

Methodik zur Auslegung von Klebverbindungen mit variabler Klebschichtdicke

Design Methodology for Bonded Joints with Varying Adhesive Thickness

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

André Gabener

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Tag der mündlichen Prüfung: 28.06.2016

Aachener Berichte aus dem Leichtbau
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 3/2016

André Gabener

**Methodik zur Auslegung von Klebverbindungen
mit variabler Klebschichtdicke**

Design Methodology for Bonded Joints
with Varying Adhesive Thickness

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4681-6

ISSN 2509-663X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau in den Jahren 2009 bis 2015. Ideengeber für die innerhalb dieser Arbeit diskutierte Forschungsfrage war maßgeblich das Raumfahrtprojekt iBOSS (intelligent Building Blocks for On-Orbit Satellite Servicing) mit dessen Bearbeitung ich den Großteil meiner Zeit am Institut betraut war.

Ich möchte an dieser Stelle den Personen danken, die direkt oder indirekt zur erfolgreichen Vollendung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder. Vielen Dank für die intensive Betreuung und zielgerichteten fachlichen Diskussionen während der Erstellung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisinger für die Übernahme des Koreferats sowie Frau Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin möchte ich allen Mitarbeitern und Studenten des Instituts für Strukturmechanik und Leichtbau danken, die sowohl durch ihre fachlichen als auch privaten Beiträge diese Arbeit ermöglicht und die Zeit abseits der Arbeit sehr angenehm gestaltet haben. Die Kollegialität untereinander habe ich sehr geschätzt und ist keineswegs selbstverständlich. Ich werde die Zeit am Institut stets in sehr guter Erinnerung behalten.

Ich danke meiner Familie dafür, dass Sie meinen beruflichen Weg ermöglicht und mich nach allen Kräften unterstützt hat. Nicht zuletzt bei der Korrektur dieser Arbeit. Ich weiß es sehr zu schätzen, alle notwendigen Freiräume bekommen und stets den erforderlichen Rückhalt erfahren zu haben.

Ein besonderer Dank zum Abschluss gilt meiner Frau Kathrin. Ich danke ihr für ihre Geduld und ihr Verständnis während der Jahre meiner sich auf das Wochenende beschränkenden Anwesenheit. Dies hat mir bei der Verfolgung meines persönlichen Zieles sehr geholfen.

Essen, im Juli 2016
André GABENER

Kurzfassung

Innerhalb dieser Arbeit wird die Entwicklung einer konsistenten Gesamtmethodik zur Auslegung von dickschichtigen strukturellen Klebverbindungen vom Entwurf über die Berechnung bis zum Nachweis und Qualifizierung vorgestellt. Die Arbeit enthält hierzu sowohl theoretische und numerische als auch experimentelle Anteile. Existierende numerische sowie experimentelle Ansätze werden vergleichend gegenübergestellt, kritisch diskutiert und bewertet. Es wird untersucht, welche Besonderheiten bei der Ermittlung erforderlicher Kennwerte zu Charakterisierung von dickschichtigen Klebverbindungen Berücksichtigung finden müssen. Bereits normierte Versuche, wie der DCB-Versuch, werden vor dem Hintergrund analysiert, ob die ursprünglich für dünnsschichtige nicht-metallische Klebverbindungen getroffenen Annahmen und Grundlagen hier ebenfalls angewendet werden können. Von Bedeutung ist hierbei unter anderem der Einfluss möglicher plastischer Verformungen der Fügeteile sowie die Spannungsverteilung über der Klebschichtdicke. Weiterhin wird ein in der Literatur noch nicht hinreichend beschriebener Versuch (Arcan-Test) durch ergänzende numerische und experimentelle Analysen hinsichtlich seiner Verwendbarkeit zur Kennwertermittlung untersucht.

Die Arbeit baut hierbei auf der Diskussion relevanter lokaler sowie globaler Einflussfaktoren auf. Hierbei wird untersucht und aufgezeigt, welche grundlegenden Einflussgrößen bei der Auslegung dickschichtiger Klebverbindungen berücksichtigt werden müssen. Es wird gezeigt, wie die Randbedingungen, z. B. durch die Geometrie der Klebverbindung, den Spannungszustand innerhalb der Klebverbindung beeinflussen. Für zylindrische Rohrverbindungen wird ein eindimensionales Ersatzmodell entwickelt, dass eine effiziente Berechnung ermöglicht.

Die Arbeit schließt mit einer Validierung der entwickelten Methodik, wobei vier unterschiedliche Lastfälle diskutiert werden.

Schlagwörter: Finite Elemente Methode, Klebverbindung, Bruchmechanik, Materialkennwertermittlung, Auslegungsmethode.

Abstract

Within this thesis, a methodology to design thick adhesive bonds is developed. The methodology considers the entire design process from preliminary design until qualification. Therefore this work consists of theoretical and numerical as well as experimental parts. Existing numerical and experimental approaches are compared, discussed and finally assessed. The investigation focusses on effects that have to be considered in context of thick adhesive bonds. Existing and standardized test methods as the DCB-test were originally developed to determine the inter-laminar fracture toughness of FRP specimens. Within this work it is analyzed and checked, whether the underlying assumptions are still valid when metallic adherents are used. Especially the influence of plastic deformation within the substrates and the stress distribution within the adhesive layer are of concern. Furthermore a not yet standardized test set-up (Arcan test) will be investigated by means of both numerical and experimental test. The applicability to determine required material properties will be shown.

Basis for this work is the discussion of relevant local and global influence factors. It is investigated and shown which parameters have to be considered during the design process of thick adhesive bonds. It is shown how boundary conditions such as the geometry influence the stress distribution within the adhesive layer. For cylindrical hollow cross-sections a simple model is developed that allows the simplification of 3D models to simple 1D models. The model considers the stiffness of the cross-section using an elastic foundation.

The thesis closes showing the validation of the developed methodology where four different load cases are considered.

Keywords: Finite Element Method, Adhesive Bonding, Fracture Mechanics, Material Parameter, Design Method

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Stand der Technik	4
1.2.1	Experimentelle Methoden	5
1.2.2	Analytische und numerische Methoden zur Spannungsberechnung	9
1.2.3	Bruchmechanische und energiebasierte numerische Modellierungsansätze	11
1.3	Diskussion des Stands der Technik am Beispiel von SLJ Stahlproben	13
1.3.1	Experimentelle und numerische Untersuchung	14
1.3.2	Vergleich der Ergebnisse	15
1.4	Problemstellung	16
1.5	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	18
2	Grundlagen und lokale Einflussgrößen auf das Klebschichtverhalten	23
2.1	Einsatz von Klebverbindungen in der heutigen industriellen Anwendung	23
2.2	Lastfälle und Spannungsverläufe in Klebverbindungen	24
2.2.1	Lastfälle	24
2.2.2	Spannungsverteilung in Überlappungsklebung	26
2.3	Versagensmuster	29
2.4	Einfluss der Klebschichtdicke	31
2.5	Einfluss der Geometrie des Klebschichtauslaufs	32
2.6	Einfluss hybrider Verbindungen	34
2.7	Einfluss der Oberflächeneigenschaften	35
2.7.1	Die Grenzschicht zwischen Fügeteil und Klebschicht	35
2.7.2	Einfluss der Oberflächenvorbehandlung für Aluminium Klebverbindungen	38
2.8	Einfluss durch Eigenspannungen	40
2.9	Zusammenfassung und Bewertung	41
3	Einfluss globaler geometrischer Eigenschaften & Randbedingungen	43
3.1	Einfach und doppelt überlappte Referenzproben	45
3.1.1	Modell nach Volkersen	46
3.1.2	Modell nach Goland und Reissner	47
3.1.3	Diskussion numerischer & analytischer Berechnungsergebnisse	48
3.2	Zylindrische Rohrverbindung	50
3.2.1	Vergleich von Volumen- und Schalenmodellen	51
3.2.2	Vergleich analytischer und numerischer Berechnungen	52

3.2.3	Die zylindrische Rohrverbindung idealisiert durch ein 2D-Ersatzmodell	54
3.3	Ebenes Schubfeld	56
3.4	Zusammenfassung und Bewertung	59
4	Numerische Modellierungsstrategien	61
4.1	Bruchmechanische Beschreibung des Klebschichtversagens	61
4.1.1	Mixed-Mode Verhalten	66
4.1.2	Ebener Spannungs- und ebener Verzerrungszustand	67
4.2	Numerische Methoden basierend auf der Bruchmechanik	68
4.3	Verwendete Modellierungsvarianten	70
4.3.1	Modellierungsvariante 1 - Rein kohäsiv	70
4.3.2	Modellierungsvariante 2 - Gemischt kohäsiv	71
4.3.3	Modellierungsvariante 3 - Kontakt	72
4.3.4	Modellierungsvariante 4 - xFEM	73
5	Entwicklung einer konsistenten Versuchs- und Auslegungsmethodik	75
5.1	Genormte Prüfverfahren	76
5.1.1	Zugversuch an reinen Klebstoffproben	76
5.1.2	Zugversuche an Stumpfstoßverbindungen	77
5.1.3	Scherprüfung mit dicken Fügeteilen	78
5.1.4	Stumpf verklebte Hohlzylinder	80
5.1.5	Iosipescu-Versuch	81
5.1.6	DCB-Versuch	82
5.1.7	ENF-Versuch	87
5.1.8	MMB-Versuch	89
5.1.9	Bewertung der genormten Versuche	93
5.2	Nicht genormte Prüfverfahren & Methoden zur Versuchsauswertung	94
5.2.1	Auswertung des DCB-Versuchs mit Hilfe des J-Integrals	94
5.2.2	Anwendung des J-Integrals auf den ENF-Versuch	98
5.2.3	ELS-Versuch	100
5.2.4	CLS-Versuch	101
5.2.5	MCB-Versuch	102
5.2.6	Arcan-Versuch	103
5.3	Numerische und experimentelle Erprobung des Arcan-Tests	105
5.3.1	Vergleich von 2D & 3D Modellen	106
5.3.2	Einfluss des Versuchsaufbaus	107
5.3.3	Einfluss der Fügeteilgeometrie	108
5.3.4	Einfluss der Kerben in der Klebschicht	113
5.3.5	Einfluss der thermalen Eigenspannungen	118
5.3.6	Vorbereitung der experimentellen Untersuchung	120
5.3.7	V Versuchsergebnisse	121
5.3.8	Analyse der Ergebnisse & Bewertung	123

5.3.9	Neukonstruktion der Vorrichtungen	125
5.4	Zusammenfassung und Gesamtbewertung experimenteller Verfahren	126
5.5	Klebschichtmodell	129
5.6	Methodik zu Auslegung dicker Klebverbindungen	131
6	Validierung der Auslegungsmethodik	135
6.1	Technische Ausrüstung, Materialien und Prozessschritte	135
6.1.1	Versuchsausrüstung	135
6.1.2	Materialien	136
6.1.3	Probenvorbereitung und Herstellung	137
6.2	Versuche an SLJ-Proben	139
6.3	DCB-Versuche	143
6.3.1	Proben	143
6.3.2	Auswertung der Ergebnisse	144
6.3.3	Bewertung der DCB-Versuchsergebnisse	147
6.4	Arcan-Versuche	148
6.4.1	Arcan-Test - 0° -Versuche (Zug)	149
6.4.2	Arcan-Test - 90° -Versuche (Schub)	151
6.4.3	Arcan-Test - 45° -Versuche (Schub/Zug)	154
6.4.4	Zusammenfassung und Bewertung	155
6.5	Zusammenfassung der ermittelten Materialkennwerte	156
6.6	Numerische Berechnungen	157
6.6.1	Ebener Verformungs- vs. ebener Spannungszustand	158
6.6.2	Konvergenzverhalten	160
6.7	Vorstellung und Diskussion der numerischen Berechnungen	162
6.7.1	SLJ	162
6.7.2	DCB	165
6.7.3	Arcan	168
6.7.4	SLJ auf elastischer Bettung	169
6.8	Zusammenfassung	169
7	Fazit und Ausblick	171
	Literatur	177
A	Anhang	189
A.1	Numerische Modelle	189
A.2	Spannungsverläufe	190
A.3	Konstruktionszeichnungen, Pobenabmessungen und Versuchsaufbauten	191
A.4	Experiment	197

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ausschnitt eines SLJ mit angreifenden Schnittkräften	5
1.2	Arcan-Versuchsvorrichtung - Version 1.0	7
1.3	Schritte zur Vorbereitung der SLJ Stahlproben	14
1.4	Hauptdehnungen gemessen mit Aramis (oben), verwendetes Sprengelmuster (Mitte) und Bruchbilder der SLJ-Proben	16
1.5	Vergleich experimenteller und numerischer Versagenslasten für SLJ	17
2.1	Beispiele für vorteilhaftes und nachteiliges Design von Klebverbindungen [58]	25
2.2	Grundlegende Belastungsarten von Klebverbindungen [59]	26
2.3	Dehnungs- und Spannungsverteilung innerhalb der Klebschicht für ideal steife und nachgiebige Fügeile	26
2.4	Doppelt überlappte Klebverbindung idealisiert als Dreigurtscheibe	27
2.5	Spannungsverteilung am Klebschichtende mit und ohne Harzüberschuss [40] sowie Ort der Rissinitiierung und des Verlaufs [61]	28
2.6	Rissverläufe innerhalb einer Klebschicht [66] & [67]	30
2.7	Substratnahe Versagensmuster nach Stieglitz [52]	31
2.8	Festigkeit der einfach überlappten Klebverbindung in Abhängigkeit der Kleb- schichtdicke [33]	32
2.9	Analytisch und experimentell ermittelter Rissverlauf in rechtwinklig auslaufen- den Überlappungsklebung (a)) [8] und Verlagerung des Singularitätspunkts in Abhängigkeit der Geometrie (b-d)) [71]	33
2.10	Qualitativer Verlauf der Schubverformung über der Klebschichtdicke [33]	35
2.11	Schichtenaufbau eines Metall-Polymer-Verbundes nach Bischof [75]	36
2.12	Alu-Bleche mit Bohrungen zur Herstellung von SLJ's	38
3.1	Anwendungsbeispiele für strukturelle Klebungen	44
3.2	Ausgewertete Pfade in SLJ und Schub- (links) sowie Schälspannungen (rechts) entlang Pfad I für SLJ und DLJ	49
3.3	Schubspannungsverläufe im SLJ für unterschiedliche Klebschichtdicken (links) und Schäl- bzw. Schubspannungsverlauf über der Klebschichtdicke entlang Pfad II für SLJ (rechts)	51
3.4	Zylindrische Rohrverbindung	51
3.5	Spannungslauf innerhalb der Klebschicht eines SLJ unter axialer Last für Solid- Solid und Shell-Solid Modellierung	53
3.6	Schälspannungen (links) und Schubspannungen (rechts) entlang der Klebschicht in SLJ, DLJ & Rohrverbindungen	54

3.7	Idealisierung der zylindrischen Rohrverbindung als SLJ auf elastischer Bettung und Modell zur Ermittlung der Bettungskennziffer	54
3.8	Mises Vergleichsspannungen entlang der Klebschicht in zylindrischen Rohrverbindungen - 3D Modelle & 2D mit elastischer Bettung	56
3.9	Analysierte Schubwand mit Submodell	57
3.10	Analysiertes Submodel der Klebverbindung mit analysiertem Pfad sowie den Spannungen entlang des Pfades	58
4.1	Rissöffnungsarten	62
4.2	J-Intergal	63
4.3	Risswachstum in duktilen Werkstoffen durch Vereinigung von Fehlstellen und Poren a) sowie in spröden Materialien wie z.B. CFK b)	64
4.4	Unterschiedliche Idealisierungen des Kohäsivzonenverhaltens	65
4.5	Beschreibung des bilinearen Kohäsivzonenansatzes	65
4.6	Kohäsivzonenengesetz für Mixed-Mode Belastung	66
4.7	Plastische Einflusszone für ebenen Spannungs- und ebenen Verformungszustand	68
4.8	Modellierungsvariante 1: Modellierung der Klebung mit kohäsiven Elementen - Beispiele für $t_K = 0,2$ mm und $t_K = 1,0$ mm	71
4.9	Modellierungsvariante 2: Modellierung der Klebung mit einem gemischten Ansatz - kohäsive Elemente innerhalb der Grenzschicht, Kontinuumelemente für den Klebschichtbereich dazwischen	72
4.10	Modellierungsvariante 3: Idealisierung der Versagenszone innerhalb der Grenzschicht über eine Kontaktbedingung	72
4.11	Modellierungsvariante 4: Berechnung der Rissinitiierung sowie des Rissfortschritts mit Hilfe der xFEM	73
5.1	Versuchsaufbau der Scherprüfung mit dicken Fügeteilen DIN EN 14869-2 [115]	79
5.2	Stumpf verklebter Hohlzylinder zur Torsionsprüfung nach DIN EN 14869-1	80
5.3	Iosipescu Versuchsaufbau [120]	81
5.4	Varianten des DCB-Versuchs [25]	83
5.5	Einflusszone vor Risspitze durch unterschiedliche Fügeteilsteifigkeit	84
5.6	DCB Vorversuch: a) Aufbau, b) Bruchfläche mit Farbeindringmittel und c) Ergebnisse der Energiefreisetzungsrate mit CBT	86
5.7	Abhängigkeit der Energiefreisetzungsrate nach Biel [129] (links) und Lee [130] (rechts)	87
5.8	Verformung der ENF-Probe	87
5.9	MMB-Test: a) Versuchsaufbau mit belasteter Probe, b) Bruchfläche und c) ausgewertete Energiefreisetzungsraten	90
5.10	Last-Verformungskurven der MMB-Versuche für unterschiedliche Klebschichtdicken	91
5.11	Numerisches Modell der MMB-Probe mit Spannungsverteilung sowie Richtung der Hauptspannungen innerhalb der Klebschicht	92

5.12	Konturintegral zur Auswertung des J-Integrals [132]	95
5.13	Bruchenergie (links) und Spannungs-Verformungs-Verlauf nach J-Integral für unterschiedliche Dicken [133]	96
5.14	Energiefreisetzungsrate für unterschiedliche Klebschichtdicken nach J-Integral-methode gemäß Marzi [18]	97
5.15	Kraft-Verformungs-Verlauf (links) sowie Verdrehwinkel des Kraftangriffspunkts während des Verformungsvorgangs (rechts) für DCB-Proben mit unterschiedlichen Klebstoffversagensspannungen	99
5.16	Abmessungen der ENF-Probe und ausgewertete J-Integrale für unterschiedliche Fügeiteilgeometrien	100
5.17	Geometrie der ELS (End-Loaded Split) Probe	101
5.18	Form und Belastung der CLS-Probe [28]	101
5.19	Der MCB-Versuch (Mixed mode double Cantilever Beam)	102
5.20	Spannungsverteilung im 3D-Arcan-Modell	106
5.21	Exzentrische Randbedingungen unter reiner Zugbelastung	107
5.22	Spannungsverläufe für unterschiedliche Exzentrizitäten und Randbedingungen	109
5.23	Geometrien der untersuchten Arcan-Proben mit unterschiedlichen Klebschichtdicken und Radien am Fügeiteil	110
5.24	Spannungsüberhöhung in Arcan-Proben unter Zugbelastung	110
5.25	Spannungsüberhöhung in Arcan-Proben unter Schubbelastung	111
5.26	Normierte Spannungen entlang der Grenzschicht für Arcan-Proben unter Zug- (links) und Schubbelastung (rechts)	112
5.27	Modellierungsvarianten der Kerben und Fügeiteilgeometrien	114
5.28	Mises Vergleichsspannung in Arcan-Probe mit und ohne schwindungsbedingter Kerbe für Proben mit $t_K = 1,1$ mm	115
5.29	Spannungen entlang Klebschichtmittellinie für Arcan-Proben mit Schwindungseffekt und unterschiedlichen Klebschichtdicken	116
5.30	Max. Vergleichsspannung im Zentrum sowie in der Grenzschicht für $t_k = 0,3$ mm (links) und $t_k = 1,1$ mm (recht) - Schraffierte Ergebnisse für Fügeiteil mit Kerbe	117
5.31	Mises Vergleichsspannung in Arcan-Probe durch thermale Einflüsse	119
5.32	a) Versuchsaufbau und b)-f) Proben der ARCAN-Vorversuche	121
5.33	Ergebnis der Aramis-Verformungsmessung zu unterschiedlichen Laststufen	122
5.34	Last-Verformungskurven der Arcan-Proben (links) sowie von der Klebschicht aufgenommene Energie (rechts) für unterschiedliche getestete Klebschichtdicken	123
5.35	Vorrichtungen zum Aushärten der Arcan-Proben - Version I und II	125
5.36	Prüfvorrichtung zum Einspannen der Arcan-Proben - Version I und II	126
5.37	Prüfvorrichtung in unterschiedlichen Belastungswinkeln	127
5.38	Theoretisches Klebschichtmodell	130
5.39	Methodik zur Auslegung für Fall A	133
5.40	Methodik zur Auslegung für Fall B	134

6.1	Versuchsausrüstung	136
6.2	Unterschiedliche Stufen während der Probenvorbereitung	139
6.3	Bruchflächen der SLJ-Stahlproben mit einer Klebschichtdicke von $t_K = 0,2$ mm und $t_K = 1,0$ mm	141
6.4	Von Mises Dehnungen in einem SLJ mit $t_K = 0,9$ mm ausgewertet mit Aramis & Last-Verformungskurven unterschiedlicher SLJ mit $t_K = 0,2$ mm & $t_K = 0,9$ mm	142
6.5	Versuchsaufbau für DCB-Versuche	143
6.6	Präparierte DCB-Probe	144
6.7	Bruchflächen ausgewählter DCB-Proben mit unterschiedlichen Klebschichtdicken	145
6.8	Bruchflächen ausgewählter DCB-Proben mit Risseindringmittel	145
6.9	G_I nach CBT abhängig von der Risslänge für Proben 2_1 & 3_1 (links) und G_I für unterschiedliche Probengeometrien ausgewertet mit J-Integral (rechts)	147
6.10	Auswertung G_I mit J-Integral für Proben 2_1 & 3_1 (links) und Proben 3_1 & 3_02 (rechts)	148
6.11	Bruchbilder der Arcan-Proben getestet unter 0° Belastung	149
6.12	Versagensspannung der 0° Arcan-Proben bezogen auf die ursprüngliche Fläche (links) und die reale Fläche (rechts)	150
6.13	Schwindungsbedingte Kerben der Arcan-Proben	150
6.14	Bruchbilder der Arcan-Proben getestet unter 0° Belastung	151
6.15	Bruchbilder von Arcan-Proben unter 90° Belastung	152
6.16	Versagensspannung der 90° Arcan-Proben bezogen auf ursprüngliche Fläche (links) sowie bezogen auf reale Fläche (rechts)	153
6.17	Last-Verformungskurve unter reiner Schubbelastung absolut (links) sowie normiert auf Klebschichtdicke (rechts)	153
6.18	Angenäherte Spannungs-Dehnungskurve für Araldite 2015	155
6.19	Versagensspannung der 45° Arcan-Proben bezogen auf ursprüngliche Fläche (links) sowie die real tragende Fläche (rechts)	155
6.20	3D-Modell des SLJ und Dehnungen sowie Spannungen entlang ausgewerteter Pfade	159
6.21	Ergebnisse der Konvergenzuntersuchung am SLJ	161
6.22	Kraft-Verformungsverläufe der SLJ aus Versuch und Numerik - links $t_K = 0,2$ mm, rechts $t_K = 0,9$ mm	164
6.23	Spannungszustand und Rissverlauf eines SLJ, modelliert mit der xFEM-Methode	164
6.24	Plastische Verformung innerhalb der Klebschicht	165
6.25	Numerisches Modell der DCB-Probe	166
6.26	Numerische und experimentelle Last-Verformungs-Verläufe der DCB-Proben mit $t_K = 1,0$ mm	166
6.27	Auswertung der numerischen Ergebnisse des DCB-Modells nach Variante 2 - links Degradation, rechts von Mises Vergleichsspannung	167
6.28	Last-Verformungs Verläufe für Arcan-Proben mit $t_K = 0,75$ mm	168

6.29 Kraft-Verformungsverläufe für SLJ-Proben mit und ohne elastische Bettung, modelliert nach Variante 3	170
7.1 Idealisierte Klebschichtverformungen	175
A.1 Numerische Modelle der zylindrischen Rohrverbindung	189
A.2 Shell-Solid und Solid-Solid-Modell der zylindrischen Rohrverbindung	190
A.3 Normierte Spannungen im Klebschichtzentrum für Arcan-Proben. (Links Zugbelastung, Rechts Schubbelastung)	190
A.4 Geometrie SLJ	191
A.5 Geometrie der Arcan 1.0 Proben sowie Aushärtdevorrichtung	191
A.6 Zeichnung und Aufbau des Arcan Versuchsaufbaus 1.0	192
A.7 Arcan Obere Vorrichtung	193
A.9 Arcan Aushärtungsvorrichtung	194
A.10 Geometrie der Arcan-Probe	194
A.8 Arcan Untere Vorrichtung	195
A.11 Abmessungen und Versagenslasten der SLJ	197
A.12 Bruchflächen der SLJ-Stahlproben mit einer Klebschichtdicke von 0,6 mm	198
A.13 Bruchflächen der SLJ-Stahlproben mit einer Klebschichtdicke von 0,9 mm	198
A.14 Klebschichtdicken und ermittelte Energiefreisetzungsraten der DCB-Proben	199
A.15 Klebschichtdicken und Versagenslasten der 0° Arcan-Proben	200
A.16 Klebschichtdicken und Versagenslasten der 45° Arcan-Proben	201
A.17 Klebschichtdicken und Versagenslasten der 90° Arcan-Proben	202

Tabellenverzeichnis

1.1	Übersicht über experimentelle Methoden	6
1.2	Versagenslasten der SLJ-Stahlproben	15
2.1	Vergleich von Füge-techniken für den Karosseriebau [57]	24
2.2	Übersicht über Vorbehandlungsvarianten von Aluminium SLJ Proben	39
3.1	Bettungsziffern	55
5.1	Vor- und Nachteile des Zugversuchs an Stumpfstoßverbindungen [114]	78
5.2	Vor- und Nachteile des Iosipescu Schubversuchs [114]	82
5.3	Verwendete Kerbradien und Kerbtiefen	114
6.1	Materialkennwerte der Füge-teile	137
6.2	Probenvorbereitungsschritte für Stahl	137
6.3	Abmessungen und Versagenslasten der SLJ Stahlproben	141
6.4	Nomenklatur für DCB-Proben	144
6.5	Energiefreisetzungs-raten aus DCB-Versuchen für unterschiedliche Probengeo- metrien ausgewertet nach Norm (CBT)	146
6.6	Verformungsenergie in Klebschichten für reine Schubbelastung	154
6.7	Zusammenfassung der ermittelten Materialkennwerte	158
6.8	Übersicht über numerisch und experimentell ermittelte Versagenslasten für SLJ	163

Symbolverzeichnis

C	Balkennachgiebigkeit
B, b	Breite
KC	Bruchzähigkeit
D	Durchmesser
E	E-Modul
k	Federsteifigkeit
A	Fläche
I	Flächenträgheitsmoment
h	Fügeteildicke
t	Klebschichtdicke
F, P	Kraft
L	Länge
M	Moment
N	Normalkraft
r	Radius
a	Risslänge
T	Spannung
S11, S22, S12	Spannungskomponenten
K	Klebschichtsteifigkeit
l _ü	Überlappungslänge
v, w	Verformungen
W	Verformungsenergie

Indizes

a	Äußeres
B	Bruch
F	Fügeteil
i	Inneres
K	Klebstoff
T	Total
y	Yield

Abkürzungsverzeichnis

CBT	Corrected Beam Theory
CFK	Kohlefaserverbundwerkstoff
CLS	Cracked lap Shear
DCB	Double Cantilever Beam
DLJ	Double-Lap Joint
ELS	End-Loaded Split
ENF	End Notch Flexure
LEBM	Linear Elastische Bruchmechanik
MCB	Mixed-Mode Cantilever Beam
MMB	Mixed-Mode Bending
MPC	Multiple Point Constraint
PTFE	Polytetrafluorethylen
SHM	Structural Health Monitoring
SLJ	Single- Lap Joint
VCCT	Virtual Crack Closure Technic