



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Diplomarbeit

Klebverbindungen - Simulation und Experiment

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder MSc),
eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften,
von

Sebastian TRUMMER

Mat.Nr.: 1125062
Moselgasse 6/1/11
1100 Wien, Österreich

unter der Leitung von
Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Melanie Todt
Institut für Leichtbau and Struktur-Biomechanik, E317
Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Koch
Institut für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie, E308
Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heinz Pettermann
Institut für Leichtbau and Struktur-Biomechanik, E317

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung
Diplomarbeit
nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in der Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Dieses Diplomarbeitsthema wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem Beurteiler/einer Beurteilerin zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter/Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

Wien, am 14. Februar 2020

Unterschrift

Danksagung

Nach Absolvierung der Laborübung Leichtbau, in der ein möglichst leichter Träger aus Aluminium konstruiert, gefertigt, geklebt und geprüft wurde, wollte ich mich mehr mit dem Thema Klebverbindungen befassen. Zuerst begann ich mit einer Projektarbeit woraus sich im Anschluss durch Zustimmung von Dr. Heinz Pettermann diese Diplomarbeit ergab. Vielen Dank für diese Möglichkeit und die Unterstützung in der Anfangsphase.

Ebenso möchte ich an dieser Stelle Dr. Melanie Todt und Dr. Thomas Koch für die ausgezeichnete Weiterbetreuung, den vielen wertvollen Hinweisen und ihre oftmals spontane Verfügbarkeit danken. Ebenfalls bei Rainer Thomas von der Mück Kunststofftechnik GmbH für die Bereitstellung und den Zuschnitt der UD GFK-Platten und Robert Exler aus der Leichtbau-Werkstatt, der insbesondere bei der Fertigung der TAST-Proben half.

Besonderer Dank gilt meiner ganzen Familie und Freunden für die viele Motivation und Geduld.

Kurzfassung

Der Einsatz von Klebstoffen in moderner Technik schreitet rasch voran und die Anwendungsbereiche nehmen stetig zu. Dabei können Klebverbindungen heutzutage klassische Verbindungstechniken ablösen, wenn diese beanspruchungsgerecht gestaltet und berechnet werden.

Die Herausforderung liegt neben dem Beherrschen dieser Füge-technologie noch in der genauen Bestimmung der Berechnungseingabewerte durch Laborversuche. Es wird aufgezeigt wie geeignete Modellierungstechniken für den Einsatz von Finite Elemente Methoden aussehen und anschließend wurden passende Tests ausgewählt um alle dafür nötigen Eingabedaten messtechnisch zu erfassen. Vorzugsweise wurden genormte Werkstofftests herangezogen, doch nicht immer sind die Probenabmessungen und Füge-teilwerkstoffe festgelegt. Einige Proben mussten daher durch Vorabsimulationen mithilfe von Literaturdaten dimensioniert werden.

Das Rohmaterial wurde zur Verfügung gestellt, mit denen dann die Proben eigenhändig gefertigt und anschließend im Labor getestet wurden.

Nach der Durchführung aller Tests wurden die Messdaten mit mehreren Verfahren ausgewertet und beurteilt. Abschließend wurde ein Vergleich zwischen den Messergebnissen und den Ergebnissen aus nachgestellten Finite Elemente Modellen angestellt.

Abstract

The use of adhesives in modern engineering progresses very rapidly and the number of applications rises more and more. Today it is possible, that adhesive joints are able to replace conventional joining technologies if they are well designed and calculated.

The main challenge besides mastering the adhesive bonding process is the precise determination of input data through tests for the use of finite element simulations. It will be shown how the models for such simulations were created and which material tests were necessary to measure all input data. Standardised tests were preferred, but not for all of them the dimensions and materials of the specimens are defined (in respective engineering codes). Therefore some specimen dimensions were set by precalculation with data from the literature.

The raw material was provided and all specimen were self manufactured and tested in the material-laboratory.

After performing all tests, the collected data got through multiple evaluations and were analysed. In the end the measured results were compared with numerical results from finite element simulations.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	9
1.1	Hintergrund	10
1.1.1	Begriffsdefinitionen	10
1.1.2	Mechanische Beanspruchung von Klebverbindungen	11
1.2	Zielsetzung	12
2	Modellierungsansätze	14
2.1	Problemklassifizierung der einfach überlappenden Klebverbindung . .	14
2.2	Modellbildung	15
2.2.1	Symmetrie oder 2D	15
2.2.2	Kohäsivzonenmodellierung	15
3	Werkstoffgrößen bestimmen	20
3.1	Klebstoff	20
3.1.1	Zugversuch	21
3.1.2	Thick adherend shear test (TAST)	24
3.1.3	End notched flexure (ENF)	27
3.1.4	Double cantilever beam (DCB)	46
3.2	Fügeteile	60
3.2.1	Dreipunkt-Biegeversuch	61
4	Analyse mit der Finite Elemente Methode	65
4.1	ENF-Test	66
4.2	DCB-Test	70
5	Nachuntersuchung der Klebschicht	74
6	Zusammenfassung	76
	Literaturverzeichnis	78
	Anhang	80

Abbildungsverzeichnis

1	Vergleich der Spannungsverteilung bei Zugkraftübertragung	10
2	Stoffschlüssiger Zusammenhalt einer Klebverbindung	11
3	Mechanische Beanspruchungsarten	12
4	Deformation einer einfach überlappenden Klebverbindung	15
5	Modellierung der Klebfuge	16
6	Bilineares Traction-Separation Law	16
7	Skizze der Prozesszone.	18
8	Mode Mix	19
9	Abmessungen der Zugprobenkörper	21
10	Gegossene Zugproben in Silikonform	22
11	Geprüfte Zugproben	22
12	Versuchsaufbau Zugversuch	22
13	Zugversuch Klebstoffprobe	23
14	Geometrie der TAST-Probe	25
15	Krafteinleitung TAST	25
16	TAST Probenfertigung	25
17	TAST-Probe	25
18	Versuchsanordnung TAST	26
19	TAST Ergebnisse	27
20	Bruchflächen TAST	28
21	Schema des ENF-Tests	29
22	Finite Elemente Modell zur Auslegung der ENF-Probe	30
23	ENF-Probe Aluminium-Fügeteile, Mises-Vergleichsspannung	31
24	ENF-Probe Stahl-Fügeteile, Mises-Vergleichsspannung	31
25	ENF-Probe UD GFK-Fügeteile, Mises-Vergleichsspannung	31
26	Deformation der ENF-Probe	32
27	Last-Verschiebungsdiagramm ENF-Testauslegung	33
28	ENF-Testauslegung Prozesszone	33
29	ENF Probenfertigung	35
30	Versuchsanordnung des ENF-Tests	36
31	Flächenmethode	36
32	Prinzip der Compliance calibration	38
33	ENF Klebschichtdickenmessung unter dem Mikroskop	39
34	Last-Verschiebungsdiagramme der 1. Charge ENF-Proben	42
35	Last-Verschiebungsdiagramme der 2. Charge ENF-Proben	43
36	Gegenlichtaufnahmen ENF	44
37	Compliance calibration method Auswertung	45
38	Vergleich der Auswerteergebnisse für \mathcal{G}_s^c	45
39	Schema des DCB-Tests	46
40	Finite Elemente Modell zur Auslegung der DCB-Probe	47
41	Deformation der DCB-Probe	47
42	DCB-Probe Aluminium-Fügeteile, Mises-Vergleichsspannung	48
43	DCB-Probe Stahl-Fügeteile, Mises-Vergleichsspannung	48
44	DCB-Probe UD GFK-Fügeteile, Mises-Vergleichsspannung	48
45	Last-Verschiebungsdiagramm DCB-Testauslegung	49
46	DCB-Testauslegung Prozesszone	50

47	DCB-Probenfertigung	50
48	Scharniere ankleben	51
49	Versuchsanordnung des DCB-Tests	51
50	Flächenmethode beim DCB-Test	52
51	Ermittlung des Korrekturwertes χ_t	54
52	Last-Verschiebungsdiagramme der DCB-Proben Teil 1	56
53	Last-Verschiebungsdiagramme der DCB-Proben Teil 2	57
54	CC Ausgleichsfunktionsvergleich beim DCB-Test	58
55	DCB CBT Risslängenkorrekturwert	58
56	Vergleich der Auswerteergebnisse für \mathcal{G}_n^c	59
57	Unidirektionale E-Glasfasermatte	60
58	UD GFK-Platten	60
59	Versuchsanordnung Dreipunkt-Biegeversuch schematisch	62
60	Dreipunkt-Biegeversuch im Labor	62
61	Dreipunkt-Biegeversuch UD GFK-Proben	64
62	Finite Elemente Modell ENF, lokaler Ansatz	67
63	ENF Klebschichtbeulfigur	67
64	Finite Elemente Modell ENF Kontinuumsansatz	68
65	Deformation der ENF-Probe	68
66	Last-Verschiebungsdiagramm ENF FEM	69
67	ENF-Test Prozesszone, FEM Kontinuumsansatz	69
68	Finite Elemente Modell DCB, lokaler Ansatz	70
69	Finite Elemente Modell DCB Kontinuumsansatz	71
70	Deformation der DCB-Probe	71
71	Last-Verschiebungsdiagramm DCB FEM	73
72	DCB-Test Prozesszone, FEM Kontinuumsansatz	73
73	Vorbereitung ENF-Mikroskopproben	74
74	ENF-Mikroskopproben	74
75	Berechnungsskizze ENF-Probe	81

Tabellenverzeichnis

1	Messwerte Zugversuch	23
2	Messwerte TAST	28
3	Vorauslegungswerte UHU Plus Endfest 300	29
4	Werkstoffdaten für Fügeteile	30
5	Geometrische Messwerte der ENF-Proben	39
6	Koeffizienten der ENF-Ausgleichsfunktion	41
7	ENF-Auswertung	41
8	Geometrische Messwerte der DCB-Proben	55
9	Koeffizienten der DCB-Ausgleichsfunktionen	57
10	DCB-Auswertung	58
11	Daten glasfaserverstärkter Kunststoff	60
12	Finite Elemente Werkstoffeingabewerte	65
13	Finite Elemente Eingabewerte Geometrie	65

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CBT	corrected beam theory
CC	compliance calibration
COH	Kohäsivzonen...
DCB	double cantilever beam
ENF	end notched flexure
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
S.	Seite
SBT	simple beam theory
TAST	thick adherend shear test
u. a.	und andere
UD	unidirektional
usw.	und so weiter
v.o.n.u.	von oben nach unten
z.B.	zum Beispiel

1 Einführung

Schon seit tausenden von Jahren werden Klebstoffe eingesetzt. Anfänglich bestanden diese ausschließlich aus Naturprodukten und waren noch sehr unzuverlässig. Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts, durch die Entwicklung von synthetischen Polymeren (Kunststoffe) und in weiterer Folge mit dem genaueren chemischen Verständnis, konnten ihre mechanischen Eigenschaften dahingehend verbessert werden, dass Klebstoffe heutzutage kaum wegzudenken sind. Sie finden heute in nahezu jedem Alltagsgegenstand Verwendung.

Klebverbindungen lösen immer mehr und mehr klassische Verbindungstechniken wie Niet-, Schraub- und Schweißverbindungen insbesondere in der Raumfahrt sowie im Fahr- und Flugzeugbau ab. Weitere wichtige Anwendungsbereiche sind die Verpackungsindustrie, moderne Elektronik, Medizin, Sport- und Sportgerätetechnik. Dies liegt an einer Reihe bemerkenswerter Vorteile [1, Abschnitt 1.2], [2, Kap. 1, Kap. 3], [3, Chapter 1]:

- Abhängig vom verwendeten Klebstoff lassen sich unterschiedlichste Werkstoffe direkt miteinander verbinden.
- Ausgleich von Fügeteiltoleranzen und unterschiedlicher thermischer Ausdehnungen.
- Die Verbindungsstelle selbst nimmt wenig Platz in Anspruch. Durch den Entfall von Schrauben, Bolzen, Muttern, Nieten und Raum für das Ansetzen von Montagewerkzeugen ergibt sich eine Gewichtsreduktion.
- Direkt an der Verbindungsstelle entstehen keine Spannungskonzentrationen, wie etwa bei der Kontaktstelle zwischen Schraube bzw. Niete mit der Bohrung. Einen solchen Vergleich zeigt Abbildung 1.
- Während der Verarbeitung kommt es zu keiner lokalen Wärmeeinbringung und Gefügeänderungen in den Fügeteilen finden nicht statt (im Gegensatz zu Schweißen).
- Abdichtungs- und Isolationsfunktion, sowie Schutz vor Kontakt- und Spaltkorrosion.

Auf der anderen Seite ergeben sich auch einige Nachteile und Anwendungsgrenzen, die zu beachten sind:

- Eine Berechnung ist zwingend erforderlich, da Klebverbindungen beanspruchungsgerecht gestaltet werden müssen.

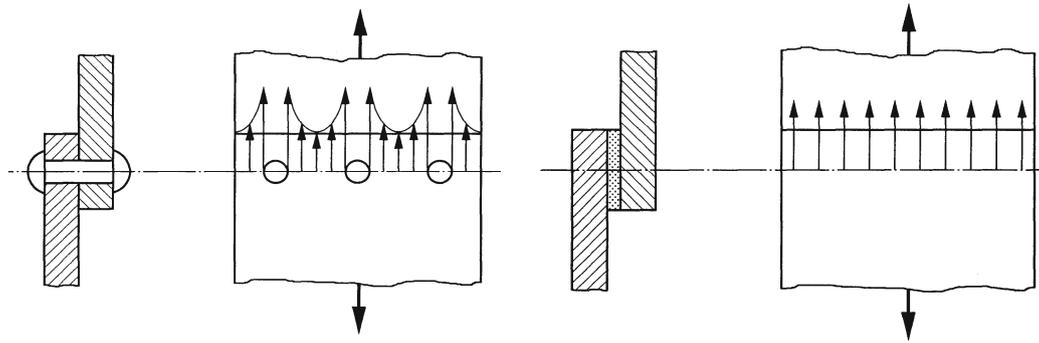


Abbildung 1: Spannungsverteilung in genieteten (geschraubten) und geklebten Verbindungen bei Zugkraftübertragung. [1, Bild 1.2]

- Mitunter aufwändige Oberflächen(vor-)behandlungen und eine präzise, saubere Fertigung sind essentiell. Dafür und auch für das Aushärten des Klebstoffs ist mehr Zeitbedarf einzuplanen.
- Begrenzter Temperatureinsatzbereich und temperaturabhängige Eigenschaften (z.B. Festigkeit).
- Die Verbindung ist stoffschlüssig und nicht einfach lösbar. Dies hat eine schlechte Reparaturfreundlichkeit und erschwerte Austauschbarkeit zur Folge.
- Kompatibilität mit Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, Alterung, usw.) ist zu prüfen.

1.1 Hintergrund

In der Norm DIN EN 923 [4] werden wichtige Begriffe festgelegt, die der Klebstoff- und der klebstoffverarbeitenden Industrie eigen sind oder dort allgemein verwendet werden. Für das weitere Verständnis sind die wichtigsten herausgegriffen.

1.1.1 Begriffsdefinitionen in Anlehnung an [4]

Klebstoff. Es handelt sich um einen nichtmetallischen Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion¹) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion²) besitzt, siehe dazu Abbildung 2.

Kleben. Darunter wird das Fügen gleicher oder ungleichartiger Werkstoffe unter Verwendung eines Klebstoffes verstanden. Eine solche Verbindungsstelle heißt Klebverbindung und besteht aus den beiden Füge­teilen, die sich an ihren Klebflächen über

¹Zustand, in dem zwei Oberflächen durch Grenzflächenbindungen zusammengehalten werden.

²Zustand, in dem die Teile eines Stoffes durch intermolekulare Kräfte zusammengehalten werden.

einen Zwischenraum, der Klebfuge, miteinander berühren. Darin befindet sich der abgebundene (verfestigte) Klebstoff.

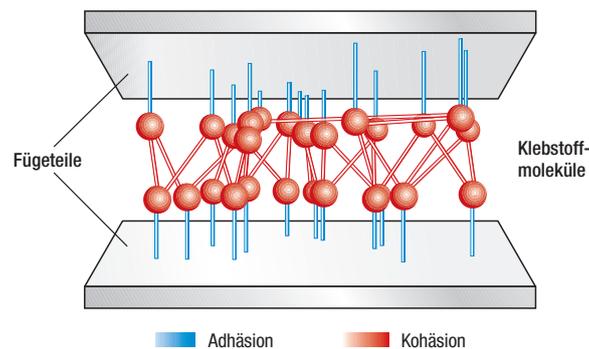


Abbildung 2: Schematische Darstellung des stoffschlüssigen Zusammenhalts einer Klebverbindung. [5, Abb. 1]

Zweikomponentenklebstoff. Dieser Klebstoff besteht aus zwei getrennten reaktionsfähigen Komponenten, die vor ihrer Verwendung gemischt werden. Eine Komponente ist das Bindemittel (Grundstoff), welches hauptsächlich Adhäsion und Kohäsion bewirkt. Die andere dient als Vernetzer (Härter), der die Bildung zwischenmolekularer kovalenter oder ionischer Bindungen zwischen Polymerketten bewirkt, fördert oder regelt und dadurch zu einem dreidimensionalen Molekülnetzwerk führt.

Topfzeit. Maximale Zeitspanne, in der ein Mehrkomponentenklebstoff nach dem Mischen in einem Gefäß („Topf“) verarbeitet werden kann.

1.1.2 Mechanische Beanspruchung von Klebverbindungen

Beanspruchungen verändern im Laufe der Zeit die Eigenschaften der Klebverbindung. Dazu zählen mechanische und thermische Beanspruchungen, Einfluss durch Strahlung (besonders Ultraviolettstrahlung) und Feuchtigkeit. In dieser Arbeit geht es speziell um die mechanischen Beanspruchungen bei quasi-statischer Belastung.

Klebung können im wesentlichen Zug-, Druck-, Schäl-, Schub- bzw. Scherbeanspruchungen unterliegen. Eine Übersicht zeigt Abbildung 3. Gegenüber Druckbeanspruchungen sind sie weitgehend unempfindlich.

Schälbeanspruchung. Durch sehr flexible Verformung mindestens eines der beiden Fügeile wird der Klebstoff nahezu linienförmig hoch beansprucht (Abbildung 3e). Dabei wird die Festigkeit der meisten Kleber rasch um ein Vielfaches übertroffen und es kommt zum schalenförmigen Ablösen der Klebschicht (Abschälung). Diese Beanspruchungsart sollte unbedingt vermieden werden.

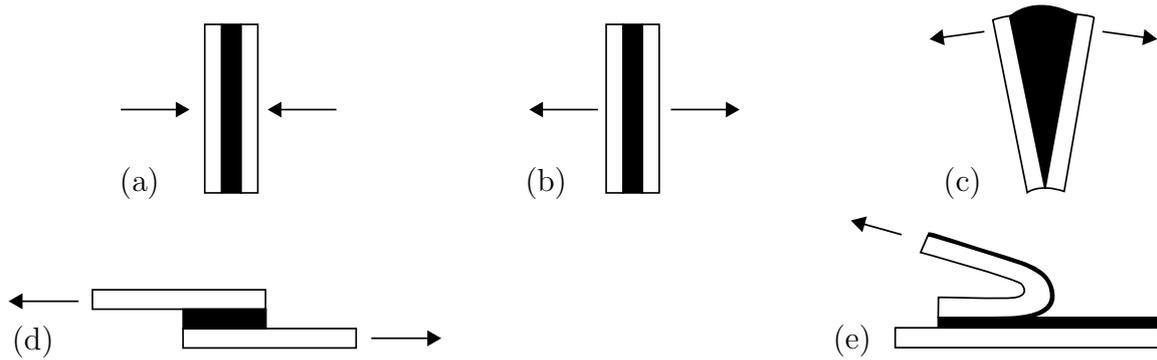


Abbildung 3: Mechanische Beanspruchungsarten. (a) Druck, (b) Zug, (c) Spaltung, (d) Scherung und (e) Schälung. [6, Figure 7.1]

Ein Spezialfall vom Schälen stellt die Spaltung dar. Die Fügeteile sind dabei relativ starr und werden senkrecht zur Klebfuge an einem Ende auseinander gezogen (Abbildung 3c).

Einfach überlappende Klebverbindung. Es handelt sich dabei um eine der gängigsten und einfachsten Möglichkeiten zwei Fügeteile miteinander durch einen Klebstoff zu verbinden. Die Klebfuge entsteht durch das Überlappen zweier ebener Platten (Abbildung 3d). Eine solche Verbindung eignet sich besonders gut für die Übertragung von äußeren Zugkräften, wodurch in der Klebschicht vorwiegend Schub hervorgerufen wird. Es ist dann von einer Zugscherung die Rede.

Optimal erweisen sich Schubbeanspruchungen, da hierbei die Kraft parallel zur Klebfläche wirkt. Genau dies macht man sich zu nutze bei Überlappungsklebungen.

1.2 Zielsetzung

Diese Diplomarbeit dient dem Zweck der genaueren Beschäftigung mit dem Thema Klebverbindungen im Leichtbau. In einer vorausgehenden Projektarbeit [7] wurden bereits mit gegebenen Werkstoffgrößen analytische und numerische Berechnungen an einfach überlappenden Klebverbindungen durchgeführt. Nun wird aufgezeigt welcher Aufwand nötig ist um solche Eingabewerte für numerische Berechnungen mithilfe der Finite Elemente Methode für einfache Überlappungsklebungen eines unbekanntes Klebstoffs zu gewinnen.

Ein Überblick der Modellierungstechniken für den Einsatz von Finite Elemente Methoden wird geschaffen. Daraus erhält man eine Liste von mechanischen und bruchmechanischen Eingabegrößen. Diese müssen dann für die Fügeteile und den verwendeten Klebstoff in geeigneten Werkstofftests bestimmt werden. Die Proben für die Tests und die entsprechenden Testabläufe werden erklärt. Zur Probenauslegung werden mit Literaturwerten Vorabsimulationen angestellt. Anschließend werden die

Proben gefertigt und die Versuche im Labor durchgeführt.

Die gemessenen Daten werden verarbeitet und ausgewertet für eine abschließende Nachrechnung mit der Finite Elemente Methode. Danach wird ein Vergleich zwischen analytischen Ergebnissen, numerischen Lösungen und den Messungen angestellt.

2 Modellierungsansätze

Geschichtlich gesehen existieren zahlreiche analytische Ansätze zur Berechnung von einfach überlappenden Klebverbindungen, meistens mit dem Ziel Spannungsverläufe für den auftretenden Schub und die Schälung in der Klebschicht zu erhalten. Damit wurde versucht die Versagenslast abzuschätzen. Ein guter Überblick ist in [8, Chapter 1] dargestellt. Mit geringfügiger Steigerung der Genauigkeit nimmt die Anzahl an Differentialgleichungen und zugehörigen Randbedingungen enorm zu. Dies wurde in der vorausgehenden Projektarbeit [7] festgestellt, was auch den heutigen Trend hin zu numerischen Ansätzen, insbesondere Finite Elemente Methoden erklärt. Mit diesen sind fast keine geometrischen Einschränkungen an die Fügestelle gegeben und es lassen sich vielzählige Werkstoffmodelle anwenden.

Im Folgenden werden die prinzipiellen Probleme einer solchen Klebverbindung aufgezeigt und anschließend wird erläutert wie sich ein geeignetes Finite Elemente Modell aufbaut.

2.1 Problemklassifizierung der einfach überlappenden Klebverbindung

In Abbildung 3d ist schematisch eine einfach überlappende Klebverbindung dargestellt. Die äußeren Zugkräfte verursachen durch die horizontale Verschiebung der oberen gegenüber der unteren Platte eine Schubbeanspruchung in der Klebschicht und Zugspannungen in den Füge-teilen. Die Zugspannung nimmt zum freien Ende der Überlappungszone hin ab, woraus folgt, dass auch die Querdehnung im Überlappungsbereich variiert. Dies zeigt Abbildung 4a.

Geometrisch bedingt wirken die äußeren Kräfte nicht in derselben Ebene. Sie bilden ein Kräftepaar, was zwangsweise zu Biegedeformationen führt um auch das Momentengleichgewicht herzustellen. Da die Platten in Richtung der dritten Dimension nicht unbedingt kleine Querschnittsabmessungen aufweisen (z.B. großes Maß B im Gegensatz zur Balkentheorie) kommt es zusätzlich zu einer sogenannten antiklastischen Biegung (Abbildung 4b). All diese Effekte lassen sich nur mit einem vollständig dreidimensionalen Modell erfassen.

Um das Versagen der Gesamtverbindung und deren Ursache festzustellen müssen entsprechende Werkstoffgesetze inklusive Schädigung für den Klebstoff und die Füge-teile bereitgestellt werden. Im Allgemeinen ist daher von nichtlinearem Werkstoffverhalten und großen Deformationen auszugehen.

Zusammenfassend handelt es sich um ein dreidimensionales, statisches, nichtlineares Festkörperproblem mit Spannungsbewertung. Die Nichtlinearitäten stammen aus den großen Deformationen und dem Materialverhalten.

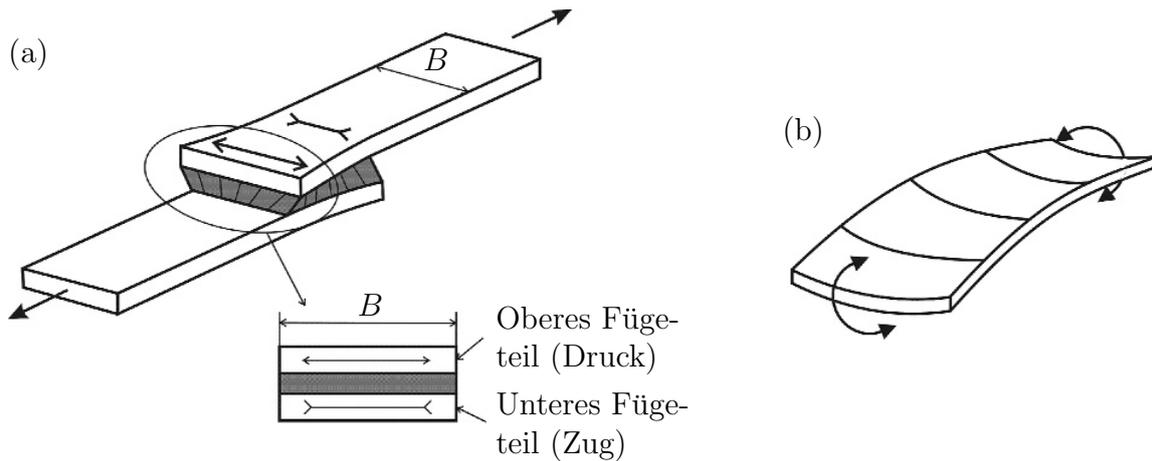


Abbildung 4: Deformation einer einfach überlappenden Klebverbindung (a) durch Querdehnung bei Zugbelastung [8, Fig. 5.7, modifiziert] und (b) antiklastische Biegung [8, Fig. 5.7].

2.2 Modellbildung

Finite Elemente Programm. Als Solver und Postprocessor kam das kommerzielle Programmsystem ABAQUS[®] (Version 6R2016) zum Einsatz. Die Vernetzung (Preprocessor) erfolgte jedoch mit der Freeware CalculiX GraphiX v2.10.

2.2.1 Symmetrie oder 2D

Die Deformationsfiguren aus Abbildung 4a und 4b zeigen eine Symmetrieebene bei der Plattenbreite $B/2$. Somit kann mithilfe von Symmetrierandbedingungen der Rechenaufwand für ein dreidimensionales Modell reduziert werden.

Vernachlässigt man die Querdehnungseffekte in Richtung der Plattenbreite B und die antiklastische Biegung so bietet sich eine zweidimensionale Vernetzung der Symmetrieebene unter Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes an. Voraussetzung dafür ist eine wesentlich größere Plattenbreite B im Vergleich zur Plattendicke. Im Allgemeinen lohnt sich der enorme Mehraufwand einer dreidimensionalen Analyse für nur geringfügig genauere Ergebnisse nicht, siehe z.B. [9, S. 6-7].

2.2.2 Kohäsivzonenmodellierung

Für die Modellierung der Klebfuge sind auf Basis der Schädigungsmechanik zwei Varianten vorstellbar:

1. *Kontinuumsansatz (continuum approach)*. Es werden Spezialelemente verwendet, welche sowohl die elastischen Eigenschaften aufweisen, den Beginn der Schädigung erkennen (Schädigungsinitiierung) und den Schädigungsfortschritt abbilden können. Die Klebfuge besteht nur aus einer einzigen Reihe dieser Elemente (Abbildung 5a).

2. *Lokaler Ansatz (local approach)*. Hierbei ist die Klebschicht unterteilt in eine oder mehrere Zonen denen rein elastische Eigenschaften zugewiesen werden und in eine andere, unendlich dünne Zone, welche lediglich für den Schädigungsprozess zuständig ist (Abbildung 5b).

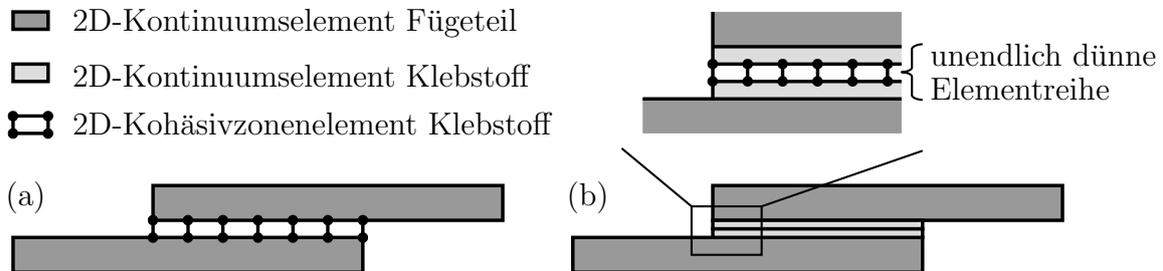


Abbildung 5: Modellierung der Klebfuge: (a) Kontinuumsansatz und (b) lokaler Ansatz. Angelehnt an [9, Fig. 11].

In beiden Fällen kommen Spezialelemente, sogenannte Kohäsivzonenelemente, zum Einsatz. Ihnen wird ein konstitutives, nichtlineares Werkstoffgesetz, *Kohäsivgesetz* genannt, zugewiesen. Im englischen Sprachgebrauch findet sich dafür der Begriff *Traction-Separation Law*. Es beschreibt die Wechselwirkung zwischen den Komponenten des Spannungsvektors (tractions) \vec{t} und der Separation δ der Grenzoberflächen vor und während der Schädigung und dem Risswachstum. Es wird dabei angenommen, dass die Materialtrennung (Separation) lediglich in einer schmalen kurzen Prozesszone vor der Risspitze stattfindet. Die einfachste Formulierung, durch zwei Geraden idealisiert, zeigt Abbildung 6.

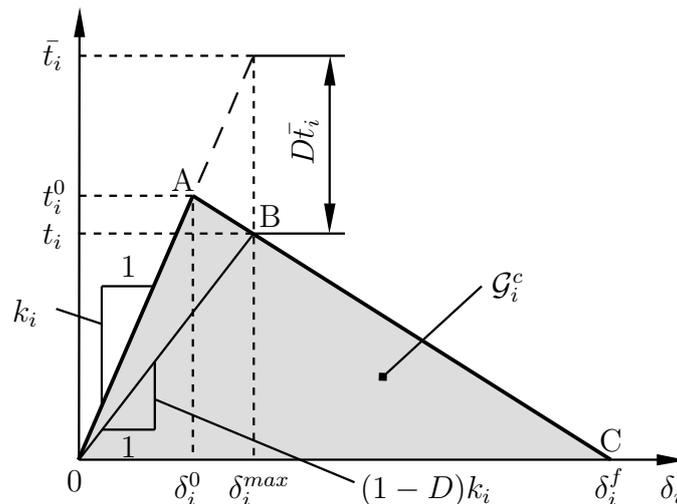


Abbildung 6: Bilineares Traction-Separation Law für einen Bruchmode i . Angelehnt an [10, Figure 24.2.3–1] und [10, 32.5.6].

Neben dieser Dreiecksform sind auch noch trapezförmige und exponentielle Gesetze üblich. Dieses Kohäsivgesetz muss für jeden Rissöffnungsmodus definiert werden. Im

zweidimensionalen Fall sind dies entsprechend Mode I und Mode II. Zur Unterscheidung wird der Index i in den Formelzeichen eingeführt. $i = n$ entspricht Mode I und steht für den Normalmode sowie $i = s$ dem Mode II als Schubmode.

Bei erstmaliger Belastung des Kohäsivelementes bewegt man sich vom Ursprung 0 beginnend entlang der Geraden $\overline{0A}$ mit Steigung k_i . Bleibt die Elementverformung kleiner als δ_i^0 so kann auf dieser Linie reversibel be- und entlastet werden (linear elastisches Verhalten). $\overline{0A}$ lässt sich beschreiben durch

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} \quad (1)$$

mit $\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{\eta}$. Dabei ist η die geometrische Klebschichtdicke. Nun kommt es auf die verwendete Variante an, wie obige Matrix befüllt wird: Beim *Kontinuumsansatz* sollen auch die elastischen Eigenschaften im Kohäsivgesetz inkludiert werden, also wird $K_n = E_K$ und $K_s = G_K$ gesetzt. E_K und G_K sind Elastizitätsmodul und Schubmodul des Klebstoffs. In diesem Fall ist $k_i = \frac{K_i}{\eta}$. Wird hingegen die Modellierung mit *lokalem Ansatz* gewählt, so setzt man für K_n und K_s einen hohen Wert an (z.B. 10^5 bis 10^6 MPa). Punkt A liegt dann fast auf der vertikalen Achse. Das elastische Verhalten wird dann von umgebenden Kontinuums-elementen mittels eines davon unabhängigen Werkstoffgesetzes beschrieben.

Angemerkt sei, dass neben der geometrischen Dicke der Klebschicht η den Kohäsivzonenelementen auch eine konstitutive Dicke zugewiesen werden kann. Wird diese gleich 1 gesetzt, dann entsprechen die Dehnungen ε_i in Gleichung (1) den Separationen δ_i .

Schädigung tritt zum ersten Mal auf wenn ein Initiierungskriterium, in dieser Arbeit

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (2)$$

erfüllt wird [9, S. 25]. Dabei wird über die sogenannte Macaulay-Klammer $\langle x \rangle := \frac{x+|x|}{2}$ ($x \in \mathbb{R}$, Definition siehe [10, 24.3.3]) ausgeschlossen, dass unter reinem Druck in der Klebfuge Schädigung stattfindet [10, 32.5.6]. Im Druckbereich ist das Verhalten stets reversibel. t_i^0 symbolisiert die Klebstofffestigkeit im Mode i .

Bereich \overline{AC} führt zu einer Entfestigung (Softening) des Klebstoffs. D heißt globale Schädigungsvariable und nimmt Werte zwischen 0 (Punkt A, ungeschädigt) und 1 (Punkt C, Rissbeginn) an. Wird beispielsweise in Punkt B wieder entlastet, so bewegt man sich im Diagramm linear in den Ursprung zurück. Die eingeschlossene Dreiecksfläche 0AB repräsentiert die dissipierte Energie \mathcal{G}_i . Erneutes Belasten von 0 ausgehend führt nun entlang der flacheren Geraden $\overline{0B}$. Geschädigte Elemente ($D > 0$) bilden die Prozesszone vor der Risspitze, siehe Abbildung 7. Punkt C wird erreicht

wenn die beiden Energiefreisetzungsraten $\mathcal{G}_n, \mathcal{G}_s$ dem Energiekriterium für Rissbeginn

$$\frac{\mathcal{G}_n}{\mathcal{G}_n^c} + \frac{\mathcal{G}_s}{\mathcal{G}_s^c} = 1 \quad (3)$$

genügen [9, S. 25]. \mathcal{G}_i^c sind die kritischen Energiefreisetzungsraten im Mode i des Klebstoffs.

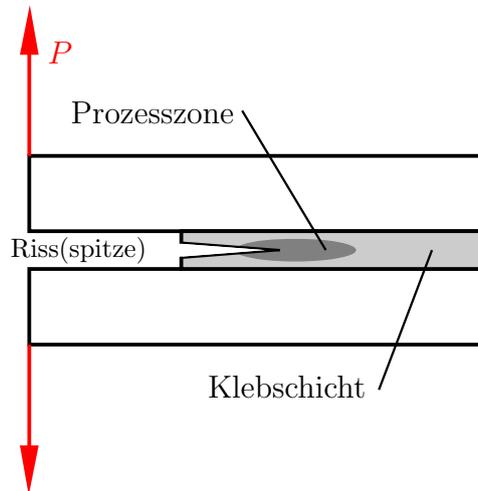


Abbildung 7: Skizze der Prozesszone, die sich aufgrund der Last P vor der Risspitze ausbildet.

Beim Kontinuumsansatz gilt es noch zu überprüfen, ob

$$\delta_i^f \geq \delta_i^0 \quad (4)$$

ist. Dann ergeben alle Eingabewerte ein gültiges Kohäsivgesetz. Bei der Dreiecksform bedeutet das konkret: $2\frac{\mathcal{G}_i^c}{t_i^0} = \delta_i^f \geq \delta_i^0 = \frac{t_i^0}{k_i}$.

Abbildung 8 zeigt schematisch den Zusammenhang wenn Mode I und II in Kombination (Mode Mix), wie bei einer Überlappungsklebung, auftreten.

Elemente. ABAQUS[®] bietet für 2D-Simulationen vierknotige Kohäsivzonenelemente (COH2D4) an, welche sich kompatibel mit linearen Kontinuumselmenten für einen ebenen Verzerrungszustand (CPE4) verbinden lassen. Den COH2D4-Elementen wird ein Traction-Separation Law zugewiesen, wobei bei der Dreiecksform als Eingabewerte t_i^0 , K_i , \mathcal{G}_i^c für jeden Rissöffnungsmodus i bereitgestellt werden müssen. Zusätzlich werden noch die elastischen Kenngrößen des Klebstoffs E_K und G_K benötigt und für die Geometrie die Klebschichtdicke η .

Bei der Netzgenerierung sollte darauf geachtet werden, dass die Klebschicht in Schichtrichtung geometrisch fein genug aufgelöst wird. Ein guter Richtwert ist, wenn mindestens 3 Elemente in der Prozesszone liegen.

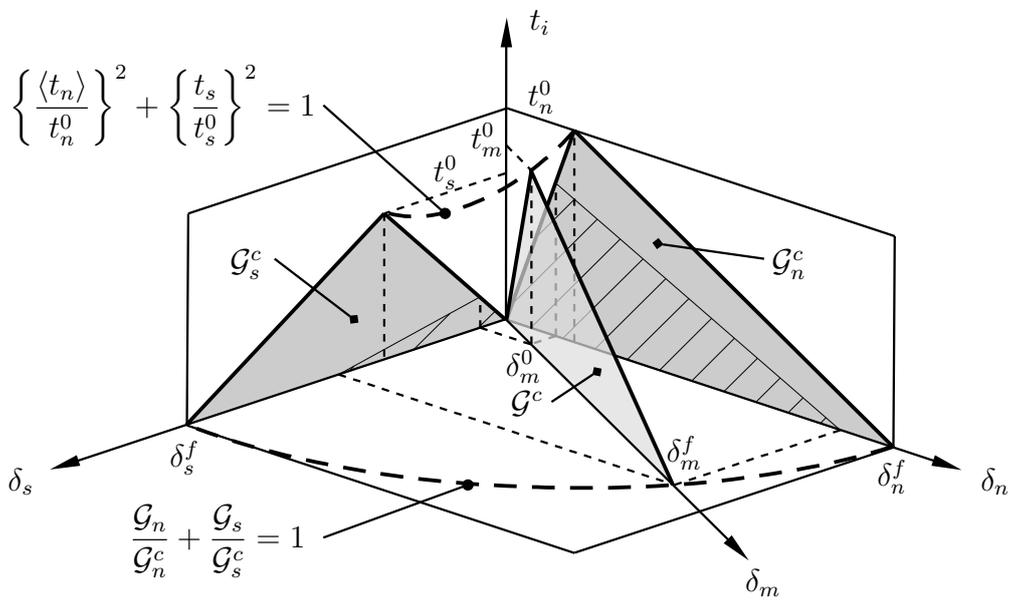


Abbildung 8: Mode Mix (Symbole mit Index m). Angelehnt an [10, Figure 32.5.6–4].

3 Werkstoffgrößen bestimmen

3.1 Klebstoff

In dieser Diplomarbeit wird der Zweikomponentenklebstoff UHU Plus Endfest 300 herangezogen. Beim Binder handelt es sich um ein Epoxidharz und der Härter besteht aus aliphatischen Aminen. Beide Komponenten wurden vor jeder Anwendung zu gleichen Volumenteilen (1:1) miteinander vermischt. Die Topfzeit beträgt 90 min. Für weitere Details wird auf das Herstellerdatenblatt im Anhang B verwiesen.

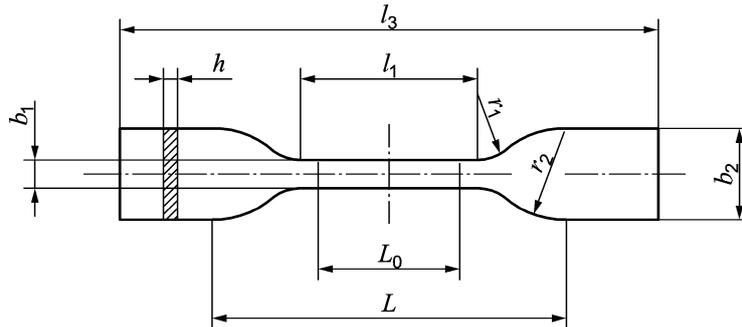
Es gibt bisher kein standardisiertes Verfahren um alle nötigen Parameter für das Kohäsivgesetz messtechnisch zu ermitteln. Jedoch haben sich einige Methoden aus der Literatur bewährt [10, S. 30-41], die hier kurz zusammengefasst sind.

- *Property determination method:* Jede Messgröße wird isoliert in einem eigenen Werkstofftest ermittelt. Vorsicht ist geboten, wenn von Ergebnissen dicker Probekörper auf die dünne Klebschicht geschlossen wird. Rissausbreitung in dicken Proben erfolgt bevorzugt senkrecht zur Richtung der maximalen Hauptnormalspannungen und in einer dünnen Klebschicht ist der wachsende Riss gezwungen der Schicht zu folgen.
- *Inverse method:* Es wird eine möglichst einfache Form für das Kohäsivgesetz und Startwerte für seine Parameter angenommen. Mithilfe eines iterativen Optimierungsverfahrens werden die Parameter so lange variiert bis die Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und Messdatenkurven ausreichend genau ist (trial and error). Ob die, auf diesem Weg gefundenen Parameter physikalisch plausibel sind, bleibt im Vorhinein offen.
- *Direct method:* Das vollständige Kohäsivgesetz wird messtechnisch erfasst. Dies geschieht durch Aufzeichnen von \mathcal{G}_i - δ_i -Kurven und anschließende Differentiation. Diese Methode erfordert den größten Aufwand, aber bringt bei guter Durchführung sehr präzise Ergebnisse. Weiters zeigt die Literatur [10, Fig. 18, 19, 22], dass \mathcal{G}_i^c auch von der Klebschichtdicke abhängt und mit dieser proportional ansteigt. Die Festigkeitswerte t_i^0 nehmen mit zunehmender Klebschichtdicke ab.

Um den Aufwand und die Mittel für die vorliegende Diplomarbeit zu begrenzen werden für die Klebstoffcharakterisierung voneinander unabhängige Werkstofftests durchgeführt (Property determination method).

3.1.1 Zugversuch

Der E-Modul des Klebstoffs E_K und die Zugfestigkeit σ_m lassen sich mit dem weit verbreiteten Zugversuch gemäß den Normen DIN EN ISO 527-1 [11] und DIN EN ISO 527-2 [12] bestimmen. Der Probekörper entspricht der kleinen Flachprobe 5A und seine Sollmaße sind in Abbildung 9 definiert. Die Einspannlänge L wurde auf 46 mm an der Prüfmaschine eingestellt, was wegen der balligen Klemmvorrichtung dann den geforderten 50 mm auf der Probe entspricht.



	Probekörpertyp	5A
l_3	Gesamtlänge	≥ 75
b_2	Breite an den Enden	$12,5 \pm 1$
l_1	Länge des engen parallelen Teils	25 ± 1
b_1	Breite des engen Teils	$4 \pm 0,1$
r_1	Kleiner Radius	$8 \pm 0,5$
r_2	Großer Radius	$12,5 \pm 1$
L	Anfangsabstand der Klemmen	50 ± 2
L_0	Messlänge	$20 \pm 0,5$
h	Dicke	$2 \pm 0,2$

Abbildung 9: Form und Abmessungen der Zugprobenkörper. Werte in mm. [12, Bild A.2, Tabelle A.2]

Probenfertigung. Alle Behältnisse, Formen und Mischstäbe wurden mit Ethanol gründlich gereinigt. Nach dem Mischen der beiden Klebstoffkomponenten wurde diese Mischung in einer Vakuumkammer bei Raumtemperatur für 32 min entgast. Dabei entstanden anfangs große Blasen und ein Schaum, sodass es zweckmäßig war einen hohen Becher für die Klebstoffentgasung zu verwenden. Anschließend wurde der Klebstoff in eine Silikonform gegossen und dann nochmal für 22 min in dieser entgast. Abschließend kam die Form mit offener Oberseite für 3 h bei 45 °C in den vorgeheizten Ofen zum Aushärten. Die Abkühlung erfolgte an der Umgebungsluft und die Proben wurden erst einen Tag später aus der Form entnommen. In Abbildung 10 sind die abgekühlten Zugproben dargestellt. Mit einer Klinge wurden die Proben voneinander

getrennt und mit Nassschleifpapier der Körnung 1000 die Kontur nachbearbeitet. Insgesamt wurden so 8 Probekörper am 14. und 15.05.2018 hergestellt.

Verwendete Geräte. Es kam die Prüfmaschine Zwick Z050 gemeinsam mit einer 1 kN Kraftmessdose und dem mechanischen Extensometer MakroXtenseII zum Einsatz. Abbildung 12 zeigt diese Versuchsanordnung im Labor. Die Probenquerschnitte wurden an 3 unterschiedlichen Stellen mit einem digitalen Messschieber auf 2 Nachkommastellen genau vermessen.



Abbildung 10: Gegossene Zugproben in Silikonform nach dem Aushärten im Ofen.

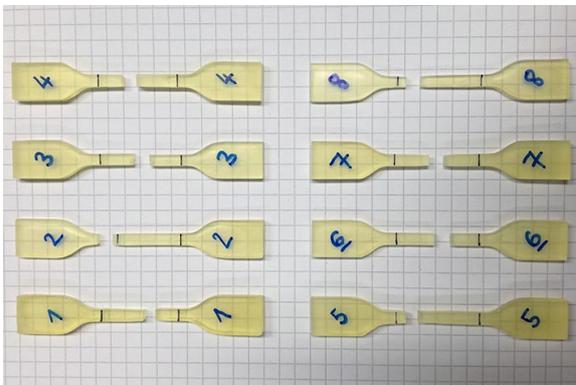


Abbildung 11: Geprüfte Zugproben.

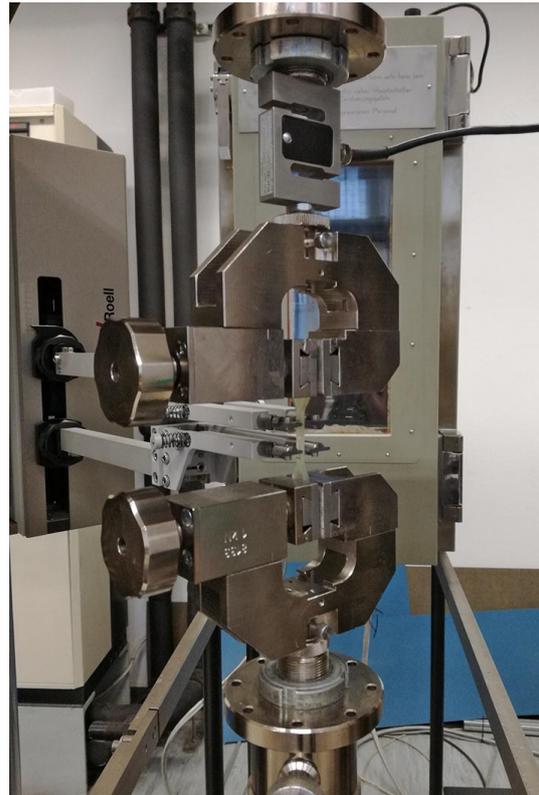


Abbildung 12: Versuchsaufbau Zugversuch. Kraftmessdose, Klemme, Probe, Extensometer (v.o.n.u.).

Ergebnisse. Das Datum der Messung war der 25.05.2018 und die Prüfgeschwindigkeit betrug 5 mm/min. Zur Ermittlung von E_K wurde eine Regressionsgerade zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung herangezogen. Es herrschten Laborumgebungsbedingungen.

Probe 2 ist ungültig, da die Einschnürung und der Bruch außerhalb des Extensometer-Messbereichs geschah. Diese Probe wurde aber trotzdem für die Ermittlung von E_K herangezogen. Probe 3 ist ungültig, weil sich im Messbereich eine Luftblase befand. Bei der statistischen Auswertung von σ_m wurde Probe 2 und 3 ausgeschlossen. In Abbildung 11 sind alle Zugproben nach dem Versuch zu sehen und Abbildung 13 zeigt

das Spannungs-Dehnung-Diagramm inklusive der Hookeschen Gerade eingetragen mit einer Steigung welche dem Mittelwert von E_K entspricht. Die gültigen Messwerte sind zusammengefasst in Tabelle 1.

Tabelle 1: Messwerte aus dem Zugversuch. MW = Mittelwert, SAW = Standardabweichung, Min = Minimum und Max = Maximum der geprüften Proben. Abmessungen h und b_1 siehe Abbildung 9.

Größe	MW	SAW	Min	Max	Einheit
h	3,00	0,49	2,41	3,73	mm
b_1	3,73	0,10	3,56	3,90	mm
E_K^3	2660,19	186,46	2470,00	2928,61	MPa
σ_m^4	44,67	1,13	43,21	46,67	MPa

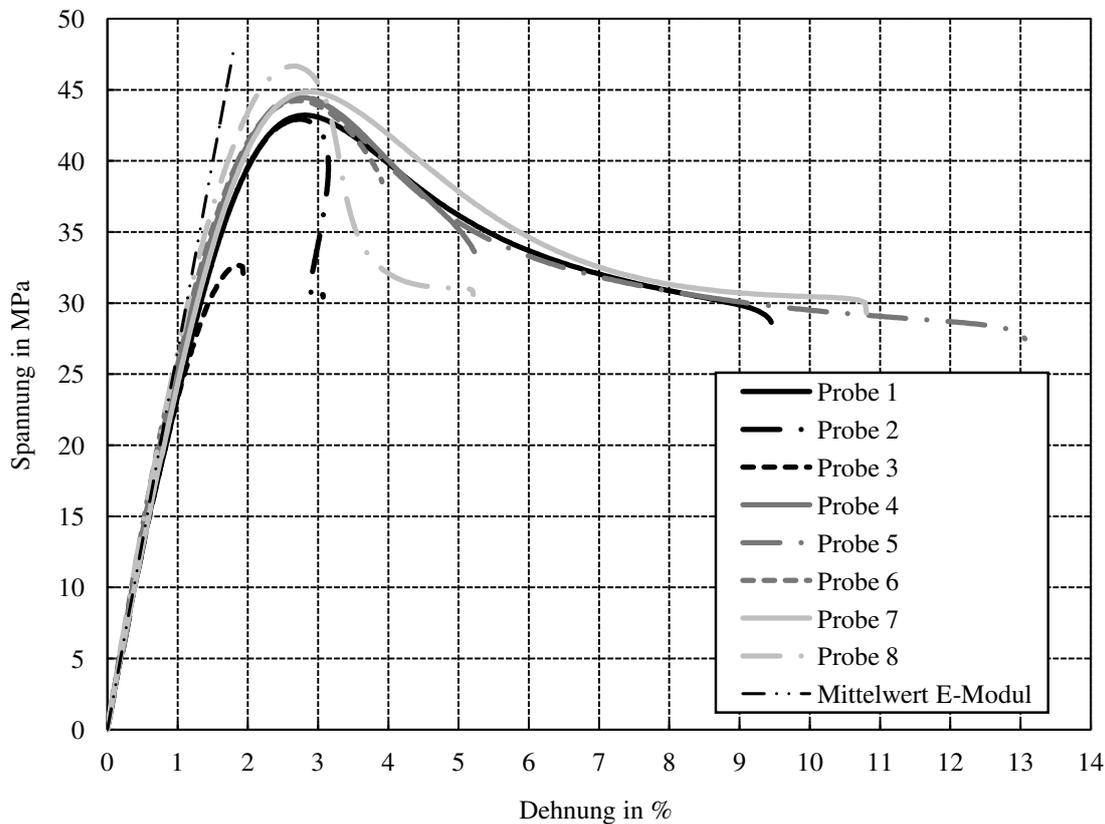


Abbildung 13: Zugversuch Klebstoff UHU Plus Endfest 300 mit einem gemittelten E-Modul $E_K = 2660,19$ MPa und einer Standardabweichung von 186,46 MPa.

³Probe 3 wurde nicht für die Auswertung des E-Moduls herangezogen.

⁴Probe 2 und 3 wurden nicht für die Auswertung der Zugfestigkeit herangezogen.

3.1.2 Thick adherend shear test (TAST)

Eine einfach überlappende Klebverbindung mit dicken Fügeteilen wird unter Zug belastet. Somit wird die Verformung der Fügeteile sehr gering gehalten und der Klebstoff auf Schub beansprucht. Dieses Prüfverfahren dient zur Bestimmung der Kurve aus Schubspannung und -dehnung bis zum Versagen des Klebstoffes. Daraus lässt sich dann der Schubmodul errechnen und es kann die Schubfestigkeit abgelesen werden. Die zugehörige europäische Norm lautet DIN EN 14869-2 [13]. Diese Norm empfiehlt für die Fügeteile Stahl zu verwenden, macht aber keine näheren Angaben über die Legierung. In [14, 2.8.3] ist angegeben, dass Baustahl St-37 völlig ausreichend ist, welcher auch hierfür eingesetzt wurde.

Probenfertigung. Abbildung 14 zeigt die Abmessungen der Probekörper. Die Überlappungslänge soll 5 mm betragen. Für die Klebschicht wird lediglich eine Mindestdicke von 0,05 mm vorgeschrieben. Um eine Klebschichtdicke von 0,2 mm zu erzielen wurde die Stufenhöhe (6 mm-Maß in Abbildung 14) entsprechend reduziert, sodass die Klebfuge vertikal mittig bleibt.

Zuerst wurde das Rohmaterial mit einer Bandsäge zugeschnitten, dann die Stufen gefräßt und das Loch für die Kraftereinleitung gebohrt. Die Zugkraft soll momentenfrei über die Bohrung eingeleitet werden (siehe Abbildung 15).

Vor dem Verkleben erfolgte eine Reinigung der Fügeflächen mit Aceton. Mithilfe zweier Beilagen, eingelegt in die 1,5 mm Spalten, wurde die Überlappungslänge von 5 mm garantiert. Dafür kamen mit Teflonband ummantelte Aluminiumblechstücke zum Einsatz. In Abbildung 16 sind diese zu sehen. Danach kamen die Proben für 3 h bei 45 °C in den vorgeheizten Ofen. Abschließend kühlten die Proben an der Umgebungsluft aus. Abbildung 17 zeigt eine Detailaufnahme einer fertigen Probe nach dem Entfernen der Beilagen. Es wurden insgesamt 6 Proben am 04.05.2018 angefertigt.

Verwendete Geräte. Es kam die Prüfmaschine Zwick Z050 gemeinsam mit einer 50 kN Kraftmessdose zum Einsatz. Die Probekörper wurden vor und nach dem Kleben mit einem digitalen Messschieber auf 2 Nachkommastellen genau vermessen. Pro Maß wurden jeweils 3 Messungen durchgeführt.

In der Norm [13] wird eine spezielle mitdrehende Extensometerausführung beschrieben, die für diesen Versuch geeignet wäre. Im Werkstofflabor war eine solche aber nicht verfügbar. Diese Problematik wurde auch in [14, 2.8.5] und [15] diskutiert. Weniger elastische Klebstoffe führen zu stärkerer Biegeverformung der Fügeteile. In so einem Fall liefert ein gewöhnliches mechanisches Extensometer zu ungenaue Ergebnisse. Es gab keine Anhaltspunkte wie sich der Klebstoff verhält, daher wurden das mechanische

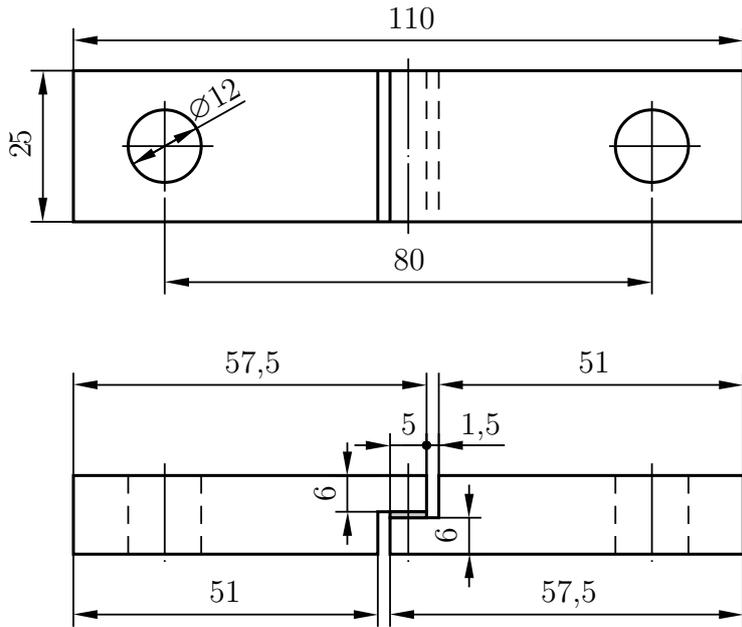


Abbildung 14: Form und Abmessungen des TAST-Probekörpers gemäß [13, Bild 1]. Maße in mm.

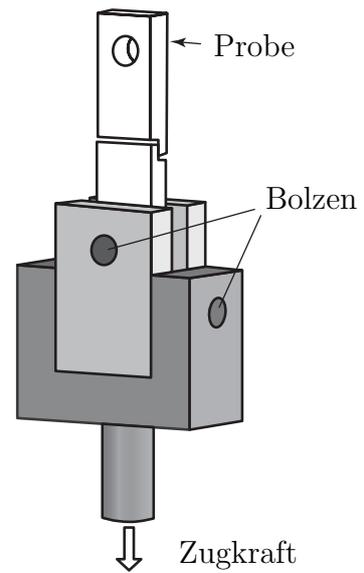


Abbildung 15: Krafteinleitung über kardanische Lagerung [14, Figure 2.45, modifiziert].

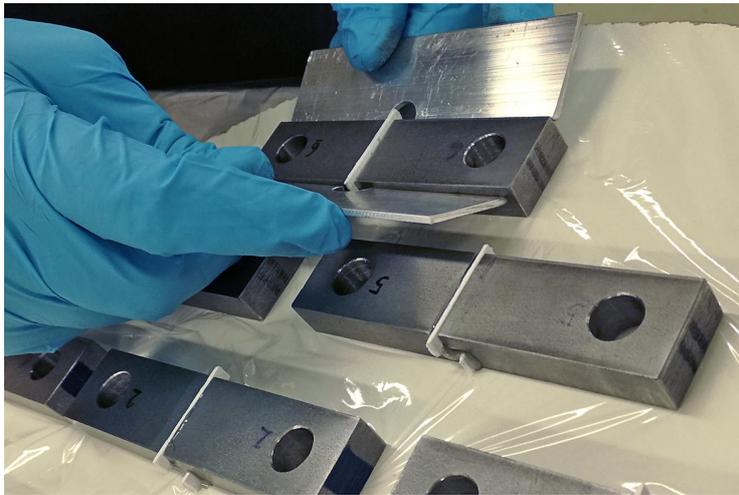


Abbildung 16: Probenfertigung. Einfügen der Beilagen (weiß), kleben und ausrichten.



Abbildung 17: Fertige Probe nach dem Entfernen der Beilagen mit angebrachten Markierungen.

Extensometer MakroXtensII und zugleich das Video-Extensometer VideoXtens von Zwick/Roell verwendet. Für letzteres wurden pro Probe 2 Punkte zur Aufzeichnung markiert (siehe Abbildung 17).

Den vollständigen Versuchsaufbau zeigt Abbildung 18. Links im Bild ist die Beleuchtung, mittig kardanisch eingespannt die Probe mit angebrachtem mechanischen Extensometer in der Prüfmaschine und rechts die Videokamera angeordnet. Die

Probenlagerung ist etwas abweichend von Abbildung 15. Zuerst ist ein Scharnier- und nachfolgend ein Kugelgelenk angeordnet.

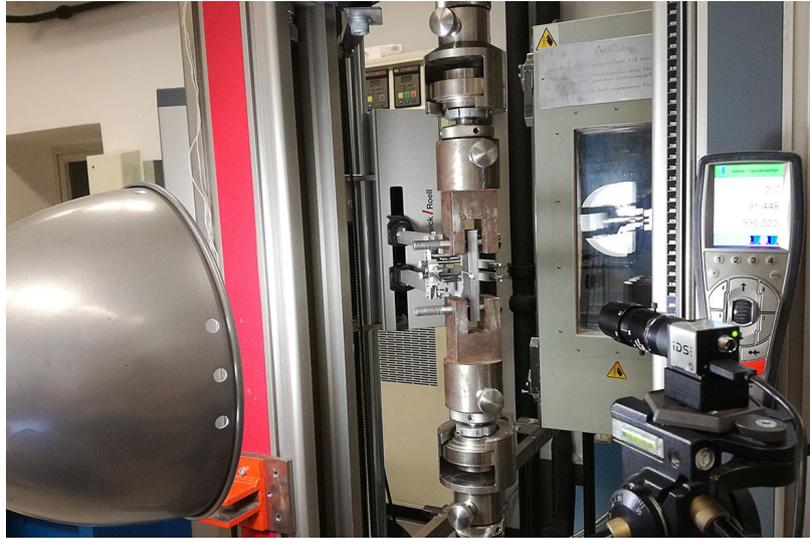


Abbildung 18: Versuchsanordnung TAST.

Ergebnisse. Der TAST wurde durchgeführt am 27.06.2018 und die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,5 mm/min. Die Applikation des mechanischen Extensometers stellte insofern ein Problem dar, weil seine Schneiden nicht nahe genug an die Klebfuge heranreichten. Die Schneiden wurden 13,86 mm symmetrisch zur Klebfuge aufgesetzt. Aber auch damit waren die Messergebnisse vollkommen unbrauchbar, da es zu Beginn der Belastung zur Verdrehung in die vertikale Lage kam (kardanische Lagerung).

Dieser Effekt ist auch bei den Messungen mithilfe des Video-Extensometers in der Vergrößerung von Abbildung 19 aufgefallen. Es wurden Kraft-Zeit- und Verschiebung-Zeit-Kurven aufgezeichnet. Die Synchronisierung erfolgte im Nachhinein manuell anhand des Bruchzeitpunktes. Mit dem Video-Extensometer war noch keine Erfahrung im Umgang und der Bedienung vorhanden. Erst bei der genauen Auswertung zeigte sich, dass das Verschiebungssignal stark verrauscht war. Dazu wurden demonstrativ für Probe 6 auch die Rohdaten in Abbildung 19 eingetragen. Alle anderen Kurven sind mit MATLAB[®] geglättet worden. Bei der Glättung werden Messpunkte mit großer Abweichung und jene geringer Messpunktdichte ignoriert. Dies führt zu dem Nachteil, dass kurz vor dem Versagen die Dehnungswerte abgeschnitten und somit in der Darstellung verfälscht wurden. Die Stärke der Glättung beeinflusst die Krümmung der Kurven. Erwartet wurde ein degressives Verhalten. Proben 2 und 3 zeigen allerdings ein progressives Verhalten.

Die Gleichungen zur Auswertung der Daten sind [13, Abschnitt 9] entnommen worden. Der Schubmodul wurde mit einer Regressionsgerade im Bereich von 1,5 bis 2 % Schubdehnung ermittelt um den Effekt der Lagerung auszuschließen. Bei der

Mittelung wurde Probe 6 nicht mitberücksichtigt. Sie passt qualitativ sehr schlecht zu den restlichen Proben. Aufgrund des stark verrauschten Signals und durch die Glättung weist der Schubmodul eine große Standardabweichung auf.

Die Kraftmessung war hingegen unproblematisch, deswegen sind die Schubfestigkeitswerte ohne Einschränkung gültig. Tabelle 2 fasst die Messergebnisse des TAST zusammen.

Alle Bruchflächen zeigen Adhäsionsbrüche (siehe Abbildung 20).

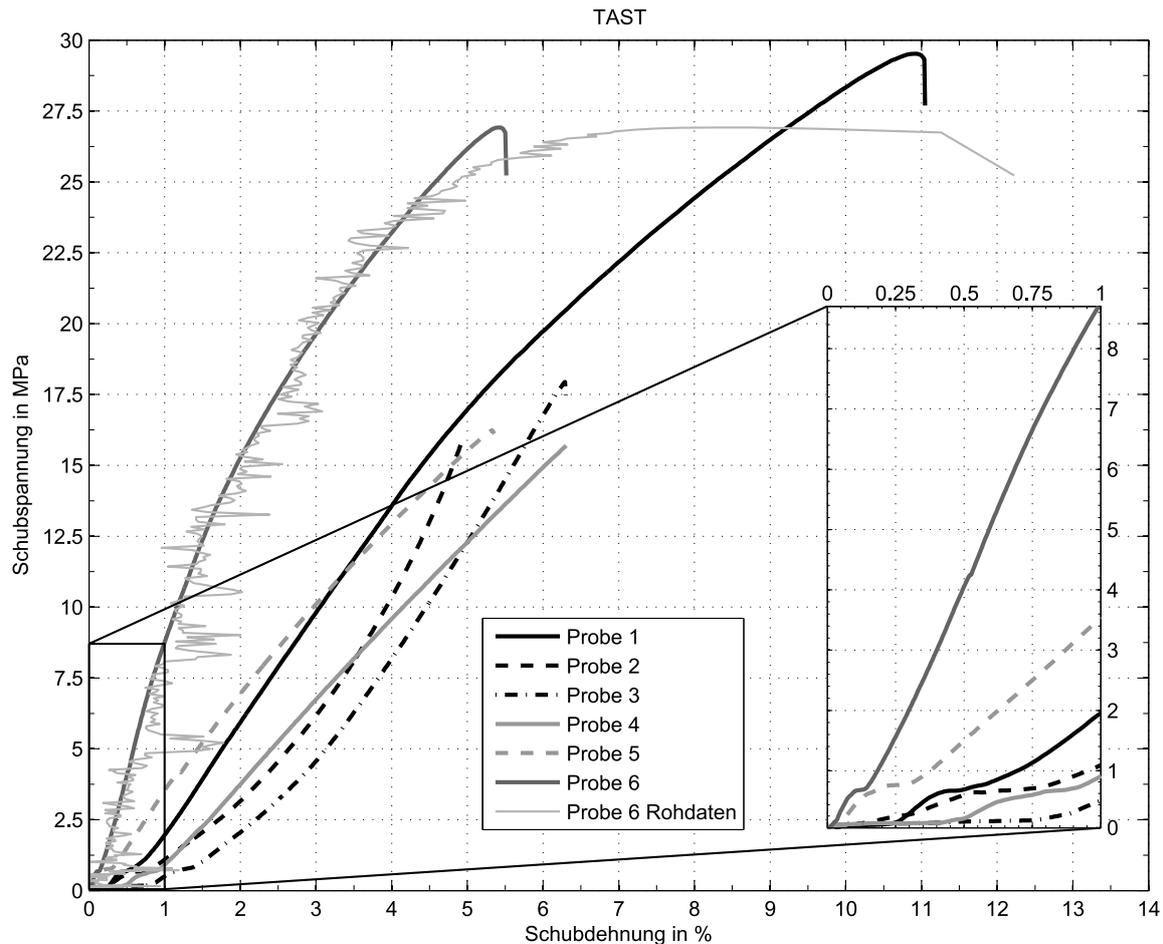


Abbildung 19: TAST Ergebnisse. Mittlere Schubspannung versus Schubdehnung im Klebstoff gemessen mit dem Video-Extensometer.

3.1.3 End notched flexure (ENF)

In einer Dreipunkt-Biege-Vorrichtung wird eine speziell vorbereitete Probe eingelegt. Sie besteht aus zwei miteinander verklebten Fügeteilen mit rechteckigem Querschnitt (Breite $B \times$ Dicke t), wobei einseitig ein künstlich geschaffener Anfangsriss mit der Länge a_0 von einem Auflager ausgeht. Abbildung 21 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Tests und der Probe. Dabei stellt die graue Fläche die Klebschicht mit ihrer Dicke η dar. Der Zweck dieser Probe ist die Bestimmung der kritischen Energiefreisetzungsrate

Tabelle 2: Messwerte des TAST. MW = Mittelwert, SAW = Standardabweichung, Min = Minimum und Max = Maximum der geprüften Proben. * Probe 6 wurde nicht für die Auswertung herangezogen.

Größe	MW	SAW	Min	Max	Einheit
Überlapplänge	4,71	0,27	4,19	4,91	mm
Klebschichtdicke	0,24	0,08	0,13	0,34	mm
Probenbreite	24,93	0,00	24,93	24,93	mm
Schubmodul*	294,72	81,97	208,25	400,60	MPa
Schubfestigkeit	20,41	6,16	15,70	29,52	MPa



Abbildung 20: Bruchflächen der geprüften Proben.

unter reiner Mode II-Beanspruchung \mathcal{G}_s^c . Der Stempel an der Oberseite wird um die vertikale Verschiebung v bewegt und drückt mit der Kraft P auf die Probe, was eine asymmetrische Durchbiegung zur Folge hat. Es verschieben sich die beiden Platten am freien Ende horizontal gegeneinander, was eine Scherbelastung an der Risspitze ohne große Reibung zwischen den Rissoberflächen verursacht. Ab einer bestimmten Last fängt der Riss an zu wachsen und wird zirka unter dem Belastungspunkt oder etwas rechts davon stehen bleiben, auch sofern die Belastung weiter gesteigert wird und die Durchbiegung v zunimmt.

Probenauslegung. Obwohl ENF-Tests sehr gängig sind zur Charakterisierung des interlaminaren Bruchs bei faserverstärkten Kunststoffen, gibt es bisher für verklebte Füge-teile keinen Standard. An dieser Stelle sei die europäische Norm DIN EN 6034 [16] für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe erwähnt. Die darin festgelegten Probenabmessungen wurden als erste Anhaltswerte herangezogen: $a_0 = 35$ mm, $2L = 100$ mm und $t = 3$ mm.

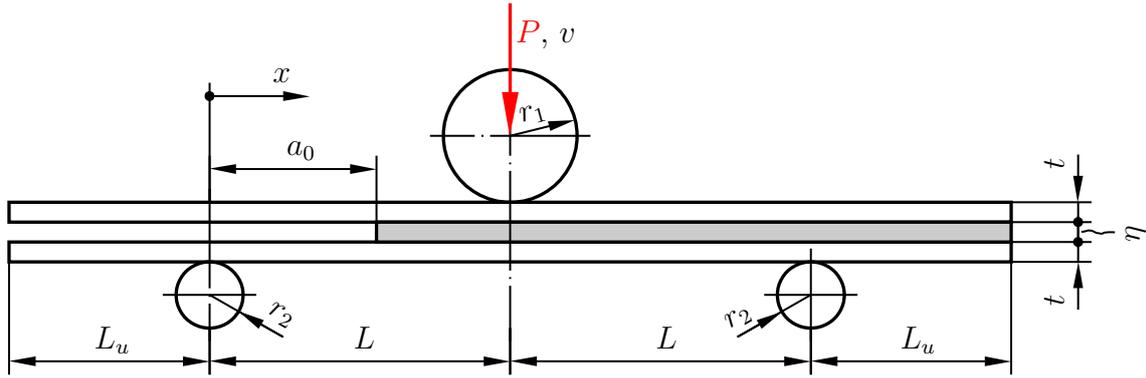


Abbildung 21: Schema des ENF-Tests. Die Klebschichtdicke η wurde übertrieben dargestellt.

An den Fügeiteilwerkstoff wird die strenge Forderung gestellt die ENF-Probe so stark zu biegen, dass der Riss zu wachsen beginnen kann. Die Durchbiegung darf keine Schädigung in den Fügeiteilen hervorrufen. Energie darf ausschließlich im Klebstoff dissipiert werden. Zusätzlich soll der Werkstoff leicht verfügbar, einfach zu ver- und bearbeiten und kostengünstig sein. Für die Probenauslegung sind in Tabelle 3 Literaturwerte des Klebstoffs aufgelistet. Es wurde angenommen, dass sich der ausgehärtete Klebstoff isotrop verhält und somit der Schubmodul $G_K = \frac{E_K}{2(1+\nu_K)} = 821,43 \text{ MPa}$ errechnet. Die Klebschichtdicke η wurde auf 0,2 mm festgesetzt, einem fertigungstechnisch erzielbaren Wert.

Zur Untersuchung mit der Finite Elemente Methode stehen die Parameter L, t, a_0 der ENF-Probe und die Auswahl eines geeigneten Fügeiteilwerkstoffs.

Tabelle 3: Daten zur Vorauslegung für UHU Plus Endfest 300. Werte markiert mit * entstammen [17, Table 1, Table 4], ** aus dem Datenblatt (Zeile Zugscherfestigkeiten).

E_K in MPa	ν_K in 1	σ_m in MPa	τ_m in MPa	\mathcal{G}_n^c in N/mm	\mathcal{G}_s^c in N/mm
2300*	0,4*	29*	17**	0,4*	0,9*

In Betracht stehen zuerst homogene isotrope Metalle, wie Stahl und Aluminium-Legierungen und gegebenenfalls noch unidirektional (UD) faserverstärkte Kunststoffe, beispielsweise GFK. Typische elastische Eigenschaften dieser Werkstoffe sind in Tabelle 4 zusammengestellt. $X^{(c)}$ und $X^{(t)}$ sind die Faserbruchfestigkeiten unter Druck- und Zugbeanspruchung.

Für die Klebschicht wird der Kontinuumsansatz aus Abschnitt 2.2.2 mit bilinearem Kohäsivzonenmodell angewendet. Bedingung (4) wird von den Klebstoffdaten aus Tabelle 3 erfüllt. Den Fügeiteilen wird isotropes linear elastisches Materialverhalten zugewiesen unter Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes. Dies gilt auch für den UD GFK-Werkstoff, da bei der Biegedeformation der E-Modul in Faserlängsrichtung

Tabelle 4: Werkstoffdaten für Fügeiteile.

UD Glasfaser/Epoxidharzverbund [18, Table C.1, Table C.3]					Aluminium-Le- gierung [19, 2.1]		Stahl	
E_1	E_2	ν_{12}	$X^{(c)}$	$X^{(t)}$	E	ν	E	ν
in GPa	in GPa	in 1	in MPa	in MPa	in GPa	in 1	in GPa	in 1
45,6	16,2	0,28	800	1280	70,07	0,30	210	0,30

ausschlaggebend ist. Die Finite Elemente Analyse erfolgte verschiebungsgesteuert mit nichtlinearer Geometrie und reibungsfreiem Kontakt zwischen allen freien Oberflächen mittels Newton-Raphson-Verfahren. Abbildung 22 zeigt repräsentativ ein Rechenmodell, wobei links das Festlager und rechts das Loslager definiert wurde. Die Klebschichtelemente messen $0,2 \times 0,5$ mm. Die Abmessungen der ENF-Probe aller hier dargestellten Ergebnisse entsprechen $L_u = 15$ mm, $2L = 200$ mm, $t = 3$ mm, $\eta = 0,2$ mm und $a_0 = 60$ mm.

Es traten numerische Probleme für den Solver auf. Zunächst wurde versucht kleine Inkremente zu verwenden und geprüft wie viele Kohäsivzonenelemente (COH-Elemente) sich in der Prozesszone befanden. Hier führte alleine schon eine kleinere Inkrementierung mit Verschiebungssteuerung zum Ziel. Weiters gibt es noch die Möglichkeit der numerischen Dämpfung mit dem Befehl STABILIZE und speziell die COH-Elemente bieten noch die viskose Dämpfung als Option. Testweise wurde auch der Riks-Algorithmus ausprobiert, aber ohne Erfolg. Es sei noch darauf hingewiesen, dass STABILIZE sich nicht in Verbindung mit dem Riks-Algorithmus verwenden lässt.

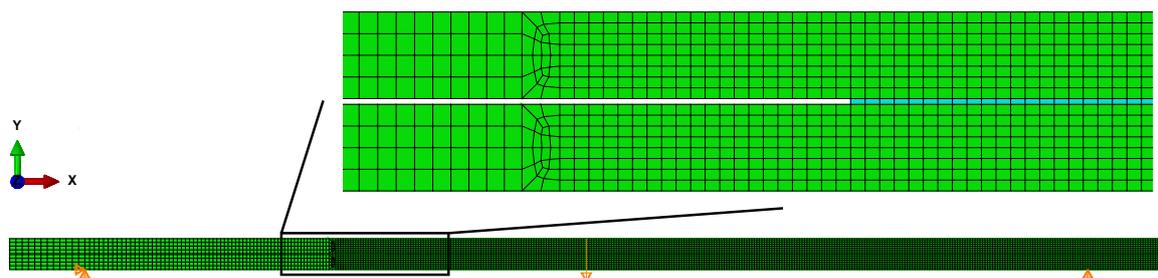


Abbildung 22: Finite Elemente Modell zur Auslegung der ENF-Probe mit $2L = 200$ mm, $L_u = 15$ mm, $t = 3$ mm, $\eta = 0,2$ mm und $a_0 = 60$ mm. In grün CPE4- und cyan COH2D4-Elemente.

Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen Spannungsplots wenn die globale Schädigungsvariable in den COH-Elementen unterhalb der Last zum ersten Mal 1 wird. Dies entspricht einer Rissverlängerung von $\Delta a = 40$ mm. In den Abbildungen ist die Risspitze nicht ganz korrekt dargestellt.

Es stellte sich heraus, dass sich für gewöhnliche Aluminium-Legierungen und Stähle

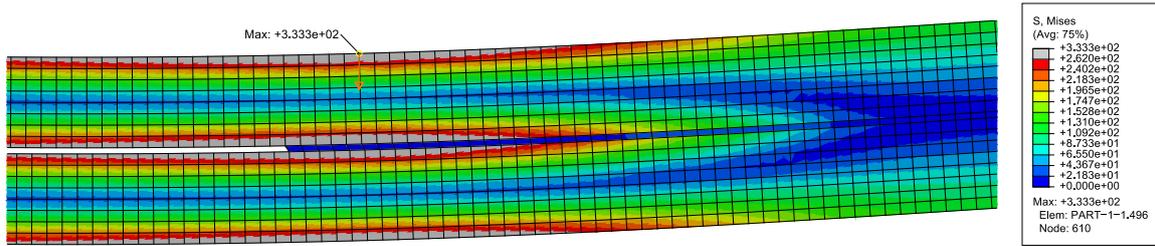


Abbildung 23: ENF-Probe aus Aluminium-Fügeteilen. Von Mises-Vergleichsspannung.

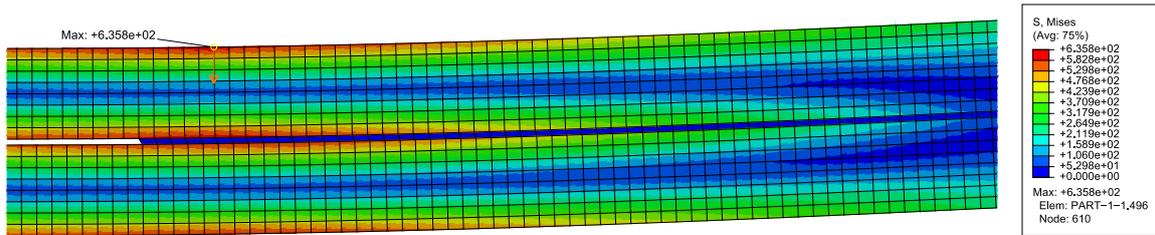


Abbildung 24: ENF-Probe aus Stahl-Fügeteilen. Von Mises-Vergleichsspannung.

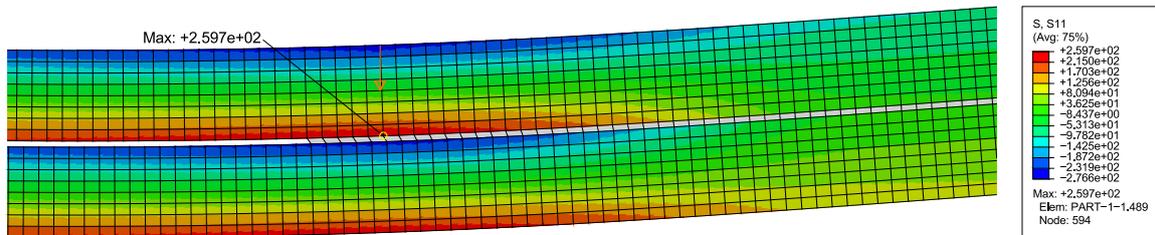


Abbildung 25: ENF-Probe aus UD GFRK-Fügeteilen. Spannungskomponente in Faserrichtung.

keine sinnvollen Werte im Bereich $100 \leq 2L \leq 300$ mm und $1,6 \leq t \leq 10$ mm finden ließen. Die Randfaserspannungen erreichten schon bei geringen Durchbiegungen hohe Werte, was kostspielige Legierungen mit hoher Streckgrenze erfordern würde. Zum Beispiel beträgt die Streckgrenze der Aluminium-Legierung AA6082 T651 $261,67 \pm 7,65$ MPa und die Zugfestigkeit $324,0 \pm 0,16$ MPa [19, 2.1]. Die Streckgrenzen von besseren Baustählen reichen bis ungefähr 355 MPa. Es kommt zum Plastizieren der Fügeteile, bevor der Riss ein Stück wachsen kann. Dabei darf nicht vergessen werden, dass die Klebstoffdaten eine gewisse Unsicherheit aufweisen und der Kleber in [17] mit abweichendem Massenmischungsverhältnis Härter : Binder = 50 : 100 angefertigt wurde. Variation von a_0 führte bei diesen Werkstoffen zu keiner brauchbaren Probenauslegung.

Wesentlich besser eignen sich Fügeteile aus unidirektional Glasfaser verstärktem Kunststoff. Sie weisen einen geringen E-Modul in Faserrichtung E_1 auf, sind deswegen sehr gut verformbar und zeigen hohe Faserbruchfestigkeiten unter Druckbeanspruchung $X^{(c)}$. Bei Faserverbundwerkstoffen ist die Druckfestigkeit kritischer als die Zugfestigkeit der Fasern. Faserbruch im Druckbereich tritt zuerst auf. Abbildung 26 zeigt die Deformationsfigur bei 12 mm Durchbiegung.

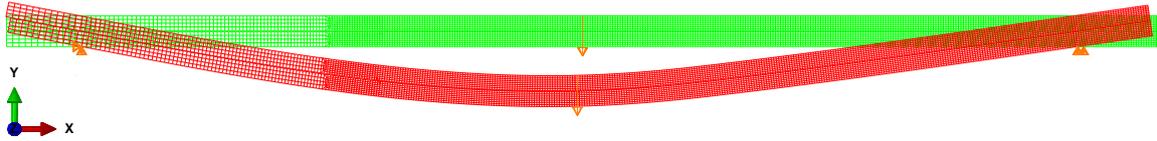


Abbildung 26: Deformation der ENF-Probe. Grün: undeformiert, Rot: Verformt bei 12 mm Durchbiegung.

In weiterer Folge wird nur noch der GFK-Fügeteilwerkstoff verwendet. In Abbildung 27 ist das Last-Verschiebungsdiagramm des Lastangriffspunktes zu sehen. Neben der Finite Elemente Lösung existiert noch eine analytische Lösung aus der Balkentheorie für sehr dünne Klebschichten. Sie wird als Corrected beam theory bezeichnet (CBT). Details zur Corrected beam theory finden sich im Anhang A. Abbildung 27 zeigt, dass die Finite Elemente Lösung gerade im Bereich des Lastmaximums einen Unterschied zur Vertikalverschiebung der Corrected beam theory

$$v = \begin{cases} P \frac{2L^3 + 3(a_0 + 0,42\chi t)^3}{96E_1I} & \text{für } 0 \leq v \leq v_c \quad (5a) \\ \frac{1}{96E_1I} \left[2L^3P + \frac{3}{P^2} \left(\frac{64BE_1IG_s^c}{3} \right)^{3/2} \right] & \text{für } v > v_c \quad (5b) \end{cases}$$

aufweist. Dies ist vorteilhaft, weil somit der Abfall nach dem Lastmaximum nicht senkrecht verläuft und der Riss stabil wächst. Der Korrekturfaktor für die Risspitze ergibt

$$\chi = \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad \text{und} \quad \Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1E_2}}{G_{13}}. \quad (6)$$

B ist die Probenbreite, $I = \frac{Bt^3}{12}$ und v_c ist jene Durchbiegung bei der der Riss zu wachsen beginnt. Dieser Wert ist sogleich der Schnittpunkt von Gleichung (5a) und (5b). In Abbildung 27 ist Gleichung (5a) als CBT 1 und Gleichung (5b) als CBT 2 eingezeichnet. Dabei wurde $G_{13} = \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})}$ verwendet.

Abbildung 28 zeigt die Entwicklung der Prozesszone, den Beginn des Risswachstums und stellt klar, dass sich eine extrem lange Prozesszone - nämlich 15 mm vor der Risspitze - ausbildet. Diese Tatsache führt schon vor Erreichen des Lastmaximums im Last-Verschiebungsdiagramm zu einem nichtlinearen Zusammenhang.

Der Einsatz der Glasfaserfügeteile erlaubt einen größeren gestalterischen Spielraum. Deshalb wurden Maße aus [20, Page 6] herangezogen, wo auch an einem unbekanntem Klebstoff ein ENF-Test vollzogen wurde. Festlegung der Probengeometrie entsprechend Abbildung 21:

- $a_0 = 60$ mm. Für sehr dünne Schichten existiert ein Risswachstumsstabilitätskriterium $a_0 \geq L/3^{1/3} \approx 0,7L$ [21, Gl. (13.17)]. Dieses wurde für die

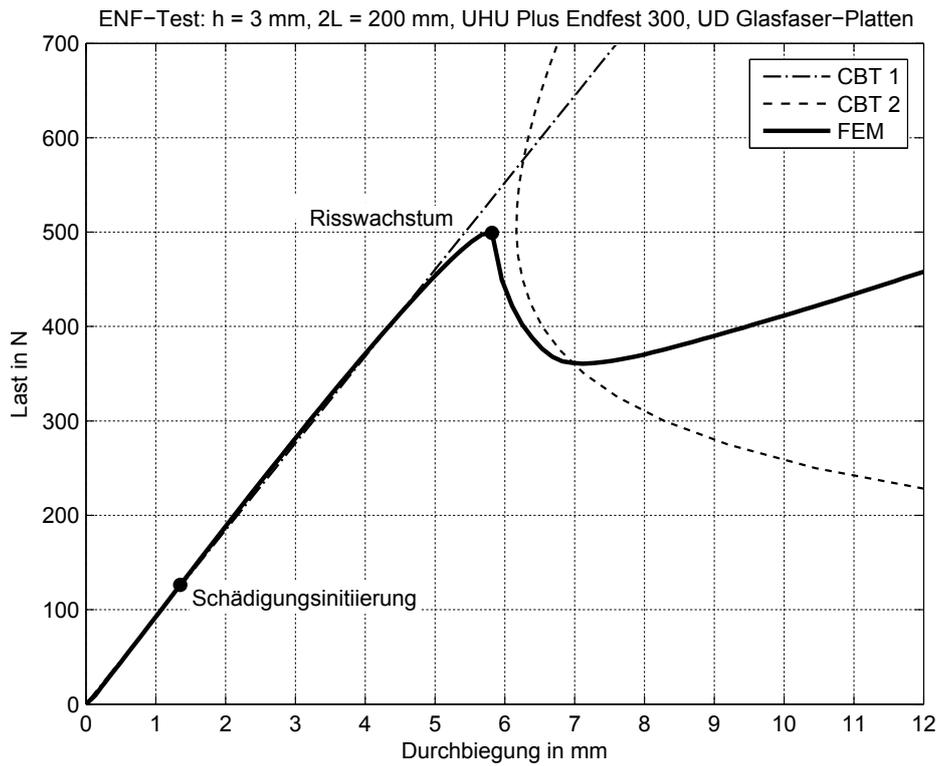


Abbildung 27: Last-Verschiebungsdiagramm. Reaktionskraft und Vertikalverschiebung am Mittelknoten zwischen den Auflagern.

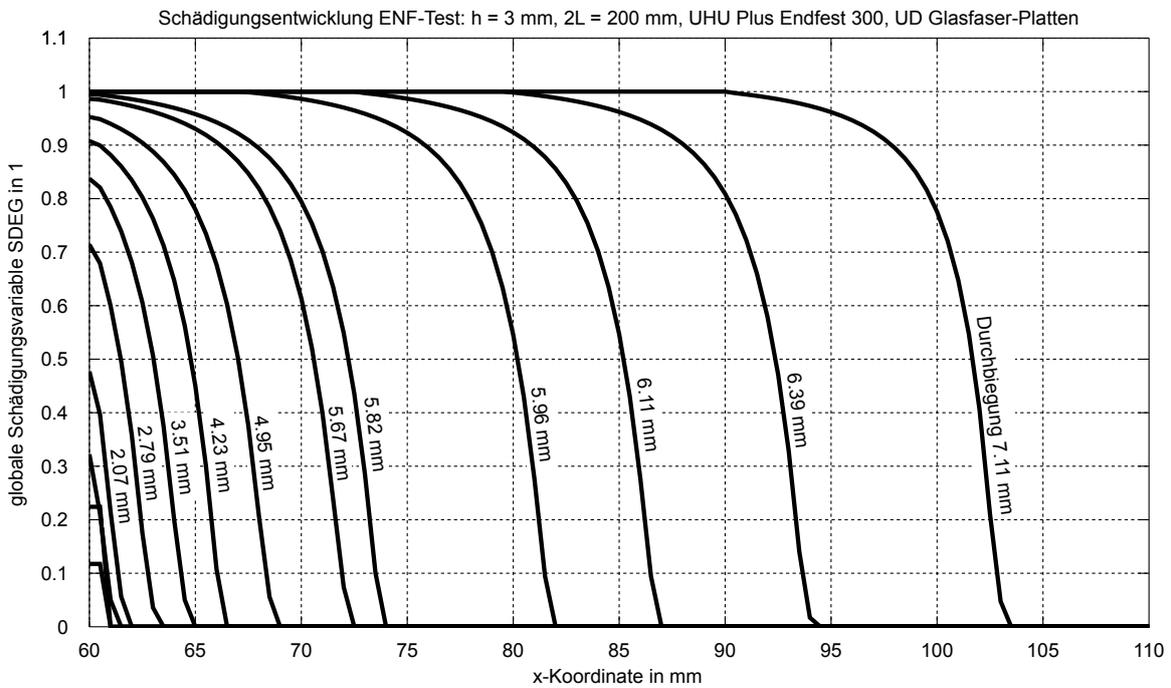


Abbildung 28: Ausbildung und Größe der Prozesszone.

Probenabmessungen der Norm DIN EN 6034 [16] angewendet. Bei Klebverbindungen hingegen wurde bereits beobachtet, dass auch Anfangsrisse im Bereich $0,4L \leq a_0 \leq 0,5L$ stabil wachsen können [14, 3.2.2.2].

- $2L = 200$ mm und $t = 3$ mm. Ausschlaggebend war ein großes Verhältnis L/t zu erzielen, um geometrische Nichtlinearitäten klein zu halten. t wurde auch nicht zu klein angesetzt, damit mindestens 2 unidirektionale Glasfaserlagen das Füge teil bilden.
- $L_u = 40 + 20 + 15$ mm = 75 mm. 40 mm horizontaler Verschiebeweg für die Compliance calibration, einer Auswertemethode die später erläutert wird. 20 mm zusätzlich für die Größe der Prozesszone (5 mm sind Reserve) und 15 mm damit seitlich ein Überstand bei den Auflagern bleibt.
- $B = 25$ mm. Ein häufiger Literaturwert und kompatibel mit den üblichen Dreipunkt-Biege-Vorrichtungen.

Probenfertigung. Die Füge teile aus Abschnitt 3.2 wurden weiterverarbeitet. Einseitig wurden die Seitenflächen der GFK-Platten schwarz lackiert, für eine spätere optische Messung der Klebschichtdicke. Beide Fügeflächen wurden mit Nassschleifpapier der Körnung 120 aufgeraut und anschließend mit Ethanol gereinigt. Beide Flächen wurden mit Klebstoff bestrichen. Um eine definierte Anfangsrisslänge zu erzeugen wurde eine sehr dünne LDPE-Folie einseitig eingelegt und für die Gewährleistung einer Mindestklebschichtdicke wurden noch 2 Kupferlitzen mit Durchmesser 0,2 mm längs eingefügt (siehe Abbildung 29). Die zusammengefügte Platten kamen, mit Gewichten beschwert, für 3 Stunden bei 45 °C in den vorgeheizten Ofen. Danach kühlten die Proben an der Umgebungsluft ab. Einen Tag nach der Ofenentnahme kamen alle Proben unter das Lichtmikroskop zur Vermessung der Klebschichtdicke. Danach wurde der seitlich ausgelaufene Klebstoff mit Nassschleifpapier entfernt, die Seitenflächen mit dem Lackstift edding 751 weiß lackiert und eine Markierung für das Ende der eingelegten Folie angebracht. Der weiße Lackstift erzeugt eine sprödere Lackschicht, wodurch der Riss bei späterer Belastung deutlicher sichtbar wurde.

Insgesamt wurden 7 Proben am 17. und 18.07.2018 gefertigt. Die Probenbezeichnung setzt sich zusammen aus den beiden Nummern der miteinander verklebten GFK-Platten. ENF-Proben 1+2, 3+4, 5+6, 7+8 und 9+10 bilden die 1. Charge, sowie 11+12 und 13+14 die 2. Charge.

Verwendete Geräte. Für die Klebschichtdickenmessung wurde das Zeiss Stereomikroskop 2000-C mit angeschlossener Zeiss AxioCam ERc 5s und Beleuchtung Zeiss KL 1500 LCD bei eingestellter Farbtemperatur 3000 K verwendet. $2L$ und a_0 wurde



Abbildung 29: Fertigung der ENF-Proben. Oben sind bereits beide Fügeteile zu einer Probe verbunden, darunter liegen zwei Platten mit Klebstoff bestrichen. Der Pfeil markiert eine Kupferlitze.

millimetergenau eingestellt. Die restlichen Maße wurden mittels eines digitalen Messschiebers mit einer Genauigkeit von zwei Nachkommastellen bestimmt. Es kam die Prüfmaschine Zwick Z250 gemeinsam mit einer 10 kN Kraftmessdose, zwei symmetrischen Auflagern $r_1 = 10$ mm und einer Druckfinne $r_2 = 5$ mm zum Einsatz (siehe Abbildung 30).

Die Prüfgeschwindigkeit \dot{v} wurde so gewählt, dass sich dieselbe Randfaserdehnrate $\dot{\epsilon}$ wie in der Norm DIN EN 6034 [16] ergab. h ist die Gesamtdicke, also $2t = 2 \cdot 3,35$ mm (Klebschichtdicke vernachlässigt). $\dot{v}_{Norm} = 1$ mm/min, $2L_{Norm} = 100$ mm, $h_{Norm} = 3$ mm.

$$\dot{\epsilon} = \frac{6\dot{v}h}{4L^2} \quad \Rightarrow \quad \dot{v} = \dot{v}_{Norm} \frac{h_{Norm}}{h} \frac{L^2}{L_{Norm}^2} = 1,791 \text{ mm/min.} \quad (7)$$

Somit wurde eine Prüfgeschwindigkeit von 1,8 mm/min eingestellt.

Auswertung.

- *Flächenmethode:* Wie schematisch Abbildung 31 zeigt, wird ein kompletter Be-/Entlastungszyklus durchlaufen. Der Belastungspfad mit der künstlich geschaffenen Anfangsrislänge a_0 entspricht der Kurve 0A. Ab Erreichen der Maximallast bei Punkt A fängt der Riss an zu wachsen und wächst zwischen Punkt A und B um die Länge Δa . Danach wird entlang von B0 entlastet. Im Falle von linear elastischem Materialverhalten und geringen Durchbiegungen sind die Kurven 0A und B0 Geradenstücke. Die eingeschlossene Fläche ΔA ist

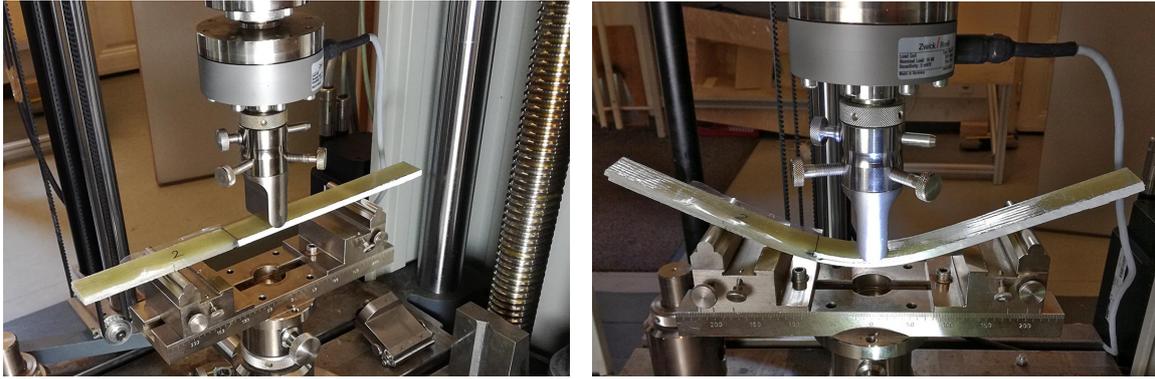


Abbildung 30: Versuchsanordnung des ENF-Tests. Links vor und rechts während der Belastung.

jene dissipierte Energie um den Riss um Δa zu verlängern und die kritische Energiefreisetzungsrate ergibt sich damit zu $\mathcal{G}_i^c = \frac{1}{B} \frac{dA}{da} \approx \frac{1}{B} \frac{\Delta A}{\Delta a}$. Zuletzt steht kein Gleichheitszeichen, da eine Mittelung über die finite Rissverlängerung Δa erfolgt. Voraussetzung ist, dass sich die Füge­teile rein elastisch deformieren.

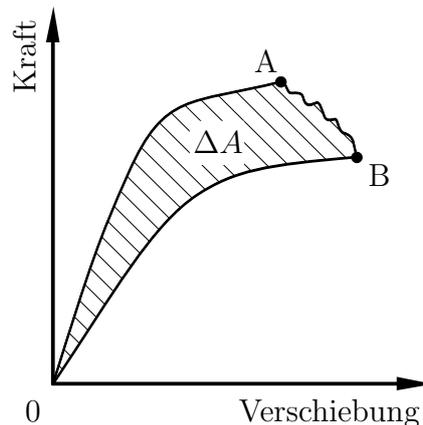


Abbildung 31: Flächenmethode zur Ermittlung von \mathcal{G}_i^c . Angelehnt an [22, Fig. 8].

Diese Methode findet sich auch in der Norm DIN EN 6033 [23, Abschnitt 9] für den DCB-Test wieder.

- *Simple beam theory* (SBT): Die Basis bildet die Gleichung

$$\mathcal{G}_i = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (8)$$

mit der Nachgiebigkeit $C = \frac{v}{P}$ [21, Gl. (2.49)]. Aus der Bernoulli-Balkentheorie ergibt sich für die ENF-Probe der Ausdruck

$$C = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_1 B t^3} \quad (9)$$

[21, Gl. (13.14)] und damit $\mathcal{G}_s = \frac{9a^2P^2}{16EB^2t^3}$. Daraus folgt die kritische Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_s^c , wenn für a die Anfangsrisslänge a_0 und für P jene Last eingesetzt wird, bei der der Riss zu wachsen beginnt. Für die spätere Auswertung wurde noch etwas umgeformt und

$$\mathcal{G}_s^c = \frac{9a_0^2P_c v_c}{2B(2L^3 + 3a_0^3)} \quad (10)$$

verwendet.

- *Corrected beam theory* (CBT): Ausgehend von der Simple beam theory wird hier ein Korrekturwert für die Risslänge verwendet. Nimmt man Gleichung (9) und das vorherige Ergebnis von \mathcal{G}_s und ersetzt darin a durch den Term $(a + 0,42\chi t)$, dann ergibt sich

$$C = \frac{2L^3 + 3(a + 0,42\chi t)^3}{8E_1Bt^3} \quad \text{und} \quad \mathcal{G}_s = \frac{9(a + 0,42\chi t)^2P^2}{16E_1B^2t^3}, \quad (11)$$

mit χ aus Gleichung (6). [24, Section 2.2], [20, Eq. (11)-(13)]

Für die Auswerteformel ergibt sich dann

$$\mathcal{G}_s^c = \frac{9(a_0 + 0,42\chi t)^2P_c v_c}{2B(2L^3 + 3(a_0 + 0,42\chi t)^3)}. \quad (12)$$

- *Compliance calibration* (CC): Eine ENF-Probe wird in mindestens 3 unterschiedlichen Lagen in die Dreipunkt-Biegevorrichtung eingelegt. Die Probe wird mittig zwischen den Auflagern mit einer Kraft belastet und ein Last-Verschiebungsdiagramm aufgezeichnet. Nach einer Entlastung gelangt die Probe durch horizontales Verschieben in der Vorrichtung von einer zur nächsten Lage und der Vorgang wird wiederholt [25, Page 5]. Deshalb wurde bei der Probenauslegung für den Überhang L_u ein Wert von 40 mm berücksichtigt. Dabei sollte die Probe in keinem Belastungsvorgang beschädigt werden (siehe Abbildung 32 links und Mitte).

Aus den Last-Verschiebungslinien werden die jeweiligen Nachgiebigkeiten $C_l = \frac{v}{P}$ errechnet. Index $l = \{1, 2, 3, \dots\}$ kennzeichnet die Lage mit der entsprechenden Nummer. Somit kann den Nachgiebigkeiten eine Anfangsrisslänge zugeordnet werden, da der Abstand vom linken Auflager zur Anfangsrisssspitze in jeder Lage immer anders ist. Es zeigt sich, dass ein linearer Zusammenhang über die Ausgleichsfunktion

$$C(a) = H + ma^3 \quad (13)$$

existiert, wenn man in einem Diagramm die Nachgiebigkeiten über die Risslänge

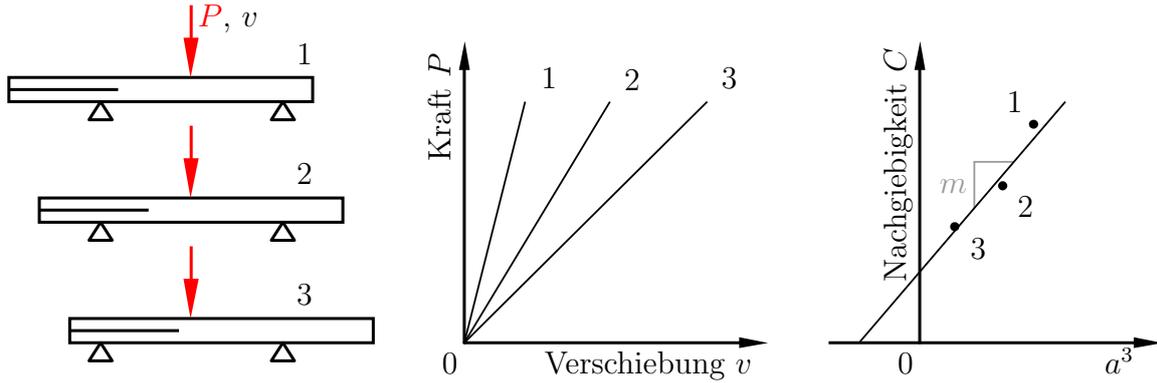


Abbildung 32: Prinzipieller Ablauf der Compliance calibration.

zur dritten Potenz a^3 einträgt (siehe Abbildung 32 rechts). H und m sind die zu bestimmenden Konstanten [8, Eq. (6.32)], [25, Eq. (1)]. Gleichung (13) kann nun verwendet werden um in Gleichung (8) die Ableitung auszuführen. Dies führt auf

$$\mathcal{G}_s^c = \frac{3P_c^2 a_0^2}{2B}. \quad (14)$$

Vorteil der Compliance calibration gegenüber anderen Auswerteverfahren ist, dass die Risslängen vordefiniert sind und nicht während der Belastung mitgemessen werden müssen. Es wurden fünf Positionen festgelegt, sodass sich $a_0 = \{30, 45, 60, 75, 90\}$ mm ergeben.

Die Hauptschwierigkeit besteht in der Praxis darin, die aktuelle Risslänge messtechnisch zu erfassen.

Ergebnisse. In Tabelle 5 sind in der ersten Spalte die ENF-Probennummern aufgelistet. Die Breite B und die Klebschichtdicke η wurden an drei unterschiedlichen Positionen entlang der Probenlänge gemessen: Links, mittig und rechts. Anschließend erfolgte für jede Probe eine Mittelung und in der letzten Zeile finden sich die Mittelwerte über alle Proben. Ein Mikroskopbild von der Klebschicht bei der Dickenmessung zeigt Abbildung 33. Die Probenlänge $2L$ beträgt 200 mm und die Überhänge $L_u = 75$ mm.

Zuerst wurde ENF-Probe 1+2 am 25.07.2019 mit $a_0 = 60$ mm eingelegt und bis zu 30 mm Durchbiegung belastet, bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 1,8 mm/min. Anschließend wurde wieder entlastet. Dies diente zur Bestimmung der kritischen Last P_c , damit bei der Compliance calibration der anderen Proben noch keine Schädigung oder Risswachstum auftritt (Abbildung 34a). Es gibt daher von Probe 1+2 keine Compliance calibration. P_c betrug 826,3 N bei $v_c = 13,44$ mm Durchbiegung. Die Füge-teile wurden nicht sichtbar bleibend verformt. Mit der Probe 3+4 wurde zu aller erst eine Compliance calibration am 31.07.2019 durchgeführt. Dabei wurde bis

Tabelle 5: Geometrische Messwerte der ENF-Proben, MW = Mittelwert.

ENF	MW B in mm	MW η in mm	Δa in mm			Anmerkung	
			links	rechts	MW		
1+2	25,78	0,256	71,03	71,03	71,03	$a_0 = 70$ mm	
			70,86	56,41	63,64		
3+4	25,73	0,408	76,57	77,77	77,17		
5+6	25,80	0,461	81,25	81,25	81,25		
7+8	25,75	0,511	74,44	75,24	74,84		
9+10	25,71	0,470	9,85	11,46	10,66		1. Messung
			90,61	90,61	90,61		2. Messung
11+12	25,75	0,434	55,70	53,54	54,62		
13+14	25,84	0,458	46,68	62,14	54,41		
MW	25,77	0,428					

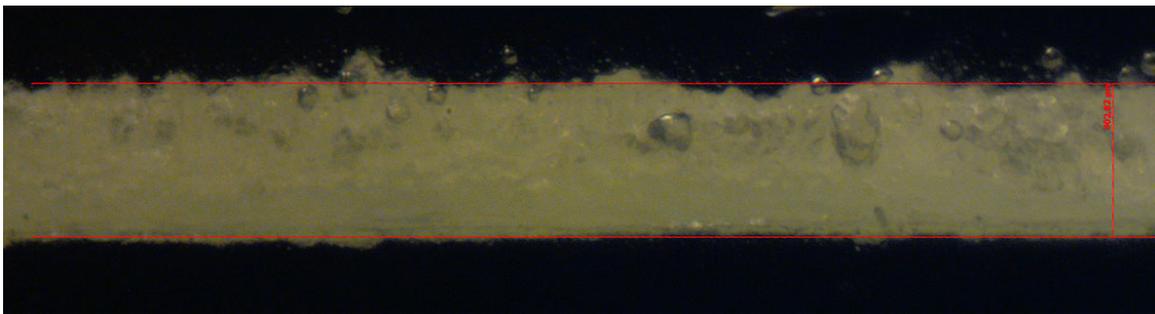


Abbildung 33: Klebschichtdickenmessung unter dem Mikroskop, ENF-Probe 1+2, Messwert: 0,303 mm. Sichtbare Blasen sind an der Oberfläche von seitlich ausgetretenem Klebstoff.

maximal 200 N belastet mit 1,8 mm/min, danach wieder entlastet und dies für alle 5 Positionen von $a_0 = \{30, 45, 60, 75, 90\}$ mm durchgeführt. Danach erfolgte der eigentliche ENF-Test mit $a_0 = 60$ mm und Belastung bis zu einer Durchbiegung von 30 mm. Dann verblieb die Prüfmaschine für 60 Sekunden in dieser Position zur Markierung der Rissspitze. Abschließend wurde entlastet. Auf Basis dieser beiden Proben wurde ein Belastungszyklus aller weiteren Proben definiert. Für die Compliance calibration Methode wurde eine maximale Last von 200 N gewählt.

1. Compliance calibration: Belastung bis 200 N mit 1,8 mm/min, danach wieder entlasten und für alle 5 festgelegten Positionen von a_0 durchführen.
2. Belastung in der Position $a_0 = 60$ mm bis zu einer Durchbiegung von 17 mm mit 1,8 mm/min. Bei den beiden anfangs getesteten Proben kam es zu instabilem Risswachstum bei 13,44 und 13,38 mm Durchbiegung. Es wurde nur mehr bis

17 mm Durchbiegung getestet, weil bei fortgesetzter Durchbiegung der Riss nicht weiterwächst. Dann erfolgte eine Pause von 60 Sekunden zur Markierung der Risspitze auf der deformierten Probe.

3. Entlastung.

Alle weiteren ENF-Proben wurden am 02.08.2019 getestet und weisen ein instabiles Risswachstum auf.

Abbildung 34 und 35 zeigt alle gemessenen Last-Verschiebungsdiagramme. Abbildung 34a zeigt noch eine weitere, gestrichelte Linie: Probe ENF 1+2 wurde nochmals mit dem bereits gewachsenen Riss in die Vorrichtung eingelegt, jedoch in der Lage $a_0 = 70$ mm, da die Probe sonst schon zu kurz gewesen wäre. In diesem Fall kommt es nach Erreichen der kritischen Last anfangs zu einem stabilen Risswachstum.

Für die Probe ENF 9+10 wurde auch noch eine zweite Messung gemacht, weil beim ersten Versuch kein großer Kraftabfall bis zu einer Durchbiegung von 17 mm erfolgte (siehe Abbildung 34e). Beim Maximum der durchgezogenen Linie war die Druckfingernposition für 60 Sekunden fixiert. Während dieser Zeit ist die Kraft um 66 N abgefallen. Diese Relaxation führte dazu, dass beim Entlasten die Linie nicht mehr in den Ursprung zurückgekehrt ist. Der zweite Versuch ergab dann ein ähnliches Verhalten wie es auch bei den anderen Proben beobachtet wurde.

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der ersten Charge und der zweiten Charge anhand der Last-Verschiebungsdiagramme, obwohl penibel auf gleiche Fertigungsabfolge, Sauberkeit, Zeitmanagement und Temperaturen geachtet wurde. Der genaue Unterschied zwischen den Chargen ließ sich jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht eruieren, wurde aber später, in Kapitel 5, geklärt.

Die Rissverlängerung Δa wurde an beiden Seitenflächen gemessen und findet sich in der Tabelle 5. Der gemittelte Wert wurde für die weitere Auswertung herangezogen. Weil die Glasfaserplatten lichtdurchlässig sind, zeigt ein Schatten die Rissfläche an (siehe Abbildung 36). Die Schattengrenze stimmt an den Seitenrändern sehr gut mit den gemessenen Werten von Δa überein.

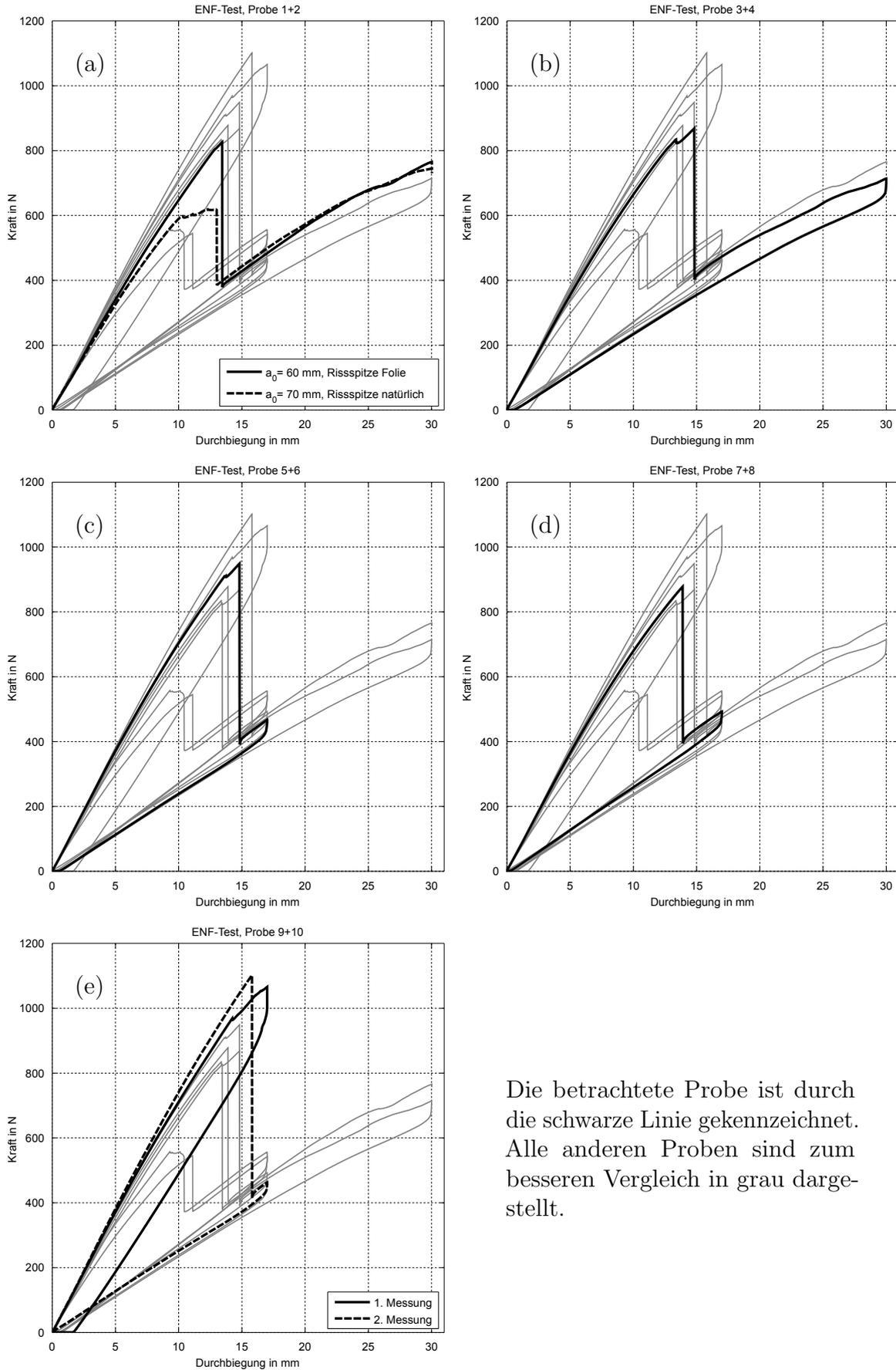
Tabelle 6 zeigt die errechneten Koeffizienten der Ausgleichsfunktion für die Compliance calibration method und Abbildung 37 die Auswertung exemplarisch anhand der Probe 7+8. Alle Messergebnisse der vier Auswerteverfahren finden sich in Tabelle 7. Bei der Mittelwertbildung von \mathcal{G}_s^c wurden die Proben der 2. Charge (Proben 11+12 und 13+14) ausgeschlossen sowie die anderen Ausreißer mit * markiert. Einen grafischen Überblick liefert Abbildung 38. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Flächenmethode und den theoretischen Auswerteverfahren. Der Flächenmethode wird etwas mehr getraut, da hierbei keinerlei Annahmen oder Idealisierungen in den Formeln getroffen werden mussten und eine rein elastische Verformung der GFK-Platten beobachtet wurde.

Tabelle 6: Koeffizienten der ENF-Ausgleichsfunktion (13) und der Qualitätswert R_{adj}^2 .

ENF	3+4	5+6	7+8	9+10	11+12	13+14
H in 10^{-3} mm/N	9,72119	9,30210	9,94305	9,66959	1,09919	9,74424
m in 10^{-8} /mm ² N	1,83233	1,77500	1,72468	1,71519	2,31244	1,98344
R_{adj}^2 in 1	0,99809	0,99730	0,99869	0,98853	0,99378	0,99939

Tabelle 7: ENF-Auswertung $a_0 = 60$ mm. * aus der Mittelwertbildung MW ausgeschlossen.

ENF	P_c in N	v_c in mm	\mathcal{G}_s^c in N/mm aus				Anmerkung
			Fläche	SBT	CBT	CC	
1+2	826,3	13,44	1,83	2,64	2,69	-	
3+4	834,6	13,38	2,14	2,65	2,71	2,68	
5+6	909,2	13,61	2,28	2,94	3,00	3,07	
7+8	877,9	13,90	2,01	2,90	2,96	2,79	
9+10	968,7	14,24	3,55*	3,28	3,35	3,38	1. Messung
	1101,6	15,80	2,53	4,14*	4,23*	4,37*	2. Messung
11+12	544,9	11,10	0,97*	1,44*	1,47*	1,44*	
13+14	557,3	9,29	1,06*	1,23*	1,25*	1,29*	
MW			2,16	2,88	2,94	2,98	



Die betrachtete Probe ist durch die schwarze Linie gekennzeichnet. Alle anderen Proben sind zum besseren Vergleich in grau dargestellt.

Abbildung 34: Last-Verschiebungsdiagramme der 1. Charge ENF-Proben.

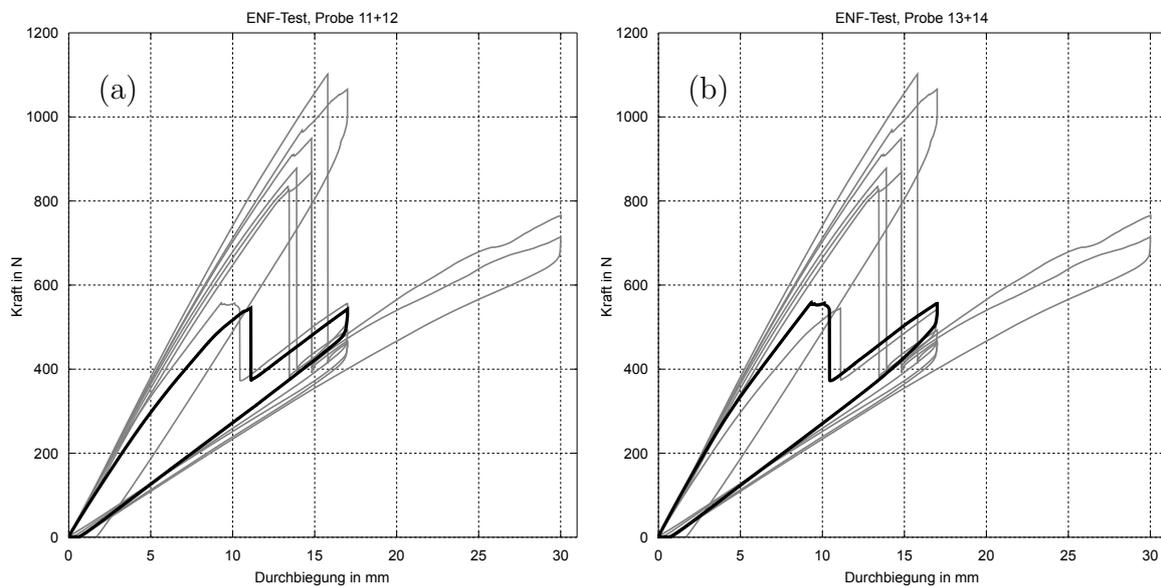


Abbildung 35: Last-Verschiebungsdiagramme der 2. Charge ENF-Proben. Die Darstellung ist analog zu Abbildung 34.

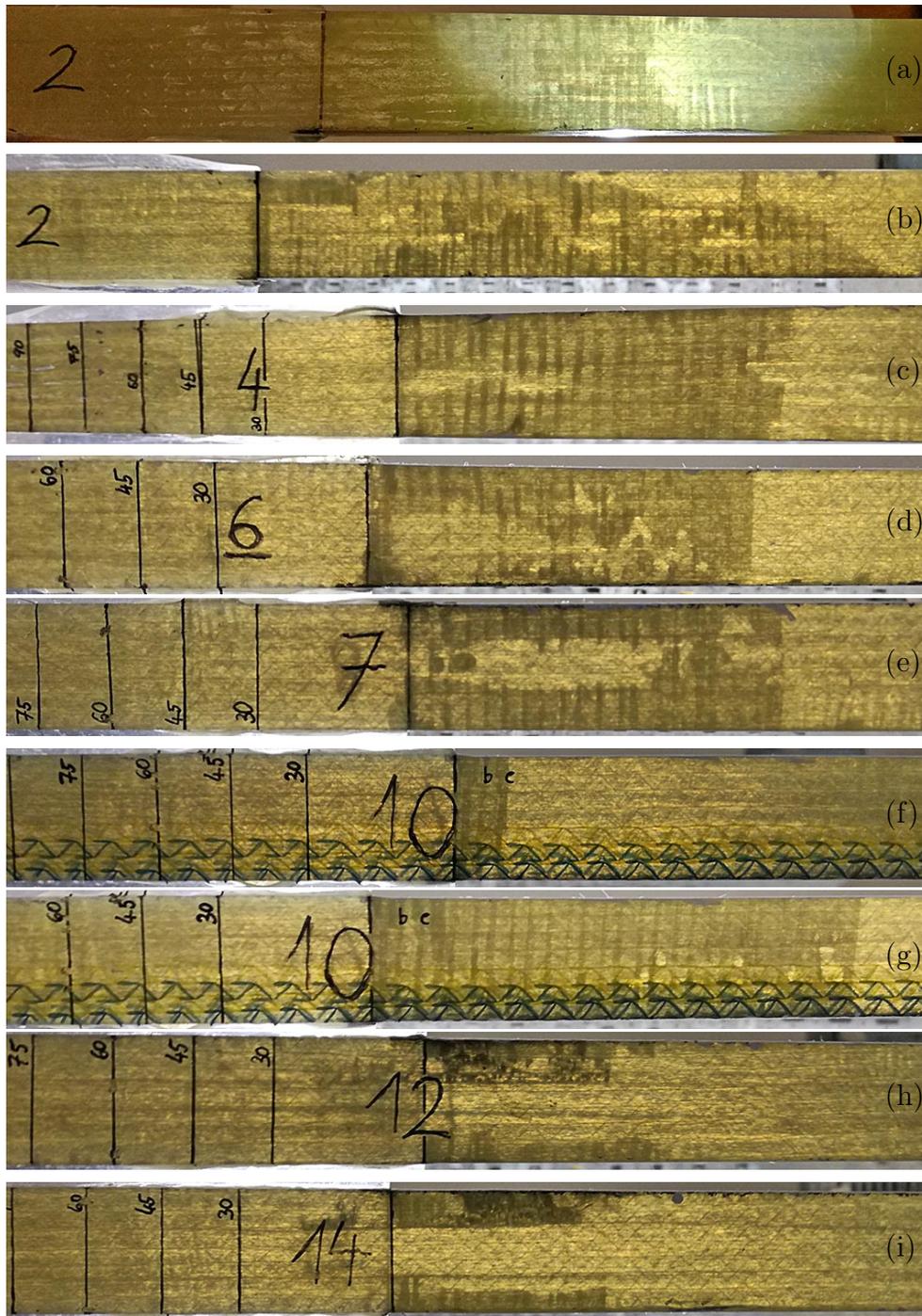


Abbildung 36: Gegenlichtaufnahmen nach jeder ENF-Prüfung im entlasteten Zustand. Die Rissfront ist als Schatten sichtbar.

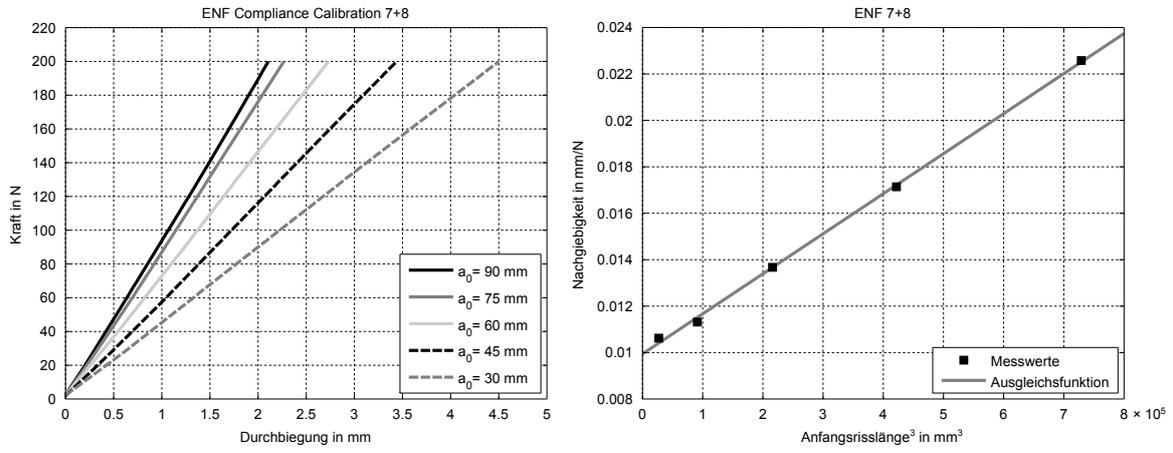


Abbildung 37: Auswertung nach der Compliance calibration method.

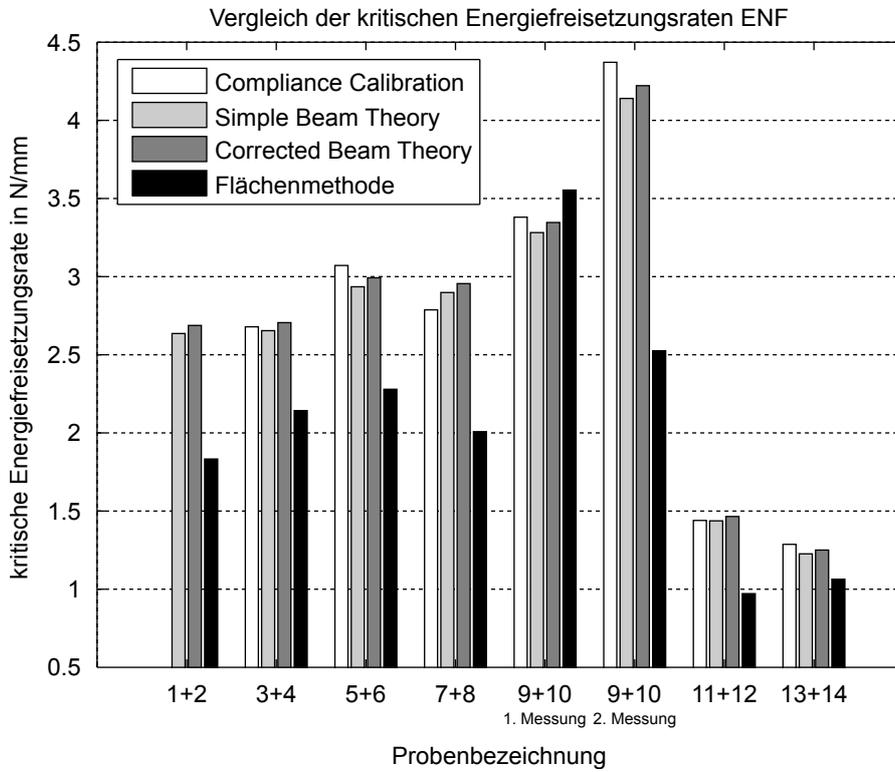


Abbildung 38: Vergleich der Auswertergebnisse für G_s^c .

3.1.4 Double cantilever beam (DCB)

Der Zweck dieses Tests ist die Bestimmung der kritischen Energiefreisetzungsrate unter reiner Mode I-Belastung \mathcal{G}_n^c . Die DCB-Probe besteht aus zwei miteinander verklebten Füge­teilen mit rechteckigem Querschnitt (Breite $B \times$ Dicke t), wobei einseitig ein künstlich geschaffener Anfangs­riss mit der Länge a_0 ausgeht. Eine Zuglast P wird am Ende über zwei Scharniergelenke vertikal einge­leitet und soll so dauerhaft für eine Schälbeanspruchung und eine Aufweitung v des Risses sorgen. Abbildung 39 zeigt das Testprinzip und die Probe. Dabei stellt die graue Fläche die Klebschicht mit ihrer Dicke η dar.

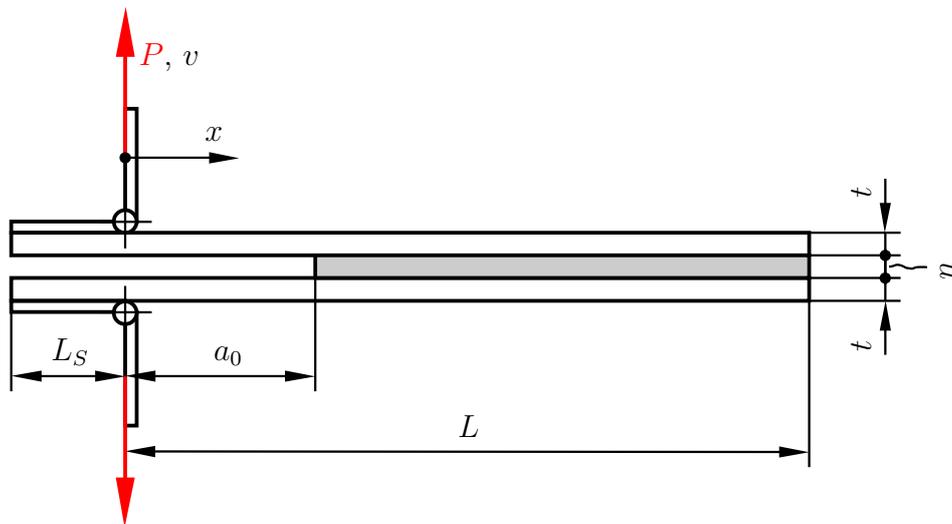


Abbildung 39: Schema des DCB-Tests. Die Klebschichtdicke η wurde übertrieben dargestellt.

Probenauslegung. Der DCB-Test findet sich in der Norm ISO 25217 oder im amerikanischen Standard ASTM D3433. Er wurde später adaptiert für faserverstärkte Kunststoffe, weil der Delaminationsprozess in Verbunden starke Ähnlichkeit mit dem Ablöseprozess von geklebten Metallen aufweist. Für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe existiert die europäische Norm DIN EN 6033 [23]. Trotzdem soll eine Voruntersuchung durchgeführt werden, analog zum ENF-Test im vorangegangenen Kapitel.

An den Füge­teilwerkstoff werden dieselben Forderungen gestellt wie beim ENF-Test. Insbesondere soll der Riss unter rein elastischer Verformung der Platten zu wachsen beginnen. Für die Probenauslegung stehen wieder die Klebstoffdaten aus Tabelle 3 und für die Füge­teile die Werkstoffdaten aus Tabelle 4 zur Verwendung. Es geht im Wesentlichen um die Füge­teilwerkstoffwahl, sowie um die Festlegung der Probenlänge L und Füge­teildicke t . Die Klebschichtdicke η soll wieder 0,2 mm und die Breite der Probe $B = 25$ mm betragen. Beim ersten Versuch wird dasselbe

Finite Elemente Netz wie für die ENF-Probe herangezogen. Daraus folgt dann der Platzbedarf für den Scharnierschenkel $L_S = 15$ mm, $t = 3$ mm und die Probenlänge $L = 215$ mm. Identisch blieb die Werkstoffmodellierung, nur die Randbedingungen wurden angepasst, sodass jetzt das Loslager beim neuen Lastangriffspunkt sitzt und eine Horizontalverschiebung verhindert (siehe Abbildung 40). Abbildung 41 zeigt die Deformationsfigur bei 12 mm Verschiebung mit unidirektionalen GFK-Platten. Die Finite Elemente Analyse erfolgte verschiebungsgesteuert mit nichtlinearer Geometrie mittels Newton-Raphson-Verfahren.

Es traten auch hier numerische Probleme auf und es musste zusätzlich zu kleinen Verschiebungsinkrementen noch die viskose Dämpfung der COH-Elemente mit dem Wert $VISCOSITY = 3 \cdot 10^{-3}$ aktiviert werden. Für die Elementlöschung wurde $MAX\ DEGRADATION = 0,99$ gesetzt. Das heißt, sobald an allen Integrationspunkten eines COH-Elements der Wert der Schädigungsvariable $SDEG = 0,99$ erreicht, wird es gelöscht. Somit wird die rechte Seite des Energiekriteriums Gleichung (3) auf 0,99 gesetzt. Der Riks-Algorithmus ohne irgendwelche Dämpfung blieb erfolglos und kam nicht zur Anwendung.

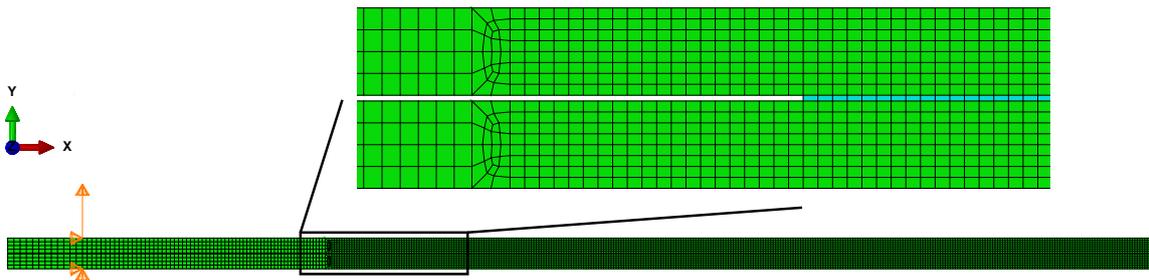


Abbildung 40: Finite Elemente Modell zur Auslegung der DCB-Probe mit $L = 215$ mm, $L_S = 15$ mm, $t = 3$ mm, $\eta = 0,2$ mm und $a_0 = 60$ mm. In grün CPE4- und cyan COH2D4-Elemente.

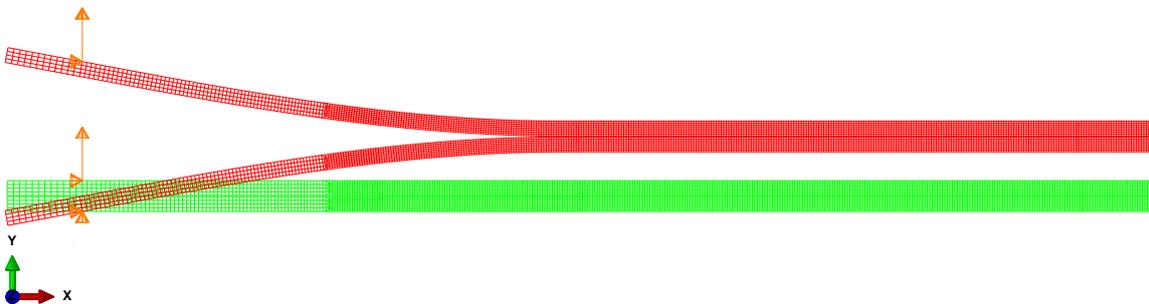


Abbildung 41: Deformation der DCB-Probe. Grün: undeformiert, Rot: Verformt bei 12 mm Verschiebung.

Beim Modell mit den GFK-Fügeteilen beträgt die in den COH-Elementen durch viskose Dämpfung dissipierte Energie 2,63 Nmm, was im Vergleich zur Schädigungsenergie

von 299 Nmm um 2 Größenordnungen darunter liegt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Dämpfung einen vernachlässigbaren Einfluss hat.

Die Spannungsplots Abbildung 42, 43 und 44 wurden bei 20 mm Rissverlängerung gemacht. Alle drei Fügeiteilwerkstoffe könnten die auftretenden Biegespannungen sehr gut ertragen.

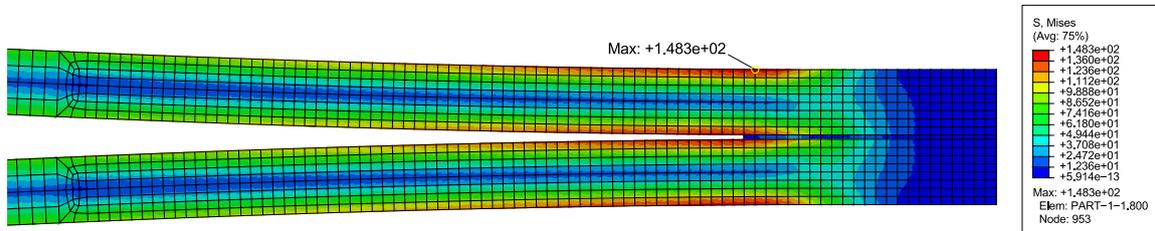


Abbildung 42: DCB-Probe aus Aluminium-Fügeiteilen. Von Mises-Vergleichsspannung.

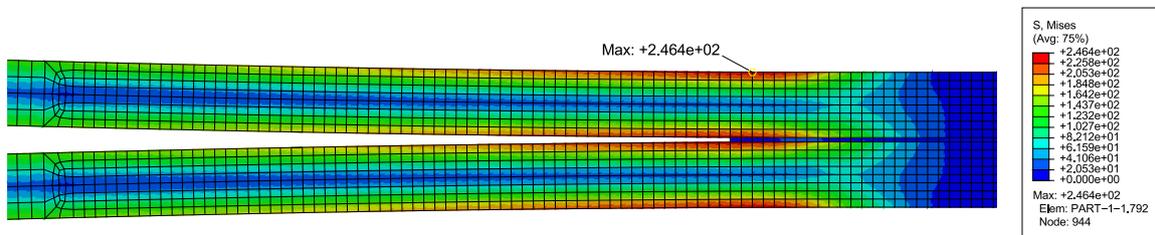


Abbildung 43: DCB-Probe aus Stahl-Fügeiteilen. Von Mises-Vergleichsspannung.

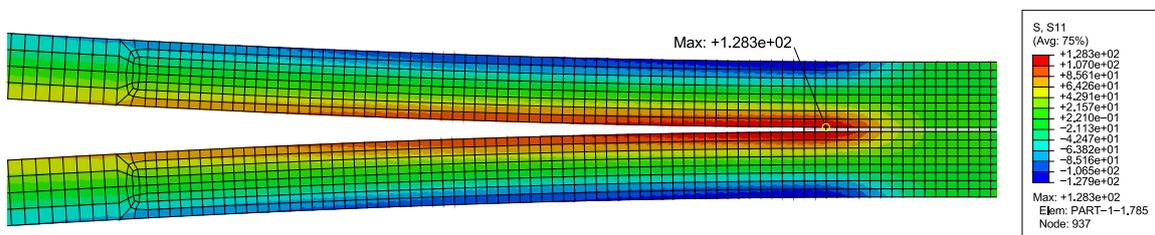


Abbildung 44: DCB-Probe aus UD GFK-Fügeiteilen. Spannungskomponente in Faserichtung.

Bei fortsetzender Verschiebung steigen die Biegespannungen in der Größenordnung von zirka 1 MPa an. Dies liegt an der monoton sinkenden Zuglast P nach dem Maximum des Last-Verschiebungsdiagramms in Abbildung 45 (dargestellt für GFRK-Platten) und dem gleichzeitig größer werdenden Abstand zwischen Scharnier und Risspitze. Zusätzlich wurde die Lösung der Corrected beam theory

$$v = \begin{cases} \frac{2P(a_0 + \chi t)^3}{3E_1 I} & \text{für } 0 \leq v \leq v_c \\ \frac{2}{3P^2} \sqrt{(\mathcal{G}_n^c B)^3 E_1 I} & \text{für } v > v_c, \end{cases} \quad (15a)$$

$$(15b)$$

eingetragen, mit $I = \frac{Bt^3}{12}$ und χ aus Gleichung (6). v_c ergibt sich aus dem Schnittpunkt von Gleichung (15a) und (15b) und ist sogleich jene Verschiebung v bei der der Riss zu wachsen beginnt. Die beiden Gleichungen (15a) und (15b) finden sich unter der Bezeichnung CBT 1 und CBT 2 in Abbildung 45 wieder. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Corrected beam theory und der Finite Elemente Simulation.

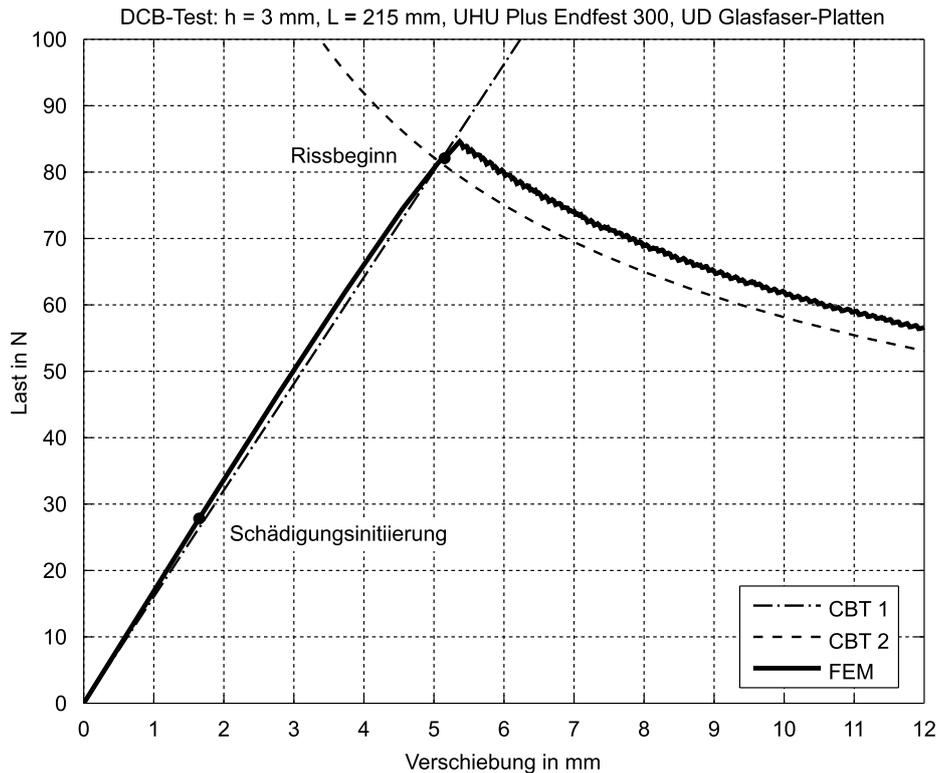


Abbildung 45: Last-Verschiebungsdiagramm. Reaktionskraft und Vertikalverschiebung am Loslager.

Weil sich bei der Auswertung der DCB-Probe keine zusätzlich höheren Ansprüche an die Füge­teile ergaben, werden ebenso unidirektional glasfaserverstärkte Platten verwendet mit einer Solldicke $t = 3$ mm. Somit musste kein weiteres Material bestellt werden. Aus Abbildung 46 lässt sich die Prozess­zonenlänge in der Klebschicht der GFK-Probe ablesen. Sie beträgt 3 bis 3,5 mm. Die Probenlänge L wird mit 200 mm definiert. Bemerkenswert ist, dass alle analytischen Gleichungen unabhängig davon sind. Für die Scharnierschenkel wird ein Platz von $L_S = 30$ mm vorgesehen.

Probenfertigung. Der Vorbehandlungs-, Klebe- und Aushärtprozess erfolgte genauso wie bei der ENF-Probe bereits im Kapitel 3.1.3 beschrieben wurde. Danach wurden ebenso die Klebschicht­dicken unter dem Mikroskop gemessen. Anschließend wurden die Außen­flächen der GFK-Platten noch mit Nassschleifpapier der Körnung 120 aufgeraut und mit Ethanol gereinigt.

Schädigungsentwicklung DCB-Test: h = 3 mm, L = 215 mm, UHU Plus Endfest 300, UD Glasfaser-Platten

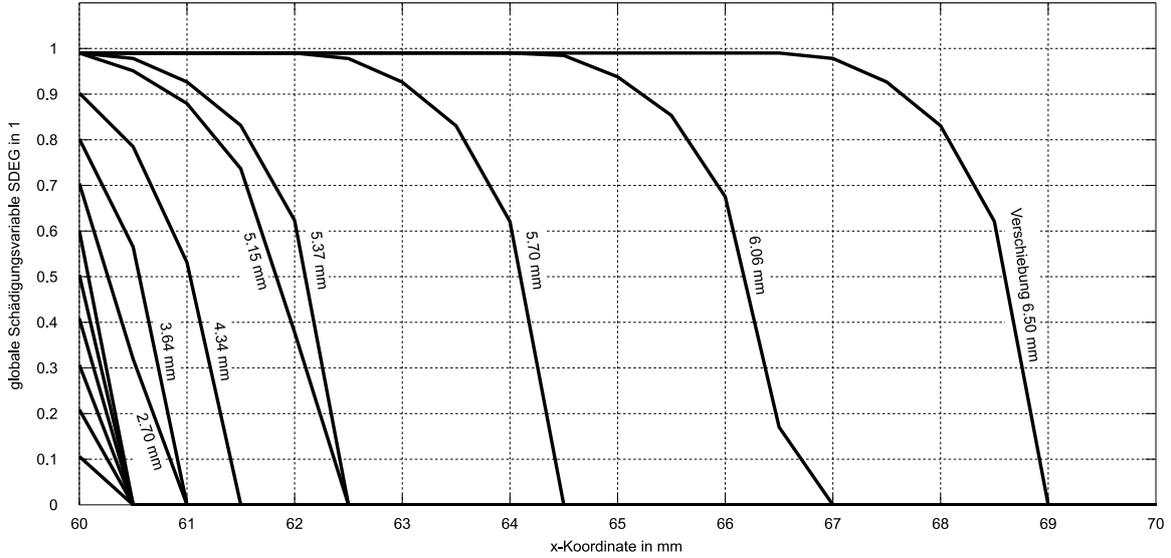


Abbildung 46: Ausbildung und Größe der Prozesszone.

Es kamen Scharniere mit Schenkel zum Einsatz, deren Laschen über die gesamte Probenbreite B verlaufen (siehe Abbildung 47 und Abbildung 48). Damit wird eine gleichmäßige Lasteinleitung ermöglicht. Die Scharniere müssen noch außen an der DCB-Probe fixiert werden. Dazu wurde der Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis Scotch-Weld™ DP490 der Marke 3M verwendet (Datenblatt siehe Anhang B). Dieser härtet bei Raumtemperatur aus, wodurch sich die Eigenschaften der UHU-Klebschicht nicht verändern. Während des gesamten Härteprozesses sorgten Gewichte für ebenes Aufliegen der Schenkel und verhinderten das Verrutschen. Die Härtedauer betrug mehr als die im Datenblatt angeführten 7 Tage. Insgesamt wurden 7 Proben in einer Charge angefertigt, welche am 04.07.2018 fertiggestellt waren.



Abbildung 47: DCB-Probenfertigung vor dem Ankleben der Scharniere.

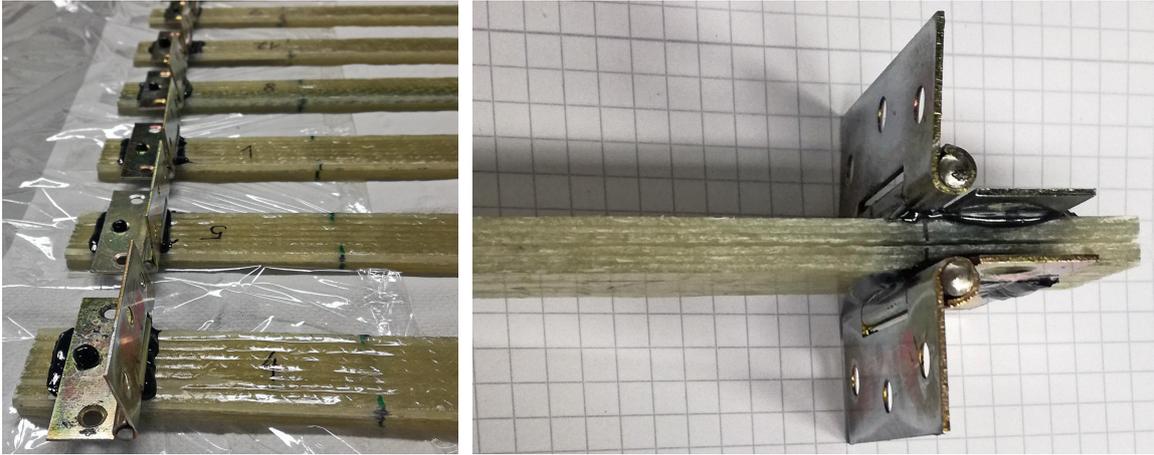


Abbildung 48: DCB-Probenfertigung. Links: Scharniere ankleben, rechts: Fertige Probe.

Verwendete Geräte. Für die Klebschichtdickenmessung wurde das Zeiss Stereomikroskop 2000-C mit angeschlossener Zeiss AxioCam ERc 5s und Beleuchtung Zeiss KL 1500 LCD bei eingestellter Farbtemperatur 3000 K verwendet. Alle restlichen Maße wurden mittels eines digitalen Messschiebers mit einer Genauigkeit von zwei Nachkommastellen bestimmt. Es kam die Prüfmaschine Zwick Z050 für die DCB-Proben 1+2, 3+4 und Zwick Z250 für die anderen Proben immer gemeinsam mit einer 1 kN Kraftmessdose zum Einsatz.

Die freien Schenkel der Scharniere werden an ihren Enden in die Klemmvorrichtung wie bei einer Zugprüfung eingespannt. Dies zeigt Abbildung 49. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 2 mm/min eingestellt.

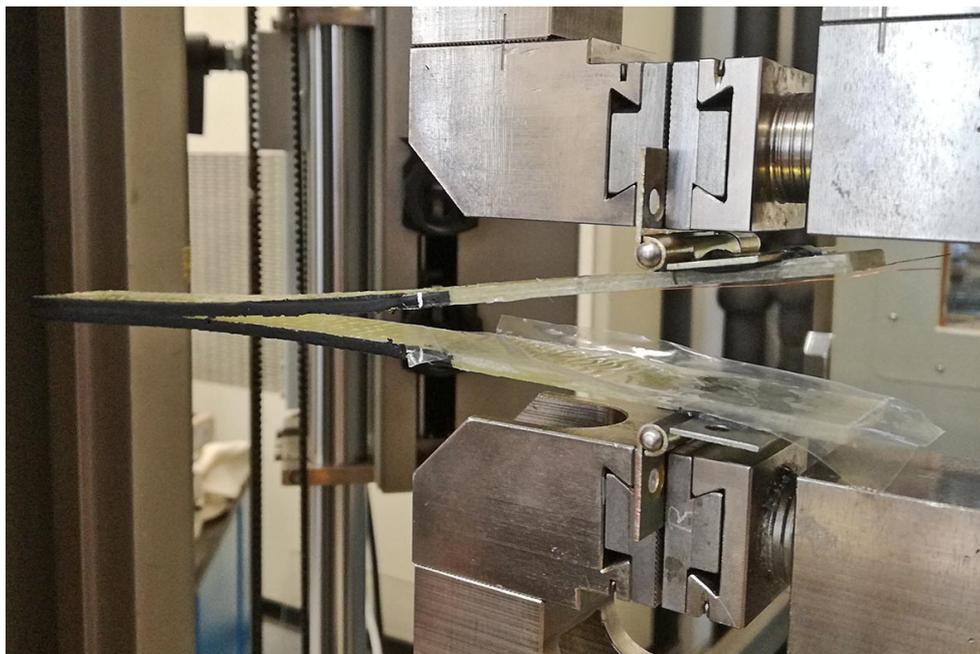


Abbildung 49: Versuchsanordnung des DCB-Tests während der Belastung.

Auswertung.

- *Flächenmethode*: Voraussetzung ist wieder, dass sich die Füge­teile rein elastisch deformieren.

Abweichend zum ENF-Test werden zwei komplette Be-/Entlastungszyklen durch­laufen, wie schematisch Abbildung 50 zeigt. Der erste Belastungspfad mit der künstlich geschaffenen Anfangs­risslänge a_0 ist dabei entlang der Kurve 0A. Ab Erreichen der Maximallast bei Punkt A fängt der Riss an zu wachsen und wächst zwischen Punkt A und B um die Länge Δa_1 . Danach wird entlang von B0 entlastet. Beim zweiten Mal wird mit dem bereits zuvor verlängerten Riss $a_0 + \Delta a_1$ entlang der Kurve 0B belastet. Sobald Punkt B erreicht wird wächst der Riss weiter um Δa_2 . Bei Punkt C wird wieder entlastet. Im Falle von linear elastischem Materialverhalten und geringen Biegedeformationen sind die Kurven 0A, B0 = 0B und C0 Geradenstücke. Die eingeschlossenen Flächen ΔA_1 und ΔA_2 sind jene dissipierten Energien um den Riss um Δa_1 bzw. Δa_2 zu verlängern. Für jeden Zyklus j ergibt sich eine kritische Energiefreisetzungsrate $(\mathcal{G}_n^c)_j = \frac{1}{B} \frac{dA_j}{da_j} \approx \frac{1}{B} \frac{\Delta A_j}{\Delta a_j}$. Es kann auch über beide Zyklen gemittelt werden, dann folgt $(\mathcal{G}_n^c)_{12} \approx \frac{1}{B} \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2}{\Delta a_1 + \Delta a_2}$.

Es wurden hier zwei Zyklen gewählt, um einerseits herauszufinden ob ein Un­terschied besteht zwischen künstlich und natürlich geschaffenen Anfangs­riss, andererseits um 3 Nachgiebigkeiten zu erhalten für die Auswertemethode der Compliance calibration.

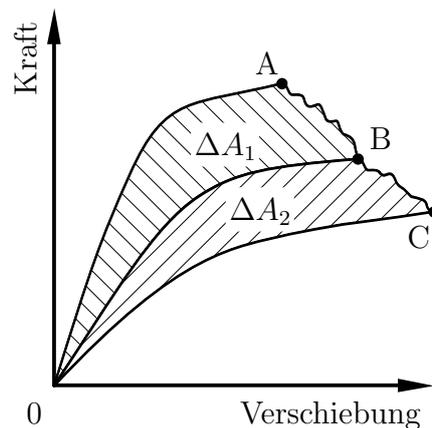


Abbildung 50: Flächenmethode beim DCB-Test zur Ermittlung von \mathcal{G}_n^c .

- *Simple beam theory* (SBT): Die Basis bildet wieder Gleichung (8). Aus der Bernoulli-Balkentheorie ergibt sich für die DCB-Probe ein Ausdruck für die Nachgiebigkeit

$$C = \frac{v}{P} = \frac{2a^3}{3E_1I} \quad (16)$$

[21, Gl. (13.1)] und damit $\mathcal{G}_n = \frac{P^2 a^2}{BE_1 I}$. Daraus folgt die kritische Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_n^c , wenn für a die Anfangsrisslänge a_0 und für P jene Last eingesetzt wird, bei der der Riss zu wachsen beginnt. Für die spätere Auswertung wurde noch etwas umgeformt und

$$\mathcal{G}_n^c = \frac{3P_c v_c}{2Ba_0} \quad (17)$$

verwendet.

- *Compliance calibration* (CC): Auch beim DCB-Test lässt sich eine Compliance calibration durchführen. Aus den Pfaden 0A, 0B und C0 in Abbildung 50 werden 3 Nachgiebigkeiten bestimmt und über die Risslänge a in ein Diagramm eingetragen. Es kann nun wieder eine Ausgleichsfunktion über ein Polynom 3. Grades genau wie Gleichung (13) errechnet oder eine Potenzfunktion

$$C(a) = Ha^m \quad (18)$$

angesetzt werden [22, Eq. (14)]. H und m sind die zu bestimmenden Parameter. Die Ausgleichsfunktion (18) hat auch die Form einer Gerade mit Steigung m wenn man sie in einem Diagramm mit doppeltlogarithmischen Achsen darstellt. Mit beiden Funktionen wäre die Ableitung in Gleichung (8) durchführbar. Für Ausgleichsfunktion (18) ergibt sich dann

$$\mathcal{G}_n^c = \frac{mP_c v_c}{2Ba_0}. \quad (19)$$

Hier ist nachteilig, dass die Risslängen nicht vordefinierbar und mitunter schwierig zu messen sind.

- *Corrected beam theory* (CBT): Ausgehend von der Simple beam theory wird ein Korrekturwert für die Risslänge verwendet. Nimmt man Gleichung (16) und das vorherige Ergebnis von \mathcal{G}_n und ersetzt darin a durch den Term $(a + |\chi t|)$, dann ergibt sich

$$C = \frac{2(a + |\chi t|)^3}{3E_1 I} \quad \text{und} \quad \mathcal{G}_n = \frac{P^2(a + |\chi t|)^2}{BE_1 I}. \quad (20)$$

χ könnte wieder aus der theoretischen Gleichung (6) eingesetzt werden oder lässt sich besser empirisch über den funktionalen Zusammenhang der 3 gemessenen Nachgiebigkeiten mit den zugehörigen Risslängen über eine Ausgleichsfunktion der Form:

$$\sqrt[3]{C}(a) = H + ma \quad (21)$$

bestimmen. χt ist dann die Nullstelle der Ausgleichsfunktion (21) und ergibt sich zu $-\frac{H}{m}$. Dies ist in Abbildung 51 grafisch dargestellt. [22, 1.4.1.2]

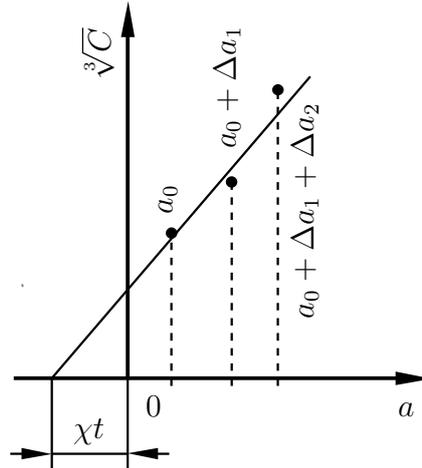


Abbildung 51: Ermittlung des Korrekturwertes χt beim DCB-Test für die Corrected beam theory. Angelehnt an [22, Fig. 9] und [8, Fig. 6.8].

Für die Auswerteformel ergibt sich dann

$$\mathcal{G}_n^c = \frac{3P_c v_c}{2B(a_0 + |\chi t|)} = \frac{3P_c v_c}{2B(a_0 + |-\frac{H}{m}|)}. \quad (22)$$

Ergebnisse. In Tabelle 8 sind in der ersten Spalte die DCB-Probennummern aufgelistet. Die Breite B und die Klebschichtdicke η wurden an drei unterschiedlichen Positionen entlang der Probenlänge gemessen: Links, mittig und rechts. An beiden seitlichen Probenrändern wurde die Anfangsrisslänge a_0 gemessen. Anschließend erfolgte für jede Probe eine Mittelung und in der letzten Zeile finden sich die Mittelwerte über alle Proben. Die Probenlänge L beträgt 200 mm und $L_S = 30$ mm. Wieder lies sich die Rissspitze an der Schattengrenze erkennen. Alle Schattengrenzen waren gerade. Dies war hilfreich für die Bestimmung der Rissverlängerungen Δa . Zusätzlich wurde die Übereinstimmung mit dem sichtbaren Riss an der Seitenfläche geprüft.

Zuerst wurde DCB-Probe 1+2 am 04.07.2018 getestet und bis zu einer Vertikalverschiebung $v = 20,58$ mm mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min belastet. Dies wurde gemacht um einen ersten Eindruck vom Last-Verschiebungsverhalten zu gewinnen, siehe Abbildung 52a. Die Entlastung wurde nicht aufgezeichnet und es gibt keinen Messwert der Rissverlängerung Δa . Es ließ sich keine sichtbare bleibende Verformung an den Füge­teilen feststellen. Danach kam DCB 3+4 am 06.07.2018 zur Prüfung, wobei bis $v = 20$ mm belastet, dann für 30 Sekunden gehalten und wieder entlastet wurde. Die senkrechte Linie genau bei $v = 20$ mm stammt von 15 fehlerhaften Messwerten die während der Haltezeit aufgezeichnet wurden. Der Verlauf von DCB 3+4 passt gut zu 1+2. Nun wurden die 2 Zyklen für alle weiteren DCB-Proben festgelegt: Belasten bis zu 10 mm Vertikalverschiebung, halten für 60 Sekunden zur Messung der Rissverlängerung Δa_1 und wieder entlasten. Anschließend

Tabelle 8: Geometrische Messwerte der DCB-Proben, MW = Mittelwert. * Rissspitzenkennung war nicht eindeutig. Ein möglicher anderer Wert ist 66,03 mm. ** Probe ist schlagartig bis zum Ende durchgerissen.

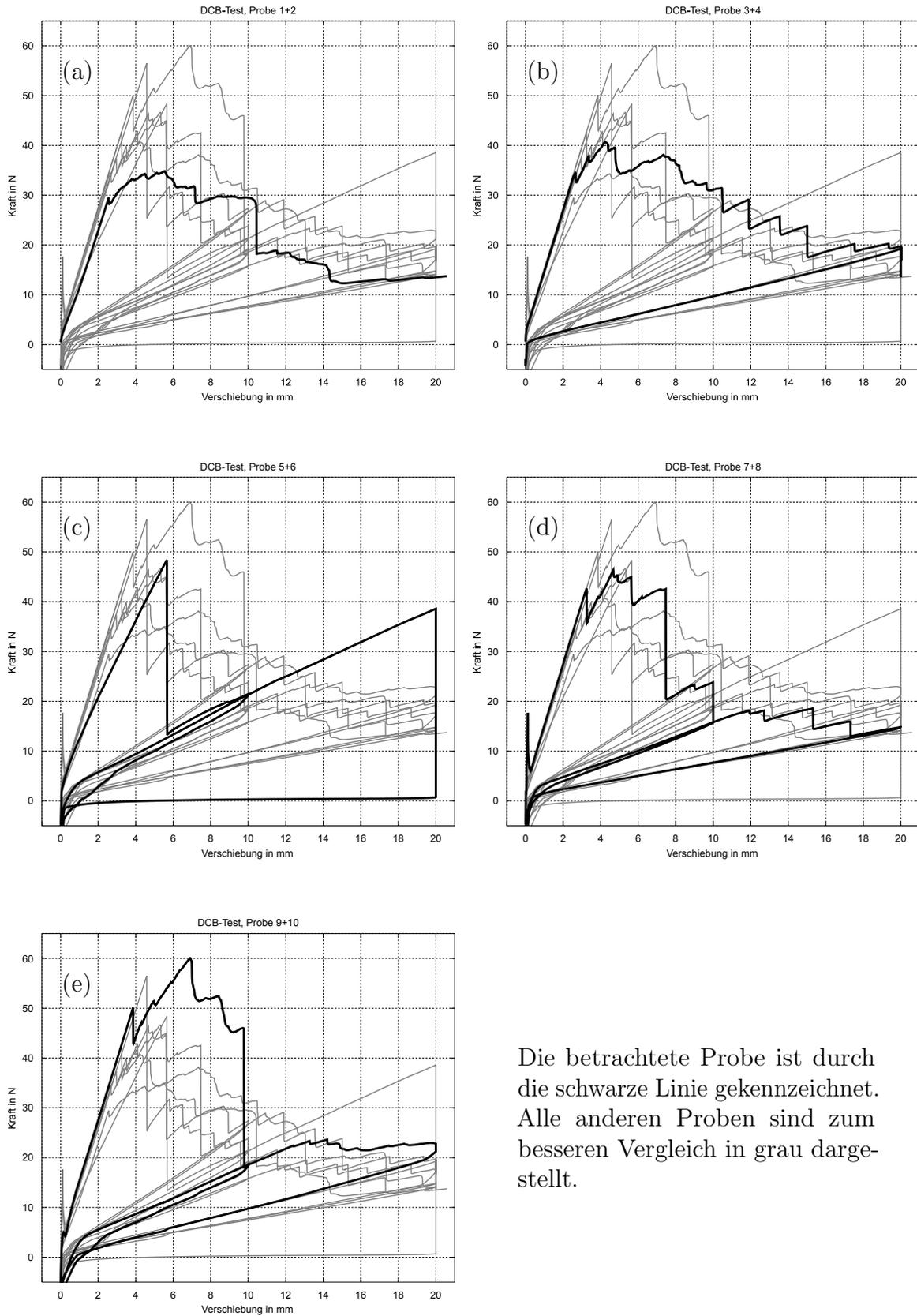
DCB	MW B in mm	MW η in mm	MW a_0 in mm	in mm	
				Δa_1	Δa_2
1+2	25,98	0,420	60,05	-	-
3+4	26,02	0,533	60,02	91,19	-
5+6	25,92	0,506	60,51	50,31*	**
7+8	25,92	0,532	59,86	69,90	38,35
9+10	25,88	0,863	59,22	62,07	25,63
11+12	25,88	0,551	60,16	60,83	39,45
13+14	26,02	0,539	59,53	53,98	56,40
MW	25,95	0,563	59,90		

wieder belasten bis $v = 20$ mm, halten für 30 Sekunden zur Messung von Δa_2 und abschließend entlasten. Alle restlichen DCB-Proben kamen am 23.07.2018 zur Prüfung dran.

In den Abbildungen 52 und 53 sind immer alle Last-Verschiebungskurven eingetragen und nur eine schwarz hervorgehoben. Das Last-Verschiebungsverhalten von DCB-Probe 5+6 in Abbildung 52c weicht etwas von den anderen Proben ab: Die Nachgiebigkeit am Anfang der Belastungspfade macht einen leichten Knick und beide Male kam es zu einem abrupten instabilen Risswachstum. Der erste Wert Δa_1 ließ sich nur ungenau während der Haltephase bestimmen. Beim zweiten Zyklus riss die Probe bis zum Ende hin durch und es gab keinen Messwert für Δa_2 . Alle anderen Proben zeigen abschnittsweise stabiles Risswachstum.

Tabelle 9 zeigt die errechneten Koeffizienten der Ausgleichsfunktionen des DCB-Tests. Vergleicht man die Qualitätswerte R_{adj}^2 zwischen Ausgleichsfunktion (13) und (18) so ist es sinnvoll nur für die DCB-Proben 7+8 und 9+10 die Potenzfunktion anzuwenden, da sie die Messwerte besser approximiert. Diesen Vergleich zeigt auch Abbildung 54 grafisch. Abbildung 55 zeigt exemplarisch die Ermittlung des Risslängenkorrekturwertes χt für die Anwendung der Corrected beam theory anhand von Probe 9+10.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Auswerteverfahren für die kritische Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_n^c zusammengefasst und in Abbildung 56 grafisch dargestellt. Die Spalten ΔA_1 , ΔA_2 und $\Delta A_1 + \Delta A_2$ stellen die Ergebnisse aus den Flächenmethoden dar: Nur Fläche 1, nur Fläche 2 und beide Flächen kombiniert. Probe 5+6 wurde aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen, da sich ihr Verhalten im Last-Verschiebungsdiagramm deutlich von den anderen Proben unterscheidet und einen geknickten Anfangsbereich



Die betrachtete Probe ist durch die schwarze Linie gekennzeichnet. Alle anderen Proben sind zum besseren Vergleich in grau dargestellt.

Abbildung 52: Last-Verschiebungsdiagramme der DCB-Proben Teil 1.

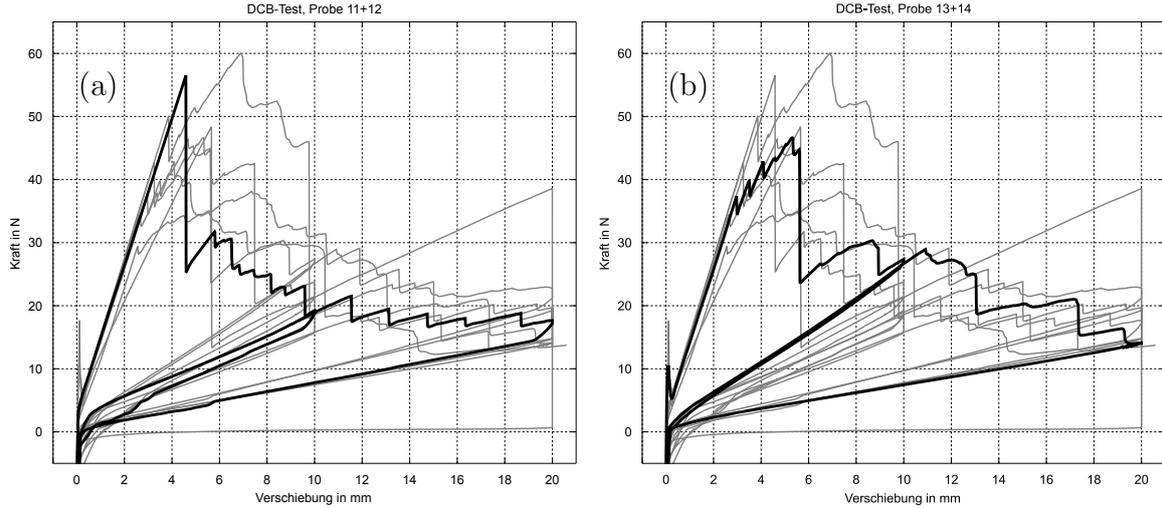


Abbildung 53: Last-Verschiebungsdiagramme der DCB-Proben Teil 2. Die Darstellung ist analog zu Abbildung 52.

Tabelle 9: Koeffizienten der DCB-Ausgleichsfunktionen und Qualitätswerte R_{adj}^2 .

DCB		7+8	9+10	11+12	13+14
Gleichung (13)	H in $10^{-2}\text{mm}/\text{N}$	2,83279	5,62092	0,88541	1,28196
	m in $10^{-7}/\text{mm}^2\text{N}$	3,15523	2,87273	3,60757	2,89774
	R_{adj}^2 in 1	0,99801	0,95852	0,99999	0,99905
Gleichung (18)	H in $10^{-6}\text{mm}^{1-m}/\text{N}$	1,05333	9,91141	0,46861	0,29532
	m in 1	2,76710	2,29777	2,94948	2,99845
	R_{adj}^2 in 1	0,99992	0,98660	0,99998	0,99860
Gleichung (21)	H in $10^{-2}(\text{mm}/\text{N})^{\frac{1}{3}}$	3,87475	7,03690	1,96991	6,16715
	m in $10^{-3}/\text{mm}^{\frac{2}{3}}\text{N}^{\frac{1}{3}}$	6,62989	6,29684	7,00496	6,22473
	R_{adj}^2 in 1	0,99943	0,98490	0,99999	0,99510

aufweist. Bei der Auswertung von Probe 11+12 mit den Methoden SBT, CBT und CC passen die Werte schlecht zu den Ergebnissen der Flächenmethode und den anderen Probenergebnissen. Daher wurden sie als Ausreißer deklariert und nicht in der Mittelung berücksichtigt.

Zum Abschluss wurden die Füge­teile aller Proben durch Auseinanderziehen voneinander getrennt um die Bruchflächen zu analysieren: Es traten vorwiegend Adhäsionsbrüche auf, nur Probe DCB 9+10 wies einen Mischbruch (teilweise adhäsive und kohäsive Bruchstellen) auf.

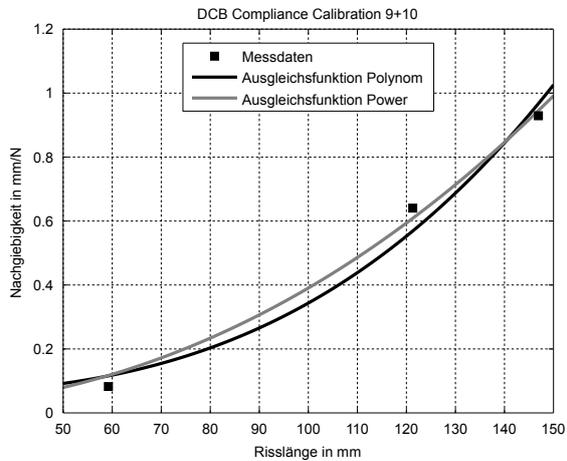


Abbildung 54: Vergleich der Ausgleichsfunktionen bei der Compliance calibration.

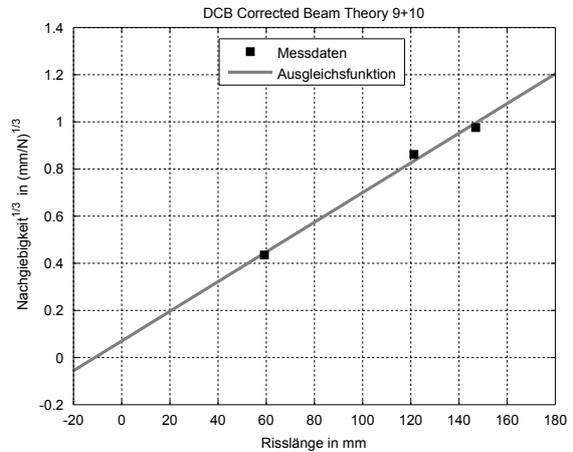


Abbildung 55: Ermittlung des Risslängenkorrekturwertes χt mittels Ausgleichsfunktion (21).

Tabelle 10: DCB-Auswertung. * aus der Mittelwertbildung MW ausgeschlossen.

DCB	P_c in N	v_c in mm	\mathcal{G}_n^c in N/mm aus					
			ΔA_1	ΔA_2	$\Delta A_1 + \Delta A_2$	SBT	CBT	CC
1+2	29,40	2,558	-	-	-	0,0723	-	-
3+4	34,39	2,663	0,144	-	-	0,0879	-	-
5+6	48,37	5,660	0,103*	-	-	0,262*	-	-
7+8	42,71	3,252	0,127	0,0942	0,116	0,134	0,122	0,124
9+10	50,10	3,858	0,204	0,186	0,199	0,189	0,159	0,145
11+12	56,51	4,585	0,121	0,128	0,124	0,250*	0,238*	0,242*
13+14	37,39	2,968	0,114	0,135	0,125	0,107	0,0921	0,0828
MW			0,142	0,136	0,141	0,118	0,125	0,117

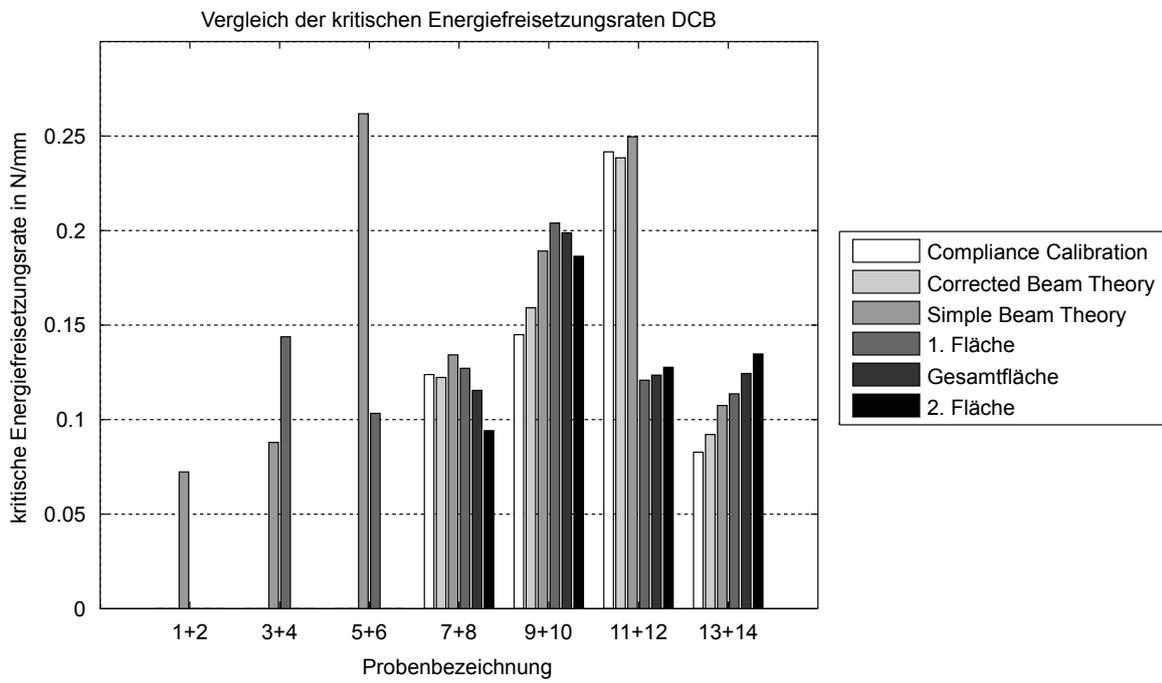


Abbildung 56: Vergleich der Auswertergebnisse für G_n^c .

3.2 Fügeiteile

Die Fügeiteile wurden aus unidirektionalem glasfaserverstärkten Kunststoff hergestellt. Dies stellte sich bei der Auslegung der ENF-Probe in Kapitel 3.1.3 heraus. Bei den Glasfasern handelt es sich um das Produkt L 1200 E07A - 0 UNIDIRECTIONAL E-GLASS-127CM der Firma METYX Composite Reinforcements und der Matrixwerkstoff war AROPOL DRL 085 TB, ein Polyesterharz von der Firma Ashland Inc. Beide Produktdatenblätter finden sich im Anhang B und zusätzliche Kennwerte in Tabelle 11. Abbildung 57 zeigt eine noch unverarbeitete unidirektionale E-Glasfasermatte. Dabei geben farbige Fäden die Faserlängsrichtung an.

Drei übereinanderliegende unidirektionale Glasfaserschichten n wurden mit der Matrix im Handlaminierverfahren zu großen Platten gefertigt und in 25 mm breite Streifen mit Faserrichtung in Richtung der längeren Seite geschnitten. Die mittlere Dicke dieser Streifen beträgt $t = 3,35$ mm. Das ist das Istmaß, 3 mm war der Sollwert. Dies erfolgte dankenswerterweise durch die Firma Mück Kunststofftechnik GmbH. In Abbildung 58 ist der GFK-Plattenquerschnitt mit seinem Lagenaufbau dargestellt.

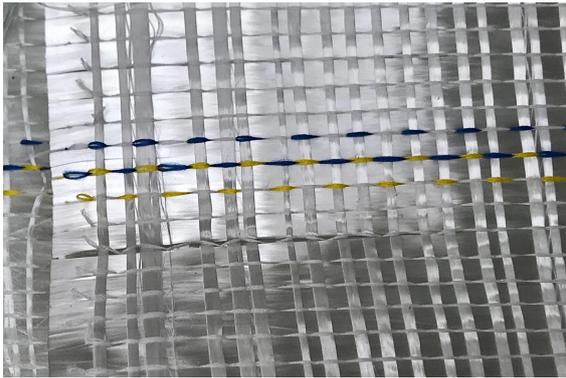


Abbildung 57: UD E-Glasfasermatte.

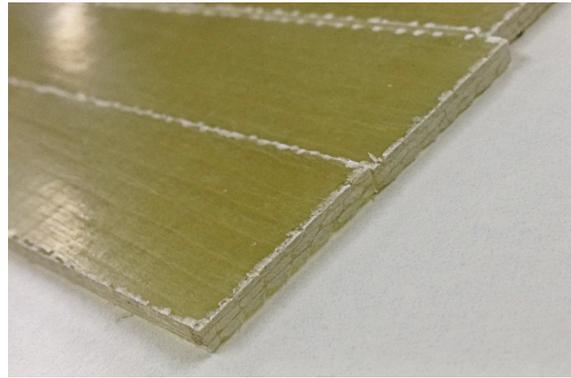


Abbildung 58: UD GFK-Platten.

Tabelle 11: Daten der isotropen E-Glasfaser, isotropen Matrix und des Verbundes. Werte markiert mit * von Mück Kunststofftechnik GmbH, ** aus dem Datenblatt.

E-Glasfaser				Polyesterharz		Verbund	
E_f	ν_f	ρ_f	$\left(\frac{m_f}{Lb}\right)$	E_m	ν_m	n	t
in MPa	in 1	in kg/m^3	in g/m^2	in MPa	in 1	in 1	in mm
73000*	0,25*	2600*	1226**	4100**	0,35*	3	3,35

Der Faservolumenanteil des Verbundes errechnet sich nach [26, Gl. (6.10)]

$$\xi = \frac{n}{t} \frac{\left(\frac{m_f}{Lb}\right)}{\rho_f} = 0,42 \quad (23)$$

mit $\left(\frac{m_f}{Lb}\right)$ als Flächengewicht der reinen UD-Fasern und ρ_f als Dichte der Glasfasern. Der Verbund verhält sich orthotrop und für das Materialgesetz ergibt sich gemäß [27, Gl. (3.21)] die Querdehnungszahl

$$\nu_{12} = \xi\nu_f + (1 - \xi)\nu_m = 0,31 \quad (24)$$

und die E-Moduln längs und quer zur Faser

$$E_1 = \xi E_f + (1 - \xi)E_m, \quad E_2 = \frac{E_m}{1 - \sqrt{\xi}(1 - E_m/E_f)}. \quad (25)$$

Damit kann das Verhältnis

$$\frac{E_2}{E_1} = 0,32 \text{ bzw. } E_2 = 0,32E_1 \quad (26)$$

abgeschätzt werden. Der absolute Wert des Moduls in Faserrichtung E_1 wird experimentell mittels Dreipunkt-Biegeversuch [28] bestimmt.

3.2.1 Dreipunkt-Biegeversuch

Dieser Versuch ist in der Norm DIN EN ISO 178 [28] festgelegt. Abbildung 59 zeigt wichtige Abmessungen und schematisch die Versuchsanordnung. Hier entspricht h gleich der Dicke t eines Fügeteils. Seine Anwendung dient in dieser Diplomarbeit zur Bestimmung des Biegemoduls der Fügeteile, welcher sich mit ansteigendem Verhältnis L/h dem Zugmodul E_1 von unten annähert [21, Fig. 7.4]. Demnach sind große L/h Verhältnisse erstrebenswert.

Probenfertigung. Es wurden keine eigenen Proben für diesen Test gefertigt, sondern jeweils 5 unverklebte Fügeteile des ENF- und DCB-Tests herangezogen. Das sind Plattenstreifen mit rechteckförmigem Querschnitt ($B \times t$). Die DCB-Streifen messen 230 mm und die ENF-Streifen 350 mm Länge. Aus Tabellen 5 und 8 können die gemessenen Mittelwerte der Breite B entnommen werden. Insgesamt wurden mehr Fügeteile aus den großen Platten geschnitten als notwendig waren. Außerdem wurde dieselbe Auflagedistanz $L = 200$ mm wie beim ENF-Test eingestellt.

Verwendete Geräte. Es kam die Prüfmaschine Zwick Z050 gemeinsam mit einer 1 kN Kraftmessdose, zwei symmetrische Auflager $R_1 = 5$ mm und einer Druckrolle $R_2 = 5$ mm zum Einsatz. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 10 mm/min. L wurde millimetergenau eingestellt und die Probekörper mit einem digitalen Messschieber auf 2 Nachkommastellen genau vermessen. Alle Probenmaße wurden an jeweils 3

verschiedenen Stellen abgelesen. Abbildung 60 zeigt eine eingespannte belastete Probe in der Prüfmaschine.

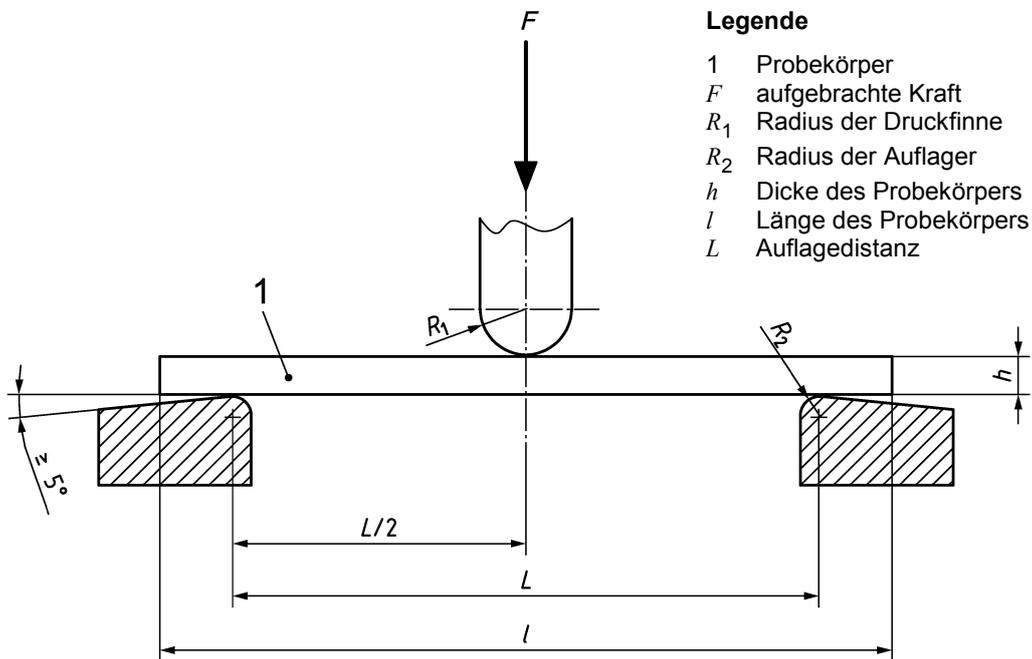


Abbildung 59: Versuchsanordnung Dreipunkt-Biegeversuch schematisch. [28, Bild 2]



Abbildung 60: Dreipunkt-Biegeversuch im Labor.

Ergebnisse. Es wurde Verfahren A der Norm DIN EN ISO 178 [28] (konstante Prüfgeschwindigkeit) zur Bestimmung der Biegespannungs-Biegedehnungskurve bis zu einer Durchbiegung mittig von maximal 34,3 mm angewendet. Nach Entlastung waren keine bleibenden Verformungen sichtbar und es trat keine erkennbare Schädigung (Faserbruch, Delamination) an den Probekörpern auf. Abbildung 61 stellt die Messkurven zusammengefasst dar. In der Legende finden sich die Plattennummern der getesteten Fügeteile.

Der Biegemodul wurde mittels einer Regressionsgerade zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung am 25.05.2018 bestimmt und beträgt über alle Proben gemittelt 27217,69 MPa mit einer Standardabweichung von 1202,63 MPa. Eine Gerade mit diesem Mittelwert wurde zusätzlich noch in Abbildung 61 eingefügt. Somit wird deutlicher, dass sich diese Biegedeformation geometrisch nichtlinear verhält.

Die Messwertkurve der DCB-Platte 15 wurde zu aller erst aufgezeichnet und zeigt einen steilen Anstieg am Ende. Dabei berührte die Probe das Auflager aufgrund der starken Durchbiegung (34,3 mm). Diese Kontaktstelle markiert der rote Pfeil in Abbildung 60. Geprüfte Platten aus diesem Biegeversuch wurden nicht für andere Tests weiterverwendet.

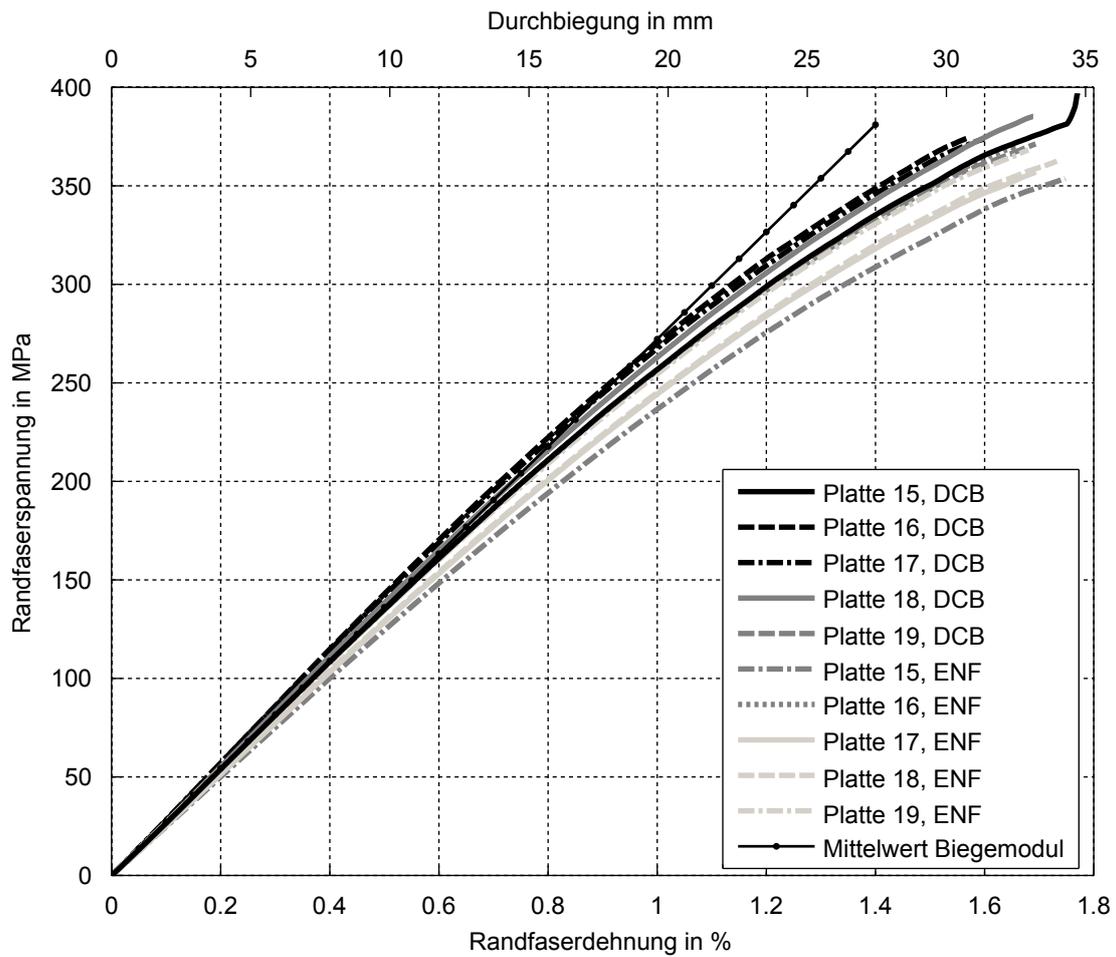


Abbildung 61: Ergebnisse des Dreipunkt-Biegeversuchs der UD GFRK-Proben.

4 Analyse mit der Finite Elemente Methode

Tabelle 12 fasst jene Messwerte, welche als Eingabewerte für die Finite Elemente Berechnung dienen zusammen. Sie entstammen alle aus Kapitel 3. Da sich kein sinnvoller Messwert für die Schubsteifigkeit aus dem TAST gewinnen ließ, wird ν_K den Literaturdaten aus Tabelle 3 entnommen. Unter der Annahme eines isotropen Klebstoffs lässt sich daraus dann der Klebstoffschubmodul $G_K = \frac{E_K}{2(1+\nu_K)}$ errechnen und ergibt 950,07 MPa. Dieser Wert wurde um $p = 5\%$ nach oben und unten variiert um den Einfluss von Annahmefehlern zu untersuchen. Wird zurückgerechnet, so folgt

$$\nu_K = \frac{E_K}{2pG_K} - 1 = \begin{cases} 0,3333 & \text{für } p = 1,05, \\ 0,4000 & \text{für } p = 1,00, \\ 0,4737 & \text{für } p = 0,95, \end{cases}$$

was im zulässigen Wertebereich realer Werkstoffe liegt. Die \mathcal{G}_i^c -Werte stammen jeweils von der Flächenmethode und beim DCB-Test aus der ersten Fläche ΔA_1 .

Die Zugfestigkeit σ_m aus dem Zugversuch und Schubfestigkeit τ_m aus dem TAST dienen jeweils als Festigkeitswert t_i^0 des bilinearen Kohäsivgesetzes für Mode i .

Tabelle 12: Finite Elemente Werkstoffeingabewerte. Alles experimentell ermittelte Werte, siehe Kapitel 3, außer * ist aus [17, Table 1] entnommen.

GFK-Fügeteile		Klebstoff UHU Plus Endfest 300					
E_1	ν_{12}	E_K	ν_K	t_n^0	t_s^0	\mathcal{G}_n^c	\mathcal{G}_s^c
in MPa	in 1	in MPa	in 1	in MPa	in MPa	in N/mm	in N/mm
27217,7	0,31	2660,2	0,40*	44,67	20,41	0,142	2,16

Tabelle 13: Finite Elemente Eingabewerte Geometrie. Mittelwerte der Proben aus Kapitel 3.

Test	B	t	η	a_0
	in mm	in mm	in mm	in mm
DCB	25,95	3,35	0,563	59,9
ENF	25,77	3,35	0,428	60,0

Prüft man die Werte aus Tabelle 12 und 13 zwecks Anwendbarkeit des Kontinuumsansatzes mittels Bedingung (4), so stellt sich heraus, dass sie für den Bruchmode $i = n$ nicht erfüllt wird. Die Klebschicht ist dafür zu dick. Sie ist sowohl beim DCB- als auch beim ENF-Test in der Fertigung wesentlich dicker geworden als der Sollwert von 0,2 mm. Daher wird der lokale Ansatz herangezogen.

Den unidirektionalen GFK-Fügeteilen und Kontinuumselementen der Klebschicht wird ein linear elastisches, isotropes Werkstoffgesetz unter Annahme eines ebenen Verzerrungszustandes zugewiesen (CPE4-Elemente).

4.1 ENF-Test

Der Auflagerabstand $2L = 200$ mm und die Überhänge der Probe $L_u = 75$ mm. Es wurden 3 Finite Elemente Modelle erstellt:

1. Zuerst ein grobes Modell mit lokalem Ansatz und Klebschichtauflösung von 0,5 mm in x-Richtung. Sein Aufbau ist analog zu Abbildung 62 und entspricht der Beschreibung von Abbildung 5a. Die Kohäsivzonenelemente befinden sich genau mittig zwischen den orangenen Kontinuumselementen der Klebschicht und sind nur 0,002 mm dick mit $K_n = K_s = 10^6$ MPa. Es kam das Newton-Raphson-Verfahren mit Verschiebungsgesteuerung, einer sehr feinen Inkrementierung und viskose Dämpfung ($VISCOSITY = 1,5$) zum Einsatz.

Die Last-Verschiebungskurve dieses Modells findet sich in Abbildung 66 mit der Bezeichnung FEM LA. Ab einer Durchbiegung von 2,59 tritt ein negativer Eigenwert auf. Das liegt im Bereich der Schädigungsinitiierung. Die COH2D4-Elemente beginnen zwar zu schädigen, aber nicht alle werden vollständig zerstört. Es bilden sich Lücken in der Klebschicht am linken Ende und es scheint als ob sich der Kleber wellt aber nicht wie erwartet zu reißen beginnt. Möglicherweise handelt es sich um eine Mikrobeulform. Ein negativer Eigenwert zeigt üblicherweise die Stelle des Lastmaximums an, jedoch wurde hier ein anderer Lastpfad gefunden. Testweise wurde der Kontakt deaktiviert und als Ersatz ein Loslager links unterhalb der oberen Platte eingefügt. Das Phänomen bestand aber weiterhin, auch mit dem Riks-Algorithmus. Die durch viskose Dämpfung dissipierte Energie liegt um 3 Größenordnungen über der Schädigungsenergie. Eine geringere Dämpfung führte zum frühen Berechnungsabbruch. Für eine genauere Analyse wurde das nächste Modell erstellt.

2. Von ersterem Modell existiert eine verfeinerte Variante mit einer Klebschichtauflösung von 0,25 mm in x-Richtung, auch mit lokalem Ansatz. Das entsprechende Netz ist in Abbildung 62 abgebildet. Es kommt auch hier zu dem oben beschriebenen Stabilitätsproblem, mit einer welligen Klebschicht (siehe Abbildung 63). Die Last-Verschiebungskurve ist gleich wie zuvor. Leider ließ sich auch mit dem Riks-Algorithmus, mit und ohne numerischer Stabilisierung (STABILIZE) und ohne Kontakt, aber zusätzlichem Loslager kein anderer Last-Verschiebungspfad finden.

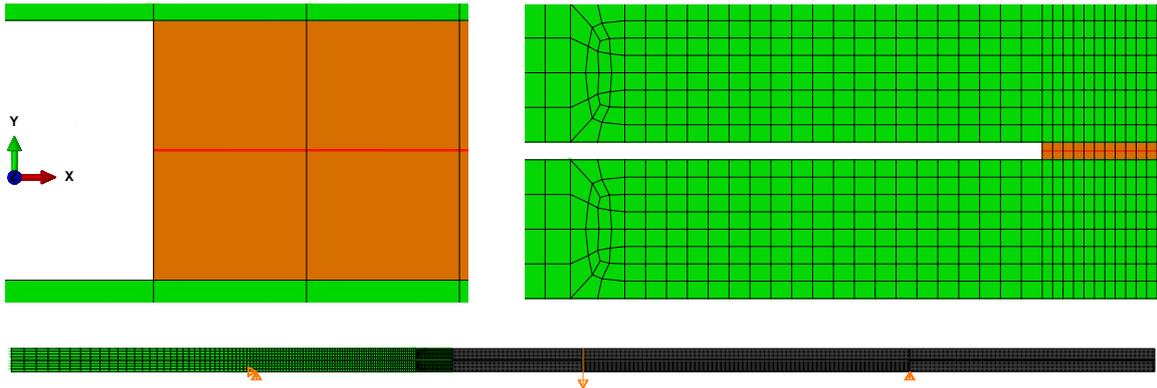


Abbildung 62: Finite Elemente Modell des ENF-Tests mit lokalem Ansatz: $2L = 200$ mm, $L_u = 75$ mm, $t = 3,35$ mm, $\eta = 0,428$ mm und $a_0 = 60$ mm. In grün und orange sind Kontinuums-elemente (CPE4) dargestellt und mittig befinden sich sehr schmale rote Kohäsivzonen-elemente (COH2D4).

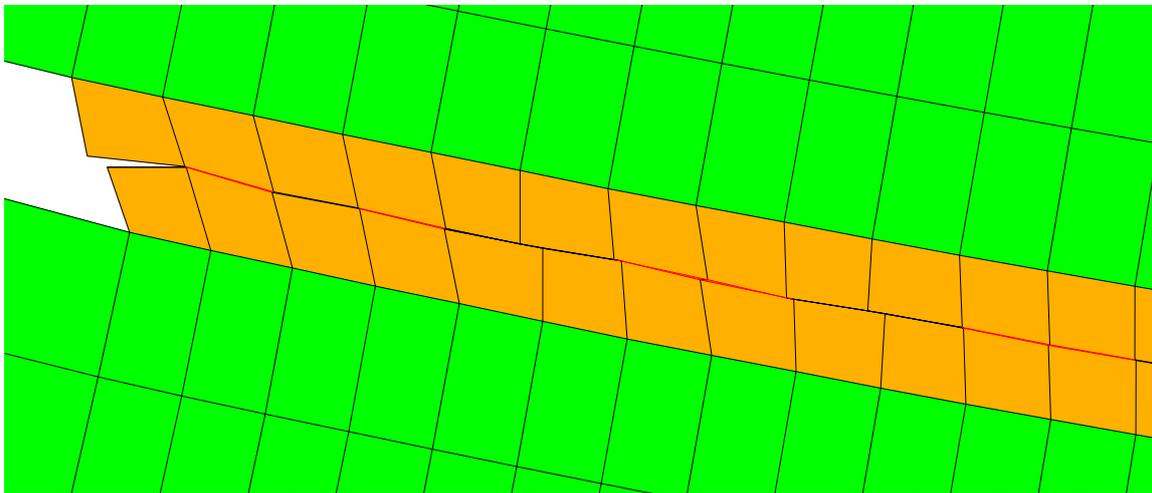


Abbildung 63: Beulfigur der Klebschicht. Die Deformationen wurden um den Faktor 3 verstärkt. Rot: nicht zerstörte Kohäsivzonen-elemente (COH2D4).

3. Reduziert man den Wert der Klebstofffestigkeit t_n^0 um 50 % (strength reduction) so lässt sich ein Modell mit Kontinuumsansatz erstellen. Dies ist beim ENF-Test möglich, da in der Klebschicht reiner Schub auftritt und daher die Festigkeit für Normalbeanspruchung keinen Einfluss haben sollte. Die Klebschichtelemente messen $0,5 \times 0,428$ mm. In Abbildung 64 ist das Finite Elemente Modell dargestellt, Abbildung 65 zeigt die Deformationsfigur und Abbildung 66 die Last-Verschiebungskurve mit dem Namen FEM CA SR 0.5. Es kam das Newton-Raphson-Verfahren mit Verschiebungssteuerung und viskoser Dämpfung ($VISCOSITY = 1,5 \cdot 10^{-2}$) zum Einsatz. Die Schädigungsenergie liegt um 2 Größenordnungen über der dissipierten Energie aufgrund viskoser Dämpfung.

Ob die Festigkeitsreduktion tatsächlich keinen Einfluss hat wurde noch mit $0,75t_n^0$ nachgerechnet. Das ist die Kurve mit der Bezeichnung FEM CA SR 0.75, welche

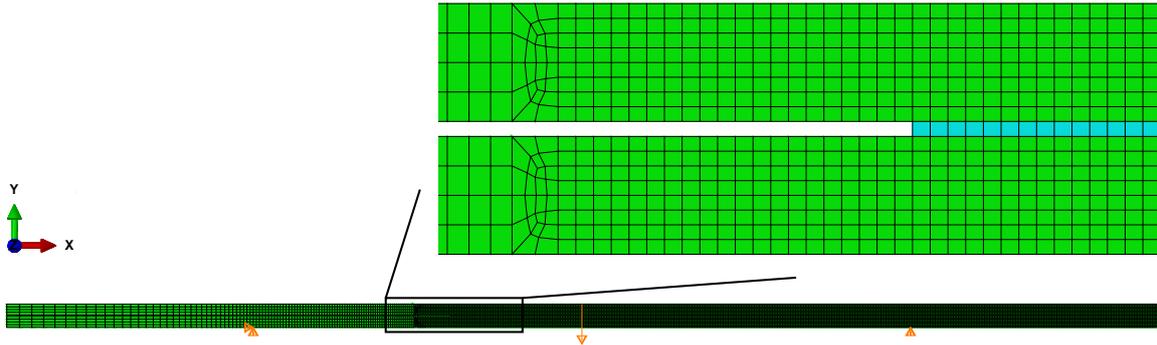


Abbildung 64: Finite Elemente Modell des ENF-Tests mit Kontinuumsansatz: $2L = 200$ mm, $L_u = 75$ mm, $t = 3,35$ mm, $\eta = 0,428$ mm und $a_0 = 60$ mm. In grün CPE4- und cyan COH2D4-Elemente.

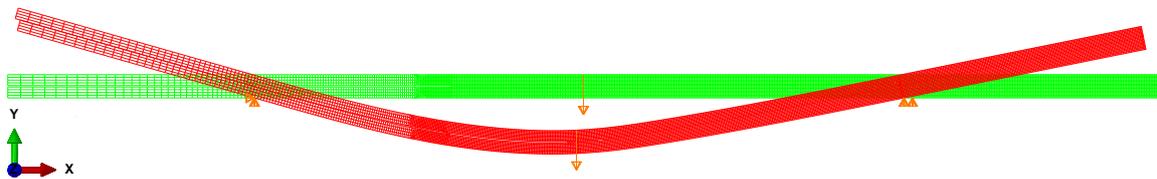


Abbildung 65: Deformation der ENF-Probe. Kontinuumsansatz. Grün: undeformiert, Rot: Verformt bei 17 mm Durchbiegung.

deckungsgleich mit der Kurve FEM CA SR 0.5 ist. Ebenso zeigt die Variation des Klebstoffschubmoduls G_K keine Änderung in den Berechnungsergebnissen. Das entspricht den Kurven FEM CA 1.05 G_K und FEM CA 0.95 G_K , die auch deckungsgleich mit der Kurve FEM CA SR 0.5 sind. In hellgrau wurden zum Vergleich die Messkurven eingetragen und auch die Corrected beam theory mit dem Wert für \mathcal{G}_s^c der Flächenmethode und der Compliance calibration aus Tabelle 7. Wie sich die Prozesszone ausbreitet und der Riss fortwächst ist in Abbildung 67 ersichtlich. Daraus lässt sich die Prozesszonlänge ablesen, die 15,5 mm beträgt.

Beim Vergleich der Last-Verschiebungskurven in Abbildung 66 fallen zunächst die unterschiedlichen Anfangssteifigkeiten zwischen den Finite Elemente Lösungen, der Corrected beam theory und den Messkurven auf. Die CBT vernachlässigt die Klebschichtdicke, daher sind die Platten des Finite Elemente Modells um $\eta/2$ weiter von der neutralen Faser entfernt. Durch diese Zunahme ihres Flächenträgheitsmoments steigt auch die Steifigkeit der Platten an. Die Steifigkeit der Finite Elemente Lösung liegt, wegen der bekannterweise endlichen Anzahl an Deformationsfreiheitsgraden und der einfachen Verschiebungsrandbedingungen der Auflager, zirka 10 bis 20 % über den Messungen. Im Versuch veränderten sich die Kontaktstellen an den runden Auflagern in Abhängigkeit von der Durchbiegung der Probe. Der Wert der kritischen Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_s^c , bestimmt mittels Flächenmethode ist eher konservativ.

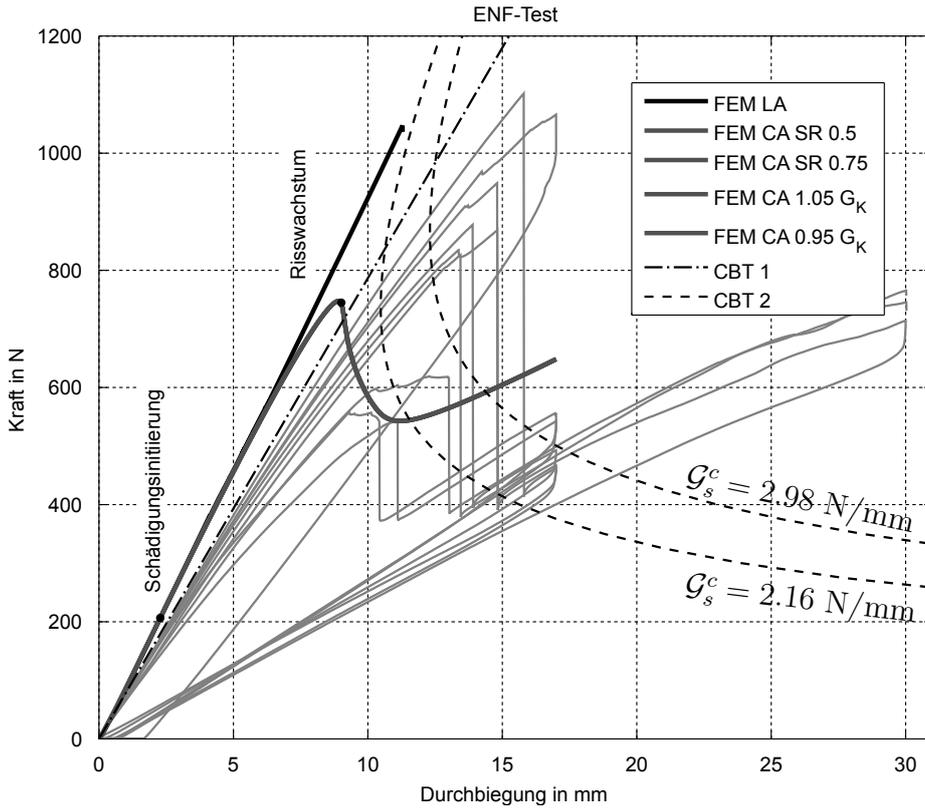


Abbildung 66: Last-Verschiebungsdiagramm. Reaktionskraft und Vertikalverschiebung am Mittelknoten zwischen den Auflagern. Vergleich zwischen Finite Elemente Simulationen (FEM), wobei die dunkelgrauen Kurven alle deckungsgleich sind, mit den hellgrauen Messkurven und der Corrected beam theory (CBT).

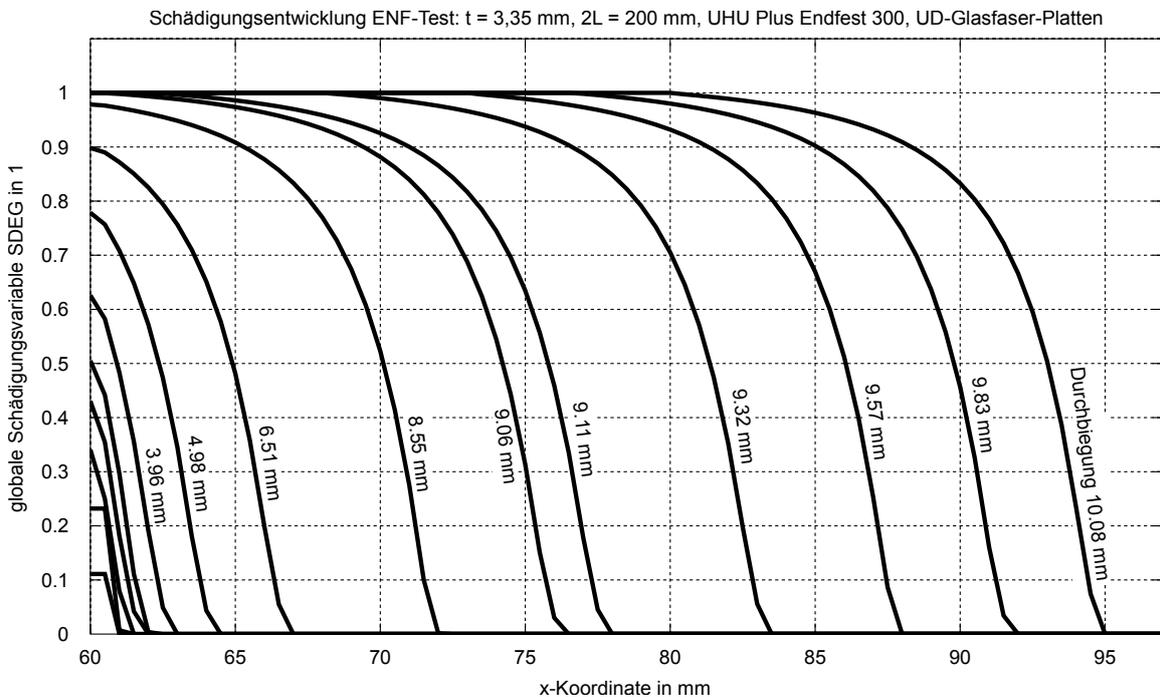


Abbildung 67: Ausbildung und Größe der Prozesszone beim ENF-Test. Kontinuumsansatz.

Die Rissausbreitung erfolgte instabil. Das zeigt der senkrechte Abfall der Kraft P nach dem Maximum an.

4.2 DCB-Test

Die Probenabmessungen betragen $L = 200$ mm und $L_S = 30$ mm. Es wurden 3 Analysen mit 2 Finite Elemente Modellen durchgeführt: Bei allen Analysen wurde für die Elementlöschung MAX DEGRADATION = 0,99 gesetzt.

1. Zuerst wurde eine Modellierung mit dem lokalen Ansatz, wie in Abbildung 5b dargestellt und beschrieben, durchgeführt. Das Netz zeigt Abbildung 68. Die Klebschicht wird in x-Richtung mit einer Netzfeinheit von 0,25 mm aufgelöst. Die Kohäsivzonelemente COH2D4 befinden sich genau mittig zwischen den orangefarbenen Kontinuums-elementen der Klebschicht und sind 0,002 mm dick. Die Steifigkeit der Kohäsivzonelemente wurde als sehr hoch, mit Werten $K_n = K_S = 10^6$ MPa, angesetzt. Es kam das Newton-Raphson-Verfahren mit Verschiebungssteuerung und viskoser Dämpfung (VISCOSITY = 10^{-5}) zum Einsatz.

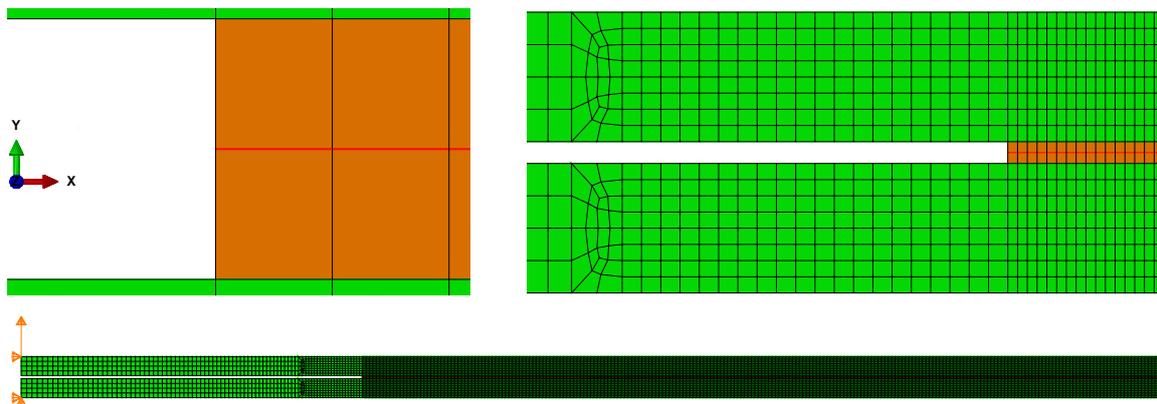


Abbildung 68: Finite Elemente Modell des DCB-Tests mit lokalem Ansatz: $L = 200$ mm, $L_S = 30$ mm, $t = 3,35$ mm, $\eta = 0,563$ mm und $a_0 = 59,9$ mm. In grün und orange CPE4- und mittig sehr schmale rote COH2D4-Elemente.

Die Last-Verschiebungskurve dieses Modells findet sich in Abbildung 71 mit der Legendenbezeichnung FEM LA. Lastmaximum und Risswachstum liegen zirka bei den doppelten Werten wie jene aus den Messungen. Vergleichsweise gut stimmen aber die analytischen Lösungen der Corrected beam theory (CBT 1 und CBT 2) mit dem Experiment überein. Die Simple beam theory und in weiterer Folge auch die Corrected beam theory kommt ohne Eingabewert für die Klebstofffestigkeit t_n^0 aus. Das Lastmaximum ergibt sich lediglich durch den Schnitt der Kurven Gleichung (15a) und (15b). Im Finite Elemente Modell ist

die Schädigungsenergie um den Faktor 2 höher als die dissipierte Energie durch viskose Dämpfung.

2. Es wird selbiges Modell von vorhin eingesetzt und nur der Wert der Klebstofffestigkeit t_n^0 um 50 % reduziert um zu sehen wie sich das Kraftmaximum verändert. Dabei war keinerlei Dämpfung nötig. Das Kraftmaximum sinkt ab in einen Bereich ähnlich der Messungen (Legendeneintrag FEM LA SR 0.5 in Abbildung 71). Es besteht daher die Vermutung, dass die Klebstoffproben im Zugversuch durch die Entgasung in der Vakuumkammer eine höhere Qualität aufwiesen (womöglich weniger Lufteinschlüsse) als jene des DCB- und ENF-Tests, wo eine Entgasung der verklebten GFK-Platten unmöglich war. Die so ermittelte Prozesszonengröße ist leider kleiner als eine Elementkantenlänge (0,25 mm) und das Last-Verschiebungsverhalten nach dem Maximum sieht unplausibel aus (vergleiche mit der Corrected beam theory).
3. Zum Vergleich wurde noch ein Modell mit Kontinuumsmodellierung mit $0,5t_n^0$ und viskoser Dämpfung (VISCOSITY = 0,1) erstellt (gezeigt in Abbildung 69). Ein Klebstoffelement misst in x-Richtung 0,25 mm. Abbildung 70 zeigt die deformierte DCB-Probe.

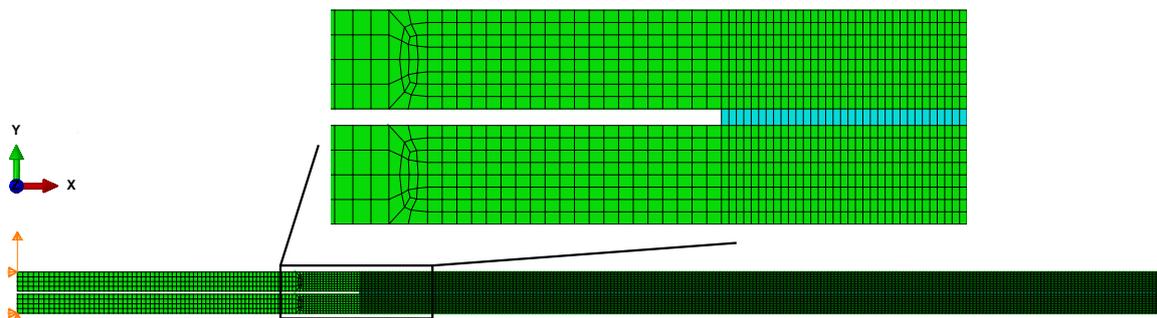


Abbildung 69: Finite Elemente Modell des DCB-Tests mit Kontinuumsansatz: $L = 200$ mm, $L_S = 30$ mm, $t = 3,35$ mm, $\eta = 0,563$ mm und $a_0 = 59,9$ mm. In grün CPE4- und cyan COH2D4-Elemente.

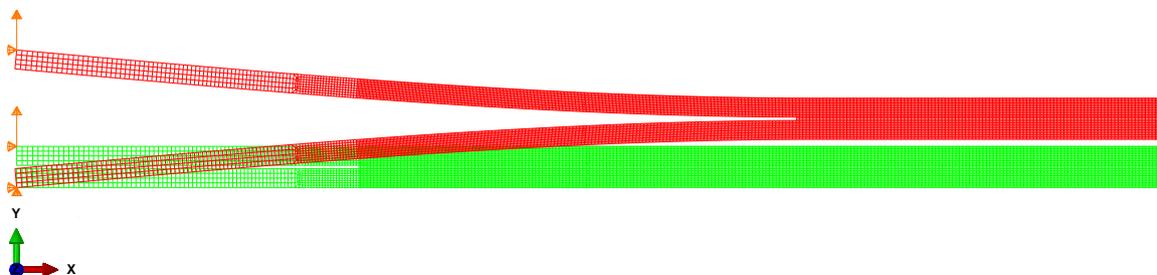


Abbildung 70: Deformation der DCB-Probe. Kontinuumsansatz. Grün: undeformiert, Rot: Verformt bei 17 mm Verschiebung.

Das Last-Verschiebungsverhalten (Legendeneintrag FEM CA SR 0.5 in Abbildung 71) passt qualitativ sehr gut zu Messungen und der Corrected beam theory und das Maximum ist identisch mit der 2. Analyse. Aus Abbildung 72 kann die Prozesszonlänge abgelesen werden. Sie beträgt 1,5 mm. Die Schädigungsenergie liegt um den Faktor 10 höher als jene durch viskose Dämpfung dissipierte.

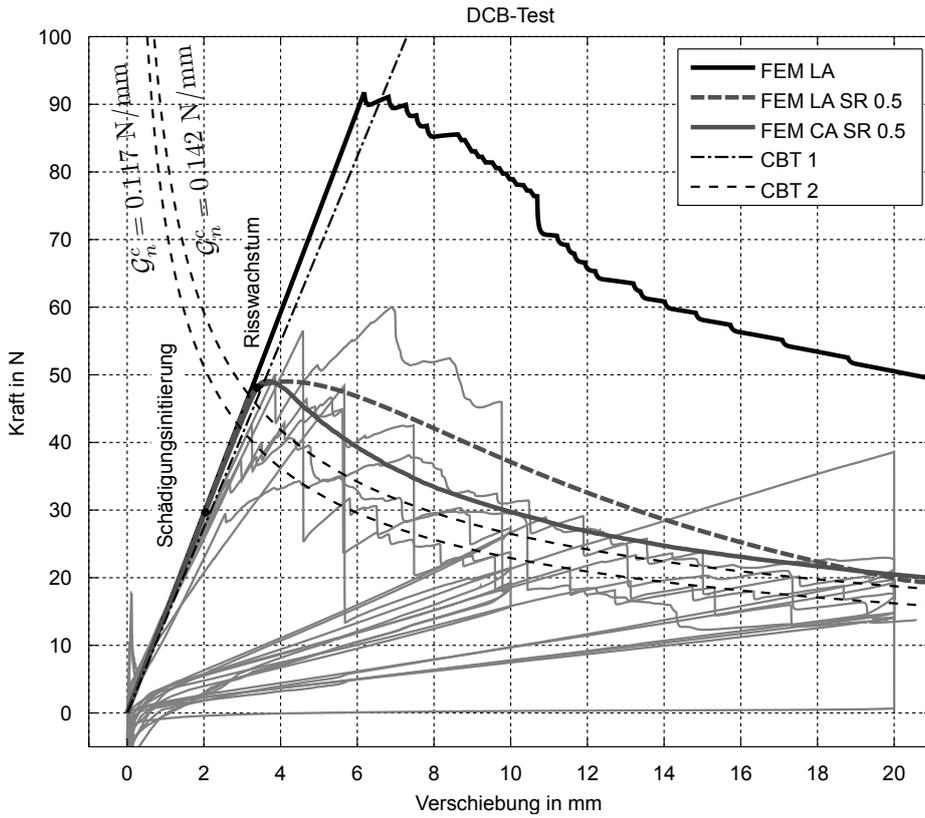


Abbildung 71: Last-Verschiebungsdiagramm. Reaktionskraft und Vertikalverschiebung am Loslager. Vergleich zwischen Finite Elemente Simulationen (FEM) mit den hellgrauen Messkurven und der Corrected beam theory (CBT).

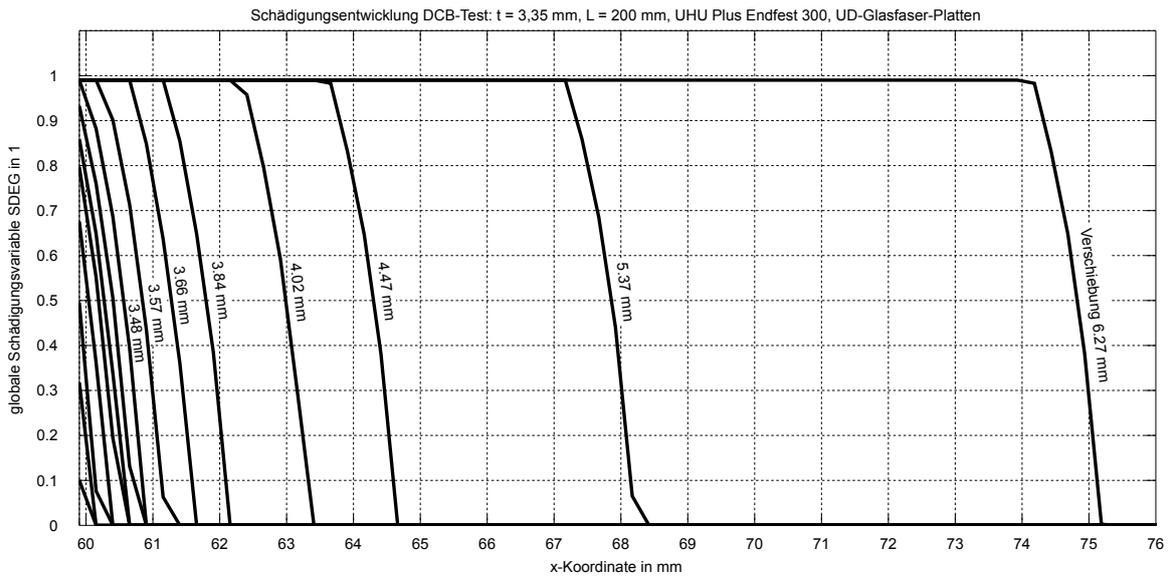


Abbildung 72: Ausbildung und Größe der Prozesszone. Modell mit Kontinuumsansatz entsprechend Punkt 3 und $0,5t_n^0$, sowie einer Elementkantenlänge von 0,25 mm.

5 Nachuntersuchung der Klebschicht

Bei der Analyse mittels Finite Elemente Methode und anschließendem Vergleich mit den Messergebnissen kam die Vermutung auf, dass die gemessene Klebstofffestigkeit t_n^0 zu hoch liegen könnte. Sie wurde nämlich im Zugversuch aus Proben mit entgastem Klebstoff ermittelt. Im Gegensatz dazu konnten die ENF- und DCB-Proben nach dem Zusammenfügen der beiden GFK-Platten nicht mehr entgast werden.

Anhand des ungeschädigten Bereichs, 70 mm vom rechten Probenende einiger ENF-Proben wurden Schliffproben für das Lichtmikroskop angefertigt und der Zustand der Klebschicht beurteilt. ENF-Proben 5+6, 9+10 und 13+14 wurden dafür herangezogen. Abbildung 73 zeigt die Markierungen für die Schnitte. Je Probe wurden ein Längs- und ein Querschnitt angefertigt. Die Schnittflächen in Längsrichtung wurden durch Nassschleifen mit feinsten Körnung 2400 bearbeitet. Unter dem Lichtmikroskop wurden die Längsschnitte beobachtet und sind rechts neben den zugehörigen Proben in Abbildung 74 dargestellt.



Abbildung 73: Vorbereitung der ENF-Mikroskopproben vor dem Schneiden.

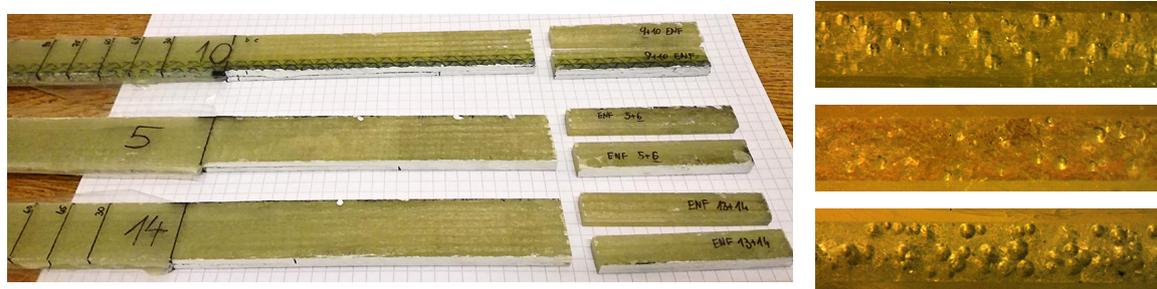


Abbildung 74: ENF-Mikroskopproben. Links: Übersicht und rechts: Ansicht der Klebschicht unter dem Mikroskop v.o.n.u. ENF 9+10, 5+6 und 13+14.

Es stellte sich heraus, dass sich in der Klebschicht Luftschlüsse in Form von Blasen befanden. Die in der Messung schlecht ausgefallene ENF-Probe 13+14 hatte

besonders viele Luftblasen. Sie entstammte der 2. Charge ENF-Proben. ENF-Probe 5+6 zeigte im Mikroskop sehr wenige Blasen. Diese und ENF-Probe 9+10 wurden in der 1. Charge gefertigt. Daher wird der Wert von t_n^0 der Klebschicht in den ENF- und DCB-Proben unter 44,67 MPa liegen und wahrscheinlich bei zirka 50 % davon.

6 Zusammenfassung

Für den Klebstoff UHU Plus Endfest 300 wurde eine Kohäsivzonenmodellierung mit bilinearem Traction-Separation Law angewandt. Um die Eingabewerte dafür zu bestimmen wurden vier voneinander unabhängige Werkstofftests durchgeführt: Zugversuch, TAST, ENF- und DCB-Test, sowie für das Biegeverhalten der Fügeiteile ein Dreipunkt-Biegeversuch.

Bei der Fertigung der Zugproben wurden die vermischten Klebstoffkomponenten in eine Silikonform gegossen und anschließend entgast. Die Temperierung erfolgte 3 Stunden lang bei 45 °C im Ofen. Im Zugversuch ließen sich die Klebstoffzugfestigkeit, 44,67 MPa, und der Elastizitätsmodul, mit dem Wert 2660 MPa, ohne Probleme bestimmen.

Der Schubmodul konnte aus dem TAST nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden. Ein einfaches mechanisches Extensometer ist ungeeignet die Kurve aus Schubspannung und -dehnung im TAST aufzuzeichnen. Mit dem verwendeten Video-Extensometer muss mehr Erfahrung gesammelt werden, wie sich das Messrauschen reduzieren lässt. Trotz der Probleme konnte die Schubfestigkeit mit Hilfe des TAST ermittelt werden und beträgt 20,41 MPa.

Höchste Präzision und Sauberkeit sind bei der Vorbereitung und dem Klebeprozess nötig. Die Variation der Klebschichtdicke zwischen den Proben war groß und vom Sollwert 0,2 mm wurde abgewichen. Die DCB-Proben wiesen eine mittlere Klebschichtdicke von 0,563 mm auf und die der ENF-Proben 0,428 mm. Klebschichten gleicher Dicke anzufertigen stellte sich besonders schwierig heraus. Dieser Fertigungsprozess gehört verbessert. Außerdem wäre eine größere Anzahl an Proben hilfreich für mehr Selektion bei der Mittelwertbildung.

Die Corrected beam theory eignet sich hervorragend für die Vorauslegung der DCB- und ENF-Proben, bei weniger Eingabewerten als der Kohäsivzonenmodellierung mittels Finite Elemente Methode. Es werden keine Klebstofffestigkeitswerte für die Corrected beam theory benötigt. Unidirektionale Glasfaserplatten für die Fügeiteile waren die geeignete Wahl für den Klebstoff UHU Plus Endfest 300 und bieten ausreichend Spielraum nach oben bis zum Eintreten von Faserbruch im Druckbereich. Für diesen Klebstoff kamen keine herkömmlichen Aluminium-Legierungen oder Stahl als Fügeiteilwerkstoff in Frage, wegen der Gefahr des Plastizierens im ENF-Test. Instabiles Risswachstum sollte vermieden werden. Dies trat beim ENF-Test auf, weil die aus der Literatur entnommenen elastischen Größen der Fügeiteile und die bruchmechanischen Größen des Klebstoffs stark von den tatsächlich gemessenen abwichen. Somit passte die Vorauslegung nicht mit dem Versuch zusammen. Bei einer Testwiederholung sollte deswegen die Anfangsrislänge vergrößert werden. Außerdem zeigte sich die Flächenmethode bei der Auswertung des ENF-Tests eher konservativ. Die damit

ermittelte kritische Energiefreisetzungsrate beträgt im ENF-Test 2,16 N/mm und im DCB-Test 0,142 N/mm.

Die Kohäsivzonenmodellierung der Klebschicht mit Kontinuumsansatz mittels Finite Elemente Methode bereitete weniger numerische Probleme bei der Gleichungslösung als mit dem lokalen Ansatz. Beim Nachrechnen mit der Finite Elemente Methode und durch Beobachtung von Schlißproben unter dem Mikroskop stellte sich heraus, dass die Zugfestigkeit des Klebstoffs in der Fuge der DCB- und ENF-Proben wahrscheinlich nur die Hälfte des Messwerts aus dem Zugversuch beträgt. Durch das Mischen der beiden Klebstoffkomponenten entstanden Lufteinschlüsse. Diese führen zu einer Verringerung der Klebstoffzugfestigkeit. Bei den Zugproben konnte durch das Entgasen eine blasenarme Masse angefertigt werden, was bei der Fertigung der schmalen Klebschicht nicht möglich war. Des weiteren hat sich gezeigt, dass ein ungenau bestimmter Schubmodul sich nur sehr gering auf die Berechnungsergebnisse auswirkt.

Mit den gemessenen Werkstoffparametern für die Klebschicht und Fügeteile ließ sich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Finite Elemente Simulation erzielen.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Habenicht. *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*. 6. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [2] M. Pröbster. *Elastisch Kleben - aus der Praxis für die Praxis*. Springer Vieweg, 2013.
- [3] A. V. Pocius. *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. 3rd Edition. Carl Hanser Verlag, 2012.
- [4] DIN EN 923:2016-03. *Klebstoffe - Benennungen und Definitionen*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- [5] P. L. Geiß u. a. „Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei“. In: *Merkblatt Informationsstelle Edelstahl Rostfrei* 382 (2012).
- [6] S. Ebnesajjad. *Adhesives Technology Handbook*. 2. Auflage. William Andrew Inc., 2008.
- [7] S. Trummer. *Analytische und numerische Berechnung von Klebeverbindungen*. Projektarbeit am Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der Technischen Universität Wien, 2017.
- [8] L. F. M. da Silva und A. Öchsner. *Modelling of Adhesively Bonded Joints*. Springer-Verlag, 2008.
- [9] L. F. M. da Silva und R. D. S. G. Campilho. *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Springer-Verlag, 2012.
- [10] Abaqus Online Documentation. *Abaqus Analysis User's Guide*. Dassault Systèmes, 2015.
- [11] DIN EN ISO 527-1:2012-06. *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- [12] DIN EN ISO 527-2:2012-06. *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- [13] DIN EN 14869-2:2011-07. *Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Füge­teile (ISO 11003-2:2001, modifiziert)*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- [14] L. F. M. da Silva u. a. *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. Wiley-VCH Verlag, 2012.
- [15] L. F. M. da Silva u. a. „Alternative Methods to Measure the Adhesive Shear Displacement in the Thick Adherend Shear Test“. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 22 (2008), S. 15–29.

- [16] DIN EN 6034:2016-02. *Luft- und Raumfahrt – Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren - Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates, Mode II – GIIC*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- [17] A. Akhavan-Safar u. a. „Application of adhesively bonded single lap joints for fracture assessment of adhesive materials“. In: *The Journal of Adhesion* (2017). DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2017.1329656>.
- [18] T. Flatscher. *A constitutive model for the elasto-plasto-damage ply behavior in laminated FRP composites: its development, implementation and application in FEM simulations*. Dissertation am Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der Technischen Universität Wien, 2010.
- [19] R. D. S. G. Campilho und T. A. B. Fernandes. „Comparative evaluation of single-lap joints bonded with different adhesives by cohesive zone modelling“. In: *Procedia Engineering* 114 (2015), S. 102–109.
- [20] J. P. R. Monteiro u. a. „Experimental estimation of the mechanical and fracture properties of a new epoxy adhesive“. In: *Applied Adhesion Science* 3:25 (2015).
- [21] L. A. Carlsson und R. B. Pipes. *Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe*. Teubner-Studienbücher: Werkstoffe. B. G. Teubner Stuttgart, 1989.
- [22] A. Biel. *Constitutive behaviour and fracture toughness of an adhesive layer*. Thesis for Licentiate of Engineering no 2005:24 at Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [23] DIN EN 6033:2016-02. *Luft- und Raumfahrt – Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren - Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates, Mode I – GIC*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- [24] T. Cegljar. *Finite Element Method Simulations of the Delamination in Laminated Composite Structures*. Master thesis der Universität von Ljubljana in Zusammenarbeit mit dem Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der Technischen Universität Wien, 2017.
- [25] T. K. O’Brien, W. M. Johnston und G. J. Toland. „Mode II Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Characterization of a Graphite Epoxy Composite Material“. In: *NASA Technical Memorandum* 216838 (2010).
- [26] H. Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2. Auflage. Springer-Verlag, 2007.
- [27] F. G. Rammerstorfer. *Skriptum zur Vorlesung Leichtbau*. Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der Technischen Universität Wien, 2015.
- [28] DIN EN ISO 178:2013-09. *Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.

Anhang A

Herleitung Simple und Corrected beam theory

Annahmen und Idealisierungen: Es gilt die linearisierte Elastizitätstheorie und die Bernoulli-Hypothese aus der Balkentheorie (Querschnitte bleiben eben). Im Gegensatz zum Kohäsivgesetz der Finite Elemente Methode wird keine Schub- oder Zugfestigkeit des Klebstoffs berücksichtigt. Die Klebschicht wird als unendlich dünn angenommen.

DCB-Probe

Die Nachgiebigkeit der DCB-Probe kann einfach aus der Formel für die Durchbiegung v unter der Last P eines Kragbalkens mit der Länge a und rechteckförmigem Querschnitt ($B \times t$) gewonnen werden:

$$v = 2 \frac{Pa^3}{3E_1I}, \quad (27)$$

mit $I = \frac{Bt^3}{12}$. Der Faktor 2 kommt zustande, da es sich um 2 Platten übereinander handelt. Das Verhältnis $C = \frac{v}{P}$ definiert die Nachgiebigkeit.

Aus Gleichung (8) ergibt sich dann die Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_n . Die Überleitung zur Corrected beam theory erfolgt wenn der Korrekturwert $(a + \chi t)$ anstelle von a eingesetzt wird. Gleichung (15a) gilt im ungeschädigten Bereich und ergibt sich aus $P \cdot C$. Sie ist eine Gerade im Last-Verschiebungsdiagramm. Wird der kritische Wert der Energiefreisetzungsrate $\mathcal{G}_n = \mathcal{G}_n^c$ erreicht so führt dies auf eine quadratische Gleichung für die Risslänge a

$$0 = a^2 + 2\chi ta + \frac{\chi^2 t^2 P^2 - \mathcal{G}_n^c B E_1 I}{P^2}$$

mit der Lösung

$$a = -\chi t + \frac{\sqrt{\mathcal{G}_n^c B E_1 I}}{P}.$$

Die kritische Risslänge kann nur einen positiven Wert ergeben, daher wurde die zweite Lösung gestrichen. Wird dies in die Formel der Nachgiebigkeit aus Gleichung (20) (ohne den Betragsstrichen) eingesetzt und auf v umgeformt so folgt als Ergebnis Gleichung (15b).

ENF-Probe

Die Nachgiebigkeit der ENF-Probe kann sehr schnell mithilfe des Satzes von Castigliano gewonnen werden. Dazu werden 2 Schnitte gemacht und die Biegemomentenverläufe ermittelt (siehe Abbildung 75):

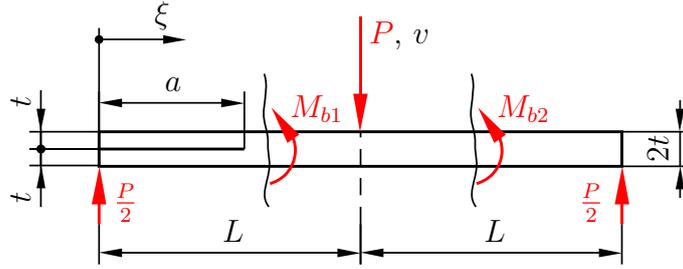


Abbildung 75: Berechnungsskizze ENF-Probe.

$$I(\xi) = \begin{cases} I_1 = 2 \frac{t^3 B}{12} & \text{für } 0 \leq \xi \leq a, \\ I_2 = \frac{(2t)^3 B}{12} & \text{für } a \leq \xi \leq 2L. \end{cases}$$

$$M_b(\xi) = \begin{cases} M_{b1}(\xi) = \frac{P}{2} \xi & \text{für } 0 \leq \xi \leq L, \\ M_{b2}(\xi) = P \left(L - \frac{\xi}{2} \right) & \text{für } L \leq \xi \leq 2L. \end{cases}$$

Aufstellen der Ergänzungsenergie (ohne Querkraftschub)

$$\begin{aligned} U^* &= \frac{1}{2} \int_0^{2L} \frac{M_b^2(\xi)}{E_1 I(\xi)} d\xi = \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_0^a \frac{M_{b1}^2(\xi)}{E_1 I_1} d\xi + \int_a^L \frac{M_{b1}^2(\xi)}{E_1 I_2} d\xi + \int_L^{2L} \frac{M_{b2}^2(\xi)}{E_1 I_2} d\xi \right) = \dots \\ &= \frac{P^2 (2L^3 + 3a^3)}{16 E_1 B t^3}, \end{aligned}$$

liefert gemäß dem Satz von Castigliano die Vertikalverschiebung unter der Last

$$\frac{\partial U^*}{\partial P} = \frac{P(2L^3 + 3a^3)}{8 E_1 B t^3} = v.$$

Aus Gleichung (8) ergibt sich dann die Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}_s . Die Überleitung zur Corrected beam theory erfolgt wenn der Korrekturwert $(a + 0,42\chi t)$ anstelle von a eingesetzt wird. Gleichung (5a) gilt im ungeschädigten Bereich und ergibt sich aus $P \cdot C$. Sie ist eine Gerade im Last-Verschiebungsdiagramm. Wird der kritische Wert der Energiefreisetzungsrate $\mathcal{G}_s = \mathcal{G}_s^c$ erreicht, so führt dies auf eine quadratische Gleichung für die Risslänge a

$$0 = a^2 + 2 \cdot 0,42\chi t a + \frac{3P^2 0,42^2 \chi^2 t^2 - 64\mathcal{G}_s^c B E_1 I}{3P^2}.$$

Hierbei ist $I = \frac{Bt^3}{12}$ eine Konstante. Ihre Lösung lautet

$$a = -0,42\chi t + \frac{8}{P} \sqrt{\frac{\mathcal{G}_s^c B E_1 I}{3}}.$$

Die kritische Risslänge kann nur positiv sein, daher wurde die zweite Lösung gestrichen. Wird dies in die Formel der Nachgiebigkeit aus Gleichung (11) eingesetzt und auf v umgeformt so folgt die implizite Gleichung (5b).

Anhang B

Datenblätter

Es folgen

- 5 Seiten Datenblätter zum Klebstoff UHU Plus Endfest 300,
- 2 Seiten Datenblätter zum Polyesterharz,
- 1 Seite zu den unidirektionalen Glasfasermatten und
- 4 Seiten Datenblätter zum Klebstoff Scotch-Weld™ DP490 von 3M.

UHU Technisches Merkblatt

UHU PLUS ENDFEST 300

UHU PLUS ENDFEST 300 ist ein lösungsmittelfreier Zweikomponenten-Klebstoff auf Epoxidharz-Basis, der hochfeste Klebebindungen an zahlreichen Werkstoffen ermöglicht. UHU PLUS ENDFEST hat eine UL Zulassung.

Spezifikation UHU PLUS ENDFEST 300	
Chemische Basis	Epoxidharz
Klebertechnik	Naßkleben
Temperatureinsatzbereich	- 40 °C bis + 100 °C (abhängig von Material und Konstruktion; auch höhere Temperaturen möglich – siehe Diagramm Seite 3)
Konsistenz	Binder: hochviskos Härter: mittelviskos
Viskosität [mPa·sec]	Binder: 40.000 Härter: 30.000
Basis	Binder: Epoxidharz Härter: aliphatische Amine
Lösungsmittel	keine
Festkörpergehalt [%]	100
Dichte [g/cm³]	Binder: ca. 1,2 Härter: ca. 0,96
Flammpunkt [°C]	Binder: ca. 210 Härter: ca. 110
Gefahrenklasse (VbF)	keine
Kennzeichnung gemäß Gefahrstoff-Verordnung	Binder: reizend, umweltgefährlich, enthält Epoxidharz Härter: reizend, enthält Amine
Gefahrensymbol	Xi; N
Topfzeit (bei 20 °C)	90 min
Festigkeitswerte	Mischungsverhältnis (Volumen) 1:1, Prüfung bei Raumtemperatur Handfestigkeit 6 h Funktionsfestigkeit 12 h Endfestigkeit 24 h
Zugscherfestigkeiten* (UHU Methode in Anlehnung an DIN EN 53283)	Mischungsverhältnis (Volumen) 1:1, Prüfung bei Raumtemperatur 10 h: 5 N/mm² 24 h: 12 N/mm² 5 Tage: 17 N/mm² 1 Monat: 17 N/mm²
Zugscherfestigkeiten** (DIN EN 1465)	24 h: 16,5 N/mm² 1 Monat: 17,5 N/mm²
Mischungsverhältnis (Volumen)	1:1 (andere Mischungsverhältnisse möglich)
optimale Verarbeitungstemperatur	+18 °C bis +20 °C
Beständigkeit	viele Lösungsmittel, verdünnte Säuren und Laugen
nicht geeignete Materialien	Polyethylen, Polypropylen, Teflon®, Polystyrol, Weich-PVC und sonstige Materialien
Farbe	Binder: opak Härter: honigfarben

UHU Technisches Merkblatt

UHU PLUS ENDFEST 300

Prüfbedingungen:

* Prüfung UHU Methode in Anlehnung an DIN 53283; Prüfkörper AlCuMg1 Korundgestrahlt (ELK 90): 82,5mm x 25mm x 1,5mm; Überlappungslänge 25mm x 12,5mm = 312,5mm²; Prüfgeschwindigkeit 15mm/min; Klebstoffdicke 0,1mm

** Prüfung nach DIN EN 1465; Prüfkörper AlCuMg1 Korundgestrahlt (ELK 90): 82,5mm x 25mm x 1,5mm; Überlappungslänge 25mm x 12,5mm = 312,5mm²; Prüfgeschwindigkeit 1mm/min; Klebstoffdicke 0,2mm

Eigenschaften:

Nach dem Mischen der beiden Komponenten härtet UHU PLUS praktisch ohne Volumenverlust zu einem duroplastischen Kunstharz. Die Fügeteile benötigen lediglich den Fixierdruck. Anwendung höheren Druckes ist nicht erforderlich. Die Härtung erfolgt auch unter Luftabschluß. Die Verarbeitungskonsistenz ist so eingestellt, daß bei Raumtemperatur gute Benetzungsfähigkeit mit minimalem Laufbestreben vereinigt ist. Das UHU PLUS-System gibt dem Anwender die Möglichkeit, durch Variation der Härtermenge zu härteren oder weicheren Endprodukten zu gelangen:

- a) Mischungsverhältnis 100 Gewichtsteile Binder + 50 Gewichtsteile Härter ergibt ein härteres Endprodukt mit etwas erhöhter Wärme-, Wasser- und Chemikalienbeständigkeit.
- b) Mischungsverhältnis 100 Gewichtsteile Binder + 80 Gewichtsteile Härter (gleichlange Stränge aus den Tuben) ist das normale Mischungsverhältnis für universelle Anwendung.
- c) Mischungsverhältnis 100 Gewichtsteile Binder + 120 Gewichtsteile Härter ergibt ein Endprodukt mit guter Flexibilität und verbesserter Schälfestigkeit, jedoch mit verminderter Wärme-, Wasser- und Chemikalienbeständigkeit.

In diesen Grenzen ist je nach Erfordernis jedes Mischungsverhältnis möglich. Mit erhöhtem Härteranteil verlängern sich Topfzeit und Härtung minimal.

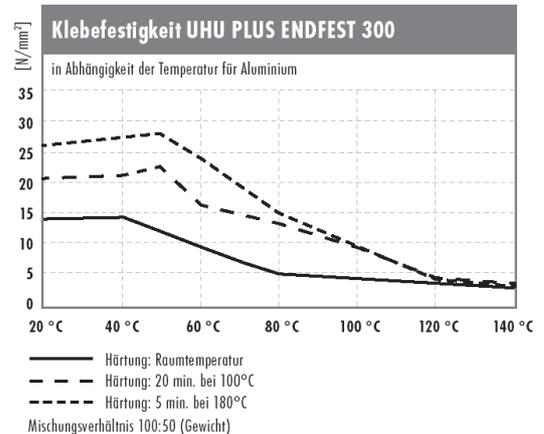
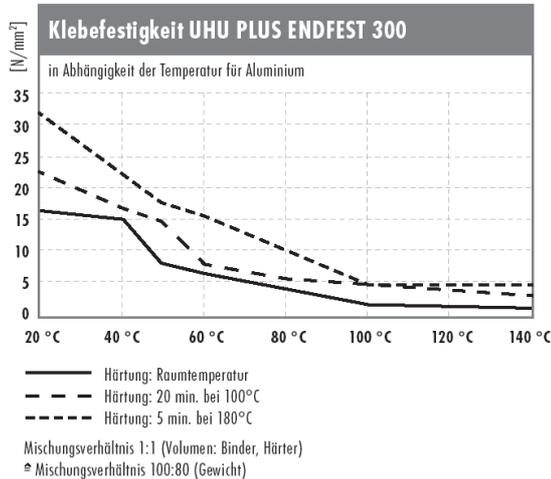
Temperaturen unter 18 °C bremsen den Härtungsvorgang und ergeben schlechte Bindefestigkeiten, deshalb ist für die Verarbeitung in kühlen Arbeitsräumen oder im Freien Wärmezufuhr notwendig (Heizlüfter, Infrarotstrahler oder dergleichen).

Besonders hohe Klebefestigkeiten erzielt man, wenn die Härtung bei erhöhter Temperatur im Bereich zwischen 70 °C und 180 °C erfolgt. Hierzu folgende Temperatur/Zeitrelationen als minimale Härtungszeiten:

45 Minuten bei	70 °C
30 Minuten bei	80 °C
20 Minuten bei	90 °C
10 Minuten bei	100 °C
7 Minuten bei	120 °C
6 Minuten bei	140 °C
5 Minuten bei	150 - 180 °C

Temperaturen über 200 °C sind weder bei der Härtung noch bei späterer Beanspruchung der Klebung zu überschreiten, weil die Klebefestigkeit und die Stabilität der Substanz beeinträchtigt wird.

UHU PLUS ENDFEST 300



Durchführung: Zugscherfestigkeiten in Anlehnung an DIN 53286; vor Prüfung Lagerung 7 Tage bei 20 °C/65% relative Luftfeuchtigkeit; Zwick Prüfmaschine mit Temperierkammer (Prüfgeschwindigkeit: 50mm/min)

Prüfbedingungen: Überlappungslänge: 25mm x 10mm = 250mm², Prüfkörper: AlCuMg1 sandgestrahlt (Korund ELK 90): 82,5mm x 25mm x 1,5mm

Klebefestigkeit UHU PLUS ENDFEST 300 in Abhängigkeit der Temperatur		
Temperatur	Aushärtezeit	Festigkeit*
20 °C	12 h	ca. 12 N/mm ²
40 °C	3 h	ca. 18 N/mm ²
70 °C	45 min	ca. 20 N/mm ²
100 °C	10 min	ca. 25 N/mm ²
180 °C	5 min	ca. 30 N/mm ²

* bei Zugscherbeanspruchung für ALU

Beim Kleben von Werkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ist zu beachten, daß der Klebstoff bei Temperaturschwankungen die Längenänderungen nur bis zu einem gewissen Grade aufnehmen kann. Es empfiehlt sich deshalb, in solchen Fällen den Härteranteil der Mischung zu erhöhen und damit ein flexibleres Endprodukt einzustellen.

(s. Seite 1).

Größere Metallteile, z.B. Schilder, auf Glasflächen lassen sich später nur außerordentlich schwer wieder ablösen, da man den Klebstoff mit Harzauflösemitteln nur vom Rande her angreifen kann.

An großen Glasflächen, z.B. an Schaufensterscheiben, sollten deshalb mit UHU PLUS keine Schilder, Buchstaben u. dgl. geklebt werden, da die Haftung am Glas so gut ist, daß Schwingungen der Scheibe unter ungünstigen Umständen Muschelbrüche im Glas bewirken können.

UHU PLUS ENDFEST 300

Beständigkeiten:

UHU PLUS-Verklebungen sind beständig gegen Feuchtigkeit, Öl, verdünnte Säuren und Laugen und viele Lösungsmittel. Feuchtigkeit, verdünnte Säuren und verdünnte Laugen und Mineralöl beeinträchtigen die Bindefestigkeiten auch bei längerer Einwirkung kaum. Allgemeingültige Angaben können nicht gemacht werden, da stets eine Vielzahl von Faktoren, wie Angriffsmöglichkeiten, Einwirkungsdauer und Temperatur, das Verhalten der Klebkonstruktion beeinflussen.

UHU PLUS ist alterungs- und witterungsbeständig. Kälte, selbst sehr niedrige Temperaturen, beeinflussen den Klebstoff nicht.

Bei Temperaturen unterhalb minus 60 °C erniedrigen sich die Zugscherfestigkeitswerte auf etwa 75 - 80 % der bei Raumtemperatur gemessenen Werte; werden die Proben wieder auf Raumtemperatur erwärmt, so werden auch die ursprünglichen Klebefestigkeiten wieder erreicht.

Physikalische Eigenschaften:

Gehärtetes UHU PLUS hat ausgezeichnete elektrisch isolierende Eigenschaften:

Spezifischer Widerstand: $5,6-5,8 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$, ermittelt bei 100 V und 21 °C.

Die Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612 beträgt 0,249 W/m·K bei 28,3 °C.

Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient liegt bei $90 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei 20 °C.

Druckfestigkeiten

(nach DIN 53454 gemessen am 10 mm-Würfel): 100 : 50 GT ca. 69 N/mm²

100 : 80 GT ca. 45 N/mm²

GT = Gewichtsteile

100 : 100 GT ca. 16 N/mm²

Verarbeitung:

Vorbehandlung der Klebeflächen: Die Klebeflächen müssen vor dem Auftragen des Klebstoffs sehr gründlich gereinigt werden.

Vorteilhafterweise schmirgelt man zunächst mit Schleifleinen, Körnung 100, danach entfettet man mit Zellstoff, der mit einem Fettlösemittel (Aceton) befeuchtet ist. Spezielle Vorbehandlungen zur Erzielung höchster Bindefestigkeiten sind in der DIN-Vorschrift 53281, Blatt 1, beschrieben. (Zu beziehen durch Beuth-Verlag GmbH, Berlin)

Aluminium und seine Legierungen werden z.B. durch den sogenannten Pickling-Prozeß vorbehandelt: Die gereinigten Teile werden 30 Minuten in die 60 – 65 °C warme Beizlösung getaucht.

Diese Lösung besteht aus:

27,5 Gewichtsteilen konz. Schwefelsäure (Dichte 1,82 g/cm³)

7,5 Gewichtsteilen Natriumdichromat (Na₂Cr₂O₇·2H₂O)

65,0 Gewichtsteilen Wasser

Nach den Beizen wird sehr gründlich gespült und in Warmluft getrocknet. Andere Metalle: siehe DIN 53 281, Blatt 1.

Kautschuk: Die Klebefläche von Vulkanisaten aus Natur- oder Kautschuk wird je nach Gummiqualität zwischen 2 und 10 Minuten mit konz. Schwefelsäure (Dichte 1,82 g/cm³) behandelt. Danach wird sehr gründlich gespült bis die Säurereste vollständig entfernt und getrocknet sind. Wenn beim Durchbiegen des Gummis auf der vorbehandelten Fläche feine Haarrisse erkennbar werden, ist die Klebefläche ausreichend vorbehandelt.

UHU PLUS ENDFEST 300

Glas, Porzellan und dergl. werden üblicherweise nur mit Lösungsmitteln entfettet. Bei Holz ist lediglich für staubfreie Oberfläche zu sorgen.

Gehärtete Kunststoffe (Duroplaste), wie Phenolharz (Bakelite), Melamin-, Harnstoff, Resorcin-, Polyester- und Epoxidharze schmirgelt man mit Schleifsteinen (Körnung 100) und entfettet wie oben angegeben.

Für thermoplastische Kunststoffe, wie Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol und Weich-PVC eignet sich UHU PLUS nicht.

Dosieren und Mischen:

Genaueres Dosieren und gründliches Mischen sind Voraussetzungen für gute Klebefestigkeiten und gleichmäßige Klebungen.

Das normale Mischungsverhältnis ist **1 :1 Volumenteile** (gleichlange Stränge aus den Tuben), das sind
100 Gewichtsteile Binder
+ 80 Gewichtsteile Härter

Geringe Abweichungen im Binder/Härter-Verhältnis machen sich kaum bemerkbar.

Zum Anmischen benutzt man am besten Kunststoffbecher (z.B. aus Polyethylen) oder nichtparaffinierte Pappbecher. Kleine Mengen lassen sich auch auf einer Glasplatte oder dergleichen mit Holz- oder Metallspatel anmischen. Es soll solange gemischt werden, bis die Paste gleichmäßige Farbe zeigt; dabei muß die Masse an Wandung und Boden mit erfaßt werden.

Baldmöglichst nach dem Mischen ist die Paste auf die Klebeflächen aufzubringen, um bestmögliche Benetzung zu gewährleisten. Das Auftragen geschieht mittels Holz- oder Metallspatel oder auch mit einem kurzborstigen Pinsel. Bei Großflächen verwendet man einen feingezähnten Spachtel, der das Aufbringen gleichmäßiger Mengen pro Fläche ermöglicht. Für Serienproduktion geben wir auf Anfrage gern Hinweise auf Hersteller von Dosier-, Misch- und Verarbeitungsgeräten.

Anmerkung für die Verarbeitung der Doppelkammerkartusche:
Mischdüse erst aufsetzen, sobald Materialaustritt aus beiden Kammern der Kartusche erfolgt.

Topfzeit (Gebrauchsdauer): Bei Raumtemperatur etwa 1 bis 1 1/2 Stunden.

Reinigung:

Die Reinigung von Arbeitsgeräten soll erfolgen, solange der Klebstoff noch nicht ausgehärtet ist. Hierzu sind Aceton sowie Nitroverdüner als Lösungsmittel geeignet. Dasselbe gilt für beschmutzte Kleidung. Der ausgehärtete Klebstoff kann nur mechanisch entfernt werden. Das Material auf Eignung prüfen.

Schutzmaßnahmen:

Bei der Verarbeitung von UHU PLUS ENDFEST 300 sollte man den Kontakt von Klebstoff mit der Haut möglichst vermeiden. Sauberkeit erleichtert die Arbeit. Die Hände sind baldmöglichst mit Wasser und Seife, keinesfalls mit Lösungsmittel zu reinigen. Bei Serienfertigung soll der Arbeitsplatz gut belüftet sein. Die gehärtete UHU PLUS-Substanz ist – wie die meisten Kunststoffmaterialien - physiologisch unbedenklich, geruchs- und geschmacksfrei. Eine Anwendung zur Verklebung von Teilen, die absehbar mit Lebensmitteln in Kontakt kommen können, wird nicht empfohlen, da der Klebstoff keine Zulassung nach FDA oder BGVV besitzt.

aropol®
unsaturated
polyester resins

AROPOL®

AROPOL® DRL 085 TB General Purpose Resin

AROPOL DRL 085 TB is a thixotropic, preaccelerated, low viscosity, general purpose resin based on orthophthalic acid. AROPOL DRL 085 TB has a medium geltime and due to its low viscosity, the glass fiber wetting properties are good.

Typical liquid resin properties

Property at 25 °C	Value	Unit	Method
Viscosity, Brookfield, RV2, 10 rpm	500	mPas	DS-09-138
Styrene content	43	%	DS-09-143
Density	1,1	kg/dm3	ISO 2811
Geltime at 20°C, 1.5% MEKP-50	40	min	DS-09-129
Peak exotherm,	150	°C	DS-09-129
Gel to Peak	20	min	DS-09-129

Typical cured resin properties

Property	Value	Unit	Method
Tensile strength	65	MPa	ISO 527
Tensile modulus	4100	MPa	ISO 527
Elongation at break	2,1	%	ISO 527
Flexural strength	110	MPa	ISO 178
Flexural modulus	3990	MPa	ISO 178
Heat deflection temperature (HDT)	65	°C	ISO 75/2 (A)
Hardness	42	Barcol	ASTM D2583

Application and use

AROPOL DRL 085 TB resin is suitable for hand lay-up and spray-up applications. It is especially recommended for manufacturing of industrial pieces and similar products.

Certificates and approvals

The manufacturing, quality control and distribution of products, by Ashland Performance Materials, are complying with one or more of the following programs or standards: Responsible Care, ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001.

Handling and storage

It is highly recommended that all material is stored at stable temperatures under 20°C preferably indoors, and away from direct sunlight. Prolonged storage outside of recommended conditions can influence liquid resin properties like viscosity and gel time. It is also strongly recommended to mix resin thoroughly before use. Shelf



Responsible Care*

Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.
* Registered service mark of the American Chemistry Council. ® Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.

aropol®
unsaturated
polyester resins

AROPOL®

AROPOL® DRL 085 TB General Purpose Resin

life of AROPOL DRL 085 TB is 3 months.

Notice

All information presented herein is believed to be accurate and reliable, and is solely for the user's consideration, investigation and verification. The information is not to be taken as an express or implied representation or warranty for which Ashland assumes legal responsibility. Any warranties, including warranties of merchantability or non-infringement of intellectual property rights of third parties, are herewith expressly excluded.

Since the user's product formulations, specific use applications and conditions of use are beyond the control of Ashland, Ashland makes no warranty or representation regarding the results which may be obtained by the user. It shall be the responsibility of the user to determine the suitability of any of the products mentioned for the user's specific application.

Ashland requests that the user reads, understands and complies with the information contained herein and the current Material Safety Data Sheet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Responsible Care*

Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.
* Registered service mark of the American Chemistry Council. ® Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.

Technical Datasheet - METYX Composite Reinforcements

PRODUCT CODE	5200.001.213
PRODUCT NAME	L 1200 E07A - 0 UNIDIRECTIONAL E-GLASS-127CM
PRODUCT DESCRIPTION	.
CUSTOMER CODE	.
CUSTOMER ID	.

REINFORCEMENT CONSTRUCTION		
LAYER	FIBER TYPE	AREA WEIGHT
1	0°	2400 Tex
2	90°	68 Tex
3	Stitch	76 Dtex
4		
5		
6		
7		

* Checked via own test based on ISO 3374.

TOTAL* 1226 gr / m2 (± %3)

OTHER PROPERTIES		ROLL INFO	
Stitch Gauge	7 stitches/inch	Roll Width	127 cm
Stitch Type	Tricot	Roll Weight	65 kg
Stitch Length	4 mm	Roll Length	42 m
Pilot Yarn / Position	Su Yeşili	Core Diameter	76 mm

Resin Compatibility	Loss on Ignition	Moisture Content
Polyester, Vinylester, Epoxy resins	Max.%0,70 by weight (ISO 1887)	Max.%0,20 by weight (ISO 3344)

Packaging	All rolls are wrapped with polyethylene bags; placed in pallet boxes or in single cardboard boxes or in pyramid style on pallets.
Labelling	Each roll is labelled on the inner side of the core, on the bag or on the cardboard boxes including a unique reference number for its traceability.
Storage	Store at %40-70 relative humidity and 18-30 °C temperature range. Recommended to be brought to working area 24 hrs prior to use.

Certification	DNV	Lloyd's Register
Metyx products are produced by Telateks A.S. company who is run by ISO 9001:2008 QA System.	TYPE Approved	-

Note: The above specifications reflect the product data on release date but are subject to change without prior notice.

Address:

Orhanli Beldesi 34956
Tuzla Istanbul – TURKIYE



Phone : +90-216-394-32-60
Fax : +90-216-394-32-58
Web : www.metyx.com



Scotch-Weld™ DP 490

Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff auf Epoxidharzbasis für das EPX-System

Produkt-Information

02/2003

Beschreibung

Scotch-Weld™ DP 490 ist ein zähelastischer Zweikomponenten-Konstruktionsklebstoff, der bei Raumtemperatur härtet. Er wurde für das Kleben von Metallen, Kunststoffen wie ABS, PVC-hart, PC, PMMA und Faserverbundwerkstoffen sowie anderen Werkstoffen entwickelt.

Zähelastizität, hohe Festigkeiten, erhöhte Warmfestigkeit, gutes Alterungsverhalten und eine schnelle, einfache Verarbeitung zeichnen das Produkt aus.

Physikalische Daten

	Basis	Härter
Basis	mod. Epoxidharz	mod. Polyamin
Farbe	schwarz	weiß
Konsistenz	pastös	
Viskosität (bei RT)*,**	520.000 mPa.s	100.000 mPa.s
Festkörper	100%	
Spez. Gewicht*	1,0 g/cm ³	1,0 g/cm ³
Mischungsverhältnis	2	1

* Durchschnittswerte

** Brookfield RVF, Spindel 6, 10 Upm

Verarbeitungsmerkmale

Methode	Fließen, EPX-Auftragssystem
Verarbeitungszeit	min. 90 Minuten
Weiterverarbeitungszeit	4-6 Stunden
Härtung	7 Tage bei 23° C 1 Tag bei 23° C + 1 Std. bei 80° C 2 Std. bei 65° C

Produktmerkmale

Temperatureinsatzbereich	-55 bis +120°C
Wasserbeständigkeit	gut
Witterungsbeständigkeit	gut
Alterungseigenschaften	gut

Festigkeiten

Die Festigkeitswerte stellen Durchschnittswerte auf geätztem Aluminium und anderen Werkstoffen bei unterschiedlicher Härtung gemäß der Norm dar.

Rollenschälfestigkeit (DIN 53289)

Härtung			
Prüftemperatur	7 Tage bei 23° C	2 Std. bei 65° C	24 Std. bei 23°C +1 Std. bei 80° C
- 55° C	--	--	--
23° C	160 N/25mm	185 N/25mm	130 N/25mm
80° C	--	--	--
23° C	--	--	170 N/25mm
- nach 30 Min. bei 80° C	--	--	170 N/25mm
- nach 30 Min. bei 120° C	230 N/25mm	210 N/25mm	205 N/25mm

Oberflächenvorbehandlung: AL-geätzt

Zugscherfestigkeiten (DIN 53283)

Härtung			
Prüftemperatur	7 Tage bei 23° C	2 Std. bei 65° C	24 Std. bei 23°C +1 Std. bei 80° C
- 55° C	17 MPa	24 MPa	24 MPa
23° C	26 MPa	30 MPa	30 MPa
80° C	12 MPa	12 MPa	13 MPa
120° C	2 MPa	2 MPa	2 MPa

Oberflächenvorbehandlung: AL-geätzt

Zugscherfestigkeiten auf Kunststoffen

Werkstoff	
ABS (gefüllt)	3 MPa**
PVC (gefüllt)	3 MPa**
PC, Glas gefüllt	3 MPa***
PET, Glas gefüllt	2 MPa***
PMMA	4 MPa***
PPO, Glas gefüllt	.. 5 MPa***
Faserverbundwerkstoffe	
- Kohlefaser-Epoxidharz	36 MPa*
- Glasfaser-Epoxidharz	30 MPa*
- SMC-Polyester	4 MPa**

* Bruch im Werkstoff

** Kohäsionsbruch

*** Adhäsionsbruch

Härtung: 7 Tage bei RT, Prüftemperatur: 23° C

Alle Werkstoffe mit Lösemittel gereinigt

Alterungsdaten

Einlagerung	Zugscherfestigkeit
Kontrollwert	26 MPa
30 Tage Wasser, 23° C	27 MPa
30 Tage Düsentreibstoff JP4, 23 ° C	29 MPa
30 Tage Skydrol 500 B, 23° C	28 MPa
30 Tage Hydrauliköl, 23° C	30 MPa
30 Tage 120° C	25 MPa
30 Tage 175° C	22 MPa
30 Tage 50° C/ 95 % r.F.	30 MPa

Härtung: 7 Tage bei 23° C, Prüftemperatur: 23° C

**Oberflächen-
vorbehandlung**

Die Oberflächen müssen trocken, frei von Staub, Öl, Trennmitteln und anderen Verunreinigungen sein. Die Art der Oberflächenvorbehandlung hängt von dem jeweiligen Anforderungsprofil (Festigkeit, Alterung etc.) ab.

Für die meisten Anwendungen reichen normalerweise Vorbehandlungen aus, die auf Metallen einen geschlossenen Wasserfilm an der Oberfläche ergeben.

Sowohl für metallische als auch nichtmetallische Werkstoffe wird eine mechanische Oberflächenvorbehandlung mit Scotch Brite 7447 empfohlen, die von einem Vor- und Nachreinigen mit werkstoff-verträglichen Lösemitteln unterstützt wird.

Anwendung

Die günstigste Verarbeitungstemperatur für Konstruktionsklebstoff und Werkstoff liegt zwischen 20°C und 25°C.

Optimale Festigkeiten werden bei Klebstoffschichtdicken von 0,05-0,15 mm erzielt.

Eine einheitliche Klebstoffschichtdicke kann durch Einlegen von entsprechenden Abstandhaltern, wie z.B. Glasfasern, sichergestellt werden. Die Teile werden zusammengefügt und für die Härtung positioniert/fixiert.

Auftrag

Mit dem EPX-Auftragssystem wird der Klebstoff dosiert, gemischt und auf die zu klebenden Werkstoffe aufgetragen.

Verarbeitungsgeräte

EPX-Auftragssystem	
50 ml Kartusche	EPX-Handauftragsgerät EPX-Druckluftpistole
400 ml Kartusche	EPX-Druckluftpistole

Bedienungsanleitung

Kartusche in die Halterung des Auftragsgerätes einsetzen und arretieren. Verschlusskappe entfernen und eine kleine Menge Klebstoff spenden (ausdrücken) bis beide Komponenten frei fließen.

Mischdüse (mind. 20 Elemente) aufsetzen, Auftragsspitze anwendungsbezogen vergrößern und den Klebstoff auftragen.

Nach dem Klebstoffauftrag Mischdüse entfernen, Austrittsöffnungen an der Kartusche reinigen und Verschlusskappe aufsetzen.

Bleibt die Mischdüse solange auf der Kartusche, daß die Verarbeitungszeit überschritten wird, muß sie durch eine neue ersetzt werden.

Härtung

Die Härtung der Klebstoffe erfolgt bei Raumtemperatur, kann jedoch durch Wärme beschleunigt werden. Die Festigkeitszunahme bei einigen Klebstoffen ist so zügig, daß die Teile nach 4-6 Stunden weiterverarbeitet werden können.

Die Endfestigkeit ist nach ca. 7 Tagen bei RT erreicht.

Reinigung

Rückstände von nicht gehärtetem Klebstoff und an Verarbeitungsgeräten können mit Lösemitteln wie Ketone entfernt bzw. gereinigt werden. Bei Gebrauch des Reinigungsmittels sind die notwendigen Sicherheitsvorschriften zu beachten.

Gehärteter Klebstoff kann nur mechanisch entfernt werden.

Lagerung und Handhabung

Die beste Lagerfähigkeit hat der Klebstoff bei einer Temperatur von 15°C bis 25°C. Höhere Temperaturen verkürzen die normale Lagerfähigkeit. Niedrigere Temperaturen verursachen vorübergehend eine höhere Viskosität.

Umfaßt das Lager Kartuschen aus mehreren Lieferungen, so sollten diese in der Reihenfolge ihres Einganges verarbeitet werden.

Sicherheitshinweise

Gefahrenklasse nach VbF	-
Flammpunkt	> 100°C
Lagerfähigkeit*	15 Monate bei RT

* ab Versanddatum Werk/Lager

Gefahrenhinweise

- R 34 Verursacht Verätzungen
- R 43 Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich

Sicherheitsratschläge

- S 24/25 Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.
- S 26 Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren.
- S 28 Bei Berührung mit der Haut sofort mit viel Wasser und Seife abwaschen.
- S 37/39 Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen
- S 45 Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, dieses Etikett vorzeigen)
- S 2015 Beschmutzte Kleidung sofort reinigen, ungereinigte Kleidung nicht benutzen.