eigenschaften angesehen. Auf mikroskopischer Ebene wird jedoch deutlich, dass sich die Klebstoffstruktur im Bereich der Kontaktflächen zwischen Klebstoff und Fügeteil anders ausbildet als in der Mitte der Klebschicht. Letztere wird neben der generellen chemischen Zusammensetzung der Klebstoffbestandteile vorwiegend von den Randbedingungen beim Aushärte- bzw. Abbindeprozess (Zeit, Temperatur, Druck) beeinflusst. In der Nähe der Fügeteiloberfläche kommen neben den genannten Faktoren noch weitere hinzu. Hier hängt die Morphologie der Klebschicht u. a. von der Oberflächenbeschaffenheit des benetzten Fügeteils ab. Die Polymersegmente, aus denen der Klebstoff besteht, orientieren sich tendenziell parallel zu diesem als Grenzschicht definierten Bereich, weshalb dort eine Verdichtung der Phasengrenze stattfindet. Zudem diffundieren kleine Makromoleküle schneller an die Grenzschicht als große, da sie eine höhere translatorische Beweglichkeit besitzen.

Dies hat zur Folge, dass bestimmte Polymeranteile beispielsweise einer Komponente von zweikomponentigen Klebstoffen zur Anreicherung an der Grenzschicht tendieren, woraufhin eine ungleiche Verteilung der Moleküle entsteht. Kleine Moleküle haben das Bestreben, nur an einer Stelle eine Bindung mit der Fügeteiloberfläche aufzubauen (solche Strukturen werden auch als *mushroom* oder *brush* bezeichnet), wohingegen große Moleküle oder Molekülketten Wechselwirkungen über größere Bereiche der Grenzschicht aufbauen können (auch als *pancake* bezeichnet). Im Speziellen können dann, abhängig vom Fügeteilwerkstoff, über mehrere Reaktionsschritte auch Bindungen z. B. mit Oxiden eines Metallfügeteils eingegangen werden. Die an diese Oxidstruktur gebundenen Moleküle können sich dann nicht mehr an der Reaktion zur Aushärtung des Klebstoffs beteiligen. Dies hat z. B. zur Folge, dass Strukturen, die als Schnittstelle zur eigentlichen Molekülstruktur fungieren sollen, nun nicht mehr vorliegen oder korrekt ausgebildet werden können. Die Summe der beschriebenen Gegebenheiten führt letztendlich dazu, dass die Polymerstruktur in Grenzschichtnähe oftmals gestört ist, woraus Bereiche verminderter Festigkeitseigenschaften (auch als *weak boundary layer* bezeichnet) resultieren. Dies führt zu Grenzschichten, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften, wie z. B. der Glasübergangstemperatur, dem Kriechverhalten oder der Dichte, von der restlichen Klebschicht unterscheiden. Durch die unterschiedlichen Strukturen innerhalb des Verbunds unterscheidet sich auch das Verformungsverhalten dieser Bereiche grundlegend, wodurch u. a. Zugspannungen entstehen können, die ohne äußere Belastungen Schädigungsprozesse in der Klebschicht auslösen. Aus diesem Grund stellt der Übergang zwischen diesen Strukturtypen oftmals eine Schwachstelle bei Belastung dar, weshalb Schädigungsvorgänge zumeist an der Grenzfläche entstehen und somit zu einem verfrühten Versagen des Klebverbunds im Betrieb führen können [7, pp. 293-294, 325-331, 578-581] [8] [9, pp. 80-86] [10, pp. 7507-7514] [11, pp. 1-7].

2.3 Fertigung von Klebverbindungen und Fehlerpotenziale

Nach der DIN EN ISO 9000:2015-11 ff. ist das Kleben ein *spezieller Prozess*, für den hohe Qualitätsstandards bei der Herstellung gelten. Dazu gehören u. a. kontrollierte Umgebungsbedingungen und die Vermeidung klebtechnisch relevanter Kontaminationen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind speziell für diese Aufgaben geschultes Personal und definierte Bedingungen am Klebarbeitsplatz notwendig [1]. In der Literatur wird in der Regel über Klebverbindungen berichtet, die unter idealen

Laborbedingungen hergestellt werden, wobei größte Sorgfalt auf die Einhaltung von Qualitätssicherungsmaßnahmen gelegt wird. Doch selbst diese strengen Bedingungen verhindern nicht, dass nahezu bei jedem Prozessschritt in der Herstellung Imperfektionen in das Endprodukt eingebracht werden können. Eine Auswahl an möglichen Prozessschritten, in denen Fehler in die Klebverbindung eingebracht werden können, ist auf Abbildung 2 dargestellt.

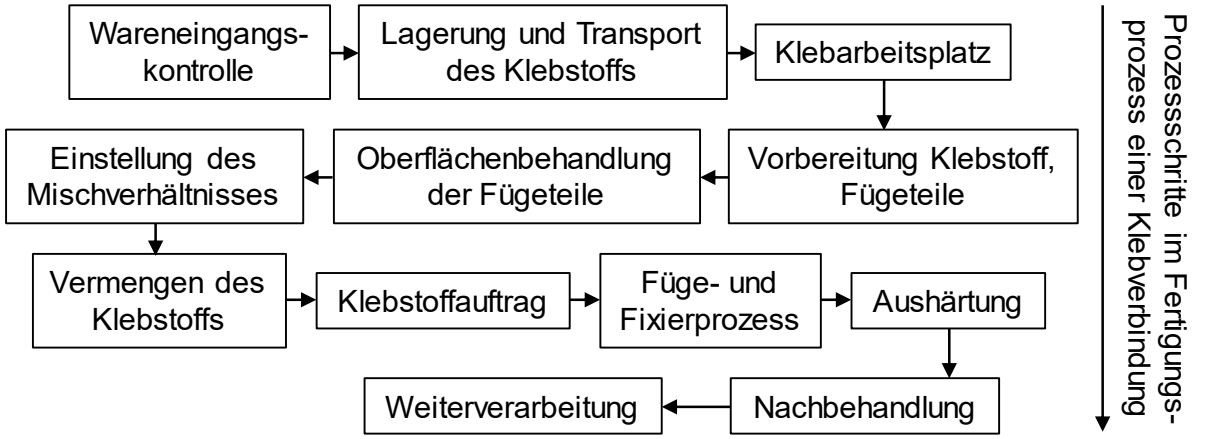


Abbildung 2: Auswahl an Prozessschritten bei der Fertigung von Klebverbindung

Abweichungen in den Prozessschritten können Imperfektionen einbringen oder hervorrufen und resultierend die mechanischen Eigenschaften einer Klebverbindung verändern, was zu einem frühzeitigen Versagen des Verbunds führen kann. Die Kritikalität der Fehlstellen ist von der Art, Größe und Lage des Defekts sowie der aufgebrachten Belastung abhängig. In der Literatur werden für Klebstoffe charakteristische Imperfektionen häufig in folgende grundlegende generische Schadensformen klassifiziert, welche schematisch auf Abbildung 3 dargestellt sind [12, pp. 78-80] [13, pp. 1175-1178] [14, p. 3] [15, pp. 93-94] [16, p. 92] [17, p. 4]:

- **Adhäsionsfehler** stellen eine Störung der Anbindung zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche dar, wodurch die Haftung an mindestens einem Teil der Klebfläche nur eingeschränkt oder gar nicht gegeben ist. Die Scherfestigkeit der Verbindung entspricht maximal 20 % in diesen Bereichen. Idealisiert betrachtet sind diese Imperfektionen nahezu unendlich dünn und werden in der Fachliteratur als sogenannte *Kissing Bonds* bezeichnet [15, pp. 93-94] [18, pp. 4-5] [19, pp. 1-4] [20, p. 212] [21, p. 2].
- **Kohäsionsfehler** repräsentieren Inhomogenitäten innerhalb der Klebschicht. Die Ursachen dieser Schadensform können beispielsweise feste, flüssige oder

gasförmige Einschlüsse in der Klebschicht umfassen, ebenso wie partiell nicht ausgehärteter Klebstoff, der im Vergleich zum umgebenden Klebstoff abweichende mechanische Kennwerte aufweist. Darüber hinaus können hohe Temperaturen (bei Polymeren üblicherweise ≥ 250 °C [6, p. 20]) zur thermischen Spaltung der Molekülstrukturen führen. Solche Inhomogenitäten übertragen in der Regel keine bzw. nur geringfügig Lasten, wodurch die Kohäsion des Klebstoffs beeinträchtigt wird [7, pp. 292, 684] [15, pp. 93-94] [17, p. 4].

- Bei einer **Fehlbildung der Klebfugengeometrie** weicht die erzeugte Fugen- von der Sollgeometrie ab. Dies kann sich in Form von zu dicken, zu dünnen oder ungleichmäßigen Klebschichten abzeichnen. Weichen die Fügepartner im Bereich der konstruktiv vorgegebenen Geometrie voneinander ab, können kleinere Klebflächen aufgrund kürzerer Überlappungslängen oder Klebschichtbreiten entstehen. Weiterhin verkürzen sich die intermolekularen Abstände zwischen den Monomeren während der Vernetzung bei Polymeren, woraus sich ein Volumenschwund ergibt, welcher insbesondere in den Randbereichen durch Geometrieabweichungen sichtbar werden kann. Bei speziellen Aushärtereaktionen, wie z. B. bei Polyurethanklebstoffen, entsteht ein Gas, welches zu einer Volumenzunahme führen kann. Da Klebverbindungen entsprechend ihrer Beanspruchung ausgelegt werden, kann eine Abweichung der Klebfugengeometrie dazu führen, dass die geforderten mechanischen Kennwerte nicht eingehalten werden [6, p. 42] [7, p. 367] [17, p. 4] [20, p. 206] [22, p. 3].

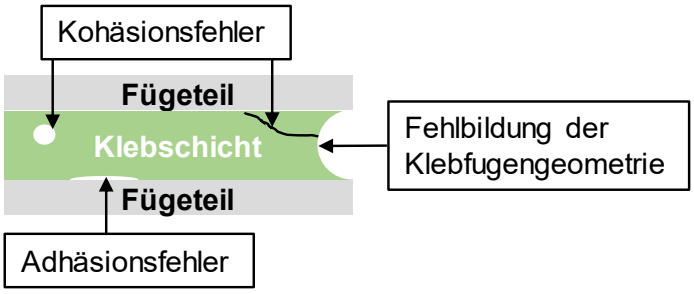


Abbildung 3: Generische Schadensformen in Klebverbindungen

Nachfolgend werden ausgewählte Prozessschritte näher beleuchtet, welche zu den vorgestellten und später in dieser Arbeit untersuchten Imperfektionen führen können.

2.3.1 Oberflächenbehandlung der Fügeteile

Um den Aufbau von Adhäsionskräften zwischen Fügeteil und Klebstoff zu ermöglichen, ist eine saubere, fettfreie und trockene Oberfläche erforderlich. Abhängig von der Art der Verschmutzung und den Anforderungen an die Klebverbindung ist eine Aneinanderreihung verschiedener Oberflächenbehandlungsverfahren notwendig. Zunächst müssen sowohl Fügeteile als auch Klebstoff klimatisiert werden, um die Bildung von Kondenswasser zu verhindern. Weiterhin müssen grundlegende Verunreinigungen, wie z. B. Staub, Öle oder Fette, mithilfe geeigneter Reinigungs- oder Lösungsmittel entfernt werden. Letztere müssen anschließend vollständig ablüften, bevor der Klebprozess starten kann. Befinden sich beim Klebstoffauftrag noch Reste der genannten Verunreinigungen oder Reinigungs- bzw. Lösemittel auf der Fügeteiloberfläche, kann dieser das Fügeteil nicht vollständig benetzen. Resultierend entstehen Bereiche, in denen zum einen die Adhäsion gestört bzw. nicht vorhanden ist und zum anderen Kohäsionsfehler in Form von Hohlräumen auftreten, falls diese sich noch in größeren Mengen auf der Oberfläche befinden. Gleiches gilt für den Einsatz von Haftvermittlern, welche häufig zu großen Teilen mit Lösemitteln angereichert sind, weshalb die notwendige Ablüftzeit unbedingt einzuhalten ist. Nach der Reinigung kann die Fügeteiloberfläche zusätzlich mit mechanischen, chemischen oder physikalischen Verfahren vorbehandelt werden, um Fremdschichten, wie beispielsweise Oxidschichten bei Metallen, zu entfernen. Nach der Bearbeitung ist möglichst schnell mit dem Klebprozess fortzufahren, um eine Neubildung der Fremdschichten zu beschränken. Sind diese undefiniert oder zu groß, können Adhäsionsfehler oder ein frühes Versagen innerhalb der Fremdschicht bzw. zwischen Grundmaterial und Fremdschicht die Folge sein. Des Weiteren dienen verschiedene Oberflächenbehandlungen der Erhöhung der Oberflächenspannung. Diese muss größer sein als die des eingesetzten Klebstoffsystems, um eine gute Benetzung gewährleisten zu können. Dies stellt eine notwendige Voraussetzung für die Ausbildung von Adhäsionskräften dar, weshalb ein fehlerhaftes Verhältnis der Oberflächenspannungen umgehend zu Adhäsionsstörungen führt. Da im Rahmen dieser Arbeit Aluminiumfügeteile verklebt werden, wird nachfolgend im Speziellen auf die Besonderheiten der Oberflächenbehandlung von Aluminium eingegangen [15, pp. 93-94] [18, pp. 4-5] [19, pp. 1-4] [20, p. 212] [21, p. 2].

Oberflächenbehandlung von Aluminium

Aluminium ist aufgrund seiner geringen Dichte, den anhand vielfältiger Legierungen umfangreich einstellbaren mechanischen Eigenschaften sowie guter Korrosionsbeständigkeit in Klebanwendungen weit verbreitet. Vor allem im Luftfahrt- und Automobilbau, wo der Einsatz von Aluminium Gewichtsreduzierungen und Energieeinsparungen vorangetrieben hat, kommt dieses Material häufig zum Einsatz. Für das erfolgreiche Kleben insbesondere von Aluminium und -legierungen ist eine entsprechende Oberflächenvorbehandlung jedoch zwingende Voraussetzung. Durch die Reaktion mit Sauerstoff und Wasserdampf aus der Luft bildet dieses Metall eine natürliche sauerstoffhaltige Oxid-, Hydroxid- oder Carbonatschicht aus, welche im Vergleich zu anderen Metalloxiden sehr stark an der Oberfläche haftet und den Grundwerkstoff schützt. Abhängig von den Umgebungsbedingungen können diese Strukturen verschiedene morphologische Zustände und Dicken im nm- bis µm-Bereich annehmen. Eine schematische Darstellung einer Aluminiumoxid-Struktur ist auf Abbildung 4 dargestellt. Die verschiedenen Gefüge haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Festigkeit der Klebverbindung, da zum einen die faserige Struktur einen gleichförmigen Steifigkeitsübergang zwischen Oxidschicht und Polymermatrix bewirken kann und die Oxidstruktur zum anderen die reale Klebfläche zwischen Oxid und Klebstoff erhöht, insofern dieser die volle Oberfläche benetzen kann [7, pp. 384, 626-629] [23, pp. 283-286].

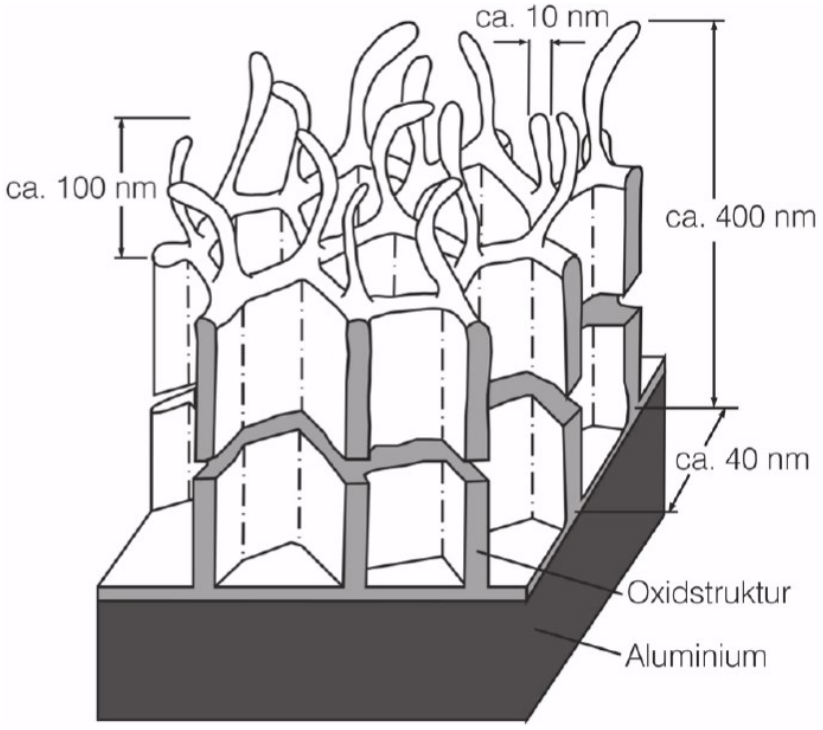


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Aluminiumoxid-Struktur [23, p. 286]

Da nach der Herstellung normalerweise eine mit Trennmitteln aus der Bearbeitung kontaminierte und damit für den Aufbau von Wechselwirkungen sehr träge Oxidschicht vorliegt, ist eine Oberflächenbehandlung erforderlich. Des Weiteren entstehen, abhängig von den Umgebungsbedingungen, zusätzliche Deckschichten auf der Aluminiumoxidschicht. Durch hohe Luftfeuchtigkeit und dem Vorhandensein von Kohlenstoff- sowie Schwefeldioxid in der Atmosphäre kann sich beispielsweise Aluminiumhydroxid bilden und in die Aluminiumoberfläche mit eingebaut werden. Dieses ist zum einen wenig reaktionsfähig mit z. B. Klebstoffen und kann zum anderen eine Schwachstelle in der Struktur darstellen, was zu einer beschleunigten Alterung führen kann. Oberflächenvorbehandlungsverfahren bei Aluminium haben daher vor allem zum Ziel, durch beispielsweise Abrasion wenig reaktionsfähiger Oxidschichten frische und damit chemisch aktive Oberflächen zu generieren. Je höher die Anforderungen an die Klebverbindung im Einsatz sind, desto aufwändiger sind die aufzuwendenden Vorbehandlungsmethoden. Grundlegend werden mechanische Verfahren, wie z. B. Schleifen oder Strahlen, oder chemische Verfahren, wie z. B. Beizen oder Anodisieren, für klebtechnische Anwendungen empfohlen. Bei letzterem werden im Allgemeinen Laugen (Natriumhydroxid) oder Säuren (Phosphor-, Schwefelsäure), deren pH-Werte außerhalb des thermodynamisch stabilen Bereichs des Aluminiumoxids von ca. 4…8 liegen, verwendet. Die chemischen haben gegenüber den mechanischen Verfahren den Vorteil, dass sich durch entsprechende Zusätze eine Konversionsschicht auf der Oberfläche bilden kann, die verbesserte mechanische Eigenschaften und höhere Beständigkeit aufweist. Darüber hinaus werden die Fügeteiloberflächen nicht durch Mikrorisse geschädigt, weshalb chemische Methoden auch bei dünnen Fügeteilen eingesetzt werden können, welche z. B. beim Strahlen verformt würden. Aktuell werden aufwendige Vorbehandlungsverfahren mit chemischen und elektrochemischen Verfahren nahezu ausschließlich bei Klebanwendungen mit sehr hohen Anforderungen, wie z. B. in der Luft- und Raumfahrt, durchgeführt. Die Quellen [7], [23] sowie die DIN EN 13887:2003-11 empfehlen für klebtechnische Anwendungen in Bereichen außerhalb der Luftfahrt eine Verbindung aus Strahlen sowie vorheriger und nachträglicher Entfettung, um sehr gute Voraussetzungen zu schaffen. Darüber hinaus ist bei Bedarf der Einsatz von Primern genannt [7, pp. 554-556, 630] [23, pp. 283-286, 297-299] [24, pp. 12-19].

2.3.2 Einstellung des Mischungsverhältnisses und Vermengen des Klebstoffs

Um bei einem zweikomponentigen Klebstoffsystem die gewünschte Härtungsreaktion hervorzurufen, ist das vorgegebene Mischungsverhältnis insbesondere bei Polyadditions- und Polykondensationsklebstoffen exakt einzuhalten. Dieses richtet sich nach definierten Gewichts- oder Volumeneinheiten der beiden Reaktionspartner. Bei Abweichungen dieses stöchiometrischen Verhältnisses können Anteile von Monomeren der jeweiligen überdosierten Komponente nicht an der Härtereaktion teilnehmen. Mit steigender Abweichung vom vorgegebenen Mischungsverhältnis sinkt daher die Kohäsion der Klebschicht, da sich die Eigenschaften des ausgehärteten Klebstoffs im Wesentlichen aus den beteiligten Reaktionspartnern erschließen. Darüber hinaus besteht beim Vermengen des Klebstoffs die Gefahr, dass Luftblasen eingemischt werden und bis zum anschließenden Klebstoffauftrag im Gemisch enthalten bleiben. Dies tritt insbesondere bei höherviskosen Komponenten auf, die mit einem dynamischen Mischsystem vermengt werden. Durch die Rotation des Mischers kommt es zu Kavitation, wobei gasgefüllte Hohlräume in schnell strömenden Fluiden entstehen. Je höher die Rotationsgeschwindigkeit ist, desto geringer ist der statische Druck der Flüssigkeit. Unterschreitet der statische Druck den Verdampfungsdruck der Flüssigkeit, bilden sich Dampfblasen, die als Kohäsionsfehler in der Klebschicht bleiben [7, pp. 292, 684] [15, pp. 93-94] [17, p. 4].

2.3.3 Klebstoffauftrag

Wird ein statisches Mischrohr zur Vermengung von mehrkomponentigen Klebstoffsystemen verwendet, ist darauf zu achten, die erste Länge des Mischrohrs vollständig zu verwerfen. Erst danach kann gewährleistet werden, dass die Komponenten des Klebstoffs sich korrekt vermengen und keine Kohäsionsfehler entstehen. Zudem sind während des Klebstoffauftrags die Umwelteinflüsse auf das verwendete System zu berücksichtigen. Der Auftrag sollte innerhalb eines möglichst kurzen Zeitraums erfolgen, da sich verändernde Umgebungsparameter negativ auf die Homogenität der Klebschichteigenschaften auswirken und somit die Qualität der Klebverbindung beeinträchtigen können. Besonders die Luftfeuchtigkeit stellt eine erhebliche Fehlerquelle dar. Bei einer zu hohen Feuchtigkeitskonzentration ist einerseits die Kondensatbildung auf der Fügeteiloberfläche und andererseits bei bestimmten Klebstoffen, wie z. B. Cyanacrylaten, eine Blitzaushärtung möglich, die sowohl eine intensive Wärmeentwicklung als auch die Bildung von Mikrorissen zur Folge haben kann. Zudem ist auf eine saubere

Umgebung in unmittelbarer Nähe der Klebarbeiten zu achten, da Staubpartikel oder andere Fremdkörper in der Klebschicht in Form von Kohäsionsfehlern die Festigkeit des Klebverbunds schwächen. Weiterhin ist es ratsam, den Klebstoffauftrag in einem kontinuierlichen Arbeitsgang durchzuführen. Ein Wiederansetzen beim Auftragen des Klebstoffs sowie nebeneinander abgelegte Klebstoffraupen können zu kleinen Lücken oder Kerben bzw. generell zu Lufteinschlüssen führen, die sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung auswirken können [7, pp. 292, 684] [15, pp. 93-94] [17, p. 4].

2.3.4 Füge- und Fixierprozess

Sobald das Fügeteil auf dem Klebstoff positioniert wurde, sollte es nicht mehr von der Klebschicht gelöst oder erneut aufgesetzt werden, um beispielsweise eine Korrektur der Ausrichtung vorzunehmen. Diese Vorgehensweise würde zur Zerstörung der bereits etablierten adhäsiven und kohäsiven Bindungen führen und somit die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung beeinträchtigen, da Adhäsions- und Kohäsionsfehler entstehen können. Darüber hinaus ist während des Aushärtungsprozesses sicherzustellen, dass nach dem Fügen keine Relativbewegung der Bauteile zueinander erfolgen kann. Daher ist es erforderlich, die Fügeteile zu fixieren. Das Fixieren erfolgt in der Regel durch Anwendung von Druck auf die beiden Fügeteile. Dabei ist sicherzustellen, dass die Klebfläche gleichmäßig belastet wird, um eine homogene Klebschichtgeometrie zu gewährleisten und ein Verrutschen zu verhindern. Weiterhin kann ein unsachgemäßes Abziehen der Klebfuge mit beispielsweise einem Spatel zu unerwünschten Einschnürungen im Randbereich der Klebverbindung führen [17, p. 4] [20, p. 206] [22, p. 3].

Neben herstellungsbedingt eingebrachten Imperfektionen können auch im Betrieb Fehlstellen entstehen oder sich vergrößern, wodurch die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung beeinträchtigt werden. Dies wird nachfolgend näher beleuchtet.

2.4 Alterung von Kunststoffen

Auf die Klebverbindung wirken sowohl bei der Fertigung als auch im Betrieb verschiedene Beanspruchungen, welche den Klebstoff altern lassen. Die Alterung von Kunststoffen fasst alle über den Lebenszeitraum einer Klebverbindung irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge zusammen. Diese können alle Bereiche einer Klebverbindung (Adhäsions-, Kohäsionszone und Fügeteile) betreffen und

damit die Eigenschaften dieser grundlegend verändern. Folgen einer Alterung sind z. B. Abnahme der Festigkeit, Änderung des Verformungsverhaltens oder der optischen Eigenschaften. Eine Alterung wird durch verschiedene Beanspruchungsarten hervorgerufen, welche sich im Wesentlichen in mechanische Einflüsse und Einflüsse aus der Umgebung unterteilen lassen (vgl. Abbildung 5) [7, pp. 378-402].

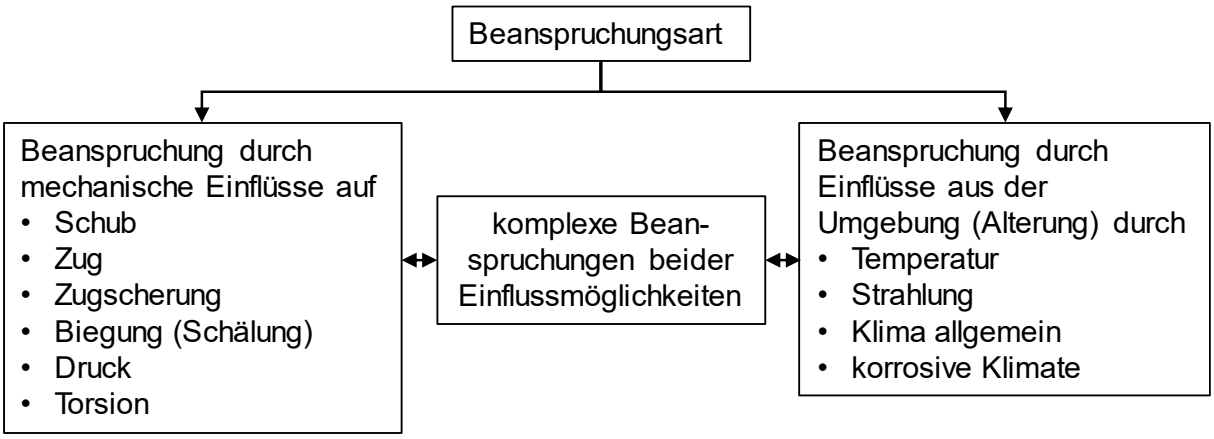


Abbildung 5: Einteilung der Beanspruchungsarten für Kunststoffalterung [7, p. 379]

Beim Einfluss mechanischer Beanspruchungen verursachen bestimmte Spannungs- und/ oder Dehnungswerte irreversible Prozesse, wie z. B. Kriechen, Rissbildung oder -wachstum, innerhalb der Klebschicht. Der Zeitraum, über welchen diese auf die Klebverbindung wirken, sowie das Vorhandensein von Imperfektionen aus vorherigen Prozessschritten beeinflussen den Grad der Schädigung zusätzlich. Vor allem kleine Fehlstellen werden bei anhaltender mechanischer Beanspruchung schnell größer und können so zum Versagen der Klebverbindung führen [7, pp. 378-380].

Zu den Einflüssen aus der Umgebung zählen Temperaturunterschiede oder das Einwirken von Medien wie beispielsweise Wasser. Durch den Kontakt mit Medien aus der Luft oder Umgebung, hauptsächlich Flüssigkeiten oder Gase, können Klebverbindungen geschädigt werden. Die Diffusion von Feuchtigkeit in die Klebfuge stellt dabei den kritischsten Schädigungsmechanismus dar. In der Kohäsionszone können die Wassermoleküle intermolekulare Wechselwirkungen schwächen oder durch Quellvorgänge Hohlräume hervorrufen, wodurch das Medium innerhalb des Hohlraums verbleibt oder ein Lunker entsteht. Beides führt u. a. zur Herabsetzung der Steifigkeit und Festigkeit, ist häufig jedoch durch eine Rücktrocknung reversibel. Darüber hinaus kann die Spaltung von chemischen Bindungen, auch Hydrolyse genannt, zu irreversiblen Schäden führen. In der Adhäsionszone führt die Diffusion von Wassermolekülen eben-

falls zur Hydrolyse von chemischen Bindungen und schwächt bzw. schädigt intermolekulare Wechselwirkungen. Letzteres ist in der Regel ebenfalls irreversibel in diesem Bereich der Klebverbindung. Die Wirkungsweise ist zudem stark vom morphologischen Aufbau der Klebschicht im Grenzbereich abhängig (vgl. Abschnitt 2.2). Bei geklebten Metallverbindungen erfahren die durch die Metalloberfläche orientierten Strukturen der Grenzschicht eine schnellere Feuchtigkeitsdurchdringung als der Polymeraufbau in der Mitte der Klebschicht. Abhängig vom Fügeteilmaterial kann es zudem zu einer Destabilisierung oder Umwandlung der Metalloxidschichten oder zu Korrosion kommen, was die Adhäsionszone ebenfalls irreversibel schädigt und zum Versagen der Klebverbindung führen kann [7, pp. 271-280, 380-389].

Durch die Überlagerung von mehreren Alterungseinflüssen erhöht sich das Schädigungspotenzial, da mitunter mehrere Prozesse parallel ablaufen. Bei mechanischer Beanspruchung und Medieneinfluss verändert sich aufgrund der Fügeteil- und Klebschichtverformung beispielsweise das Eindiffundieren von Wassermolekülen in den Klebstoff. Die durch das Eindringen von Feuchtigkeit hervorgerufenen Alterungsprozesse laufen somit schneller ab und führen demnach früher zu Eigenschaftsveränderungen der Klebverbindung. Darüber hinaus können auch Temperaturunterschiede dazu führen, dass Alterungsprozesse anders ablaufen. Neben der verminderten Kohäsion führen erhöhte Temperaturen ebenfalls zur Beschleunigung von Diffusionsprozessen oder ermöglichen chemische Reaktionen, die ohne eine Temperaturerhöhung nicht ablaufen würden. Tiefe Temperaturen schränken hingegen das Verformungsverhalten ein und können beispielsweise zu Versprödung führen [7, pp. 378-380].

Die beschriebenen Gegebenheiten führen dazu, dass eine Degradation der mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen, hervorgerufen durch einerseits im Herstellungsprozess eingebrachte oder im Betrieb entstehende Imperfektionen und andererseits Alterungseinflüsse, unvermeidbar ist. Um die Auswirkungen der vorgestellten Fehlstellen und Alterungseinflüsse auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen beurteilen zu können, sind zerstörende Prüfungen notwendig, welche im nächsten Abschnitt thematisiert werden.

2.5 Zerstörende Prüfung von Klebverbindungen

Die zerstörenden Prüfverfahren zählen zu den aufschlussreichsten Versuchen, um die mechanischen Eigenschaften einer Klebverbindung zu ermitteln. Diese gliedern sich

grundlegend in statische und zyklische Verfahren auf. Eine Übersicht zu Standardprüfverfahren von Klebverbindungen in Abhängigkeit der Belastungsart ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter zerstörender Prüfverfahren für Klebverbindungen

Zugversuche	DIN EN ISO 527-1:2019-12	Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze
	DIN EN 15870:2009-08	Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen
Scherversuche	DIN 54455:2016-09	Prüfung von Metallklebestoffen und Metallklebungen - Torsionsscher-Versuch
	DIN EN 1465:2009-07	Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen
	DIN EN 14869-1:2011-07	Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder
	DIN EN 14869-2:2011-07	Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeteile
	DIN EN ISO 9664:1995-08	Klebstoffe - Verfahren zur Prüfung der Ermüdungseigenschaften von Strukturklebungen bei Zugscherbeanspruchung
Schälversuche	DIN EN 1464:2010-06	Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen - Rollenschälversuch
	DIN EN 28510-1:2014-07	Klebstoffe - Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben - Teil 1: 90°-Schälversuch
	ISO 11339:2022-02	Klebstoffe - T-Schälprüfung für geklebte Verbindungen aus flexiblen Fügeteilen

Um Klebverbindungen optimal ausnutzen zu können, wird die Klebschicht in Strukturen bevorzugt auf Schub belastet. Der Zugscherversuch nach DIN EN 1465:2009-07 ist ein weit verbreitetes Standardverfahren. Mit diesem kann die Verbundfestigkeit von Klebverbindungen bei Schubbelastung beurteilt werden, welche u. a. von der gewählten Materialkombination und Oberflächenbehandlung abhängig ist. Aus diesem Grund eignet sich dieses zerstörende Prüfverfahren, um im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen von Fehlstellen in Klebverbindungen auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen, weshalb dieser nachfolgend näher vorgestellt wird [6, p. 142].

2.5.1 Theoretische Grundlagen des Zugscherversuchs

Beim Zugscherversuch nach DIN EN 1465:2009-07 werden zwei Fügeteile (je 100 mm x 25 mm x 1,6 mm, Aluminium) überlappend miteinander verklebt. Eine schematische Darstellung einer Zugscherprobe nach DIN EN 1465:2009-07 ist auf Abbildung 6 dargestellt. Laut Norm ist eine Klebschicht von 25 mm x 12,5 mm mit einer an die Anwendung angepassten Klebschichtdicke zu verwenden. Der asymmetrische Aufbau der Versuchskörper führt während steigender Belastung neben Schubspannungen τ zu einem Biegemoment M_b, welches aufgrund senkrecht zur Klebfläche auftretender Normalspannungen σ entsteht [7, pp. 417-419] [25, pp. 6,8].

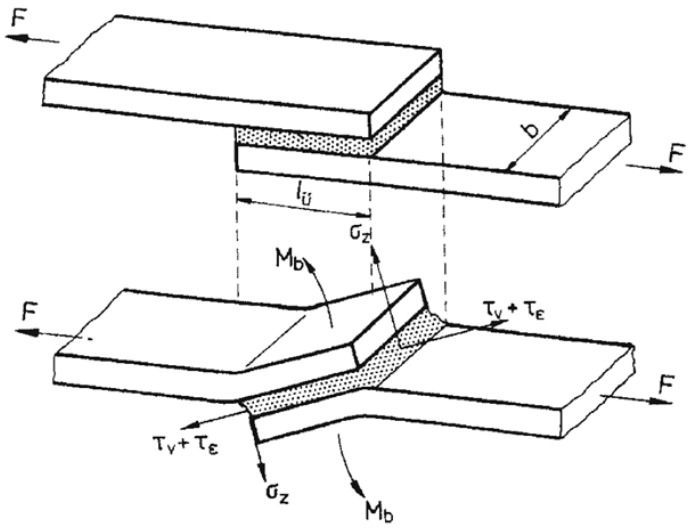


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer Zugscherprobe nach DIN EN 1465:2009-07 und auftretende Spannungen und Momente während einer Belastung [6, p. 123]

Im Gegensatz zu den in diesem Versuch unerwünschten Normalspannungen σ, welche lediglich in einem kleinen Bereich der Klebfläche wirken, werden Schubspannungen τ bei Klebverbindungen bevorzugt. Die auftretenden Normalspannungen führen zu einer komplexen und ungleichmäßigen Spannungsverteilung in der Klebfuge. Mit steigendem Betrag der aufgebrachten Kraft addieren sich die unterschiedlichen Spannungsarten. Ihren maximalen Wert τ_{max}, welcher bei Kohäsionsversagen einen Materialparameter des Klebstoffs darstellt, erreicht die Probe im Bereich der Überlappungsenden. Die Spannungsspitzen an den Überlappungsenden treten auf, da sich die Fügeteile unterschiedlich stark längen, was durch die Klebschicht ausgeglichen wird. Des Weiteren sorgen die auftretenden Biegemomente, welche mit steigender Klebschichtdicke zunehmen, für weitere Normalspannungen an den Überlappungsenden. Wird τ_{max} in der Klebschicht überschritten, kommt es zum Kohäsionsversagen. Eine belastete Probe ist auf Abbildung 7 dargestellt [7, pp. 413-428] [26, p. 12].

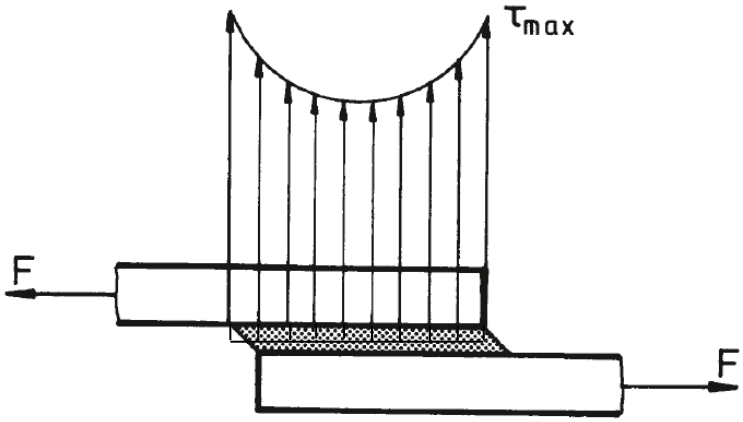


Abbildung 7: Spannungsverlauf in der Klebschicht beim Zugscherversuch [7, p. 424]

Die Schubspannungen τ erreichen bei einer *idealen* Zugscherprobe ihr Maximum in der Mitte der Klebschichtdicke, woraufhin dort ein kohäsives Versagen auftreten und der entstehende Riss entlang der Klebschichtmitte weiterverlaufen würde. Ein idealer Schubspannungsverlauf im Randbereich einer belasteten Klebschicht ist auf Abbildung 8 illustriert. Geringfügige Unterschiede im Klebverbund, wie beispielsweise variierende Übergangsradien, inhomogene Strukturen oder abweichende Geometrien der Fügeteile, aber auch der asymmetrische Aufbau der einseitigen Überlappungsproben nach DIN EN 1465:2009-07 können den Bereich der maximalen Schubspannung verschieben und somit den Initiationspunkt von Rissen beeinflussen [7, pp. 413-428].

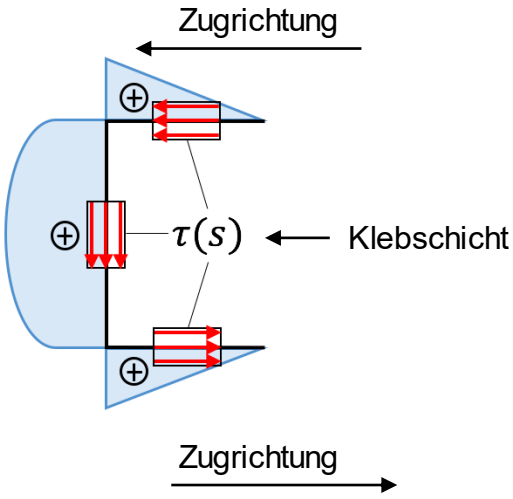


Abbildung 8: Schubspannungsverlauf beim Zugscherversuch in der Klebschicht [27]

Mithilfe der beim Zugscherversuch aufgenommenen Daten kann anschließend ein Kraft-Weg-Diagramm abgeleitet werden. Dies ermöglicht die Berechnung der Festigkeit des Klebverbunds $\tau_{Verbund}$, mit dessen Hilfe Klebstoffe charakterisiert und miteinander verglichen werden können (vgl. Formel 1).

Formel 1: Berechnung der Verbundfestigkeit

$$\tau_{Verbund} = \frac{F_{max}}{A}$$

Legende: F_{max} Maximalkraft in N

A Klebfläche in mm²

Um zusätzliche Informationen beim Zugscherversuch zu generieren, kann ergänzende Messtechnik hinzugezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist es sinnvoll, insbesondere die Verformungen und Dehnungen der Klebschicht exakt bestimmen zu können, um einerseits die Auswirkungen von Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung genauer bestimmen und andererseits diese mit Werten aus numerischen Berechnungen vergleichen zu können. Eine Möglichkeit, um die Werkstoffverformung während der zerstörenden Prüfung zu bestimmen, ist die digitale Bildkorrelation (DIC), die im Nachfolgenden näher beschrieben wird.

2.5.2 Digitale Bildkorrelation

Bei der DIC wird auf ausgewählte Probekörper ein Specklemuster aufgebracht, bestehend aus einem weißen Hintergrund mit kleinen schwarzen Sprenkeln. In dieser Arbeit wird das Messystem *ARAMIS 3D Camera 6M* der Firma *GOM* zur DIC verwendet. Das Messsystem für die Material- und Bauteilprüfung erstellt Bildserien mit einer Aufnahmefrequenz von bis zu 130 Hz während der zerstörenden Prüfungen, mithilfe derer das Bauteilverhalten detaillierter beurteilt werden kann. Die zu untersuchenden Prüfkörper werden zusätzlich mit blauem Licht beleuchtet, wodurch Störungen durch Tageslicht und andere externe Einflüsse bei der Bildaufnahme minimiert werden. Zunächst wird der unbelastete Zustand der Probe erfasst (Referenzaufnahme). Mit diesem können über softwarebasierte Algorithmen die Folgebilder analysiert und Unterschiede in der Position des Specklemusters ermittelt werden, was beispielhaft auf Abbildung 9 zu sehen ist. Über den Abgleich mit der Referenzaufnahme können so u. a. die Verformungen und Dehnungen berechnet werden [28] [29, p. 29].

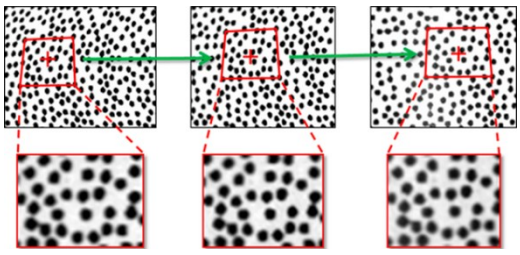


Abbildung 9: Anwendung der DIC bei der Verfolgung eines Specklemusters einer belasteten Probe [30]

Um das Materialverhalten bei Beanspruchung zu untersuchen, sind neben zerstörenden Prüfverfahren auch numerische Ansätze möglich. Mit der steigenden Rechenleistung moderner Computer kann dem stetigen Wettbewerbsdruck begegnet und Entwicklungszeiten verringert, Herstellungskosten gesenkt sowie eine höhere Qualität des Endprodukts erzielt werden. Zudem erlauben sie ein tiefes Verständnis über die vorliegenden Spannungen innerhalb beanspruchter Klebverbindungen. Aus diesem Grund werden numerische Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit hinzugezogen, um die Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen näher zu untersuchen [31, p. 1].

2.6 Numerische Simulation

Im Konstruktionsprozess ist die Anwendung numerischer Simulationen zur Auslegung von Fügeverbindungen gängige Praxis. In der Mechanik wird die Spannung als Maß für die Materialbeanspruchung definiert, um somit das Werkstoffverhalten zu beschreiben. Diese Spannung ergibt sich aus dem Quotienten der auf ein Bauteil wirkenden Kraft F und der Fläche A. Um den Spannungszustand eines Bauteils an bestimmten Positionen zu analysieren, werden komplexe Geometrien in eine definierte Anzahl von kleinen Abschnitten, sogenannten Elementen, unterteilt (vgl. Abbildung 10) [31, p. 1].

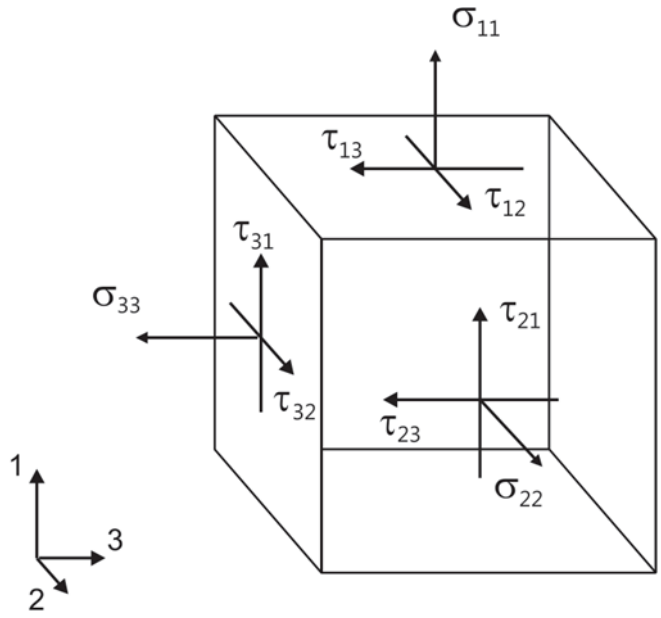


Abbildung 10: Element mit an den sichtbaren Flächen wirkenden Schub- und Normalspannungen [32, p. 8]

An den Flächen dieser Elemente werden grundsätzlich senkrecht zu den Flächen stehende Normalspannungen σ sowie parallel zu den Flächen gerichtete Schubspannungen τ formuliert. Die Unterscheidung zwischen diesen beiden

Spannungskomponenten ist notwendig, da sie unterschiedliche Verformungen am gedachten Element verursachen und somit entscheidend für das Abbilden realitätsnaher Ergebnisse sind. Die FEM-Simulation folgt dieser Methodik, um z. B. Spannungszustände an komplexen Geometrien berechnen zu können. Zwischen den Elementen entstehen Berührungspunkte, die über Knoten miteinander verbunden werden. Um das physikalische Verhalten unter diesen Bedingungen zu berechnen, wird jedes Element mit der Grundgleichung der Statik beschrieben. Diese Gleichung ist in Formel 2 dargestellt [26, p. 7] [31, pp. 11-12] [32, pp. 7-12].

Formel 2: Grundgleichung der Statik

$$\mathrm{F} = \mathrm{K} \times \mathrm{u}$$

Legende:

	F	Kraft in N
	K	Element-/ Struktursteifigkeit in $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{mm}}$
	u	Knotenverschiebung in mm

Bei Belastung des Gesamtmodells entstehen an den Knoten drei unbekannte Verschiebungen in X-, Y- und Z-Richtung. Das entstandene Gleichungssystem kann anschließend gelöst werden. Mittels eines Materialgesetzes, wie z. B. nach Hooke, können zunächst die Dehnungen aus den Verschiebungen und daraus anschließend die Spannungen abgeleitet werden [31, pp. 12-13].
Die einzelnen Lösungen der durch das Netz entstandenen Teilbereiche können daraufhin addiert werden. Hieraus ergibt sich ein Spannungsverlauf, der das Verhalten des Bauteils annähernd beschreibt. Inwiefern diese Methodik das physikalisch korrekte Ergebnis abbildet, hängt von der Vernetzung sowie der Genauigkeit der angegebenen Randbedingungen ab. Grundlegend geht die FEM-Simulation von homogenen Materialeigenschaften aus, sofern keine Inhomogenitäten im Modell nachgebildet oder über verringerte Materialparameter abgebildet werden. Aus diesem Grund ist es von entscheidender Bedeutung, die numerisch berechneten Lösungen mit experimentell ermittelten Kennwerten zu validieren [31, p. 14] [32, p. 2].
In dieser Arbeit wird ein Epoxidharzsystem zur Herstellung von Klebverbindungen verwendet, welches zur Kunststoffklasse der Duromere gehört. Diese setzen sich aus langkettigen Makromolekülen zusammen, die durch viele starke chemische Bindungen (im Verhältnis zu physikalischen Wechselwirkungen) vernetzt sind. Diese starke Vernetzung führt dazu, dass diese Kunststoffklasse bis zum Versagen des Materials kaum oder nur minimal viskoses Verhalten zeigen. Wenn das Material einer äußeren

Belastung ausgesetzt wird, deformiert sich das Netzwerk, bis die Spannungen durch die gestreckten Molekülketten ausgeglichen werden können. Wenn die Deformation jedoch weiter zunimmt, sind die langen Makromoleküle nicht mehr in der Lage, diese Last zu tragen, was in Schäden und oft in einem Versagen des Materials resultiert. Aufgrund dieser Eigenschaften haben Duromere nur sehr geringe viskoelastische und viskose Effekte. Zudem sind Temperatureinflüsse bei ihnen weniger bedeutend als bei anderen Kunststoffarten. Daher kann das Werkstoffverhalten von Duromeren in der entscheidenden Phase der Bauteilauslegung verallgemeinert als elastisch betrachtet werden. Außerdem besitzen Vertreter dieser Kunststoffklasse grundsätzlich eine hohe Steifigkeit, was in technischen Anwendungen zu nur geringen Dehnungen und praktisch keinen plastischen Deformationen führt. Zur Analyse der Spannungsverteilung innerhalb der Klebschicht kann somit ein linear-elastisches Materialmodell verwendet werden, um das Werkstoffverhalten zu beschreiben und ausreichend präzise Ergebnisse zu erzielen. Da im Rahmen dieser Arbeit die FEM-Simulation ausschließlich zur Beurteilung der Auswirkungen von Imperfektionen auf die Spannungsverhältnisse innerhalb der Klebschicht genutzt wird, ist der linear-elastische Ansatz ohne Fokus auf reale Schädigungsmechanismen hier ausreichend [32, p. 97].

Zusammenfassend können sowohl mit numerischen Berechnungen als auch mit zerstörenden Prüfungen die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen und dementsprechend auch die Auswirkungen von Imperfektionen auf die Materialcharakteristik untersucht werden. Die Literatur schreibt den vorgestellten Fehlstellen und Alterungsprozessen einen generell negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen zu. Zur genaueren Bewertung der Kritikalität solcher Imperfektionen wird nachfolgend eine umfassende Literaturrecherche aktueller Forschungsarbeiten in Bezug auf einerseits das definierte und reproduzierbare Einbringen von Imperfektionen und andererseits den Auswirkungen dieser auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindungen durchgeführt.

2.7 Einbringung und Einfluss von Imperfektionen in Klebverbindungen

Die konstruktive Gestaltung und geometrischen Gegebenheiten von Klebverbindungen als *unsichtbare* Fügetechnik erschweren die Detektion von Imperfektionen, wodurch u. a. die Auswirkungen der Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften schwer vorherzusagen und bisher noch nicht ausreichend bekannt sind. Um den Aufwand und die Kosten für notwendige Nacharbeiten möglichst gering zu halten

sowie eine ausreichende Sicherheit über den gesamten Produktlebenszyklus garantieren zu können, ist es notwendig, die Auswirkungen von Abweichungen auf das mechanische Verhalten von Bauteilen zu untersuchen. Aus diesem Grund hat das Interesse an dem Einfluss von Imperfektionen auf das mechanische Verhalten von Bauteilen, welches häufig unter dem Ausdruck *Effect of Defect* (EoD) zusammengefasst wird, in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten zugenommen. Ist der Wissensstand über den EoD in Fügeverbindungen sehr hoch, können u. a. Reparaturen, Ausfallzeiten und Schadensfälle minimiert werden [7, p. 720] [33, pp. 81-95].

In Quelle [34] werden zwei Verfahren zur Simulation von Lufteinschlüssen in Grenzschichtnähe innerhalb der Klebschicht vorgestellt. Zum einen wurde ein Teil des Klebstoffs, bevor dieser ausgehärtet ist, beispielsweise durch den Einsatz eines Spatels entfernt, wodurch Hohlräume im Grenzschichtbereich entstanden sind, deren Größe und Form variiert haben. Zum anderen wurden Drähte unterschiedlicher Durchmesser, die mit Trennmittel vorbehandelt waren, in die Klebschicht integriert. Abhängig von ihrer Länge wurden diese nach Aushärtung des Klebstoffs aus der Probe entfernt oder in dieser belassen. Anschließend wurden die Proben in zyklischen Versuchen bei verschiedenen Temperaturen getestet. Die mit Fehlstellen präparierten Proben versagten bei geringeren Lastzyklen im Vergleich zu intakten oder mechanisch vorbelasteten Prüfkörpern. Auffällig war bei vielen fehlerhaften Versuchskörpern, dass erste Rissbildungen an den eingebrachten Imperfektionen in der Klebschicht entstanden sind, welche dann zu einem schnellen und verfrühten Versagen führten [34, pp. 12-13, 39-75].

In [35] wurden verschiedene Geometrien von 2D- (Polyvinylchlorid (PVC)-Folie, Dicke: 0,05 mm) und 3D-Imperfektionen (nicht näher definierter Schaum; Dicke: 0,5 mm) in die Klebschicht gebracht, was auf Abbildung 11 dargestellt ist.

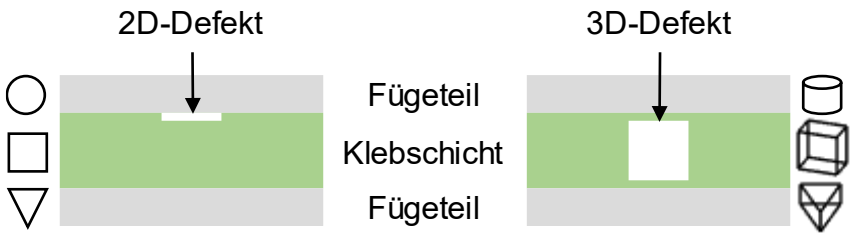


Abbildung 11: 2D- und 3D-Geometrien als Imperfektionen in Klebverbindungen [35, p. 129]

In verschiedenen Ausprägungen verdeckten die 2D-Fehlstellen eine Klebfläche von bis zu 64 % und die 3D-Geometrien verdrängten ein Klebstoffvolumen von bis zu 64 %. Die Versuche mit 3D-Fehlstellen, welche vor allem die Kohäsionszone

schwächten, zeigten einen nahezu linearen Festigkeitsabfall bei größerem Fehlstellenvolumen. Verschiedene Fehlerformen wiesen bei den Versuchen ein nahezu gleiches Verhalten auf. Dies zeigt, dass das Volumen der Imperfektion einen größeren Einfluss auf die Festigkeit hat als die untersuchten Geometrien. Lediglich Defekte mit einer dreieckigen Geometrie wiesen eine höhere Festigkeitsabnahme auf, was anhand der Spannungskonzentrationen an den scharfen Kerben der Eckpunkte in Prüfungsrichtung erklärt werden konnte. Die Prüfkörper mit 2D-Imperfektionen, welche vorwiegend die Adhäsionszone schwächten, zeigten einen graduellen negativen Einfluss auf die Festigkeit bei steigendem Fehleranteil. Insbesondere ab einem Anteil von ca. 30 % durch Imperfektionen verdeckter Klebfläche wurde ein starker Anstieg der Schwächung des Verbunds sichtbar. Dieser trat zudem auf, da die Fehlstellen mit hohen Ausprägungen in die Randbereiche der Klebverbindungen vordrangen, wo die höchsten Spannungen herrschen (vgl. Abbildung 7). Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung der Kritikalität einer Fehlstelle in der Klebverbindung [35, pp. 128-132].

Im Gegensatz dazu beschreibt Quelle [36] Versuche, in denen Polytetrafluorethylen (PTFE)-Folie verwendet wurde, um Adhäsionsfehler auf Aluminiumfügeteilen zu erzeugen. Zerstörende Prüfungen zeigten, dass keine Festigkeitsabminderung bis zu einem Fehlstellenanteil von 40 % der ursprünglichen Klebfläche auftrat [36, p. 1901]. Die Quelle [37] beschreibt geklebte Stahl- und Aluminiumverbindungen, in die verschiedene Imperfektionen eingebracht wurden. Dazu zählten u. a. Adhäsions- und Kohäsionsfehler oder Fehlpositionierungen der Fügeteile. Erstere wurden in verschiedenen Ausprägungen mithilfe von PTFE-Folie (vgl. Abbildung 12) oder -Lack simuliert, welche Bereiche der Klebfläche verdeckten bzw. verschmutzten und somit eine Haftung zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche verhinderten. Letztere wurden beispielsweise hervorgerufen, da Ölrückstände auf der Fügeteiloberfläche verblieben, welche anschließend in den Klebstoff diffundierten, oder indem Lufteinschlüsse bewusst beim Mischprozess des Klebstoffs eingerührt wurden [37, pp. 83-88].

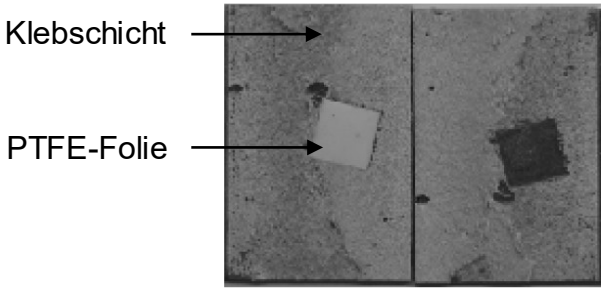


Abbildung 12: PTFE-Folie zur Herbeiführung von Adhäsionsfehlern in einer Klebverbindung [37, p. 91]

Als besonders kritisch erwiesen sich bei den Versuchen ebenfalls Adhäsionsfehler in großen Ausprägungen, welche in einer Abnahme der Verbundfestigkeit von 30 % bis 40 % resultierten [37, pp. 83-88].
In [38] wurden Adhäsionsfehler mittels Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE)-Folien in glasfaserverstärkte Kunststoff (GFK)-Klebverbindungen eingebracht und verdeckten dort in verschiedenen Ausprägungen bis zu 70 % der Klebfläche. Je höher der Anteil der verdeckten Klebfläche war, desto größer wurde der negative Einfluss der Imperfektionen auf die Festigkeit. Bei der höchsten Ausprägung von 70 % verdeckter Klebfläche wurde die Verbundfestigkeit um 65 % herabgesetzt [38, p. 66].
Die Quellen [18] und [19] beschreiben Vorgehen, in denen die Fügeteiloberflächen durch rechteckige Imperfektionen, hervorgerufen mithilfe von PTFE-Folie, PTFE-Spray und Trennmittel bzw. Silikonfett und Trennmittel, kontaminiert wurden. Die Fehlstellen nahmen einen Anteil von ca. 11 % bzw. 25 % der ursprünglichen Gesamtklebfläche ein. In zerstörenden Versuchen resultierten diese Fehlstellen in einer Abnahme der Verbundfestigkeit um etwa 45 % bzw. 50 %, abhängig von der eingesetzten Kontaminationsart [18, pp. 101-107] [19, pp. 168-178].
In [39] wurden Adhäsionsfehler durch Auftragen von Trennmittel, künstlichem Schweiß und Schneidölschmierstoff auf einem Fügeteil hervorgerufen. In statischen Versuchen zeigte sich, dass lediglich das Trennmittel zu einer Abnahme der Verbundfestigkeit geführt hat. Der künstliche Schweiß und der Schneidölschmierstoff sind in den Klebstoff diffundiert und haben dadurch keinen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hervorgerufen. Ob sich dadurch das bisher kohäsive Bruchbild verändert hat, ist nicht überliefert [39, pp. 101-107].
Aus vorangegangenen Quellen zeichnet sich ab, dass vor allem Adhäsionsfehler eine signifikante Abnahme der Verbundfestigkeit nach sich ziehen. Weiterhin steigt laut einigen Quellen die Kritikalität der Fehlstellen, wenn sie bei Belastung im Bereich der Überlappungsenden einer Klebverbindung liegen.

Im Verbundprojekt *BladeTester* [40] des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) wurden die Auswirkungen verschiedenster Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dazu wurden in einen 3-Punkt-Biegebalken [41, pp. 16-21], welcher vorrangig für die Prüfung von Rotorblattklebverbindungen entwickelt wurde, fertigungsbedingte Imperfektionen, wie z. B. Lufteinschlüsse hervorgerufen durch Polystyrolkugeln bzw. -stücken oder Voids (unvollständige Klebfugen), eingebracht. Aus zerstörenden Prüfungen ging hervor, dass die

Fehlstellen besonders unter schwingender Belastung ein enormes Schädigungspotenzial aufwiesen und zu einer verfrühten Rissinitiierung führten. Diese Erkenntnis wurde mit Versuchen von kreis- und linienförmigen Imperfektionen in geklebten Torsionsrohrproben [42] bekräftigt. In den Versuchen zeigte sich, dass die untersuchten Adhäsions- und Kohäsionsfehler unter quasistatischer Last nur geringe, unter zyklischer Belastung jedoch erhebliche Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte und insbesondere auf die Lebensdauer haben [42, p. 71].
Die Quelle [43] zeigt ebenfalls, dass Hohlräume in der Klebschicht in einer verringerten Verbindungssteifigkeit und früher auftretenden Rissinitiierung resultieren [43, pp. 9-17]. Unvollständige Klebfugen im Bereich der Hinterkante können laut [44] sogar der Auslöser für ein Versagen des kompletten Rotorblatts sein, da sie die Rissinitiierung und den -fortschritt bedeutend begünstigen [44, pp. 641-652].
In [45] wurden die Auswirkungen verschiedener Fugenausprägungen (Kehle, Hohlkehle, vgl. Abbildung 13) und in [46] von unvollständig ausgebildeten Klebschichtecken und -kanten in den Randbereichen von Klebverbindungen ermittelt. Die Imperfektionen erwiesen sich insbesondere bei schwingender Beanspruchung als stark festigkeitsvermindernd und setzten die Bruchlasten um bis zu 50 % herab [45, pp. 38-41].

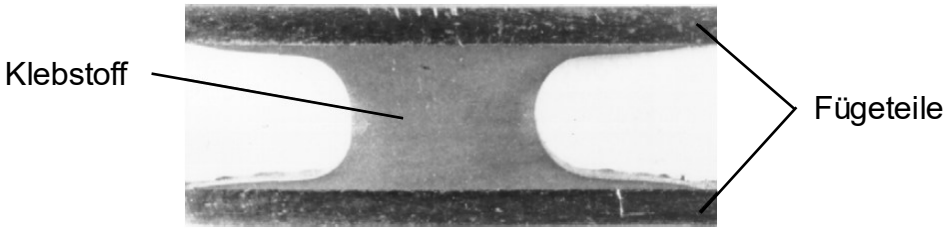


Abbildung 13: Klebverbindung mit Hohlkehlen [46, p. 37]

Neben der Lage der Fehlstellen innerhalb der Klebschicht (Kritikalität steigt im Bereich der höchsten Spannungen) hängt das Schädigungspotenzial laut vorangegangener Quellen ebenfalls von der Belastungsart ab. Bei zyklischen Beanspruchungen steigt der negative Effekt der Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften einer Klebverbindung im Vergleich zu statischen Versuchen.

Die Quelle [47] nutzte erneut unterschiedliche Ausprägungen von PTFE-Folie, um Adhäsionsfehler hervorzurufen. Diese wurden auf Fügeteilen zum einen aus Baustahl und zum anderen aus gehärtetem Stahl aufgebracht. In zerstörenden Prüfungen führten die Imperfektionen in Prüfkörpern aus verklebtem Baustahl bis zu einem Fehlstellenanteil von 50 % der ursprünglichen Klebfläche zu keinem negativen Einfluss auf die

Verbundfestigkeit. Die Klebverbindungen mit Fügeteilen aus gehärtetem Stahl zeigten hingegen eine nahezu lineare Abnahme der Verbundfestigkeit, je größer der Anteil der Imperfektionen in der Klebverbindung wurde [47, pp. 289-292]. Auch in [14], [48] und [49] wurde bestätigt, dass kleine Imperfektionen bei weicheren Fügeteilen, wie z B. aus Baustahl, nahezu keinen Effekt auf die mechanischen Eigenschaften hatten. Erst ab einem Grenzwert des Fehlstellenanteils, meist um die 50 %, wiesen die Prüfkörper eine Reduktion der Festigkeit auf. Bei härteren Materialien, wie z. B. hochfesten Stählen, nahm die Festigkeit annähernd linear ab, je größer der Anteil der Imperfektion in der Klebschicht war [14, p. 82] [48, pp. 69-76] [49, p. 1177].

Zusammenfassend wird anhand der Literatur deutlich, dass die Kritikalität der Fehlstellen von verschiedenen Parametern abhängt. Dazu zählen die Lage und Größe der Fehlstellen, die Belastungsart sowie die Materialeigenschaften der Fügeteile. Teilweise stehen sich jedoch gegensätzliche Aussagen über den Einfluss von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen gegenüber, was die Komplexität der bestehenden Zusammenhänge unterstreicht. Dies verdeutlicht, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um allgemeingültige Aussagen für klebtechnische Anwendungen treffen zu können. Insbesondere die im letzten Absatz erwähnte Abhängigkeit des Imperfektionseinflusses aufgrund der Fügeteileigenschaften bedarf weiterer Versuche, da in der Literatur vorwiegend Stahlfügeteile oder faserverstärkte Kunststoffe als Verbindungselemente gewählt wurden.

Um das Wissen um den Einfluss von Inhomogenitäten in Klebverbindungen anwenden zu können, müssen die Fehlstellen detektiert werden. Zerstörende Prüfmethoden sind für betriebsbegleitende, wiederkehrende Inspektionen ungeeignet. Im Rahmen des Betriebs oder während Wartungsarbeiten sollte ausschließlich der Zustand der Klebung analysiert werden, ohne die Integrität der Struktur für den weiteren Einsatz zu beeinträchtigen. Zerstörungsfreie Prüfverfahren ermöglichen die Beurteilung der Qualität der Klebung durch die Identifikation von Auffälligkeiten an der Oberfläche oder im Inneren des Bauteils, ohne dieses zu beschädigen. Nachfolgend werden ausgewählte zfP-Verfahren vorgestellt, die sich für die Anwendung an Klebverbindungen eignen.

2.8 Zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen

Um den EoD beurteilen zu können, ist es notwendig, dass die Imperfektionen in den Klebverbindungen mit geeigneten zfP-Verfahren detektiert werden können. Die klebtechnische Norm DIN EN ISO 21368:2024-10 stellt eine Auswahl an möglichen zfP-

Verfahren vor, wie z. B. die Ultraschallprüfung, Thermographie oder Shearographie, um Fehlstellen in Klebverbindungen sichtbar zu machen. Dies stellt jedoch nur eine allgemeine Empfehlung gängiger Verfahren dar, ohne spezifische zfP-Verfahren für bestimmte Imperfektionen oder Anwendungen zu benennen [50, p. 106].

Ein z. B. im Schiffbau verbreitetes Prüfverfahren ist die Röntgenprüftechnik, welches dort u. a. für kritische Schweißverbindungen eingesetzt wird. Dabei werden die Klebverbindungen mit einem Röntgenstrahler durchleuchtet. Abhängig von der Dichte und Dicke der Fügeteile sowie des Klebstoffs variiert die Strahlungsmenge, die anschließend den Detektor erreicht und ein Bild erzeugt. Auf diesem lassen sich daraufhin z. B. Imperfektionen innerhalb der Klebschicht detektieren [7, pp. 806-807] [51, pp. 31-33].

Quelle [37] beschreibt Klebverbindungen einerseits mit Stählen (Dicke: 3 mm) und andererseits mit Aluminium (Dicke: 2 mm) mit einem 1K-Epoxidharzsystem, welche mithilfe der Röntgenprüftechnik auf Fehlstellen untersucht wurden. Neben Ölkontaminationen, Fremdeinschlüssen (Glasperlen, Durchmesser: 0,2 mm) und PTFE-Folie (Dicke: 0,1 mm) konnten Schichtdickenschwankungen innerhalb der Klebschicht mithilfe von Röntgenaufnahmen sicher detektiert werden (vgl. Abbildung 14) [37, pp. 32-42].

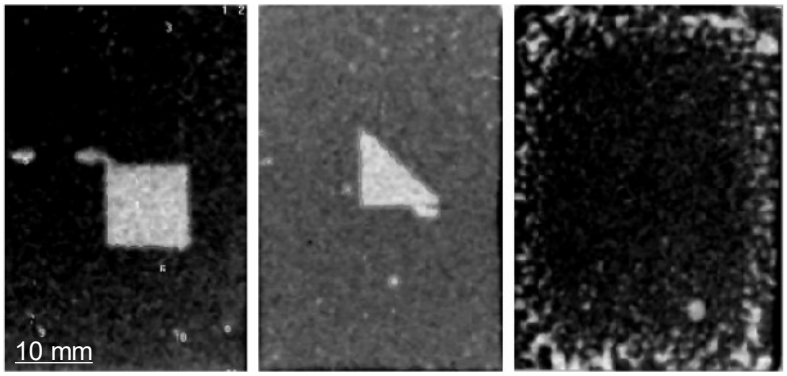


Abbildung 14: Röntgenaufnahmen mit Imperfektionen innerhalb der Klebschicht (helle Bereiche) [37, p. 40]

In Quelle [52] wurden Röntgenuntersuchungen an geklebten Aluminium- und CFK-Stahlverbindungen beschrieben, in denen mittels PTFE-Schmiermittel Kissing Bonds hervorgerufen wurden. In den Versuchen konnten lediglich die Glasperlen, welche sich als Füllstoffe im Klebstoff befanden, nachgewiesen werden. Das PTFE-Schmiermittel war auf den Röntgenaufnahmen nicht erkenntlich [52, pp. 3-6].

In Quelle [53] wurden geklebte CFK-Verbindungen mit verschiedenen Fehlstellen präpariert (z. B. Durchmischungsfehler, Trennmittel, Hydrauliköl). Trotz einiger Auffälligkeiten auf den Aufnahmen konnten die Imperfektionen nicht zuverlässig mithilfe der Röntgenprüftechnik erkannt werden [53, pp. 556-564].

In [54] wurden Messingbleche (Dicke: 0,05 mm) in die Klebschicht von Aluminiumverbindungen eingebracht. Diese konnten mithilfe von Röntgenstrahlen sicher detektiert werden [54, pp. 15-20].
Anhand der Quellen wird deutlich, dass mithilfe der Röntgenprüftechnik das Innere einer Klebverbindung auf hochauflösenden Aufnahmen untersucht werden kann. Somit lassen sich Imperfektionen in kleinsten Dimensionen erfassen. Nicht detektierbar sind hingegen Fehlstellen, deren Dichte sehr ähnlich zu dem umliegenden Material ist, wodurch sie die eingebrachte Strahlung nicht ausreichend beeinflussen und auf den Röntgenaufnahmen nicht dargestellt werden können.

Ein ebenfalls im Schiffbau zur Schweißnahtprüfung oder in der Prüfung der Klebverbindungen von Rotorblättern weit verbreitetes zfP-Verfahren ist die Ultraschallprüfung. Bei diesem akustischen Verfahren werden Schallwellen beispielsweise mithilfe eines kombinierten Sender-Empfänger-Ultraschallkopfs ausgestrahlt und die reflektierten Echos detektiert. In einer fehlerfreien Klebverbindung breiten sich die Wellen gradlinig aus, bei Fehlstellen werden sie hingegen gebrochen und abhängig von Geometrie, Größe und Lage dieser teilweise reflektiert. Somit lassen sich z. B. Poren, Fremdeinschlüsse, Risse und unbenetzte Bereiche im Klebstoff detektieren [7, pp. 802-803]. Die Quelle [37] beschreibt geklebte Aluminium- bzw. Stahlverbindungen, in die PTFE-Einsätze (Dicke: 0,1 mm), Fremdeinschlüsse (Glasperlen, Durchmesser: 0,2 mm) und Ölkontaminationen eingebracht wurden. Es zeigte sich, dass Adhäsionsfehler lediglich in der ersten Grenzschicht zwischen Fügeteil und Klebstoff zuverlässig detektiert werden konnten. Über Fehlstellen in der zweiten Grenzschicht zwischen Klebstoff und Fügeteil konnten mithilfe dieses Verfahrens keine Informationen gewonnen werden. Des Weiteren sind die Imperfektionen nicht exakt lokalisierbar, da sie auf dem Scan größer erscheinen, als es der Realität entspricht. Feinere Defekte, wie z. B. die Glaskugeln oder Poren, konnten mittels Ultraschallprüfung in diesem Prüfaufbau nicht detektiert werden (vgl. Abbildung 15) [37, pp. 59-68].

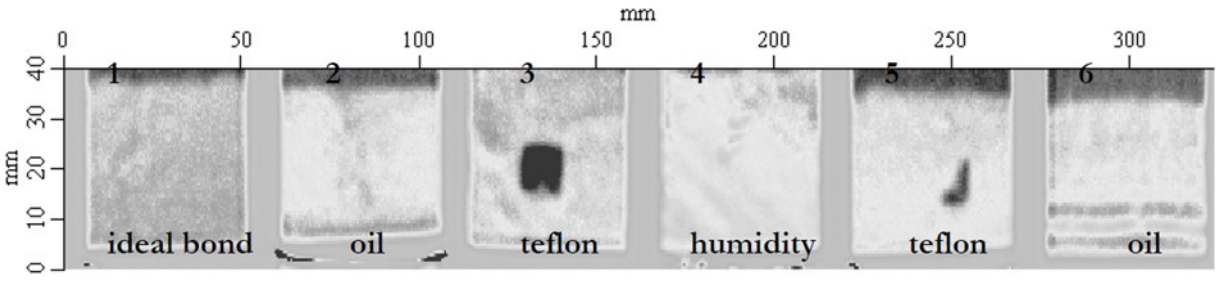


Abbildung 15: C-Scan der Ultraschalluntersuchungen an fehlerbehafteten Proben [37, p. 60]

In Quelle [52] wurden Ultraschalluntersuchungen an überlappenden Aluminium- und CFK-Stahlklebverbindungen gemacht. In diese wurden mithilfe von PTFE-Schmiermittel Bereiche eingebracht, in denen der Klebstoff keine Adhäsionskräfte zum Fügeteil aufbauen konnte. Diese sollten Kissing Bonds simulieren. Darüber hinaus waren in dem genutzten Klebstoffsystem Glasperlen zur Klebschichtdickeneinstellung vorhanden, welche Fremdeinschlüsse darstellten. In den geklebten CFK-Stahlverbindungen konnten auf den Ultraschallbildern die Bereiche mit Kissing Bonds detektiert werden. Die Glasperlen konnten hingegen nicht gefunden werden. Konträr dazu waren auf dem C-Scan der geklebten Aluminiumverbindungen die Glasperlen sichtbar, die Bereiche mit PTFE-Schmiermittel konnten jedoch nicht ausfindig gemacht werden [52, pp. 4-5].
In Quelle [53] wurden unterschiedliche Fehlstellen (z. B. Durchmischungsfehler, Trennmittel, Hydrauliköl) in CFK-Klebverbindungen eingebracht. Obwohl einige Bereiche mit Trennmittel oder Hydrauliköl in der Klebverbindung ausgemacht werden konnten, wurde deutlich, dass die Ultraschallprüfung die eingebrachten Imperfektionen nicht zuverlässig detektieren konnte [53, pp. 556-564].
Die Quelle [12] beschreibt Ultraschalluntersuchungen an geklebten Aluminiumverbindungen, die mit drei verschiedenen Klebstoffen gefügt wurden. In die Klebverbindungen wurden sowohl Adhäsionsfehler (mit Trennmittel, PTFE-Spray oder -Folie) als auch Kohäsionsfehler (Poren) eingebracht. Unabhängig vom Klebstoffsystem konnten auf dem C-Scan der Untersuchungen Poren und PTFE-Folie detektiert werden. Die flüssigen Fehlstellen, hervorgerufen durch Trennmittel und PTFE-Spray, waren hingegen nicht sichtbar [12, pp. 183-191].
In Quelle [54] wurden Versuche an geklebten Aluminiumverbindungen gemacht. In diese wurden Messingbleche (Dicke: 0,05 mm) in verschiedenen Größen zur Simulation von Kissing Bonds in die Grenzschicht zwischen Klebstoff und Fügeteil gebracht. Die Messingbleche konnten reproduzierbar detektiert werden. Anhand der C-Scans konnten bei den kleinsten Ausprägungen der Messingbleche jedoch keine Rückschlüsse auf die genaue Lage der Imperfektionen gezogen werden, da mittels der Ultraschalltechnik nicht die gesamte Fläche des Blechs dargestellt werden konnte [54, pp. 13-16].
In Quelle [55] wurden GFK-Klebverbindungen einer Alterung (Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswechsel) unterzogen. Nach der Alterung konnten mithilfe von Ultraschalluntersuchungen Bereiche detektiert werden, in denen eine Enthaftung stattgefunden hat und somit keine bzw. nur sehr geringe Adhäsionskräfte zwischen Klebstoff und

Fügeteil vorhanden waren [55, pp. 1-9].
Die ausgewählte Literatur zeigt, dass viele Imperfektionen mithilfe der Ultraschallprüfung detektiert werden können. Zudem wird deutlich, dass die Prüfung jedoch sehr komplex ist und viel Erfahrung in der Parameterauswahl voraussetzt, um geeignete Ergebnisse zu erzeugen. Speziell für den Automobilbau, wo die eingesetzten Strukturen eine hohe Maßhaltigkeit aufweisen und der Aufbau genaustens bekannt ist, existieren beispielsweise Ultraschall-Phased-Array-Rollsensoren zur Prüfung von Klebverbindungen auf Hohlräume, welche sicher detektiert werden können [56, pp. 9-19] [57].

Ein weiteres zfP-Verfahren, um Klebverbindungen zu untersuchen, ist die Thermographie. Bei diesem thermischen Verfahren wird die Wärmestrahlung mithilfe einer Infrarot (IR)-Kamera gemessen. Aus dem Prozess heraus oder mithilfe einer externen Wärmeanregung wird Wärmeenergie in das Bauteil gebracht. Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit, wie sie Inhomogenitäten wie beispielsweise Poren hervorrufen, resultieren in Temperaturunterschieden an der Bauteiloberfläche, da sie die thermischen Wellen reflektieren bzw. ablenken. Die IR-Kamera macht diese Unterschiede und somit die Fehlstellen sichtbar [7, pp. 805-806].
In Quelle [58] wurden in einer geklebten Aluminium-CFK-Verbindung sowohl Lufteinschlüsse in verschiedenen Ausprägungen (Polystyrol, Durchmesser: 5…20 mm | Höhe: 3,5…5,5 mm) als auch PTFE-Folie (Durchmesser: 5…25 mm | Höhe: 0,1 mm) eingebracht, um Beeinträchtigungen in der Adhäsions- und Kohäsionszone hervorzurufen. Bei den thermographischen Untersuchungen konnten alle Volumendefekte reproduzierbar detektiert werden, wohingegen die Kissing Bonds, hervorgerufen durch PTFE-Folie, auf den Thermogrammen nicht sichtbar wurden. Ein Thermogramm mit sichtbaren Imperfektionen ist auf Abbildung 16 dargestellt [58, pp. 1-14].

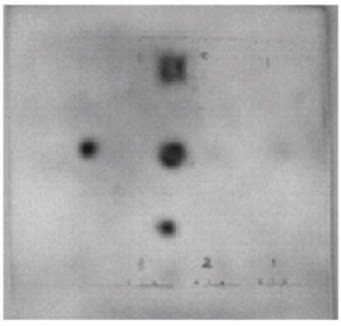


Abbildung 16: Thermogramm eines Klebverbunds mit Imperfektionen (dunkle Bereiche) [58, p. 7]

Die Quelle [59] beschreibt Thermographieuntersuchungen an geklebten CFK-Verbindungen, in denen Kissing Bonds mithilfe von PTFE-Folie und Silikon-Schmiermittel simuliert wurden. In diesen Versuchen konnten die PTFE-Folien innerhalb der Klebschichten sicher detektiert werden, wohingegen das Silikon-Schmiermittel auf den Thermogrammen nicht sichtbar war. Erst bei Belastung der Prüfkörper konnte Letzteres ebenfalls auf den Aufnahmen kenntlich gemacht werden, da sich durch die eingebrachte Flüssigkeit nun ein Spalt zwischen Klebstoff und Fügeteil geöffnet hatte, welcher die Wärmeleitfähigkeit entscheidend beeinflusst hat [59, pp. 168-178].
In Quelle [60] werden Thermographieversuche beschrieben, in denen die Klebverbindungen von 4 mm starken Kunststoffplatten zerstörungsfrei geprüft wurden. In die Klebverbindungen wurden verschiedenste Fehlstellen (z. B. Lufteinschlüsse, Sand, Aluminiumspäne, Silikonspray oder Schmieröl) eingebracht. Mithilfe der Thermographie konnten sowohl Lufteinschlüsse als auch Kissing Bonds (Schmieröl) und große Metallspäne in der Klebschicht detektiert werden. Die Sandkörner und kleine Aluminiumspäne waren hingegen nicht sichtbar [60, pp. 40-45].
In Quelle [55] wurden in GFK-Klebverbindungen Kissing Bonds mittels PTFE-Folie hervorgerufen. In den Versuchen konnten diese Imperfektionen zuverlässig mittels Thermographie detektiert werden [55, pp. 1-9].
In Quelle [61] wurden Pickup-Truck-Boxen, die aus verklebten FKV-Fügeteilen bestehen, direkt in der Fertigung mittels Thermographie untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass sowohl Imperfektionen in den Klebverbindungen als auch in den FKV-Fügeteilen auf den Thermogrammen sichtbar wurden. Diese zeigten sich z. B. in Form von Lufteinschlüssen, die durch Ablösungen oder Impactschäden hervorgerufen wurden. Letztere waren selbst unter Zuhilfenahme von Kameras und Lupen nicht in der visuellen Prüfung erkenntlich [61, pp. 1511-1517].
Quelle [62] beschreibt Versuche, in denen in geklebte FKV-Verbindungen eingebrachte 3D-Defekte mithilfe von Thermographie detektiert werden sollten. Diese wiesen unterschiedlichen Geometrien (kreisrunder, drei- und viereckiger Zylinder, Durchmesser: 15…40 mm), Positionen innerhalb der Klebschicht und Dicken (0,5…2 mm) auf. Innerhalb dieser Versuchsreihen konnten alle Volumendefekte zuverlässig in der Klebverbindung lokalisiert werden [62, pp. 1-15].
Anhand der Quellen wird deutlich, dass die Thermographie eine geeignete Methode darstellt, um verschiedenste Imperfektionsarten in Klebverbindungen zu detektieren. Herausforderungen stellen jedoch kleine und tiefliegende Fehlstellen dar, die auf dem

Thermogramm nicht realitätsnah dargestellt werden können und ihre Geometrie lediglich diffus oder gar nicht abgebildet wird.

Die Shearographie ist ein weiteres zfP-Verfahren, mit dem sich die Qualität von Klebverbindungen untersuchen lässt. Mit ihr lassen sich größere Bereiche eines Bauteils gleichzeitig untersuchen. Dazu wird kohärentes Licht, wie z. B. von einem Laser, auf eine Oberfläche gestrahlt und die Reflektion mit einer hochauflösenden Kamera erfasst. Im Anschluss wird im Bauteil eine Deformation hervorgerufen, z. B. mittels mechanischer (Vakuum) oder thermischer Belastung, und erneut die Reflexion des Lichtes erfasst. Aus der Abstandsänderung unterschiedlicher Bildpunkte zueinander lassen sich Rückschlüsse auf Fehlstellen in der Klebverbindung ziehen, da sich der Deformationsgradient in der Nähe von Imperfektionen ändert [63, pp. 39-41].
Quelle [64] beschreibt Shearographieuntersuchungen an einer geklebten Stahl-Kautschuk-Verbindung. In diese wurden einerseits quadratische (Kantenlänge: 4…20 mm) und andererseits runde (Durchmesser: 4…20 mm) PTFE-Folien eingebracht, um Haftungsfehler zu simulieren. Mithilfe der Shearographie konnten sowohl bei der thermischen als auch der mechanischen (Vakuum) Anregung alle eingebrachten Imperfektionen zuverlässig detektiert und deren Größe bestimmt werden (Abweichungen ± 1 mm). Die Shearogramme sind auf Abbildung 17 dargestellt [64, pp. 1-8].

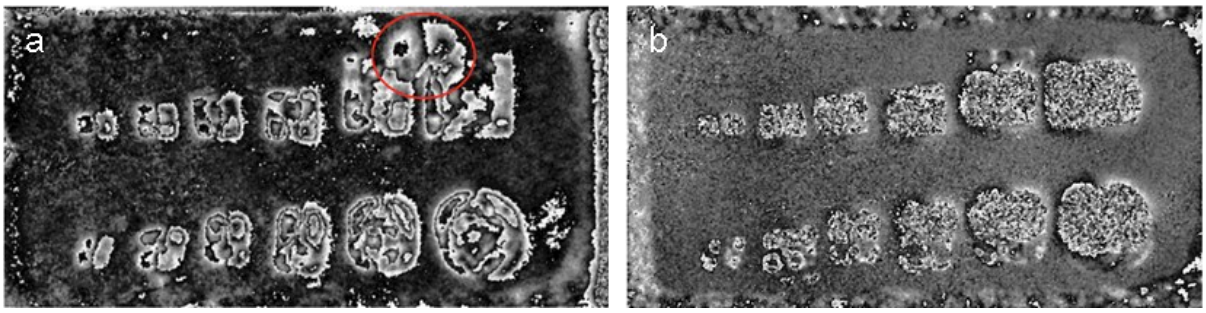


Abbildung 17: Shearogramme der fehlstellenbehafteten Stahl-Kautschuk-Klebverbindungen bei thermischer (a) und mechanischer (b) Belastung [64, p. 5].

In Quelle [65] wurden fehlerbehaftete geklebte Aluminium-CFK-Verbindungen mittels Shearographie untersucht. Die eingebrachten Imperfektionen umfassten korrodierte Aluminiumfügeteile, Risse und kreisförmige Enthaftungsbereiche (Durchmesser: 20…80 mm) innerhalb der Klebschicht. Mit diesem zfP-Verfahren konnten alle genannten Fehlstellen sicher gefunden werden. Es zeigte sich zudem, dass die genaue Größe bei kleineren Fehlstellen exakter bestimmt werden konnte als bei größeren bzw. mehreren Defekten innerhalb der Klebschicht, da diese auf dem Shearogramm zunehmend unscharfe Ränder aufwiesen [65, pp. 1-16].

Quelle [66] beschreibt Shearographieuntersuchungen an einer geklebten Stahl-Kunststoff-Verbindung. In diese wurden kreisrunde Hohlräume (Durchmesser 2…4 mm) in verschiedenen Tiefen (0,3…0,6 mm) eingebracht. Mithilfe von Vakuum wurden verschiedene Drücke (5 kPa und 15 kPa) auf die Bauteile aufgebracht und eine Verformung hervorgerufen. Die Fehlstellen innerhalb der Klebschicht konnten in den Versuchsreihen reproduzierbar detektiert werden. Es zeigte sich jedoch, dass sich die Geometrien der Imperfektionen bei einem Vakuum mit 5 kPa Unterdruck genauer auf dem Shearogramm abbilden (ca. 5 % Abweichung) als bei 15 kPa (bis 10 % Abweichung), woraufhin die Ränder der Defekte unscharf und damit Rückschlüsse auf die tatsächliche Größe der Imperfektionen erschwert wurden [66, pp. 1-10].
In Quelle [67] wurden geklebte Beton-CFK-Verbindungen angefertigt, in welchen kreisrunde Fehlstellen (Durchmesser: 10…30 mm) in verschiedenen Tiefen (1…6 mm) mittels PTFE-Folie eingebracht wurden. Die Bauteile wurden thermisch angeregt, um eine Deformation auf der betrachteten Oberfläche hervorzurufen. In den Versuchsreihen konnten die Fehlstellen mit einem Durchmesser von 10 mm nur in der geringsten Tiefe mit diesem Verfahren detektiert werden. Die größeren Durchmesser waren stets sichtbar auf den Thermogrammen [67, pp. 404-416].
In Quelle [14] wurden diverse Kombinationen aus Stahl (Dicke: 1…3 mm) und CFK (Dicke: 1,5 mm) verklebt, in denen unterschiedliche Fehlstellen (ungleichmäßige Klebschichtdicke, Durchmischungsfehler, fehlender Klebstoff, Poren im Klebstoff, Kissing Bonds) in verschiedenen Ausprägungen (5…20 mm) simuliert wurden. Die Proben wurden dabei thermisch angeregt, um die für die Shearographie notwendige Bauteildeformation hervorzurufen. Die Versuchsreihen zeigten, dass ungleichmäßige Klebschichtdicken mit diesem Verfahren nicht nachgewiesen werden konnten. Bei den 3 mm starken Fügeteilen konnten lediglich Durchmischungsfehler detektiert werden, alle anderen Imperfektionen zeigten keine Auffälligkeiten auf den Shearogrammen. Bei den Versuchen mit 1 mm bzw. 1,5 mm starken Fügeteilen konnten die anderen Imperfektionen sicher detektiert werden [14, pp. 5-8].
Die Quelle [58] beschreibt geklebte Aluminium-CFK-Verbindungen, in denen sowohl Lufteinschlüsse in verschiedenen Größen (Durchmesser: 5…20 mm | Höhe: 3,5…5,5 mm) als auch PTFE-Folie (Durchmesser: 5…25 mm | Höhe: 0,1 mm) eingebracht wurden, um Imperfektionen zu simulieren. Mittels thermisch angeregter Shearographie wurden die verschiedenen Proben untersucht. Es stellte sich heraus, dass insbesondere Adhäsionsfehler (PTFE-Folie) zuverlässig detektierbar waren und sich

die Größe der Fehlstellen genau bestimmen ließ. Die Kohäsionsfehler (Lufteinschlüsse) zeigten sich ebenfalls auf den Shearogrammen. Die bestimmte Dimension dieser wich jedoch um bis zu 95 % vom tatsächlichen Wert ab [58, pp. 1-14].
Die ausgewählte Literatur zeigt, dass sich viele gängige Imperfektionen in Klebverbindungen mithilfe der Shearographie detektieren lassen. Die Eignung beschränkt sich jedoch häufig auf dünne Fügeteile bzw. nah an der Oberfläche liegende Defekte.

Ein Verfahren, das vor allem im Flugzeug- und Windenergieanlagen (WEA)-Bau eingesetzt wird, ist die akustische Emission, welche sowohl manuell als auch automatisiert erfolgen kann. Durch innere mechanische Spannungen oder externer Anregung, wie beispielsweise erzwungene Materialausdehnung durch Wärmezufuhr oder Abklopfen mit einem Impulshammer, wird der Klebverbund belastet. Bei Vorhandensein von Schäden (z. B. Rissbildung, -fortschritt, Feuchtigkeit) werden charakteristische Schallwellen, die sich vom intakten Bauteil unterscheiden, emittiert und mithilfe eines Sensors aufgenommen. Diese Schallwellen können beispielsweise anhand ihrer Impulsdauer, -amplitude, Ereigniszahl oder -rate analysiert und so Rückschlüsse auf vorhandene Schäden gezogen werden [68, pp. 41-46] [69, p. 13].
In Quelle [70] wurden stahlverstärkte Betonfügeteile miteinander verklebt und anschließend einer zerstörenden Druckprüfung unterzogen. Mithilfe von Sensoren, die die akustischen Emissionen beim Versagen der Klebschicht aufgenommen haben, wurden für spezifische Schadensmechanismen innerhalb der Klebschicht charakteristische Schallwellen aufgezeichnet. Es konnte gezeigt werden, dass hohe Frequenzen (275…325 kHz) ein Indikator für Rissbildung aufgrund von Normalspannungen und die niedrigeren Frequenzen für Versagen durch Scherspannungen waren [70, pp. 4-8].
In der Quelle [71] wurden GFK-Laminate mit verschiedenen Faserausrichtungen zu einem Double-Cantilever-Beam (DCB)-Prüfkörper verklebt. Diese wurden senkrecht zur Klebfläche (Mode I) belastet und bis zum Versagen geprüft. Mithilfe der akustischen Emission konnten während der Versuche Rückschlüsse auf verschiedenste Versagensmechanismen gezogen werden, wobei zwischen Schäden in der Klebschicht (Kohäsionsversagen) und Schäden in den GFK-Fügeteilen (Matrixversagen, Faser-Matrix-Ablösung oder Faserbruch) unterschieden werden konnte [71, pp. 5-15].
In Quelle [72] wurden geklebte Stahl-CFK-Verbindungen zerstörend geprüft. Mithilfe von akustischen Emissionen, die über einen Sensor aufgenommen wurden, konnten charakteristische Schallwellen beim Versagen der Proben aufgenommen werden. Diese ließen Rückschlüsse auf spezifische Schäden innerhalb der Proben zu. Mithilfe

des Algorithmen-Klassifikators Ensembles of Decision Tree (EoDT) konnten verschiedene Schadensmechanismen klassifiziert und charakteristischen Schallwellen zugeordnet werden. Dies erlaubte es, über die akustische Emission bei der Prüfung die Zeitpunkte von kohäsivem und adhäsivem Versagen innerhalb der Klebschicht, aber auch Fügeteildeformationen und Delaminationen innerhalb der CFK-Fügeteile, zu detektieren. Eine Darstellung auftretender Schadensmechanismen bei steigender Belastung ist auf Abbildung 18 dargestellt [72, pp. 7-17].

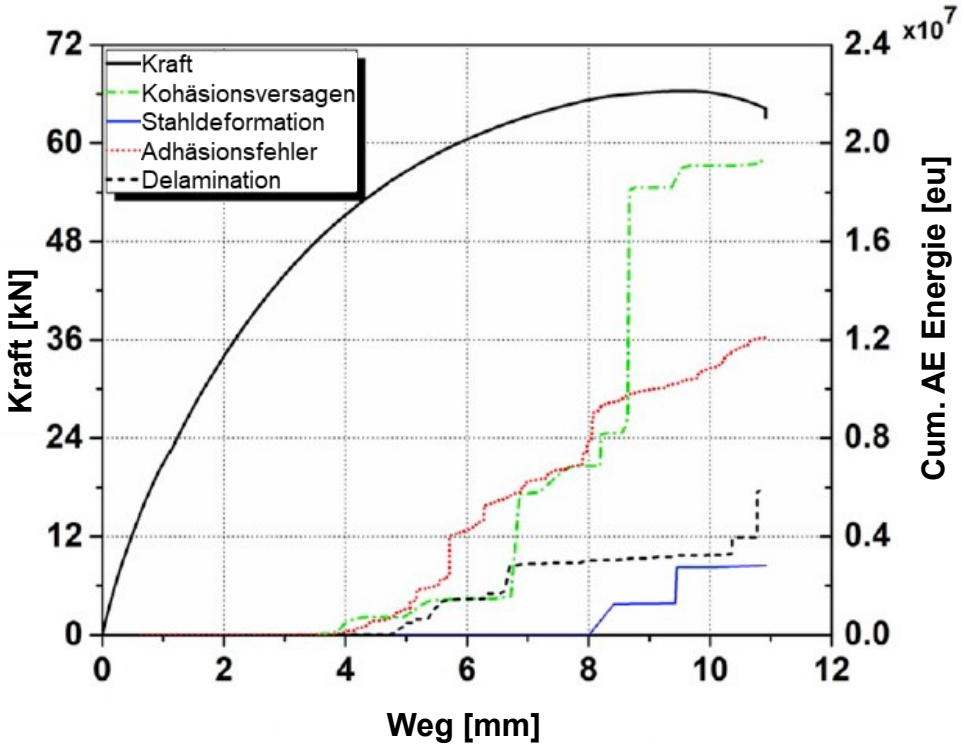


Abbildung 18: Kraft-Weg-Diagramm mit Schadensarten, die während der zerstörenden Prüfung anhand der Schallwellen im Bauteil ermittelt werden konnten [72, p. 19]

In Quelle [73] wurden geklebte GFK-Verbindungen angefertigt, in welche anschließend Impactschäden verschiedener Energieniveaus eingebracht wurden. Mit der akustischen Emission konnten im Anschluss daran bei zyklischen Versuchen Rissfortschritte sowie Delaminationen gemessen und Risse lokalisiert werden, die einerseits innerhalb der Klebschicht und andererseits in den GFK-Laminaten auftraten [73, pp. 5-12]. Die beschriebenen Quellen zeigen, dass sich die akustische Emission vor allem zur frühzeitigen Erkennung von Schäden in der Klebverbindung eignet, indem diese erkannt und einem direkten Schadensmechanismus zugeordnet werden können.

Zusammenfassend wird deutlich, dass viele verschiedene zfP-Verfahren vorhanden sind, mit denen Imperfektionen in Klebverbindungen detektiert werden können. Ihre

Eignung ist u. a. abhängig von der Geometrie und dem Material der Fügepartner sowie der Art und Dimension der Fehlstellen und Klebschicht. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Eignung ausgewählter zfP-Verfahren

Verfahren	**Potenzial**	**Einschränkungen**
Röntgen	Vor allem Kohäsionsfehler bis hin zu kleinsten Dimensionen	Risse senkrecht zur Strahlungsrichtung, Fehler ähnlich zum umgebenden Material
Ultraschall	Adhäsions- und Kohäsionsfehler im Inneren einer Struktur	Fehler müssen größer als die Wellenlänge der Ultraschallwellen sein, Fehler parallel zur Strahlrichtung
Thermographie	Oberflächliche und oberflächennahe Adhäsions- und Kohäsionsfehler	Kleine tiefliegende Fehlstellen, Effusivität der Fehler muss sich von umgebendem Material unterscheiden
Shearographie	Oberflächliche und oberflächennahe Adhäsions- und Kohäsionsfehler	Zumeist beschränkt auf dünne Fügeteile, tiefliegende Fehlstellen
Akustische Emission	Nicht-statische Prozesse wie z. B. Rissentstehung und -wachstum	Lage der Fehlstellen nur rudimentär lokalisierbar

Um Rückschlüsse auf die Kritikalität der Inhomogenitäten und notwendige Maßnahmen ziehen zu können, sind Richtwerte bzw. zulässige Grenzwerte notwendig. Für eine zuverlässige Auslegung geklebter Verbindungen sollten diese grundlegend in klebtechnischen Normen verankert sein, womit sich der nächste Abschnitt beschäftigt.

2.9 Umgang mit Imperfektionen in der Normung

Anhand des Vorhandenseins von Imperfektionen in Klebverbindungen, welche durch zfP-Verfahren detektiert wurden, sind Rückschlüsse zu ziehen, wie sich die Defekte auf die Haltbarkeit der Struktur im Betrieb auswirken können und welche Maßnahmen ergriffen werden müssen. Aktuell finden sich in den klebtechnischen Normen jedoch keine definierten Angaben, die diese Bereiche im Speziellen ansprechen. Im Schienenfahrzeugbau, welcher eine Vorreiterrolle in der Normung klebtechnischer Anwendungen einnimmt und 2006 die weltweit erste klebtechnische Normenreihe veröffentlicht hat, werden beispielsweise verschiedene Ausführungsregeln und Aspekte der

Qualitätssicherung von Klebverbindungen in der DIN 6701-4:2015-12 bzw. der DIN EN 17460:2022-10 adressiert. In den Dokumenten sind mögliche „Unregelmäßigkeiten bei Klebverbindungen“ bzw. „Beispiele nicht-dekorativer und dekorativer Mängel von Klebverbindungen“ aufgelistet, die im Fertigungsprozess oder betrieblichen Einsatz entstehen können. Zusätzlich sind mögliche Fehlerursachen aufgeführt, allerdings werden keine konkreten Handlungsanweisungen gegeben, wie bei Feststellung derartiger Befunde vorzugehen ist bzw. mit welchen Einflüssen auf die mechanischen Eigenschaften der Struktur zu rechnen ist. Gleiches gilt für die DIN EN ISO 21368:2024-10, welche als allgemeingültiger Standard für klebtechnische Anwendungen gelten soll. Stattdessen wird darauf verwiesen, dass die „Zulässigkeit anwendungsbezogen beurteilt werden kann“ bzw. „Relevanz der einzelnen Fehlerbilder von der jeweiligen Anwendung abhängt“ [2, p. 25] [3, pp. 86-87] [50, p. 113] [74, p. 16].

Ähnliches ist auch in konkreten Industriebereichen wie z. B. dem Yachtbau zu finden. Dort werden u. a. vermehrt FKV-Materialien eingesetzt, weshalb die Klebtechnik in diesem Bereich im Vergleich zum konventionellen Schiffbau bereits stärker verbreitet ist. Hier werden sowohl Kiel- als auch Deck-Rumpf-Verbindungen bereits geklebt. Für diese kritischen Verbindungen liefern Klebstoffhersteller genaue Arbeitsanweisungen, die allerdings nach der Ausführung der Klebverbindung enden und keine weiteren Schritte zur regelmäßigen Prüfung der Klebnaht enthalten. Auch die DIN 2304-2:2024-10, welche speziell das Kleben im Schiffbau adressiert, gibt lediglich eine Auswahl an möglichen geeigneten Inspektionsmethoden, um die Einhaltung der im Qualitätsplan festgelegten Abnahmekriterien zu überprüfen, ohne genaue Vorgaben zu geben [50, p. 48] [75, p. 26] [76] [77, pp. 36-38] [78, pp. 54-57].

Einen anderen Ansatz verfolgt die Quelle [79], welche sich damit beschäftigt hat, ein Konzept aufzustellen, um die Nutzungsdauer einer WEA über die ausgelegte Lebensdauer hinaus zu erweitern. Insbesondere die Rotorblätter bestehen zu einem Großteil aus klebtechnisch gefügten Komponenten. Entsprechende Konzepte zur Erweiterung der Lebensdauer beruhen auf dem *damage tolerance concept*, welches besagt, dass eine beschädigte Struktur die im Betrieb auftretenden Lasten weiterhin bis zu einem bestimmten Ausmaß ertragen kann. Die Weiterbelastung von fehlerbehafteten Verbindungen wird auch in anderen Quellen thematisiert. Hier werden u. a. rissbehaftete Nietverbindungen im Flugzeugbau beschrieben, die bis zu einer definierten Ausprägung toleriert werden, bevor umgehend Maßnahmen ergriffen werden müssen. Auch flexible hochelastische Klebstoffsysteme zeigen im Gegensatz zu vielen hochfesten

und steifen Strukturklebstoffen unter schwingender Beanspruchung selbst bei hohen Lastamplituden in der Regel ein fehlertolerantes Versagensverhalten. Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass zwischen Anriss und Totalversagen eine nennenswerte Restlebensdauer verbleibt, die als eine Restnutzungsdauer der Klebverbindung angesehen werden kann. Hinsichtlich der zunehmenden Zähelastifizierung von beispielsweise hochsteifen Epoxidharzen zeigen jedoch auch diese Klebstoffe ein immer fehlertoleranteres Versagensverhalten auf. Dies legt eine Weiterführung des *damage tolerance concept* für klebtechnische Anwendungen nahe [21, p. 2] [80, pp. 29-39] [81, pp. 241-271] [82] [83, pp. 1, 3].

Auch in der Luftfahrtindustrie wird das Thema EoD sehr intensiv bei der Herstellung und Verarbeitung von Faserverbundbauteilen aus CFK und GFK sowie beim Verkleben dieser behandelt. Hier werden durch vielfältige zfP-Verfahren entsprechende Material- und Defekt-Charakterisierungskennwerte ermittelt, um Festigkeitskennwerte des Materials anhand des vorhandenen Defekts abzuleiten. Trotz vieler durchgeführter Untersuchungen bedarf es der Weiterentwicklung der eingesetzten Methoden durch verschiedene Institutionen, um allgemeingültige Rückschlüsse auf die Sicherheit von Klebverbindungen ziehen zu können [84, pp. 5-10] [85, p. 7].

Die aufgeführte Situation zeigt, dass es Fortschritte hinsichtlich der Qualitätsstandards bei Klebverbindungen gibt, eine vollständige Einbeziehung von Grenzwerten und Standards in der Klebtechnik jedoch noch nicht gegeben ist. Trotz aufwendiger Nachweisführungen, bestehend z. B. aus Berechnungen zur Auslegung der Fügeverbindung, einer Kombination von zerstörenden Prüfungen auf Coupon-Ebene oder im Realmaßstab sowie dokumentierter Erfahrungen, verhindert u. a. die fehlende Normung zu den Auswirkungen von Imperfektionen in Klebverbindungen immer noch die breite Anwendung der Klebtechnik als Fügeverfahren. Die umfangreiche Prüfung jeglicher eingesetzter Materialpaarungen, um sichere klebtechnische Anwendungen zu garantieren, das allgemein sehr zeitintensive Vorgehen, welches vorrangig in einer Einzelfallzulassung resultiert, zusammen mit der Unsicherheit vor Schadensfällen im Einsatz durch Mangel an Langzeiterfahrung führen häufig dazu, dass insbesondere in Bereichen hoher Belastungen auf andere Fügeverfahren umgeschwenkt wird. Daraus ergibt sich die Forderung, dass die Standards mit den Auswirkungen von Fehlstellen in Klebverbindungen erweitert werden sollen, um diese möglichst früh in Bezug auf den Einsatz der Struktur abschätzen zu können [50, pp. 32-34] [75, pp. 17-22] [86].

Die Schweißtechnik ist in diesem Hinblick bereits fortschrittlicher und hat es seit Beginn des industriellen Einsatzes Anfang des 20. Jahrhunderts geschafft, frühzeitig Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu integrieren. Abbildung 19 zeigt eine Übersicht aus der DIN EN ISO 5817:2023-07, wie mit Imperfektionen in Schweißverbindungen in Abhängigkeit der Anforderungen an die Schweißnaht (B bzw. P3: höchste bis D bzw. P1: niedrigste Anforderungen) umzugehen ist [86, p. 8] [87, pp. 11-31].

Ordnungsnr. nach DIN EN ISO 6520-1	Benennung nach DIN EN ISO 6520-1	Beschreibung nach DIN EN ISO 8501-3	DIN EN ISO 5817			DIN EN ISO 8501-3		
			D	C	B	P1	P2	P3
602	Spritzer	Schweißspritzer	+	+	+	*	*	-
514	Unregelmäßige Nahtzeichnung	Geriffelte /profilierte Schweißnaht	+	+	+	+	*	-
615	Schlackenrest	Schweißschlacke	+	+	+	-	-	-
501	Einbrandkerbe	Randkerbe	*	*	*	+	*	-
2017	Oberflächenpore	Schweißporosität	*	*	-	+	*	-
516	Wurzelporosität		*	-	-	+	*	-
2025	Offener Endkraterlunker	Krater am Schweißnahtende	*	*	-	+	*	-

\+ zulässig Einschränkung oder vom Regelwerk nicht behandelt
* bedingt zulässig: zulässig unter Einhaltung von Grenzwerten
\- unzulässig

Abbildung 19: Bewertungsgruppen von Imperfektionen in Schweißverbindungen [87, p. 4]

Es zeigt sich, dass bei schweißtechnischen Anwendungen konkrete Kenntnisse über die Auswirkungen von Fehlstellen in Schweißverbindungen aufgebaut wurden und daher direkt bei Detektion der aufgeführten Imperfektionen eingeschätzt werden kann, ob diese tragbar für den jeweiligen Anforderungsbereich sind oder nachgebessert werden müssen. Darüber hinaus werden derzeit beispielsweise schweißtechnische Fertigungsprozesse auf Werften durch externe kleine und mittelständische Unternehmen (KmU) überwacht und zertifiziert. Dies ist möglich, weil zu schweißtechnischen Fertigungsprozessen, wie etwa in Quelle [88], klare Vorgaben und Kriterien definiert sind, wie diese Prozesse auszuführen und zu überwachen bzw. prüfen sind. Der Umgang mit Abweichungen zum Prozess bzw. hinsichtlich Inhomogenitäten ist bekannt, wodurch Zulassungen vereinfacht werden und der Einsatz dieses Verfahrens attraktiver wird. Dies wurde durch die frühzeitige Integration qualitätssichernder Maßnahmen geschaffen, welche in jeglichen Einsatzbereichen und Anwendungsfällen der Schweißtechnik vorzufinden sind (vgl. Abbildung 20) [74, pp. 16-20] [86, pp. 8-9].



Abbildung 20: Beispiele für Qualitätsstandards in der Schweißtechnik [74, p. 17]

Die Schweißtechnik hat gezeigt, dass ein neuartiges Fügeverfahren, dem zu Beginn des 20. Jahrhunderts kein Vertrauen entgegengebracht wurde, über ein umfassendes Prozessverständnis zusammen mit einer frühzeitigen Integration von Qualitätssicherungsmaßnahmen zu einem vertrauenswürdigen Fügeverfahren (im Laufe des 20. Jahrhunderts) werden kann. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, neben der Verwendung von Sicherheitsfaktoren, welche die zu erwartenden langzeitbedingten Abminderungen der Klebstoffeigenschaften unter Einsatz- und Umgebungsbedingungen bereits im Dimensionierungsprozess berücksichtigen, auch eine Ausweitung der Normung auf die Auswirkungen von Imperfektionen entsprechend des Vorbilds der Schweißtechnik zu etablieren. Somit könnten direkte Rückschlüsse auf die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften getroffen und die Kritikalität der Fehlstellen bewertet werden. Imperfektionen, die regelmäßig durch schwankende Fertigungsqualität bereits im Herstellungsprozess eingebracht werden, können im Dimensionierungsprozess mit geeigneten Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden [89, pp. 19-33]. Die in Kapitel 2 aufgeführte Literatur zeigt bereits, dass der EoD in Bezug auf Klebverbindungen sowie die Detektion der Fehlstellen Thema vieler Untersuchungen war.

Darüber hinaus wird jedoch deutlich, dass die Komplexität des Klebens weitere Studien notwendig macht, um die zahlreichen Einflussfaktoren (z. B. Fehlerlage, Beanspruchungsart, -richtung, Ausbildung der Klebschicht in Abhängigkeit der Fügeteilmaterialien und Oberflächenbeschaffenheiten) abzudecken. Nur so können zuverlässige allgemeingültige Aussagen zum Einfluss von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen getroffen und in einem Regelwerk zusammengefasst werden, auf das sich Anwendende in klebtechnischen Bereichen beziehen können. Dazu sind weitere Versuche sowie das Zusammentragen der Erfahrungen aus bereits durchgeführten Arbeiten notwendig. Anhand dieser Erkenntnisse ergibt sich die wissenschaftliche Fragestellung, wie die bereits in der Industrie etablierte Bewertung von Fehlstellen in Schweißverbindungen auf die Besonderheiten von klebtechnisch gefügten Verbindungen übertragen werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Ermittlung der Auswirkungen von Imperfektionen in Klebverbindungen auf die mechanischen Eigenschaften und die Überführung der Erkenntnisse in einen Normvorschlag. Trotz zahlreicher Arbeiten wurden bisher keine einheitlichen Richtlinien in den klebtechnischen Normen definiert. An diese Gegebenheit soll diese Arbeit anknüpfen und das Thema voranbringen. Die vorgestellten zfP-Verfahren werden in dieser Arbeit nicht weiter thematisiert. Die aufgeführte Literatur hat gezeigt, dass es vielfältige Möglichkeiten gibt, um verschiedenste Defekte in Klebverbindungen zu ermitteln. Eine Überarbeitung des Umgangs mit diesen in klebtechnischen Normen ist anzustreben. Dies stellt jedoch einen Folgeschritt zu den in dieser Schrift angestrebten Arbeiten dar, da die Änderungen auf den Erkenntnissen des EoD aufbauen müssen, welcher im folgenden Kapitel behandelt wird.

3 Materialien und Methoden

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Materialien vorgestellt und die Methodik der durchgeführten Tests erläutert. Zudem wird der Herstellungsprozess der Probekörper beschrieben. Anschließend erfolgt eine Vorstellung der unterschiedlichen Imperfektionen sowie deren Einbringung in Klebverbindungen.

3.1 Verwendete Materialien

Die Literatur hat gezeigt, dass bereits vielfältige Arbeiten zur Untersuchung des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen gelaufen sind. Es wurde deutlich, dass vor allem Fehlerart, -lage, Art der Beanspruchung und eingesetzte Materialien Einflussfaktoren darstellen, welche in dieser Arbeit thematisiert werden sollen. Vor allem letzteres beschränkte sich in den gelaufenen Publikationen häufig auf FKV- und Stahlfügeteile. Die aktuellen Bestrebungen zum Leichtbau fokussieren neben weiteren Fügeverfahren, wie z. B. der Klebtechnik, auch Leichtmetalle, wie beispielsweise Aluminium. Dieses Metall ist bereits weit in verschiedenen Industriebranchen verteilt, weshalb dieses Fügeteilmaterial für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Zusammenfassend wird somit der EoD von geklebten hochsteifen Aluminiumverbindungen untersucht. Zur Verbindung der Fügeteile wird der strukturelle Konstruktionsklebstoff *Scotch-Weld 7271 B/A* von der Firma *3M* verwendet. Ausgewählte technische Informationen zu dem verwendeten Klebstoffsystems sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Technische Informationen zum Scotch-Weld 7271 B/A [90]

Hersteller	3M
Handelsname	Scotch-Weld 7271 B/A
Chargennummern (für Versuche in dieser Arbeit)	2445_2448 und 6777_6778
Lagerungsbedingungen	RT, lichtgeschützt
Mischungsverhältnis (nach Volumen)	1:1
Verarbeitungszeit bei RT	12 min
Zugscherfestigkeit (ASTM D3165)	22,7 MPa

Dieser 2-Komponenten-Klebstoff auf Epoxidharzbasis, welcher zu einem Duromer aushärtet, eignet sich zur Verklebung von Metall- und Faserverbundwerkstoffen und weist sehr hohe Zug- und Schälfestigkeiten auf. Aufgrund dieser Eigenschaften ist dieses Klebstoffsystem prädestiniert für den Einsatz bei den Untersuchungen zur Schadensbewertung für strukturelle Klebverbindungen (nach [20, p. 27] und [91, p.

140]: Festigkeit > 10 MPa, Reißdehnung < 70 %). Um die Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften charakterisieren zu können, müssen sowohl fehlerfreie als auch fehlerbehaftete Prüfkörper zerstörenden Prüfungen unterzogen werden. Dies soll in statischen und zyklischen Versuchen von gealterten und ungealterten Proben erfolgen. Mithilfe der entstehenden Daten können Rückschlüsse auf die Kritikalität der untersuchten Fehlstellen gezogen und Abminderungsfaktoren berechnet werden. Dazu ist zunächst ein Standardprüfkörper zu definieren.

3.2 Standardprüfverfahren zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Klebverbindungen

Die experimentellen Versuche dienen dazu, den Einfluss verschiedenster Imperfektionen in der Klebschicht auf die mechanischen Eigenschaften des Klebverbunds zu untersuchen. Dafür bedarf es eines Standardversuchs, mit dem die Ergebnisse gleichartiger Versuchskörper in einer zerstörenden Prüfung miteinander verglichen werden können. Der Zugscherversuch nach DIN EN 1465:2009-07, welcher zu den am häufigsten verwendeten Prüfverfahren für Untersuchung von Klebverbindungen zählt, erfüllt diese Voraussetzungen und wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Um vielfältigere Möglichkeiten zu haben, Imperfektionen in der Klebschicht zu platzieren, werden die Abmessungen der Klebschicht in dieser Arbeit auf 50 mm x 50 mm x 5 mm erhöht (vgl. Abschnitt 2.5.1). Infolgedessen werden ebenfalls größere Aluminiumfügeteile verwendet, als es die Norm vorschreibt. Diese weisen die Maße von 180 mm x 50 mm x 10 mm auf, was auf Abbildung 21 dargestellt ist [25].

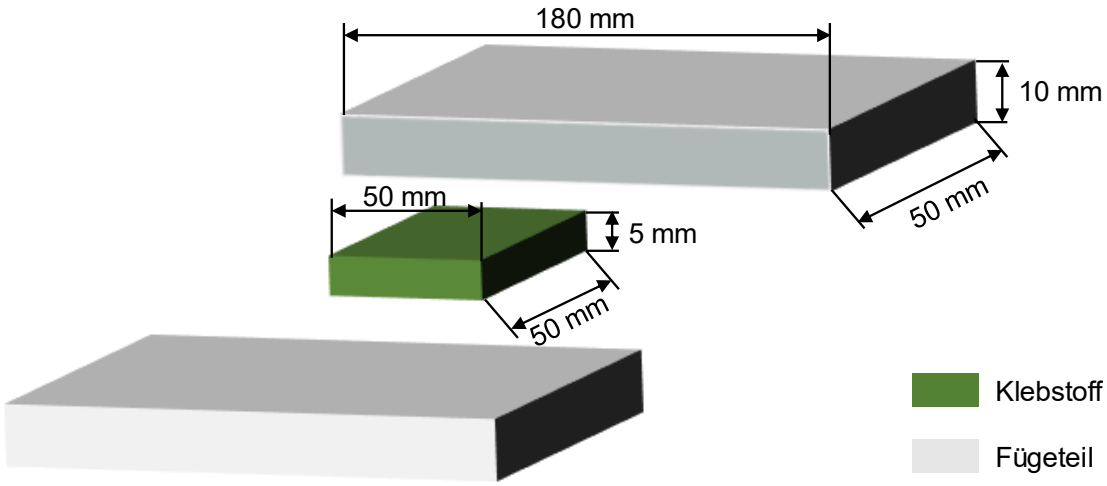


Abbildung 21: Zugscherprobe mit vergrößerten Dimensionen (Explosionsdarstellung)

Die Fügeteildicke von 10 mm wird gewählt, um die Biegesteifigkeit zu erhöhen und damit die Verformung dieser während des Zugscherversuchs zu reduzieren. Die Nut-

zung steiferer Fügeteile führt zu einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung in der Klebschicht und vermindert den Betrag der Spannungsspitzen im Randbereich, weshalb abweichend von der Norm dickere Fügeteile verwendet werden [25].

3.3 Probekörperherstellung

Um eine maximale Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Probenserien sicherzustellen, werden alle Zugscherproben in einem definierten Prozess hergestellt, welcher sich zwischen den Serien nur durch die eingebrachten Imperfektionen unterscheidet. Die Oberflächenbehandlung orientiert sich an den Erkenntnissen aus dem Abschnitt 2.3.1. Der Herstellungsprozess ist wie folgt definiert, um eine Haftung zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche zu garantieren:

1. Zweimaliges Reinigen der Fügeteiloberfläche mit einem mit Methylethylketon (MEK) getränkten fusselfreien weißen Tuch
2. Ablüften der Fügeteile für mindestens 10 min
3. Sandstrahlen der zu verklebenden Fügeteiloberfläche (Strahlwinkel ca. 45° | Strahlabstand ca. 50 mm) mit Edelkorund F54 (Körnung von 250…355 µm)
4. Zweimaliges Reinigen der Fügeteiloberfläche mit einem mit MEK getränkten fusselfreien weißen Tuch
5. Ablüften der Fügeteile für mindestens 10 min
6. Säubern der Fügeteiloberfläche mit staub- und ölfreier Druckluft
7. Anfertigen der Proben in Kleblehre und ggf. Einbringen von Imperfektionen
8. Tempervorgang (6 h bei 80 °C mit einer Temperaturrampe von 10 K/h)
9. Konditionierung für 24 h bei Normalklima (23 °C ± 2 °C und 50 % ± 10 % relative Luftfeuchtigkeit (rel. LF)) vor der Prüfung [92, p. 5]

Die in Abschnitt 2.3 erwähnten generischen Schadensformen müssen reproduzierbar und realitätsnah in den Zugscherproben mittels verschiedener Hilfsmittel in die Klebschicht eingebracht werden, was nachfolgend beschrieben ist.

3.4 Verfahrensentwicklung zur Erzeugung generischer Schadenstypen in hochsteifen Klebverbindungen

Dieser Abschnitt befasst sich auf Basis der Erkenntnisse aus Abschnitt 2.7 mit verschiedenen Methoden, um Schadenstypen reproduzierbar und realitätsnah in einer Laborumgebung in strukturellen Klebverbindungen einzubringen. Aufgrund teilweise gegensätzlicher Aussagen zur Kritikalität von Fehlstellen in Bezug auf die Lage dieser werden Imperfektionen in der gesamten Klebschicht platziert und beschränken sich nicht ausschließlich auf die kritischen Bereiche der Zugscherproben (vgl. Abbildung 7).

Fehlstellen werden aufgrund der häufig vorkommenden Querschnittsminderung generell festigkeitsvermindernde Auswirkungen zugeschrieben und führen vor allem bei hochsteifen Klebstoffsystemen zu Eigenspannungen, welche die Ausgangspunkte für Schädigungen bei Belastung bilden. Infolgedessen sind negative Auswirkungen aufgrund des Vorhandenseins von Imperfektionen trotz der Lage in weniger kritischen Bereichen zu erwarten und werden dementsprechend untersucht [7, pp. 292, 334].

Kohäsionsfehler in Klebverbindungen

Zur Erzeugung von Kohäsionsfehlern bzw. ellipsoiden Hohlräumen in Klebverbindungen, welche u. a. Lufteinschlüsse simulieren sollen, werden Polystyrolkugeln verwendet. Deren Eignung wurde bereits in verschiedenen Quellen bewiesen (vgl. Abschnitt 2.7). Sie weisen eine ähnliche Geometrie auf und enthalten einen hohen Luftanteil im Material. Darüber hinaus können sie in verschiedenen Größen reproduzierbar in die Klebschicht eingebracht und beliebig platziert werden, was die Umsetzung verschiedenster Variationen ermöglicht und damit die Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Proben garantiert. Aufgrund ihrer geringen Festigkeit (mit einem Unterschied von mindestens dem Faktor 240 zwischen expandiertem Polystyrol und Epoxidharz in Bezug auf die Druckfestigkeit [93, p. 114] [94, pp. 201-202]) wirken die Polystyrolkugeln nicht verstärkend auf den Klebverbund. Die Klebverbindungen werden in der Grenzschicht und/ oder der Kohäsionszone geschwächt. Um letztere maximal zu schwächen, werden Polystyrolvollkugeln (VK) mit einem Durchmesser von ca. 5 mm verwendet, was der Klebschichtdicke entspricht (vgl. Abbildung 26, rechts oben). Der maximale Durchmesser der VK befindet sich bei dieser Methodik in der Mitte der Klebschichtdicke und schwächt diesen Bereich größtmöglich. Mithilfe von Schablonen werden die VK in definierten Anordnungen in die Klebschicht gebracht und verdrängen somit verschiedene Anteile an Klebstoffvolumen, was in Tabelle 4 und auf Abbildung 22 zu sehen ist.

Tabelle 4: Verdrängtes Klebstoffvolumen durch die Einbringung von VK in verschiedenen Anordnungen

Anordnung	**2x3**	**3x4**	**4x6**	**6x6**
Verdrängtes Klebstoffvolumen in %	3	6	13	19

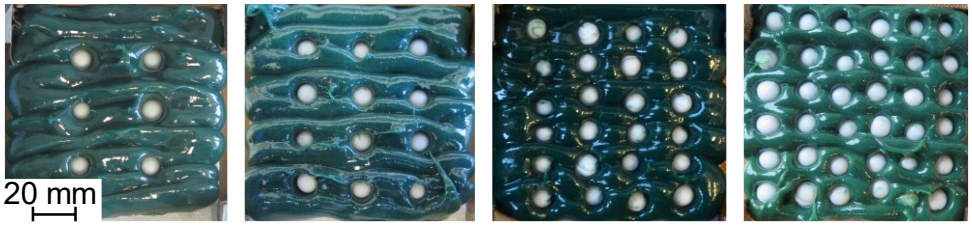


Abbildung 22: VK in der 2x3-, 3x4-, 4x6- und 6x6-Anordnung (v. l. n. r.) in der Klebschicht

Die Anordnungen werden gewählt, da in der schweißtechnischen Norm DIN EN ISO 5817:2023-07 Grenzwerte für Porositäten thematisiert werden. Abhängig von der Bewertungsgruppe finden sich zulässige Werte in einem Bereich von 2,5…16 %. Aufgrund dieser Werte werden sinnvolle Anordnungen für die Kohäsionsfehler entwickelt. Die maximale Ausprägung stellt die 6x6-Anordnung dar, um einen Mindestabstand sowohl zwischen den VK als auch zum Randbereich von 2,5 mm, was dem halben Durchmesser der VK entspricht, einzuhalten [87, pp. 20-33].

Zur Schwächung der Grenzschicht und Kohäsionszone werden diese halbiert. Die so entstehenden Polystyrolhalbkugeln (HK) werden anschließend ebenfalls mittels einer Schablone auf einem Fügeteil platziert. Wie auf Abbildung 26 (links oben) dargestellt, befindet sich der maximale Durchmesser der Kugeln somit in der Grenzschicht der Klebverbindung, wodurch diese größtmöglich durch Verdrängung von Klebstoffvolumen und Verdecken der Klebfläche (vgl. Abbildung 23 und Tabelle 5) geschwächt wird. Die Anordnungen entsprechen demselben Schema wie bei den VK.

Tabelle 5: Verdeckte Klebfläche und verdrängtes Klebstoffvolumen durch die Einbringung von HK in verschiedenen Anordnungen

Anordnung	**2x3**	**3x4**	**4x6**	**6x6**
Verdeckte Klebfläche in %	5	9	19	28
Verdrängtes Klebstoffvolumen in %	2	3	6	9

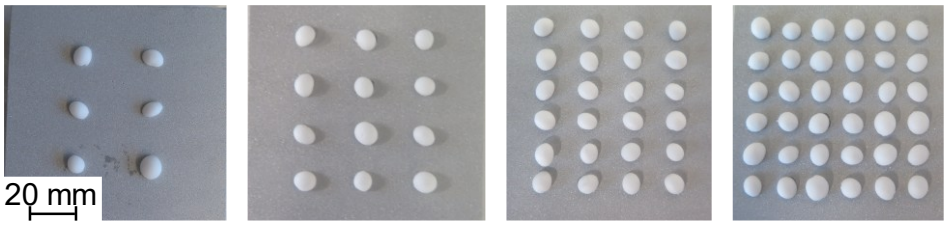


Abbildung 23: HK in der 2x3-, 3x4-, 4x6- und 6x6-Anordnung (v. l. n. r.) auf dem Fügeteil

Adhäsionsfehler in Klebverbindungen

Um Adhäsionsfehler zu simulieren, wird PTFE-Folie verwendet. In der Literatur (vgl. Abschnitt 2.7) wurde diese bereits vielfach verwendet und konnte ein reproduzierbares Schadensbild gewähren. Zudem liegt diese als Meterware vor und kann somit an verschiedenste geometrische Anforderungen angepasst und auf der Fügeteiloberfläche platziert werden. Weiterhin ist sie lediglich 0,1 mm stark, wodurch sie nahezu kein Klebstoffvolumen verdrängt, sobald sie in die Klebverbindung gebracht wird. Darüber hinaus besitzt PTFE eine sehr niedrige Oberflächenspannung (ca. 18,6 $\frac{mN}{m}$ [95, p. 159]) im Vergleich zu Epoxidharz (ca. 32,9 $\frac{mN}{m}$ [96, p. 6]), weshalb dieser nicht bzw. nur

schlecht auf der PTFE-Folie benetzen kann. Aufgrund dieser Eigenschaft kann der Klebstoff keine bis sehr wenig Adhäsionskräfte zur PTFE-Folie aufbauen, wodurch Bereiche mit schwacher Haftung entstehen. Auch diese wird in verschiedenen Ausprägungen zentral auf einem Fügeteil platziert und verdeckt eine Klebfläche von bis zu 75 % (vgl. Tabelle 6 und Abbildung 24). Die Literatur zeigte teilweise widersprüchliche Aussagen zur Kritikalität von Adhäsionsfehlern, welche zentral bzw. im Randbereich der Klebschicht vorhanden waren. Aus diesem Grund werden Ausprägungen gewählt, welche zentral auf einem Fügeteil platziert werden und mit steigenden Ausprägungen immer weiter in Richtung der Randbereiche der Klebverbindung vordringen.

Tabelle 6: Verdeckte Klebfläche durch die Einbringung von PTFE-Folie in verschiedenen Ausprägungen

Ausprägung	**10 %**	**25 %**	**50 %**	**75 %**
Verdeckte Klebfläche in %	10	25	50	75

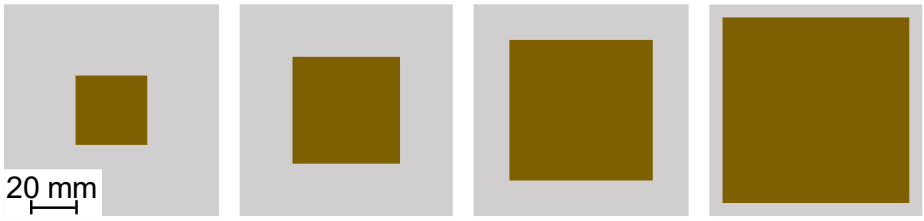


Abbildung 24: PTFE-Folie in der 10 %-, 25 %-, 50 %- und 75 %-Ausprägung auf der gesamten Klebfläche

Abweichungen der Klebfugengeometrie

Um Abweichungen der Klebfugengeometrie, insbesondere im Randbereich der Klebverbindung, zu simulieren, werden Einleger aus Aluminium hergestellt. Diese werden während des Herstellungsprozesses in der Kleblehre platziert und bringen entweder eine keil- oder radiusförmige Einschnürung, sowohl längs als auch quer zur Zugrichtung, in den Randbereich der Klebschicht (vgl. Abbildung 25) ein.

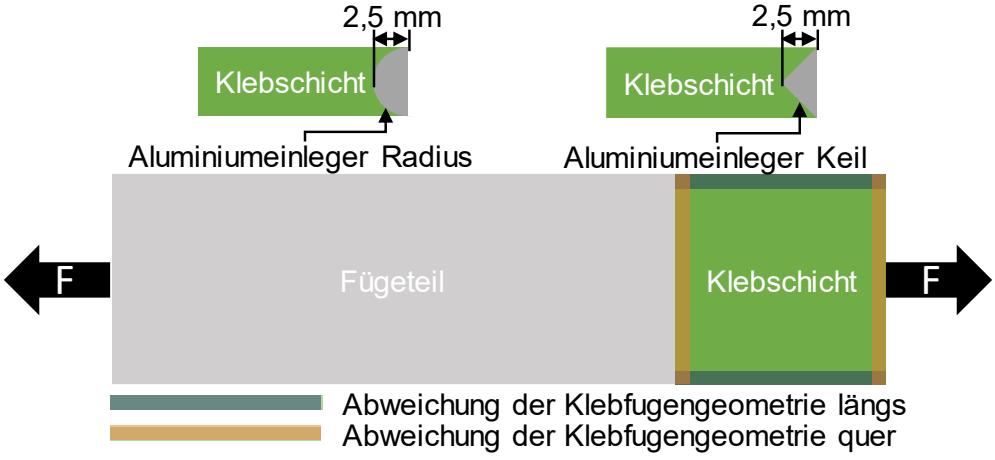


Abbildung 25: Platzierung der Aluminiumeinleger, um Abweichungen der Klebfugengeometrie herzustellen

Diese Geometrien werden gewählt, da mit ihnen sowohl Schwund (radiusförmige Einschnürungen) als auch unachtsam entfernte Bereiche mittels eines Spatels (keilförmige Einschnürungen) abgebildet werden können. In Analogie zum Radius der VK ragen sie 2,5 mm in die Klebschicht hinein. Nach vollständiger Aushärtung des Klebstoffs werden die Aluminiumeinleger wieder entfernt, woraufhin lediglich die Abweichung der Klebfugengeometrie in der Klebverbindung verbleibt.
Eine schematische Darstellung aller eingebrachten Imperfektionen in verschiedenen Anordnungen bzw. Ausprägungen ist auf Abbildung 26 dargestellt.

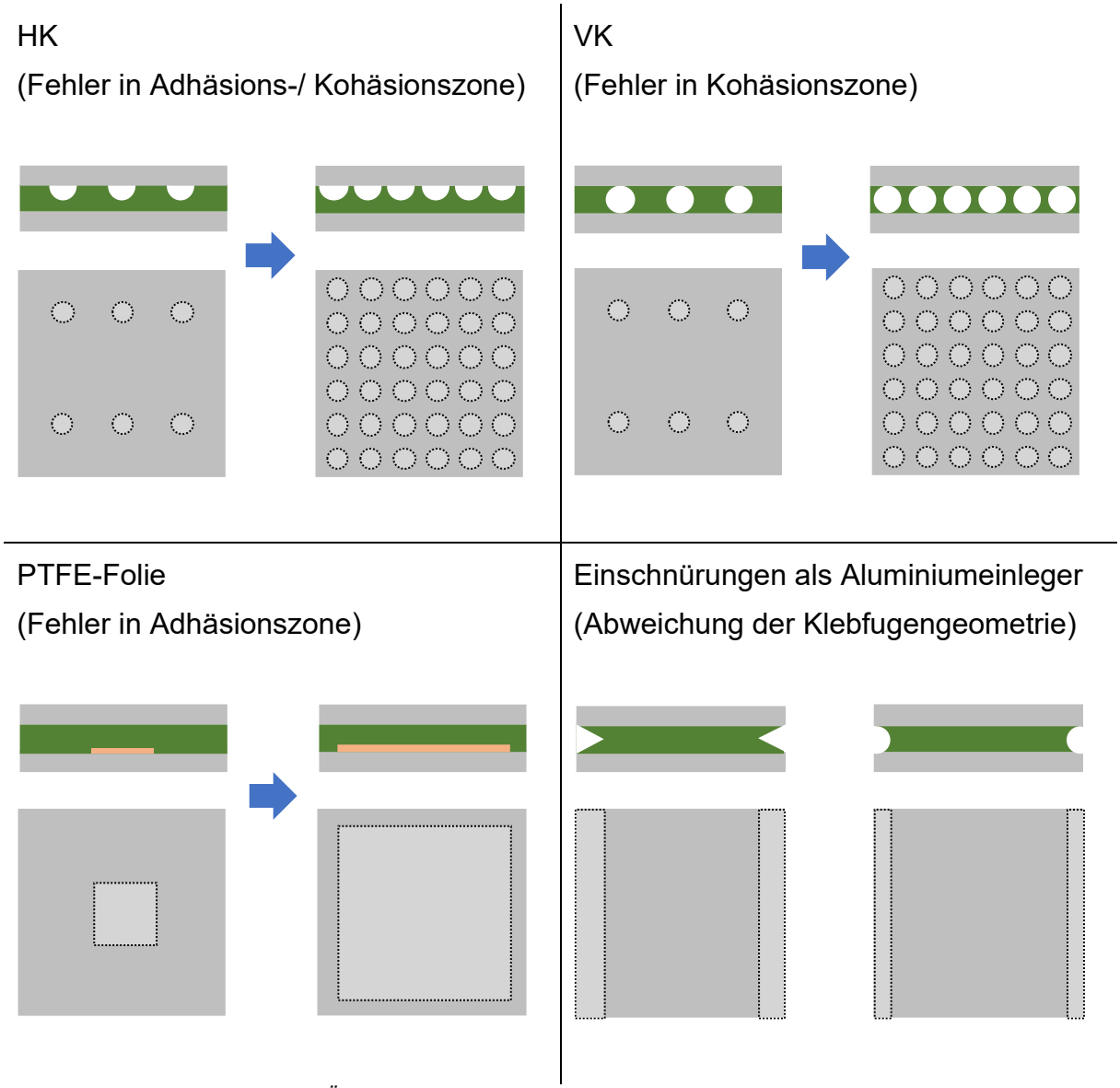


Abbildung 26: Schematische Übersicht der eingebrachten Imperfektionen

4 Untersuchung des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von hochsteifen Klebverbindungen

In diesem Kapitel werden auf die Durchführung der experimentellen Versuche und numerischen Berechnungen eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse präsentiert und einer detaillierten Auswertung unterzogen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Aussagekraft von experimentellen Untersuchungen zum Einfluss von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen ist die Beherrschung des gesamten Klebprozesses. Das bedeutet, dass die Adhäsionskräfte zwischen Klebschicht und Fügeteiloberfläche und die Kohäsionskräfte innerhalb der Klebschicht mit Sicherheit reproduzierbar gewährleistet sind. Für die nachfolgenden Versuche wurde in Vorversuchen bestätigt, dass durchgehend Haftung zwischen Klebstoff und Fügeteil vorhanden ist und die fehlerfreien Referenzproben ausschließlich ein kohäsives Bruchbild aufzeigen. Zudem wird das Versagen als Hauptkriterium betrachtet, weshalb der Einfluss auf die Festigkeit ermittelt wird. Nur unter diesen Gegebenheiten kann eine Beurteilung der Qualität der Klebverbindungen aufgrund des Vorhandenseins von Fehlstellen in diesen erfolgen [7, p. 801].

4.1 Versuchsgegenstand

Kunststoffe sind während ihrer Betriebszeit Alterungseinflüssen ausgesetzt und verändern ihre Ursprungseigenschaften. Die Abnahme der Festigkeit hängt beispielsweise von verschiedenen Beanspruchungen ab (vgl. Abschnitt 2.4). Um den Einfluss von Imperfektionen in Klebverbindungen auf die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln, werden zunächst statische Versuche auf experimenteller Basis an ungealterten Zugscherproben durchgeführt. Diese werden ebenfalls in numerischen Berechnungen simuliert, um die Auswirkungen der Fehlstellen auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht näher zu beleuchten. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Untersuchungen werden ausgewählte Probenserien weiteren Beanspruchungen ausgesetzt (Medien- und Temperatureinfluss, zyklische Belastung), um die Auswirkungen von Imperfektionen im Betrieb weiter zu untersuchen.

4.2 Statische Versuche an ungealterten hochsteifen Klebverbindungen

In diesem Abschnitt wird auf die statischen Versuche an ungealterten Proben eingegangen. Es werden zunächst die Kraft-Weg-Diagramme erstellt, um mithilfe der resultierenden Daten die Zugscherfestigkeiten berechnen zu können. Mittels dieser werden die Probenserien anschließend in Relation zueinander gesetzt.

Anhand der aufgeführten Schadenstypen ergeben sich die in Tabelle 7 und Tabelle 8 abgebildeten Versuchsmatrizen, in denen alle Bezeichnungen und die zu den Prüfkörpern gehörigen Informationen zusammengefasst sind.

Tabelle 7: Versuchsmatrix der ungealterten statischen Versuche Teil 1

Anzahl	6	6	6	6	6	6	6	6	6	**∑ 54**
Fehlerort	-	gleichmäßig verteilt				längs	quer	längs	quer	
Ausprägung/ Anordnung	-	2x3	3x4	4x6	6x6	Keil		Radius		
Fehlertyp	-	VK				Aluminiumeinleger				
Klebschicht	50 mm x 50 mm x 5 mm									
Klebstoff	3M Scotch-Weld 7271 B/A									
Fügeteil	Aluminium (180 mm x 50 mm x 10 mm)									
Probenbezeichnung	**Referenz**	**2x3 VK**	**3x4 VK**	**4x6 VK**	**6x6 VK**	**Keil/l**	**Keil/q**	**Radius/l**	**Radius/q**	

Tabelle 8: Versuchsmatrix der ungealterten statischen Versuche Teil 2

Anzahl	6	6	6	6	6	6	6	6	**∑ 48**
Fehlerort	gleichmäßig verteilt auf einem Fügeteil				zentral platziert auf einem Fügeteil				
Ausprägung/ Anordnung	2x3	3x4	4x6	6x6	10 %	25 %	50 %	75 %	
Fehlertyp	HK				PTFE-Folie				
Klebschicht	50 mm x 50 mm x 5 mm								
Klebstoff	3M Scotch-Weld 7271 B/A								
Fügeteil	Aluminium (180 mm x 50 mm x 10 mm)								
Probenbezeichnung	**2x3 HK**	**3x4 HK**	**4x6 HK**	**6x6 HK**	**10 %**	**25 %**	**50 %**	**75 %**	

4.2.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in statischen Versuchen an ungealterten Klebverbindungen

In den statischen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben wird ermittelt, welche Kräfte die Klebverbindungen mit der durchgeführten Materialpaarung, Oberflächenbehandlung usw. aufnehmen können, bevor sie versagen. Da sich diese Vorgehensweise bei allen Proben wiederholt (vgl. Abschnitt 3.3), können die Daten später

mit den Ergebnissen fehlerbehafteter Prüfkörper ins Verhältnis gesetzt werden, um die Auswirkungen von Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen zu ermitteln. Die ungealterten Zugscherproben werden zerstörend an einer Universalprüfmaschine (vgl. Abbildung 27) untersucht. Die Prüfparameter der Versuche sind in Tabelle 9 aufgelistet.

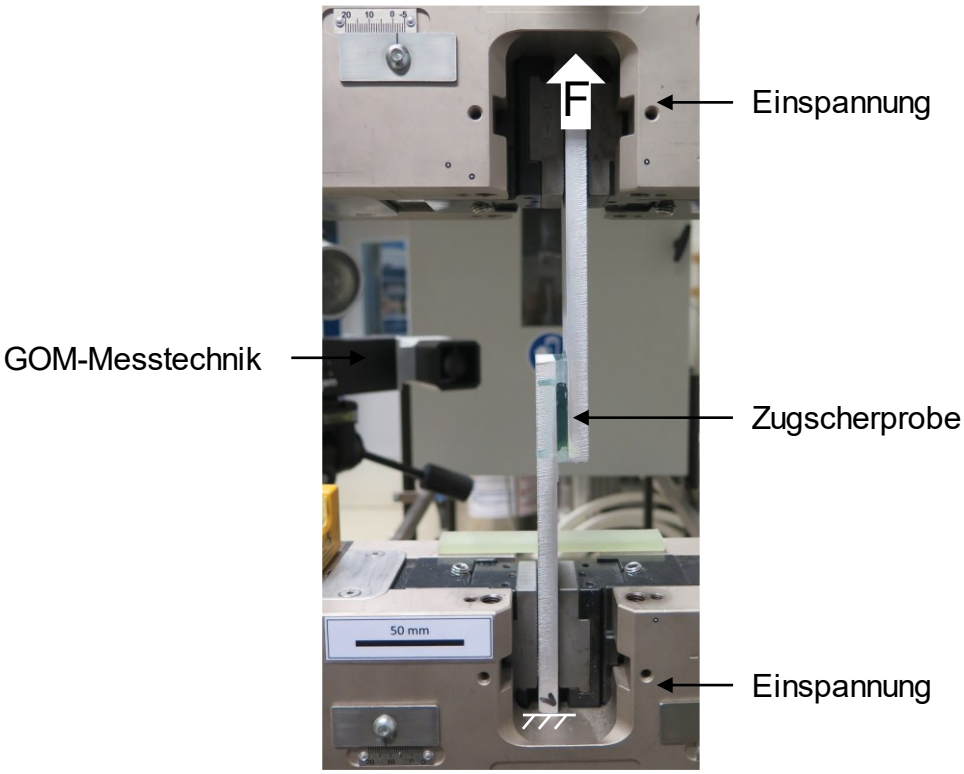
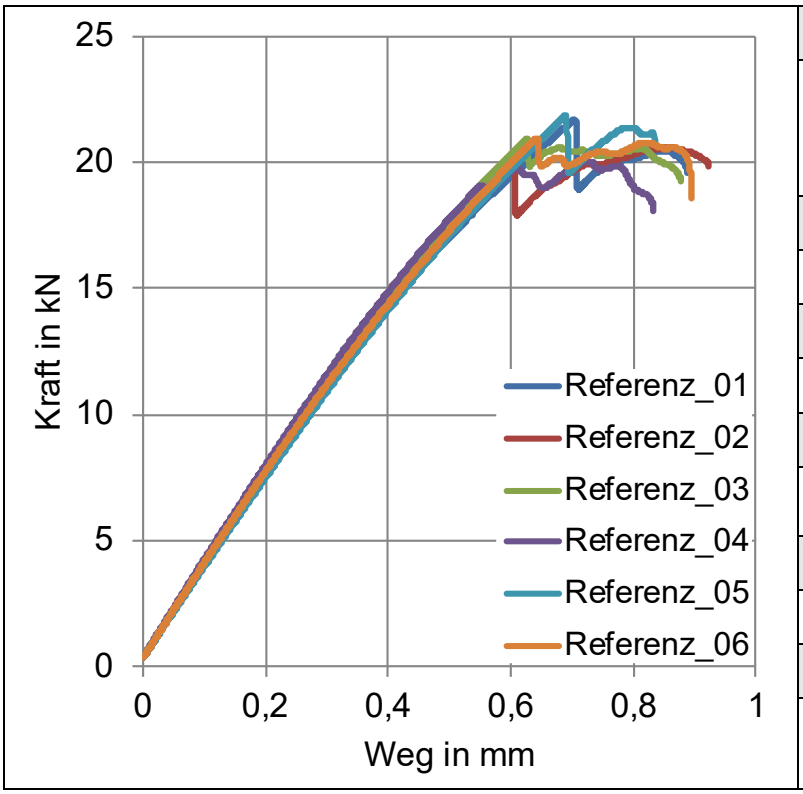


Abbildung 27: Prüfaufbau des Zugscherversuchs in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07

Tabelle 9: Parameter der statischen Zugscherversuche

Norm	In Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07
Prüfmaschine	ZwickRoell Z050 (EQ-No.: 12405317) Kraftmessdose 50 kN Genauigkeitsklasse: 0,5
Belastungsart	Quasistatisch
Maschinensteuerung	Weggesteuert
Prüfparameter	Raumtemperatur (RT), rel. LF unkontrolliert
Vorkraft	100 N
Geschwindigkeit Vorkraft	$5\ \frac{mm}{min}$
Prüfgeschwindigkeit	$2\ \frac{mm}{min}$
Aufzeichnung der Wegverschiebung	Traversenweg

Im Folgenden wird beispielhaft auf die Ergebnisse der Referenzserie eingegangen. Alle weiteren statischen Untersuchungen an ungealterten Proben folgen dem gleichen Schema. Aus dem zerstörenden Zugscherversuch resultiert ein Kraft-Weg-Diagramm, welches auf Abbildung 28 dargestellt ist.



Werkstoffe
Fügeteile: AlMg3 Klebstoff: 3M Scotch-Weld 7271 B/A
Prüfnorm
DIN EN 1465: 2009-07
Prüfmaschine
ZwickRoell Z050
Prüfgeschwindigkeit
v = 2 $\frac{mm}{min}$
Wegmessung
Traversenweg
Probengeometrie
Zugscherprobe 310 mm x 50 mm x 25 mm

Abbildung 28: Kraft-Weg-Diagramm der fehlerfreien Zugscherproben (Referenzserie)

Mithilfe der Maschinendaten kann die Maximalkraft F_{max} ermittelt werden. Zusammen mit der Klebfläche A kann somit die Zugscherfestigkeit $\tau_{Verbund}$ für diesen Versuch berechnet werden (vgl. Formel 3).

Formel 3: Berechnung der Zugscherfestigkeit

$$\tau_{Verbund} = \frac{F_{max}}{A}$$

Legende:

$\tau_{Verbund}$	Zugscherfestigkeit in $\frac{N}{mm^2}$
F_{max}	Maximalkraft in N
A	Klebfläche in mm

Aus den Daten der sechs Proben einer Serie, um laut Norm ein Grundmaß an statistischer Sicherheit abbilden zu können, werden Mittelwerte gebildet. Die Ergebnisse der Referenzserie sind in Tabelle 10 aufgelistet [25, p. 6].

Tabelle 10: Ergebnisse der Referenzserie

Referenz	Maximalkraft	Zugscherfestigkeit
Mittelwert	21042 N	8,4 MPa
Standardabweichung	702 N	0,3 MPa
Variationskoeffizient	0,03	0,03

Nach DIN EN ISO 10365:2022-05 weist die Mehrheit der Proben einen substratnahen Kohäsionsbruch (SCF) auf. Ein kleiner Teil der Bruchfläche ist ein Kohäsionsbruch (CF). In letzterem beginnt das Risswachstum bei Versagen der Klebverbindung. Der Riss verläuft anschließend weiter in Richtung einer Fügeteiloberfläche und geht in den SCF über, wo er sich über die gesamte Klebschicht ausbreitet (vgl. Abbildung 29). Der Bereich nahe der Fügeteiloberfläche weist veränderte Eigenschaften im Vergleich zur Klebschichtmitte auf und stellt in der Klebverbindung den schwächsten Bereich dieser dar (vgl. Abschnitt 2.2), weshalb der Riss entlang der Grenzschicht verläuft. In der DIN EN ISO:21368-10 werden Klebverbindungen in verschiedene Sicherheitsklassen in Abhängigkeit von der Ebene der Sicherheitsanforderungen eingeteilt. Diese reichen von S1- (Sicherheitsanforderung: hoch) bis zu S4-Klebungen (Sicherheitsanforderung: keine). Laut der Norm werden Bruchbilder bei Klebverbindungen der höchsten Anforderungen (Klasse S1 und S2) mit einem Anteil eines CF oder SCF von über 70 % als zulässig eingestuft. Diese Voraussetzung werden im Rahmen der Untersuchungen abgedeckt, weshalb die Versuche als zulässig eingestuft und als Referenzwerte zur Beurteilung des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen verwendet werden können. Alle Kraft-Weg-Diagramme, Abmessungen, zusammengefasste Ergebnisse und Bruchbilder der restlichen ungealterten Zugscherversuche sind in Anhang 1 bis Anhang 50 zu finden [50, pp. 21, 85-86] [97, p. 6].

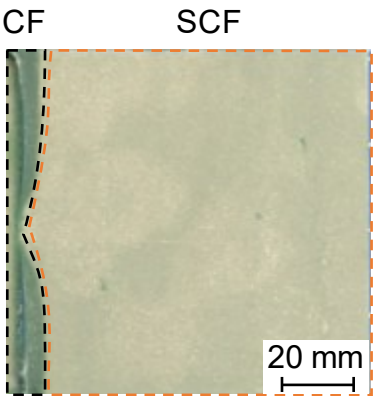


Abbildung 29: Verschiedene Bereiche der gesamten Bruchfläche bei einer Zugscherprobe ohne Imperfektionen

4.2.2 Untersuchung ausgewählter Prüfkörper mit der *GOM*-Messtechnik

Als Ergänzung zur zerstörenden Prüfung werden ausgewählte Zugscherproben während der Versuche mit einer *ARAMIS 3D Camera 6M* der Firma *GOM* aufgezeichnet. So können weitere Erkenntnisse über das Materialverhalten des Klebstoffs während der Belastung ermittelt und Vergleichswerte für die später folgenden numerischen Untersuchungen aufgenommen werden (vgl. Abschnitt 2.5.2). Die Proben mit Imperfektionen in der Grenzschicht werden während der zerstörenden Prüfungen mit einer Frequenz von 10 Hz dokumentiert. Der Versuchsaufbau ist auf Abbildung 30 abgebildet.

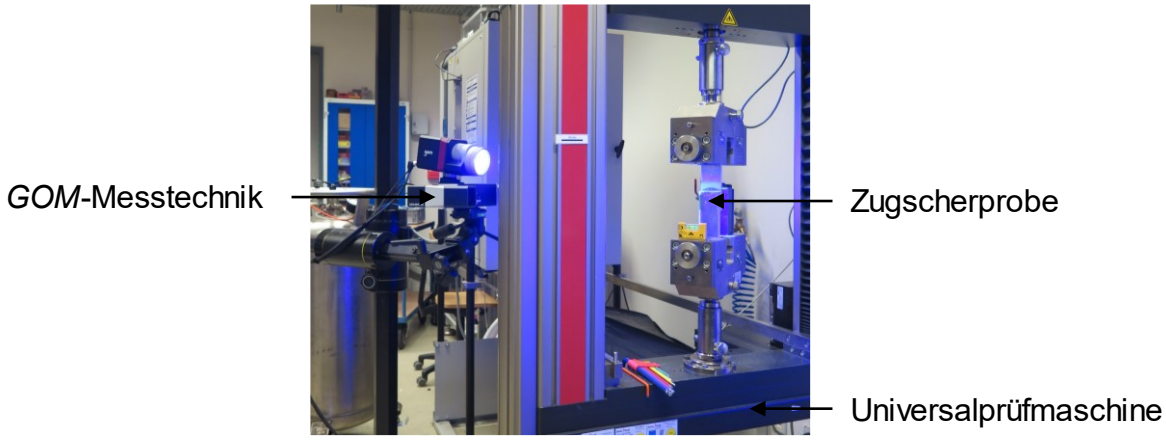


Abbildung 30: Prüfaufbau des Zugscherversuchs in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07 unter Zuhilfenahme der GOM-Messtechnik

Über die Software *GOM Correlate* ist es möglich, die aufgenommenen Daten auszuwerten und die auftretende Gleitung $\tan\gamma$ zu ermitteln. Der Parameter wird in 1 kN-Schritten von 1…10 kN ermittelt, um ihn später mit den Berechnungen der Numerik zu vergleichen und Veränderungen im Materialverhalten zu erkennen. In diesem Prüfbereich zeigen die Proben nahezu ausschließlich linear-elastisches Verhalten (vgl. Abschnitt 2.6), weshalb dieser zum Vergleich mit der Numerik hinzugezogen wird. Auf diesen Sachverhalt wird nachfolgend in Abschnitt 4.3.1 näher eingegangen, wo die numerische Simulation thematisiert wird. Zur Berechnung der Gleitung $\tan\gamma$ wird Formel 4 mit den auf Abbildung 31 dargestellten Parametern verwendet [7, p. 267].

Formel 4: Berechnung der Gleitung

$$tan\,\gamma = \frac{v}{\mathrm{d}}$$

Legende:	$tan\,\gamma$	Gleitung
	v	Verschiebung in mm
	d	Klebschichtdicke in mm

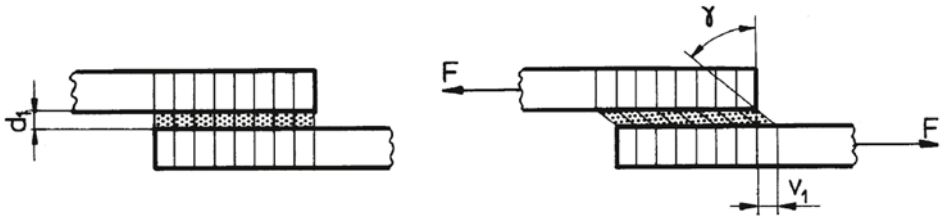


Abbildung 31: Darstellung der Gleitung beim Zugscherversuch [7, p. 268]

Die Klebschichtdicke d kann mithilfe eines Messschiebers an der jeweiligen Probe ausgemessen werden. Die Verschiebung v wird anhand der Daten der *GOM*-Messtechnik berechnet. Dies geschieht über den Betrag von zwei Punkten vor sowie während der Prüfung, welche sich parallel zur Kraftrichtung beim Zugscherversuch auf dem Specklemuster innerhalb der Klebschicht verschieben (vgl. Abbildung 32).

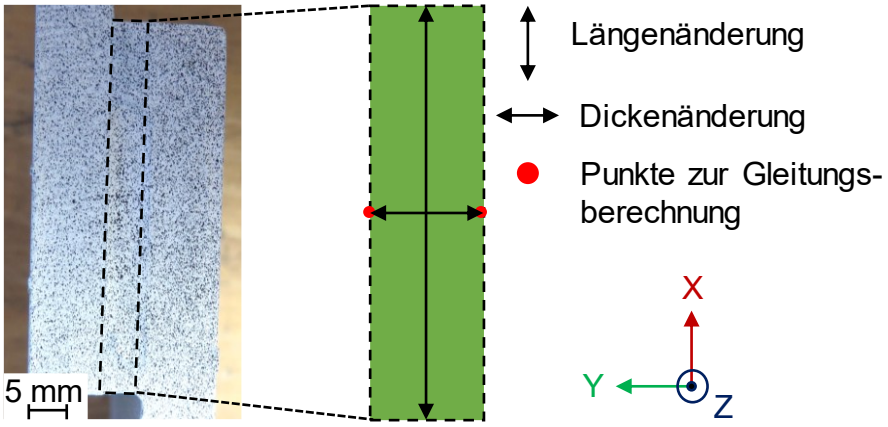


Abbildung 32: Specklemuster auf Zugscherprobe (links) und Auswerteparameter (rechts)

Die Auswertung mit der *GOM*-Messtechnik wird exemplarisch anhand einer Probe mit VK in der 2x3-Anordnung dargestellt. Zunächst wird in der Software *GOM Correlate* ein Koordinatensystem definiert. Die X-Achse wird parallel zur Außenkante des in den oberen Spannbacken fixierten Fügeteils ausgerichtet. An der unbelasteten Zugscherprobe wird eine Flächenkomponente auf der Oberfläche der Klebschicht erstellt. In diesem Bereich verfolgt die Software das Specklemuster. Nach der Definition wird die Flächenkomponente von der Software selbstständig angepasst, was zu leichten Abweichungen im Vergleich zur tatsächlichen Klebschichtoberfläche führen kann. Innerhalb dieser Flächenkomponente können verschiedenste Werkzeuge eingesetzt werden, um z. B. Längenänderungen oder weitere Kennwerte zu berechnen. Diese Parameter können zu spezifischen Zeitpunkten bzw. Kraftniveaus während des Zugscherversuchs ermittelt werden. Abbildung 33 zeigt den Vergleich einer unbelasteten und belasteten Zugscherprobe, die für die Auswertung in *GOM Correlate* vorbereitet

ist. Zur Ermittlung der Längen- und Dickenänderung der Klebschicht entlang der X- bzw. Y-Achse werden zwei Extensometer (schwarze Pfeile) positioniert. Zudem werden zur Berechnung der Gleitung zwei Facettenpunkte (rote Punkte) erstellt, um die Verschiebung entlang der X-Achse zu erfassen. Die Extensometer und Facettenpunkte werden entsprechend dem Schema auf Abbildung 32 platziert und orientiert. Anhand der Aufnahmen können die beim jeweiligen Kraftniveau vorliegenden Verschiebungen sowie Abstandsänderungen mithilfe der Software berechnet werden.

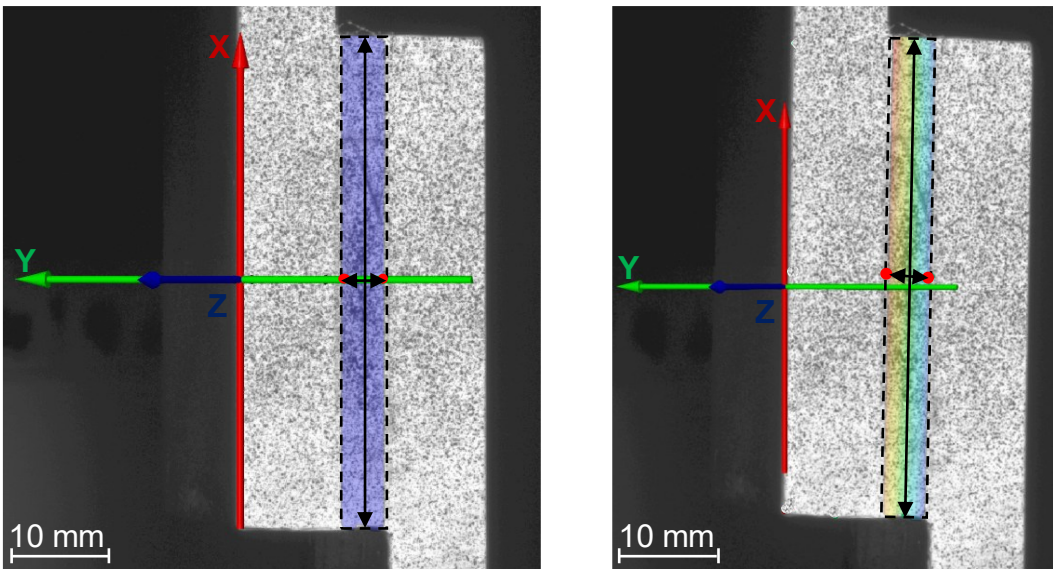


Abbildung 33: Ausrichtung des Koordinatensystems und Platzierung der Extensometer in GOM Correlate an einer unbelasteten (links) und belasteten Probe (rechts)

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit der *GOM*-Messtechnik für die VK in der 2x3-Anordnung sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für HK in der 2x3-Anordnung

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,19	0,001	0,001
2	0,37	0,003	-0,001
3	0,58	0,003	-0,001
4	0,79	0,005	-0,003
5	0,99	0,006	-0,003
6	1,17	0,005	-0,004
7	1,37	0,008	-0,004
8	1,57	0,008	-0,004
9	1,77	0,009	-0,004
10	1,95	0,009	-0,006

Die Gleitung weist eine nahezu lineare Steigerung von ca. 0,2 % pro Kraftschritt auf. Dies bestätigt, dass die Klebverbindung bis zu einem Kraftniveau von 10 kN nahezu linear-elastisches Materialverhalten aufweist. Mit steigender Belastung nimmt die Länge der Klebschicht zu und die Dicke ab. Die Aufnahmen zeigen nur geringe Änderungen der Gleitung bzw. der Länge und Dicke, was auf den hochsteifen Klebstoff zurückzuführen ist. Die Ergebnisse aller weiteren Proben, die mittels der *GOM*-Messtechnik aufgenommen wurden, sind in Anhang 51 bis Anhang 57 dokumentiert.

4.2.3 Vergleich und Interpretation der experimentellen statischen Untersuchungen an ungealterten Klebverbindungen

Die Bruchbilder der ungealterten Prüfserien mit Imperfektionen, die aus den statischen Untersuchungen hervorgegangen sind, zeigen ein nahezu identisches Bruchverhalten im Vergleich zu den Referenzproben. Die vorhandenen Fehlstellen beeinflussen das Rissverhalten demnach nicht signifikant. Die Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die Übersichten der Zugscherfestigkeiten der verschiedenen ungealterten Probenserien, welche in statischen zerstörenden Zugscherversuchen geprüft wurden. Der leicht transparente blaue Balken entspricht der Standardabweichung der Referenzserie und spiegelt die Schwankungen während des Herstellungs- und Prüfprozesses wider.

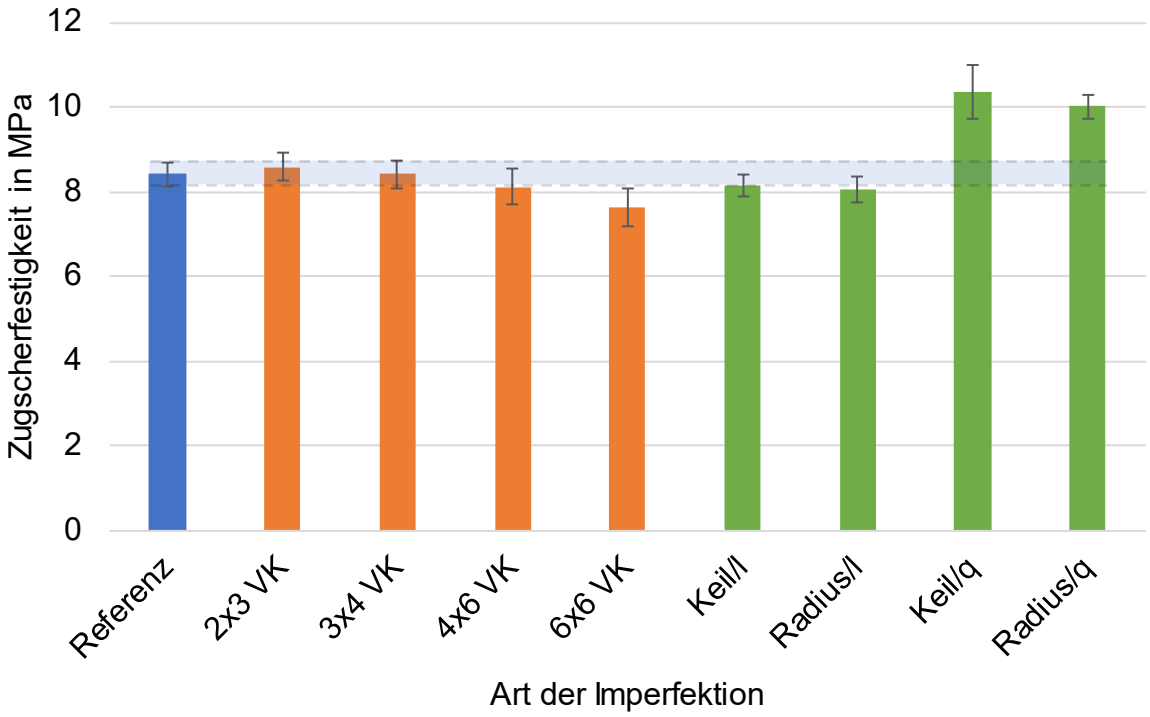


Abbildung 34: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von Fehlern in der Kohäsionszone (VK) und Abweichungen der Klebfugengeometrie (Aluminiumeinleger)

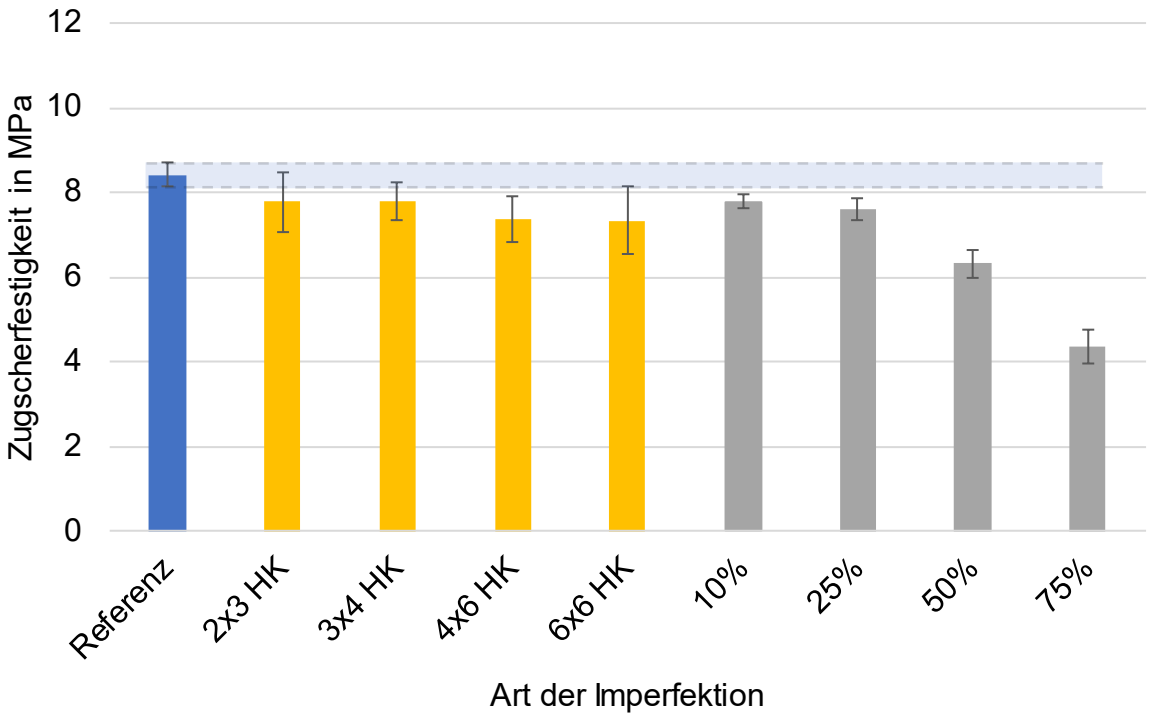


Abbildung 35: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von Fehlern in der Kohäsions- und Adhäsionszone (HK) und Fehlern in der Adhäsionszone (PTFE-Folie)

Zur Einordnung des Schädigungsverhaltens von Imperfektionen in strukturellen Klebverbindungen werden Abminderungsfaktoren gebildet. Dafür wird das Verhältnis der Mittelwerte der Zugscherfestigkeiten der jeweiligen Imperfektionsserie zur Referenzserie ermittelt. Dieser Wert gibt an, um welchen Faktor die Imperfektionen die Festigkeit der Klebverbindung beeinflussen. Der Abminderungsfaktor wird anhand der Formel 5 berechnet und ist ausschließlich für die in dieser Schrift vorliegenden Randbedingungen und Materialkombinationen gültig.

Formel 5: Berechnung des Abminderungsfaktors

$$Abminderungsfaktor = \frac{Mittelwert\ Festigkeit\ der\ Fehlstellenserie}{Mittelwert\ Festigkeit\ der\ Referenzserie}$$

Die Ergebnisse aller statisch geprüften ungealterten Probenserien sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführt. Die Festigkeitswerte enthalten die Standardabweichung sowie die Unsicherheit der relativen Messung. Die aufgeführten Ergebnisse werden nach Formel 6 ermittelt.

Formel 6: Berechnung der Messunsicherheit der Ergebnisse

$$Ergebnis = Mittelwert \pm \sqrt{(Mittelwert \times Unsicherheit)^2 + Standardabweichung^2}$$

Tabelle 12: Zusammenfassung der statischen Zugscherversuche Teil 1

Serie		**Referenz**	**2x3 VK**	**3x4 VK**	**4x6 VK**	**6x6 VK**	**Keil/l**	**Radius/l**	**Keil/q**	**Radius/q**
Imperfektion	**Typ**	keine	VK				Aluminiumeinleger			
	Ausprägung/ Anordnung		2x3	3x4	4x6	6x6	Keil längs	Radius längs	Keil quer	Radius quer
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	3	6	13	19	5	8	5	8
Festigkeit (Mittelwert) in MPa		8,4 ± 0,3	8,6 ± 0,3	8,4 ± 0,3	8,1 ± 0,4	7,6 ± 0,4	8,1 ± 0,3	8,1 ± 0,3	10,3 ± 0,6	10,0 ± 0,3
Abminderungsfaktor		-	1,02	1,00	0,96	0,91	0,97	0,96	1,23	1,19
Auswirkungen auf durchschnittliche Festigkeit in %		-	+2	=	-4	-9	-3	-4	+23	+19

Tabelle 13: Zusammenfassung der statischen Zugscherversuche Teil 2

Serie		**Referenz**	**2x3 HK**	**3x4 HK**	**4x6 HK**	**6x6 HK**	**10 %**	**25 %**	**50 %**	**75 %**
Imperfektion	**Typ**	keine	HK				PTFE-Folie			
	Ausprägung/ Anordnung		2x3	3x4	4x6	6x6	10 %	25 %	50 %	75 %
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	2	3	7	9	-	-	-	-
Reduktion Klebfläche in %		-	5	9	19	28	10	25	50	75
Festigkeit (Mittelwert) in MPa		8,4 ± 0,3	7,8 ± 0,7	7,8 ± 0,5	7,4 ± 0,5	7,3 ± 0,8	7,8 ± 0,2	7,6 ± 0,3	6,3 ± 0,3	4,4 ± 0,4
Abminderungsfaktor		-	0,92	0,93	0,88	0,87	0,93	0,90	0,75	0,52
Auswirkungen auf durchschnittliche Festigkeit in %		-	-8	-7	-12	-13	-7	-10	-25	-48

Imperfektionen hervorgerufen durch VK

Die Zugscherproben, bei denen die Imperfektionen bis zu 6 % des Klebstoffvolumens verdrängen (VK in 2x3- bzw. 3x4-Anordnung), weisen nahezu identische Festigkeiten wie die Referenzserie auf. Bei einer Klebstoffverdrängung von ca. 13 % (4x6-Anordnung) zeigt sich erstmals ein leichter Rückgang der durchschnittlichen Festigkeit, welcher unterhalb der Standardabweichung der Referenzserie liegt. Erst bei der höchsten Ausprägung der Fehlstellen in der Kohäsionszone mit VK (6x6-Anordnung, 19 % des Klebstoffvolumens werden verdrängt) führen die Imperfektionen zu einer signifikanten Reduktion der Festigkeit um etwa 10 %. Der Einfluss des Volumenanteils der VK in der Klebschicht auf die durchschnittliche Festigkeit ist auf Abbildung 36 dargestellt.

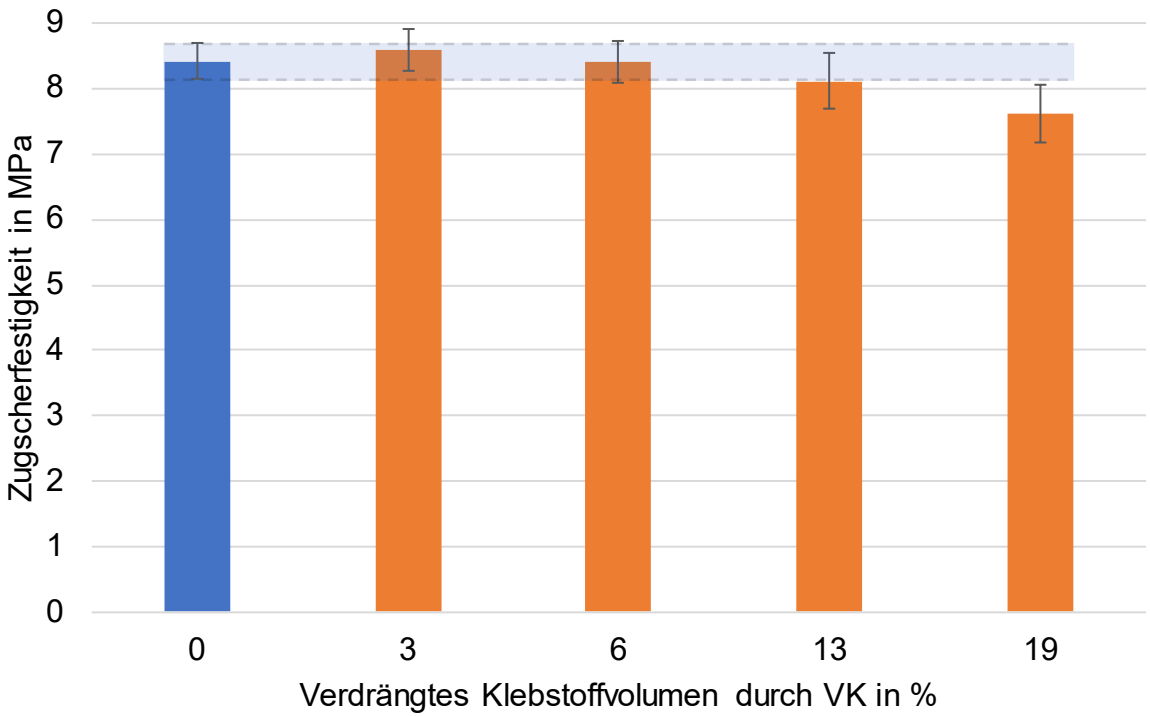


Abbildung 36: Auswirkungen des verdrängten Klebstoffvolumens durch VK auf die Durchschnittsfestigkeit (blau: Referenz | orange: VK)

Diese Tendenz zeigt, dass es einen Grenzwert für hochsteife Klebverbindungen gibt, ab dem die ertragbare Festigkeit sinkt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen in dieser Arbeit liegt dieser zwischen 6 % und 13 % Verdrängung des Klebstoffvolumens durch Imperfektionen in der Kohäsionszone. Der weitere Verlauf des Einflusses, ob dieser linear, exponentiell oder in einer Stabilisierung auf einem minimalen Niveau verläuft, kann aufgrund der begrenzten Probenanzahl nicht eindeutig bestimmt werden. Des Weiteren zeigt die Analyse des Bruchbilds, dass der maximale Durchmesser der VK nicht in dem Bereich liegt, in dem der Riss verläuft (vgl. Abbildung 37).



Abbildung 37: Vergleich verschiedener Rissverläufe bei Zugscherproben mit VK

Bei einem CF würde der Riss direkt durch den maximalen Kugeldurchmesser verlaufen. Da jedoch der SCF überwiegt, verläuft der Riss in der Nähe des Fügeteils. Nach Rissbeginn stellen die Bereiche des maximalen Kugeldurchmessers und damit auch der maximalen Schwächung der Klebverbindung durch Imperfektionen nicht den

schwächsten Bereich der Klebverbindung dar. Dies wird deutlich, da der Riss grenzschichtnah durch eine weitestgehend intakte Klebschicht verläuft.

Imperfektionen hervorgerufen durch HK

Aufgrund des grenzschichtnahen Rissverlaufs werden Versuche mit HK gemacht, um den Bereich der Grenzschicht maximal durch den Durchmesser der HK zu schwächen. Die Versuche zeigen, dass diese Art der Imperfektion bereits ab der 2x3-Anordnung einen negativen Einfluss auf die maximale Festigkeit von etwa 8 % hat. Dieser Effekt ist vergleichbar mit den Auswirkungen der HK in der 3x4-Anordnung. Die weiteren Ausprägungen (HK 4x6- und 6x6-Anordnung) weisen untereinander nahezu keine Unterschiede in der durchschnittlichen Festigkeit auf, sind jedoch schädlicher als die vorherigen Ausprägungen. Daraus resultiert, dass das Volumen der Imperfektionen, welches sich im Bereich der Grenzschicht und somit im Rissverlauf befindet, einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung hat. Diese spezielle Art der Imperfektionen führt zu einer stärkeren Reduktion der durchschnittlichen Festigkeit im Vergleich zu den VK, die erst ab einem bestimmten Grenzwert einen negativen Einfluss zeigen. Weiterhin zeigt sich, dass erneut ab der 4x6-Anordnung ein Abfall der Festigkeit im Vergleich zur 2x3- und 3x4-Anordnung der HK zu sehen ist. Dieser Abfall ist ebenfalls bei der Probenserie mit VK aufgetreten.

Imperfektionen hervorgerufen durch PTFE-Folie

Bei den Zugscherproben, in denen Kissing Bonds, welche ausschließlich den Bereich der Grenzschicht schwächen, mittels PTFE-Folie simuliert werden, ist ebenfalls bereits bei der geringsten Ausprägung eine Reduktion der Zugscherfestigkeit festzustellen. Mit zunehmender Ausprägung sinkt hier jedoch die erreichte Festigkeit kontinuierlich. Besonders ausgeprägt ist der Rückgang der durchschnittlichen Festigkeit bei den Ausprägungen, bei denen 50 % und 75 % der ursprünglichen Klebfläche verdeckt werden. Die in der Ausprägung von 10 % verdeckte Klebfläche durch die PTFE-Folie entspricht der von der Probenserie HK in der 3x4-Anordnung verdeckten Klebfläche, wobei die negativen Auswirkungen auf die Festigkeit vergleichbar sind. Die Proben mit Adhäsionsfehlern durch PTFE-Folie bei 25%-Ausprägung liegen hinsichtlich des Anteils der verdeckten Klebfläche genau zwischen der 4x6- und 6x6-Anordnung der HK. Dennoch führen Letztere zu einer stärkeren Reduktion der durchschnittlichen Festigkeit. Aufgrund der Spannungsverteilung in der Klebschicht während des Zugscherversuchs sowie den Erkenntnissen aus der Literatur (vgl. Abschnitt 2.7) lässt sich ableiten, dass

die unterschiedliche Positionierung der Imperfektionen zu den Ergebnissen beiträgt. Die PTFE-Folie ist zentral auf der Klebefläche platziert, während die HK über die Fläche verteilt sind. Darüber hinaus verdrängt die PTFE-Folie nahezu kein Klebstoffvolumen. Der Einfluss des verdrängten Klebstoffvolumens, wie er bei den VK auftritt, trägt bei den HK zusätzlich zur Schwächung der Grenzschicht bei und beeinträchtigt somit die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung stärker.

Die beobachteten Abweichungen sind sehr gering, fallen jedoch aus dem Bereich der Standardabweichung der Referenzserie. Dies lässt den Schluss zu, dass diese Abweichung nicht auf Schwankungen im Herstellungs- und Prüfprozess zurückzuführen, sondern direkte Einflüsse der Fehlstellen sind. In Bezug auf die Imperfektionen in Grenzschichtnähe wird jedoch deutlich, dass es einen Grenzwert gibt, ab dem die negativen Einflüsse auf die durchschnittliche Festigkeit der Zugscherproben signifikant zunehmen. Dies ist auf Abbildung 38 dargestellt. Wenn der Anteil der verdeckten Klebfläche 30 % überschreitet, kommt es zu einer erheblichen Verringerung der durchschnittlichen Festigkeit im Zugscherversuch.

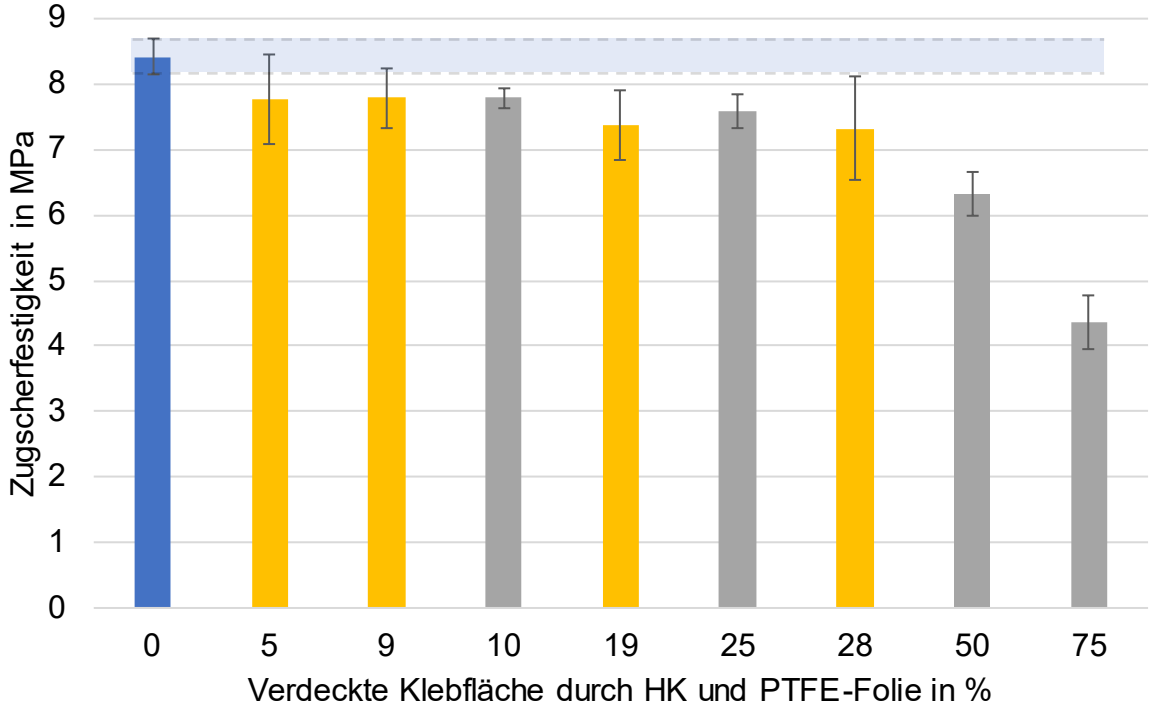


Abbildung 38: Auswirkungen der verdeckten Klebfläche durch HK und PTFE-Folie auf die Durchschnittsfestigkeit (blau: Referenz | gelb: HK | grau: PTFE-Folie)

Einige Zugscherproben aus den Probenserien mit PTFE-Folie zeigen ab einer Ausprägung von 50 % ein spezielles Bruchverhalten. Anhand der Bruchbilder ist zu erkennen, dass der SCF teilweise entlang der Fügeteiloberfläche verläuft, auf der keine PTFE-

Folie vorhanden ist. Wie auf Abbildung 39 schematisch dargestellt, durchzieht der Riss jedoch die gesamte Klebfläche, sobald er den Bereich der Fehlstelle erreicht. Anschließend wandert der Riss auf dieser fehlerbehafteten Fügeteilseite weiter. Die Bruchbilder sowie die Aufnahmen der DIC ermöglichen keine definitive Aussage darüber, ob der Riss zunächst auf der Seite mit der Fehlstelle oder auf der fehlerfreien Seite entsteht. Dieses Phänomen tritt ausschließlich bei Zugscherproben mit Kissing Bonds in sehr hohen Ausprägungen auf. Bei diesen reichen die Bereiche der geschwächten bzw. nicht vorhandenen Adhäsion näher an den Randbereich heran, was zu diesem besonderen Bruchverhalten führen kann.

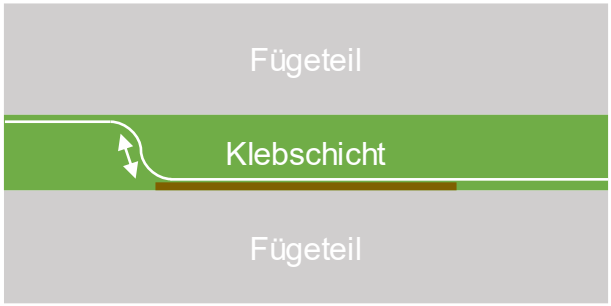


Abbildung 39: Schematischer Rissverlauf bei Zugscherproben mit hohen Ausprägungen von PTFE-Folie

Abweichungen der Klebfugengeometrie

Die Abweichungen der Klebfugengeometrie führen zu einer Reduktion des Klebstoffvolumens um 5 % (Keil) bzw. 8 % (Radius) und beeinträchtigen insbesondere den Bereich in der Mitte der Klebschicht. Die Verdrängung des ursprünglichen Klebstoffvolumens ist mit der der VK in der 3x4-Anordnung vergleichbar. Diese zeigten keinen negativen Einfluss auf die Festigkeit der Zugscherproben. Bei den Einschnürungen, die parallel der Zugrichtung angeordnet sind, zeigt sich eine geringfügige Abnahme der durchschnittlichen Festigkeit, welche direkt an den Bereich der Standardabweichung der Referenzserie angrenzt. Der Riss verläuft bei nahezu allen Proben in einem kleinen Bereich zentral im Klebschichtbulk und wandert anschließend in die Nähe des Fügeteils. Im Gegensatz zu den VK weisen die Proben mit Abweichungen der Klebfugengeometrie längs zur Zugrichtung in diesem Bereich des Rissstarts eine geringere Klebschichtbreite auf (vgl. Abbildung 40), was als mögliche Ursache für die beobachtete leichte Festigkeitsabnahme interpretiert werden kann.

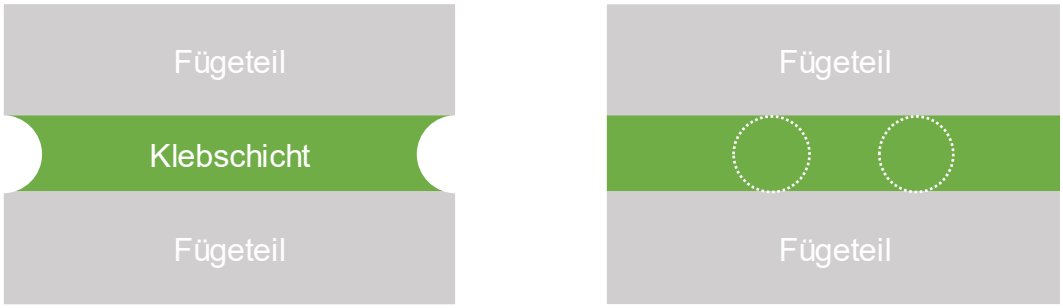


Abbildung 40: Verminderte Klebschichtbreite der Zugscherproben mit Abweichungen der Klebfugengeometrie (links) im Vergleich zu Proben mit VK (rechts)

Die Abweichungen der Klebfugengeometrie, welche quer zur Zugrichtung angeordnet sind, reduzieren exakt dasselbe Klebstoffvolumen wie die Imperfektionen, welche längs zur Zugrichtung auftreten. Allerdings führen sie zu einer durchschnittlichen Erhöhung der maximalen Festigkeit um bis zu 23 % (Keil). Wie auf Abbildung 41 illustriert, zeigen die Proben einen höheren Anteil an CF.

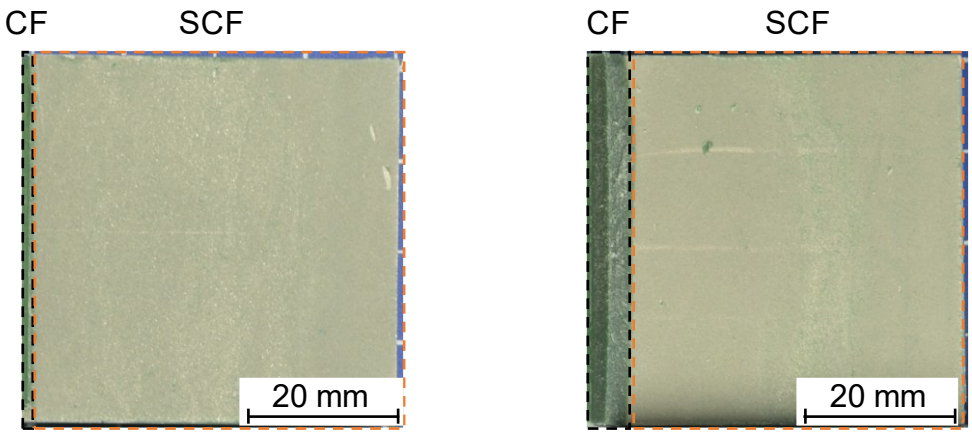


Abbildung 41: Bruchbild einer Referenzprobe mit kleinem CF-Bereich (links) und Bruchbild einer Probe mit keilförmiger Einschnürung quer zur Zugrichtung (rechts)

Die Abweichungen der Klebfugengeometrie sorgen dafür, dass die Kräfte im Randbereich der Klebschicht auf eine größere Fläche im Vergleich zur Referenz verteilt werden (vgl. Abbildung 42) und somit Spannungsspitzen abgebaut werden. Die vom Klebstoff maximal ertragbare Spannung wird somit erst bei einem höheren Kraftniveau während des Zugscherversuchs erreicht, wodurch die Festigkeit steigt.

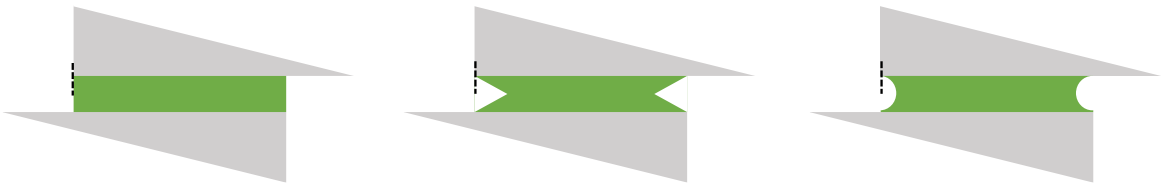


Abbildung 42: Veränderung des Übergangs vom Fügeteil zur Klebschicht bei Referenz (links) und den Abweichungen der Klebfugengeometrie Keil (mittig) und Radius (rechts)

Darüber hinaus beginnt das Risswachstum im mittleren Bereich der Klebschichtdicke. Es ist davon auszugehen, dass der Riss somit eine größere Distanz durch die vom Fügeteil unbeeinflusste und damit höherfeste Struktur des Klebstoffs zurücklegen muss, bevor er in die tendenziell niedrigfestere Grenzschicht (vgl. Abschnitt 2.2) übergeht und dort als SCF weiterwächst (siehe Abbildung 43). In nahezu allen anderen Probenserien befindet sich der Bereich des CF nur knapp oberhalb der Fügeteiloberfläche, was dazu führt, dass der Riss eine geringere Strecke durch den Klebstoff zurücklegt, bevor er in den SCF übergeht. Bei den Proben mit der radiusförmigen Einschnürung ist die Höhe des Rissbeginns generell minimal geringer als bei der keilförmigen Einschnürung, was möglicherweise den leicht besseren Einfluss der keilförmigen Einschnürung quer zur Zugrichtung erklärt.

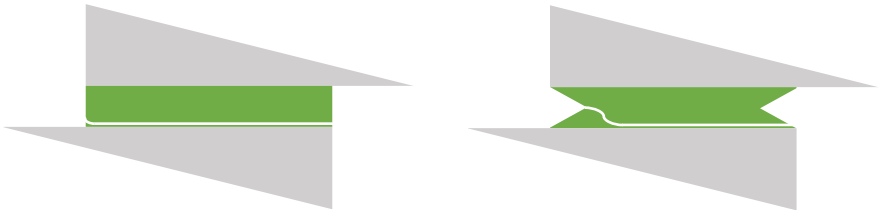


Abbildung 43: Unterschied des Rissbeginns bei fehlerfreien Proben (links) und Proben mit Abweichungen der Klebfugengeometrie (Keil, rechts)

Zusätzlich zu den zuvor genannten Effekten führen die Abweichungen der Klebfugengeometrie orthogonal zur Zugrichtung, unabhängig von ihrer Geometrie, auch zu einer Verringerung der Überlappungslänge im Bereich der Rissinitiierung. Dies sorgt für eine gleichmäßigere Spannungsverteilung innerhalb der Klebschicht und reduziert den Betrag der Spannungsspitzen an den Überlappungsenden bei gleichem Kraftniveau während des Zugscherversuchs. Resultierend versagt die Klebschicht auf einem höheren Kraftniveau, wodurch sich die Verbundfestigkeit bei den zerstörenden Prüfungen erhöht. Dieser Zusammenhang wird auf Abbildung 44 veranschaulicht [7, pp. 431-434].

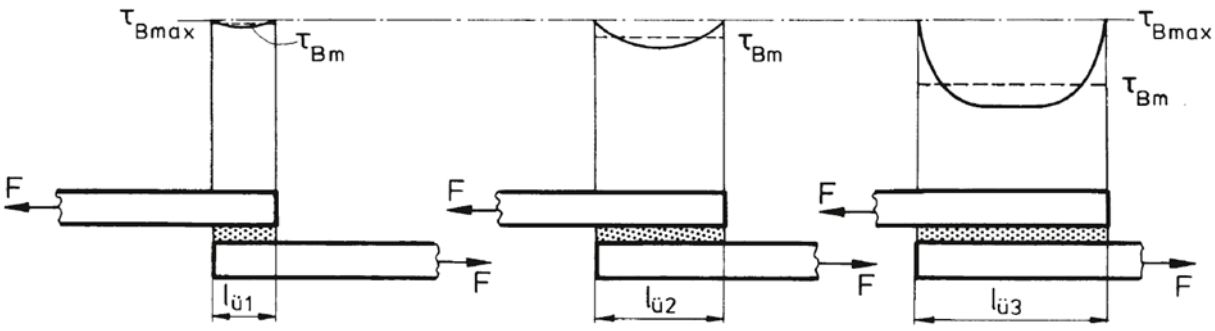


Abbildung 44: Spannungsverteilung in der Klebschicht beim Zugscherversuch in Abhängigkeit von der Überlappungslänge [7, p. 432]

Basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen haben Imperfektionen grundlegend einen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen. Abhängig vom Anteil und der Lage dieser führen sie in den meisten Fällen zu einer Abnahme der durchschnittlichen Festigkeit. Zudem weisen nahezu alle fehlerbehafteten Probenserien ebenfalls eine höhere Standardabweichung im Vergleich zur fehlerfreien Referenzserie auf, wodurch die Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Tragfähigkeit der für eine Beanspruchung ausgelegten Klebverbindung weiter zunimmt. Darüber hinaus bestätigen die erhöhten Werte der Verformungen in der Klebschicht, welche mithilfe der *GOM*-Messtechnik erfasst wurden, dass die hier untersuchten Imperfektionen in der Adhäsionszone bzw. Grenzschicht in einem negativen Einfluss auf die Festigkeit der Klebverbindung resultieren. Die Reduktion der Klebfläche und des Klebstoffvolumens führen zu geringen, aber messbaren Anstiegen der Verformungs- und Gleitungswerte. Insbesondere bei hochsteifen Klebstoffen, welche prinzipiell unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G eingesetzt werden und eine Bruchdehnung vorwiegend im einstelligen Bereich aufweisen, führen höhere Verformungswerte zu Schädigungsmechanismen im Klebstoff, da lokal die Materialfestigkeit erreicht und damit die Festigkeit der Gesamtstruktur herabgesetzt wird [7, p. 422].

4.3 Numerische Untersuchung von statischen Versuchen an ungealterten Zugscherproben

Um die Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen tiefergehend analysieren zu können, werden zusätzlich numerische Berechnungen zu den Versuchen durchgeführt. Diese dienen der detaillierten Analyse der experimentellen Untersuchungen, indem die Spannungsverteilung innerhalb der Klebschicht bei Vorhandensein von Imperfektionen untersucht wird.

Die numerischen Untersuchungen werden mit der FEM-Software *Ansys* durchgeführt. Die Zugscherproben werden mit denselben Abmessungen wie bei den angestrebten realen Zugscherproben modelliert (vgl. Abschnitt 3.2). Um das Materialverhalten in den Berechnungen möglichst genau ableiten zu können, werden die Modelle in eine definierte Anzahl an Elementen zerlegt (vgl. Abschnitt 2.6). Da mithilfe der FEM-Simulationen insbesondere das Verhalten der Klebschicht analysiert werden soll, wird diese feiner vernetzt (Elementgröße: 1 mm x 0,25 mm) als die Fügeteile (Elementgröße: 1 mm x 1 mm), was auf Abbildung 45 dargestellt ist. Dies erlaubt es, genauere Spannungs- bzw. Verformungswerte anhand der Modelle zu berechnen. Mit diesen können

anschließend Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften einer Klebverbindung gezogen werden.

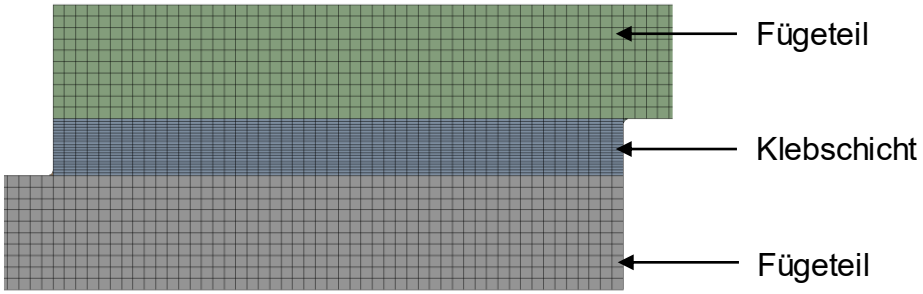


Abbildung 45: Modell einer in definierte Elemente unterteilten Zugscherprobe

In numerischen Berechnungen kann es aufgrund fehlerhafter Modellierung zu Singularitäten kommen, welche zu falschen Ergebnissen führen. Bauteilgeometrien weisen häufig spitz-, recht- oder stumpfwinklige Übergänge auf, an denen Kerben entstehen. In der Praxis weisen Kerben jedoch bedingt durch den Fertigungsprozess einen Radius auf. Dieser wird in der FEM-Simulation nicht berücksichtigt, weshalb in der Berechnungssoftware eine unendlich scharfe Kerbe abgebildet wird. Dies führt zu unrealistisch hohen Spannungen, welche mit zunehmender Netzdichte, entgegen des natürlichen Verhaltens, immer weiter steigen. In der Realität werden diese Spannungen beispielsweise durch lokale Materialplastifizierungen abgebaut, was in vielen Fällen in der FEM unberücksichtigt bleibt. Um das Auftreten dieser sogenannten Singularitäten bei den Berechnungen zu vermeiden, ist es erforderlich, den Übergang vom Fügeteil zur Klebschicht mit einem definierten Radius zu versehen (vgl. Abbildung 46). Bei den Realproben wird überschüssiger Klebstoff während des Herstellungsprozesses mit einem Holzspatel entfernt, woraufhin der Übergang zwischen Fügeteil und Klebschicht ebenfalls einen geringen Radius aufweist. Aus diesem Grund wird den numerischen Modellen ein Übergangsradius von 0,5 mm hinzugefügt, der in ausreichender Näherung den Radius des verwendeten Holzspatels abbildet. Dieser wird später in der Auswertung der numerischen Berechnungen nicht berücksichtigt [31, pp. 17-18].

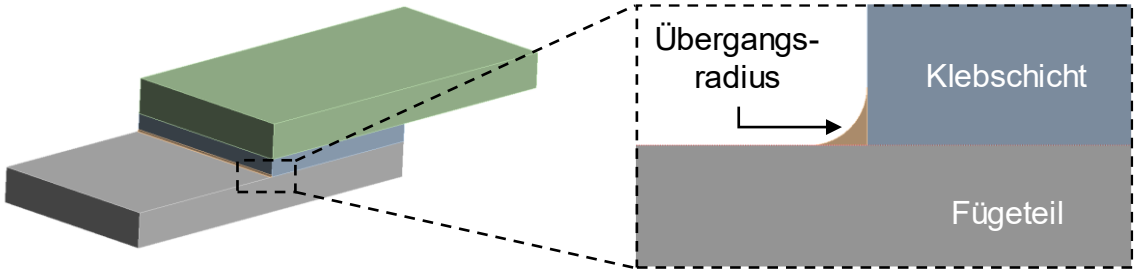


Abbildung 46: Modell einer Zugscherprobe mit Übergangsradius zur Vermeidung von Singularitäten

Die Modelle werden anschließend so aufgebaut, dass die auf Abbildung 26 dargestellten Imperfektionen in den Modellen realitätsnah abgebildet werden. Durch die Anwendung dieser Modelle werden die Spannungen in der Klebschicht bei der Einwirkung einer Kraft bestimmt und untereinander verglichen. In diesem Zusammenhang dienen die Ergebnisse der Referenzserie aus den numerischen Untersuchungen, ähnlich wie bei den experimentellen Versuchen, als Vergleichswerte für die Berechnungen mit Zugscherproben, welche Imperfektionen aufweisen. Um das Materialverhalten der verwendeten Komponenten in den Berechnungen abbilden zu können, werden spezifische Materialparameter zugeordnet. Eine Übersicht dieser ist in Tabelle 14 aufgeführt. Für Berechnungen im linear-elastischen Bereich sind die Dichte, der Elastizitätsmodul (E-Modul) und die Querkontraktionszahl notwendig, um das mechanische Verhalten des Materials unter Belastung korrekt zu simulieren [31, p. 131] [32, p. 102].

Tabelle 14: Materialparameter für numerische Berechnungen [98, pp. 1-2] [99]

	AlMg3	**Scotch-Weld 7271 B/A**
Dichte in $\frac{g}{cm^3}$	2,67	1,30
E-Modul in MPa	70500	2360
Querkontraktionszahl	0,30	0,35

In den Modellen werden die Kontaktflächen zwischen Klebstoff und Fügeteilen als *Kontaktbereiche* mit der Eigenschaft *Verbund* definiert. Folglich ist die Adhäsion in der FEM-Simulation permanent und vollständig gewährleistet, unabhängig von der aufgebrachten Belastung. Diese Definition des Verbunds entspricht den Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen, bei denen durchgehend kohäsives Versagen festgestellt wurde, und ist zudem für die vorliegende Betrachtung ausreichend, da keine Schädigungsvorgänge (wie z. B. Risse in der Klebschicht, viskoelastische und viskose Verformungen des Klebstoffs oder der Fügeteile) in die Analyse einbezogen werden. Im Anschluss daran werden die Randbedingungen für den Zugscherversuch anhand der experimentellen Versuche nachgestellt (vgl. Abbildung 47).

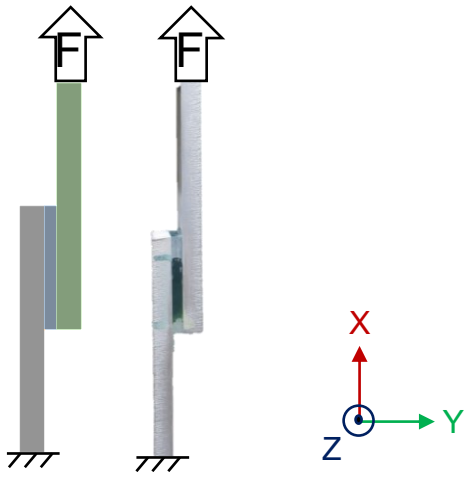


Abbildung 47: Zugscherversuch in numerischen Berechnungen (links) und experimentellen Versuchen (rechts)

4.3.1 Berechnung von Spannungs- und Verformungswerten einer fehlerfreien Klebverbindung

In diesem Abschnitt erfolgt die Auswertung der Ergebnisse der FEM-Simulationen. Die Berechnungen bilden lediglich den linear-elastischen Bereich ab, in welchem in der Theorie kein viskoses oder viskoelastisches Materialverhalten auftritt. Dieser wird anhand des Anstiegs des Graphen charakterisiert, welcher dort konstante Werte annimmt. Verändert sich der Wert des Anstiegs, treten viskoelastische und/ oder viskose Prozesse im Material auf, welche über die definierten Materialparameter nicht mehr abgedeckt werden. Diese Unterscheidung ist beispielhaft auf Abbildung 48 dargestellt.

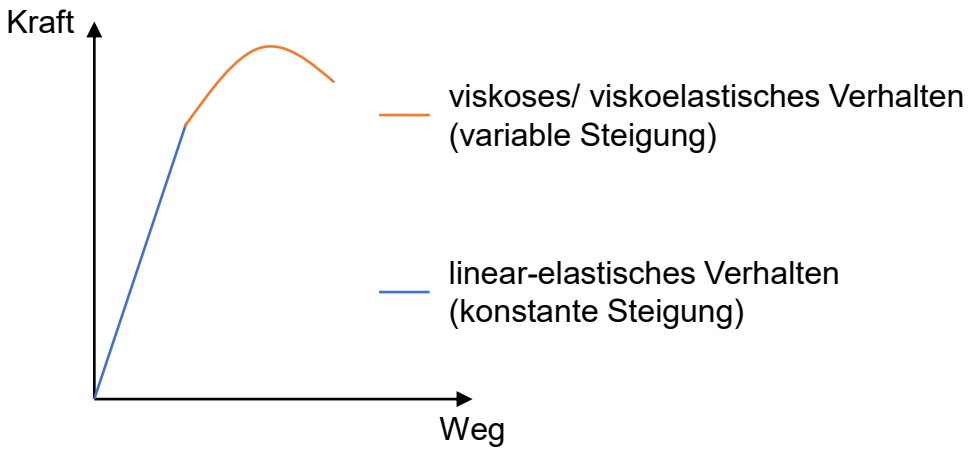


Abbildung 48: Idealisierte Abgrenzung des linear-elastischen Bereichs im Kraft-Weg-Diagramm

Es ist zu beachten, dass dieses Verhalten stark idealisiert dargestellt wird. Bei Kunststoffen unmittelbar bei Belastung auftretende zeitabhängige viskoelastische und viskose Prozesse bleiben in diesen Betrachtungen unberücksichtigt.

Anhand der beim statischen Zugscherversuch der ungealterten Referenzserie ermittelten Funktionsgraphen (vgl. Abbildung 28) können die Steigungen in verschiedenen Bereichen (Beginn der Prüfung bis zu einem definierten Kraftniveau) berechnet werden. In Tabelle 15 wird dies bis zu einem Kraftniveau von 10 kN durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Steigungen innerhalb dieser Kraftgrenzen um weniger als 2 % voneinander abweichen. Dies wird als ausreichend für die Annahme gewertet, dass dieser Bereich (von der Prüfmaschine aufgebrachte Kraft entspricht 0…10 kN) das linear-elastische Verhalten der Klebverbindung darstellt. Da in der FEM-Simulation ausschließlich dieses Materialverhalten abgebildet werden soll, wird dies in den Berechnungen als Grenze für die maximal auf die Zugscherprobe aufgebrachte Kraft gesetzt.

Tabelle 15: Berechnung der Steigung des Funktionsgraphen der ungealterten Referenzserie aus den statischen Versuchen bei verschiedenen Kraftniveaus

	Probe					
Kraft in kN	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	38,0	38,6	39,0	39,9	37,5	38,6
2	38,2	38,3	38,9	39,6	37,0	38,4
3	38,0	37,9	38,7	39,3	36,7	38,1
4	37,7	37,6	38,4	39,0	36,4	37,9
5	37,4	37,4	38,2	38,7	36,1	37,6
6	37,2	37,2	38,0	38,4	35,9	37,4
7	37,0	37,0	37,8	38,2	35,8	37,2
8	36,8	36,8	37,6	38,0	35,6	37,0
9	36,7	36,7	37,4	37,8	35,5	36,7
10	36,5	36,5	37,2	37,6	35,4	36,5
Mittelwert in kN	37,3	37,4	38,1	38,7	36,2	37,5
Standardabweichung in kN	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7	0,7
Variationskoeffizient in %	1,60	1,89	1,67	1,97	1,92	1,88

Als Beispiel für die Auswertung der FEM-Simulationen wird das Modell der Zugscherprobe ohne Imperfektionen herangezogen. Im Rahmen der Auswertung werden die Maximalwerte der Schub- und Vergleichsspannungen (von Mises) sowie die Normalspannungen orthogonal zur Klebschicht bei einer Belastung von 10 kN berechnet. Diese ermöglichen eine fundierte Beurteilung der Auswirkungen der Imperfektionen auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht, welche in Tabelle 16 am Beispiel der Referenzserie aufgelistet sind [31, pp. 225-226].

Tabelle 16: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Referenzserie bei einer Kraft von 10 kN

	Referenz-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	12,20
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	24,51
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	21,56

Zudem werden ausgewählte Geometrieänderungen berechnet, um sie mit den Daten von der *GOM*-Messtechnik zu vergleichen (vgl. Abbildung 32). Zum Vergleich der Werte werden die Beanspruchungen in 1 kN-Schritten anhand der Modelle berechnet, analog zu den experimentellen Untersuchungen. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der FEM-Simulation der ungealterten Zugscherprobe ohne Imperfektionen bis zu einer Zugkraft von 10 kN dargestellt. Alle weiteren Ergebnisse aus den Berechnungen sind im Anhang 74 bis Anhang 89 dokumentiert.

Tabelle 17: Ergebnisse der FEM-Simulation für die Geometrieänderungen der Referenzserie

Kraft in kN	$\tan\gamma$ **in %**	**Längenänderung in mm**	**Dickenänderung in mm**
1	0,06	0,005	0,000
2	0,12	0,011	0,000
3	0,18	0,016	0,000
4	0,24	0,021	0,001
5	0,30	0,026	0,001
6	0,37	0,032	0,001
7	0,43	0,037	0,001
8	0,49	0,042	0,001
9	0,55	0,048	0,001
10	0,61	0,053	0,002

Es ist zu erkennen, dass die Gleitung nahezu durchgehend um 0,06 % pro kN zunimmt. Auch die Länge und Dicke der Klebschicht ändern sich nur minimal, was auf die Eigenschaften des hochsteifen Klebstoffs zurückzuführen ist.

4.3.2 Vergleich und Interpretation der FEM-Simulationen

Eine Übersicht der Ergebnisse der FEM-Simulationen ist in Tabelle 18 bis Tabelle 21 aufgelistet. Alle Ergebnisse zu den Spannungswerten werden bei einer anliegenden Kraft von 10 kN berechnet.

Tabelle 18: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Spannung) Teil 1

Serie		**Referenz FEM**	**2x3 VK FEM**	**3x4 VK FEM**	**4x6 VK FEM**	**6x6 VK FEM**	**Keil/l FEM**	**Radius/l FEM**	**Keil/q FEM**	**Radius/q FEM**
Imperfektion	**Typ**	keine	VK				Aluminiumeinleger			
	Ausprägung/ Anordnung		2x3	3x4	4x6	6x6	Keil längs	Radius längs	Keil quer	Radius quer
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	3	6	13	19	5	8	5	8
Max. Schubspannung in MPa		12,20	14,21	14,68	15,33	16,15	16,69	13,03	13,50	11,60
Einfluss auf Schubspannung		-	1,16	1,20	1,26	1,32	1,37	1,07	1,11	0,95
Max. Normalspannung in MPa		24,51	28,52	29,25	30,51	32,25	26,24	27,38	28,35	19,23
Einfluss auf Normalspannung		-	1,16	1,19	1,24	1,32	1,07	1,12	1,16	0,78
Max. Vergleichsspannung (v. Mises) in MPa		21,56	25,04	25,82	26,98	28,49	29,62	23,77	24,12	20,45
Einfluss auf Vergleichsspannung		-	1,16	1,20	1,25	1,32	1,37	1,10	1,12	0,95
Gesamteinflussfaktor		-	1,16	1,20	1,25	1,32	1,27	1,10	1,13	0,89
Einfluss auf Spannung in %		-	+16	+20	+25	+32	+27	+10	+13	-11

Tabelle 19: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Geometrie) Teil 1

Serie		**Referenz FEM**	**2x3 VK FEM**	**3x4 VK FEM**	**4x6 VK FEM**	**6x6 VK FEM**	**Keil/l FEM**	**Radius/l FEM**	**Keil/q FEM**	**Radius/q FEM**
Imperfektion	**Typ**	keine	VK				Aluminiumeinleger			
	Ausprägung/ Anordnung		2x3	3x4	4x6	6x6	Keil längs	Radius längs	Keil quer	Radius quer
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	3	6	13	19	5	8	5	8
Längenänderung bei 10 kN in mm		0,053	0,053	0,054	0,056	0,058	0,054	0,054	0,056	0,056
Dickenänderung bei 10 kN in mm		0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
tan γ bei 10 kN in %		0,61	0,63	0,65	0,70	0,76	0,67	0,68	0,65	0,67
Einflussfaktor tan γ		-	1,03	1,06	1,15	1,25	1,09	1,12	1,06	1,10
Einfluss auf tan γ in %		-	+3	+6	+15	+25	+9	+12	+6	+10

Tabelle 20: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Spannung) Teil 2

Serie		**Referenz FEM**	**2x3 HK FEM**	**3x4 HK FEM**	**4x6 HK FEM**	**6x6 HK FEM**	**10 % FEM**	**25 % FEM**	**50 % FEM**	**75 % FEM**
Imperfektion	**Typ**	keine	HK				PTFE-Folie			
	Ausprägung/ Anordnung		2x3	3x4	4x6	6x6	10 %	25 %	50 %	75 %
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	2	3	7	10	-	-	-	-
Reduktion der Klebfläche in %		-	5	9	19	28	10	25	50	75
Max. Schubspannung in MPa		12,20	14,81	14,96	16,23	17,10	17,11	23,69	35,61	53,31
Einfluss auf Schubspannung		-	1,21	1,23	1,33	1,40	1,40	1,94	2,92	4,37
Max. Normalspannung in MPa		24,51	29,74	31,27	38,51	40,58	26,49	27,82	31,80	39,85
Einfluss auf Normalspannung		-	1,21	1,28	1,57	1,66	1,08	1,14	1,30	1,63
Max. Vergleichsspannung (v. Mises) in MPa		21,56	26,06	26,41	29,32	30,90	30,24	41,75	62,55	93,46
Einfluss auf Vergleichsspannung		-	1,21	1,23	1,36	1,43	1,40	1,94	2,90	4,34
Gesamteinflussfaktor		-	1,21	1,24	1,42	1,50	1,30	1,67	2,37	3,44
Einfluss auf Spannung in %		-	+21	+24	+42	+50	+30	+67	+137	+244

Tabelle 21: Zusammenfassung der FEM-Simulationen (Geometrie) Teil 2

Serie		**Referenz FEM**	**2x3 HK FEM**	**3x4 HK FEM**	**4x6 HK FEM**	**6x6 HK FEM**	**10 % FEM**	**25 % FEM**	**50 % FEM**	**75 % FEM**
Imperfektion	**Typ**	keine	HK				PTFE-Folie			
	Ausprägung/ Anordnung		2x3	3x4	4x6	6x6	10 %	25 %	50 %	75 %
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	2	3	7	10	-	-	-	-
Reduktion der Klebfläche in %		-	5	9	19	28	10	25	50	75
Längenänderung bei 10 kN in mm		0,053	0,067	0,068	0,069	0,069	0,067	0,069	0,073	0,085
Dickenänderung bei 10 kN in mm		0,002	0,001	0,002	0,002	0,003	0,001	0,001	-0,002	-0,008
tan γ bei 10 kN in %		0,61	0,72	0,73	0,76	0,79	0,72	0,77	0,94	1,32
Einflussfaktor tan γ		-	1,17	1,19	1,24	1,29	1,19	1,27	1,54	2,17
Einfluss auf tan γ in %		-	+17	+19	+24	+29	+19	+27	+54	+117

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Ausnahme der radiusförmigen Abweichungen der Klebfugengeometrie quer zur Zugrichtung alle Imperfektionen in den Berechnungen einen negativen Einfluss auf die auftretenden Spannungen innerhalb der Klebschicht haben. Je mehr Anteil die Fehlstellen in der Klebschicht einnehmen, desto höher werden die auftretenden Spannungsspitzen und desto eher ist von einem Versagen der Klebverbindung auszugehen. Lediglich die radiusförmigen Abweichungen der Klebfugengeometrie quer zur Zugrichtung senken die auftretenden Spannungsmaxima innerhalb der Klebschicht und haben somit einen positiven Effekt auf die Festigkeit der

Klebverbindungen in den numerischen Berechnungen. Hinsichtlich des geometrischen Verhaltens machen die FEM-Simulationen deutlich, dass alle Imperfektionen dafür sorgen, dass die Gleitung bei gleicher Belastung steigt. Aufgrund der Fehlstellen sinkt laut den Berechnungen die Steifigkeit der Klebschicht, wodurch sie *weicher* wird und sich stärker im Verhältnis zu den fehlerfreien Proben verformt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl die Verminderung des Klebstoffvolumens als auch die Reduzierung der Klebfläche einen signifikanten Einfluss auf das Deformationsverhalten und die auftretenden Spannungen innerhalb der Klebschicht im linear-elastischen Bereich haben. In der Software ANSYS Workbench werden die berechneten Zahlenwerte zusätzlich durch eine Farbskala auf dem 3D-Modell veranschaulicht. Die Modelle der Zugscherproben zeigen grundsätzlich Bereiche mit sehr hohen Spannungen an Randbereichen der Klebschicht, die orthogonal zur Zugrichtung ausgerichtet sind. Diese Spannungsmaxima befinden sich stets in der Nähe der Fügeteile, was auf Abbildung 49 dargestellt ist. In den durchgeführten FEM-Simulationen kennzeichnen diese Bereiche die Stellen, an denen die höchste Wahrscheinlichkeit für ein Versagen in der Klebschicht und den Beginn eines Risses besteht.

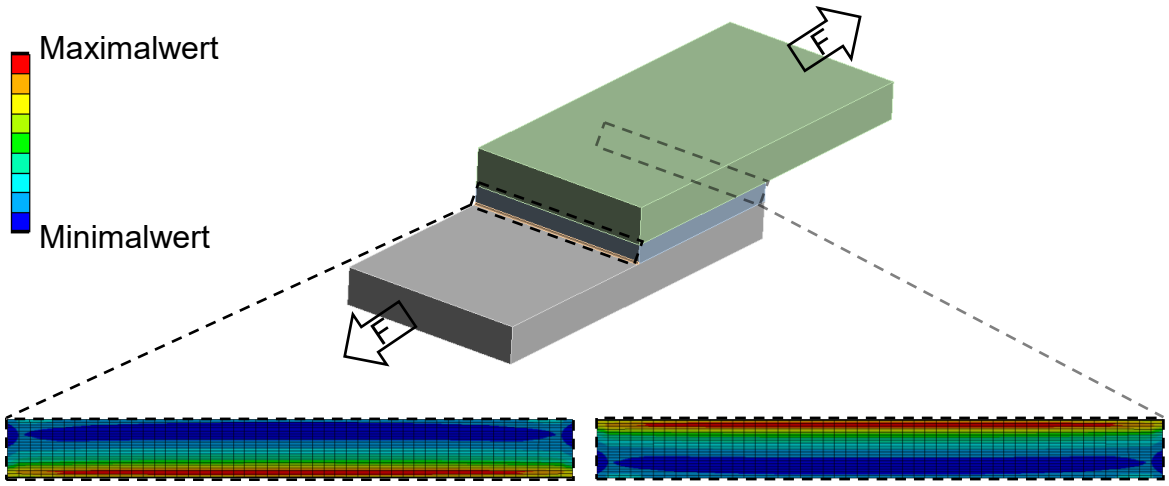


Abbildung 49: Schubspannungsmaxima an den Überlappungsenden der Modelle der Zugscherproben

Imperfektionen hervorgerufen durch VK

Mit steigendem Anteil an Kohäsionsfehlern in der Klebschicht nehmen die Spannungen zu. Bei den VK erhöhen sich die berechneten Spannungswerte nahezu identisch mit steigendem Imperfektionsanteil. Diese Beobachtung ist auf die in der Simulation verwendeten *perfekten* Kugeln zurückzuführen, die äquidistant und auf gleicher Höhe als Imperfektionen verteilt sind, was zu einer vollständig symmetrischen Klebschicht führt. Der linear-elastische Ansatz in den Berechnungen führt somit zu einem

gleichmäßigen Anstieg der Normal- und Schubspannungen. Es ist jedoch zu beachten, dass real auftretende Gaseinschlüsse typischerweise die Form von Ellipsoiden annehmen und ungleichmäßig in der Klebschicht verteilt sind, wie auf Abbildung 50 dargestellt. Diese Aspekte sind bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

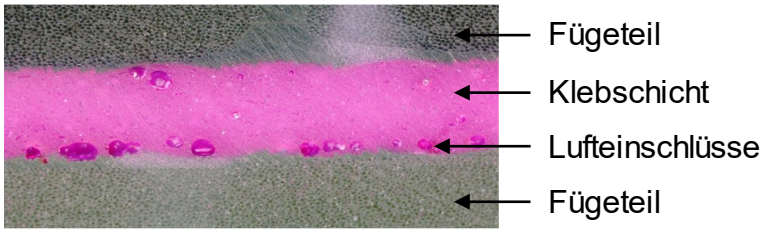


Abbildung 50: Gaseinschlüsse innerhalb einer realen Klebverbindung

Imperfektionen hervorgerufen durch HK

Die Spannungen bei den HK bleiben zwischen der 2x3- und der 3x4-Anordnung nahezu konstant. Allerdings befinden sich diese Spannungen auf einem höheren Niveau im Vergleich zu den Modellen mit VK bei den gleichen Anordnungen. Ab der 4x6-Anordnung steigen insbesondere die Normalspannungen, welche sich innerhalb der Klebschicht auf einen kleinen Bereich konzentrieren, an. Diese symbolisieren Schälung in realen Belastungen, welche besonders kritisch für Klebverbindungen sind. Es zeigt sich, dass die negativen Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung ab einem bestimmten Anteil der grenzschichtnahen Lufteinschlüsse erheblich zunehmen. Besonders die Normalspannungen in der 4x6- sowie der 6x6-Anordnung sind bereits im Bereich des linear-elastischen Materialverhaltens um mehr als 35 % höher als die Referenzwerte. In den FEM-Simulationen fallen die hohen Normal- und Schubspannungen besonders am Übergang zu den HK auf (vgl. Abbildung 51), welche für den signifikanten Anstieg der negativen Einflüsse verantwortlich sind. Diese Spannungsmaxima an den HK nehmen mit zunehmender Anzahl der Fehlstellen in der Klebschicht zu. Resultierend entstehen ab der 3x4-Anordnung in diesen Bereichen die höchsten Normal- und Schubspannungen in der gesamten Klebschicht.

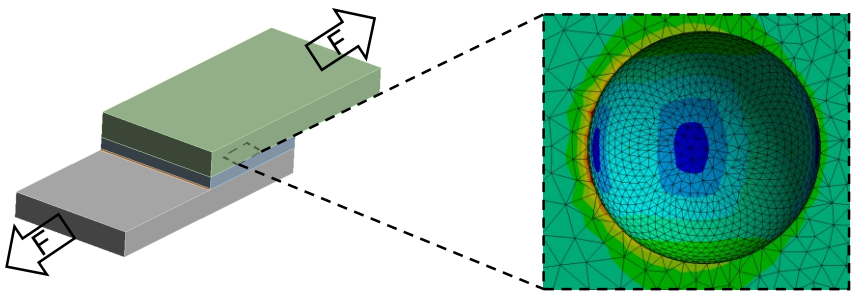


Abbildung 51: Spannungsmaxima am Übergang zu HK

Daraus lässt sich schließen, dass die Imperfektionen in der Grenzschicht bei einem Versagensverhalten, welches sich primär in Grenzschichtnähe abspielt, ab einem bestimmten Anteil in der Klebverbindung einen deutlich negativeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung ausüben als reine Kohäsionsfehler (wie z. B. VK). Bei letzterem treten an den Überlappungsenden quer zur Zugrichtung (vgl. Abbildung 49) die höchsten Spannungen in der Klebschicht auf.

Abweichungen der Klebfugengeometrie

Die Spannungswerte der Modelle mit definierten Randgeometrien (Radius und Keil) längs zur Zugrichtung weisen höhere Werte als die Referenzserie auf und haben somit laut den Berechnungen einen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Klebverbunds. Insbesondere bei den keilförmigen Abweichungen der Klebfugengeometrie steigen vor allem die Schubspannungen stark an, welche insbesondere in der Spitze des Keils auftreten. Der Unterschied zwischen den beiden Klebfugengeometrien resultiert aus der Tatsache, dass die Radiusgeometrie denselben Durchmesser wie die Klebschichtdicke aufweist. Durch den gleichmäßigen Übergang werden Spannungsspitzen vermieden. Im Gegensatz dazu weist die Keilform eine Kerbe auf (trotz kleinem Radius in der Spitze zur Vermeidung von Singularitäten), die hohe Spannungswerte in den FEM-Simulationen verursacht. Die berechneten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Probe mit keilförmigen Klebfugengeometrien voraussichtlich früher versagen als die mit radiusförmigen. Darüber hinaus führen die Geometrien längs zur Zugrichtung zu einer Verringerung des Klebstoffvolumens (vgl. Abbildung 40), wodurch die gleichen Kräfte auf einen kleineren Klebschichtquerschnitt verteilt werden. Dies resultiert in höheren Spannungen im Vergleich zur Referenzserie.

Die radiusförmigen Klebfugengeometrien, die quer zur Zugrichtung angeordnet sind, bewirken eine Verringerung der maximalen Schubspannungen um 5 % sowie der Normalspannungen um 28 %. Somit kann der Betrag der aufgebrachten Kraft erhöht werden, um die gleichen Spannungen wie bei der Referenzprobe zu erzeugen, was in einer höheren Festigkeit des Klebverbunds resultieren würde. Aufgrund der Fehlstelle wird der Winkel beim Übergang vom Fügeteil zur Klebschicht verringert, was zu einer besseren Verteilung der entstehenden Kräfte auf eine größere Fläche führt. Wie auf Abbildung 52 dargestellt, verteilt sich die Spannung über den Radius auf eine größere Fläche, wodurch Spannungsspitzen, die einen Riss initiieren würden, reduziert werden. Zudem wird mit der vorliegenden Imperfektion zusätzlich Klebstoffvolumen entfernt, wodurch die Überlappungslänge sinkt und dies in geringeren Spannungsspitzen

an den Überlappungsenden resultiert (vgl. Abbildung 44) [7, pp. 431-434].

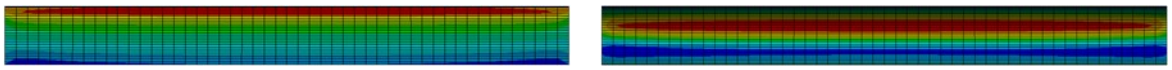


Abbildung 52: Normalspannungsmaxima an den Überlappungsenden der Modelle der Zugscherproben ohne Imperfektionen (links) und mit radiusförmigen Klebfugengeometrien quer zur Zugrichtung (rechts)

Der Abbau von Spannungsspitzen beim Zugscherversuch durch Verringerung der Überlappungslänge gilt ebenfalls für die keilförmigen Klebfugengeometrien quer zur Zugrichtung. Dennoch sind die Spannungswerte in diesen Modellen höher im Vergleich zur Referenz. Die Spannungsmaxima treten erneut im Bereich der Spitze des Keils auf, was auf die zuvor erwähnte Kerbwirkung zurückzuführen ist. Zusammenfassend wird aus den FEM-Simulationen deutlich, dass die radiusförmigen Klebfugengeometrien beim Betrachten der Spannungswerte den keilförmigen vorzuziehen sind, insbesondere da sie bei der Anordnung quer zur Zugrichtung das Spannungsniveau sogar senken können.

Imperfektionen hervorgerufen durch PTFE-Folie

Bei den Modellen mit reinen Adhäsionsfehlern (PTFE-Folie) nehmen die Spannungswerte mit zunehmender Fläche der Imperfektion zu. Die Auswirkungen auf die Normalspannungen sind jedoch weniger negativ im Vergleich zu den HK bei vergleichbaren Anteilen an Imperfektionen. Diese Spannungen befinden sich hauptsächlich an den Überlappungsenden (vgl. Abbildung 49). Die Modelle weisen jedoch hohe Schubspannungen an den Klebflächen in dem Bereich der Imperfektion auf, die mit Erhöhung der Fehlstelle weiterhin signifikant zunehmen. Sie erreichen bei der höchsten Ausprägung von 75 % Adhäsionsfehler einen Maximalwert, der mehr als das Vierfache der Referenzserie beträgt. Diese Schubspannungsspitzen sind, wie auf Abbildung 53 dargestellt, lokalisiert.

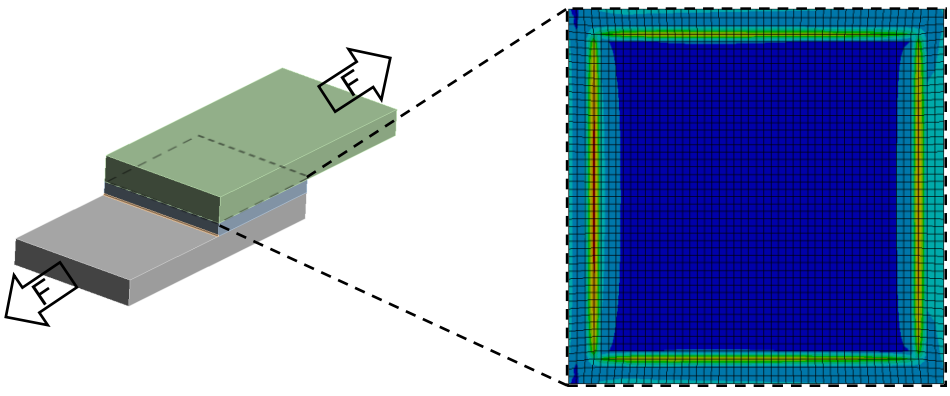


Abbildung 53: Schubspannungsmaxima innerhalb der Klebschicht mit einem Adhäsionsfehler von 75 %

Aufgrund der sehr hohen Spannungsspitzen in der Klebschicht besteht die Möglichkeit, dass zunächst ein Riss innerhalb der Klebschicht einer Zugscherprobe mit hohen Anteilen an Adhäsionsfehlern auftritt. Dieser Riss kann sich im Inneren der Klebschicht ausbreiten und anschließend in einem hochbelasteten Bereich am Rand der Klebschicht austreten.

Die Werte, welche vergleichend zu der *GOM*-Messtechnik aus den experimentellen Untersuchungen ermittelt wurden, zeigen, dass die Gleitung und Änderungen der geometrischen Abmessungen mit den einzelnen Belastungsschritten bei allen Modellen kontinuierlich zunehmen. Da die Berechnungen ausschließlich den linear-elastischen Bereich abbilden, entspricht dieses Verhalten den Erwartungen. Die untersuchten Modelle mit HK und PTFE-Folie zeigen bei vergleichbaren Ausprägungen nahezu identisches Verhalten in Bezug auf die Gleitung und Längen- sowie Dickenänderungen. Mit steigender Ausprägung der Adhäsionsfehler nimmt die Gleitung jedoch überproportional zu. Das Auftreten höherer Verformungswerte kann bei Duromeren, die generell eine geringe Bruchdehnung und damit eher sprödes Verhalten aufweisen, zu einem früheren Versagen im Vergleich zu den anderen Proben führen. Die Dicken- und Längenänderungen zeigen größtenteils marginale Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen mit Imperfektionen. Erst bei sehr hohen Ausprägungen der Adhäsionsfehler (50 %, 75 %) nehmen diese Werte zwischen den Kraftschritten verstärkt zu.

4.3.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus experimentellen Versuchen und numerischen Untersuchungen

Mithilfe der Ergebnisse aus den FEM-Simulationen ist es möglich, die Auffälligkeiten aus den experimentellen Untersuchungen nachzuvollziehen und zu erklären. Um die Auswirkungen der Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen miteinander vergleichen zu können, werden die Abminderungsfaktoren aus den experimentellen Untersuchungen und die Kehrwerte des Gesamteinflussfaktors aus den numerischen Berechnungen miteinander verglichen (vgl. Abbildung 54). Eine Ausnahme, bei der die numerischen Berechnungen ein gänzlich anderes Verhalten gegenüber den experimentellen Untersuchungen aufzeigen, bilden die Berechnungen der keilförmigen Abweichungen der Klebfugengeometrie quer zur Zugrichtung. Hier spiegelt sich das Materialverhalten nicht realitätsnah wider, da die Experimente eine stark positive Beeinflussung der Festigkeit zeigen und die Numerik einen stark negativen Einfluss auf die Spannung darstellt. Alle anderen Serien zeigen im Vergleich

zwischen numerischen Berechnungen und experimentellen Untersuchungen grundlegend sehr ähnliche Verhaltensweisen.

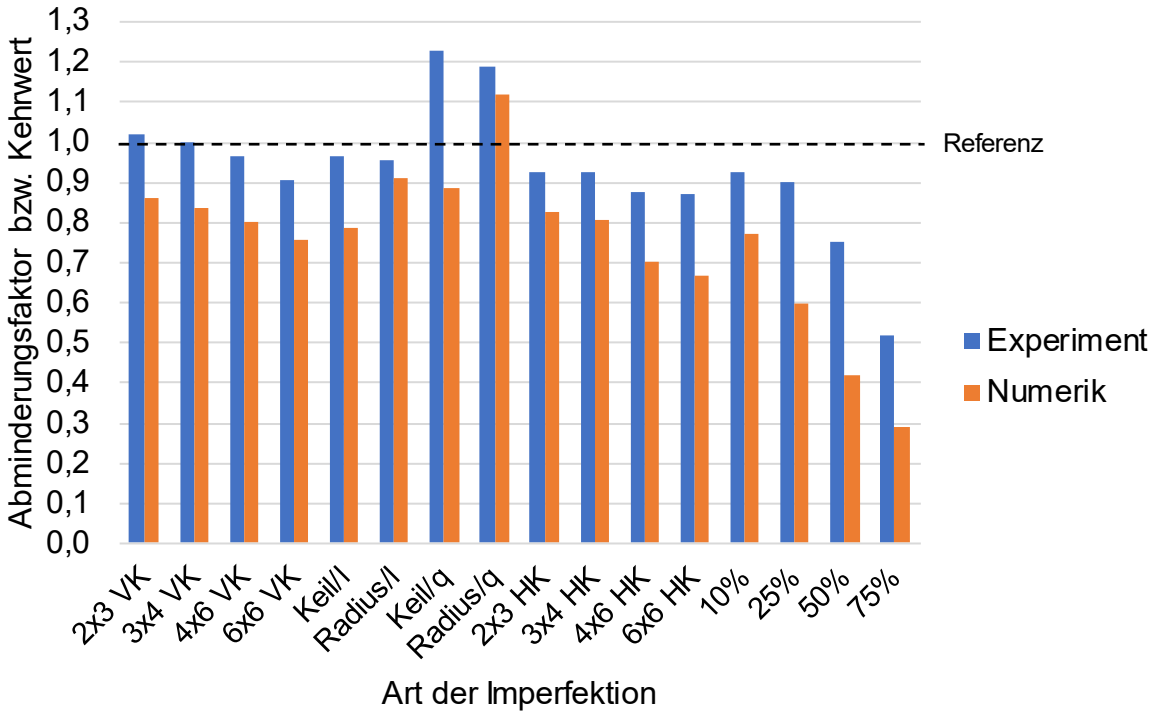


Abbildung 54: Vergleich der experimentell ermittelten Abminderungsfaktoren und numerisch berechneten Kehrwerte

Bei den experimentellen Versuchen führen die HK zu einer höheren Reduktion der Festigkeit im Vergleich zu den VK. In den Berechnungen zeigen die Modelle mit HK höhere Spannungen an, womit ein verfrühtes Materialversagen im Vergleich zu den Modellen mit VK erklärt werden kann. Die Proben mit PTFE-Folie zeigen den größten negativen Einfluss auf die Festigkeit und weisen zudem die höchsten Spannungen aller untersuchten Modelle auf. Die Festigkeiten der Zugscherproben mit Abweichungen der Klebfugengeometrie längs zur Zugrichtung sind geringer als die der Referenzserie, während in den entsprechenden FEM-Simulationen höhere Spannungen innerhalb der Klebschicht auftreten als im Referenzmodell. Die Radiusform der Geometrieabweichungen quer zur Zugrichtung hat sowohl in den experimentellen Versuchen als auch in den numerischen Berechnungen einen positiven Effekt auf die Zugscherprobe. Die quer zur Zugrichtung verlaufende keilförmige Abweichung der Klebfugengeometrie erzielt in den experimentellen Zugscherversuchen die besten Ergebnisse, während die Berechnungen hohe Spannungswerte aufweisen, die über dem Niveau des Referenzmodells liegen. Die Ergebnisse der FEM-Simulationen weichen jedoch in weiteren Punkten von den Experimenten ab. In letzteren zeigen die VK in den Anordnungen

2x3 und 3x4 keinen Einfluss auf die Festigkeit. Die 4x6-Anordnung sowie die Abweichungen der Klebfugengeometrie, welche längs zur Zugrichtung verlaufen, bewegen sich bei den experimentellen Untersuchungen in einem Bereich innerhalb der Standardabweichung der Referenzserie (vgl. Abbildung 34), weshalb sie auch den Schwankungen durch Herstellungs- und Prüfprozesseinflüsse zugeordnet werden können. In den FEM-Simulationen zeigt sich hingegen, dass bereits bei minimalen Ausprägungen der zuvor genannten Imperfektionen nicht unerhebliche Spannungserhöhungen in der Klebschicht auftreten, die folglich zu einem verfrühten Versagen führen müssen. Ähnliches gilt für die HK. Während die Anordnungen 2x3, 3x4, 4x6 und 6x6 untereinander nur einen sehr kleinen Unterschied in den Abminderungsfaktoren aufweisen, zeigen die Spannungen mit jeder Ausprägung teils erhebliche Anstiege. Hierbei unterscheiden sich die Berechnungen von den Experimenten.

Die experimentellen Versuche zeigen nahezu durchgehend ein einheitliches Bruchbild. Zunächst versagt die Klebschicht kohäsiv. Anschließend wandert der Riss zunehmend in Richtung einer in der Regel mit Imperfektionen behafteten Fügeteiloberfläche und geht dann in den SCF über. Die FEM-Simulationen verdeutlichen, dass in den Bereichen, die mit der Zone des Rissbeginns korrelieren, sehr hohe Normal- und Schubspannungen auftreten (vgl. Abbildung 55). Dies bestätigt das Bruchverhalten der experimentell untersuchten Proben.

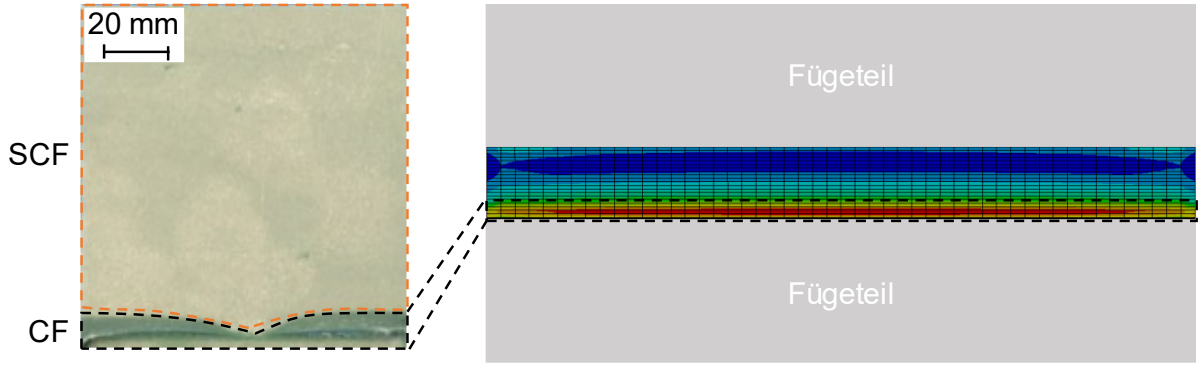


Abbildung 55: CF bei Bruchbild aus experimentellem Versuch (links) und Bereich hoher Spannungen aus FEM-Simulation (rechts)

Die Farbpalette der Berechnungen zeigt, dass sich der Bereich mit den höchsten Spannungen nicht unmittelbar in Fügeteilnähe befindet, sondern einen Abstand aufweist. Dort versagt der Klebstoff beim Zugscherversuch, weshalb nahezu durchgehend ein Bereich mit einem CF in den Bruchbildern der experimentell untersuchten Zugscherproben erkennbar ist, welcher anschließend in den SCF übergeht. Der Beginn des Risswachstums ist mithilfe der FEM-Simulationen korrekt abzubilden. Ein

hoher Spannungsbereich ist ebenfalls auf der gegenüberliegenden Fläche der dargestellten Klebschicht vorhanden. Die verschiedenen Höhen, in denen das Risswachstum bei den experimentellen Untersuchungen startet, sind hauptsächlich auf die manuelle Herstellung der Proben zurückzuführen. Dies führt dazu, dass zwischen einzelnen Proben kleine Abweichungen auftreten. So kann beispielsweise der Übergangsradius in Größe oder Form variieren. Zudem ist es möglich, dass die abgezogene Klebfläche nicht durchgängig plan ist, sondern in Zusammenhang mit beim Aushärten auftretendem Schwund kleine Unebenheiten aufweist. Diese Varianz führt zu veränderten Spannungsverhältnissen (vgl. Abbildung 8). Die Modelle bilden diese Variabilität nicht ab. In der realen Anwendung treten jedoch stets Abweichungen auf, die zu Unterschieden im vorher berechneten Materialverhalten führen können. Wird die Klebschicht in den Modellen nach der Hälfte der Überlappungslänge (25 mm) geschnitten, werden in den FEM-Simulationen mit HK, PTFE-Folie und Abweichungen der Klebfugengeometrie quer zur Zugrichtung Schubspannungsmaxima sichtbar, die sich unmittelbar in der Nähe der Fügeteile befinden. Dies ist auf Abbildung 56 veranschaulicht.

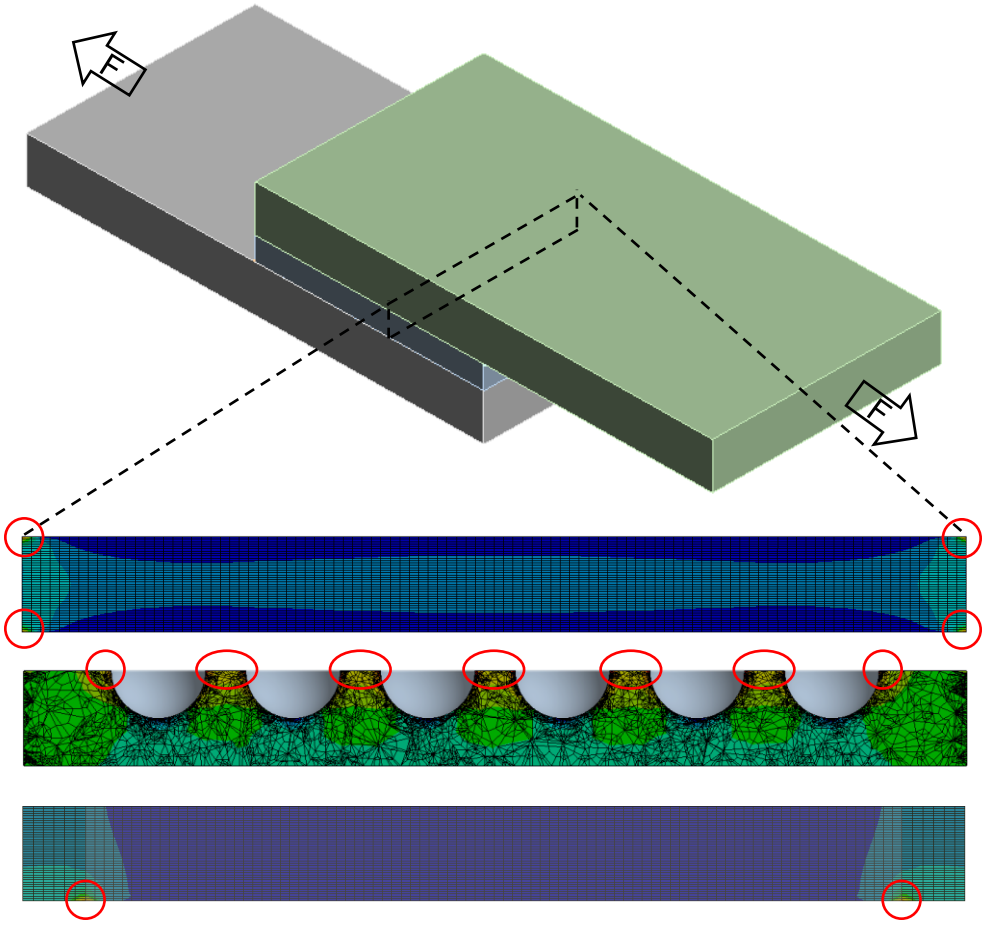


Abbildung 56: Grenzschichtnahe Spannungsmaxima verschiedener Modelle (v. o. n. u. Referenzserie, 6x6 HK und 50 %) mit Adhäsionsfehlern

Diese Bereiche können, neben beispielsweise Inhomogenitäten (vgl. Abschnitt 2.2), eine Ursache für das überwiegend vorherrschende Bruchbild des SCF darstellen. Bei den übrigen Imperfektionen befinden sich die maximalen Schubspannungen jedoch in der Mitte der Klebschichtdicke. Keine der experimentell untersuchten Proben mit diesen Imperfektionen zeigt jedoch einen CF in diesem Bereich. Bei den Modellen mit VK tritt das Spannungsmaximum stets an der Übergangszone zwischen Klebstoff und Fehlstelle auf, wo diese den größten Durchmesser aufweist. Dies lässt Rückschlüsse auf das Versagensverhalten der Proben mit HK zu, welche die höchsten Spannungswerte direkt in der Grenzschicht aufweisen, da der Kugeldurchmesser dieser Imperfektionen dort am größten ist. Die Normalspannungsmaxima der Proben mit VK sowie den Abweichungen der Klebfugengeometrie längs zur Zugrichtung befinden sich hingegen im Bereich der Grenzschicht. Dies ist auf Abbildung 57 veranschaulicht. Generell zeigen die FEM-Simulationen, dass bei einer Belastung von 10 kN die Normalspannungen innerhalb der Klebschicht deutlich höhere Werte annehmen als die Schubspannungswerte (Ausnahme: PTFE-Folie 50 % und 75 %). Die Spannungsspitzen in diesen Bereichen können für den SCF mitverantwortlich sein.

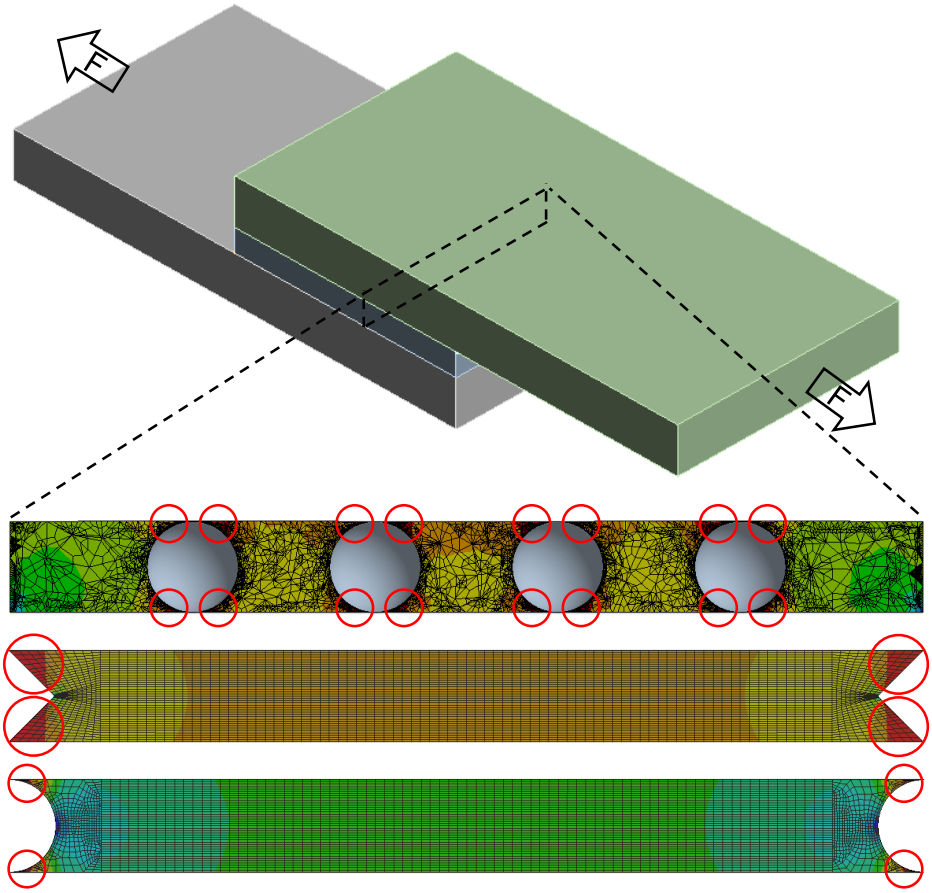


Abbildung 57: Grenzschichtnahe Spannungsmaxima verschiedener Modelle (v. o. n. u. 4x6 VK, Keil/l und Radius/l) mit Kohäsionsfehlern

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, weist der Klebstoff unterschiedliche Eigenschaften in verschiedenen Bereichen der Klebschichtdicke auf. In den FEM-Simulationen wird die gesamte Klebschicht als homogen angenommen. Treten in der Praxis Spannungen mit ähnlichen Beträgen in unterschiedlichen Bereichen der Klebschicht auf, ist es möglich, dass diese Spannungen einerseits lokal toleriert werden, andererseits jedoch in einem anderen Bereich zu einem Versagen der Klebschicht führen. Diese Phänomene sind mit den in dieser Arbeit durchgeführten FEM-Simulationen jedoch nicht darstellbar.

Bei den FEM-Simulationen der Modelle mit 75 % PTFE-Folie zeigt sich ein Bereich mit sehr hohen Spannungen, die mit dem untypischen Bruchbild einiger Proben dieser Imperfektion korrelieren (vgl. Abbildung 39). Auf der Klebschichtseite, die keine Fehlstelle aufweist, befindet sich ein Bereich direkt oberhalb der Imperfektion, welcher höhere Schubspannungen aufweist. Diese Zone ist auf Abbildung 58 dargestellt.

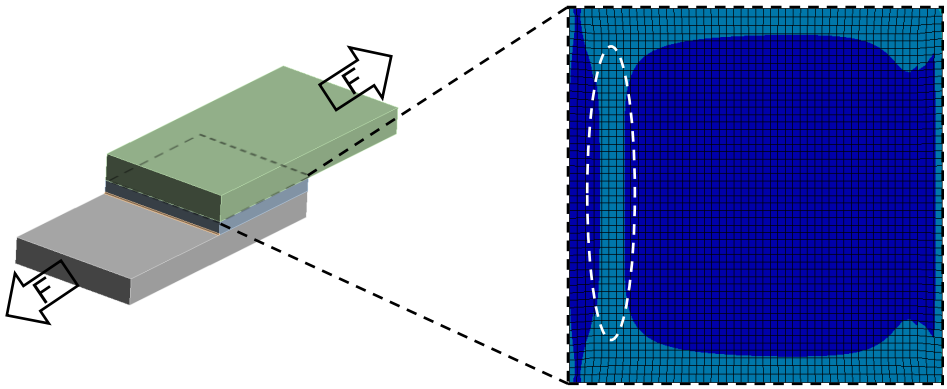


Abbildung 58: Bereich höherer Spannungen (Ellipse) auf Klebschichtseite ohne Imperfektion bei Modell mit PTFE-Folie 75 %

Aufgrund des Bereichs mit erhöhten Schubspannungen, welcher lediglich bei dem Modell mit PTFE-Folie in hoher Ausprägung von 75 % auffällig wird, besteht die Möglichkeit, dass der Riss in diesem Bereich verläuft. Bei einer Ausprägung von 50 % PTFE-Folie ist der Unterschied der Schubspannungen bereits deutlich geringer. Diese Beobachtung erklärt sehr wahrscheinlich das spezielle Bruchverhalten, welches insbesondere bei den Proben mit PTFE-Folie mit 75%-Ausprägung auftritt.

Ein Vergleich der Daten der *ARAMIS 3D Camera* mit den FEM-Simulationen hinsichtlich des Deformationsverhaltens zeigt, dass sich die Verläufe dieser Daten sehr ähnlich gestalten. Dies ist auf Abbildung 59 dargestellt.

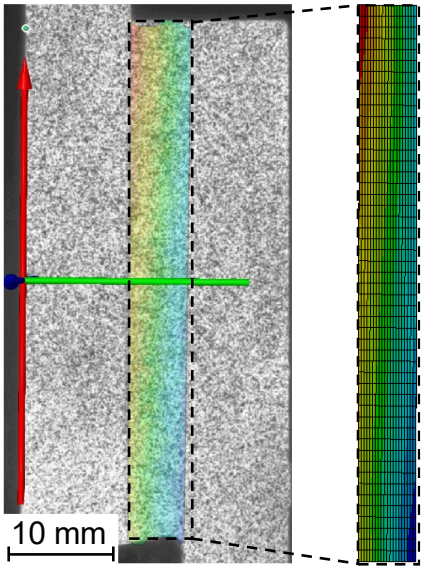


Abbildung 59: Deformation der Klebschicht in den experimentellen Untersuchungen (links) und in den FEM-Simulationen (rechts)

Bei der Gegenüberstellung des geometrischen Verhaltens (Gleitung, Längen- und Dickenänderung) zeigen sich signifikante Abweichungen. Die Messwerte der *GOM*-Messtechnik ermitteln bei den Proben mit HK in der 2x3-Anordnung bei einer Belastung von 5 kN beispielsweise eine Längenänderung von etwa 0,006 mm, während die numerischen Berechnungen einen Wert von mehr als dem Fünffachen (0,034 mm) ausgeben. Diese Abweichung zwischen den Werten nimmt mit steigender Belastung weiter zu. Ein Grund hierfür ist, dass der Bereich der Klebschicht in der Software *GOM Correlate* nicht exakt ausgewählt werden kann (vgl. Abschnitt 4.2.2). Daher besteht die Möglichkeit, dass die von der Software ausgewertete Flächenkomponente nicht ausschließlich die Klebschicht, sondern auch Bereiche der Fügeteile umfasst. Insbesondere das *obere* Fügeteil, an dem in den Simulationen die Zugkraft aufgebracht wird (vgl. Abbildung 47), verformt sich laut den FEM-Simulationen stärker als die Klebschicht. Dies kann dazu führen, dass der hohe Verformungswert auch von dem Fügeteil stammen kann. *ANSYS* berücksichtigt hingegen ausschließlich die Ergebnisse der Klebschicht, was zu Abweichungen zwischen den Werten aus den experimentellen Versuchen und den FEM-Simulationen führt. Zudem können die Maße der Zugscherproben aus den experimentellen Untersuchungen von den angestrebten Abmessungen (vgl. Abbildung 21) abweichen. Es ist daher möglich, dass die Länge, Breite oder Höhe der Fügeteile sowie der Klebschicht nicht exakt mit den in den FEM-Simulationen verwendeten Werten übereinstimmen. Die Platzierung der Punkte bei der Auswertung mit *GOM Correlate* (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 33) erfolgt ausschließlich basie-

rend auf den angestrebten Abmessungen. Folglich können sich die Positionen, an denen die Werte abgelesen werden, in *GOM Correlate* und den FEM-Simulationen geringfügig unterscheiden, was zu weiteren Abweichungen führt.
Zwischen den Gleitungswerten der *GOM*- und FEM-Ergebnisse liegt stets ein Faktor von ca. drei. In diesem Zusammenhang kann das FEM-Modell unter Berücksichtigung eines Umrechnungsfaktors das Materialverhalten angemessen darstellen. Bei den Werten für die Dicken- und Längenänderungen hingegen lässt sich kein konstanter Umrechnungsfaktor finden. Hier kann das Verhalten der Zugscherprobe während des Versuchs nur unzureichend simuliert werden. Dies ist auf die geringe Komplexität der aufgestellten FEM-Simulationen und die fehlenden Parameter zurückzuführen. Darüber hinaus werden aufgrund der über die Klebschicht hinausragenden Flächenkomponente beim *GOM*-System teilweise Werte der Fügeteile erfasst. Das Materialverhalten dieser Fügeteile unterscheidet sich jedoch erheblich von dem des Klebstoffs, weshalb Verschiebungs- bzw. Verformungswerte der Fügeteile nicht direkt mit den Ergebnissen der Klebschicht aus den FEM-Simulationen verglichen werden können. Weiterhin treten Abweichungen durch zeitabhängige Prozesse, wie viskoelastisches und viskoses Materialverhalten, auf. Diese sind Bestandteil der Experimente, wenn auch in geringer Ausprägung bei Duromeren, werden in den FEM-Simulationen jedoch nicht berücksichtigt. Alle genannten Gegebenheiten können somit zu signifikanten Abweichungen führen.
Trotz der Beschränkung auf den linear-elastischen Bereich konnten mithilfe der FEM-Simulationen die Auffälligkeiten aus den experimentellen Untersuchungen nahezu vollständig erklärt und ein erweitertes Verständnis über die Auswirkungen von Fehlstellen auf die Spannungsverteilung innerhalb der Klebschicht geschaffen werden. Diese Erkenntnis zeigt, dass bereits mit einfachen Modellen und grundlegenden Annahmen zu Randbedingungen und Materialparametern nutzbringende Aussagen über die Kritikalität von Fehlstellen in hochsteifen Aluminiumklebverbindungen getroffen werden können.

4.4 Statische Versuche an gealterten hochsteifen Klebverbindungen

Neben Imperfektionen innerhalb der Klebschicht degradieren zudem Alterungseinflüsse die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen (vgl. Abschnitt 2.4). Darüber hinaus können Imperfektionen dazu führen, dass Alterungsprozesse anders ablaufen, gegebenenfalls sogar beschleunigt werden, weshalb das Verhalten von

fehlerfreien und fehlerbehafteten Proben bei verschiedenen Alterungseinflüssen untersucht wird. Um herausfordernde Bedingungen zu simulieren, wird das Beispiel einer Verklebung am Schiff gewählt. In maritimer Umgebung sind Klebverbindungen neben mechanischen Belastungen insbesondere Temperaturwechseln, Salzwassereinwirkungen und UV-Strahlung ausgesetzt. Strukturelle Klebverbindungen dienen vor allem der Übertragung großer Lasten. Infolgedessen wird davon ausgegangen, dass die Klebfläche den Anforderungen entsprechend dimensioniert und aufgrund des in zahlreichen Experimenten nachgewiesenen schädigenden Einflusses von UV-Strahlung auf Kunststoffe einen Großteil der Klebschicht von den Fügeteilen oder durch zusätzliche Maßnahmen verdeckt ist. In dieser Arbeit wird sich daher auf den Einfluss von Salzwasser und Temperaturwechseln auf die Klebverbindung konzentriert, welche ebenfalls von der DIN EN ISO 21368:2024-10 empfohlen werden [50, p. 111].
Hierfür wird einerseits der standardisierte Salzsprühnebeltest gemäß DIN EN ISO 9227:2023-03 eingesetzt. Zur Simulation von Temperaturunterschieden wird andererseits der Klimawechseltest nach PV1200 durchgeführt. Dieser Test umfasst einen 12-stündigen Prüfzyklus (vgl. Abbildung 60), der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswechsel umfasst, welche in Tabelle 22 aufgelistet sind. Um den kritischsten Zustand testen zu können, wird die längste von der DIN EN ISO 9227:2023-03 empfohlene Prüfdauer für beide Alterungsverfahren gewählt. Infolgedessen werden die Zugscherproben über einen Zeitraum von 1000 h den definierten Einflüssen ausgesetzt [100, p. 16] [101] [102].

Tabelle 22: Parameter der Alterungsverfahren [100] [102]

	Salzsprühnebeltest	**Klimawechseltest**
Auslagerungsdauer	1000 h	1000 h
Zyklusdauer	-	12 h
Temperatur	35 °C ± 2 °C	- 40…+ 80 °C ± 2 °C
Rel. LF	≈ 100 %	30…80 % ± 5 % (unreguliert unterhalb 10 °C)
Sprühmedium	5%ige Natriumchlorid-Lösung	Wasser
pH-Wert	6,5 bis 7,2	7,0 bis 8,5

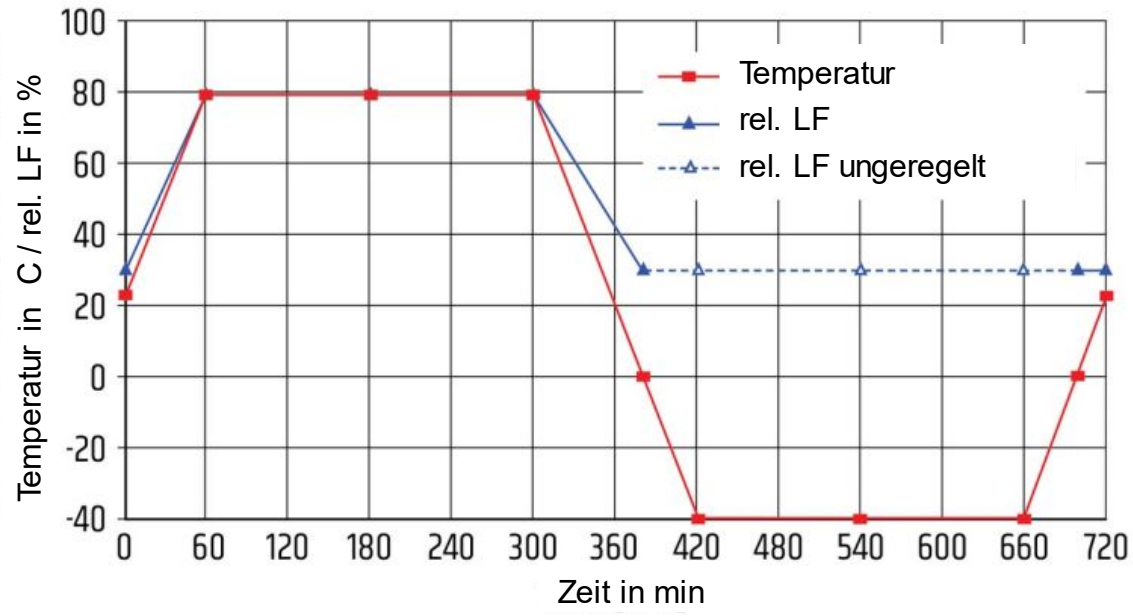


Abbildung 60: Prüfzyklus des Klimawechseltests nach PV1200 [101]

In den statischen Versuchen mit ungealterten Proben haben sich bei den verschiedenen Fehlerarten Grenzwerte aufgezeigt, ab welchen die Kritikalität der Imperfektionen steigt. Insbesondere bei den Serien mit VK und HK konnte ein Abfall der durchschnittlichen Festigkeit zwischen der 3x4- und der 4x6-Anordnung festgestellt werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden eine fehlerfreie Referenzserie sowie jeweils zwei Serien mit VK und HK der Alterung ausgesetzt. Mit der gealterten Referenzserie wird untersucht, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Alterungsstandards grundlegend auf die Klebverbindung haben. Die vier Serien der fehlerbehafteten Probekörper mit VK und HK dienen der Analyse, ob Volumenfehler in der Adhäsions- und Kohäsionszone Feuchtigkeit anreichern und die Wirkung der Alterung verstärken. Aus diesem Grund werden diese Imperfektionen und Anordnungen ausgewählt, während z. B. Prüfkörper mit PTFE-Folie oder Abweichungen der Randgeometrie vernachlässigt werden. Die Möglichkeit, Feuchtigkeit aufgrund der vorhandenen Fehlstellen anzureichern, wird bei den Proben mit VK und HK als deutlich höher angesehen als bei denen mit PTFE-Folie. Die Abweichungen der Klebfugengeometrie befinden sich bei den Prüfkörpern direkt am Rand der Klebschicht, weshalb diese Bereiche unmittelbar den Alterungseinflüssen ausgesetzt sind. Die Auswirkungen werden sich sehr wahrscheinlich auf die Abnahme der Festigkeit aufgrund der Alterung beschränken, welche mit der Referenzserie ermittelt wird. Weitere Abminderungen aufgrund der Klebfugengeometrie sind nicht zu erwarten. Aus diesem Grund sind diese Fehlerarten nicht Bestandteil dieser Untersuchungen, da der Erkenntnisgewinn in diesen Fällen als gering

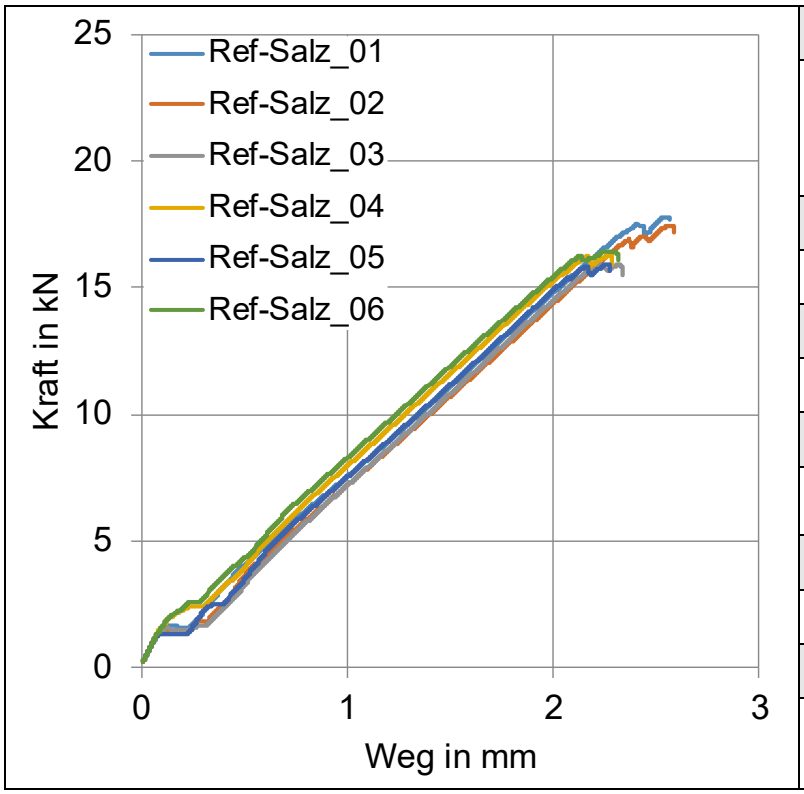
eingeschätzt wird. Die daraus resultierende Prüfmatrix ist in Tabelle 23 aufgeführt. Die Probenfertigung erfolgt nach dem gleichen Schema wie bei den Probenserien für die ungealterten Zugscherproben (vgl. Abschnitt 3.3).

Tabelle 23: Versuchsmatrix der gealterten statischen Versuche

Anzahl	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	∑ **60**
Fehlerort	-					gleichmäßig verteilt					
Ausprägung/ Anordnung	-		3x4		4x6		3x4		4x6		
Fehlertyp	-		VK				HK				
Klebschicht	50 mm x 50 mm x 5 mm										
Klebstoff	3M Scotch-Weld 7271 B/A										
Fügeteil	Aluminium (180 mm x 50 mm x 10 mm)										
Probenbe-zeichnung	**Referenz-Alterung-Salz**	**Referenz-Alterung-Klima**	**3x4 VK-Alterung-Salz**	**3x4 VK-Alterung-Klima**	**4x6 VK-Alterung-Salz**	**4x6 VK-Alterung-Klima**	**3x4 HK-Alterung-Salz**	**3x4 HK-Alterung-Klima**	**4x6 HK-Alterung-Salz**	**4x6 HK-Alterung-Klima**	

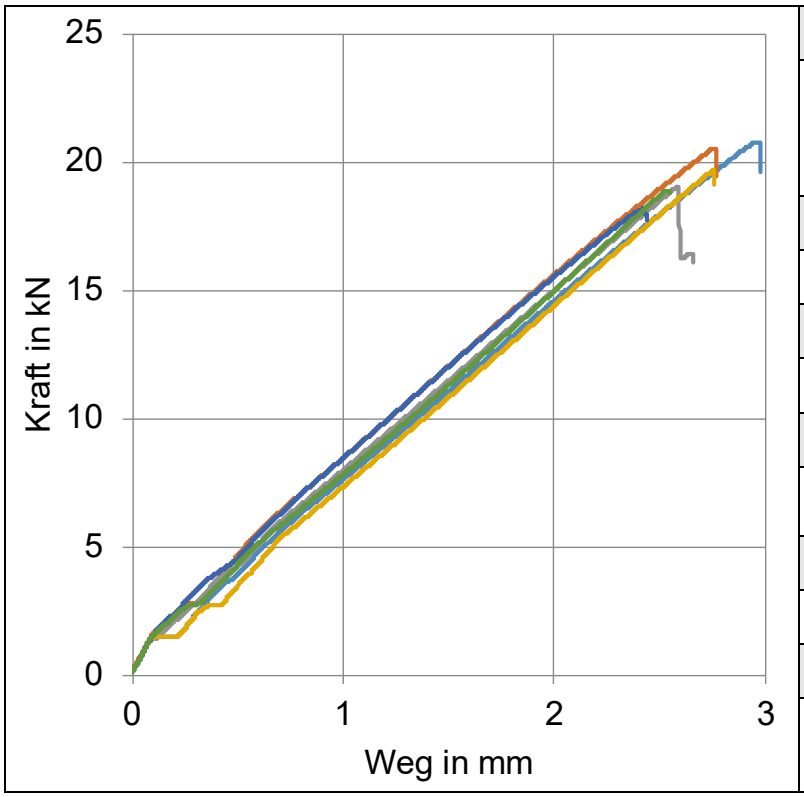
4.4.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in statischen Versuchen an gealterten Klebverbindungen

Die statischen Zugscherversuche mit den gealterten Zugscherproben werden mit den gleichen Parametern wie bei den ungealterten Versuchen durchgeführt (vgl. Abbildung 27 und Tabelle 9). Die Proben wurden vor den zerstörenden Prüfungen für 72 h im Konstantklima gelagert. So wird sichergestellt, dass alle Proben vor der zerstörenden Prüfung gleich klimatisiert sind und zumindest ein Großteil der in der Klebschicht befindenden Feuchtigkeit herausdiffundieren kann. Dies ermöglicht die Herausstellung von irreversibel hervorgerufenen Schäden durch die Alterungseinflüsse. Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse für die gealterten Referenzserien auf Abbildung 61 und Abbildung 62 sowie in Tabelle 24 und Tabelle 25 dargestellt.



Werkstoffe
Fügeteile: AlMg3 Klebstoff: 3M Scotch-Weld 7271 B/A
Prüfnorm
DIN EN 1465: 2009-07
Prüfmaschine
ZwickRoell Z050
Prüfgeschwindigkeit
$v = 2 \frac{mm}{min}$
Wegmessung
Traversenweg
Probengeometrie
Zugscherprobe 310 mm x 50 mm x 25 mm

Abbildung 61: Kraft-Weg-Diagramm der im Salzsprühnebel gealterten fehlerfreien Referenzserie



Werkstoffe
Fügeteile: AlMg3 Klebstoff: 3M Scotch-Weld 7271 B/A
Prüfnorm
DIN EN 1465: 2009-07
Prüfmaschine
ZwickRoell Z050
Prüfgeschwindigkeit
$v = 2 \frac{mm}{min}$
Wegmessung
Traversenweg
Probengeometrie
Zugscherprobe 310 mm x 50 mm x 25 mm

Abbildung 62: Kraft-Weg-Diagramm der im Klimawechseltest gealterten fehlerfreien Referenzserie

Tabelle 24: Ergebnisse der im Salzsprühnebel gealterten fehlerfreien Referenzserie

Referenz-Alt-Salz	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	16641	6,7
Standardabweichung	811	0,3
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Tabelle 25: Ergebnisse der im Klimawechseltest gealterten fehlerfreien Referenzserie

Referenz-Alt-Klima	Maximalkraft	Zugscherfestigkeit
Mittelwert	19528 N	7,8 MPa
Standardabweichung	997 N	0,4 MPa
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Die Bruchbilder zeigen die gleichen Auffälligkeiten wie bei den Versuchen mit ungealterten Proben (vgl. Abbildung 29). Alle Kraft-Weg-Diagramme, Abmessungen, zusammengefasste Ergebnisse und Bruchbilder der restlichen Zugscherversuche mit gealterten Proben sind in Anhang 90 bis Anhang 117 zu finden.

4.4.2 Vergleich und Interpretation der experimentellen statischen Untersuchungen an gealterten Klebverbindungen

Auf Abbildung 63 werden alle durchschnittlichen Festigkeitswerte der im Salzsprühnebel- und Klimawechseltest gealterten Zugscherversuche gegenübergestellt. Des Weiteren sind in Tabelle 26 und Tabelle 27 die Ergebnisse aller Versuche aufgelistet.

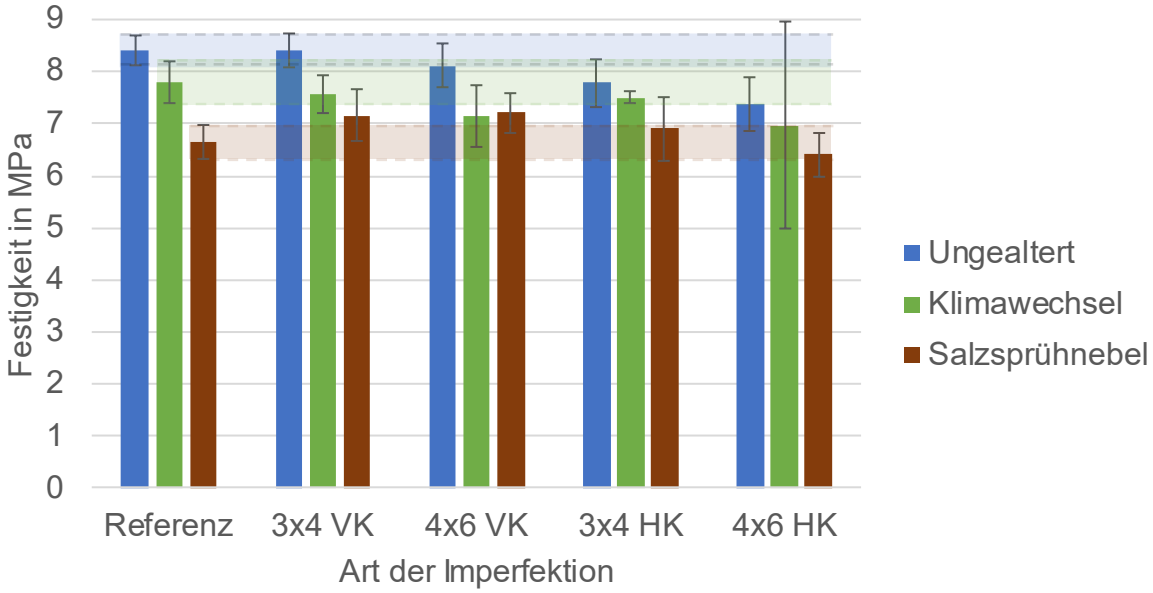


Abbildung 63: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von ungealterten und gealterten Zugscherproben

Tabelle 26: Zusammenfassung der im Salzsprühnebeltest gealterten statischen Zugscherversuche

Serie		**Referenz**	**Referenz-Alterung-Salz**	**3x4 VK-Alterung-Salz**	**4x6 VK-Alterung-Salz**	**3x4 HK-Alterung-Salz**	**4x6 HK-Alterung-Salz**
Imperfektion	**Typ**	keine	keine	VK		HK	
	Ausprägung/ Anordnung			3x4	4x6	3x4	4x6
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	-	6	13	3	7
Reduktion Klebfläche in %		-	-	-	-	9	19
Festigkeit (Mittelwert) in MPa		8,4 ± 0,3	6,7 ± 0,3	7,2 ± 0,5	7,2 ± 0,4	6,9 ± 0,6	6,4 ± 0,4
Abminderungsfaktor		-	0,79	0,85	0,86	0,82	0,76
Auswirkungen auf durchschnittliche Festigkeit in %		-	-21	-15	-14	-18	-24

Tabelle 27: Zusammenfassung der im Klimawechseltest gealterten statischen Zugscherversuche

Serie		**Referenz**	**Referenz-Alterung-Klima**	**3x4 VK-Alterung-Klima**	**4x6 VK-Alterung-Klima**	**3x4 HK-Alterung-Klima**	**4x6 HK-Alterung-Klima**
Imperfektion	**Typ**	keine	keine	VK		HK	
	Ausprägung/ Anordnung			3x4	4x6	3x4	4x6
Reduktion Klebstoffvolumen in %		-	-	6	13	3	7
Reduktion Klebfläche in %		-	-	-	-	9	19
Festigkeit (Mittelwert) in MPa		8,4 ± 0,3	7,8 ± 0,4	7,6 ± 0,4	7,2 ± 0,6	7,5 ± 0,1	7,0 ± 2,0
Abminderungsfaktor		-	0,93	0,90	0,85	0,89	0,83
Auswirkungen auf durchschnittliche Festigkeit in %		-	-7	-10	-15	-11	-17

Die Alterung durch den Salzsprühnebel- bzw. Klimawechseltest hat keine signifikanten Veränderungen im Bruchverhalten bewirkt. Die Bruchbilder der gealterten Zugscherproben weisen weitgehend Ähnlichkeiten mit denen der ungealterten Proben auf, wobei der SCF weiterhin das dominierende Bruchbild darstellt und lediglich ein kleiner Bereich CF zu beobachten ist. Zusätzlich zeigen nun vor allem die Proben, welche dem Salzsprühnebeltest unterzogen wurden, in den Randbereichen einen kleinen Anteil an Adhäsionsbrüchen (AF).

Die Auslagerung im Salzsprühnebel reduziert die maximalen Festigkeiten um bis zu 24 %. Die resultierende Schädigung ist überwiegend auf die Alterung zurückzuführen,

da die Referenzserie im Durchschnitt den zweitniedrigsten Festigkeitswert aller untersuchten Serien aufweist. Lediglich die größte untersuchte Anordnung mit VK zeigt noch niedrigere Kraftwerte im Vergleich zur Referenz. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Serien sind zudem teilweise auf die Schwankungen während des Herstellungs- und Prüfprozesses zurückzuführen. Des Weiteren bestätigt das vermehrte Versagen der Proben mit HK auf der Klebschichtseite ohne Fehlstellen (bei 3x4 HK noch wechselhaft, bei den Proben mit 4x6 HK durchweg), dass die eingeführten Imperfektionen nicht primär den schwächsten Bereich der Klebschicht darstellen, sondern der gealterte Klebstoff in der Grenzschicht. Zusätzlich ist an den Proben erkennbar, dass der Rand der Klebschicht leicht hell gefärbt ist (vgl. Abbildung 64). Dies weist darauf hin, dass die Einwirkungen von Salz und Feuchtigkeit in Kombination mit Temperatur die Struktur des Klebstoffs angreifen. Auf der Fügeteilseite, an der der SCF aufgrund der sehr dünnen Klebstoffrückstände gut sichtbar ist, zeigt sich zudem, dass an den Außenseiten der Bruchfläche teilweise kein Klebstoff vorhanden ist. Neben dem SCF, der bei den durch den Salzsprühnebeltest gealterten Proben überwiegt, sind am Rand der Klebschicht auch Bereiche mit AF zu finden. In diesen Bereichen konnten u. a. die Feuchtigkeitseinflüsse zuerst auf die Klebschicht wirken und somit eine Schädigung in der Adhäsionszone hervorrufen.

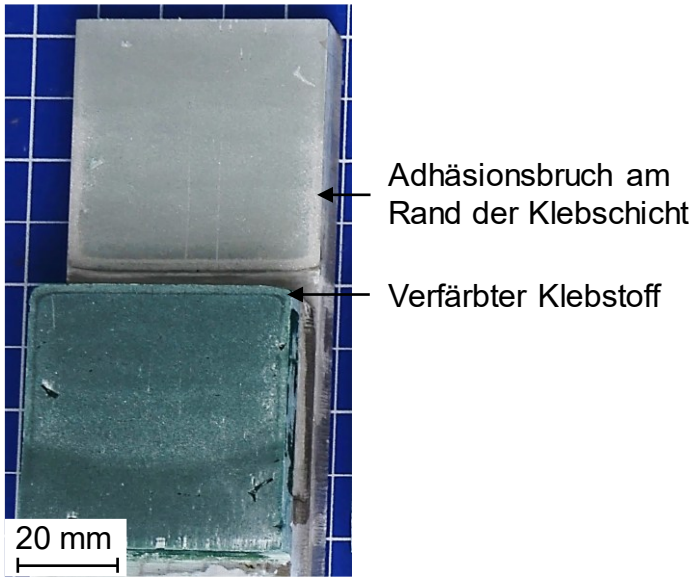


Abbildung 64: Auswirkungen des Salzsprühnebeltests auf das Bruchbild der Zugscherproben

Die Alterungseinwirkungen, welche im Salzsprühnebeltest auf die Prüfkörper einwirken, führen zum einen zu einer Schwächung der Kohäsionskräfte innerhalb der Klebschicht durch den Weichmachereffekt und zum anderen der Adhäsionskräfte zwischen der Fügeteiloberfläche und dem Klebstoff. Vor den zerstörenden Prüfungen konnten

an den gealterten Proben keine Ablösungen des Klebstoffs von der Fügeteiloberfläche festgestellt werden. Auf der Fügeteilseite, auf der nach der Prüfung der Großteil des Klebstoffs noch haftet, bleibt der Klebstoff weiterhin fest mit der Fügeteiloberfläche verbunden und weist keine abgelösten Bereiche auf. Die Alterungseinflüsse sorgen dafür, dass Feuchtigkeit in den Klebstoff diffundieren kann. Dadurch gelangen u. a. Wassermoleküle sowohl in den Klebstoff als auch zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche. Dies führt dazu, dass diese Bereiche teilweise irreversibel geschwächt werden, da zum einen physikalische Wechselwirkungen abgebaut werden (vor allem in der Adhäsionszone) und zum anderen chemische Bindungen durch Hydrolyse gespalten werden (vor allem in der Kohäsionszone). Der verfärbte Klebstoff am äußeren Rand der Klebschicht nach der Alterung lässt darauf schließen, dass Wasser in diese Bereiche über den Zeitraum von 1000 h hineindiffundiert ist und irreversible Schädigungen hervorgerufen hat. Auch nach der Konditionierung von 72 h resultieren die Veränderungen durch die Alterung dort in einem AF. Bei Erhöhung des Alterungszeitraums ist davon auszugehen, dass die Feuchtigkeit immer weiter, jedoch auch immer langsamer, in den Klebstoff hineindiffundieren und somit größere Bereiche dauerhaft schwächen wird.

Der Klimawechseltest zeigt bei der Referenzserie eine Reduktion der durchschnittlichen Festigkeit um bis zu 17 % im Vergleich zum ungealterten Zustand. Die Imperfektionen verringern die Verbundfestigkeit im Vergleich zur gealterten Referenzserie zusätzlich. Dieser negative Einfluss steigt zudem mit größerer Ausprägung der Imperfektionen. Auch hier weisen einige Proben mit HK ein Versagen auf der Klebschichtseite auf, die keine Imperfektionen enthalten. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Fehlstellen einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Zugscherproben haben und mit steigender Ausprägung zunehmen. Die Ursachen hierfür stimmen mit denen der ungealterten Zugscherversuche überein. Abweichend zu den im Salzsprühnebeltest gealterten Proben weisen diese jedoch keine Bereiche mit AF auf. Die dauerhafte Belastung mit der Natriumchloridlösung bei konstant 35 °C erscheint bei dieser Klebverbindung als deutlich kritischer in den Auswirkungen.

Die beiden Versuche mit gealterten Proben verdeutlichen, dass Alterungseinflüsse die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs negativ beeinflussen. Insbesondere die Einwirkung von salzhaltiger Feuchtigkeit bei erhöhten Temperaturen erweist sich als äußerst schädlich für die Klebverbindung. Die auftretende Veränderung der Kleb-

stoffstruktur und die Schwächung der Adhäsionskräfte im Randbereich, die beim Klimawechseltest nicht offensichtlich auftreten, haben erhebliche negative Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung. Daraus lässt sich schließen, dass ein optimaler Schutz der Klebverbindung vor Alterungseinflüssen entscheidend ist, um die Integrität des Verbunds langfristig zu gewährleisten. Des Weiteren zeigt der Untersuchungsumfang nicht eindeutig, dass Imperfektionen die Festigkeit der Klebverbindungen unter dem Einfluss von Salzsprühnebel weiter mindern. Die vorherrschende Schädigung resultiert aus der Alterung, da die gealterte Referenzserie nahezu den maximalen Festigkeitsabfall aufweist. Ebenso ist der Abfall der Festigkeit zwischen der 3x4- und 4x6-Anordnung in den ungealterten statischen Versuchen bei den gealterten Proben mit HK nicht erkennbar. Die gealterten Zugscherproben mit VK zeigen hingegen diesen Sprung zwischen den beiden Anordnungen, wobei die 4x6-Anordnung eine geringere durchschnittliche Festigkeit aufweist als die gealterte Referenzserie. Dies lässt vermuten, dass die Auswirkungen auf den Festigkeitsabfall der Klebverbindung mit steigendem Anteil der Imperfektionen in der Klebschicht zunehmen und ab einem bestimmten Punkt die durchschnittliche Festigkeit signifikant von einer fehlerfreien Probe abweicht.

Im Rahmen des Klimawechseltests zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei den ungealterten statischen Proben. Die Alterung senkt auch hier die durchschnittliche Festigkeit der gealterten Referenzserie, wobei die Imperfektionen diesen Effekt verstärken. Zudem ist ein Festigkeitsabfall zwischen der 3x4- und 4x6-Anordnung erkennbar, was den Erkenntnissen aus den statischen Versuchen mit ungealterten Proben entspricht. Bei den HK ist der Abminderungsfaktor der gealterten Proben vergleichbar mit dem der ungealterten Proben. Hingegen ist der Abminderungsfaktor der gealterten Zugscherproben mit VK höher als der der ungealterten Serien. Hier addieren sich die negativen Einflüsse der Alterung und der Imperfektionen, was verdeutlicht, dass die Alterung die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs verändert. Eine Anreicherung von Feuchtigkeit in den Bereichen der Volumenfehlern und damit einhergehend eine verstärkte Degradation der Festigkeitswerte im Vergleich zu den ungealterten Probenserien konnte jedoch nicht beobachtet werden.

4.5 Zyklische Versuche an ungealterten hochsteifen Klebverbindungen

Neben Imperfektionen innerhalb der Klebschicht und Alterungseinflüssen wirken sich auch wiederkehrende mechanische Belastungen auf die strukturellen Eigenschaften von Klebverbindungen aus (vgl. Abschnitt 2.4). Um den Einfluss der Imperfektionen unter zyklischer Last zu untersuchen, wird die DIN EN ISO 9664:1995-08 in Verbindung mit dem Dauerschwingversuch gemäß DIN 50100:2016-12 herangezogen. Die gleichen Prüfkörper, welche auch in den statischen Versuchen verwendet wurden, werden in den zyklischen Untersuchungen Wechselbelastungen ausgesetzt, bis die Klebschicht versagt. Nach dem Horizontenverfahren müssen dafür zunächst drei Lasthorizonte für die zyklischen Prüfungen ausgewählt werden, welche zu einem angestrebten Versagen der Proben innerhalb von 1×10^4 Lastwechseln (LW), 1×10^5 LW und 1×10^6 LW führen. Die Auswahl erfolgt auf Basis der Ergebnisse der statischen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 4.2) sowie anhand zyklischer Vorversuche, bei denen die fehlerfreien Proben mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % im Bereich der angestrebten LW versagen (vgl. Tabelle 29). In den experimentellen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben hat sich gezeigt, dass Proben mit VK erst ab einem Grenzwert (zwischen 6 % und 13 %, Unterschied zwischen 3x4- und 4x6-Ausprägung) eine Abminderung der Festigkeit, hervorgerufen durch Kohäsionsfehler, zeigen. Ähnliches Verhalten wiesen die Prüfkörpern mit HK auf. Diese setzten grundlegend bei Auftreten dieser Fehlerart die Festigkeit herab, der Betrag der Schädigung wurde jedoch ebenfalls beim Übergang von der 3x4- auf die 4x6-Ausprägung weiter erhöht. Zudem zeigten auch die Proben mit PTFE-Folie zwischen der Ausprägung mit 25 % und 50 % Anteil des Adhäsionsfehlers einen starken Abfall bezüglich der Festigkeit der Klebverbindung. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden speziell diese Ausprägungen der verschiedenen Imperfektionsarten in den zyklischen Versuchen betrachtet. Darüber hinaus werden die Zugscherproben mit keilförmigen Einschnürungen quer zur Zugrichtung in den Prüfplan mitaufgenommen, da diese die höchste Steigerung der Festigkeit erzielt haben. Somit kann ermittelt werden, ob ähnliche Effekte auch in den zyklischen Versuchen auftreten. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 28 zu sehen.

Tabelle 28: Versuchsmatrix der ungealterten zyklischen Versuche

Anzahl	15	12	12	12	12	12	12	12	∑ **99**
Fehlerort	-	gleichmäßig verteilt				zentral platziert auf einem Fügeteil		quer	
Ausprä-gung/ Anordnung	-	3x4	4x6	3x4	4x6	25 %	50 %	Keil	
Fehlertyp	-	VK		VK		PTFE-Folie		Alu-einle-ger	
Klebschicht	50 mm x 50 mm x 5 mm								
Klebstoff	3M Scotch-Weld 7271 B/A								
Fügeteil	Aluminium (180 mm x 50 mm x 10 mm)								
Probenbe-zeichnung	**Referenz-zyklisch**	**3x4 VK-zyklisch**	**4x6 VK-zyklisch**	**3x4 HK-zyklisch**	**4x6 HK-zyklisch**	**25 %-zyklisch**	**50 %-zyklisch**	**Keil/q-zyklisch**	

4.5.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in zyklischen Versuchen an ungealterten Klebverbindungen

Die zerstörenden zyklischen Versuche werden an einer servohydraulischen Universalprüfmaschine durchgeführt (vgl. Abbildung 65). Die Prüfparameter sind in Tabelle 29 aufgeführt. Im Gegensatz zu den statischen Versuchen, bei denen die Zugscherproben lediglich auf Zug belastet wurden, erfolgt hier die Anwendung einer Zug-Druck-Wechsellast. Alle Zugscherproben, bei denen bis 3×10^6 LW kein Versagen auftritt, gelten als Durchläufer. Die Prüffrequenz wird auf 10 Hz begrenzt, um nach den Vorgaben der DIN EN 17460:2022-10 eine Erwärmung des Klebstoffs um mehr als 10 K während der Versuchsdurchführung zu vermeiden. Dies wurde bei den Versuchen zur

Auslegung der Lasthorizonte mithilfe von Thermographieaufnahmen bestätigt. [3, p. 73].

Tabelle 29: Prüfparameter der zyklischen Versuche

Prüfnorm	DIN EN ISO 9664:1995-08 bzw. DIN 50100:2016-12	
Probenform	Überlappungsklebverbindung in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07	
Temperatur	RT (ungeregelt)	
Prüfmaschine	Servohydraulische Universalprüfmaschine Typ LFV-63-HM	
Frequenz	10 Hz	
Spannungsverhältnis	-1	
Grenzschwingspielzahl	3.000.000	
Lasthorizonte	3	2,36 MPa
		3,21 MPa
		4,37 MPa

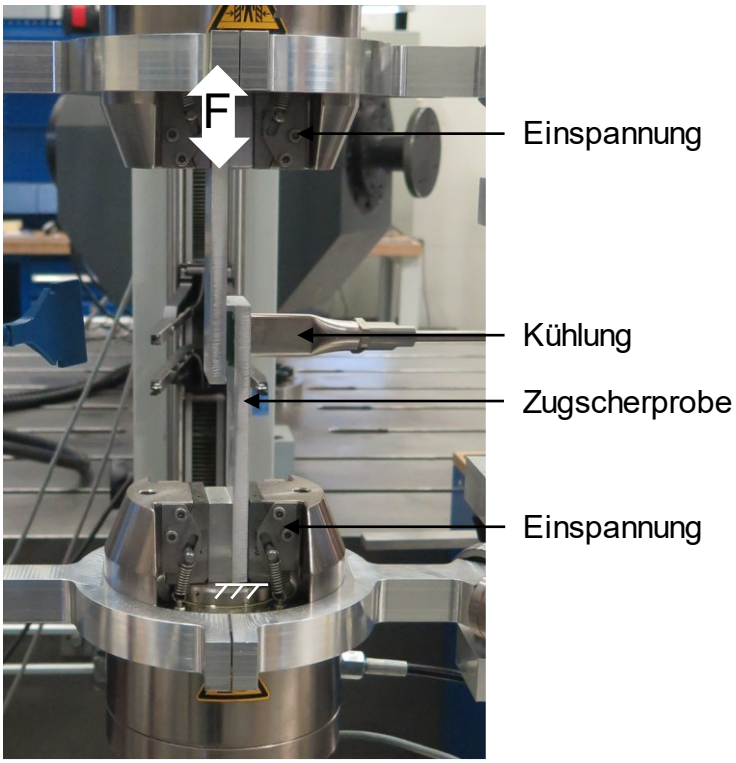


Abbildung 65: Versuchsaufbau der zyklischen Untersuchungen nach DIN EN ISO 9664:1995-08 unter Zuhilfenahme der DIN 50100:2016-12

Die Proben ohne Imperfektionen (Referenzserie) dienen als Vergleichswerte für die Probenserien mit Fehlstellen. Die Ergebnisse und die Wöhlerkurve der zyklischen Untersuchungen an fehlerfreien Prüfkörpern sind in Tabelle 30 sowie auf Abbildung 66 zu sehen. Alle Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Zugscherproben sind im Anhang 120 bis Anhang 138 aufgeführt.

Tabelle 30: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Referenzserie

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	1.387.789
	Standardabweichung in LW	334.900
	Variationskoeffizient	0,24
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	180.630
	Standardabweichung in LW	54.900
	Variationskoeffizient	0,30
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	19.026
	Standardabweichung in LW	2.159
	Variationskoeffizient	0,11

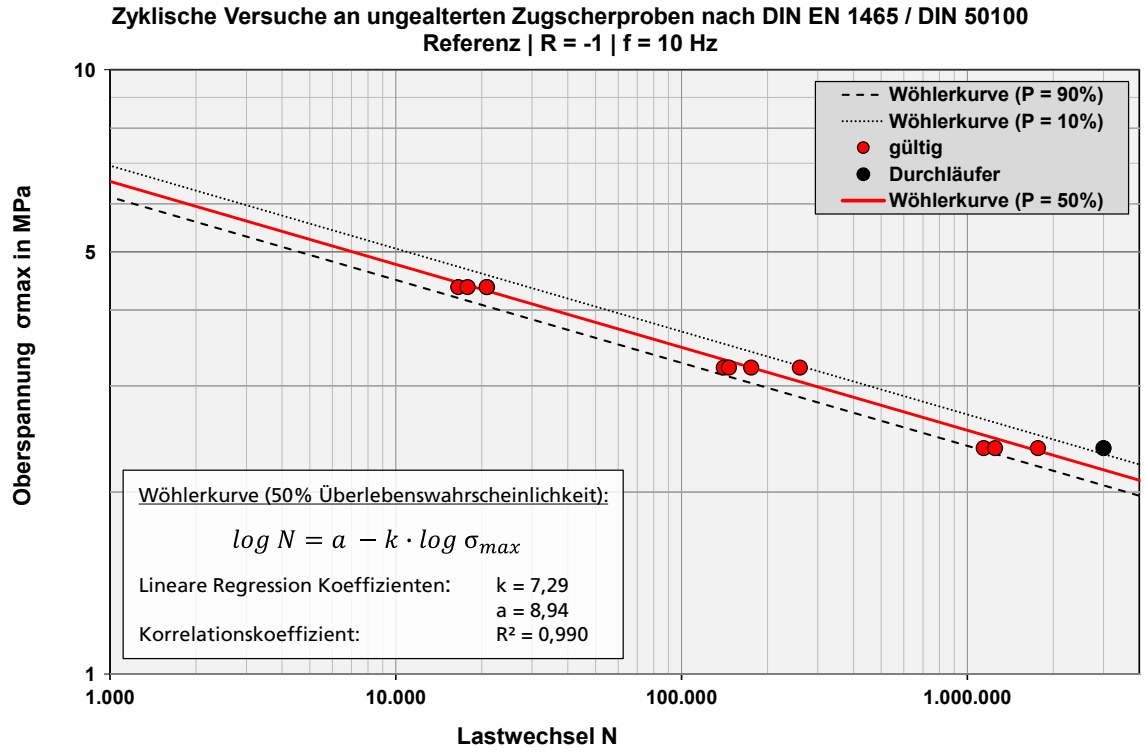


Abbildung 66: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Referenzserie

Die zyklische Belastung der Zugscherproben hat das Bruchverhalten im Vergleich zu den statischen Versuchen nicht signifikant verändert. Es tritt nahezu vollständig ein SCF mit einem kleinen Bereich von CF auf, was auf die zuvor beschriebenen Gegebenheiten zurückzuführen ist. Die erreichten LW überschreiten durchgängig die angestrebten Werte von 10^4, 10^5 und 10^6 bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %. Allerdings zeigen die Ergebnisse eine hohe Streuung, die teilweise auf die Toleranzen der händisch gefertigten Zugscherproben zurückzuführen sein kann. Beispielsweise können eine ungenaue Parallelität der Fügeteile oder leichte Verdrehungen bei der Einspannung zu lokal erhöhten Spannungen in der Klebschicht führen, die während der gesamten Versuchsperiode anliegen und somit ein frühzeitiges Versagen begünstigen. Zudem weisen einige Proben Fertigungsfehler, wie kleine Lufteinschlüsse, auf, die ebenfalls die Lebensdauer negativ beeinflussen. Alle Ergebnisse, Abmessungen, Wöhlerkurven und Bruchbilder der zyklischen Versuche sind in Anhang 118 bis Anhang 147 dokumentiert [103, pp. 268-274].

4.5.2 Vergleich und Interpretation der experimentellen zyklischen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben

Alle Ergebnisse der zyklischen ungealterten Untersuchungen sind in Tabelle 31 sowie Abbildung 67 bis Abbildung 69 dargestellt.

Tabelle 31: Zusammenfassung der zyklischen ungealterten Untersuchungen

Serie		**Referenz-zyklisch**	**3x4 VK-zyklisch**	**4x6 VK-zyklisch**	**3x4 HK-zyklisch**	**4x6 HK-zyklisch**	**25 %-zyk-lisch**	**50 %-zyk-lisch**	**Keil/q-zyklisch**
Imperfektion	**Typ**	keine	VK		HK		PTFE-Folie		Alulein-leger
	Ausprägung/ Anordnung		3x4	4x6	3x4	4x6	25 %	50 %	quer
Reduktion Klebstoffvo-lumen in %		-	6	13	3	7	-	-	5
Reduktion Klebfläche in %		-	-	-	9	19	25	50	-
Neigung k Zeitfestig-keitsgerade		7,29	6,23	7,85	7,14	7,60	6,47	6,90	7,38
LW bei 2,36 MPa		1.387.789 ± 335.248	474.035 ± 146.306	765.023 ± 179.158	645.594 ± 277.892	731.536 ± 255.951	597.981 ± 133.735	138.297 ± 27.202	2.968.233 ± 71.434
Abminde-rungsfaktor 2,36 MPa		-	0,34	0,55	0,47	0,53	0,43	0,10	2,14
LW bei 3,21 MPa		180.630 ± 54.936	78.019 ± 15.903	59.446 ± 27.421	72.023 ± 28.585	64.356 ± 4.591	84.236 ± 21.717	11.738 ± 7.781	330.392 ±106.260
Abminde-rungsfaktor 3,21 MPa		-	0,43	0,33	0,40	0,36	0,47	0,06	1,83
LW bei 4,37 MPa		19.026 ± 2.169	10.193 ± 2.439	7.160 ± 1.416	7.525 ± 709	6.527 ± 3.118	11.079 ± 950	2.022 ± 564	31.243 ± 3.054
Abminde-rungsfaktor 4,37 MPa		-	0,54	0,38	0,40	0,34	0,58	0,11	1,64

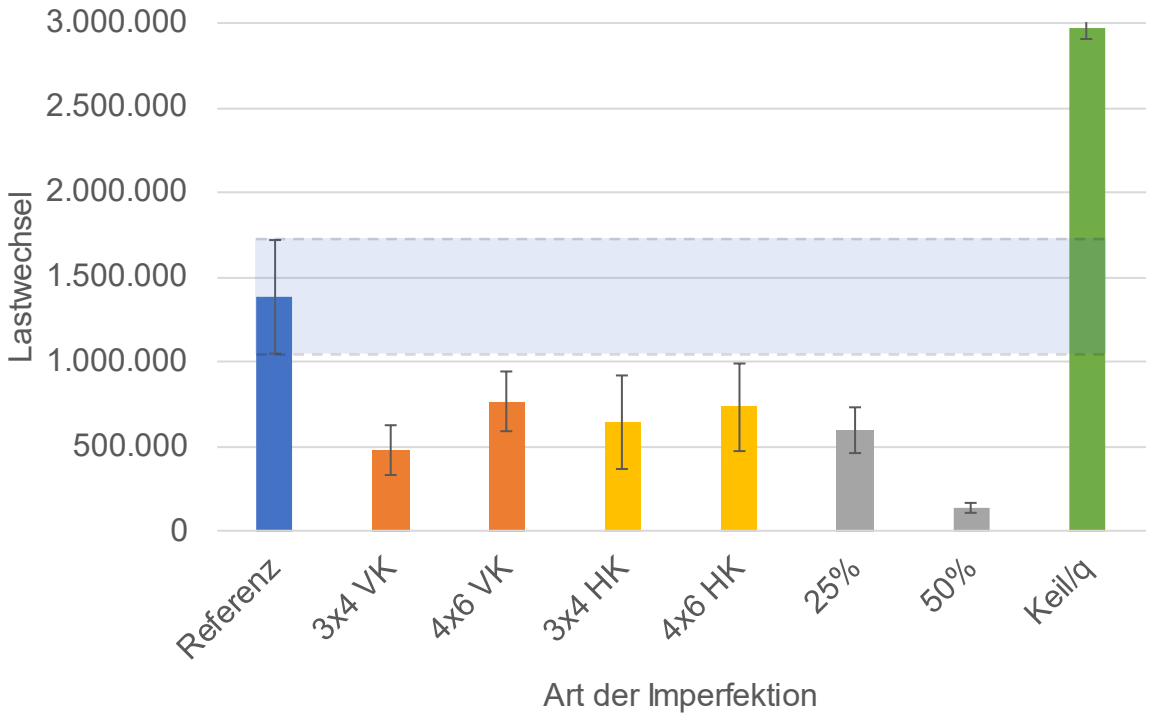


Abbildung 67: Durchschnittliche LW bei einer Maximalspannung von 2,36 MPa

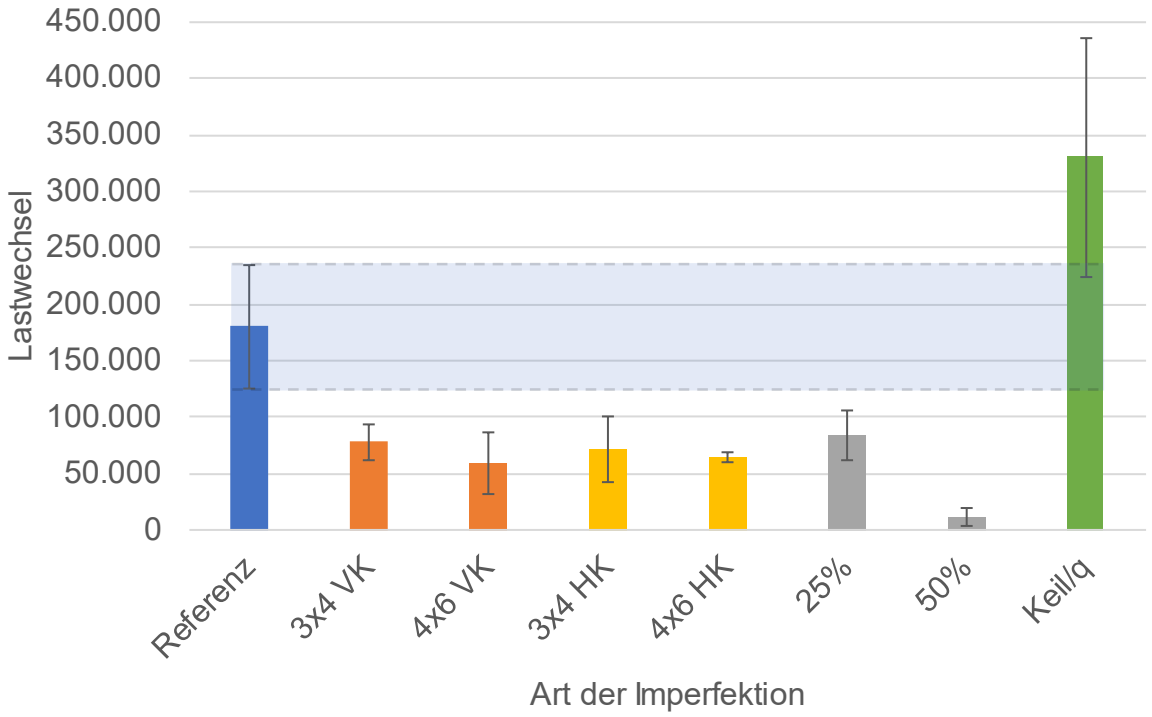


Abbildung 68: Durchschnittliche LW bei einer Maximalspannung von 3,21 MPa

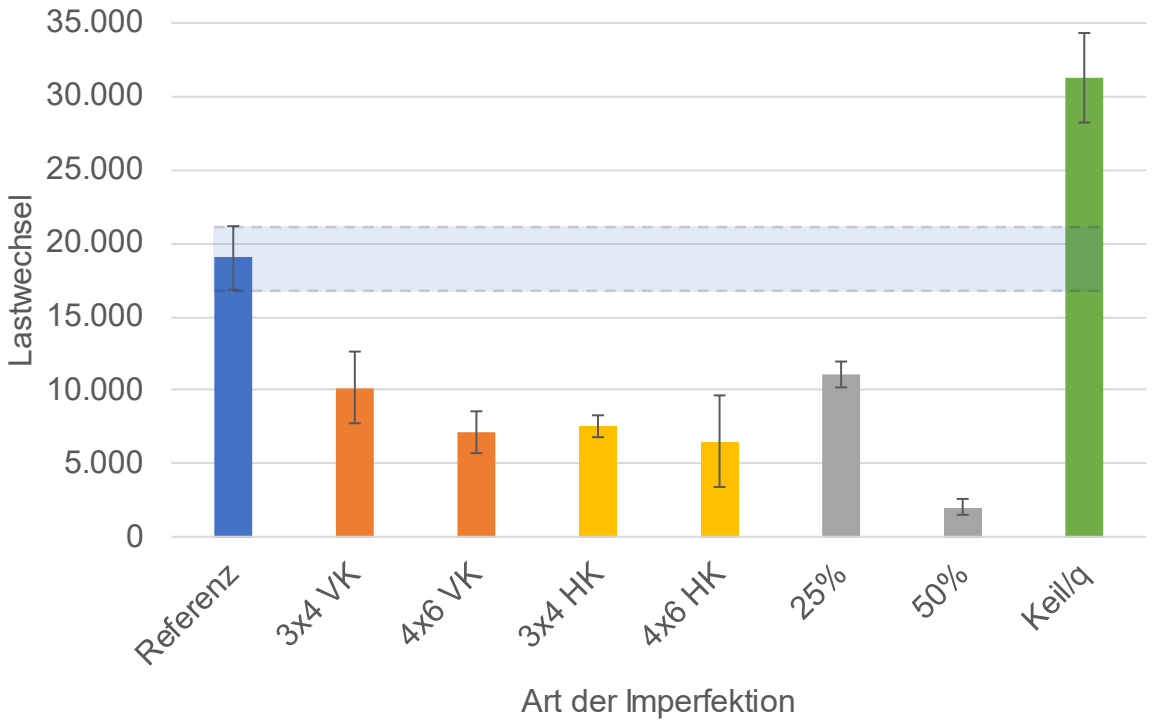


Abbildung 69: Durchschnittliche LW bei einer Maximalspannung von 4,37 MPa

Im Rahmen der zyklischen Versuche werden die Einflüsse der Imperfektionen, die sich in den statischen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben gezeigt haben, größtenteils bestätigt. Generell reduzieren alle untersuchten Imperfektionen die LW im Vergleich zur Referenzserie. Eine Ausnahme bilden hierbei lediglich die Zugscherproben mit quer zur Zugrichtung angeordneten keilförmigen Einschnürungen. Im Vergleich zu den statischen Versuchen zeigen sich bei den zyklischen Untersuchungen jedoch deutlich höhere Abminderungsfaktoren. Weiterhin erweisen sich insbesondere bei den beiden höheren Belastungen die HK im Durchschnitt schädlicher als die VK. Dies belegt, dass Imperfektionen in der Grenzschicht und somit im Bereich des Rissfortschritts auch bei zyklischen Belastungen eine stärkere negative Beeinflussung der Klebschicht aufweisen als Fehlstellen, die rein in der Kohäsionszone liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Proben der HK in der 3x4-Anordnung lediglich in zwei von zwölf Fällen auf der Seite der Imperfektionen versagen. Bei den HK in der 4x6-Anordnung beträgt dieser Anteil fast die Hälfte der Proben. Dies verdeutlicht, dass die Klebschicht infolge der zyklischen Belastungen geschwächt wird und die Imperfektionsseite nicht primär den anfälligeren Bereich der Klebverbindung darstellt. Diese Beobachtungen stehen im Gegensatz zu den Ergebnissen der statischen Untersuchungen. Es ist

jedoch zu beachten, dass die Auswirkungen der Positionierung der Proben bei zyklischen Beanspruchungen deutlich mehr Einfluss auf die Ergebnisse haben als bei den statischen Untersuchungen. Darüber hinaus zeigt sich bei den beiden höheren Lasthorizonten, dass HK im Durchschnitt die LW stärker reduzieren als die Proben mit reinen Adhäsionsfehlern (PTFE-Folie) in der 25 %-Ausprägung. Neben der Reduktion der Klebfläche wird auch die Verringerung des Klebstoffvolumens für die festgestellten Unterschiede mitverantwortlich sein. Die Analyse der Bruchbilder zeigt, dass bei den Proben mit reinen Adhäsionsfehlern in der 25 %-Ausprägung diese durchgehend nicht auf der Klebschichtseite versagen, auf der sich die PTFE-Folie befindet. Dies legt nahe, dass die zyklische Belastung den Klebstoff derart schwächt, dass die Imperfektion nicht die dominierende Ursache für das Versagen darstellt. Im Gegensatz dazu werden bei den Proben mit Adhäsionsfehlern mit 50 %-Ausprägung die LW auch bei den zyklischen Versuchen am stärksten herabgesetzt, wobei alle Zugscherversuche auf der Seite versagen, wo sich die PTFE-Folie befindet. Dies zeigt, dass die PTFE-Folie beim Übergang der Ausprägungen von 25 % auf 50 % sehr wahrscheinlich deutlicher in den Bereich hoher Spannungen in der Klebschicht (vgl. Abbildung 7) vordringt, wodurch sich das Schädigungspotenzial deutlich erhöht. Die keilförmigen Einschnürungen quer zur Zugrichtung zeigen, wie bereits in den statischen Versuchen, einen positiven Einfluss auf die Klebverbindung, da sie im Durchschnitt höhere LW aufweisen als alle anderen Serien. Beim niedrigsten Lasthorizont sind zudem nahezu alle Zugscherversuche Durchläufer, was bedeutet, dass sie nicht versagt haben. Das Bruchbild ähnelt dem aus den statischen Versuchen, wobei ein dominanter SCF- und ein ausgeprägter CF-Bereich zu beobachten sind, der sich im mittleren Bereich der Klebschichtdicke manifestiert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der grundlegend negative Einfluss der Imperfektionen auf die Klebverbindung, die in den statischen Versuchen festgestellt wurden, auch in den zyklischen Versuchen beobachtet werden konnten. Das generelle Bruchverhalten zeigt nur geringfügige Unterschiede. Wider Erwarten zeigen die Bruchbilder jedoch, dass der Bereich des Versagens oftmals entlang des Bereichs der Klebschicht verläuft, welcher keine Imperfektionen aufweist (bei Fehlstellen in der Grenzschicht). Der Wechsel zwischen Zug- und Druckbeanspruchung scheint zu anderen oder beschleunigten Schädigungsmechanismen innerhalb der Klebschicht zu führen. Weiterhin sorgen lokale Temperaturüberhöhungen, die trotz ausreichend dimensionierter Kühlung nicht zu vermeiden sind, für eine Veränderung der mechanischen Ei-

genschaften der Klebverbindung (vgl. Abschnitt 2.4). Die Alterungsvorgänge, in diesen Versuchen hervorgerufen durch mechanische Beanspruchung, beschleunigen Schädigungsprozesse und führen so zu einem früheren Versagen der Proben. Die deutlich erhöhte Kritikalität von Imperfektionen in Klebverbindungen, welche sich in der Literatur in vielen Quellen gezeigt hat (vgl. Abschnitt 2.7), konnte somit bestätigt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bruchbilder bei einigen Probenserien eine mäßige Qualität der Klebverbindung offenbaren, welche auf herstellungsbedingte Fehler zurückzuführen sind. Diese beeinflussen neben den eingebrachten Imperfektionen zusätzlich die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindungen und beeinflussen somit die Integrität der Rückschlüsse, die aus den Ergebnissen der Versuche gezogen werden. Aus diesem Grund ist die teilweise sehr hohe Kritikalität der eingebrachten Imperfektionen, welche sich in den durchgeführten zyklischen Untersuchungen aufgezeigt hat, zumindest vereinzelt infrage zu stellen.

4.6 Statische Versuche an ungealterten hochsteifen Klebverbindungen auf Substrukturebene

Um die Ergebnisse aus den vorangegangenen Versuchen mit Prüfkörpern auf Couponebene zu bestätigen, wird eine repräsentative Substruktur entwickelt. Mit dieser werden Skalierungseffekte zwischen Coupon- und Substrukturebene ermittelt und untersucht, ob eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den vorherigen Versuchen gegeben ist. Im Zuge dessen wird zudem ein anderes Klebstoffsystem, welches jedoch ebenfalls ein hochsteifes System auf Epoxidharzbasis mit ähnlichen Eigenschaften ist, verwendet. Dies zeigt, ob die Ergebnisse auf gleichartige Klebstoffe übertragen werden können. Die Prüfkörper der Substrukturversuche werden mit dem zweikomponentigen Epoxidharz-Konstruktionsklebstoff *Scotch-Weld 7240 B/A FR* von der Firma *3M* gefügt. Darüber hinaus wird die Dicke der Fügeteile auf 20 mm erhöht, um eine höhere Steifigkeit zu erreichen und somit die Fügeteilverformungen während der zerstörenden Prüfung durch die höheren Kräfte auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Couponversuchen zu erhalten. Die Vorkehrungen lassen eine bestmögliche Vergleichbarkeit zwischen den Prüfkörpern auf Coupon- und Substrukturebene zu. Dies ermöglicht die optimale Untersuchung der Übertragbarkeit vom Einfluss von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen auf vergrößerte Probekörper mit einem Klebstoffsystem, welches ähnliche Eigenschaften aufweist. Die Abmessungen der Prüfkörper für die Substrukturversuche sind auf Abbildung 70 dargestellt.

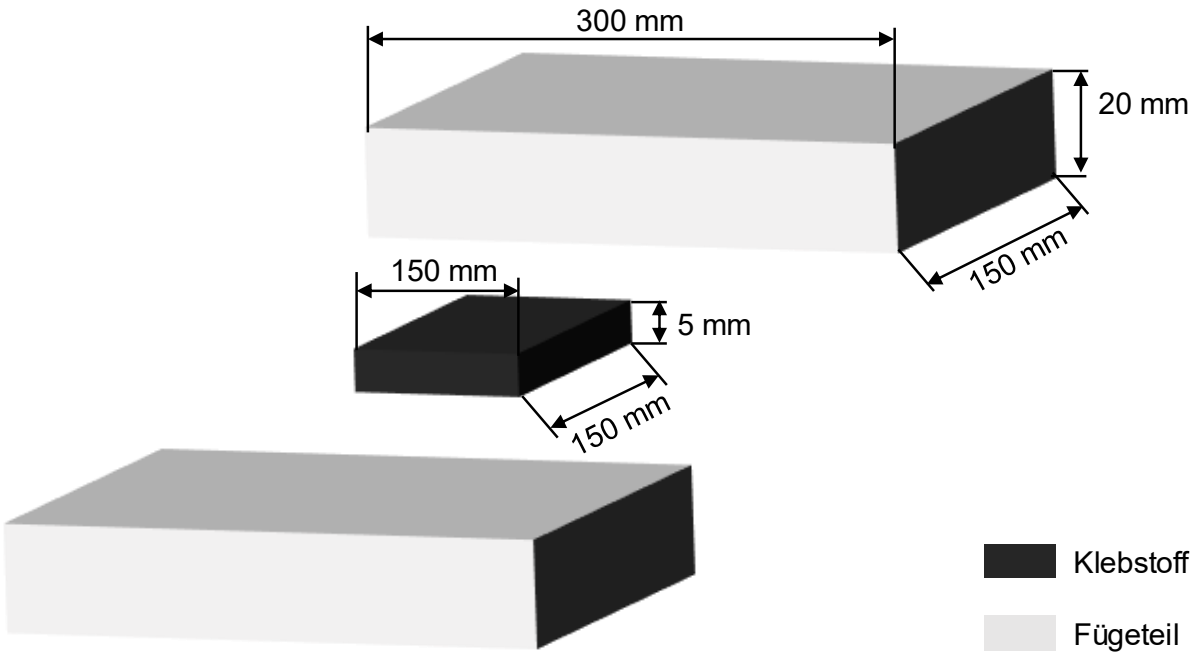


Abbildung 70: Abmessungen der Zugscherproben für die Substrukturversuche (Explosionsdarstellung)

Um die Übertragbarkeit des Einflusses von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen zu überprüfen, wird der gleiche Herstellungsprozess wie bei den Couponproben verwendet (vgl. Abschnitt 3.3). Es wird lediglich eine Imperfektionsart geprüft. Aufgrund der in den vorherigen Abschnitten ermittelten Kritikalität von Adhäsionsfehlern wird diese Imperfektionsart für die Substrukturversuche ausgewählt. Insbesondere die Serien mit HK haben gezeigt, dass die durch Fehlstellen verdeckte Klebfläche eine unmittelbare Schwächung der Festigkeit herbeiführt. Hinzu kommt der Einfluss des verdrängten Klebstoffvolumens, der ab einem Grenzwert zu einer zusätzlichen Abnahme der Verbundfestigkeit führt. Aus diesem Grund wird die maximale Ausprägung von 6x6 HK aus den Versuchen auf Couponebene für die Versuche auf Substrukturebene ausgewählt. Um dieselben Anteile der negativen Einflüsse in der Klebschicht herbeizuführen (vgl. Tabelle 5), sind jeweils 18 HK rasterförmig in Längs- und Querrichtung der Klebschicht (= 324 HK) zu platzieren. Dies ist in Tabelle 32 und auf Abbildung 71 dargestellt.

Tabelle 32: Verdeckte Klebfläche und verdrängtes Klebstoffvolumen durch die Einbringung von HK bei den Proben auf Substrukturebene

Parameter	**Ausprägung**
Anordnung	18x18
Verdeckte Klebfläche in %	28
Verdrängtes Klebstoffvolumen in %	9

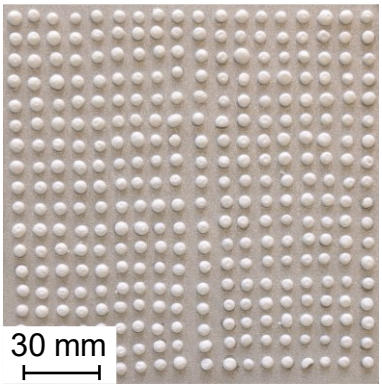


Abbildung 71: HK in der 18x18-Anordnung auf dem Fügeteil des Prüfkörpers auf Substrukturebene

4.6.1 Ermittlung mechanischer Referenzkennwerte in statischen Versuchen an ungealterten Klebverbindungen auf Substrukturebene

Zunächst wird eine Referenzserie ohne definiert eingebrachte Imperfektionen in statischen Versuchen zerstörend geprüft. Mittels dieser Daten können die Ergebnisse der fehlerbehafteten Proben ins Verhältnis gesetzt werden, um die Auswirkungen der HK auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen zu ermitteln und einen Vergleich zu den Couponproben ziehen zu können. Die Substrukturversuche werden an einer Universalprüfmaschine (vgl. Abbildung 72) durchgeführt. Die Prüfparameter der Untersuchungen sind in Tabelle 33 aufgelistet.

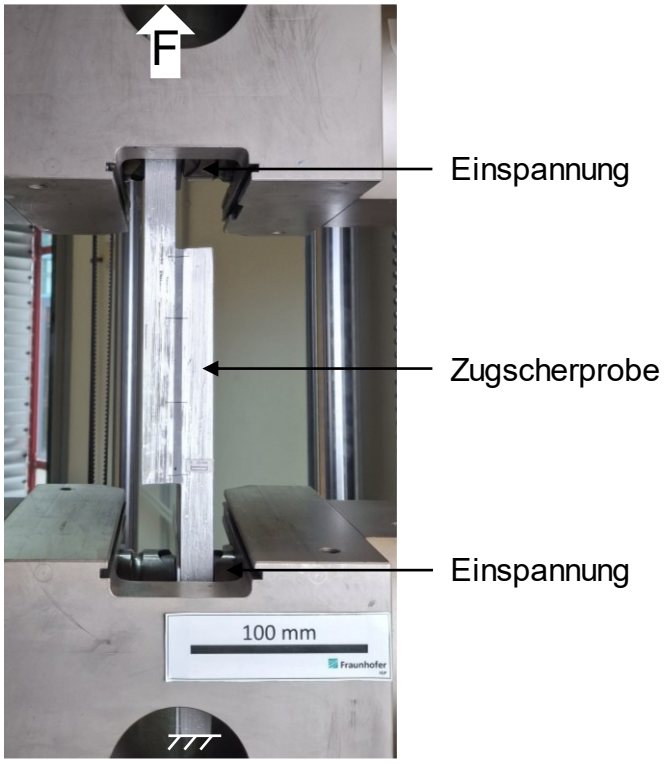
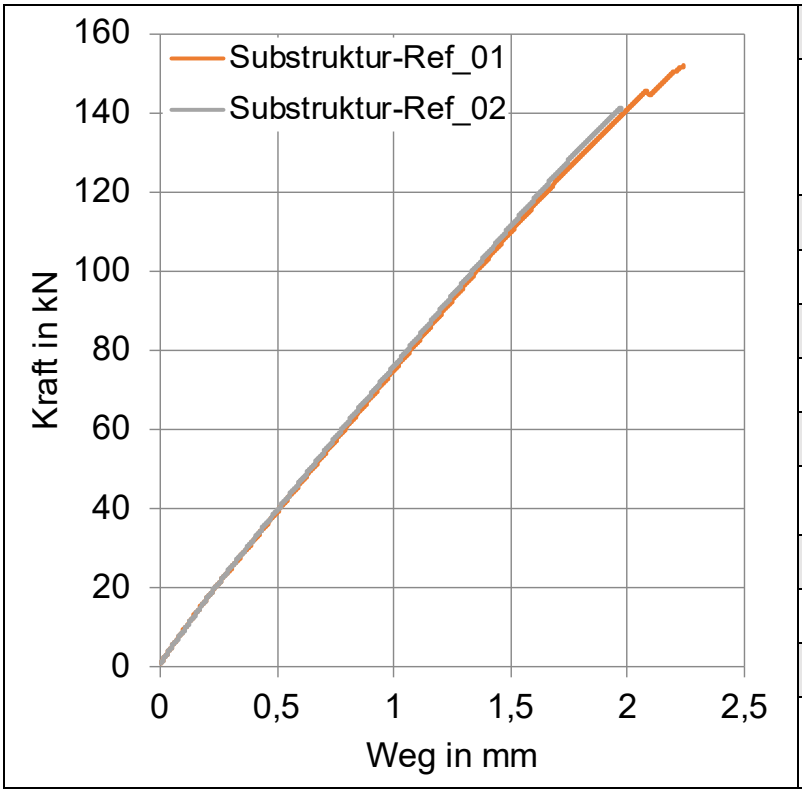


Abbildung 72: Prüfaufbau der Zugscherversuche auf Substrukturebene in Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07

Tabelle 33: Parameter der statischen Zugscherversuche auf Substrukturebene

Norm	In Anlehnung an DIN EN 1465:2009-07
Prüfmaschine	ZwickRoell Z400 (EQ-No.: 12262625) Kraftmessdose 400 kN Genauigkeitsklasse: 0,5
Belastungsart	Quasistatisch
Maschinensteuerung	Weggesteuert
Prüfparameter	Raumtemperatur (RT), rel. LF unkontrolliert
Vorkraft	100 N
Geschwindigkeit Vorkraft	5 $\frac{mm}{min}$
Prüfgeschwindigkeit	2 $\frac{mm}{min}$
Aufzeichnung der Wegverschiebung	Traversenweg

Im Folgenden wird beispielhaft auf die Ergebnisse der Referenzserie eingegangen. Alle weiteren statischen Untersuchungen an den Proben folgen dem gleichen Schema. Die entsprechenden Daten sind in Anhang 148 bis Anhang 153 zu finden. Aus dem zerstörenden Zugscherversuch resultiert ein Kraft-Weg-Diagramm, welches auf Abbildung 73 dargestellt ist. Die Ergebnisse der Referenzserie sind in Tabelle 34 aufgelistet.



Werkstoffe
Fügeteile: AlMg3 Klebstoff: 3M Scotch-Weld 7271 B/A
Prüfnorm
DIN EN 1465: 2009-07
Prüfmaschine
ZwickRoell Z050
Prüfgeschwindigkeit
v = 2 $\frac{mm}{min}$
Wegmessung
Traversenweg
Probengeometrie
Zugscherprobe 310 mm x 50 mm x 25 mm

Abbildung 73: Kraft-Weg-Diagramm der fehlerfreien Zugscherproben (Referenzserie) auf Substrukturebene

Tabelle 34: Ergebnisse der Referenzserie auf Substrukturebene

Referenz	Maximalkraft	Zugscherfestigkeit
Mittelwert	146715 N	6,5 MPa
Standardabweichung	7460 N	0,3 MPa
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Die Proben weisen das gleiche Bruchverhalten wie die Prüfkörper auf Couponebene auf (vgl. Abbildung 74). Das Risswachstum beginnt am Rand der Überlappung und führt zu einem CF. Das Versagen verläuft anschließend nahe der Fügeteiloberfläche und geht in einen SCF über, welcher einen Großteil der Bruchfläche ausmacht.

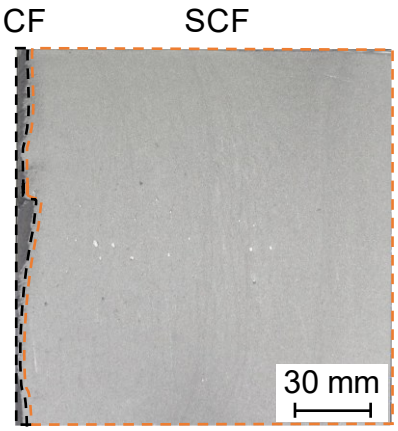


Abbildung 74: Verschiedene Bereiche des Bruchbilds bei der Referenzserie auf Substrukturebene

4.6.2 Vergleich und Interpretation der experimentellen statischen Untersuchungen an ungealterten Zugscherproben auf Substrukturebene

Die Bruchbilder der Prüfserien mit Imperfektionen, die aus den statischen Untersuchungen auf Substrukturebene hervorgegangen sind, zeigen nahezu identisches Bruchverhalten im Vergleich zu den Referenz- als auch zu den Couponproben. Die vorhandenen Fehlstellen beeinflussen das Rissverhalten demnach auch in größeren Dimensionen nicht signifikant. Alle Bruchbilder sind in Anhang 152 und Anhang 153 dokumentiert. Abbildung 75 zeigt eine Übersicht der Zugscherfestigkeiten der verschiedenen Probenserien auf Substrukturebene, welche statisch zerstörend geprüft wurden. Der leicht transparente blaue Balken entspricht der Standardabweichung der Referenzserie und spiegelt die Schwankungen während des Herstellungs- und Prüfprozesses wider.

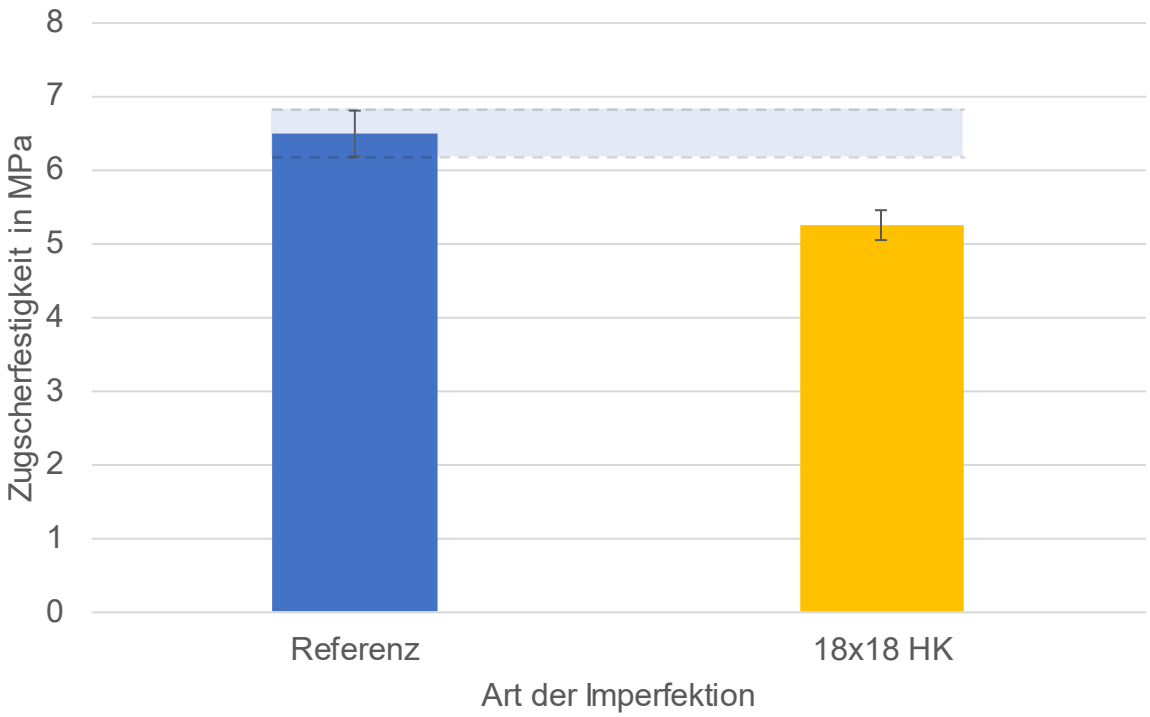


Abbildung 75: Vergleich der Zugscherfestigkeiten von Imperfektionen in der Kohäsions- und Adhäsionszone (HK) auf Substrukturebene

Die Ergebnisse der statisch geprüften ungealterten Probenserien auf Substrukturebene sind in Tabelle 35 aufgeführt.

Tabelle 35: Zusammenfassung der statischen Zugscherversuche auf Substrukturebene

Serie	**Referenz**	**18x18 HK**
Imperfektion	-	HK
Ausprägung/Anordnung	-	18x18
Reduktion Klebstoffvolumen in %	-	9
Reduktion Klebfläche in %	-	28
Festigkeit (Mittelwert) in MPa	6,5	5,3
Abminderungsfaktor	-	0,81
Auswirkungen auf durchschnittliche Festigkeit in %	-	-19

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Auswirkungen der Adhäsions- und Kohäsionsfehler auf die Festigkeit der Klebverbindung in einem ähnlichen Bereich befinden wie bei den Couponproben. Der Abminderungsfaktor auf Couponebene beträgt 0,87, auf Substrukturebene liegt dieser bei 0,81, was einer Abweichung von ca. 7 % entspricht. Dies ist u. a. auf den geringen Prüfumfang zurückzuführen, welcher keine statistische Absicherung erlaubt und zu Unterschieden führen kann. Weiterhin haben alle in den

vorangegangen Abschnitten aufgeführten Versuche gezeigt, dass Imperfektionen in Klebschichten die Standardabweichungen in einem Großteil der Prüfungen erhöht haben, wodurch eine größere Streuung innerhalb der geprüften Serien entsteht. Generell bestätigen die zerstörenden Prüfungen auf Substrukturebene die Ergebnisse der Imperfektionen in der Adhäsions- und Kohäsionszone auf Couponebene und zeigen, dass die Erkenntnisse bei gleichem Belastungsfall auf Klebstoffsysteme mit ähnlichen Eigenschaften in unterschiedlich dimensionierten Anwendungen übertragbar sind. Diese Erkenntnis lässt somit eine allgemeingültige Aussage zu den Auswirkungen von Imperfektionen in hochsteifen Klebverbindungen auf die mechanischen Eigenschaften bei der Verwendung von Aluminiumfügeteilen bei gleichen Randbedingungen zu, was die Grundlage für die im nächsten Kapitel folgende Aufstellung von Bewertungsgruppen bildet.

5 Bewertungsgruppenentwicklung zu den Auswirkungen von Imperfektionen in hochsteifen Klebverbindungen

Wie bereits in Kapitel 2 aufgeführt, verhindert der Mangel an Langzeiterfahrungen und Vertrauen sowie die damit verbundene Angst vor schweren Schadensfällen den großflächigen Einsatz der Klebtechnik in vielen Industriebranchen. Die Historie der Schweißtechnik hat gezeigt, dass sich über die frühzeitige Integration von Maßnahmen zur Qualitätssicherung dieses Image ändern lässt. Mit der DIN EN ISO 21368:2024-10 (allgemeine Klebanwendungen), welche die DIN 2304-1:2020-04 Ende 2026 ersetzt, und der DIN EN 17460:2022-10 (Klebanwendungen im Schienenfahrzeugbau), welche die DIN 6701-1:2004-11 im September 2025 ersetzt, befinden sich zwei Normen in der Übergangsphase zur internationalen Einführung, die diese Erkenntnis aus der Historie der Schweißtechnik direkt angehen. Sie zeigen jedoch auch, dass Richtlinien und Normen mit vollumfänglichen Vorgaben für verschiedenste Anwendungsbereiche bei klebtechnischen Anwendungen noch in der Anfangsphase stecken. Beispielsweise fehlen in beiden Standards Informationen, wie mit Fehlstellen in Klebverbindungen umzugehen ist. Aufgrund der weiten Verbreitung schweißtechnischer Anwendungen und Normen in verschiedensten Industriebranchen liegt es nahe, dass sich die Klebtechnik an diesem Stand orientiert, um Bewertungsgruppen von Imperfektionen für klebtechnische Anwendungen aufzustellen. Dies erleichtert die Integration neuer Vorgaben und Prozesse in die Unternehmen, da sich bekannte Methodiken auf neuartige klebtechnische Fügeverbindungen anwenden lassen.

Anhand der Erkenntnisse um die Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen aus Kapitel 4 können Rückschlüsse auf die Kritikalität verschiedener Fehlerarten unter definierten Randbedingungen gezogen werden. Gemeinsam mit den zusammengetragenen Erkenntnissen aus der aktuellen Literatur (vgl. Abschnitt 2.7) bilden diese die Grundlage für die Entwicklung der Bewertungsgruppen. Es hat sich gezeigt, dass Adhäsionsfehler prinzipiell eine stark festigkeitsvermindernde Wirkung auf Klebverbindungen haben, unabhängig von deren Lage. Dieser Einfluss wird umso kritischer, je größer der Anteil dieser Fehlerart in Bereichen hoher Spannungen ist. Reine Kohäsionsfehler in hochsteifen Klebverbindungen führen nicht unmittelbar zu einer Abnahme der Festigkeit. Die Kritikalität dieser Imperfektion ist stark von dem Anteil innerhalb der Klebschicht abhängig. Die hochsteifen Klebstoffsysteme neigen laut der Literatur und den Ergebnissen dieser Arbeit

dazu, einen gewissen Anteil an Kohäsionsfehlern zu tolerieren, bevor sich ein negativer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften in der Klebverbindung einstellt. Diese Imperfektionen sind somit als weniger kritisch im Vergleich zu Adhäsionsfehlern einzuordnen. Abweichungen der Klebfugengeometrie haben sich bei hochsteifen Klebstoffsystemen als wenig kritisch bzw. sogar festigkeitsfördernd (abhängig von der Belastungsrichtung) herausgestellt. Auf Basis dieser Erkenntnisse können die Bewertungsgruppen aufgestellt werden.

Sowohl das Schweißen als auch das Kleben gehören zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren. Trotzdem unterscheiden sie sich in ihrem Wirkprinzip. Während bei Schweißverfahren in der Regel artgleiche Werkstoffe unter hohem Wärmeeintrag miteinander verbunden werden, zählt das Kleben zu den wärmearmen Fügeverfahren, wo generell artfremde Materialien über Adhäsion und Kohäsion zusammengehalten werden. Dennoch lassen sich in der Normung beider Verfahren Gemeinsamkeiten finden, auf Basis derer sich die Bewertungsgruppen für klebtechnische Anwendungen in Anlehnung an bestehende schweißtechnische Normen aufstellen lassen. In der DIN EN ISO 5817:2023-07 wird der Umgang mit Imperfektionen in Schweißverbindungen in Abhängigkeit der Anforderungen an die Schweißnaht eingeteilt (vgl. Abbildung 19). Die Klebtechnik bietet diese Einteilung auf Basis der Sicherheitsklassen in der DIN 2304-1:2020-04 bzw. DIN EN ISO 21368:2024-10 ebenfalls. Hier werden Klebverbindungen hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen eines möglichen mechanischen Versagens klassifiziert. Die Unterteilung erfolgt in S1- (hohe Sicherheitsanforderungen) bis S4-Klebverbindungen (keine Sicherheitsanforderungen). Zusätzlich besteht eine Analogie beim Materialverhalten der beiden Fügeverfahren. Metalle zeigen bei Belastung elastische und plastische Verformungen. Kunststoffe, zu welchen Klebstoffe aushärten, haben neben diesen beiden Verformungen in der Regel noch viskoelastische Anteile. Dieses bei Kunststoffen oftmals als Kriechen bezeichnete Verhalten tritt bei Duromeren, zu welchen beispielsweise das in dieser Schrift verwendete Epoxidharz aushärtet, nicht bzw. nur in sehr geringem Maße auf (vgl. Abschnitt 2.6). Aus diesem Grund besteht eine Vergleichbarkeit zu schweißtechnisch gefügten Verbindungen, weshalb eine Übertragbarkeit auf die in dieser Schrift durchgeführten klebtechnischen Anwendungen grundlegend gegeben ist. Anhand der Erkenntnisse aus dieser Arbeit und der Literatur werden Bewertungsgruppen für Imperfektionen in geklebten hochsteifen Aluminiumverbindungen aufgestellt, welche in Tabelle 36 dargestellt sind. Es ist anzumerken, dass die Bewertungsgruppen lediglich für scherbeanspruchte

Klebverbindungen, welche nach der DIN EN ISO 21368:2024-10 hauptsächlich eine lasttragende Funktion übernehmen und ähnlichen Randbedingungen und Materialkombinationen wie in dieser Arbeit unterliegen, gelten. Darüber hinaus muss eine ausreichende Adhäsion vorhanden sein [50, pp. 14, 21] [87, p. 4] [104, p. 8] [105, pp. 1, 6].

Tabelle 36: Bewertungsgruppen für Imperfektionen in hochsteifen Aluminiumklebverbindungen hinsichtlich der Sicherheitsklasse

Beschreibung	Sicherheitsklasse und -anforderung			
	S1 hoch	S2 mittel	S3 gering	S4 keine
Fehler in Adhäsionszone	-	-	-	*
Fehler in Kohäsionszone	*	*	*	+
Abweichungen der Klebfugengeometrie	*	*	+	+

Legende: + zulässige Einschränkung oder vom Regelwerk nicht behandelt
* bedingt zulässig: zulässig unter Einhaltung von Grenzwerten
- unzulässig

Die aufgeführte Literatur in Abschnitt 2.7 hat deutlich gemacht, dass Parameter wie Fehlerlage, -größe und -art, jedoch auch Einflüsse wie Belastungsart, Fügeteilsteifigkeit oder verwendetes Klebstoffsystem zu deutlichen Unterschieden in den Einflüssen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen führen. In den Richtlinien und Standards sollen jedoch grundlegende Aussagen über die Kritikalität von Imperfektionen getroffen werden, welche klebtechnischen Anwendern dabei helfen, die Verbindungen zulassungsgerecht zu gestalten und den Einsatz abzusichern. Die in Tabelle 36 aufgeführten Bewertungsgruppen dienen deshalb lediglich als Basis und müssen um weitere Variationen und Anwendungsfälle ergänzt werden. Im ersten Schritt erscheint es als sinnvoll, eine Unterscheidung hinsichtlich des eingesetzten Klebstoffsystems vorzunehmen. Gelaufene Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass hochelastische Klebstoffe (nach [20, p. 27] und [91, p. 140]: Festigkeit: 1…10 MPa, Reißdehnung: 70…300 %) in der Lage sind, einen größeren Anteil an Kohäsionsfehlern im Vergleich zu hochsteifen Klebstoffsystemen zu tolerieren, bevor sich ein negativer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften in der Klebverbindung ein-

stellt. Die flexiblen Klebstoffsysteme reagieren dafür jedoch aufgrund der höheren Verformungen bei Belastung anfälliger auf Abweichungen der Klebfugengeometrie (abhängig von der Art der Abweichung, z. B. [106, pp. 231-233]), weshalb diese als kritischer im Vergleich zu hochsteifen Klebstoffsystemen einzustufen sind. Adhäsionsfehler stellen auch hier die kritischste Fehlstellenart dar und sind generell zu vermeiden bzw. nicht zu tolerieren, wenn sie in Klebverbindungen der drei höchsten Sicherheitsklassen detektiert werden. Zusammen mit der in Abschnitt 2.7 vorgestellten Literatur kann somit eine nächste Iterationsstufe der Bewertungsgruppenentwicklung für Imperfektionen in geklebten Verbindungen auf Basis der Erfahrungen aus verschiedenen Arbeiten aufgestellt werden. Diese ist in Tabelle 37 aufgeführt. Ergänzend ist jedoch hinzuzufügen, dass Elastomere im Gegensatz zu Duromeren ein ausgeprägtes viskoelastisches Verformungsverhalten aufweisen und sich damit bei Belastung große Unterschiede im Materialverhalten im Vergleich zu schweißtechnisch gefügten Verbindungen einstellen. Diese Materialeigenschaft bleibt in diesem Beitrag zur Aufstellung von Bewertungsgruppen unberücksichtigt [7, pp. 11-14, 284-290].

Tabelle 37: Bewertungsgruppen für Imperfektionen in elastischen (A) und steifen (B) Aluminiumklebverbindungen hinsichtlich der Sicherheitsklasse

Beschreibung	Sicherheitsklasse, -anforderung und verwendetes Klebstoffsystem							
	S1 hoch		S2 mittel		S3 gering		S4 keine	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Fehler in Adhäsionszone	-	-	-	-	-	-	*	*
Fehler in Kohäsionszone	*	*	*	*	+	*	+	+
Abweichungen der Klebfugengeometrie	*	*	*	*	*	+	+	+

Legende:
- A elastischer Klebstoff: Festigkeit < 10 MPa | Reißdehnung > 70 %
- B steifer Klebstoff: Festigkeit > 10 MPa | Reißdehnung < 70 %
- \+ zulässige Einschränkung oder vom Regelwerk nicht behandelt
- * bedingt zulässig: zulässig unter Einhaltung von Grenzwerten
- \- unzulässig

Die aktuelle Entwicklung von hochsteifen Klebstoffen zielt zunehmend darauf ab, das ausgeprägte spröde Verhalten zu minimieren. Stattdessen wird auf eine Erhöhung der Zähigkeit und Flexibilität durch Hinzugabe von Additiven oder der Entwicklung gänzlich neuer Formulierungen hingearbeitet. Bei Weiterführung dieser Entwicklung ist davon auszugehen, dass sich hochfeste und -steife Klebstoffe zunehmend auch toleranter gegenüber Kohäsionsfehlern zeigen werden, wie es bei den elastischen Systemen der

Fall ist. Bei der Einführung von Bewertungsgruppen für Imperfektionen in Klebverbindungen sollte die Einteilung zunächst jedoch eher konservativ gestaltet werden, weshalb die in Tabelle 37 aufgezeigte Unterscheidung in Bezug auf Festigkeitswerte zunächst beibehalten werden sollte. Grundlage für die Weiterentwicklung der Bewertungsgruppen muss der stetige Aufbau an Wissen und Erfahrung über die Auswirkungen von Imperfektionen in Klebverbindungen sein. In der Literatur wurde zudem die Abhängigkeit der Fehlerlage und weiterer Faktoren wie z. B. verwendetes Fügeteilmaterial auf die Auswirkungen von Fehlstellen thematisiert. Dort resultierten die Imperfektionen teilweise in einer geringeren Abnahme der Festigkeit. Aufgrund des frühzeitigen Standes der Bewertungsgruppenentwicklung und der fehlenden Langzeiterfahrungen mit Klebverbindungen in vielen Anwendungsbereichen sollte hier dennoch im ersten Schritt der konservative Ansatz gewählt und weiterverfolgt werden. Für die Sicherheit ist es daher zunächst notwendig, stets von der größtmöglichen Kritikalität einer Imperfektion unabhängig von der Lage und den gewählten Fügeteilpartnern auszugehen. Aus diesem Grund wird aktuell auf eine Unterscheidung anhand der Fehlerlage als auch der Fügeteilsteifigkeit und -festigkeit verzichtet [83, pp. 1, 3] [107, p. 2].

6 Abschließende Betrachtungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse aus den beschriebenen Forschungsarbeiten zusammengefasst. Weiterhin werden mögliche Ansätze für zukünftige Arbeiten aufgezeigt, um zur Weiterentwicklung dieser Thematik und Etablierung der Auswirkungen von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften in Klebverbindungen in bestehende Standards beitragen zu können.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war es, Bewertungsgruppen für geklebte hochsteife Aluminiumverbindungen zu entwickeln. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Literatur wurden Verfahren erarbeitet, die eine reproduzierbare Einbringung charakteristischer Imperfektionen (Adhäsions-, Kohäsionsfehler und Fehlbildungen der Klebfugengeometrie) in Klebverbindungen ermöglichen, um eine realitätsnahe Simulation von Schädigungen innerhalb der Klebschicht zu gewährleisten. Mit dem Zugscherversuch in Anlehnung an die DIN EN 1465:2009-07 wurde ein Standardverfahren ausgewählt, mit dem die Einflüsse der Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von geklebten Aluminiumverbindungen untersucht werden konnten. Die fehlerfreien und fehlerbehafteten Probekörper wurden einerseits in statischen und andererseits in zyklischen zerstörenden Untersuchungen geprüft. Neben ungealterten Proben wurden auch in einem Salzsprühnebel oder Klimawechseltest gealterte Prüfkörper untersucht. Die experimentellen Versuche haben gezeigt, dass sich Adhäsionsfehler als kritischste Imperfektion herausgestellt haben. Bereits bei Auftreten der kleinsten Ausprägung dieser Fehlstelle zeigte sich unmittelbar ein Abfall der Festigkeit und somit ein negativer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung. Ein Erhöhen des Anteils der Adhäsionsfehler verstärkte dieses Verhalten stetig. Das Einbringen von Kohäsionsfehlern zeigte, dass das strukturelle Klebstoffsystem in der Lage ist, einen definierten Anteil dieser Schadensform in der Klebschicht zu tolerieren. Erst ab einem Anteil zwischen ca. 6…13 % verdrängten Klebstoffvolumens ließen sich negative Einflüsse auf die Festigkeit beobachten. Bei der Kombination von Adhäsions- und Kohäsionsfehlern konnte eine Überlagerung beider Schädigungspotenziale beobachtet werden, weshalb Volumenfehler in der Grenzschicht bzw. Adhäsionszone bei hochsteifen Klebverbindungen als schädigender einzustufen sind als reine Adhäsionsfehler. Die geringste Kritikalität der untersuchten Imperfektionen wiesen die Abweichungen der Klebfugengeometrie auf. Abhängig von der Belastungsrichtung zeigten sie nur

einen marginalen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Klebverbunds (längs zur Belastungsrichtung) bis hin zu einer starken Erhöhung der Festigkeit (quer zur Belastungsrichtung) bei scherender Beanspruchung. Letzteres lässt sich vor allem auf den positiven Einfluss der vorliegenden Fehlstelle auf die Spannungsverteilung innerhalb der Klebschicht zurückführen. Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen konnten mithilfe von numerischen Berechnungen bestätigt werden. Die Alterung mit Temperatur- und Medieneinfluss hat gezeigt, dass die in dieser Arbeit betrachteten Imperfektionen grundlegend keine verstärkende Wirkung auf vorhandene Alterungseinflüsse haben, sondern ihr Kritikalitätsniveau ähnlich bestehen bleibt. Bei den zyklischen Untersuchungen erwiesen sich die eingebrachten Fehlstellen jedoch als deutlich schädigender im Vergleich zu den statischen Prüfungen. Diese Beobachtung wurde bereits vermehrt in der Literatur aufgeführt. Ungeplant eingebrachte Fehlstellen in den untersuchten Proben haben diesen negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindungen bei zyklischer Belastung sehr wahrscheinlich signifikant verstärkt, weshalb diese erhebliche Herabsetzung der Leistungsfähigkeit bei Vorhandensein von Imperfektionen infrage zu stellen ist. Abschließend wurden Substrukturversuche durchgeführt, um die Übertragbarkeit vom Einfluss ausgewählter Fehlstellen auf größere Dimensionen bei Verwendung eines ähnlichen Klebstoffsystems zu überprüfen. Dabei wurde sich auf die Kombination von Adhäsions- und Kohäsionsfehlern konzentriert. Die Versuche haben gezeigt, dass die Imperfektionen zu vergleichbaren Abminderungsfaktoren führen, wodurch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Versuchen auf Couponebene bestätigt wurde. Die Datenbasis, welche sowohl aus Literatur als auch aus den Versuchen dieser Arbeit stammt, konnte anschließend zur Entwicklung eines Bewertungsgruppenvorschlags für Imperfektionen in hochsteifen Klebverbindungen für definierte Randbedingungen und Materialkombinationen genutzt werden und anschließend um elastische Systeme erweitert werden. Dieser Beitrag zur Aufstellung von Bewertungsgruppen von klebtechnischen Anwendungen beruht vorwiegend auf den Ergebnissen der in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen. Die Erkenntnisse sind daher nur auf die beschriebenen und definierten Randbedingungen und Materialkombinationen anwendbar. Zudem wurde der Einfluss von für Kunststoffe typischen zeitabhängigen Verformungen nicht berücksichtigt. Insbesondere bei der Erweiterung der Bewertungsgruppen auf Elastomere wurden lediglich Ergebnisse aus der Literatur hinzugezogen, weshalb der Gültigkeitsbereich der Erkenntnisse in den

jeweiligen Quellen zu prüfen ist.
Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Bewertungsgruppenempfehlung stellt eine erste Iterationsstufe dar, welche mit zusätzlichen Erkenntnissen erweitert werden muss, um Einhalt in klebtechnische Normen zu erhalten. Im aktuellen Stand können die Ergebnisse lediglich als ein erstes Indiz für die Auswirkungen von Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen gewertet werden und dürfen nicht als verbindliche Grundlage für die Bewertung der Integrität von Strukturen im Betrieb genutzt werden. Dieser Schritt erfordert einen fortschreitenden Erkenntnisgewinn innerhalb dieser Thematik. Welche Aspekte bei der Erweiterung der vorgeschlagenen Bewertungsgruppen berücksichtigt werden können, um den in dieser Arbeit erstellten Vorschlag zukünftig als verbindliche Wissensquelle nutzen und als Stand der Technik etablieren zu können, wird im nächsten Abschnitt thematisiert.

6.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen eine wichtige Grundlage für die Überführung von Bewertungsgruppen für klebtechnische Anwendungen in den Stand der Technik in Form von Richtlinien oder Normen dar. Zusätzlich bieten sie neue Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen, die notwendig sind, um das enorme Potenzial der Klebtechnik als zukünftige Fügetechnologie in vielen Industriebranchen vollkommen auszuschöpfen sowie das Vertrauen in dieses Verfahren weiter zu stärken.
Ziel nachfolgender Forschungsarbeiten sollte die Erweiterung der Datenbasis zu Auswirkungen von Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen mit stetig variierenden Materialpaarungen und Klebstoffsystemen sein, um übergreifende und allgemeingültige Vorgaben für klebtechnische Richtlinien und Normen aufstellen zu können. Die in der Literatur aufgeführten und anhand dieser Arbeit bestätigten Unterschiede im Hinblick auf die Toleranz gegenüber Adhäsions-, Kohäsionsfehlern und Abweichungen der Klebfugengeometrie sollten weiterhin Teil zukünftiger Forschungsarbeiten darstellen. Im Zuge dessen sollten die zyklischen Versuche dieser Arbeit mit qualitativ hochwertigen Prüfkörpern wiederholt werden. Weiterhin ist der Einfluss der gewählten Fügeteile auf die Kritikalität von Imperfektionen in Klebverbindungen zu untersuchen. Ebenfalls sind vor allem Fehlstellen in spannungskritischen Bereichen, also vor allem in den Randbereichen bei scherender Beanspruchung, in den Fokus zu rücken. Vorangegangene Arbeiten zeigen, dass die Kritikalität der Imperfektionen teilweise exponentiell zunimmt, je weiter sie in Bereiche hoher

Spannungen vordringen, die über dem durchschnittlichen Spannungsniveau der Klebfuge liegen. Zudem beziehen sich die Erkenntnisse aus der Literatur zur Erweiterung der Bewertungsgruppen auf Elastomere vorwiegend auf Festigkeitskennwerte, die in statischen Versuchen ermittelt wurden. Elastomere und die hier nicht einbezogenen Thermoplaste haben konträr zu den Duromeren eine hohe Kriechneigung, weshalb dieses Verformungsverhalten in einer Aufstellung von Bewertungsgruppen nicht vernachlässig werden darf. Denkbar wäre, dass in den Bewertungsgruppen z. B. ein Viskoelastizitätsfaktor hinzuzuziehen ist, mit welchem zeitabhängige Verformungen von Kunststoffen in die Bewertung miteinbezogen werden können. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob bzw. wie Kriechvorgänge den Einfluss von Imperfektionen auf die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen verändern.

In dieser Arbeit hat sich zudem der Salzsprühnebeltest als deutlich schädigender erwiesen als der Klimawechseltest. Dies legt nahe, dass abhängig von den Beanspruchungen auch andere Maßnahmen im Hinblick auf den Umgang mit Schäden in der Klebschicht getroffen werden müssen. Die Schweißtechnik hat sich über die Zeit des Einsatzes qualitätssichernde Maßnahmen für eine Vielzahl von verschiedensten Anwendungsbereichen aufgebaut. Die Klebtechnik sollte ebenfalls eine Unterscheidung zwischen allgemeingültigen und branchenspezifischen Vorgaben vornehmen. Erste Bestrebungen in diese Richtung stellen bereits die DIN EN 17460:2022-10 (Schienenfahrzeugbau) und die DIN 2304-2:2024-10 (Schiffbau) dar. Diese müssen jedoch stetig um neue Erkenntnisse und um neue Branchen erweitert werden, was zudem in aktuellen Forschungsbestrebungen adressiert werden sollte [3] [75].

Der aktuelle Stand der Technik hat weiterhin deutlich gemacht, dass die Detektion von Imperfektionen in Klebverbindungen in vielen Anwendungen immer noch eine Herausforderung darstellt und verschiedenste Messverfahren voraussetzt, um eindeutige und sichere Ergebnisse hervorzubringen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich beim Kleben um einen speziellen Prozess handelt, wird die zerstörungsfreie Prüfung geklebter Verbindungen auch zukünftig fester Bestandteil beim Einsatz der Klebtechnik als Fügeverfahren bleiben. Dort ist weiterhin viel Potenzial vorhanden, um die Anwendung schneller, einfacher und sicherer zu machen.

Literaturverzeichnis

[1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2015.

[2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 4: Ausführungsregeln und Qualitätssicherung," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2015.

[3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Bahnanwendungen – Kleben von Schienenfahrzeugen und deren Komponenten," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2022.

[4] B. Mayer und A. Groß, Kreislaufwirtschaft und Klebtechnik, Fraunhofer Verlag, 2020.

[5] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Klebstoffe - Benennung und Definitionen," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2016.

[6] G. Habenicht, Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie (6. überarbeitete und ergänzte Auflage), Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien, 2012.

[7] G. Habenicht, Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen (6. aktualisierte Auflage), Springer-Verlag, 2009.

[8] G. Kötting, „Dissertation: Untersuchung der Klebschichtmorphologie und der beanspruchungsabhängigen Deformations- und Versagensmechanismen in der Klebfuge von Metallklebverbindungen," Paderborn, 1984.

[9] A. V. P. Gurumoorthy und K. H. Khan, „Polymers at interfaces: Biological and non-biological applications," Recent Research in Science and Technology, 2011.

[10] D. Welch, M. P. Lettinga, M. Ripoll, Z. Dogic und G. A. Vliegenthart, „Trains, tails and loop of partially adsorbed semi-flexible filaments," The Royal Society of Chemistry, 2015.

[11] K. Paeng, J. Choi, Y. Park und D. Sohn, „Temperature effect of hydrophobically modified polyethylene oxide at the air-water interface,“ Colloids and Surfaces A, Department of Chemistry, Hanyang University, Seoul 133-791, South Korea, 2003.

[12] C. Jeenjitkaew, „Kissing Bonds in Adhesive Joints: A Holistic Approach for Surface Chemistry and Joint Mechanics,“ London, 2011.

[13] L. da Silva, A. Öchsner und R. Adams, Handbook of Adhesion Technology 2nd Edition, Springer International Publishing, 2018.

[14] I. Kryukov und S. Böhm, „Einsatz der optisch, mechanisch und induktiv angeregten Shearografie für die zerstörungsfreie Prüfung von hochfesten Strukturklebungen und elastischen Dickschichtklebungen,“ AiF-Vorhaben: 18709N, 2017.

[15] R. Adams und B. Drinkwater, „Nondestructive testing of adhesively-bonded joints,“ NDT&E International, Vol. 30, No. 2, 1997.

[16] C. Sraibr, G. Tanasie, K. Dilger und S. Böhm, „Active Thermography for Quality Assurance of joints in automobile manufacturing,“ Welding in the World Vol. 55, 2011.

[17] C. Srajbr, K. Dilger, S. Dehaan, C. Lammel und A. Dillenz, „Zerstörungsfreie Prüfung von Fügeverbindungen mit Induktions-Puls-Phasen-Thermografie,“ DGZfP e. V., Stuttgart, 2011.

[18] C. Jeenjitkaew, „Kissing Bonds in Adhesive Joints: Experimental Investigations and Numerical Predictions,“ Queen Mary, University of London, School of Engineering and Materials Science, Department of Materials, London.

[19] R. Tighe, J. Dulieu-Barton und S. Quinn, „Identification of kissing defects in adhesive bonds using infrared thermography,“ Elsevier, International Journal of Adhesion & Adhesives, Southhampton, 2016.

[20] M. Pröbster, Elastisch Kleben aus der Praxis für die Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

[21] J. Schuster, M.-H. Chen und Q. Govignon, „Kissing Bonds - Gezielte Herstellung und Detektion mit Ultraschall," DACH-Jahrestagung, Kaiserslautern, 2019.

[22] I. Kryukov und S. Böhm, „Einsatz der induktiv angeregten Shearografie für die zerstörungsfreie Prüfung von hochfesten Strukturklebungen," DGZfP-Jahrestagung 2017, Koblenz, 2017.

[23] C. Kammer, Aluminium Taschenbuch 3 - Weiterverarbeitung und Anwendung; 17., vollständig überarbeitete Auflage, DIN Media, 2014.

[24] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Strukturklebstoffe - Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2003.

[25] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.

[26] N. Kozlov, „Entwicklung eines parametrisierten FE-Modells zur Berechnung der Spannungszustände in Überlappklebungen," Rostock, 2013.

[27] „StudyHelp," [Online]. Available: https://www.studyhelp.de/online-lernen/mechanik/schubspannung/. [Zugriff am 13 Januar 2025].

[28] GOM, „GOM Präzise industrielle 3D-Messtechnik," [Online]. Available: https://www.gom.com/de/messsysteme/aramis/aramis-3d-camera.html. [Zugriff am 19. Februar 2019].

[29] J. Brackmann, „Experimentelle und numerische Untersuchungen an geklebten Faserverbundwerkstoffen unter multiaxialer Beanspruchung," Rostock, 2018.

[30] „LaVision Focus on Imaging,“ LaVision, [Online]. Available: https://www.lavision.com/de/applications/materials-testing/stereo-dic/. [Zugriff am 14 Januar 2025].

[31] C. Gebhardt, Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench - Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik, München: Carl Hanser Verlag, 2014.

[32] M. Stommel, FEM Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen, München: Carl Hanser Verlag, 2018.

[33] E. Karachalios, R. Adams und L. da Silva, „Single lap joints loaded in tension with high strength steel adherends,“ International Journal of Adhesion & Adhesives 43, 2013.

[34] H. Clark, „Definition of non-destructive detection of critical adhesive bond-line flaws,“ St. Loui, Missouri: Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1978.

[35] F. Heidarpour, M. Farahani und P. Ghabezi, „Experimental investigation of the effects of adhesive defects on the single lap joint strength,“ International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018.

[36] T. Wang, H. Schonhor und F. Ryan, „Effect of Bonding Defects on Shear Strength in Tension of Lap Joints Having Brittle Adhesives,“ Journal of Applied Polymer Science 16 (8), 1972.

[37] M. Michaloudaki, „An approach to quality assurance of structural adhesive joints,“ München, 2005.

[38] R. Vijaya Kumar, M. Bhat und C. Murthy, „Evaluation of kissing bond in composite adhesive lap joints using digital image correlation: Preliminary studies,“ International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013.

[39] C. Jeenjitkaew und F. Guild, „The analysis of kissing bonds in adhesive joints,“ International Journal of Adhesion and Adhesives 75, 2017.

[40] „Verbundprojekt BladeTester: Automatisiertes Verfahren für serienmäßige Integritätsprüfung von Rotorblättern und Bereitstellung von Rotorblatt-Tunern,“ Förderkennzeichen 0325198A/B/D, Laufzeit 2011-2015.

[41] F. Sayer und F. Kleiner, „Zuverlässigkeit von Rotorblattverklebungen: Prüfung unter realistischen Beanspruchungen," Adhäsion. Kleben und Dichten, 2011.

[42] M. Schlimmer und W. Arnold, „Zerstörungsfreie Detektion von Klebverbindungsfehlern mit Ultraschall und Untersuchungen der Auswirkungen dieser Fehler auf die mechanische Beanspruchbarkeit der Verbindung," IGF-Nr. 12.844N/ DVS-Nr. 08.022, Laufzeit: 2001-2003.

[43] K. Sharp, A. Bogdanovich, R. Boyle, J. Brown und D. Mungalov, „Wind blade joints based on noncrimp 3D orthogonal woven Pi shape performs," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013.

[44] D. Cairns, L. Wood, J. Nelson, M. Leman, T. Richey, F. Ibitoye, D. Samborsky und J. Paquette, „Wind Turbine Blade Reliability, Effects of Manufacturing Defects and Composite Repairs," Blade Workshop, Sandia National Laboratories, 2016.

[45] M. Schlimmer und O. Klapp, „Einfluss fertigungsbedingter Imperfektionen auf die mechanischen Verbindungseigenschaften von 1K-PUR-Klebungen im Nutzfahrzeugbau," AiF 11.933N, Kassel, 2002.

[46] O. Klapp, „Dissertation: Mechanisches Verhalten elastomerer Klebeverbindungen," 2002.

[47] R. Adams, F. Guild, V. Karachalios und A. Mahon, The significance of defects in adhesively bonded structures, IOM, 1997.

[48] E. Karachalios, R. Adams und L. da Silva, „Strength of single lap joints with artificial defects," International Journal of Adhesion and Adhesives 45, 2013.

[49] L. da Silva, A. Öchsener und R. Adams, Handbook of Adhesion Technology 2nd Edition, Springer International Publishing AG, 2018.

[50] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Klebstoffe – Leitlinien für die Herstellung geklebter Strukturen und Berichtsverfahren, die für die Risikobewertung solcher Strukturen geeignet sind," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2024.

[51] W. Nsengiyumva, S. Zhong, J. Lin, Q. Zhang, J. Zhong und Y. Huang, „Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review,“ Composite Structures 256 112951, 2021.

[52] M. Kornely, J. Ehrler, J. Philipp, E. Stammen, K. Dilger und M. Kreutzbruck, „Investigation of Kissing Bonds in Adhesive Joints,“ Lissabon, 2023.

[53] D. Markatos, K. Tserpes, E. Rau, S. Markus, B. Ehrhart und S. Pantelakis, „The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use,“ Composites: Part B 45, 2013.

[54] E. Jasiuniene, B. Yilmaz, D. Smagulova, G. Bhat, V. Cicenas, E. Zukauskas und L. Mazeika, „Non-Destructive Evaluation of the Quality of Adhesive Joints Using Ultrasound, X-ray, and Feature-Based Data Fusion,“ applied sciences 12(24), 12930, 2022.

[55] D. Palumbo, R. Tamborrino, U. Galietti, P. Aversa, A. Tati und V. Luprano, „Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints,“ NDT&E International 78, 2016.

[56] P. Amirafshari, N. Barltrop, U. Bharadwaj, M. Wright und S. Oterkus, „A Review of Nondestructive Examination Methods for New-building Ships Undergoing Classification Society Survey,“ Journal of Ship Production and Design 34, 2018.

[57] „Evident,“ [Online]. Available: https://ims.evidentscientific.com/de/applications/inspecting-bond-seam-adhesive-with-ultrasound-in-automobile-manufacturing. [Zugriff am 9. Februar 2025].

[58] Y. Wei, Y. Xiao, X. Gu, J. Ren, Y. Zhang, D. Zhang, Y. Chen, H. Li und S. Li, „Inspection of defects in composite structures using long pulse thermography and shearography,“ Heliyon 10, 2024.

[59] R. Tighe, J. Dulieu-Barton und S. Quinn, „Identification of kissing defects in adhesive bonds using infrared thermography,“ International Journal of Adhesion & Adhesives 64, 2016.

[60] H. Leicht, E. Kraus, B. Baudrit, T. Hochrein und M. Bastian, „Lock-in-Thermographie zur Defekterkennung in geklebten Kunststoffverbindungen,“ adhäsion KLEBEN & DICHTEN 62(9), 2018.

[61] J. Schroeder, T. Ahmed, B. Chaudhry und S. Shepard, „Non-destructive testing of structural composites and adhesively bonded composite joints: pulsed thermography,“ Composites: Part A 33, 2002.

[62] X. Zou, M. Li, H. Xu und X. Lu, „Array infrared thermography for visualization of defects in bonded fiber reinforced polymer joints,“ Composites Science and Technology 259, 2025.

[63] M. Honlet und T. Walz, „Shearografie Stand der Technik eines optischen Verfahrens für die ZfP,“ ZfP-Zeitung, 2002.

[64] L. Bin, G. XingMing, Q. GongJin und Z. DongSheng, „Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography,“ Science China - Physics, Mechanics & Astronomy Vol. 58 No. 7, 2015.

[65] M. Hung, Y. Chen, S. Ng, S. Shepard, Y. Hou und J. Lhota, „Review and comparison of shearography and pulsed thermography for adhesive bond evaluation,“ 2007.

[66] B. Liu, S. Wang, M. Zhan, H. Wang, G. Zhang und Q. Jian, „Optical nondestructive evaluation for minor debonding defects and interfacial adhesive strength of solid propellant,“ Measurement 194 111066, 2022.

[67] L.-D. Theroux, J. Dumoulin und X. Maladague, „Square Heating Applied to Shearography and Active Infrared Thermography Measurements Coupling: From Feasibility Test in Laboratory to Numerical Study of Pultruded CFRP Plates Glued on Concrete Specimen,“ strain - An International Journal for Experimantal Mechanics 50, 2014.

[68] R. Bardenheier, Schallemissionsuntersuchungen an polymeren Verbundwerkstoffen. Teil I: Das Schallemissionsverfahren als quasi-zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Darmstadt: Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 1980.

[69] Verein Deutscher Ingenieure, „Metallkleben; Hinweise für Konstruktion und Fertigung," Verein Deutscher Ingenieure, 1979.

[70] H. Li, Y. Zhou, N. Zhang, W. Shi, J. Chen und M. Karimirad, „Characterization of the shear cracking process in epoxy keyed joints using acoustic emission," Structures 73 108438, 2025.

[71] R. Lima, R. Tao, A. Bernasconi, M. Carboni und S. Teixeira de Freitas, „Acoustic emission approach for identifying fracture mechanisms in composite bonded Joints: A study on varying Substrate's stacking sequence," Theoretical and Applied Fracture Mechanics 132 104490, 2024.

[72] M. Saeedifar, M. Saleh, S. Teixeira De Freitas und D. Zarouchas, „Damage characterization of adhesively-bonded Bi-material joints using acoustic emission," Composites Part B 176 107356, 2019.

[73] S. Khoshmanesh, S. Watson und D. Zarouchas, „Early detection of impact fatigue damage in an adhesively-bonded connection using acoustic emission," Engineering Structures 308 117973, 2024.

[74] A. Groß, E. Meiß und F. Stein, „DIN Standards Become International," adhesion ADHESIVES + SEALANTS volume 20, 2023.

[75] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Klebtechnik - Qualitätsanforderungen an Klebprozesse - Teil 2: Kleben im Schiffbau," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2024.

[76] Sika AG, [Online]. Available: http://deu.sika.com/de/Industrieredirect/Kleben_Dichten_Industry/01a006/Arbeitsanleitungen.html. [Zugriff am 2. Mai 2017].

[77] Sika AG, „Marine Handbuch - Für elastische Kleb- und Dichtstoffsysteme im Yacht- und Bootsbau,“ 2003.

[78] Sika AG, „Marine-Handbuch - Arbeitsanleitungen für den Yacht- und Bootsbau,“ 2024.

[79] J. Kesenheimer, „Diplomarbeit zum Thema Grundlagenforschung zur Restnutzungsdauer von Windenergieanlagen,“ Hamburg, 2003.

[80] D. Braga, S. Tavares, L. da Silva, P. Moreira und P. de Castro, „Advanced design for lightweight structures: Review and prospects,“ Progress in Aerospace Sciences, Volume 69, 2014.

[81] A. Skorupa und M. Skorupa, Riveted Lap Joints in Aricraft Fuselage, Springer Verlag, 2012.

[82] B. Mayer, M. Brede, B. Schneider, O. Klapp, F. Roland und K. Siering, „Standardisierung von hochelastischen Aluminium-Stahl- und FVK-Stahl-Klebverbindungen für den Schiffbau,“ 2014.

[83] H. Walter, „Morphologie-Zähigkeits-Korrelationen von modifizierten Epoxidharzsystemen mittels bruchmechanischer Prüfmethoden an Miniaturprüfkörpern,“ ULB Sachen-Anhalt, 2003.

[84] R. Oster, „Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen,“ DACH-Jahrestagung - Di.1.B.1, Graz, 2012.

[85] B. Ehrhart, B. Valeske, C.-E. Muller und C. Bockenheimer, „Methods for the Quality Assessment of Adhesive Bonded CFRP Structures,“ 2nd Int. Symposium on NDT in Aerospace - We.5.B.2, Hamburg, 2010.

[86] A. Groß, „Kontrollierte Langlebigkeit - Teil 1: Produktsicherheit - Anforderungen der QS-Normen und Auswirkungen für Klebstoffanwender,“ 2023.

[87] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen

(ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2023.

[88] DNV AS, [Online]. Available: https://www.dnv.com/rules-standards/. [Zugriff am 9. März 2025].

[89] J. Weitzenböck, Adhesives in Marine Engineering, Woodhead Publishing in Materials, 2012.

[90] 3M Company, „Technische Produktinformationen - Sctoch-Weld 7271 B/A - Hybrid Konstruktionsklebstoff," 3M Company, 2011.

[91] M. Pröbster, Baudichtstoffe - Erfolgreich Fugen abdichten, Nußloch: Vieweg + Teubner Verlag, 2011.

[92] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2008.

[93] A. Rudawska, „Mechanical Properties of Selected Epoxy Adhesive and Adhesive Joints of Steel Sheets," Applied Mechanics 2(1), 2021.

[94] M. Dudescu und C. Vilau, „Investigation of Mechanical Behaviour of Expanded Polystyrene Under Compressive and Bending Loadings," Materiale Plastice 57(2), 2019.

[95] G. Hougham, P. Cassidy, K. Johns und T. Davidson, Fluorpolymers 1 Synthesis, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[96] A. Kopezynska, G. Ehrenstein und P. Drummer, „Oberflächenspannung von Kunststoffen - Messmethoden am LKT," Erlangen, 2017.

[97] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Klebstoffe - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2022.

[98] BIKAR-METALLE GmbH, „EN AW-5754," 2025.

[99] M. Sauerborn, Interviewee, *Technische Daten des Scotch-Weld 7271 B/A.* [Interview]. 20. Januar 2025.

[100] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2023.

[101] Volkswagen AG, „Testing of Resistance to Environmental Cycle Test (+80/-40) C PV1200," 2004.

[102] Ascott Analytical Kesternich Test, „PV 1200 Testing Method Statement," Ascott Analytical Equipment Limited, 2022.

[103] S. Götz und K.-G. Eulitz, Betriebsfestigkeit - Bauteile sicher auslegen!, Springer Vieweg, 2020.

[104] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Klebtechnik - Qualitätsanforderungen an Klebprozesse - Teil 1: Prozesskette Kleben," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2020.

[105] C. J. Bethke, „Carbamat-geschäumte Epoxidharze - Synthese und Eigenschaften," Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe, Bayreuth, 2024.

[106] O. Klapp, V. Beber, B. Mayer, C. Wald, L. Fröck, N. Glück und W. Flügge, „Schlussbericht zum Thema: Inspektionsmethoden für die wiederkehrende Prüfung hochelastischer Dickschicht- und Strukturklebungen in Schiffbauanwendungen," Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e. V., 2020.

[107] J. Kramer, H.-K. Engeldinger und J. Slepmann, „Zähelastifizierter, zweikomponentiger Epoxidharzklebstoff". Hamburg, Deutschland Patent 0 438 725 A2, 17 Dezember 1990.

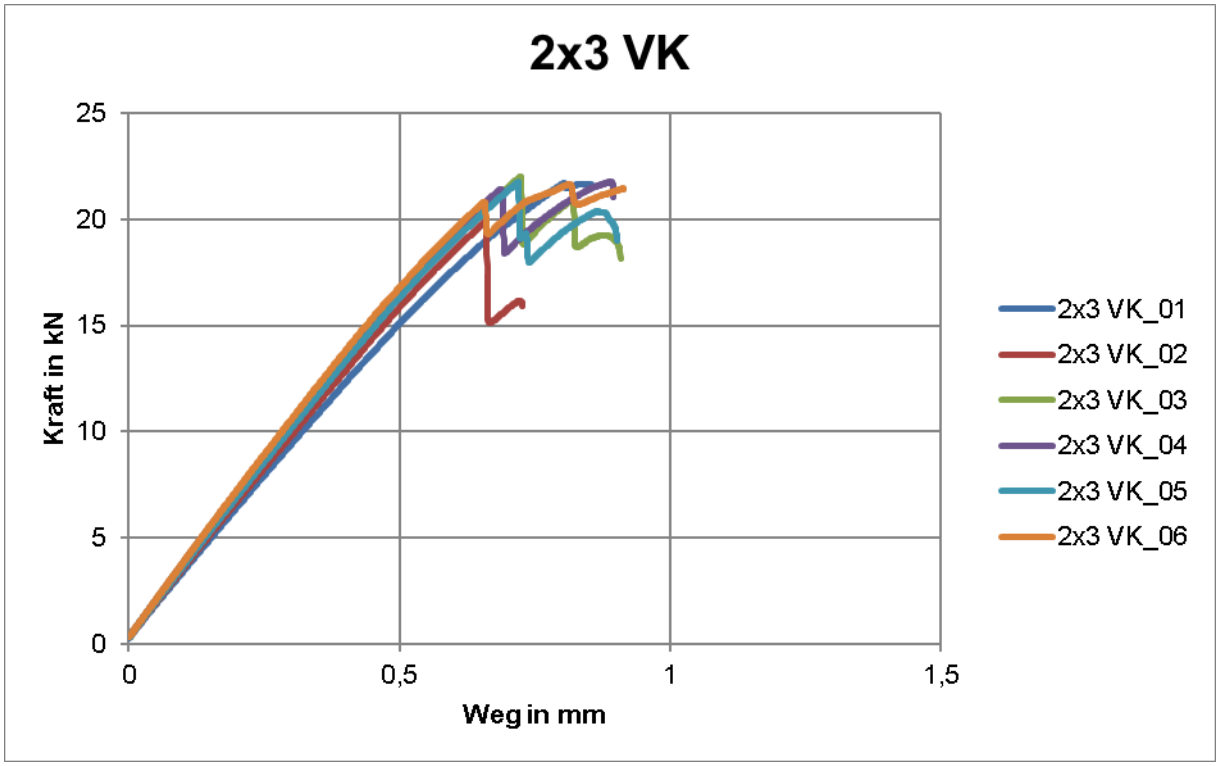
[108] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen," DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2022.

Anhang

Anhang 1: Probenabmessungen der statisch ungealterten Referenzserie

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Referenz_01	50,79	50,50
Referenz_02	50,78	50,25
Referenz_03	51,53	50,29
Referenz_04	50,69	50,23
Referenz_05	50,25	50,18
Referenz_06	51,85	50,11

Anhang 2: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 2x3 VK

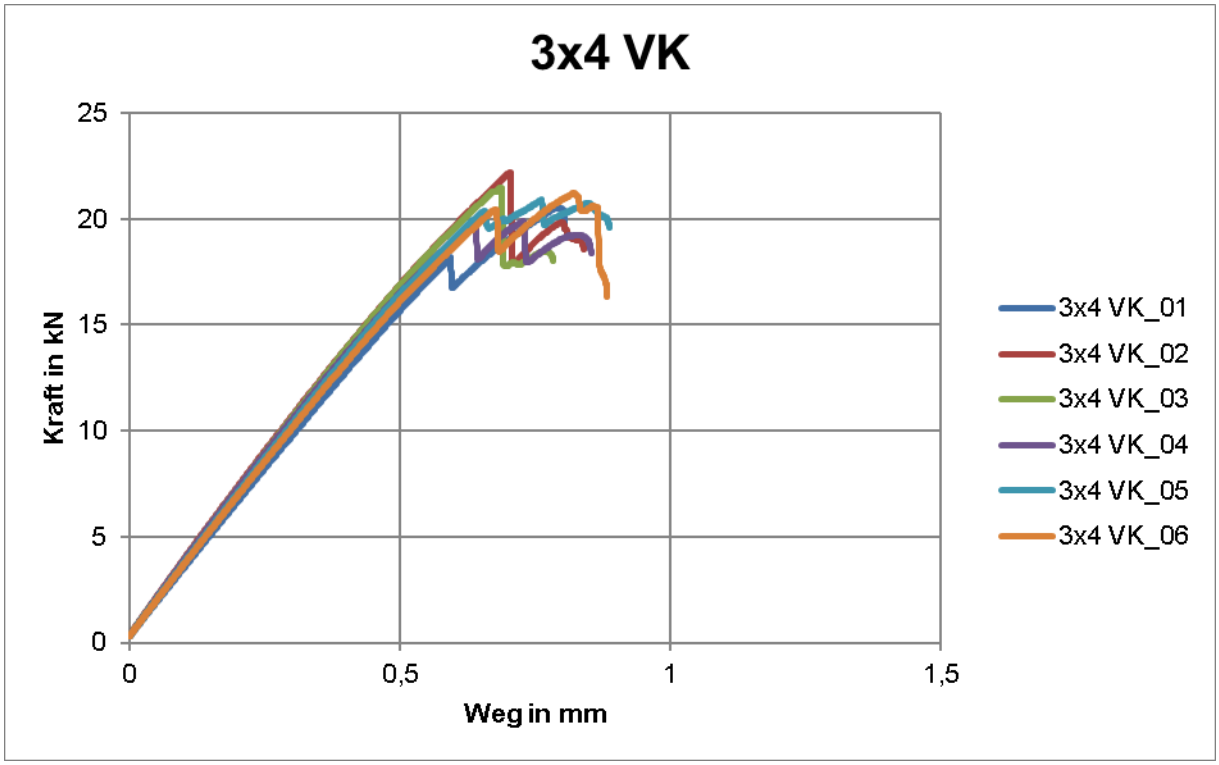


2x3 VK	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	21472	8,6
Standardabweichung	784	0,3
Variationskoeffizient	0,04	0,04

Anhang 3: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 2x3 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
2x3 VK_01	50,50	50,09
2x3 VK_02	50,25	50,01
2x3 VK_03	51,03	50,09
2x3 VK_04	50,61	50,04
2x3 VK_05	50,66	50,17
2x3 VK_06	50,38	50,04

Anhang 4: *Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 3x4 VK*

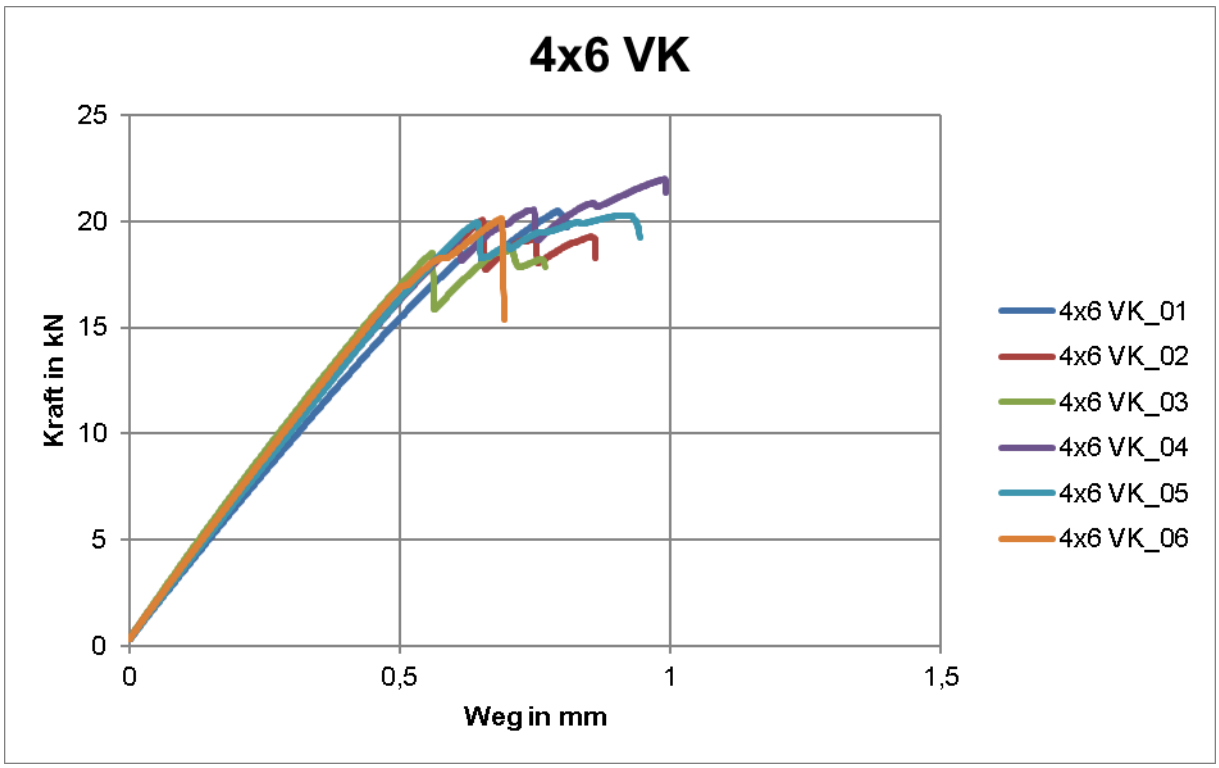


3x4 VK	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	21040	8,4
Standardabweichung	802	0,3
Variationskoeffizient	0,04	0,04

Anhang 5: *Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 3x4 VK*

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 VK_01	50,56	50,13
3x4 VK_02	50,39	50,14
3x4 VK_03	50,57	50,10
3x4 VK_04	50,62	50,34
3x4 VK_05	50,30	50,22
3x4 VK_06	50,46	50,10

Anhang 6: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 4x6 VK

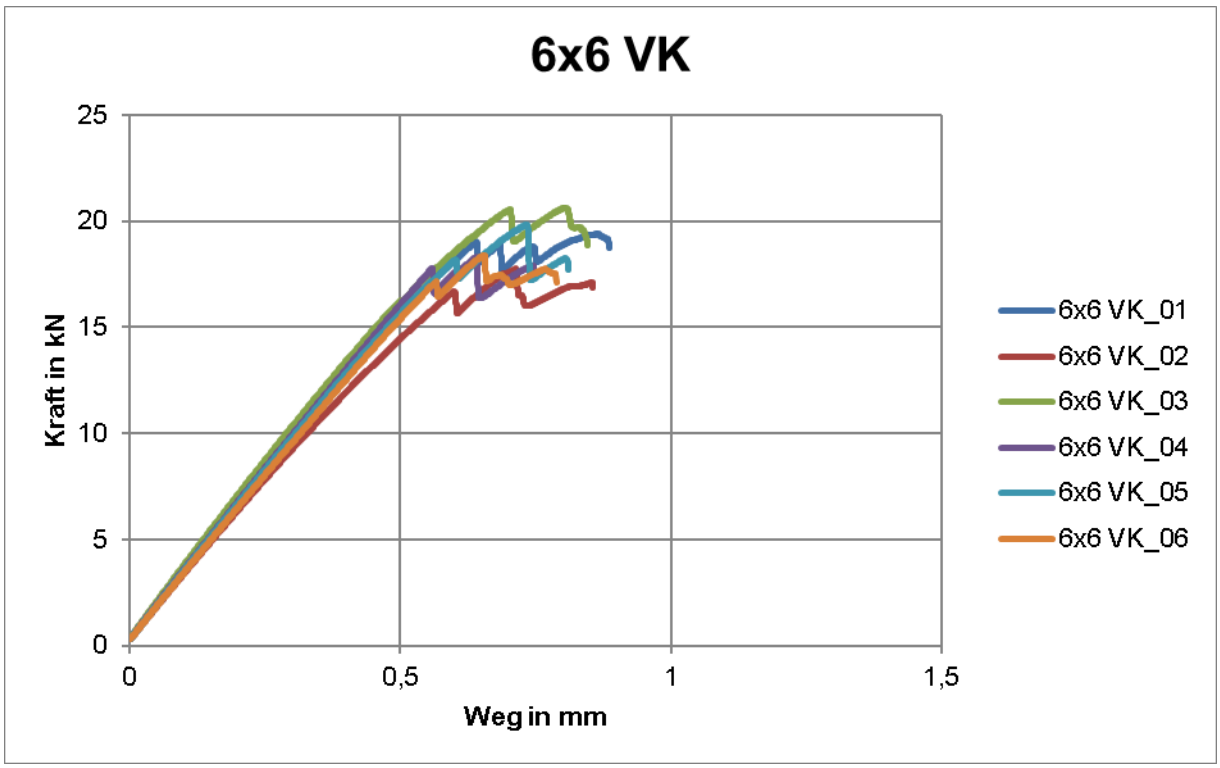


4x6 VK	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	20275	8,1
Standardabweichung	1064	0,4
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Anhang 7: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 4x6 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 VK_01	51,04	50,49
4x6 VK_02	51,15	50,20
4x6 VK_03	50,37	50,17
4x6 VK_04	51,12	50,20
4x6 VK_05	50,36	50,07
4x6 VK_06	50,69	50,11

Anhang 8: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 6x6 VK

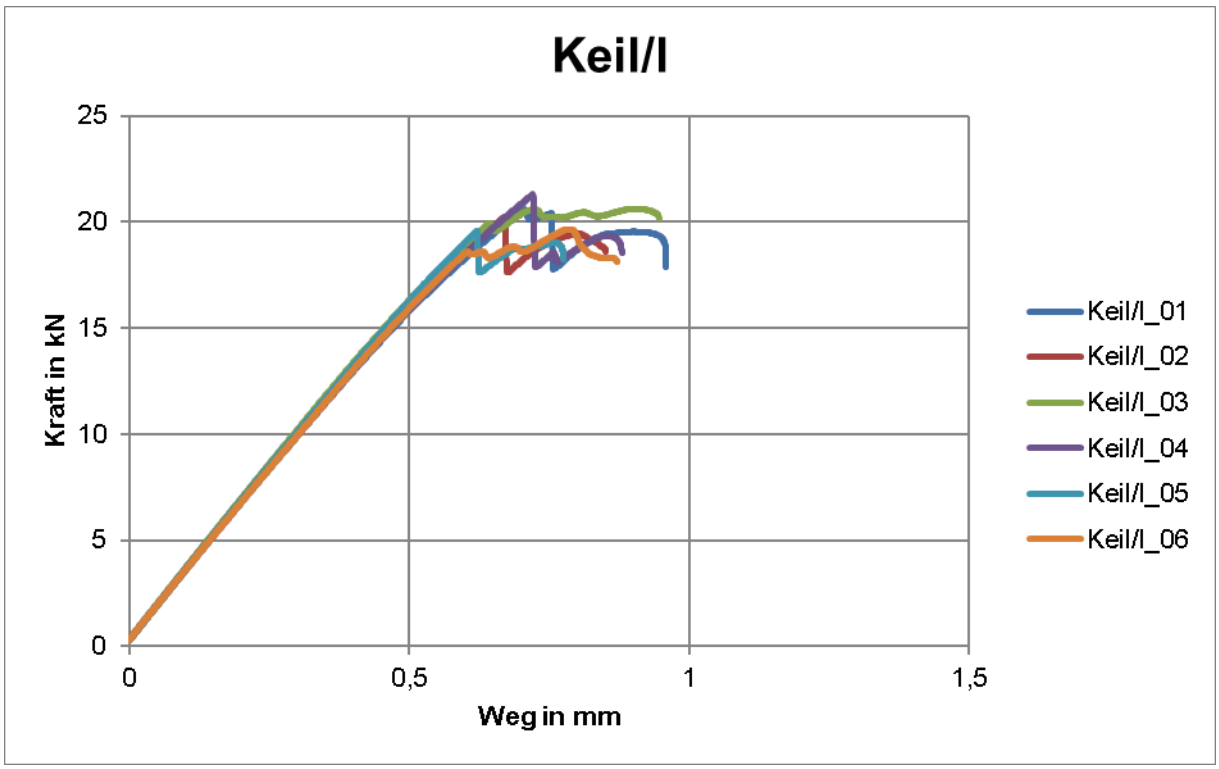


6x6 VK	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	19061	7,6
Standardabweichung	1086	0,4
Variationskoeffizient	0,06	0,06

Anhang 9: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 6x6 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
6x6 VK_01	51,53	50,34
6x6 VK_02	50,66	50,44
6x6 VK_03	50,84	50,23
6x6 VK_04	51,10	50,28
6x6 VK_05	51,12	50,38
6x6 VK_06	50,72	50,22

Anhang 10: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie Keil/l

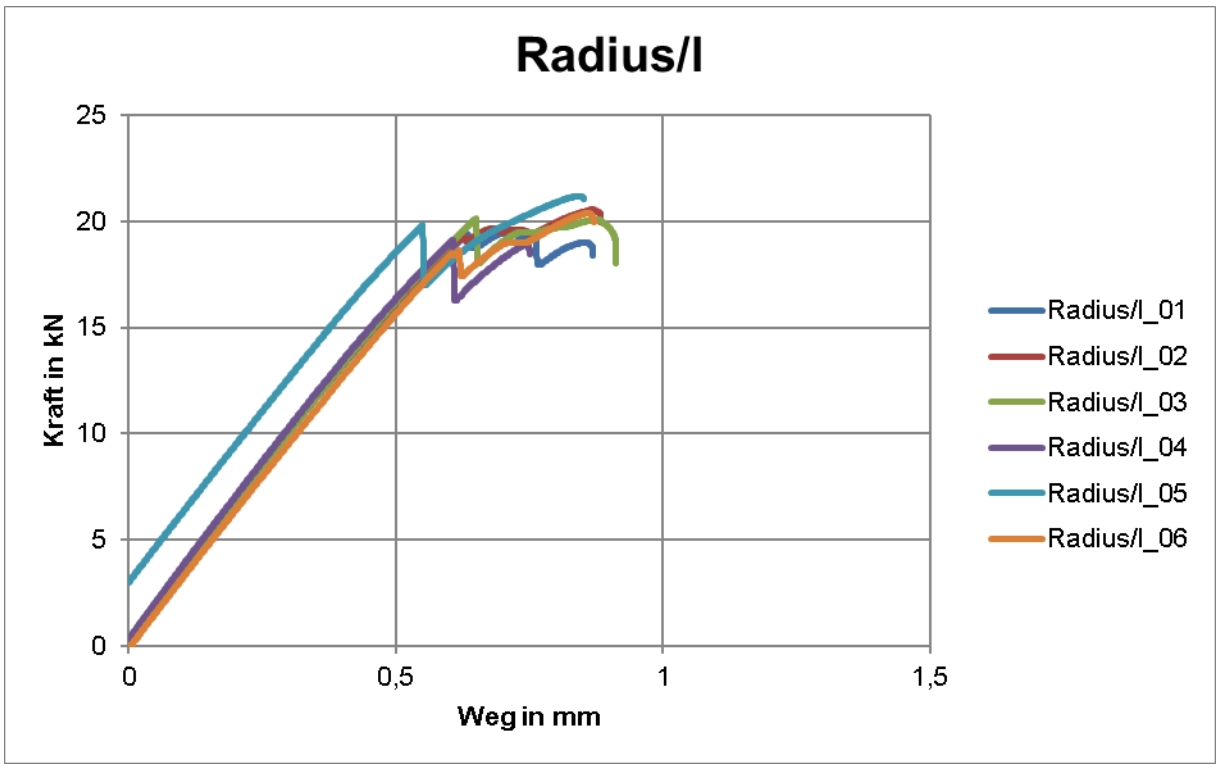


Keil/l	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	20326	8,1
Standardabweichung	662	0,3
Variationskoeffizient	0,03	0,03

Anhang 11: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie Keil/l

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Keil/l_01	50,22	50,14
Keil/l_02	50,18	49,78
Keil/l_03	50,19	49,77
Keil/l_04	50,00	49,92
Keil/l_05	50,20	49,77
Keil/l_06	49,99	50,16

Anhang 12: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie Radius/I

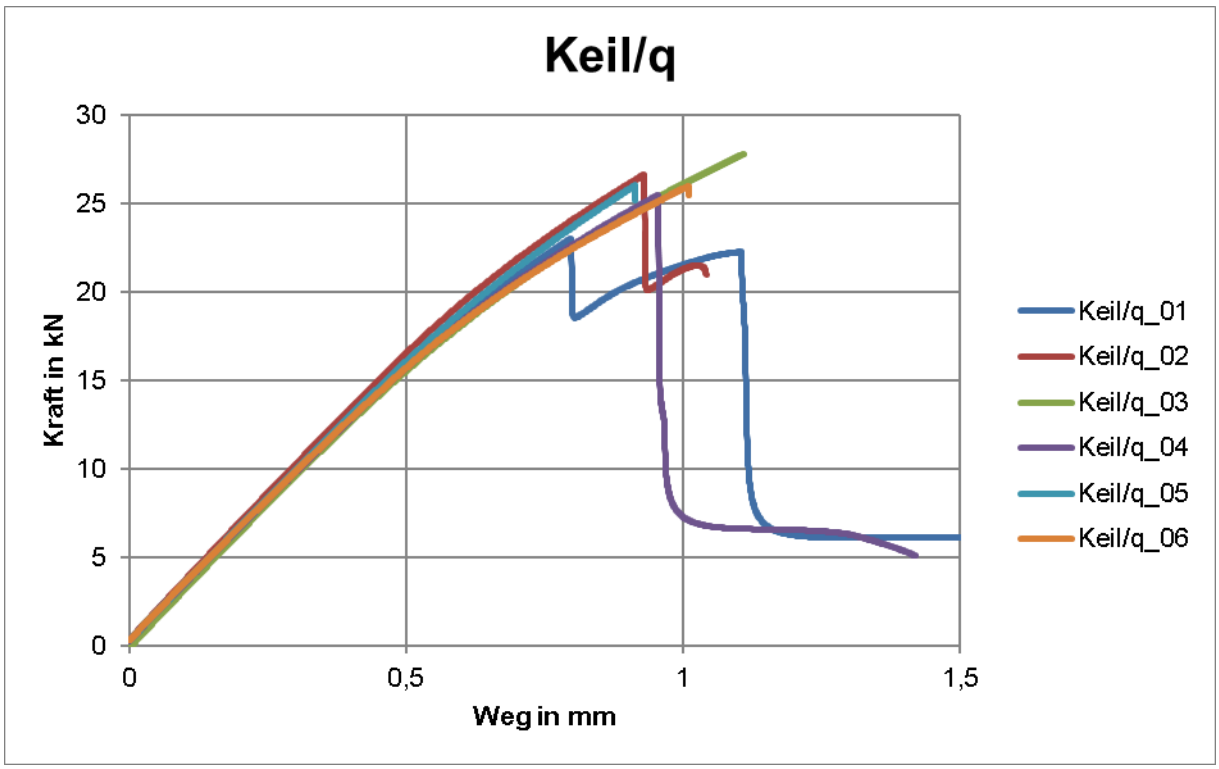


Radius/I	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	20136	8,1
Standardabweichung	766	0,3
Variationskoeffizient	0,04	0,04

Anhang 13: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie Radius/I

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Radius/I_01	50,02	50,18
Radius/I_02	50,09	49,88
Radius/I_03	50,25	49,77
Radius/I_04	49,99	50,03
Radius/I_05	49,82	49,83
Radius/I_06	50,09	49,79

Anhang 14: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie Keil/q



Keil/q	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	25849	10,3
Standardabweichung	1590	0,6
Variationskoeffizient	0,06	0,06

Anhang 15: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie Keil/q

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Keil/q_01	49,90	50,21
Keil/q_02	50,36	50,30
Keil/q_03	50,25	50,08
Keil/q_04	50,13	50,04
Keil/q_05	49,92	50,01
Keil/q_06	50,16	50,02

Anhang 16: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie Radius/q

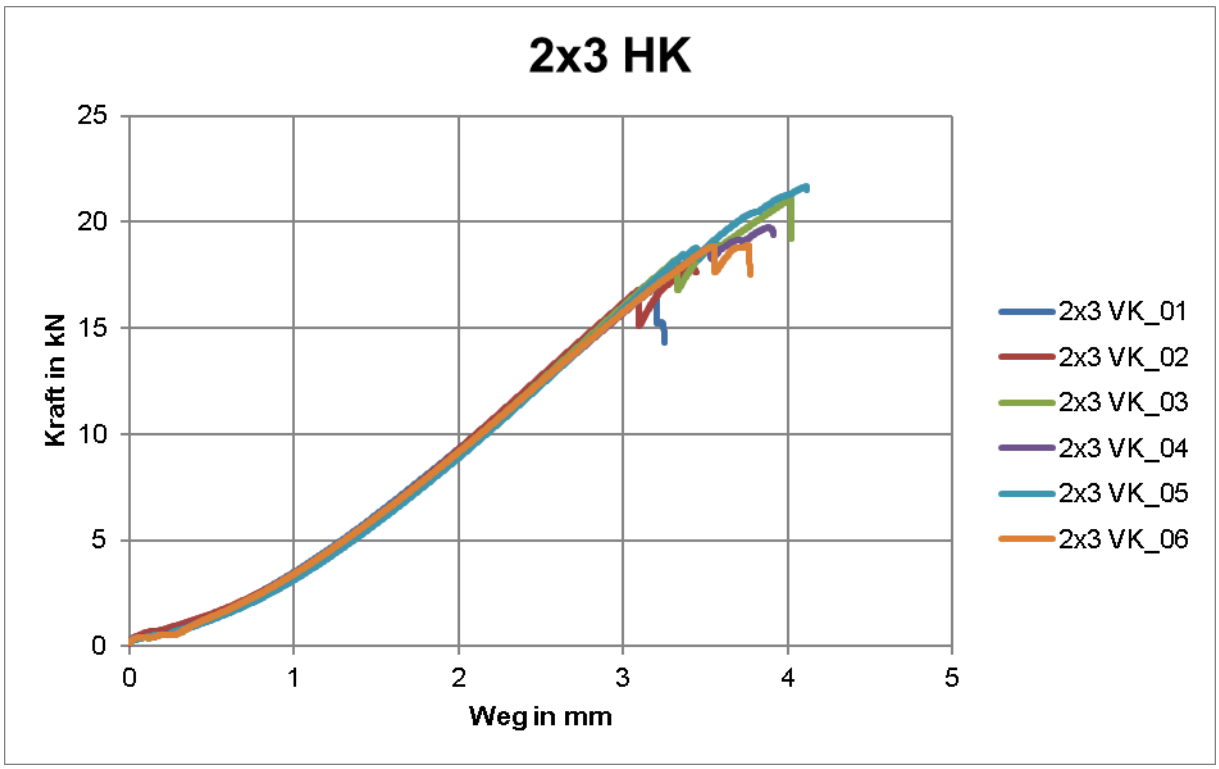


Radius/q	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	25036	10,0
Standardabweichung	698	0,3
Variationskoeffizient	0,03	0,03

Anhang 17: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie Radius/q

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Radius/q_01	49,78	50,23
Radius/q_02	49,95	50,06
Radius/q_03	50,11	50,18
Radius/q_04	49,78	50,13
Radius/q_05	49,90	50,05
Radius/q_06	50,23	50,22

Anhang 18: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 2x3 HK

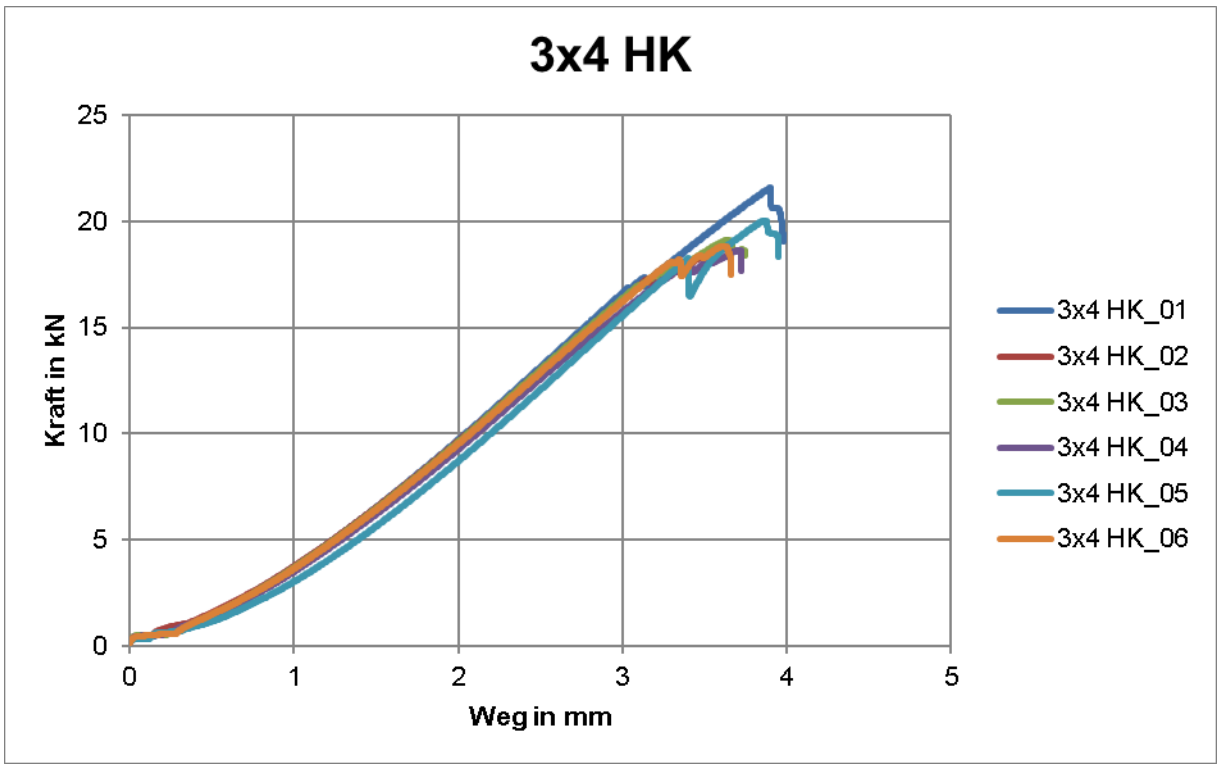


2x3 HK	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	19436	7,8
Standardabweichung	1726	0,7
Variationskoeffizient	0,09	0,09

Anhang 19: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 2x3 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
2x3 HK_01	49,82	49,99
2x3 HK_02	50,01	49,93
2x3 HK_03	49,66	50,01
2x3 HK_04	49,89	49,96
2x3 HK_05	50,03	50,05
2x3 HK_06	50,18	50,10

Anhang 20: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 3x4 HK

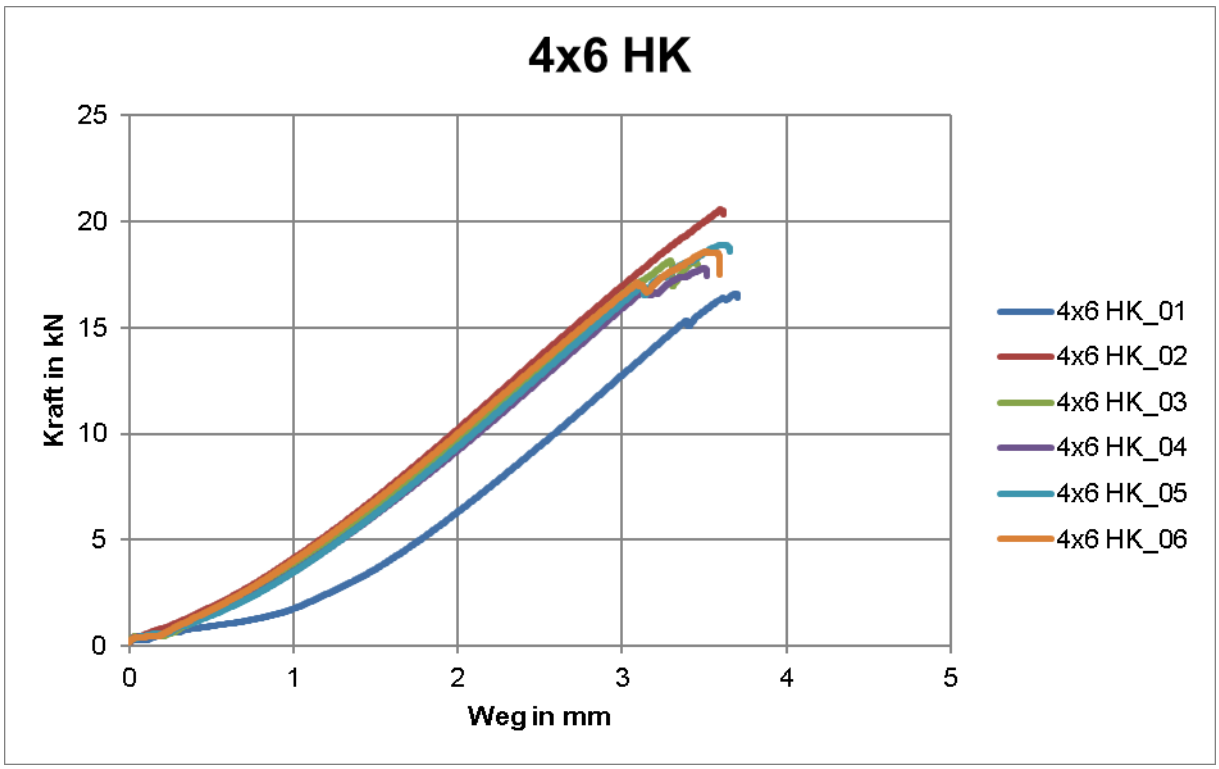


3x4 HK	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	19488	7,8
Standardabweichung	1143	0,5
Variationskoeffizient	0,06	0,06

Anhang 21: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 3x4 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 HK_01	49,87	50,00
3x4 HK_02	50,11	49,97
3x4 HK_03	49,98	49,93
3x4 HK_04	50,04	49,94
3x4 HK_05	50,32	49,92
3x4 HK_06	50,01	50,13

Anhang 22: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 4x6 HK

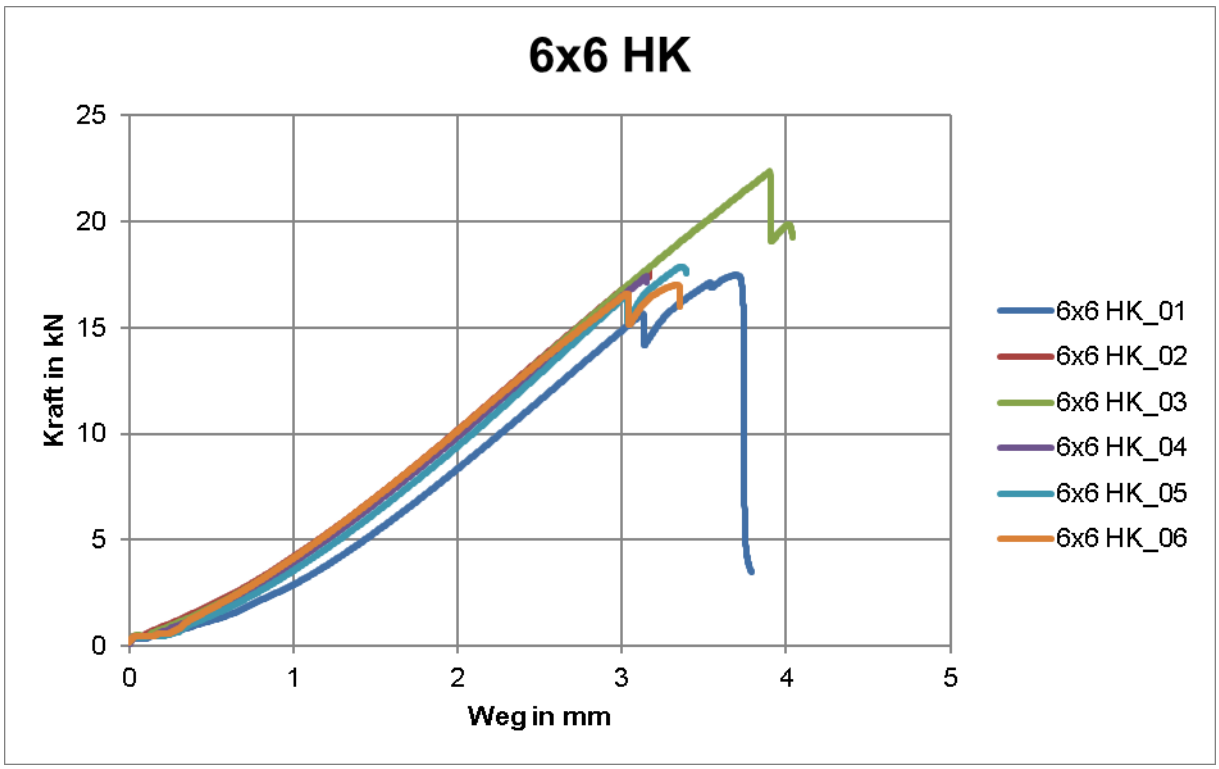


4x6 HK	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	18440	7,4
Standardabweichung	1318	0,5
Variationskoeffizient	0,07	0,07

Anhang 23: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 4x6 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 HK_01	49,95	49,94
4x6 HK_02	50,06	50,02
4x6 HK_03	49,75	49,98
4x6 HK_04	50,09	49,89
4x6 HK_05	49,84	50,02
4x6 HK_06	50,01	49,96

Anhang 24: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 6x6 HK

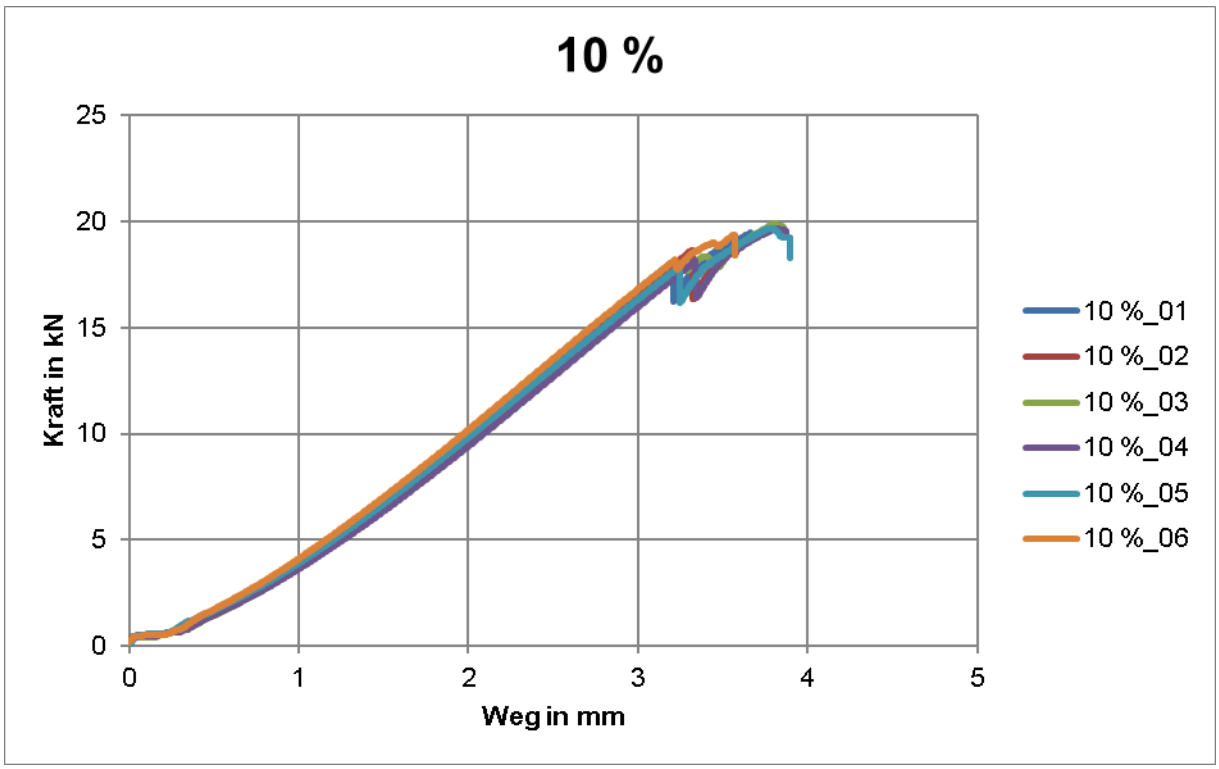


6x6 HK	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	18319	7,3
Standardabweichung	2004	0,8
Variationskoeffizient	0,11	0,11

Anhang 25: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 6x6 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
6x6 HK_01	49,99	49,96
6x6 HK_02	49,85	49,83
6x6 HK_03	49,91	49,88
6x6 HK_04	49,77	50,01
6x6 HK_05	50,10	49,89
6x6 HK_06	50,10	50,02

Anhang 26: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 10 %

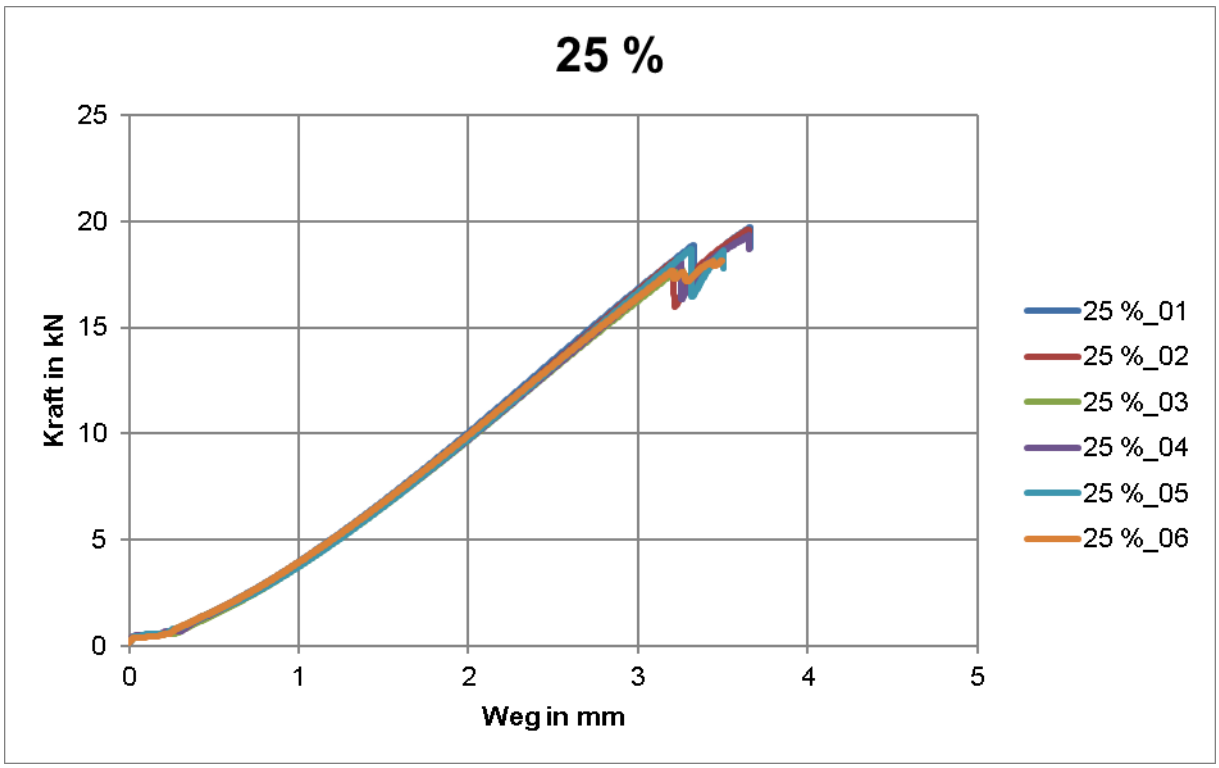


10 %	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	19486	7,8
Standardabweichung	379	0,2
Variationskoeffizient	0,02	0,02

Anhang 27: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 10 %

Probe	Länge in mm	Breite in mm
10 %_01	49,86	49,97
10 %_02	49,93	49,90
10 %_03	50,02	49,78
10 %_04	49,80	49,78
10 %_05	49,83	49,83
10 %_06	49,96	50,09

Anhang 28: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 25 %

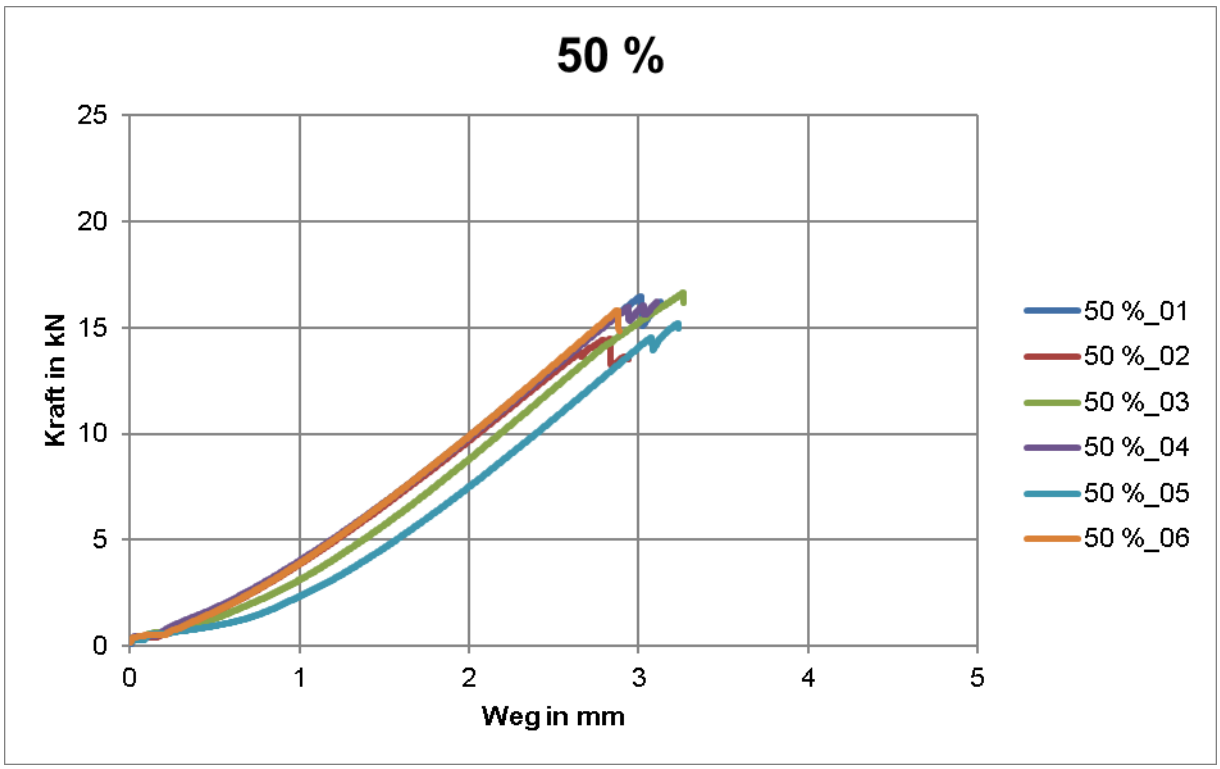


25 %	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	18981	7,6
Standardabweichung	670	0,3
Variationskoeffizient	0,04	0,04

Anhang 29: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 25 %

Probe	Länge in mm	Breite in mm
25 %_01	49,98	49,90
25 %_02	50,26	49,85
25 %_03	50,02	49,89
25 %_04	49,90	49,94
25 %_05	49,96	49,87
25 %_06	49,94	49,94

Anhang 30: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 50 %

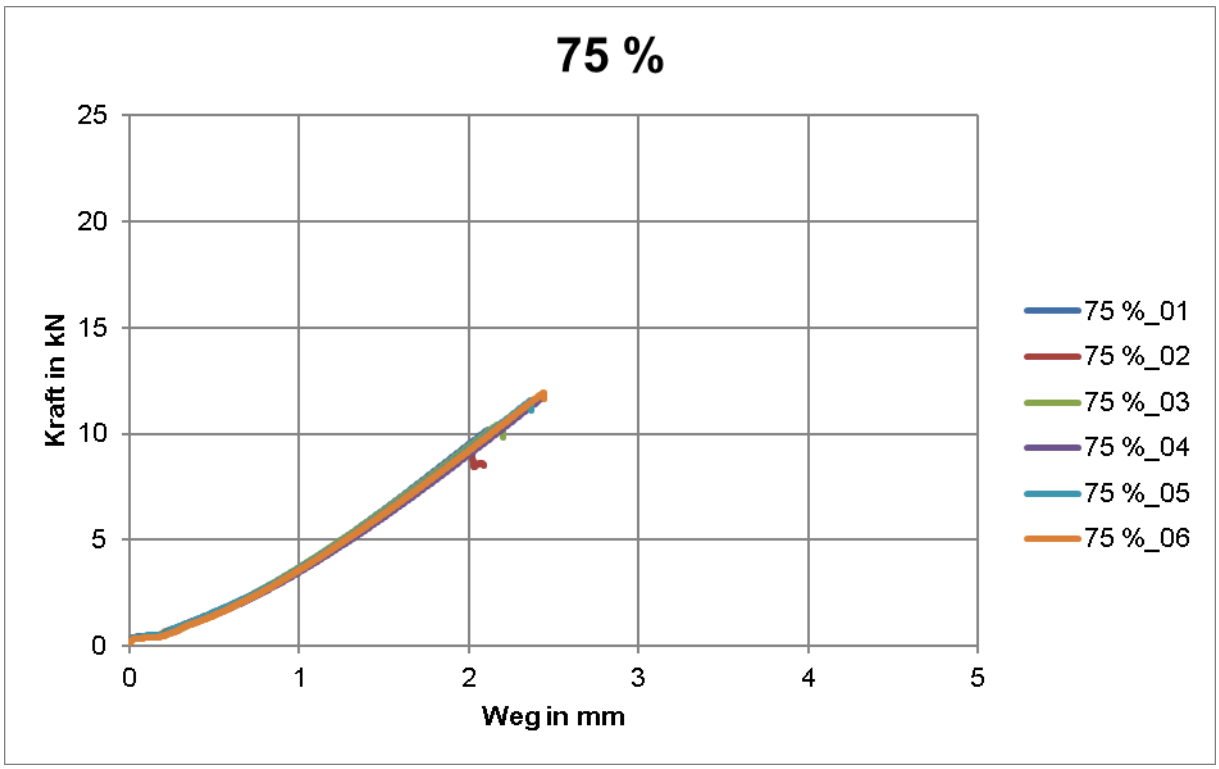


50 %	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	15809	6,3
Standardabweichung	835	0,3
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Anhang 31: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 50 %

Probe	Länge in mm	Breite in mm
50 %_01	49,89	49,94
50 %_02	49,89	49,92
50 %_03	50,36	49,99
50 %_04	50,16	49,95
50 %_05	49,79	49,89
50 %_06	50,04	50,02

Anhang 32: Ergebnisse der statischen ungealterten Serie 75 %

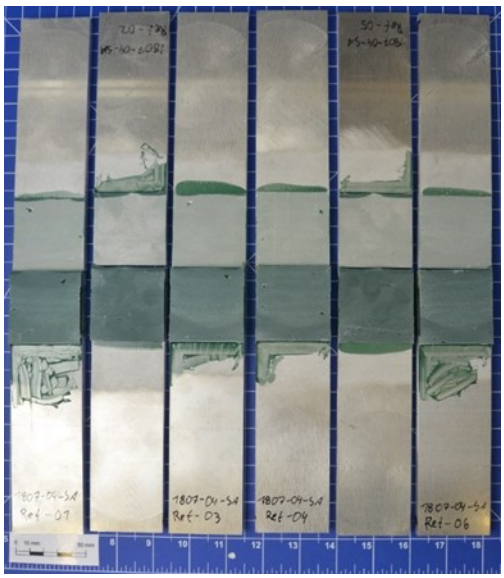


75 %	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	10889	4,4
Standardabweichung	1019	0,4
Variationskoeffizient	0,09	0,09

Anhang 33: Probenabmessungen der statisch ungealterten Serie 75 %

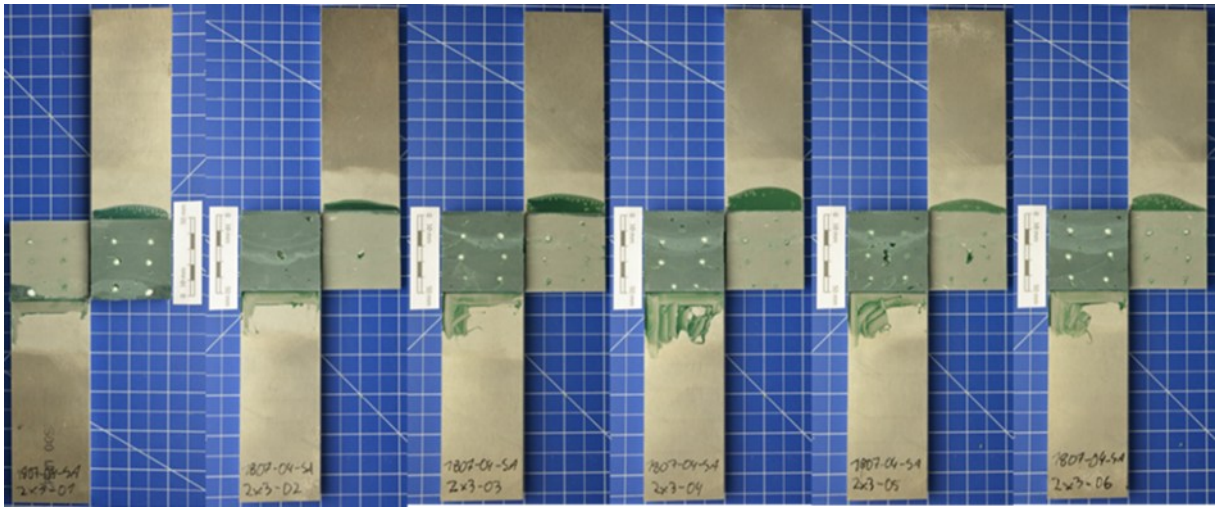
Probe	Länge in mm	Breite in mm
75 %_01	49,92	49,92
75 %_02	49,69	49,87
75 %_03	50,04	49,95
75 %_04	49,96	49,87
75 %_05	50,15	49,84
75 %_06	50,25	49,95

Anhang 34: Bruchbilder der statischen ungealterten Referenzserie



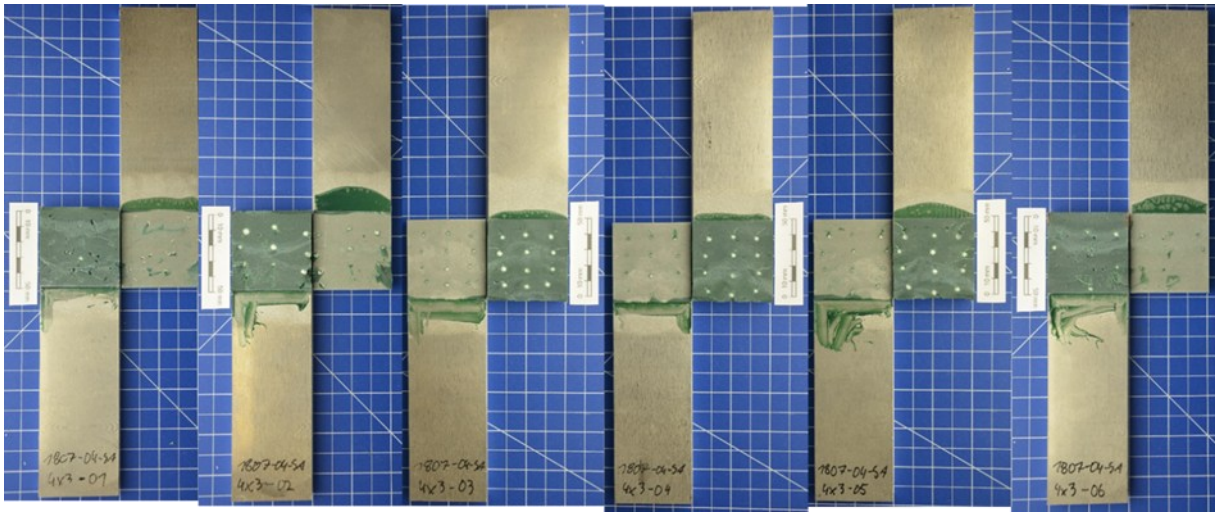
Probenbezeichnung	Bruchbild
Referenz_01	AF (0,5%), CF (5%), SCF (94,5%)
Referenz_02	CF (5%), SCF (95%)
Referenz_03	AF (0,5%), CF (2%), SCF (97,5%)
Referenz_04	AF (0,5%), CF (1%), SCF (98,5%)
Referenz_05	CF (5%), SCF (95%)
Referenz_06	AF (0,5%), CF (0,5%), SCF (99%)

Anhang 35: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 2x3 VK



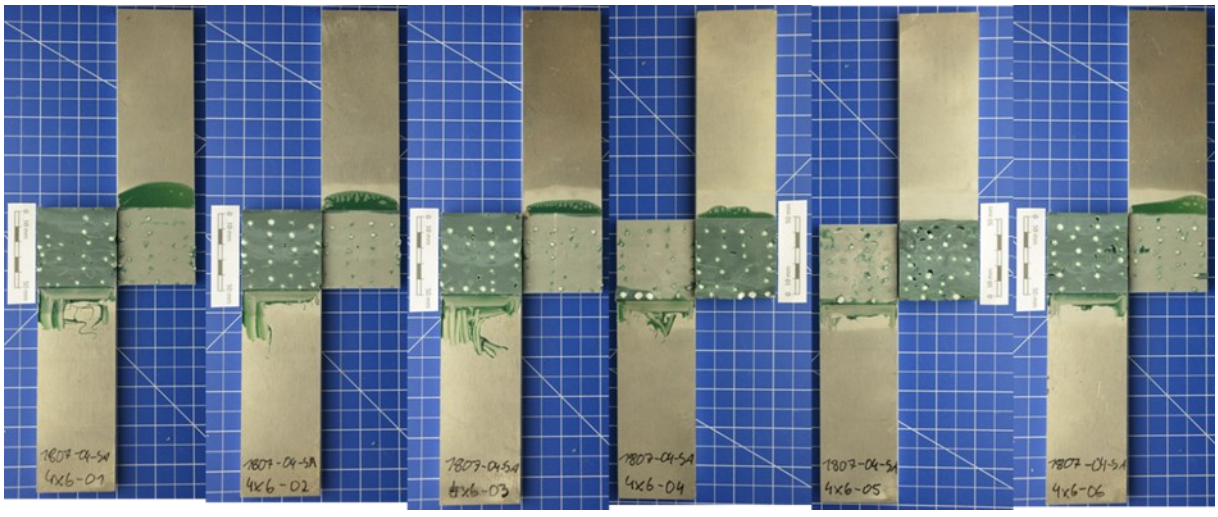
Probenbezeichnung	Bruchbild
2x3 VK_01	CF (8%), SCF (92%)
2x3 VK_02	AF (2%), CF (2%), SCF (96%)
2x3 VK_03	AF (3%), CF (5%), SCF (92%)
2x3 VK_04	AF (2%), CF (3%), SCF (95%)
2x3 VK_05	AF (4%), CF (5%), SCF (91%)
2x3 VK_06	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)

Anhang 36: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 3x4 VK



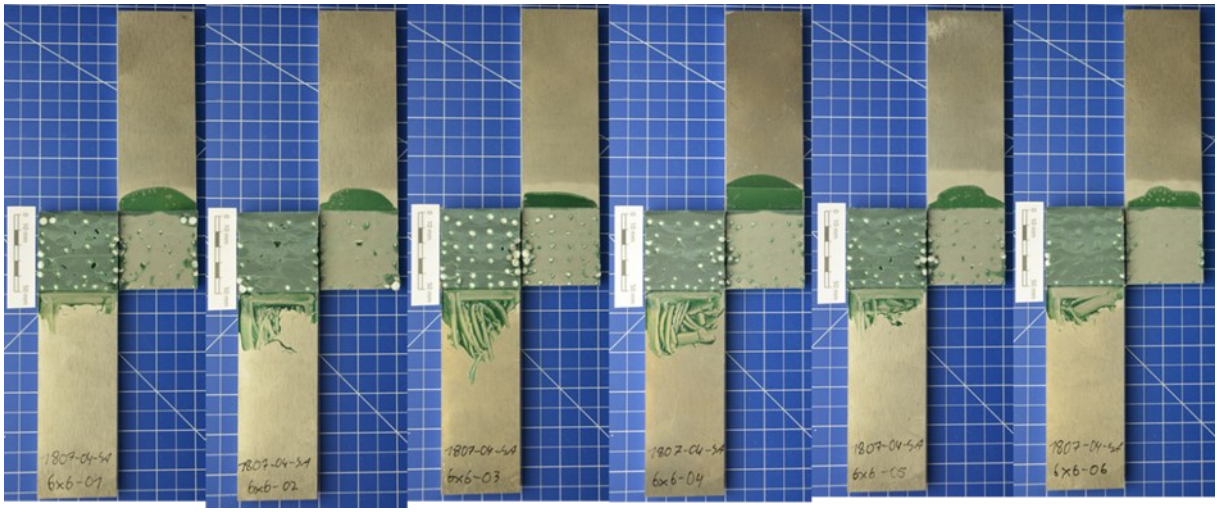
Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 VK_01	AF (3%), CF (8%), SCF (89%)
3x4 VK_02	AF (1%), CF (15%), SCF (84%)
3x4 VK_03	CF (8%), SCF (92%)
3x4 VK_04	AF (1%), CF (12%), SCF (87%)
3x4 VK_05	CF (9%), SCF (91%)
3x4 VK_06	AF (1%), CF (6%), SCF (93%)

Anhang 37: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 4x6 VK



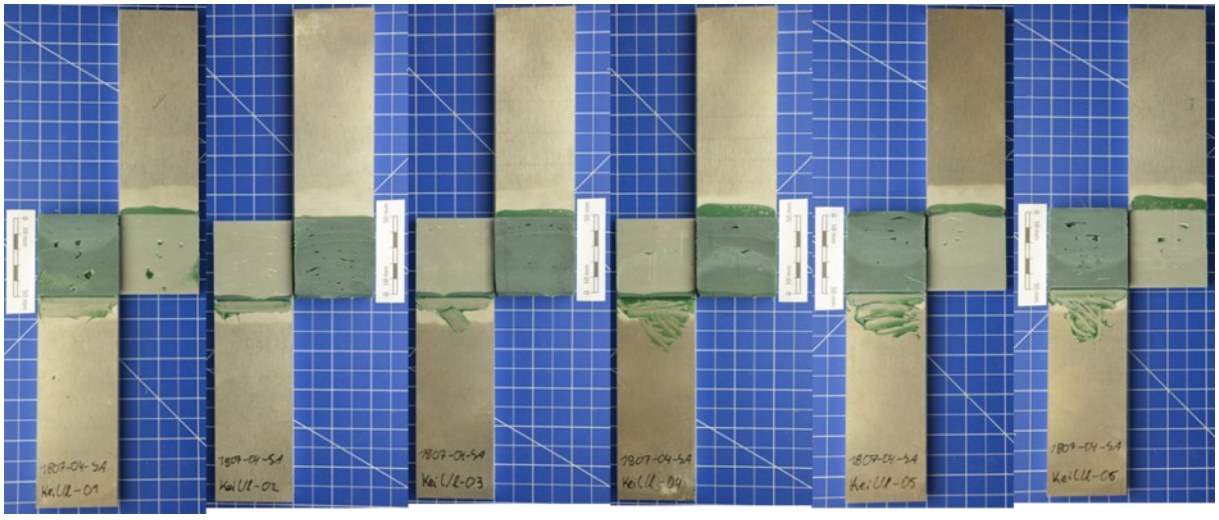
Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 VK_01	AF (1%), CF (14%), SCF (85%)
4x6 VK_02	CF (17%), SCF (83%)
4x6 VK_03	AF (3%), CF (15%), SCF (82%)
4x6 VK_04	AF (1%), CF (15%), SCF (84%)
4x6 VK_05	AF (1%), CF (25%), SCF (74%)
4x6 VK_06	CF (11%), SCF (89%)

Anhang 38: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 6x6 VK



Probenbezeichnung	Bruchbild
6x6 VK_01	AF (3%), CF (12%), SCF (85%)
6x6 VK_02	AF (2%), CF (8%), SCF (90%)
6x6 VK_03	CF (25%), SCF (75%)
6x6 VK_04	CF (30%), SCF (70%)
6x6 VK_05	AF (3%), CF (18%), SCF (79%)
6x6 VK_06	CF (6%), SCF (94%)

Anhang 39: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie Keil/l



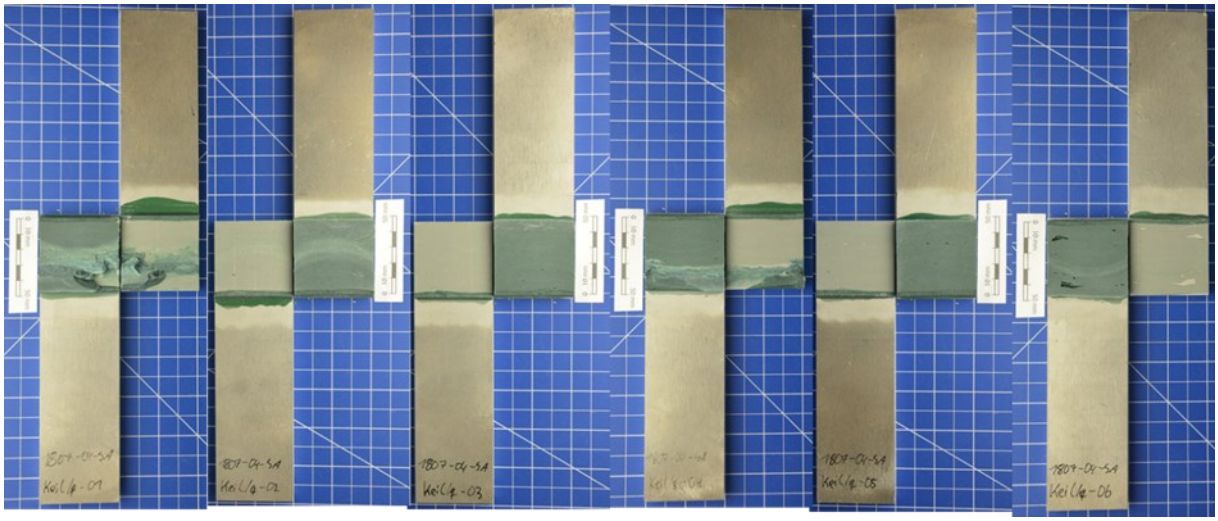
Probenbezeichnung	Bruchbild
Keil/l_01	AF (2%), CF (7%), SCF (91%)
Keil/l_02	AF (2%), CF (6%), SCF (92%)
Keil/l_03	AF (1%), CF (6%), SCF (93%)
Keil/l_04	AF (2%), CF (6%), SCF (92%)
Keil/l_05	AF (1%), CF (4%), SCF (95%)
Keil/l_06	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)

Anhang 40: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie Radius/l



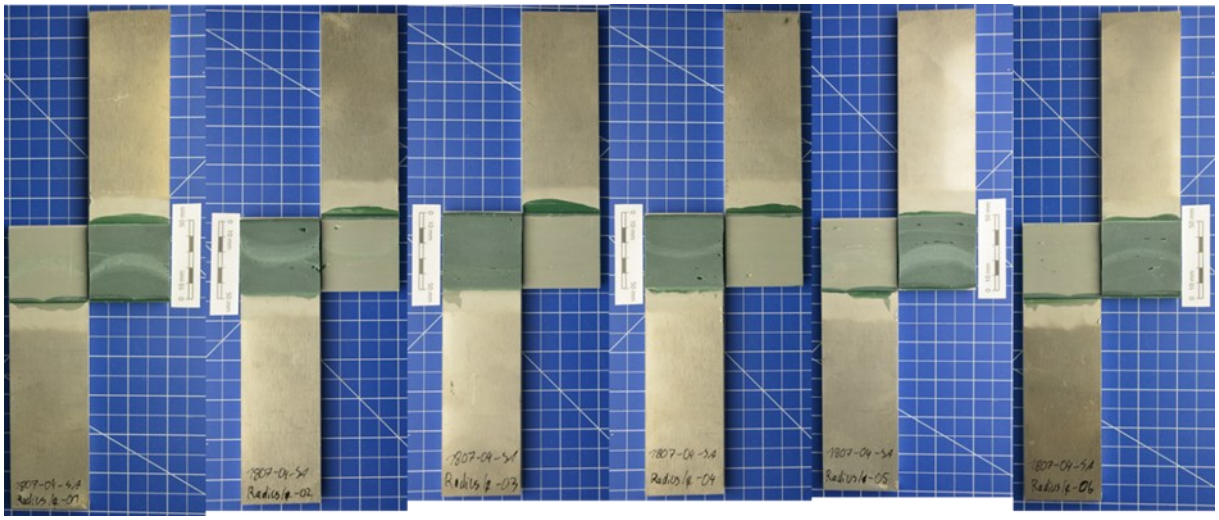
Probenbezeichnung	Bruchbild
Radius/l_01	AF (2%), CF (8%), SCF (90%)
Radius /l_02	AF (2%), CF (6%), SCF (92%)
Radius /l_03	AF (1%), CF (4%), SCF (95%)
Radius /l_04	AF (2%), CF (4%), SCF (94%)
Radius /l_05	AF (1%), CF (7%), SCF (92%)
Radius /l_06	AF (2%), CF (5%), SCF (93%)

Anhang 41: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie Keil/q



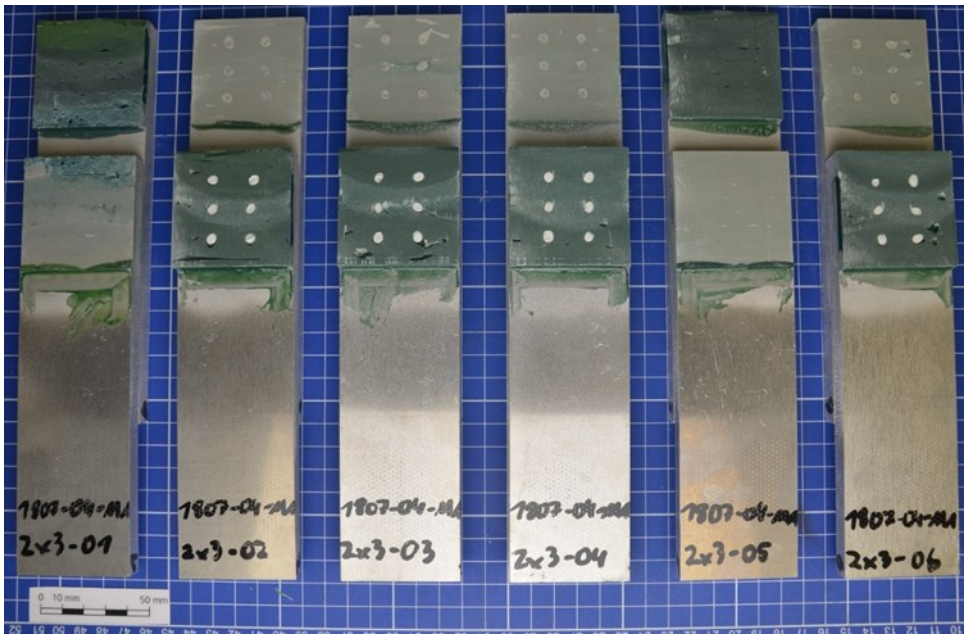
Probenbezeichnung	Bruchbild
Keil/q_01	CF (42%), SCF (58%)
Keil/q_02	AF (1%), CF (8%), SCF (91%)
Keil/q_03	CF (9%), SCF (91%)
Keil/q_04	AF (2%), CF (30%), SCF (68%)
Keil/q_05	CF (8%), SCF (92%)
Keil/q_06	AF (5%), CF (6%), SCF (89%)

Anhang 42: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie Radius/q



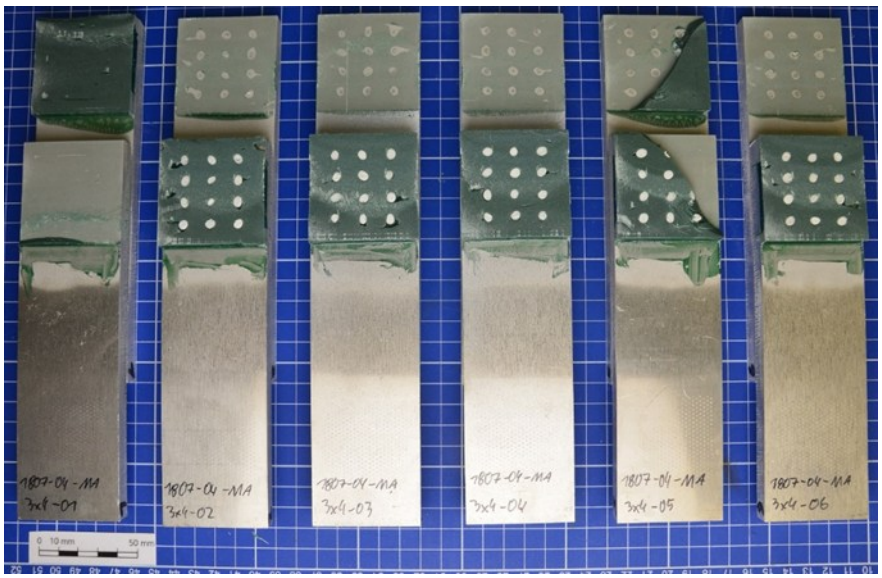
Probenbezeichnung	Bruchbild
Radius/q_01	CF (9%), SCF (91%)
Radius /q_02	AF (1%), CF (5%), SCF (94%)
Radius /q_03	AF (0,5%), CF (4%), SCF (95,5%)
Radius /q_04	AF (0,5%), CF (4%), SCF (95,5%)
Radius /q_05	AF (2%), CF (5%), SCF (93%)
Radius /q_06	AF (1%), CF (7%), SCF (92%)

Anhang 43: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 2x3 HK



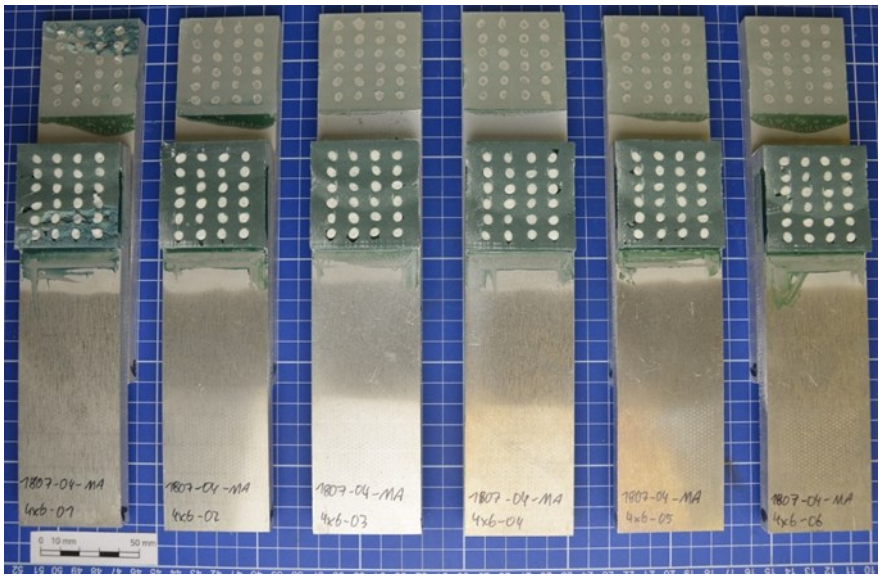
Probenbezeichnung	Bruchbild
2x3 HK_01	AF (5%), CF (18%), SCF (77%)
2x3 HK_02	AF (7%), CF (2%), SCF (91%)
2x3 HK_03	AF (9%), CF (4%), SCF (88%)
2x3 HK_04	AF (7%), CF (1%), SCF (92%)
2x3 HK_05	AF (1%), CF (4%), SCF (95%)
2x3 HK_06	AF (10%), CF (1%), SCF (89%)

Anhang 44: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 3x4 HK



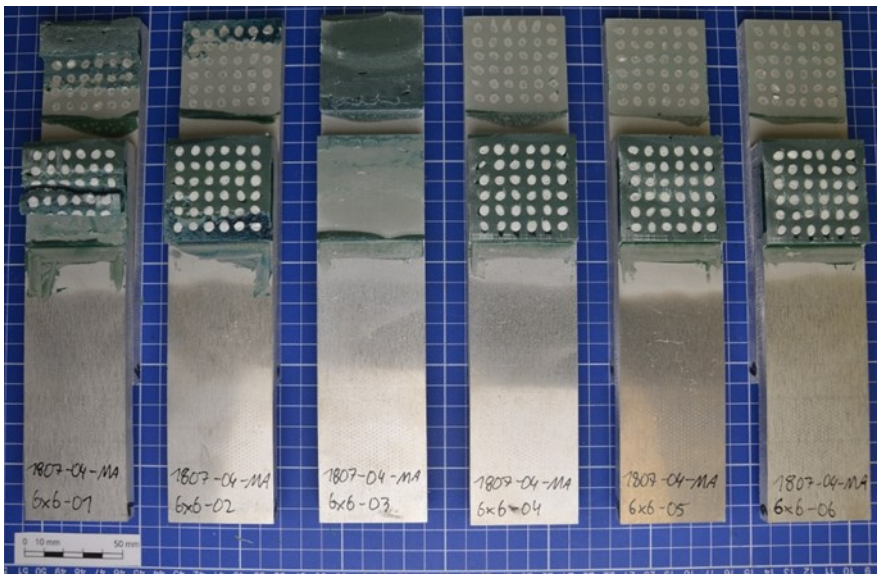
Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 HK_01	AF (1%), CF (14%), SCF (85%)
3x4 HK_02	AF (14%), CF (4%), SCF (82%)
3x4 HK_03	AF (13%), CF (2%), SCF (85%)
3x4 HK_04	AF (12%), CF (1%), SCF (87%)
3x4 HK_05	AF (9%), CF (32%), SCF (59%)
3x4 HK_06	AF (13%), CF (2%), SCF (85%)

Anhang 45: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 4x6 HK



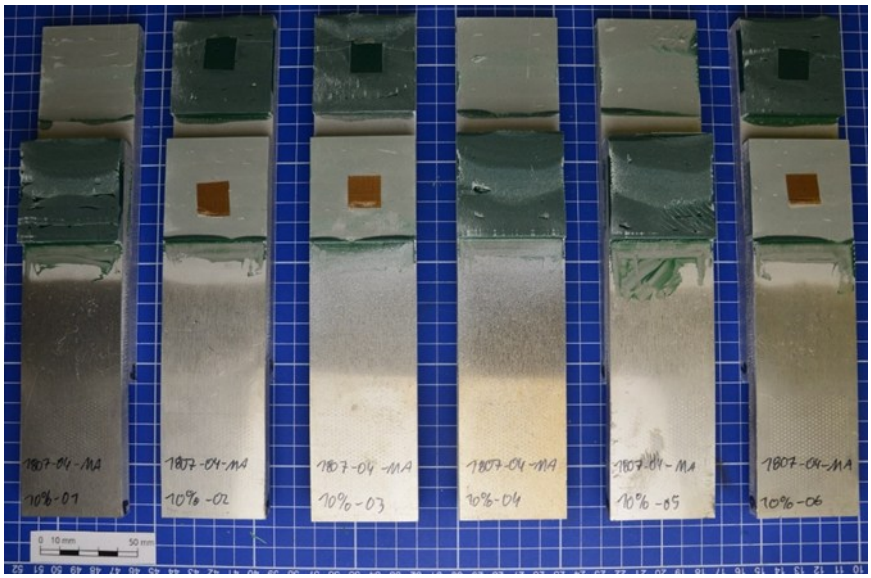
Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 HK_01	AF (22%), CF (29%), SCF (49%)
4x6 HK_02	AF (24%), CF (4%), SCF (72%)
4x6 HK_03	AF (25%), SCF (75%)
4x6 HK_04	AF (24%), CF (0,5%), SCF (75,5%)
4x6 HK_05	AF (25%), CF (2%), SCF (73%)
4x6 HK_06	AF (24%), CF (0,5%), SCF (75,5%)

Anhang 46: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 6x6 HK



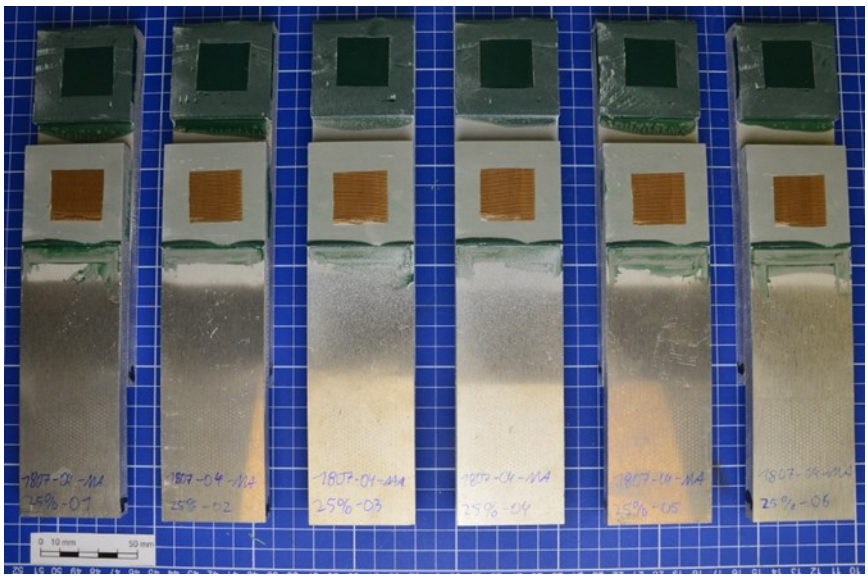
Probenbezeichnung	Bruchbild
6x6 HK_01	AF (24%), CF (48%), SCF (28%)
6x6 HK_02	AF (36%), CF (18%), SCF (46%)
6x6 HK_03	AF (1%), CF (19%), SCF (80%)
6x6 HK_04	AF (36%), CF (2%), SCF (62%)
6x6 HK_05	AF (35%), CF (1%), SCF (64%)
6x6 HK_06	AF (35%), CF (2%), SCF (63%)

Anhang 47: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 10 %



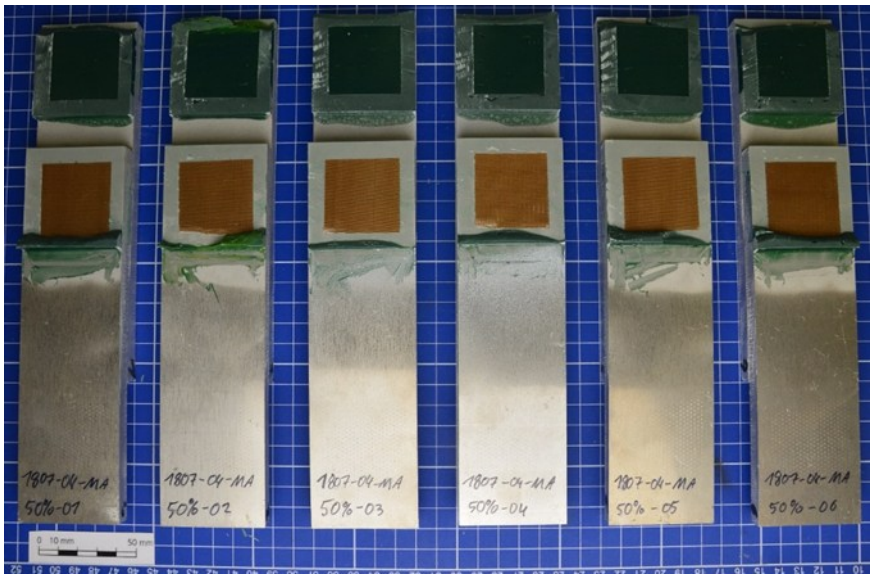
Probenbezeichnung	Bruchbild
10 %_01	AF (5%), CF (2%), SCF (93%)
10 %_02	AF (12%), CF (6%), SCF (82%)
10 %_03	AF (11%), CF (5%), SCF (84%)
10 %_04	AF (2%), CF (4%), SCF (94%)
10 %_05	AF (3%), CF (10%), SCF (87%)
10 %_06	AF (12%), CF (6%), SCF (82%)

Anhang 48: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 25 %



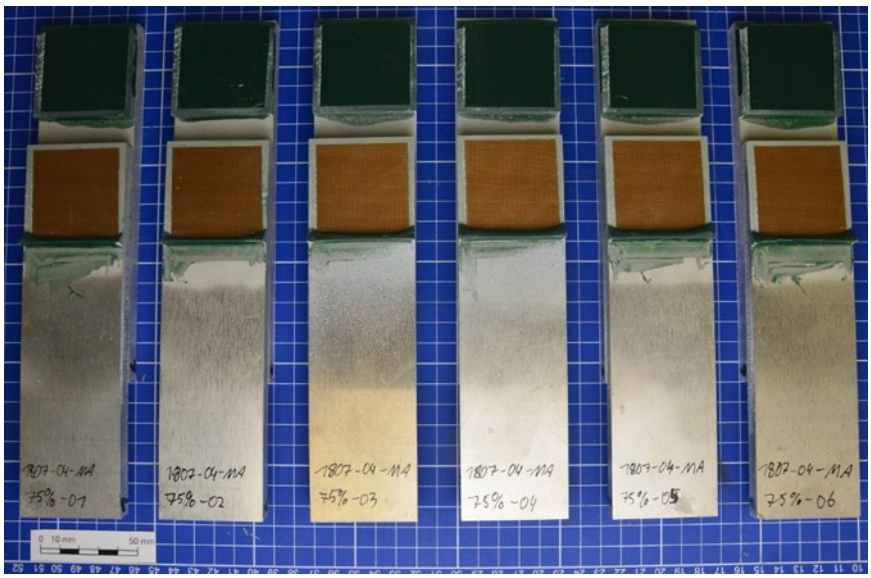
Probenbezeichnung	Bruchbild
25 %_01	AF (26%), CF (6%), SCF (68%)
25 %_02	AF (27%), CF (6%), SCF (67%)
25 %_03	AF (26%), CF (5%), SCF (69%)
25 %_04	AF (25%), CF (5%), SCF (70%)
25 %_05	AF (27%), CF (5%), SCF (68%)
25 %_06	AF (26%), CF (5%), SCF (67%)

Anhang 49: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 50 %



Probenbezeichnung	Bruchbild
50 %_01	AF (50%), CF (23%), SCF (27%)
50 %_02	AF (47%), CF (15%), SCF (38%)
50 %_03	AF (51%), CF (9%), SCF (40%)
50 %_04	AF (52%), CF (13%), SCF (35%)
50 %_05	AF (51%), CF (16%), SCF (33%)
50 %_06	AF (48%), CF (24%), SCF (28%)

Anhang 50: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 75 %



Probenbezeichnung	Bruchbild
75 %_01	AF (72%), CF (14%), SCF (14%)
75 %_02	AF (73%), CF (16%), SCF (11%)
75 %_03	AF (73%), CF (13%), SCF (14%)
75 %_04	AF (72%), CF (14%), SCF (13%)
75 %_05	AF (72%), CF (14%), SCF (13%)
75 %_06	AF (72%), CF (13%), SCF (14%)

Anhang 51: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für HK in der 3x4-Anordnung

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,22	0,009	0,000
2	0,43	0,012	0,000
3	0,65	0,012	-0,002
4	0,88	0,014	-0,003
5	1,09	0,014	-0,003
6	1,31	0,015	-0,004
7	1,51	0,015	-0,004
8	1,71	0,015	-0,005
9	1,92	0,017	-0,005
10	2,13	0,016	-0,006

Anhang 52: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für HK in der 4x6-Anordnung

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,23	0,003	0,002
2	0,46	0,004	0,001
3	0,68	0,005	0,001
4	0,90	0,006	-0,001
5	1,11	0,007	0,000
6	1,32	0,008	-0,002
7	1,54	0,010	-0,002
8	1,75	0,010	-0,003
9	1,95	0,010	-0,003
10	2,16	0,010	-0,004

Anhang 53: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für HK in der 6x6-Anordnung

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,18	0,000	-0,002
2	0,43	0,003	-0,002
3	0,67	0,003	-0,002
4	0,91	0,004	-0,003
5	1,13	0,005	-0,003
6	1,38	0,006	-0,005
7	1,58	0,008	-0,005
8	1,81	0,008	-0,005
9	2,03	0,009	-0,008
10	2,25	0,009	-0,008

Anhang 54: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für 10 %

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,22	0,003	0,000
2	0,44	0,005	-0,002
3	0,66	0,007	-0,002
4	0,86	0,008	-0,003
5	1,09	0,010	-0,004
6	1,31	0,010	-0,006
7	1,51	0,011	-0,005
8	1,71	0,011	-0,005
9	1,94	0,014	-0,006
10	2,15	0,013	-0,007

Anhang 55: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für 25 %

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,24	0,003	0,001
2	0,45	0,004	-0,001
3	0,68	0,006	-0,002
4	0,92	0,007	-0,003
5	1,13	0,009	-0,003
6	1,36	0,010	-0,004
7	1,57	0,011	-0,004
8	1,79	0,012	-0,004
9	2,00	0,014	-0,006
10	2,24	0,013	-0,007

Anhang 56: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für 50 %

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,23	0,002	-0,002
2	0,47	0,004	-0,004
3	0,70	0,005	-0,005
4	0,94	0,006	-0,004
5	1,16	0,008	-0,007
6	1,39	0,009	-0,008
7	1,60	0,009	-0,008
8	1,82	0,010	-0,009
9	2,06	0,010	-0,009
10	2,28	0,009	-0,011

Anhang 57: Ergebnisse der GOM-Messtechnik für 75 %

Kraft in kN	$tan\,\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,30	0,000	-0,001
2	0,59	0,004	-0,002
3	0,88	0,005	-0,004
4	1,18	0,008	-0,006
5	1,47	0,009	-0,007
6	1,76	0,010	-0,008
7	2,05	0,011	-0,010
8	2,35	0,011	-0,011
9	2,65	0,011	-0,012
10	2,98	0,010	-0,014

Anhang 58: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 2x3 VK bei einer Kraft von 10 kN

	2x3 VK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	14,21
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	28,52
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	25,04

Anhang 59: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 3x4 VK bei einer Kraft von 10 kN

	3x4 VK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	14,68
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	29,25
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	25,82

Anhang 60: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 4x6 VK bei einer Kraft von 10 kN

	4x6 VK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	15,33
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	30,51
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	26,98

Anhang 61: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 6x6 VK bei einer Kraft von 10 kN

	6x6 VK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	16,15
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	32,25
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	28,49

Anhang 62: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie Keil/l bei einer Kraft von 10 kN

	Keil/l-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	16,69
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	26,24
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	29,62

Anhang 63: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie Radius/l bei einer Kraft von 10 kN

	Radius/l-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	13,03
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	27,38
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	23,77

Anhang 64: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie Keil/q bei einer Kraft von 10 kN

	Keil/q-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	13,50
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	28,35
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	24,12

Anhang 65: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie Radius/q bei einer Kraft von 10 kN

	Radius/q-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	11,60
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	19,23
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	20,45

Anhang 66: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 2x3 HK bei einer Kraft von 10 kN

	2x3 HK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	14,81
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	29,74
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	26,06

Anhang 67: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 3x4 HK bei einer Kraft von 10 kN

	3x4 HK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	14,96
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	31,27
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	26,41

Anhang 68: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 4x6 HK bei einer Kraft von 10 kN

	4x6 HK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	16,23
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	38,51
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	29,32

Anhang 69: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 6x6 HK bei einer Kraft von 10 kN

	6x6 HK-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	17,10
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	40,58
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	30,90

Anhang 70: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 10 % bei einer Kraft von 10 kN

	10 %-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	17,11
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	26,49
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	30,24

Anhang 71: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 25 % bei einer Kraft von 10 kN

	25 %-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	23,69
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	27,82
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	41,75

Anhang 72: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 50 % bei einer Kraft von 10 kN

	50 %-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	35,61
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	31,80
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	62,55

Anhang 73: Ergebnisse der FEM-Simulation mit der Serie 75 % bei einer Kraft von 10 kN

	75 %-FEM
Maximale Schubspannung in MPa	53,31
Maximale Normalspannung in MPa (Y-Achse)	39,85
Maximale Vergleichsspannung (von Mises) in MPa	93,46

Anhang 74: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 2x3 VK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ **in %**	**Längenänderung in mm**	**Dickenänderung in mm**
1	0,06	0,005	0,000
2	0,13	0,011	0,000
3	0,19	0,016	0,000
4	0,25	0,021	0,001
5	0,31	0,027	0,001
6	0,38	0,032	0,001
7	0,44	0,037	0,001
8	0,50	0,043	0,001
9	0,56	0,048	0,001
10	0,63	0,053	0,002

Anhang 75: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 3x4 VK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ **in %**	**Längenänderung in mm**	**Dickenänderung in mm**
1	0,06	0,005	0,000
2	0,13	0,011	0,000
3	0,19	0,016	0,001
4	0,26	0,022	0,001
5	0,32	0,027	0,001
6	0,39	0,032	0,001
7	0,45	0,038	0,001
8	0,52	0,043	0,001
9	0,58	0,049	0,002
10	0,65	0,054	0,002

Anhang 76: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 4x6 VK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ **in %**	**Längenänderung in mm**	**Dickenänderung in mm**
1	0,07	0,006	0,000
2	0,14	0,011	0,000
3	0,21	0,017	0,001
4	0,28	0,022	0,001
5	0,35	0,028	0,001
6	0,42	0,033	0,001
7	0,49	0,039	0,001
8	0,56	0,045	0,001
9	0,63	0,050	0,002
10	0,70	0,056	0,002

Anhang 77: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 6x6 VK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,08	0,006	0,000
2	0,15	0,012	0,000
3	0,23	0,017	0,001
4	0,30	0,023	0,001
5	0,38	0,029	0,001
6	0,46	0,035	0,001
7	0,53	0,040	0,001
8	0,61	0,046	0,002
9	0,69	0,052	0,002
10	0,76	0,058	0,002

Anhang 78: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 2x3 HK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,07	0,007	0,000
2	0,14	0,013	0,000
3	0,21	0,020	0,000
4	0,29	0,027	0,001
5	0,36	0,034	0,001
6	0,43	0,040	0,001
7	0,50	0,047	0,001
8	0,57	0,054	0,001
9	0,64	0,061	0,001
10	0,72	0,067	0,001

Anhang 79: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 3x4 HK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,07	0,007	0,000
2	0,15	0,014	0,000
3	0,22	0,020	0,001
4	0,29	0,027	0,001
5	0,36	0,034	0,001
6	0,44	0,041	0,001
7	0,51	0,047	0,001
8	0,58	0,054	0,001
9	0,66	0,061	0,002
10	0,73	0,068	0,002

Anhang 80: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 4x6 HK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,08	0,007	0,000
2	0,15	0,014	0,000
3	0,23	0,021	0,001
4	0,30	0,027	0,001
5	0,38	0,034	0,001
6	0,45	0,041	0,001
7	0,53	0,048	0,002
8	0,61	0,055	0,002
9	0,68	0,062	0,002
10	0,76	0,069	0,002

Anhang 81: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 6x6 HK

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,08	0,007	0,000
2	0,16	0,014	0,001
3	0,24	0,021	0,001
4	0,32	0,028	0,001
5	0,39	0,035	0,001
6	0,47	0,042	0,002
7	0,55	0,049	0,002
8	0,63	0,056	0,002
9	0,71	0,062	0,003
10	0,79	0,069	0,003

Anhang 82: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 10 %

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,07	0,007	0,000
2	0,14	0,013	0,000
3	0,22	0,020	0,000
4	0,29	0,027	0,000
5	0,36	0,034	0,001
6	0,43	0,040	0,001
7	0,51	0,047	0,001
8	0,58	0,054	0,001
9	0,65	0,061	0,001
10	0,72	0,067	0,001

Anhang 83: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 25 %

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,08	0,007	0,000
2	0,15	0,014	0,000
3	0,23	0,021	0,000
4	0,31	0,028	0,000
5	0,39	0,034	0,000
6	0,46	0,041	0,000
7	0,54	0,048	0,000
8	0,62	0,055	0,001
9	0,70	0,062	0,001
10	0,77	0,069	0,001

Anhang 84: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 50 %

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,09	0,007	0,000
2	0,19	0,015	0,000
3	0,28	0,022	-0,001
4	0,38	0,029	-0,001
5	0,47	0,037	-0,001
6	0,56	0,044	-0,001
7	0,66	0,051	-0,001
8	0,75	0,059	-0,002
9	0,85	0,066	-0,002
10	0,94	0,073	-0,002

Anhang 85: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie 75 %

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,13	0,009	-0,001
2	0,26	0,017	-0,002
3	0,40	0,026	-0,002
4	0,53	0,034	-0,003
5	0,66	0,043	-0,004
6	0,79	0,051	-0,005
7	0,93	0,060	-0,005
8	1,06	0,068	-0,006
9	1,19	0,077	-0,007
10	1,32	0,085	-0,008

Anhang 86: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie Keil/l

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,07	0,005	0,000
2	0,13	0,011	0,000
3	0,20	0,016	0,001
4	0,27	0,022	0,001
5	0,33	0,027	0,001
6	0,40	0,032	0,001
7	0,47	0,038	0,001
8	0,53	0,043	0,002
9	0,60	0,048	0,002
10	0,67	0,054	0,002

Anhang 87: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie Radius/l

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,07	0,005	0,000
2	0,14	0,011	0,000
3	0,20	0,016	0,001
4	0,27	0,022	0,001
5	0,34	0,027	0,001
6	0,41	0,032	0,001
7	0,48	0,038	0,001
8	0,54	0,043	0,002
9	0,61	0,049	0,002
10	0,68	0,054	0,002

Anhang 88: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie Keil/q

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,06	0,006	0,000
2	0,13	0,011	0,000
3	0,19	0,017	0,001
4	0,26	0,022	0,001
5	0,32	0,028	0,001
6	0,39	0,034	0,001
7	0,45	0,039	0,001
8	0,52	0,045	0,002
9	0,58	0,050	0,002
10	0,65	0,056	0,002

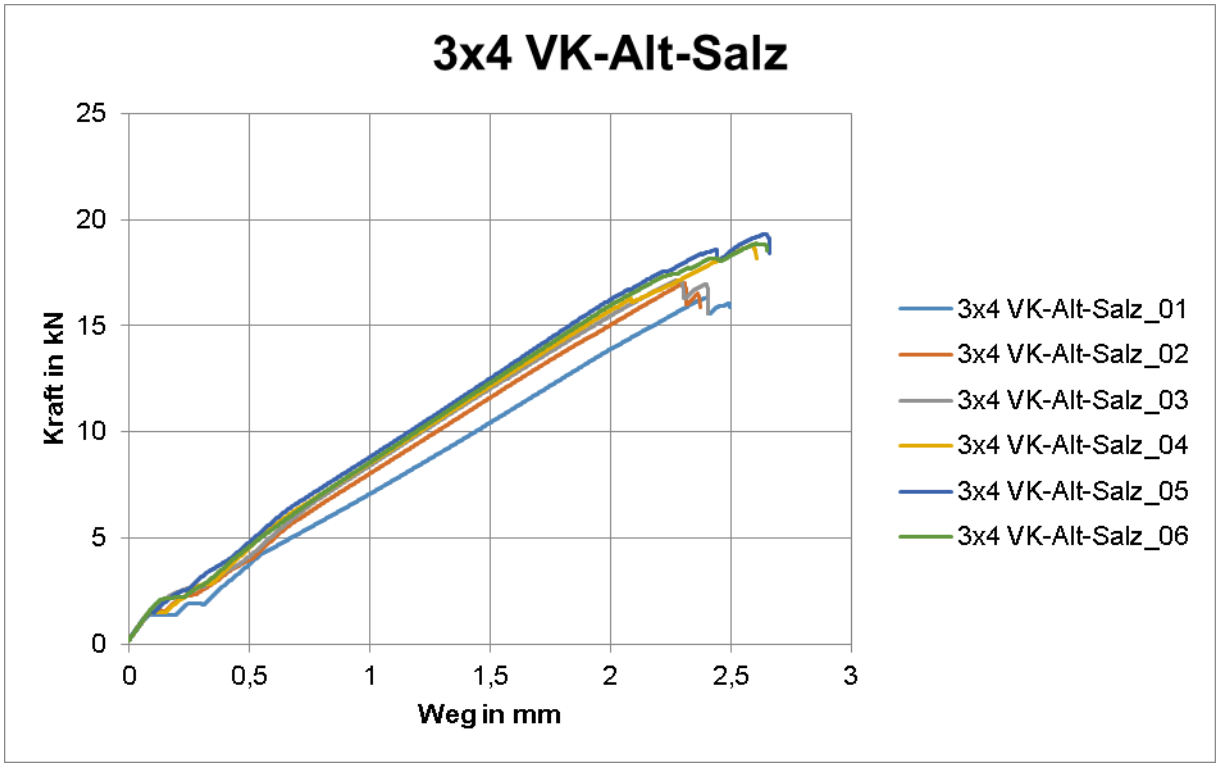
Anhang 89: Ergebnisse der FEM-Simulationen für die Geometrieänderungen der Serie Radius/q

Kraft in kN	$\tan\gamma$ in %	Längenänderung in mm	Dickenänderung in mm
1	0,07	0,006	0,000
2	0,13	0,011	0,000
3	0,20	0,017	0,001
4	0,27	0,023	0,001
5	0,34	0,028	0,001
6	0,40	0,034	0,001
7	0,47	0,039	0,001
8	0,54	0,045	0,002
9	0,60	0,051	0,002
10	0,67	0,056	0,002

Anhang 90: Probenabmessungen der im Salzsprühnebel gealterten Referenzserie

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Referenz-Alt-Salz_01	49,73	50,06
Referenz-Alt-Salz_02	49,82	49,90
Referenz-Alt-Salz_03	49,75	49,95
Referenz-Alt-Salz_04	49,69	50,04
Referenz-Alt-Salz_05	49,84	49,94
Referenz-Alt-Salz_06	49,81	50,03

Anhang 91: Ergebnisse der im Salzsprühnebel gealterten Serie 3x4 VK

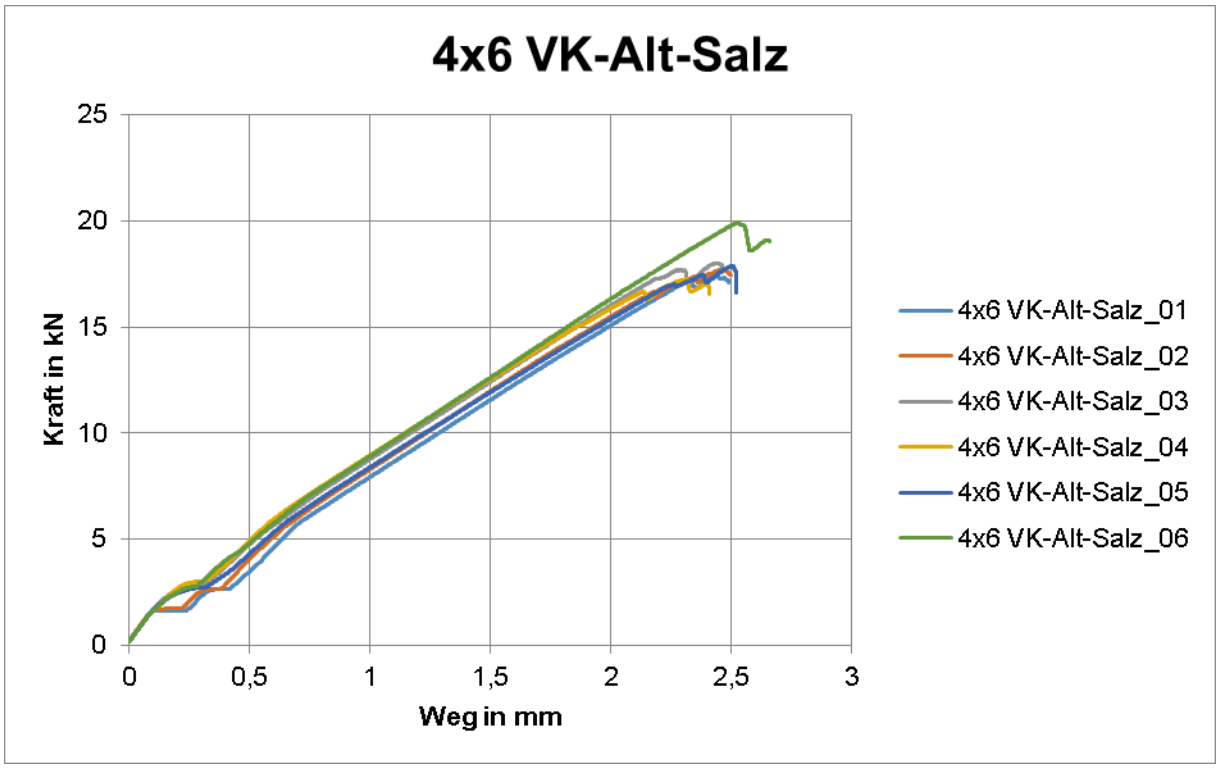


3x4 VK-Alt-Salz	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	17909	7,2
Standardabweichung	1237	0,5
Variationskoeffizient	0,07	0,07

Anhang 92: Probenabmessungen der im Salzsprühnebel gealterten Serie 3x4 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 VK-Alt-Salz_01	49,36	50,12
3x4 VK-Alt-Salz_02	49,32	49,89
3x4 VK-Alt-Salz_03	49,50	49,97
3x4 VK-Alt-Salz_04	49,59	49,98
3x4 VK-Alt-Salz_05	49,84	50,02
3x4 VK-Alt-Salz_06	49,18	49,98

Anhang 93: Ergebnisse der im Salzsprühnebel gealterten Serie 4x6 VK

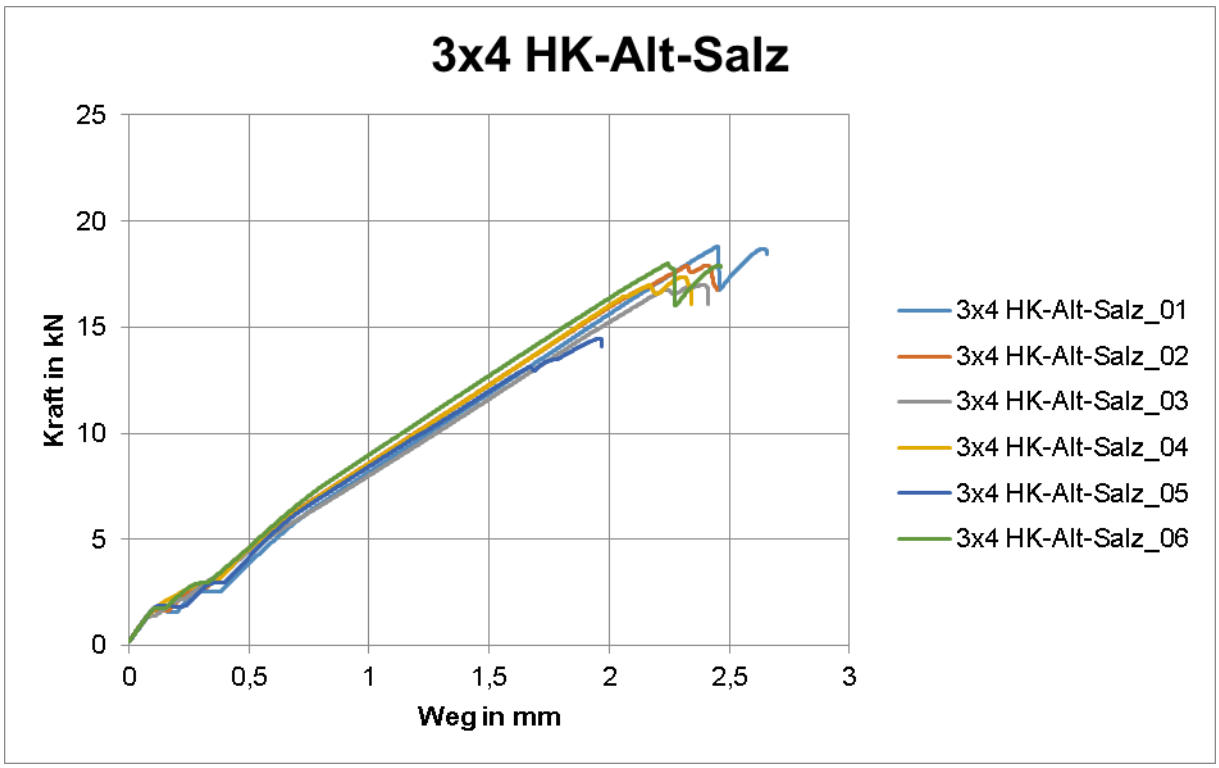


4x6 VK-Alt-Salz	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	18047	7,2
Standardabweichung	963	0,4
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Anhang 94: Probenabmessungen der im Salzsprühnebel gealterten Serie 4x6 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 VK-Alt-Salz_01	49,53	49,86
4x6 VK-Alt-Salz_02	48,96	49,94
4x6 VK-Alt-Salz_03	49,18	49,97
4x6 VK-Alt-Salz_04	49,32	49,92
4x6 VK-Alt-Salz_05	49,19	49,97
4x6 VK-Alt-Salz_06	49,69	49,98

Anhang 95: Ergebnisse der im Salzsprühnebel gealterten Serie 3x4 HK

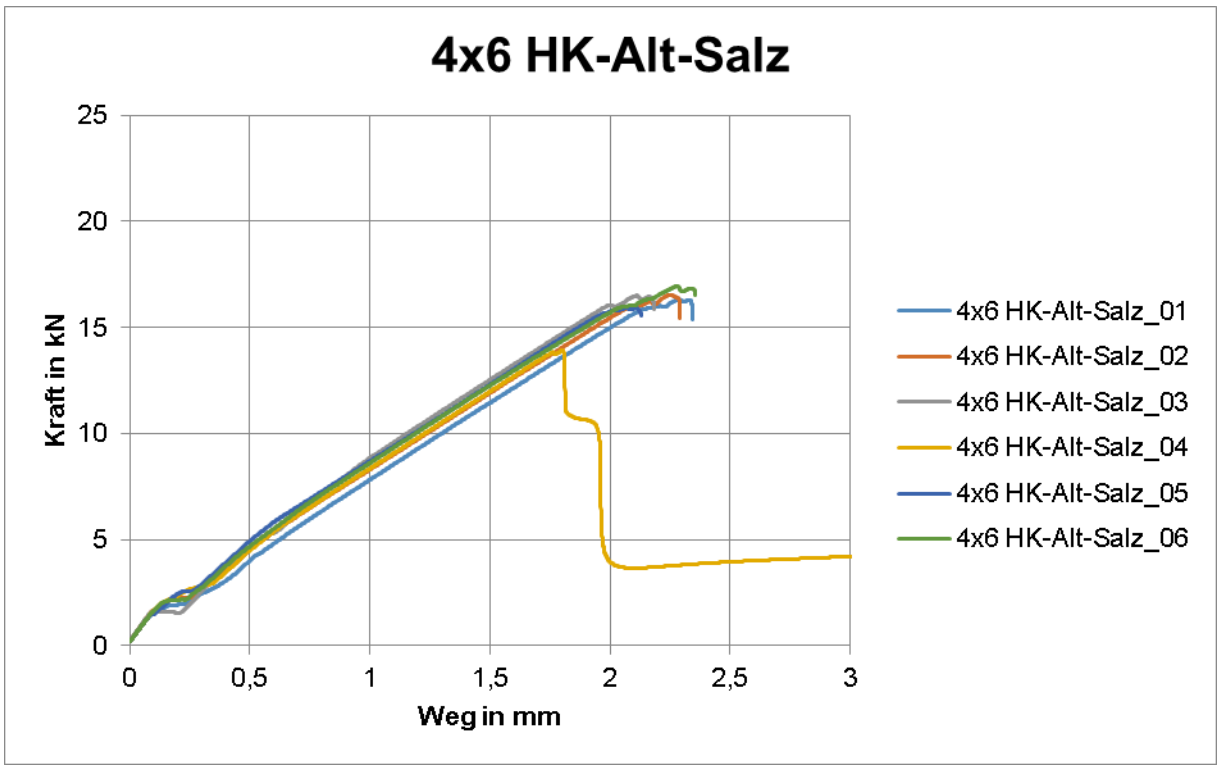


3x4 HK-Alt-Salz	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	17262	6,9
Standardabweichung	1498	0,6
Variationskoeffizient	0,09	0,09

Anhang 96: Probenabmessungen der im Salzsprühnebel gealterten Serie 3x4 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 HK-Alt-Salz_01	49,43	49,94
3x4 HK-Alt-Salz_02	49,38	50,03
3x4 HK-Alt-Salz_03	49,73	49,98
3x4 HK-Alt-Salz_04	49,35	49,74
3x4 HK-Alt-Salz_05	49,54	49,82
3x4 HK-Alt-Salz_06	49,33	50,02

Anhang 97: Ergebnisse der im Salzsprühnebel gealterten Serie 4x6 HK



4x6 HK-Alt-Salz	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	16032	6,4
Standardabweichung	1073	0,4
Variationskoeffizient	0,07	0,07

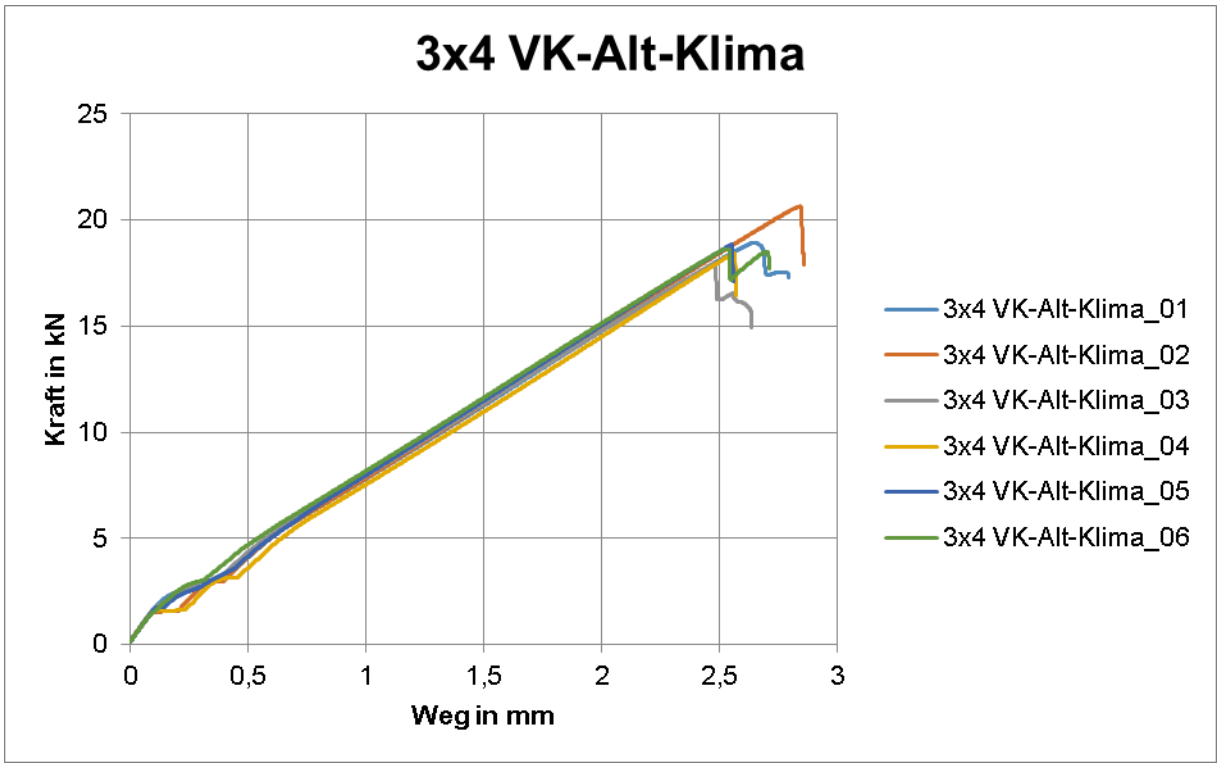
Anhang 98: Probenabmessungen der im Salzsprühnebel gealterten Serie 4x6 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 HK-Alt-Salz_01	49,16	49,88
4x6 HK-Alt-Salz_02	49,45	49,94
4x6 HK-Alt-Salz_03	49,31	49,97
4x6 HK-Alt-Salz_04	49,57	49,97
4x6 HK-Alt-Salz_05	49,34	49,93
4x6 HK-Alt-Salz_06	49,75	49,90

Anhang 99: Probenabmessungen der im Klimawechseltest gealterten Referenzserie

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Referenz-Alt-Klima_01	49,84	50,12
Referenz-Alt-Klima_02	49,69	50,03
Referenz-Alt-Klima_03	49,89	49,98
Referenz-Alt-Klima_04	49,75	49,93
Referenz-Alt-Klima_05	49,82	50,06
Referenz-Alt-Klima_06	49,59	50,04

Anhang 100: Ergebnisse der im Klimawechseltest gealterten Serie 3x4 VK

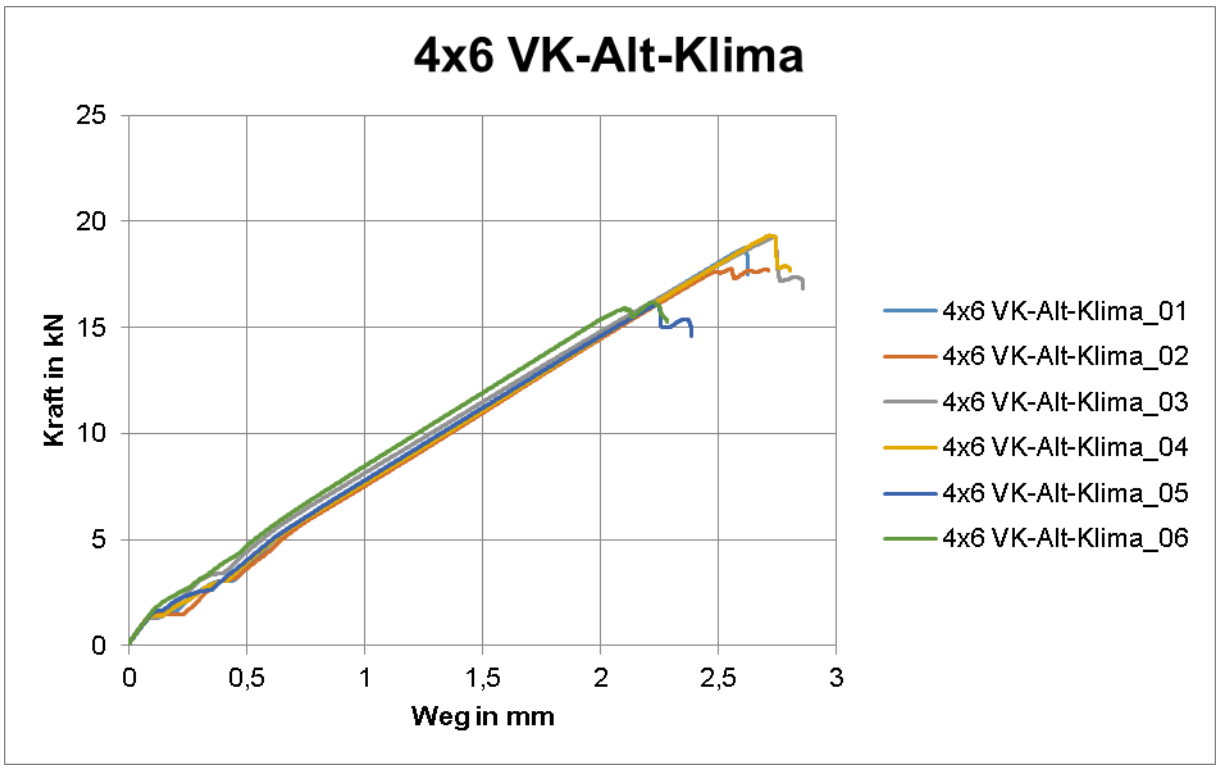


3x4 VK-Alt-Klima	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	18909	7,6
Standardabweichung	916	0,4
Variationskoeffizient	0,05	0,05

Anhang 101: Probenabmessungen der im Klimawechseltest gealterten Serie 3x4 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 VK-Alt-Klima_01	49,18	49,98
3x4 VK-Alt-Klima_02	49,36	50,12
3x4 VK-Alt-Klima_03	49,84	50,02
3x4 VK-Alt-Klima_04	49,32	49,89
3x4 VK-Alt-Klima_05	49,59	49,98
3x4 VK-Alt-Klima_06	49,50	49,97

Anhang 102: Ergebnisse der im Klimawechseltest gealterten Serie 4x6 VK

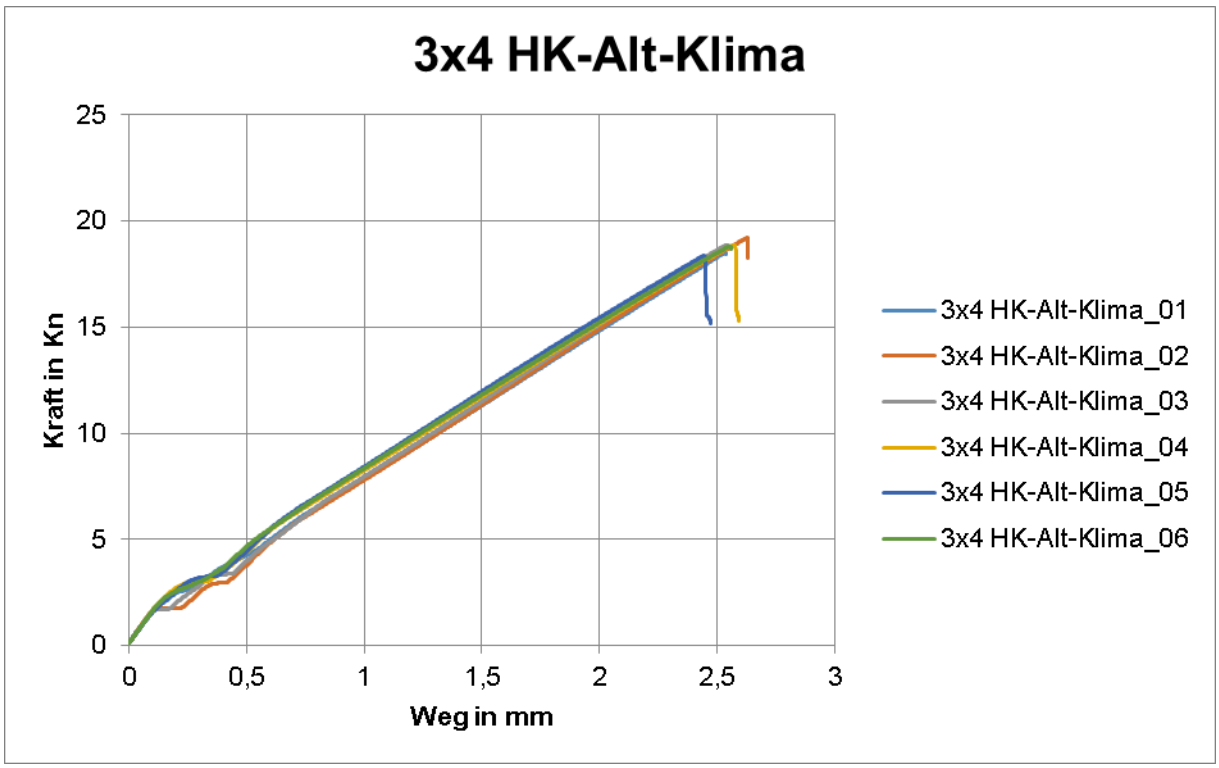


4x6 VK-Alt-Klima	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	17902	7,2
Standardabweichung	1484	0,6
Variationskoeffizient	0,08	0,08

Anhang 103: Probenabmessungen der im Klimawechseltest gealterten Serie 4x6 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 VK-Alt-Klima_01	48,90	50,03
4x6 VK-Alt-Klima_02	49,52	50,00
4x6 VK-Alt-Klima_03	49,81	50,04
4x6 VK-Alt-Klima_04	49,25	49,95
4x6 VK-Alt-Klima_05	49,08	49,89
4x6 VK-Alt-Klima_06	49,69	49,85

Anhang 104: Ergebnisse der im Klimawechseltest gealterten Serie 3x4 HK

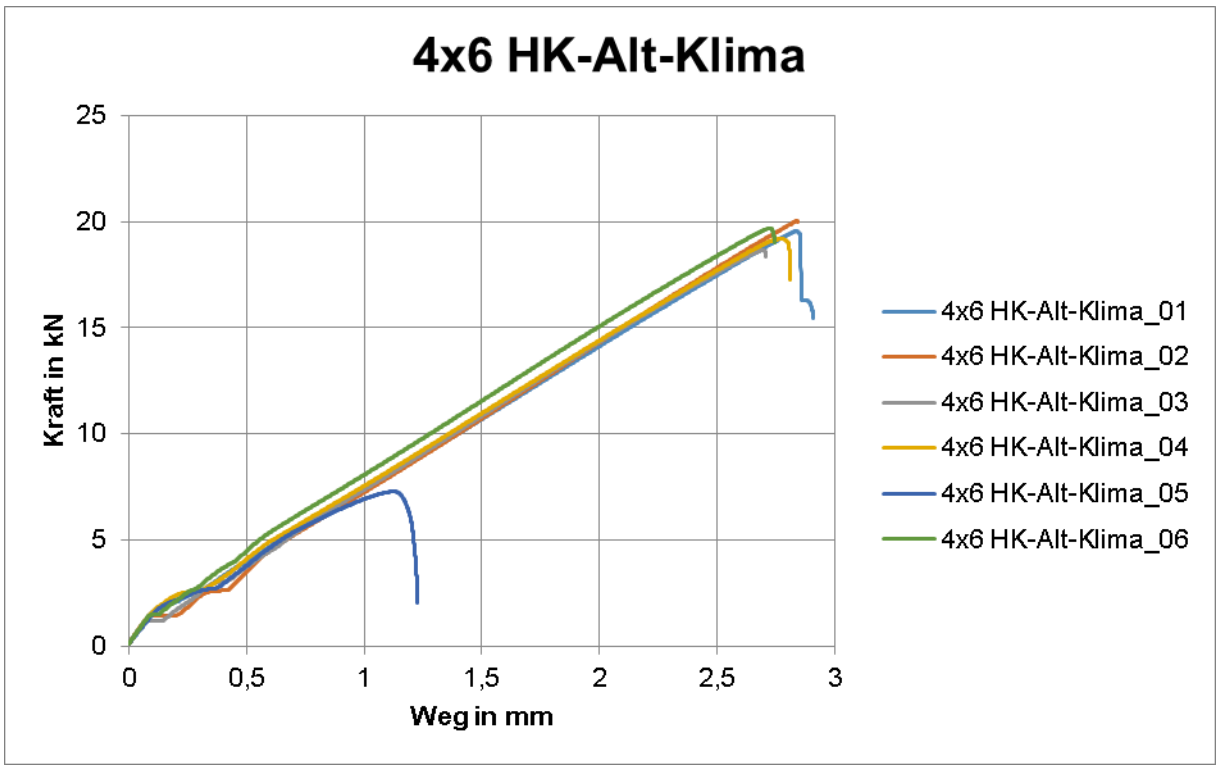


3x4 HK-Alt-Klima	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	18758	7,5
Standardabweichung	297	0,1
Variationskoeffizient	0,02	0,02

Anhang 105: Probenabmessungen der im Klimawechseltest gealterten Serie 3x4 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 HK-Alt-Klima_01	49,51	50,01
3x4 HK-Alt-Klima_02	49,45	50,02
3x4 HK-Alt-Klima_03	49,52	49,90
3x4 HK-Alt-Klima_04	49,82	50,06
3x4 HK-Alt-Klima_05	49,50	49,93
3x4 HK-Alt-Klima_06	49,89	49,96

Anhang 106: Ergebnisse der im Klimawechseltest gealterten Serie 4x6 HK

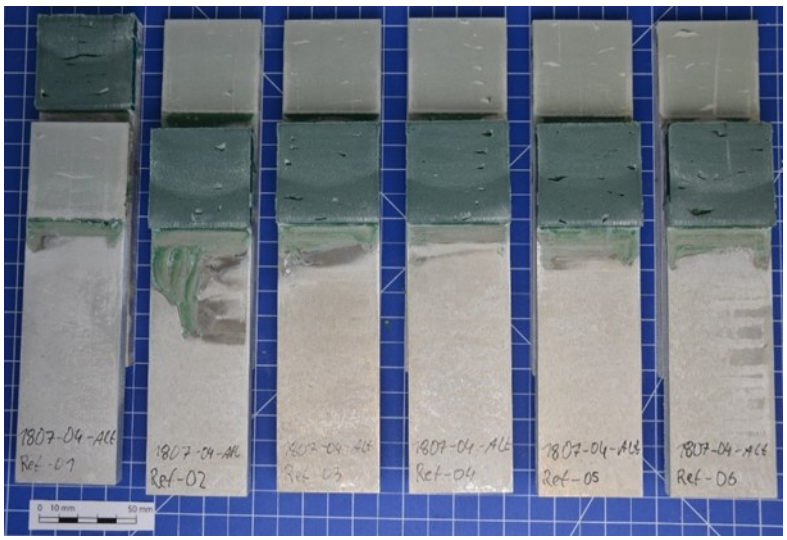


4x6 HK-Alt-Klima	**Maximalkraft in N**	**Zugscherfestigkeit in MPa**
Mittelwert	17402	7,0
Standardabweichung	4981	2,0
Variationskoeffizient	0,29	0,29

Anhang 107: Probenabmessungen der im Klimawechseltest gealterten Serie 4x6 HK

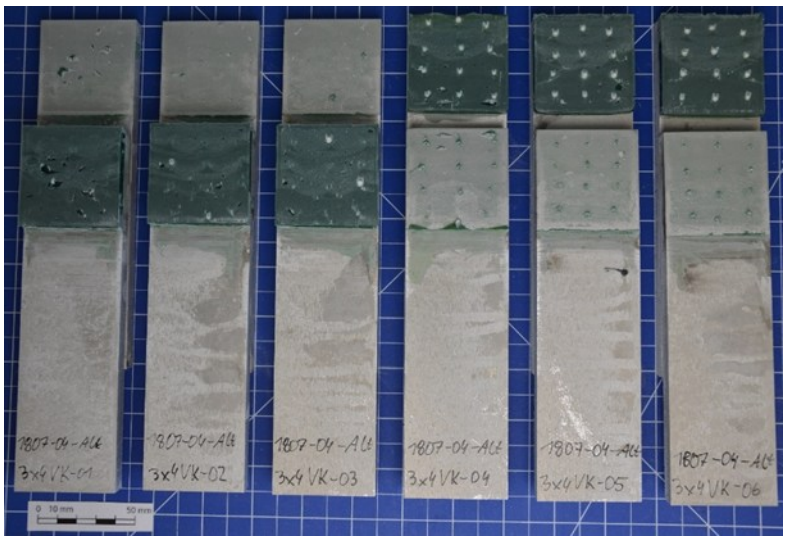
Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 HK-Alt-Klima_01	49,75	49,90
4x6 HK-Alt-Klima_02	49,16	49,88
4x6 HK-Alt-Klima_03	49,34	49,93
4x6 HK-Alt-Klima_04	49,45	49,94
4x6 HK-Alt-Klima_05	49,57	49,97
4x6 HK-Alt-Klima_06	49,31	49,97

Anhang 108: Bruchbilder der statischen im Salzsprühnebel gealterten Referenzserie



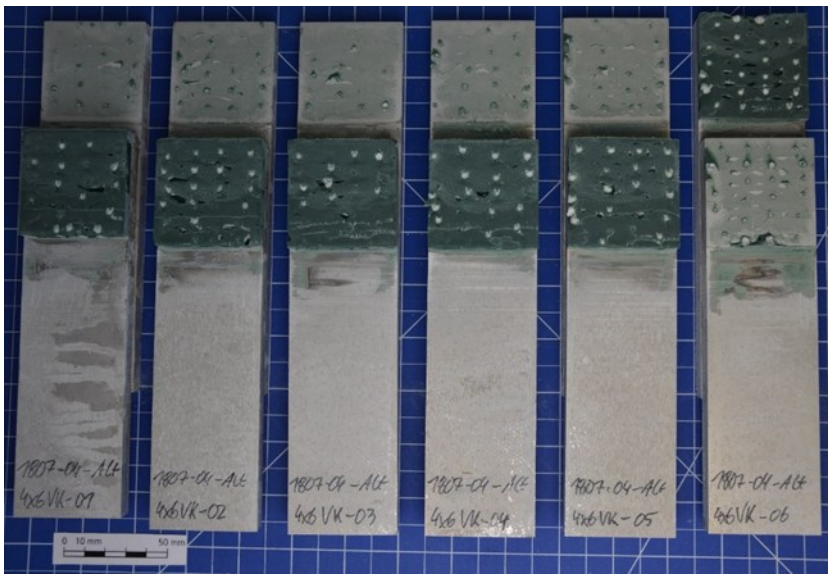
Probenbezeichnung	Bruchbild
Referenz-Alt-Salz_01	AF (10%), CF (1%), SCF (89%)
Referenz-Alt-Salz_02	AF (6%), CF (0,5%), SCF (93,5%)
Referenz-Alt-Salz_03	AF (8%), SCF (92%)
Referenz-Alt-Salz_04	AF (8%), CF (1%), SCF (91%)
Referenz-Alt-Salz_05	AF (7%), SCF (93%)
Referenz-Alt-Salz_06	AF (8%), CF (0,5%), SCF (91,5%)

Anhang 109: Bruchbilder der statischen im Salzsprühnebel gealterten Serie 3x4 VK



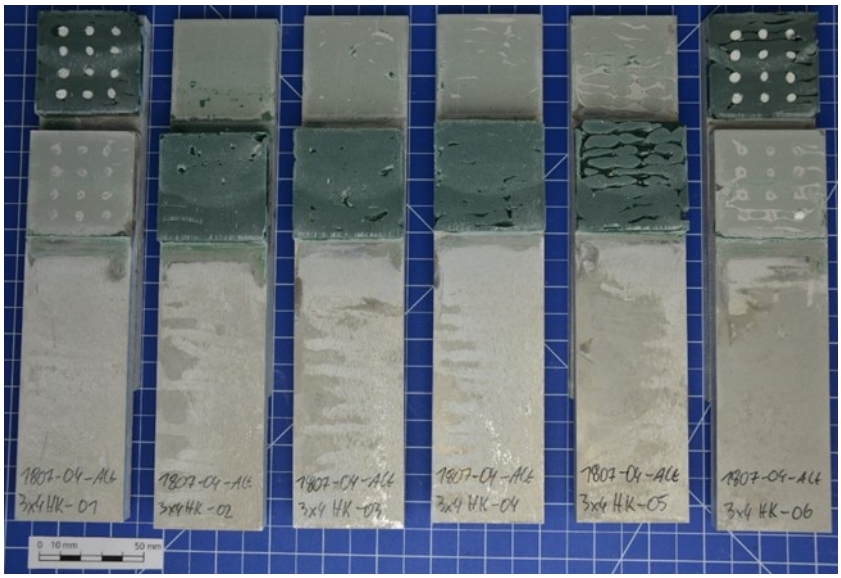
Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 VK-Alt-Salz_01	AF (11%), CF (3%), SCF (89%)
3x4 VK-Alt-Salz_02	AF (9%), CF (1%), SCF (90%)
3x4 VK-Alt-Salz_03	AF (9%), CF (1%), SCF (90%)
3x4 VK-Alt-Salz_04	AF (1%), CF (6%), SCF (93%)
3x4 VK-Alt-Salz_05	AF (1%), CF (5%), SCF (94%)
3x4 VK-Alt-Salz_06	AF (10%), CF (5%), SCF (85%)

Anhang 110: Bruchbilder der statischen im Salzsprühnebel gealterten Serie 4x6 VK



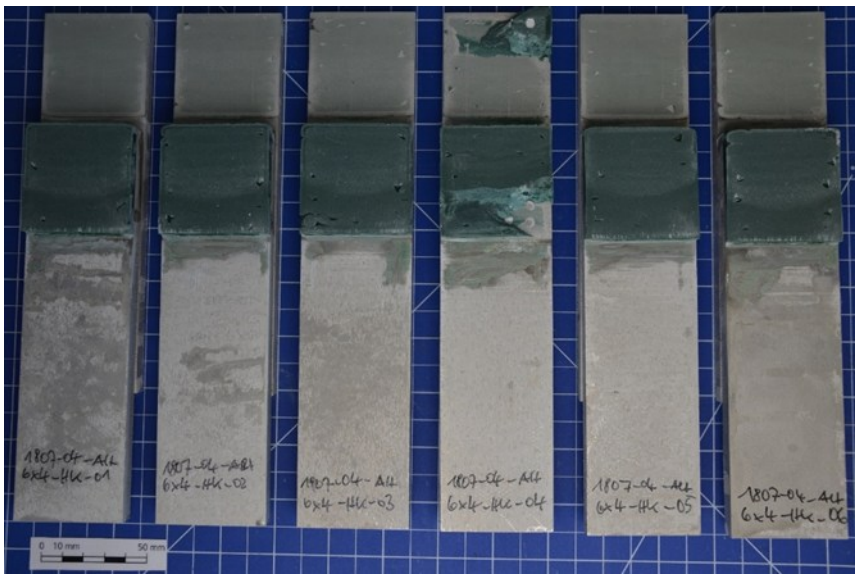
Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 VK-Alt-Salz_01	AF (6%), CF (6%), SCF (88%)
4x6 VK-Alt-Salz_02	AF (8%), CF (10%), SCF (82%)
4x6 VK-Alt-Salz_03	AF (10%), CF (6%), SCF (84%)
4x6 VK-Alt-Salz_04	AF (6%), CF (7%), SCF (87%)
4x6 VK-Alt-Salz_05	AF (8%), CF (8%), SCF (84%)
4x6 VK-Alt-Salz_06	AF (10%), CF (8%), SCF (82%)

Anhang 111: Bruchbilder der statischen im Salzsprühnebel gealterten Serie 3x4 HK



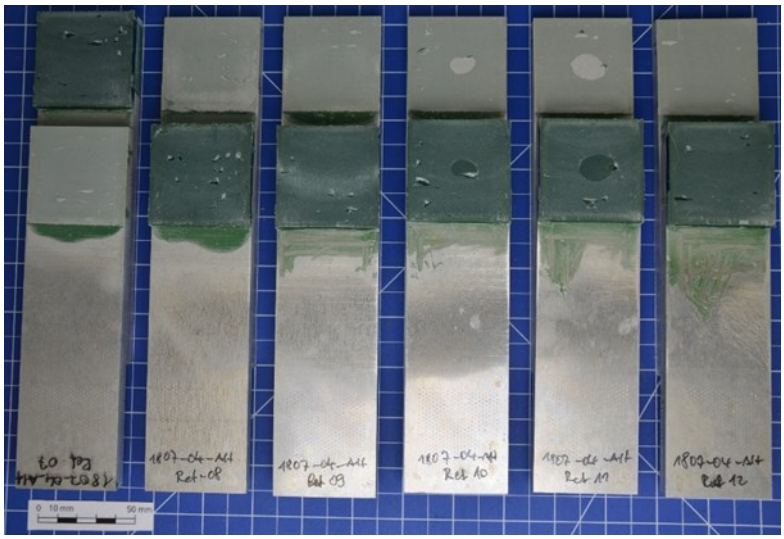
Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 HK-Alt-Salz_01	AF (12%), CF (1%), SCF (87%)
3x4 HK-Alt-Salz_02	AF (5%), CF (4%), SCF (91%)
3x4 HK-Alt-Salz_03	AF (3%), CF (1%), SCF (96%)
3x4 HK-Alt-Salz_04	AF (4%), CF (0,5%), SCF (95,5%)
3x4 HK-Alt-Salz_05	AF (12%), CF (1%), SCF (87%)
3x4 HK-Alt-Salz_06	AF (13%), CF (3%), SCF (84%)

Anhang 112: Bruchbilder der statischen im Salzsprühnebel gealterten Serie 4x6 HK



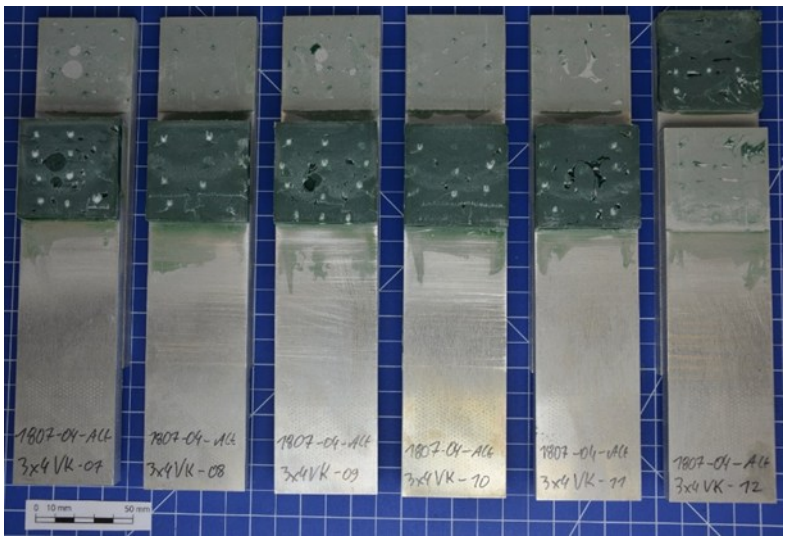
Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 HK-Alt-Salz_01	AF (10%), SCF (90%)
4x6 HK-Alt-Salz_02	AF (10%), CF (1%), SCF (89%)
4x6 HK-Alt-Salz_03	AF (15%), SCF (85%)
4x6 HK-Alt-Salz_04	AF (3%), CF (18%), SCF (79%)
4x6 HK-Alt-Salz_05	AF (12%), CF (0,1%), SCF (87,8%)
4x6 HK-Alt-Salz_06	AF (12%), SCF (88%)

Anhang 113: Bruchbilder der statischen im Klimawechseltest gealterten Referenzserie



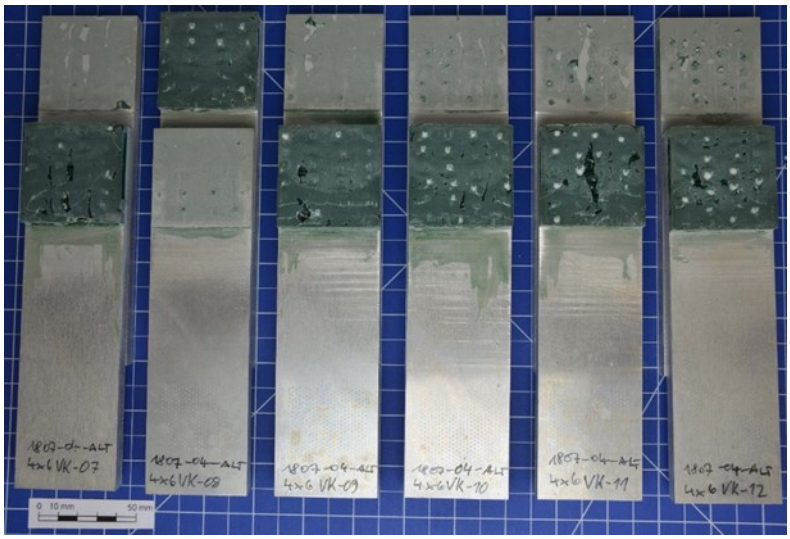
Probenbezeichnung	Bruchbild
Referenz-Alt-Klima_01	AF (2%), CF (1%), SCF (97%)
Referenz-Alt-Klima_02	AF (2%), CF (2%), SCF (96%)
Referenz-Alt-Klima_03	AF (2%), CF (0,5%), SCF (97,5%)
Referenz-Alt-Klima_04	AF (6%), CF (2%), SCF (92%)
Referenz-Alt-Klima_05	AF (11%), CF (2%), SCF (87%)
Referenz-Alt-Klima_06	AF (3%), CF (0,5%), SCF (96,5%)

Anhang 114: Bruchbilder der statischen im Klimawechseltest gealterten Serie 3x4 VK



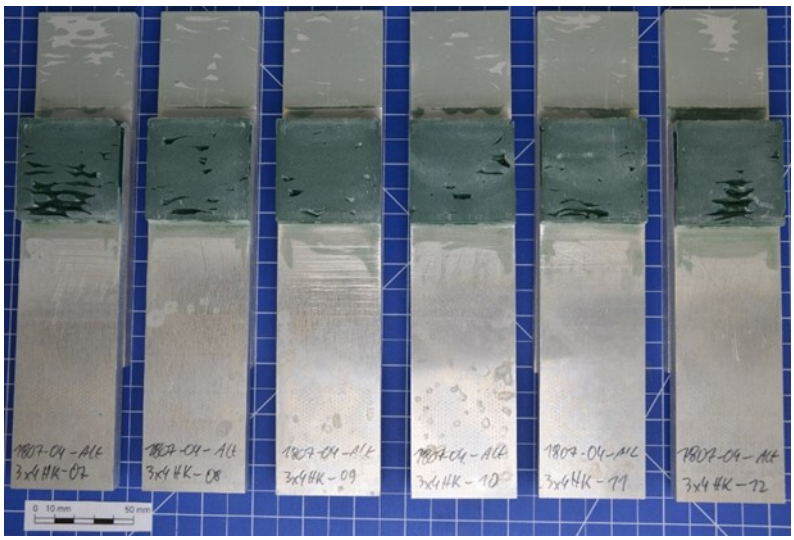
Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 VK-Alt-Klima_01	AF (9%), CF (5%), SCF (86%)
3x4 VK-Alt-Klima_02	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)
3x4 VK-Alt-Klima_03	AF (4%), CF (4%), SCF (92%)
3x4 VK-Alt-Klima_04	AF (1%), CF (2,5%), SCF (96,5%)
3x4 VK-Alt-Klima_05	AF (5%), CF (3%), SCF (92%)
3x4 VK-Alt-Klima_06	AF (2%), CF (7%), SCF (91%)

Anhang 115: Bruchbilder der statischen im Klimawechseltest gealterten Serie 4x6 VK



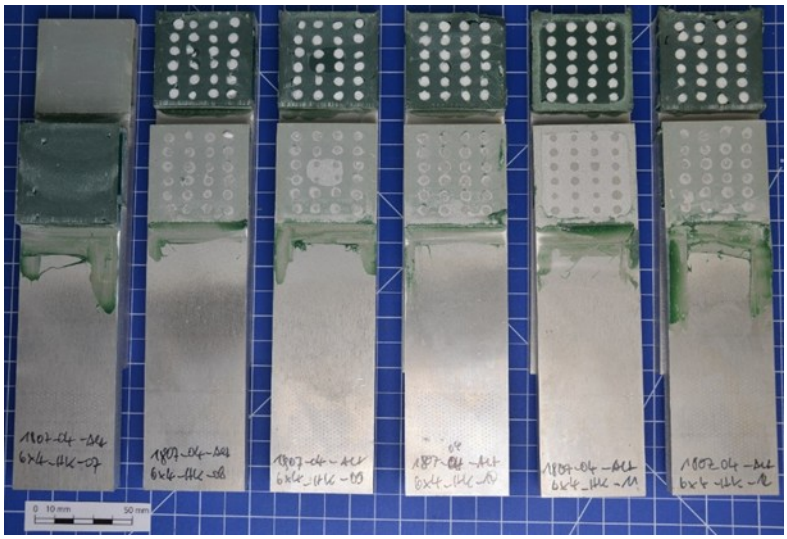
Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 VK-Alt-Klima_01	AF (6%), CF (3%), SCF (91%)
4x6 VK-Alt-Klima_02	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)
4x6 VK-Alt-Klima_03	AF (5%), CF (4%), SCF (91%)
4x6 VK-Alt-Klima_04	AF (2%), CF (3%), SCF (95%)
4x6 VK-Alt-Klima_05	AF (7%), CF (5%), SCF (88%)
4x6 VK-Alt-Klima_06	AF (3%), CF (8%), SCF (89%)

Anhang 116: Bruchbilder der statischen im Klimawechseltest gealterten Serie 3x4 HK



Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 HK-Alt-Klima_01	AF (14%), CF (2%), SCF (84%)
3x4 HK-Alt-Klima_02	AF (7%), CF (2%), SCF (91%)
3x4 HK-Alt-Klima_03	AF (5%), CF (2%), SCF (93%)
3x4 HK-Alt-Klima_04	AF (4%), CF (1%), SCF (95%)
3x4 HK-Alt-Klima_05	AF (6%), CF (1%), SCF (93%)
3x4 HK-Alt-Klima_06	AF (8%), CF (2%), SCF (90%)

Anhang 117: Bruchbilder der statischen im Klimawechseltest gealterten Serie 4x6 HK

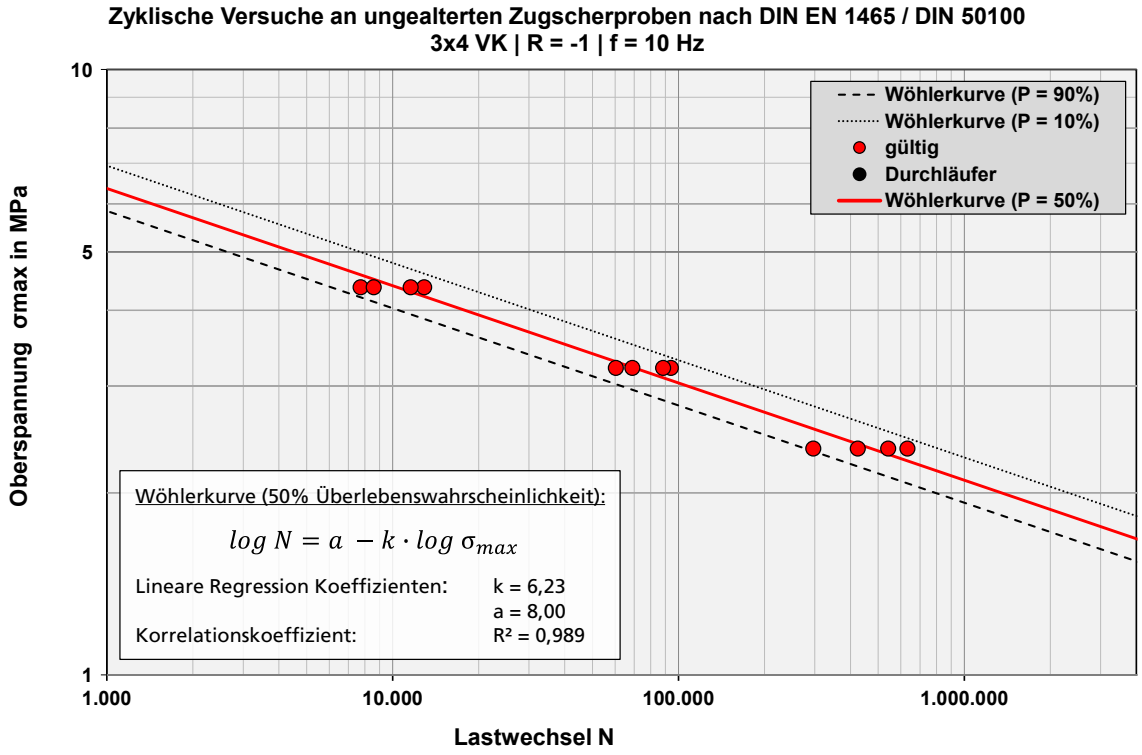


Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 HK-Alt-Klima_01	AF (1%), CF (1%), SCF (98%)
4x6 HK-Alt-Klima_02	AF (33%), CF (3%), SCF (64%)
4x6 HK-Alt-Klima_03	AF (40%), CF (3%), SCF (57%)
4x6 HK-Alt-Klima_04	AF (36%), CF (6%), SCF (58%)
4x6 HK-Alt-Klima_05	AF (50%), CF (3%), SCF (47%)
4x6 HK-Alt-Klima_06	AF (36%), CF (3%), SCF (61%)

Anhang 118: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Referenzserie

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Referenz-zyklisch_01	48,96	49,91
Referenz-zyklisch_02	49,22	49,83
Referenz-zyklisch_03	49,77	49,78
Referenz-zyklisch_04	49,78	49,88
Referenz-zyklisch_05	50,14	49,79
Referenz-zyklisch_06	50,10	49,69
Referenz-zyklisch_07	49,70	49,94
Referenz-zyklisch_08	49,54	49,89
Referenz-zyklisch_09	50,25	49,93
Referenz-zyklisch_10	50,15	49,96
Referenz-zyklisch_11	49,61	50,02
Referenz-zyklisch_12	50,44	49,97

Anhang 119: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie 3x4 VK



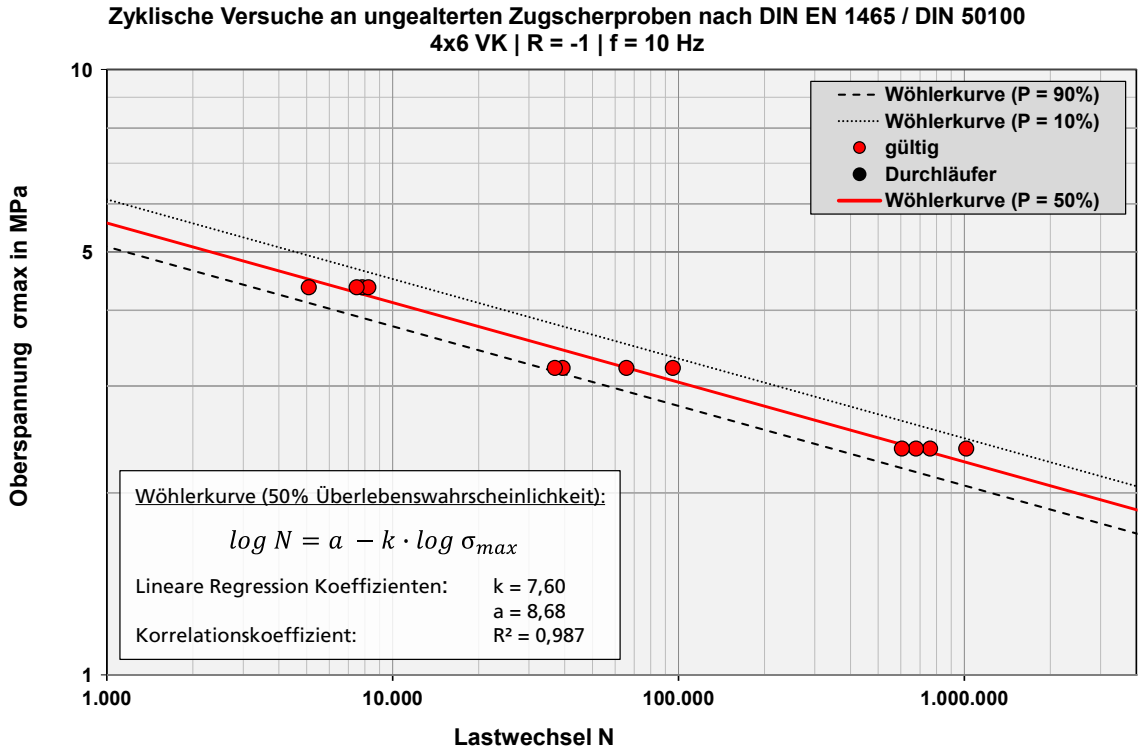
Anhang 120: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie 3x4 VK

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	474.035
	Standardabweichung in LW	146.213
	Variationskoeffizient	0,31
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	78.019
	Standardabweichung in LW	15.880
	Variationskoeffizient	0,20
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	10.193
	Standardabweichung in LW	2.436
	Variationskoeffizient	0,24

Anhang 121: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie 3x4 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 VK-zyklisch_01	49,71	50,10
3x4 VK-zyklisch_02	49,29	49,94
3x4 VK-zyklisch_03	49,55	49,88
3x4 VK-zyklisch_04	49,44	49,95
3x4 VK-zyklisch_05	49,53	49,94
3x4 VK-zyklisch_06	49,93	50,02
3x4 VK-zyklisch_07	48,93	50,00
3x4 VK-zyklisch_08	49,45	49,83
3x4 VK-zyklisch_09	49,47	49,83
3x4 VK-zyklisch_10	49,75	50,03
3x4 VK-zyklisch_11	49,51	49,93
3x4 VK-zyklisch_12	49,94	49,92

Anhang 122: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie 4x6 VK



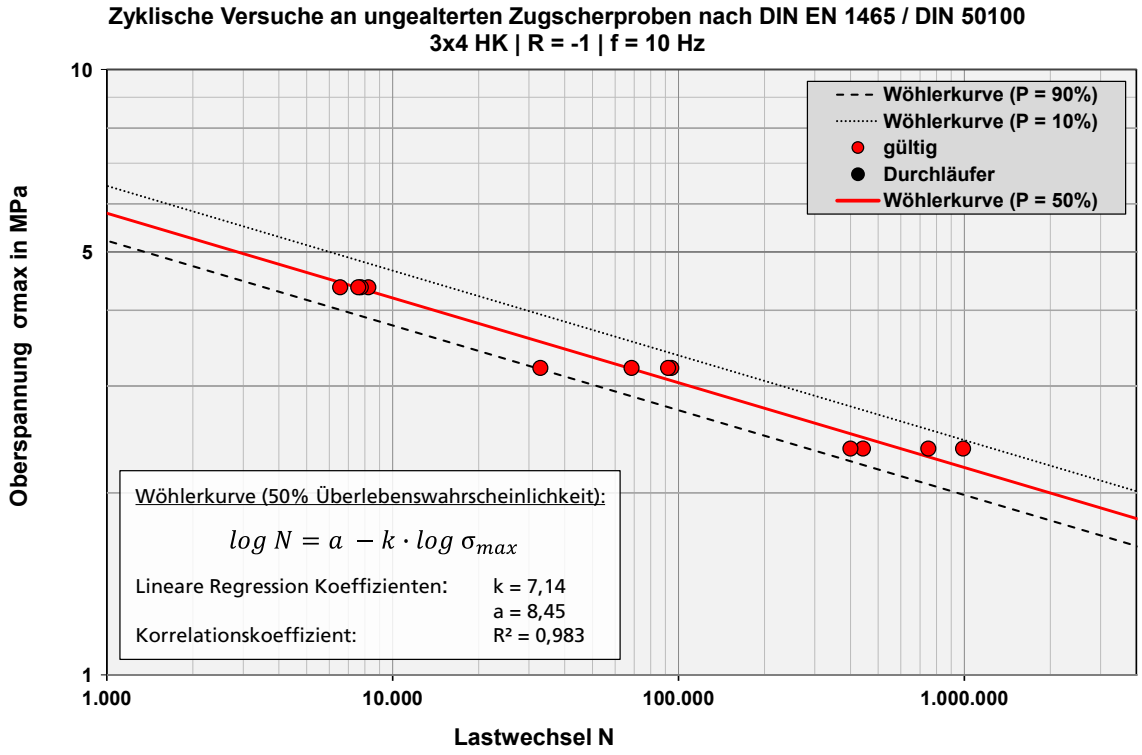
Anhang 123: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie 4x6 VK

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	765.023
	Standardabweichung in LW	178.961
	Variationskoeffizient	0,23
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	59.446
	Standardabweichung in LW	27.413
	Variationskoeffizient	0,46
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	7.160
	Standardabweichung in LW	1.414
	Variationskoeffizient	0,20

Anhang 124: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie 4x6 VK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 VK-zyklisch_01	49,25	49,87
4x6 VK-zyklisch_02	49,49	49,83
4x6 VK-zyklisch_03	49,49	50,04
4x6 VK-zyklisch_04	49,54	49,86
4x6 VK-zyklisch_05	49,74	49,85
4x6 VK-zyklisch_06	49,74	49,81
4x6 VK-zyklisch_07	49,27	50,15
4x6 VK-zyklisch_08	49,08	50,20
4x6 VK-zyklisch_09	49,03	50,06
4x6 VK-zyklisch_10	49,20	49,87
4x6 VK-zyklisch_11	49,76	50,03
4x6 VK-zyklisch_12	49,40	50,23

Anhang 125: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie 3x4 HK



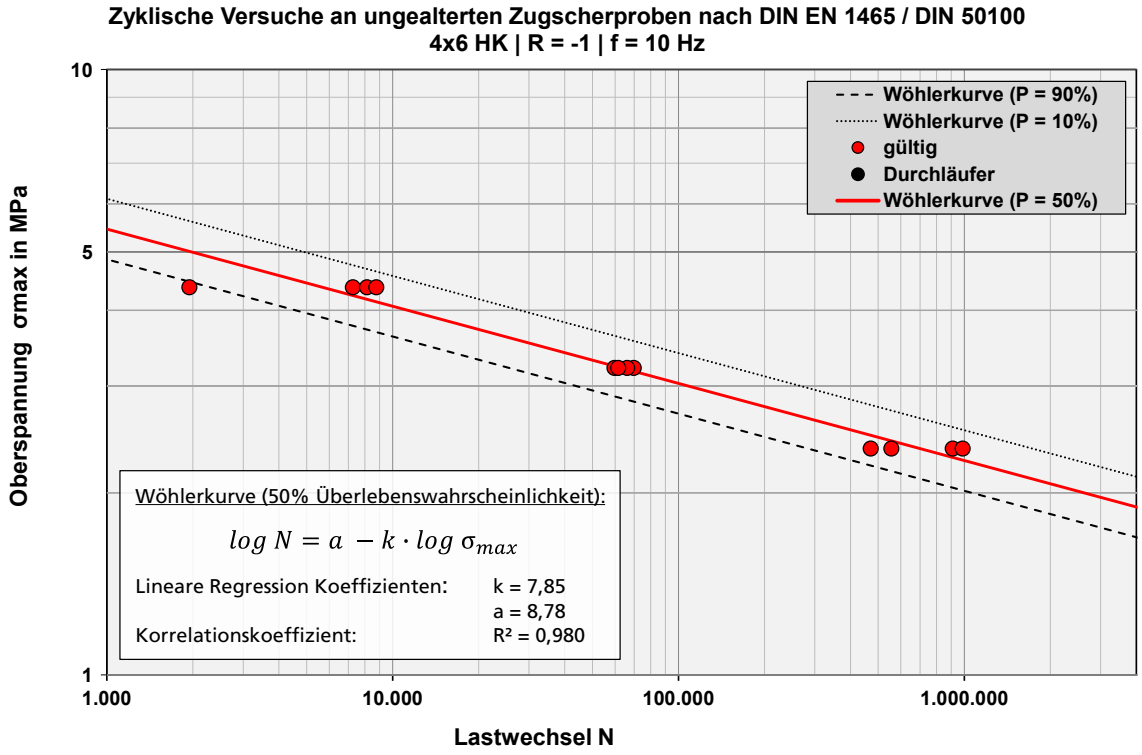
Anhang 126: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie 3x4 HK

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	645.594
	Standardabweichung in LW	277.801
	Variationskoeffizient	0,43
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	72.023
	Standardabweichung in LW	28.574
	Variationskoeffizient	0,40
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	7.525
	Standardabweichung in LW	704
	Variationskoeffizient	0,09

Anhang 127: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie 3x4 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
3x4 HK-zyklisch_01	50,11	49,91
3x4 HK-zyklisch_02	49,58	50,22
3x4 HK-zyklisch_03	49,83	50,05
3x4 HK-zyklisch_04	50,12	50,02
3x4 HK-zyklisch_05	49,54	49,88
3x4 HK-zyklisch_06	50,22	49,89
3x4 HK-zyklisch_07	49,63	50,06
3x4 HK-zyklisch_08	49,23	50,01
3x4 HK-zyklisch_09	50,13	49,96
3x4 HK-zyklisch_10	49,71	50,04
3x4 HK-zyklisch_11	50,03	50,02
3x4 HK-zyklisch_12	49,89	50,10

Anhang 128: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie 4x6 HK



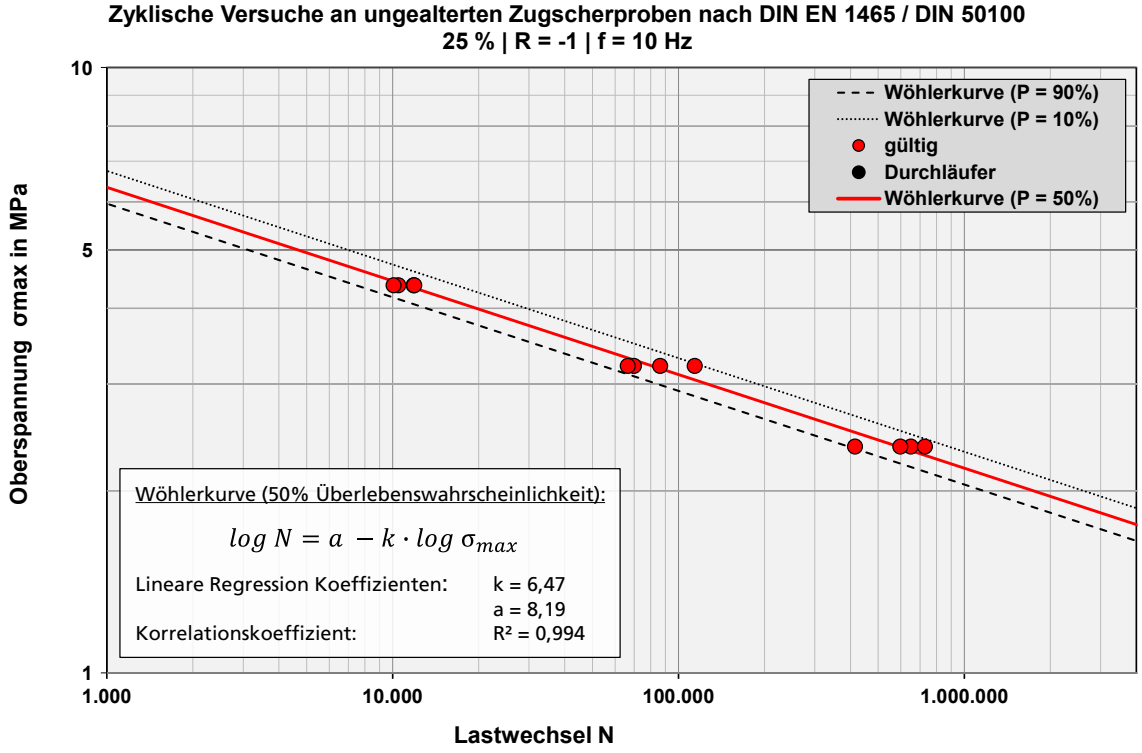
Anhang 129: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie 4x6 HK

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	731.536
	Standardabweichung in LW	255.825
	Variationskoeffizient	0,35
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	64.356
	Standardabweichung in LW	4.536
	Variationskoeffizient	0,07
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	6.527
	Standardabweichung in LW	3.117
	Variationskoeffizient	0,48

Anhang 130: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie 4x6 HK

Probe	Länge in mm	Breite in mm
4x6 HK-zyklisch_01	49,49	49,94
4x6 HK-zyklisch_02	49,54	49,97
4x6 HK-zyklisch_03	50,10	49,89
4x6 HK-zyklisch_04	49,19	49,97
4x6 HK-zyklisch_05	49,69	49,96
4x6 HK-zyklisch_06	50,49	50,14
4x6 HK-zyklisch_07	49,38	49,93
4x6 HK-zyklisch_08	49,64	49,98
4x6 HK-zyklisch_09	49,25	50,03
4x6 HK-zyklisch_10	49,36	49,99
4x6 HK-zyklisch_11	49,72	49,97
4x6 HK-zyklisch_12	49,53	50,01

Anhang 131: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie 25 %



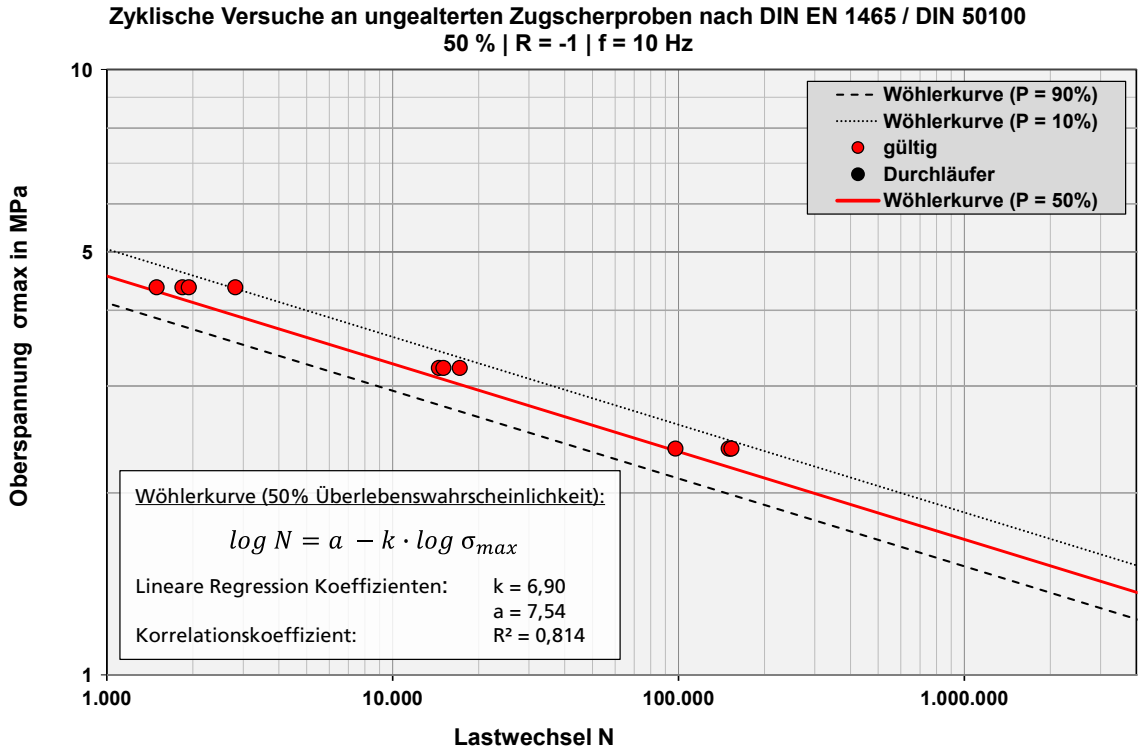
Anhang 132: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie 25 %

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	597.981
	Standardabweichung in LW	133.573
	Variationskoeffizient	0,22
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	84.236
	Standardabweichung in LW	21.697
	Variationskoeffizient	0,26
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	11.079
	Standardabweichung in LW	943
	Variationskoeffizient	0,09

Anhang 133: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie 25 %

Probe	Länge in mm	Breite in mm
25 %-zyklisch_01	48,95	50,00
25 %-zyklisch_02	48,78	50,08
25 %-zyklisch_03	49,15	50,00
25 %-zyklisch_04	49,37	49,94
25 %-zyklisch_05	49,63	49,99
25 %-zyklisch_06	50,21	50,00
25 %-zyklisch_07	49,25	50,05
25 %-zyklisch_08	49,25	50,02
25 %-zyklisch_09	49,64	50,14
25 %-zyklisch_10	49,67	50,10
25 %-zyklisch_11	49,62	49,97
25 %-zyklisch_12	49,82	50,06

Anhang 134: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie 50 %



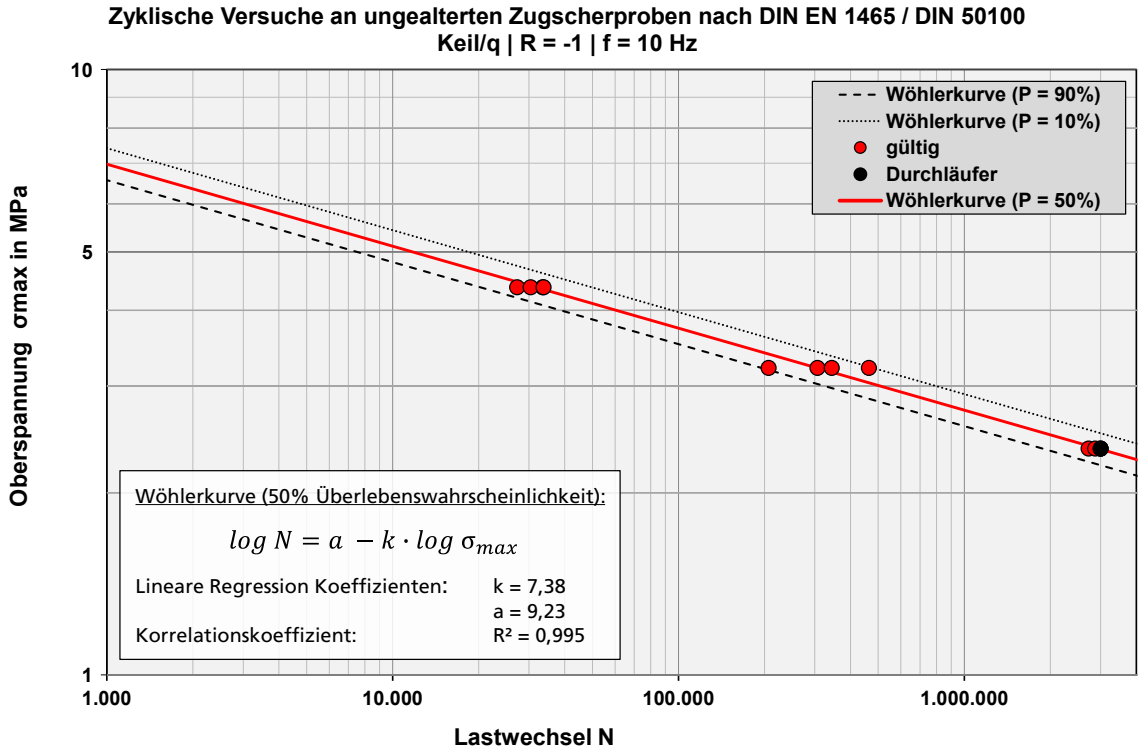
Anhang 135: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie 50 %

Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	138.297
	Standardabweichung in LW	27.159
	Variationskoeffizient	0,20
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	11.738
	Standardabweichung in LW	7.780
	Variationskoeffizient	0,66
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	2.022
	Standardabweichung in LW	563
	Variationskoeffizient	0,28

Anhang 136: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie 50 %

Probe	Länge in mm	Breite in mm
50 %-zyklisch_01	49,66	50,30
50 %-zyklisch_02	49,16	50,18
50 %-zyklisch_03	49,34	50,16
50 %-zyklisch_04	49,15	50,11
50 %-zyklisch_05	49,86	50,26
50 %-zyklisch_06	49,70	50,40
50 %-zyklisch_07	49,93	50,00
50 %-zyklisch_08	49,77	49,94
50 %-zyklisch_09	49,77	49,80
50 %-zyklisch_10	49,95	49,90
50 %-zyklisch_11	49,81	49,92
50 %-zyklisch_12	50,21	50,03

Anhang 137: Wöhlerkurve der ungealterten zyklisch geprüften Serie Keil/q



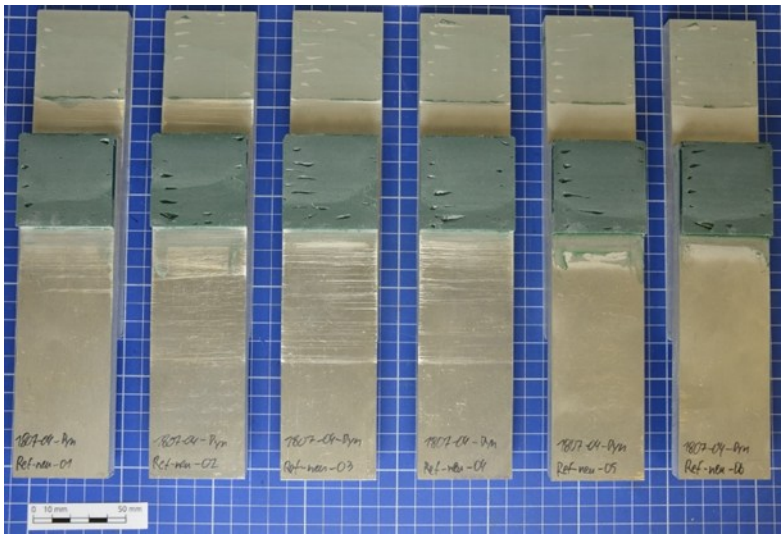
Anhang 138: Ergebnisse der ungealterten zyklisch geprüften Serie Keil/q

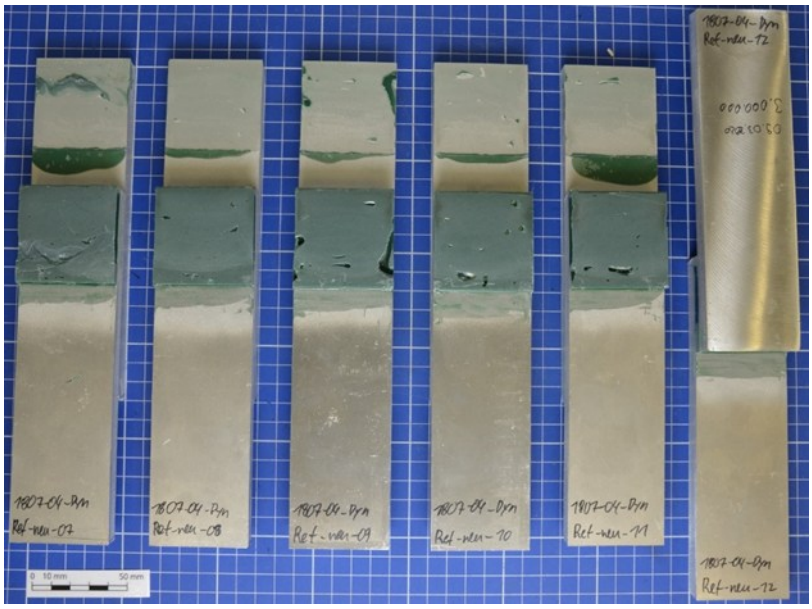
Referenz-zyklisch		
Lasthorizont 2,36 MPa	Mittelwert in LW	2.968.233
	Standardabweichung in LW	63.535
	Variationskoeffizient	0,02
Lasthorizont 3,21 MPa	Mittelwert in LW	330.392
	Standardabweichung in LW	106.198
	Variationskoeffizient	0,32
Lasthorizont 4,37 MPa	Mittelwert in LW	31.243
	Standardabweichung in LW	3.035
	Variationskoeffizient	0,10

Anhang 139: Probenabmessungen der ungealterten zyklisch geprüften Serie Keil/q

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Keil/q-zyklisch_01	50,15	49,80
Keil/q-zyklisch_02	49,87	49,87
Keil/q-zyklisch_03	50,18	49,91
Keil/q-zyklisch_04	50,06	49,85
Keil/q-zyklisch_05	49,97	49,93
Keil/q-zyklisch_06	49,72	49,95
Keil/q-zyklisch_07	49,72	49,95
Keil/q-zyklisch_08	50,00	49,93
Keil/q-zyklisch_09	49,95	49,89
Keil/qzyklisch_10	49,84	49,94
Keil/q-zyklisch_11	50,15	49,85
Keil/q-zyklisch_12	49,96	50,07

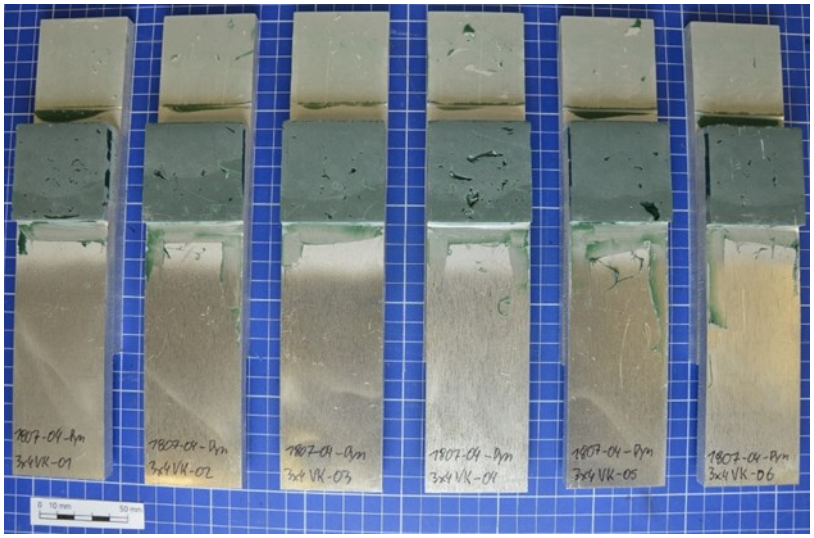
Anhang 140: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Referenzserie

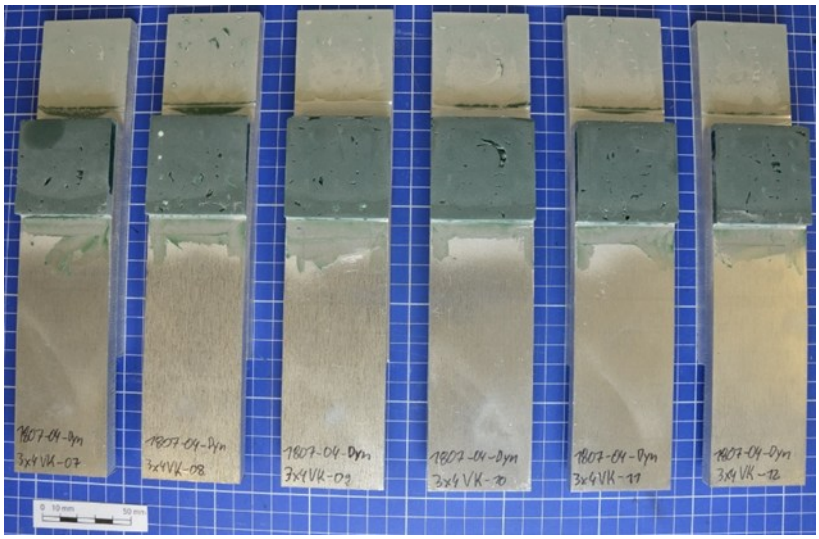




Probenbezeichnung	Bruchbild
Referenz-zyklisch_01	AF (2%), CF (3%), SCF (95%)
Referenz-zyklisch_02	AF (5%), CF (1%), SCF (94%)
Referenz-zyklisch_03	AF (4%), CF (0,5%), SCF (95,5%)
Referenz-zyklisch_04	AF (4%), CF (2%), SCF (94%)
Referenz-zyklisch_05	AF (4%), CF (1%), SCF (95%)
Referenz-zyklisch_06	AF (5%), CF (1%), SCF (94%)
Referenz-zyklisch_07	AF (1%), CF (13%), SCF (86%)
Referenz-zyklisch_08	AF (1%), CF (1%), SCF (98%)
Referenz-zyklisch_09	AF (1%), CF (9%), SCF (90%)
Referenz-zyklisch_10	AF (3%), CF (2%), SCF (95%)
Referenz-zyklisch_11	AF (2%), CF (2%), SCF (96%)
Referenz-zyklisch_12	Durchläufer

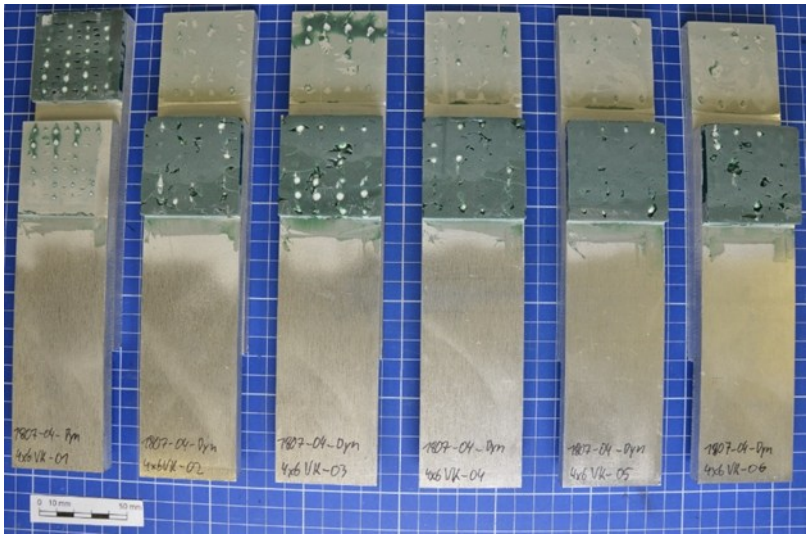
Anhang 141: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie 3x4 VK

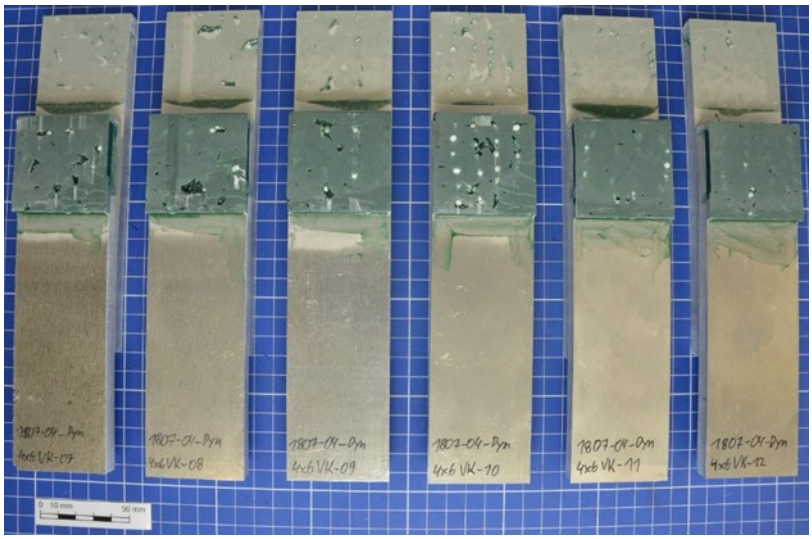




Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 VK-zyklisch_01	AF (2%), CF (1%), SCF (97%)
3x4 VK-zyklisch_02	AF (6%), CF (5%), SCF (89%)
3x4 VK-zyklisch_03	AF (3%), CF (2%), SCF (95%)
3x4 VK-zyklisch_04	AF (2%), CF (6%), SCF (92%)
3x4 VK-zyklisch_05	AF (3%), CF (4%), SCF (93%)
3x4 VK-zyklisch_06	AF (0,5%), CF (2%), SCF (97,5%)
3x4 VK-zyklisch_07	AF (2%), CF (1%), SCF (97%)
3x4 VK-zyklisch_08	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)
3x4 VK-zyklisch_09	AF (3%), CF (0,5%), SCF (96,5%)
3x4 VK-zyklisch_10	AF (3,5%), CF (3%), SCF (93,5%)
3x4 VK-zyklisch_11	AF (2%), CF (1%), SCF (97%)
3x4 VK-zyklisch_12	AF (3%), CF (0,5%), SCF (96,5%)

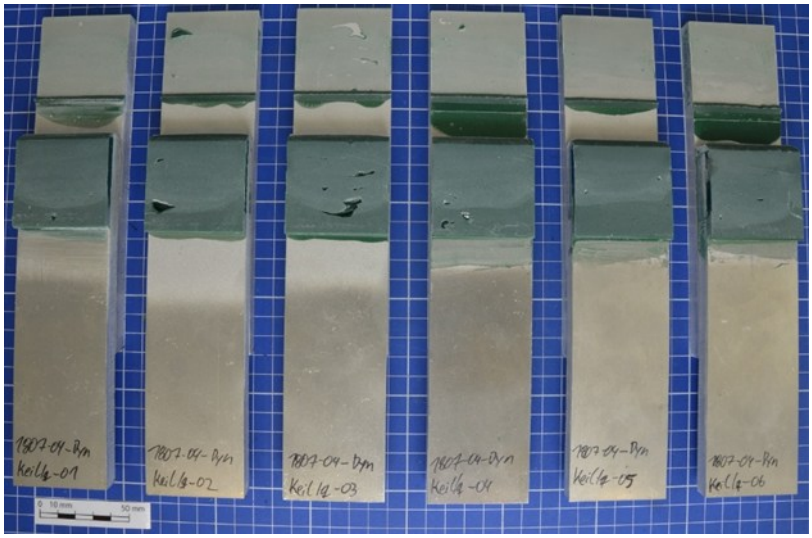
Anhang 142: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie 4x6 VK

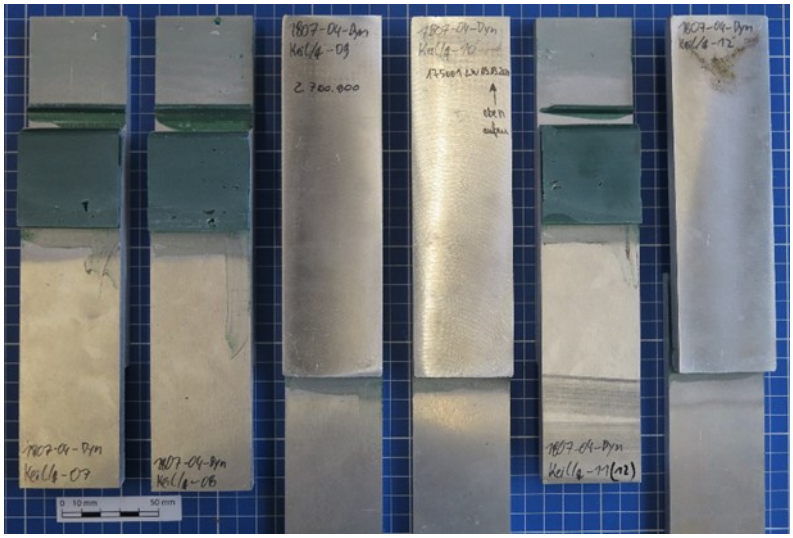




Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 VK-zyklisch_01	AF (4%), CF (14%), SCF (82%)
4x6 VK-zyklisch_02	AF (11%), CF (3%), SCF (86%)
4x6 VK-zyklisch_03	AF (9%), CF (20%), SCF (71%)
4x6 VK-zyklisch_04	AF (8%), CF (2%), SCF (90%)
4x6 VK-zyklisch_05	AF (3%), CF (2%), SCF (95%)
4x6 VK-zyklisch_06	AF (7%), CF (3%), SCF (90%)
4x6 VK-zyklisch_07	AF (4%), CF (3%), SCF (93%)
4x6 VK-zyklisch_08	AF (9%), CF (2%), SCF (89%)
4x6 VK-zyklisch_09	AF (3%), CF (3%), SCF (91%)
4x6 VK-zyklisch_10	AF (5%), CF (2%), SCF (93%)
4x6 VK-zyklisch_11	AF (2%), CF (4%), SCF (94%)
4x6 VK-zyklisch_12	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)

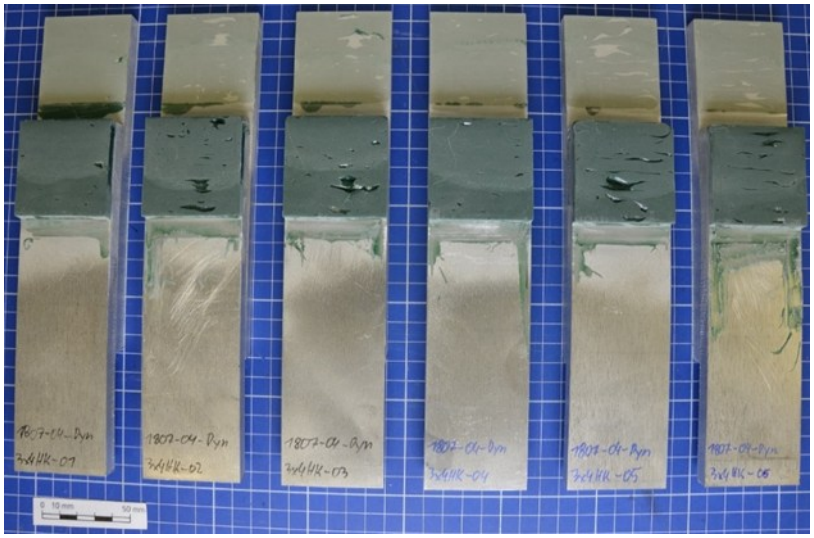
Anhang 143: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie Keil/q

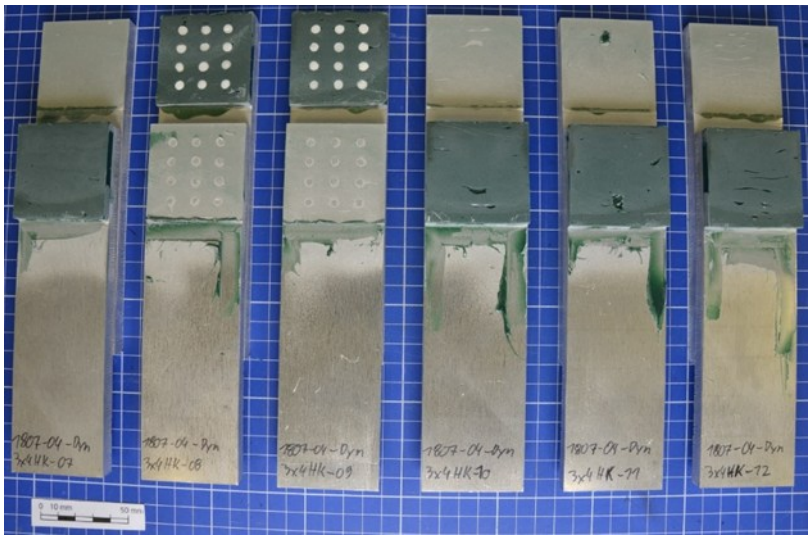




Probenbezeichnung	Bruchbild
Keil/q-zyklisch_01	AF (0,2%), CF (10%), SCF (87,8%)
Keil/q-zyklisch_02	AF (0,1%), CF (13%), SCF (86,9%)
Keil/q-zyklisch_03	AF (5%), CF (6%), SCF (89%)
Keil/q-zyklisch_04	AF (1%), CF (6%), SCF (93%)
Keil/q-zyklisch_05	CF (9%), SCF (91%)
Keil/q-zyklisch_06	AF (0,1%), CF (20%), SCF (79,9%)
Keil/q-zyklisch_07	AF (2%), CF (10%), SCF (88%)
Keil/q-zyklisch_08	AF (2%), CF (12%), SCF (86%)
Keil/q-zyklisch_09	Durchläufer
Keil/q-zyklisch_10	Durchläufer
Keil/q-zyklisch_11	AF (0,5%), CF (9%), SCF (90,5%)
Keil/q-zyklisch_12	Durchläufer

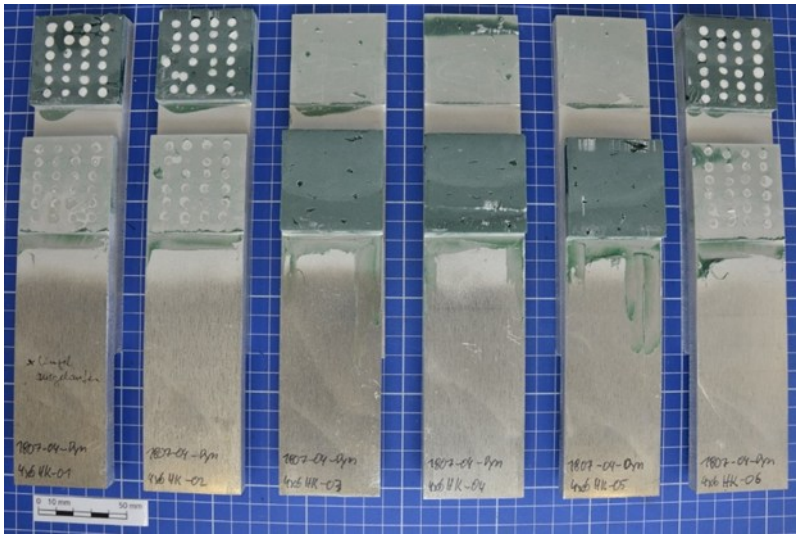
Anhang 144: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie 3x4 HK

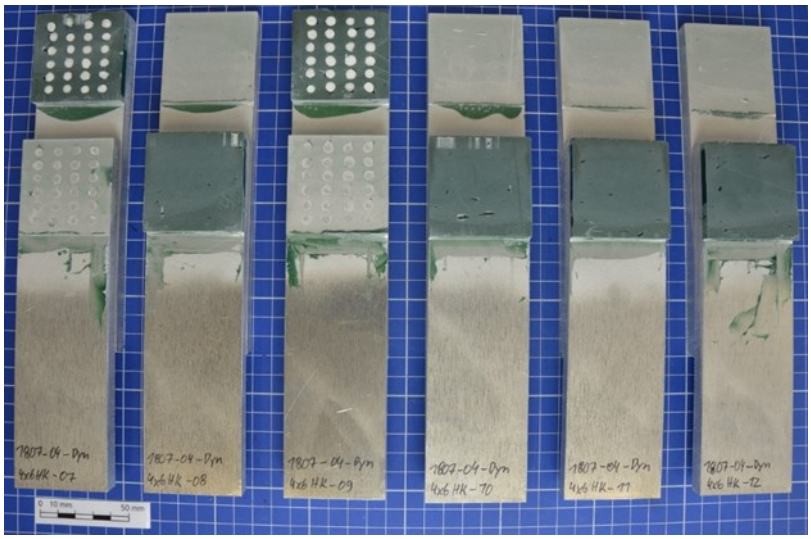




Probenbezeichnung	Bruchbild
3x4 HK-zyklisch_01	AF (1%), CF (4%), SCF (95%)
3x4 HK-zyklisch_02	AF (10 %), CF (2%), SCF (88%)
3x4 HK-zyklisch_03	AF (8%), CF (4%), SCF (88%)
3x4 HK-zyklisch_04	AF (3%), CF (3%), SCF (94%)
3x4 HK-zyklisch_05	AF (12%), CF (4%), SCF (95%)
3x4 HK-zyklisch_06	AF (8%), CF (0,5%), SCF (91,5%)
3x4 HK-zyklisch_07	AF (0,5%), CF (5%), SCF (94,5%)
3x4 HK-zyklisch_08	AF (14%), CF (8%), SCF (78%)
3x4 HK-zyklisch_09	AF (14%), CF (4%), SCF (82%)
3x4 HK-zyklisch_10	AF (3%), CF (2%), SCF (95%)
3x4 HK-zyklisch_11	AF (2%), CF (6%), SCF (92%)
3x4 HK-zyklisch_12	AF (4%), CF (4%), SCF (92%)

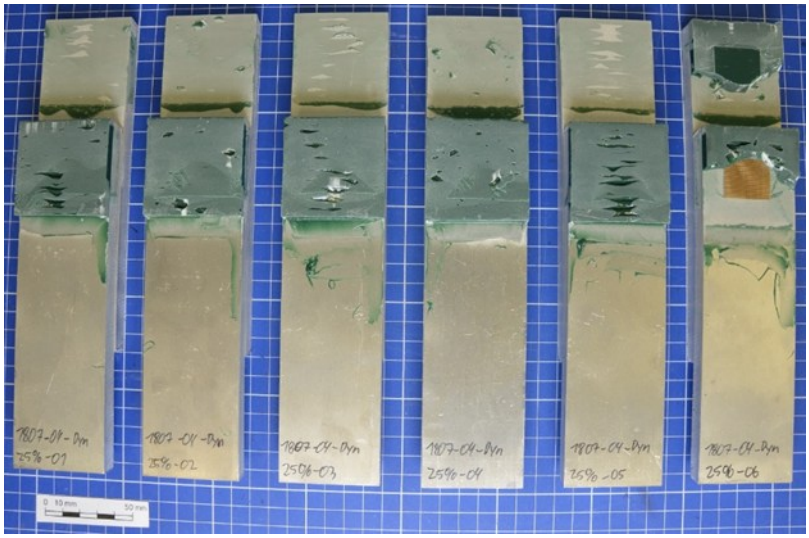
Anhang 145: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie 4x6 HK

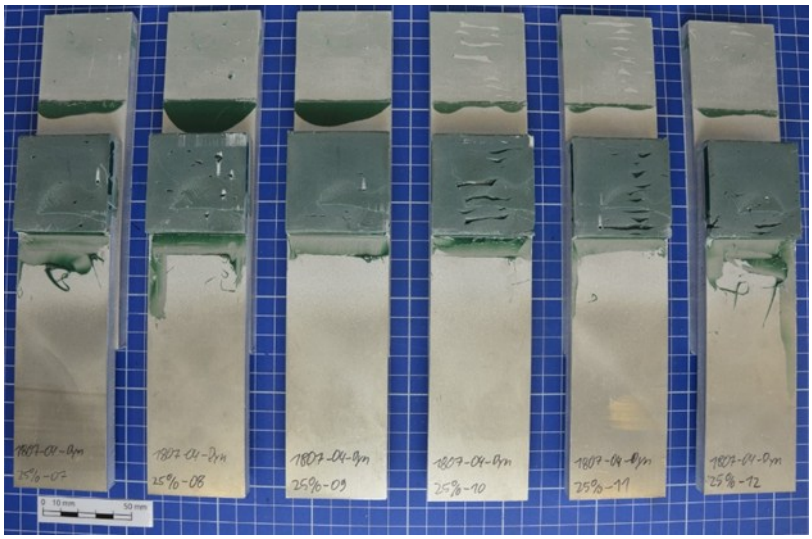




Probenbezeichnung	Bruchbild
4x6 HK-zyklisch_01	AF (25%), CF (1%), SCF (74%)
4x6 HK-zyklisch_02	AF (24%), CF (2%), SCF (74%)
4x6 HK-zyklisch_03	AF (1%), CF (2%), SCF (97%)
4x6 HK-zyklisch_04	AF (1%), CF (19%), SCF (80%)
4x6 HK-zyklisch_05	AF (3%), CF (1%), SCF (96%)
4x6 HK-zyklisch_06	AF (24%), CF (6%), SCF (70%)
4x6 HK-zyklisch_07	AF (24%), CF (3%), SCF (73%)
4x6 HK-zyklisch_08	AF (0,2%), CF (1%), SCF (98,8%)
4x6 HK-zyklisch_09	AF (24%), CF (2%), SCF (74%)
4x6 HK-zyklisch_10	AF (1%), CF (1%), SCF (98%)
4x6 HK-zyklisch_11	AF (0,5%), CF (1,5%), SCF (98%)
4x6 HK-zyklisch_12	AF (1%), CF (2%), SCF (97%)

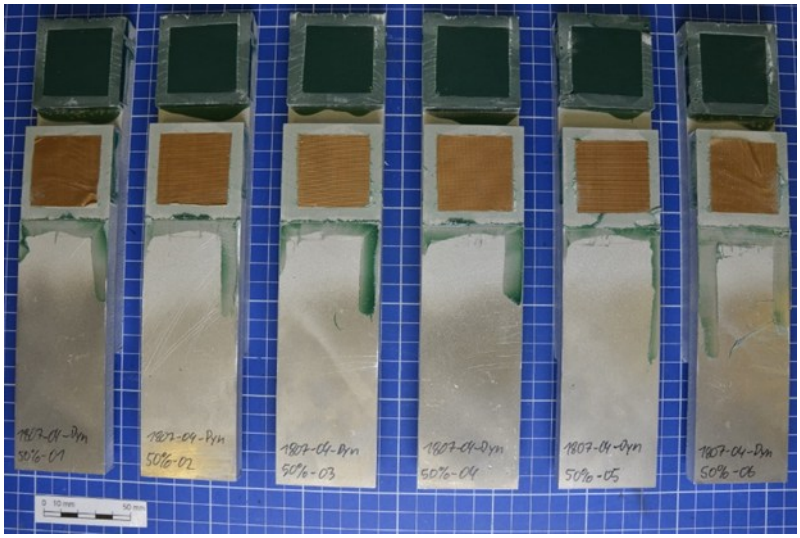
Anhang 146: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie 25 %

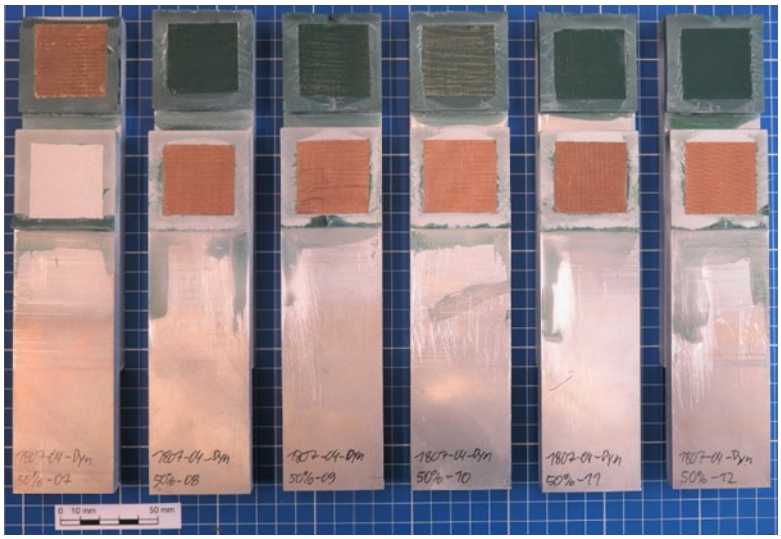




Probenbezeichnung	Bruchbild
25 %-zyklisch_01	AF (10%), CF (6%), SCF (84%)
25 %-zyklisch_02	AF (4%), CF (5%), SCF (91%)
25 %-zyklisch_03	AF (12%), CF (6%), SCF (82%)
25 %-zyklisch_04	AF (1%), CF (4%), SCF (95%)
25 %-zyklisch_05	AF (14%), CF (1%), SCF (85%)
25 %-zyklisch_06	AF (2%), CF (52%), SCF (46%)
25 %-zyklisch_07	AF (0,5%), CF (1%), SCF (98,5%)
25 %-zyklisch_08	AF (0,5%), CF (2%), SCF (97,5%)
25 %-zyklisch_09	AF (0,5%), CF (1%), SCF (98,5%)
25 %-zyklisch_10	AF (9%), CF (2%), SCF (89%)
25 %-zyklisch_11	AF (10%), CF (3%), SCF (87%)
25 %-zyklisch_12	AF (4%), CF (1%), SCF (95%)

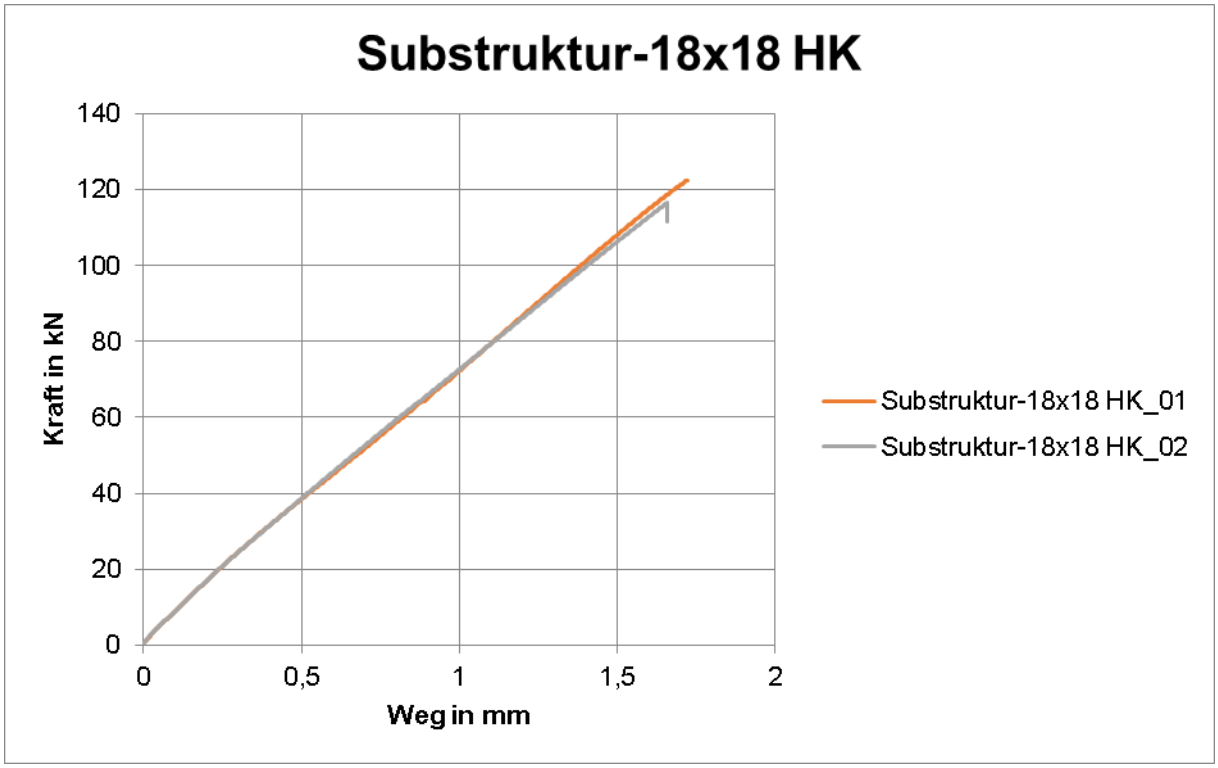
Anhang 147: Bruchbilder der zyklischen ungealterten Serie 50 %





Probenbezeichnung	Bruchbild
50 %-zyklisch_01	AF (51%), CF (4%), SCF (45%)
50 %-zyklisch_02	AF (50%), CF (5%), SCF (45%)
50 %-zyklisch_03	AF (54%), CF (3%), SCF (43%)
50 %-zyklisch_04	AF (55%), CF (4%), SCF (41%)
50 %-zyklisch_05	AF (62%), CF (5%), SCF (33%)
50 %-zyklisch_06	AF (59%), CF (5%), SCF (36%)
50 %-zyklisch_07	AF (50%), CF (14%), SCF (36%)
50 %-zyklisch_08	AF (51%), CF (3%), SCF (46%)
50 %-zyklisch_09	AF (49%), CF (13%), SCF (38%)
50 %-zyklisch_10	AF (50%), CF (9%), SCF (41%)
50 %-zyklisch_11	AF (49%), CF (8%), SCF (43%)
50 %-zyklisch_12	AF (50%), CF (9%), SCF (41%)

Anhang 148: Kraft-Weg-Diagramm der fehlerbehafteten Zugscherproben (18x18 HK) auf Substrukturebene



Anhang 149: Ergebnisse der Serie 18x18 HK auf Substrukturebene

18x18 HK	Maximalkraft in N	Zugscherfestigkeit in MPa
Mittelwert	119555	5,3
Standardabweichung	4183	0,2
Variationskoeffizient	0,03	0,04

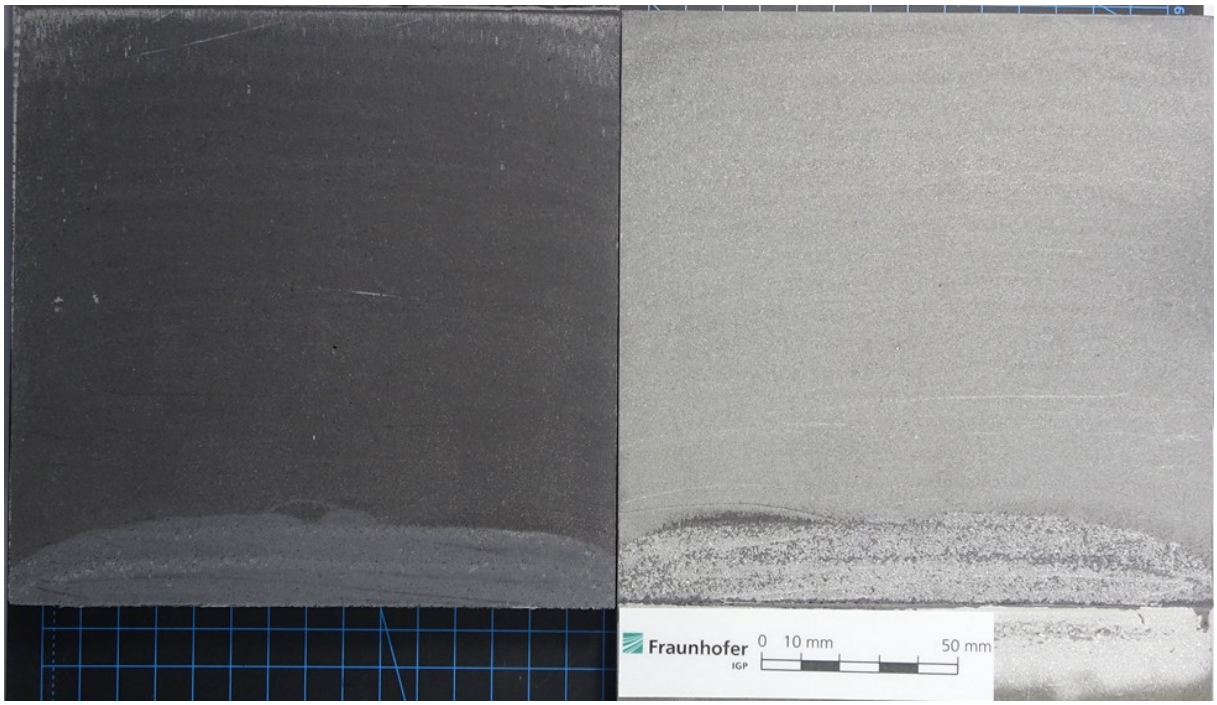
Anhang 150: Probenabmessungen der ungealterten statisch geprüften Referenzserie auf Substrukturebene

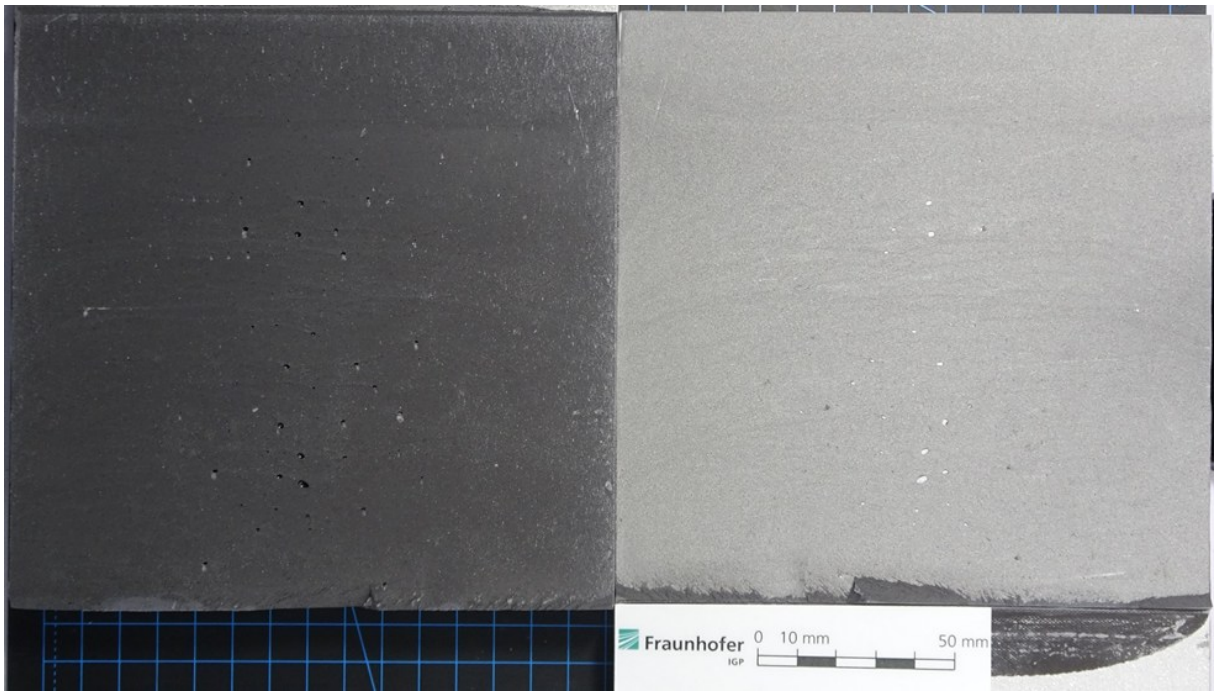
Probe	Länge in mm	Breite in mm
Substruktur-Referenz_01	149,7	151,3
Substruktur-Referenz_02	149,6	150,5

Anhang 151: Probenabmessungen der ungealterten statisch geprüften Serie 18x18 HK auf Substruktur-ebene

Probe	Länge in mm	Breite in mm
Substruktur-18x18 HK_01	149,5	151,7
Substruktur-18x18 HK_02	150,1	151,8

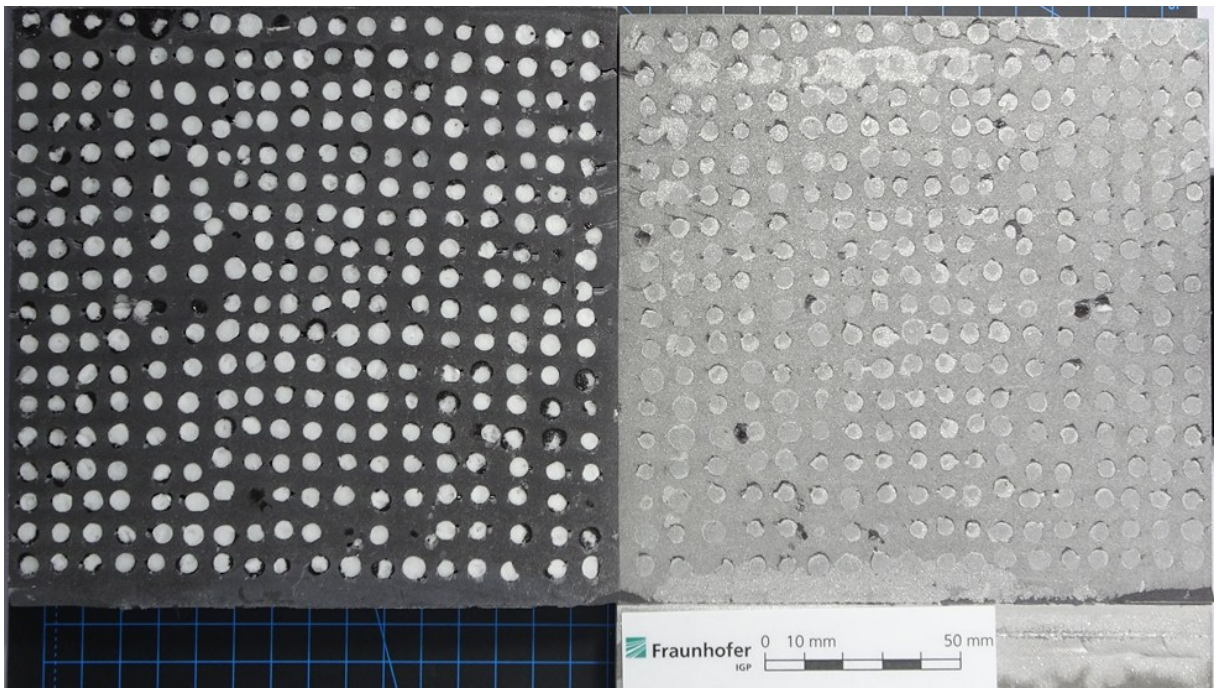
Anhang 152: Bruchbilder der statischen ungealterten Referenzserie auf Substrukturebene

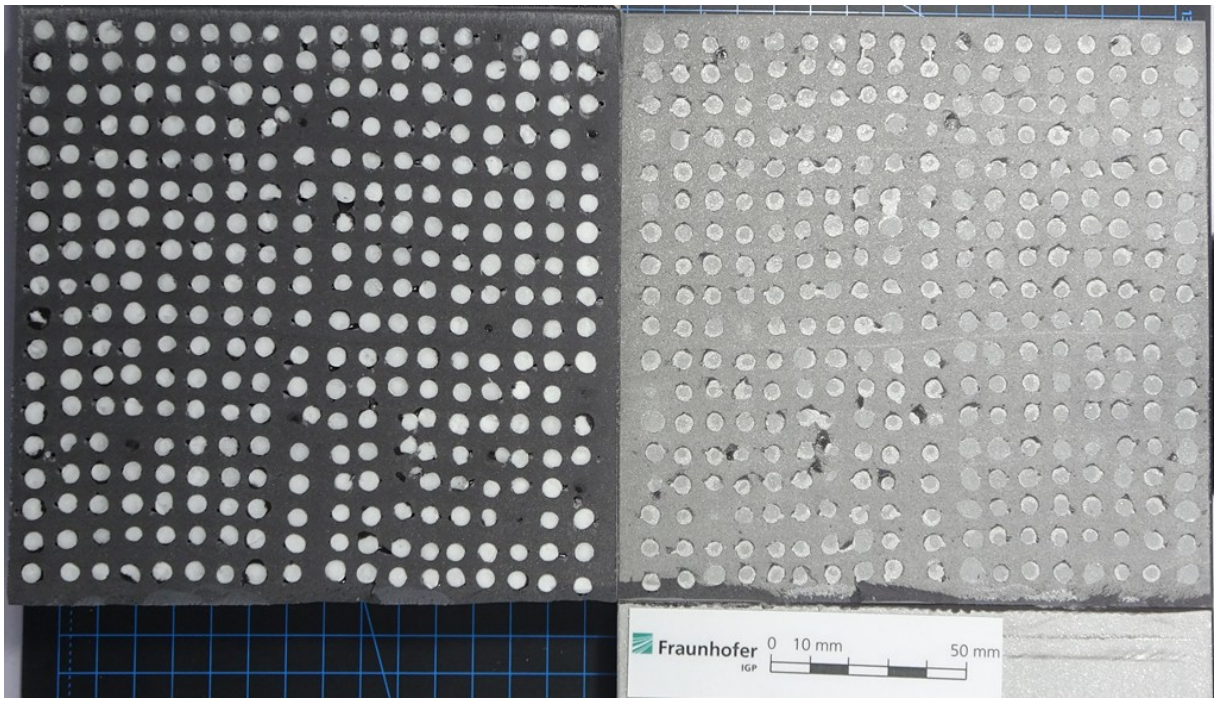




Probenbezeichnung	**Bruchbild**
Substruktur-Referenz_01	CF (1%), SCF (99%)
Substruktur-Referenz_02	AF (1%), CF (3%), SCF (96%)

Anhang 153: Bruchbilder der statischen ungealterten Serie 18x18 HK auf Substrukturebene





Probenbezeichnung	**Bruchbild**
Substruktur-18x18 HK_01	AF (2%), CF (1,5%), SCF (96,5%)
Substruktur-18x18 HK_02	CF (3%), SCF (97%)

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere eidesstattlich durch eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die beigefügte Dissertation nur in diesem und keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht wurde und dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.

Rostock, den 14.08.2025 _____

(Christopher Wald)