

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen | Band 45

Johannes Franz

Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von gebrochenen Verglasungen

*Investigation of the residual load-bearing
behaviour of fractured glazing*



 Springer Vieweg

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen

Band 45

Institutsreihe zu Fortschritten bei Mechanik, Werkstoffen, Konstruktionen, Gebäudehüllen und Tragwerken.

Johannes Franz

Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von gebrochenen Verglasungen

Investigation of the residual load-
bearing behaviour of fractured glazing

Johannes Franz
Institut für Statik und Konstruktion
Technische Universität Darmstadt
Darmstadt, Deutschland

Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2015

D 17

Mechanik, Werkstoffe und Konstruktion im Bauwesen
ISBN 978-3-662-48555-2 ISBN 978-3-662-48556-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48556-9

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Statik und Konstruktion der Technischen Universität Darmstadt.

Daher gilt auch mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider für die Übernahme des Referats, das entgegengebrachte Vertrauen und Interesse an meiner Forschung, die freie wissenschaftliche Entfaltung sowie die stets wohlwollende Förderung und Betreuung.

Ebenso danke ich herzlich Herrn Prof. habil. Dr.-Ing. Stefan Kolling der Technischen Hochschule Mittelhessen für seine Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats, den motivierenden wissenschaftlichen Zugang in die Polymermechanik und die stets freundliche Unterstützung bei der Bearbeitung meiner Arbeit insbesondere bei mechanischen und numerischen Fragestellungen.

Bei meinen Kollegen und Mitarbeitern des Institutes bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit. Dabei gilt mein besonderer Dank Jonas Hilcken, Jonas Kleuderlein, Johannes Kuntsche und Sebastian Schula für die inspirierenden Diskussionen und Ratschläge. Für die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen und den dabei entstandenen Studienarbeiten möchte ich mich bei den Studierenden bedanken, die dadurch einen nicht unerheblichen Anteil zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben. Bei Herrn Dipl.-Ing. Stefan Hiss von Kuraray Europe GmbH für die unermüdliche und kostenfreie Bereitstellung der zahlreichen und komplexen Probekörper. Die vielfältigen Versuche wären ohne die wohlwollende Unterstützung des Deutschen Instituts für Bautechnik und dessen Mitarbeiterin Frau Dipl.-Ing. Monika Herr nicht möglich gewesen.

Ich danke Joschi, Krystyna, Marion und Reinhard für die konstruktive Kritik und das Korrekturlesen meiner Arbeit sowie bei Andi und Ratz für die uneingeschränkten Unterstützungen über all die Jahre.

Meiner Familie, insbesondere meiner Frau Kerstin, danke ich für die entgegengebrachte Unterstützung und Geduld während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit.

Hausen, im August 2015

Johannes Franz

Kurzzusammenfassung

Im Bauwesen verwendete horizontale Verglasungen, die nicht den geregelten bautechnischen konstruktiven Randbedingungen entsprechen, müssen gemäß den Vorgaben der deutschen Bauaufsichtsbehörde einem der Einbausituation angepassten Resttragfähigkeitsversuch unterzogen werden.

Die vorliegende Arbeit leistet einen praxisrelevanten Beitrag zum derzeitigen Wissenstand von gebrochenen Verbundgläsern und zeigt eine Weiterentwicklung der aufwendigen Resttragfähigkeitsversuche auf.

Um die Zeit- und Kostenintensität der Resttragfähigkeitsversuche zu verbessern sowie die Reproduzierbarkeit solcher zu ermöglichen, wird der Frage nachgegangen, inwieweit eine Klassifizierung der Zwischenschicht von Verbundglas hinsichtlich der Resttragfähigkeit möglich ist. Dazu werden verschiedene Prüfmethode mit unterschiedlichen Zwischenschichten betrachtet, welche das Verbundglas als Ganzes im Kontext der Resttragfähigkeit berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden Prüfmethode Through-Cracked-Bending Test und Through-Cracked-Tensile Test eine Klassifizierung der Zwischenschicht über den Vergleich zur Standardfolie für Bauanwendungen ermöglichen. Zudem wird aus den Ergebnissen die Bedeutung des Delaminationsvermögens der Folie vom Glas im gebrochenen Zustand deutlich.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird das Delaminationsvermögen von verschiedenen Haftgraden der Standardfolie im Through-Cracked-Tensile Test bei unterschiedlichen Wegraten studiert. Das Delaminationsvermögen des Verbundglases kann mittels seiner Energiefreisetzungsrates charakterisiert werden, welche die benötigte Energie zur Ablösung der Folie vom Glas quantifiziert. Aus den experimentellen Versuchen kann eine Korrelation zwischen der Energiefreisetzungsrates und dem Haftgrad sowie der Wegrates festgestellt werden.

Anhand dieser Ergebnisse wird die numerische Abbildung der Delamination der Folie in gebrochenem Verbundglas mit Kohäsivzonenmodellen in dieser Grenzschicht mittels der Methode der finiten Elementen eingehend untersucht. Hierzu werden verschiedene Materialgesetze der Folie und der Grenzschicht beleuchtet.

Der Vergleich zwischen den experimentellen Versuchsergebnissen und den numerischen Ergebnissen zeigt, dass die Modellierung der Grenzfläche mit Kohäsivzonenmodellen eine geeignete Methode darstellt, um das Verhalten von gebrochenen Verglasungen realitätsnah abzubilden. Die Finite Elemente Berechnungen zeigen jedoch auch die derzeitigen Grenzen der implementierten Materialgesetze, insbesondere bei ratenabhängigen Materialien mit großen Dehnungen, auf.

Abstract

Laminated horizontal glazing used in construction falling outside of German building regulations must be subjected to a residual load-bearing capacity test. The test is set up to resemble the installation situation in accordance with the individual guidelines of the German building supervisory board.

The following work contributes to the existing knowledge of fractured laminated glazing and expands on approaches of performing the residual loading-bearing capacity test. The objective is to optimize the procedure for carrying out the residual load-bearing test in terms of time and cost, and to address the lack of reproducibility of residual load-bearing capacity tests.

Methods for classifying laminated glass interlayers in terms of their residual load-bearing capacity are investigated by subjecting various types of interlayers to several different test methods. The results show that two testing methods – the Through-Cracked-Bending Test and the Through-Cracked-Tensile Test – may be used to classify laminated glass interlayers relative to a standard interlayer for construction applications. Findings also point to the importance of considering the delamination capacity of the interlayer in fractured laminated glazing.

Based on the results of these investigations, the delamination behaviour of different adhesion levels of a standard interlayer are studied by the means of the Through-Cracked-Tensile Test which is performed with different displacement rates. The delamination capacity of fractured laminated glass can be characterized by its energy release rate, which quantifies the interfacial energy required to detach the interlayer from glass. The experimental tests undertaken reveal that the energy release rate is dependent on the interlayer adhesion level and displacement rate.

Finally, the interfacial delamination of fractured laminated glazing exhibited in experimental testing is simulated through a finite element model consisting of cohesive zone models between the interlayer and the glass. Therefore, various material laws of the interlayer and the interfacial adhesion are taken into account. The partial agreement between experimental test results and the finite element model results indicates that a numerical approach based on the cohesive zone model is a viable method for assessing the behaviour of fractured glass. The finite element analysis also reveals that existing finite element programs have shortcomings with respect to their capability of simulating rate-dependent material behaviour with high strain.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xix
Abkürzungen und Formelzeichen	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	2
2 Mechanische Grundlagen	7
2.1 Allgemeine Bemerkungen	7
2.2 Kinematik	7
2.2.1 Deformation	7
2.2.2 Verzerrungsmaße	10
2.2.3 Lineare Theorie	11
2.3 Spannung	12
2.3.1 Spannungsvektor	12
2.3.2 Spannungstensoren	14
2.4 Konstitutivgleichung	15
2.4.1 Elastizitätsgesetz	15
2.4.2 Linear elastisches, isotropes Materialverhalten	16
2.4.3 Hyperelastizität	17
2.4.4 Lineare Viskoelastizität	22
2.5 Linear elastisches Konstitutivgesetz von Scheiben	27
2.6 Mechanische Beschreibung von Rissen	29
2.6.1 Linear elastische Bruchmechanik	29
2.6.2 K-Konzept	30
2.6.3 Energetische Konzepte	31
2.6.4 Kohäsivzonenmodelle	33
3 Werkstoffgrundlagen	39
3.1 Glas	39
3.1.1 Amorphes Material	39

3.1.2	Glasoberfläche	41
3.1.3	Kalk-Natronsilikatglas	41
3.1.4	Basisprodukt Floatglas	42
3.2	Kunststoffe.....	45
3.2.1	Molekulare Struktur und Materialverhalten von Polymeren	45
3.2.2	Polyvinylbutyral-Folie	49
3.2.3	Ionoplast.....	55
3.2.4	Zusammenstellung der untersuchten Zwischenmaterialien	57
3.3	Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas	59
3.3.1	Begriffbestimmung und Anforderungen.....	59
3.3.2	Herstellung.....	62
4	Resttragfähigkeit von Verbund-Sicherheitsglas	65
4.1	Verbundwirkung.....	65
4.2	Bruchzustände	67
4.2.1	Einteilung	67
4.2.2	Bruchzustand I: Intaktes VSG.....	68
4.2.3	Bruchzustand II: Teilweise zerstörtes Glas des VSG	69
4.2.4	Bruchzustand III: Vollständig zerstörtes Glas des VSG	72
4.3	Normative Umsetzung der Resttragfähigkeit.....	74
4.4	Stand der Forschung hinsichtlich Resttragfähigkeit	76
4.4.1	Charakterisierung	76
4.4.2	Stand der Forschung.....	78
5	Klassifizierung der Zwischenschicht von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit	83
5.1	Einführung und Zielsetzung	83
5.2	Stoßartige Prüfungen am Verbund-Sicherheitsglas (VSG).....	84
5.3	Standardisierte Prüfmethoden zur Beurteilung des Verbundes von VSG.....	85
5.3.1	Allgemeines	85
5.3.2	Feuchtemessung	85
5.3.3	Prüfung bei hoher Temperatur	86
5.3.4	Bestimmung der Glashaftung	86
5.4	Phänomenologisch motivierte Versuche.....	89
5.5	Betrachtete Versuchsanordnungen und Zwischenschichten	91
5.6	Nicht anwendbare Versuchsanordnungen	92
5.6.1	Begründungen.....	92
5.6.2	End Notched Flexure Test.....	92
5.6.3	Double Cantilever Beam Test	95
5.7	Haftzug- und Haftscherversuch.....	100
5.7.1	Probekörper.....	100

5.7.2	Haftzugversuch (VW-Pull Test)	100
5.7.3	Haftscherversuch	102
5.7.4	Interpretation	104
5.8	Through-Cracked-Tensile Test	105
5.8.1	Versuchsaufbau und Durchführung	105
5.8.2	Ergebnisse und Auswertung	107
5.8.3	Interpretation	112
5.9	Through-Cracked-Bending Test	112
5.9.1	Versuchsapparatur	112
5.9.2	Versuchsdurchführung	113
5.9.3	Vorgehen bei der Auswertung der mechanischen Größen	116
5.9.4	Ergebnisse und Auswertung	123
5.9.5	Interpretation	126
5.10	Referenzversuche zur Resttragfähigkeit	127
5.10.1	Bauteilversuche als Referenzversuche	127
5.10.2	Versuchsaufbau und Durchführung	128
5.10.3	Ergebnisse und Auswertung	131
5.11	Vergleich und Beurteilung der untersuchten Prüfmethode	134
5.12	Empfehlungen	138
6	Delaminationsverhalten von PVB im gebrochenen VSG	143
6.1	Delaminationsvermögen	143
6.1.1	Begriffbestimmung	143
6.1.2	Stand der Forschung	144
6.2	Energiefreisetzungsrates	145
6.3	Versuchsdurchführung und -programm	148
6.3.1	Versuchsaufbau und Probenvorbereitung	148
6.3.2	Probekörper	149
6.3.3	Versuchsprogramm	150
6.3.4	Versuchsdurchführung	151
6.4	Beurteilung der Haftfestigkeit	153
6.5	Vorgehen bei der Auswertung	155
6.6	Ergebnisse und Auswertung	157
6.7	Interpretation und Vergleich mit der Literatur	162
6.8	Zusammenfassung und Empfehlungen	164
7	Numerische Berechnungsansätze der Delamination	167
7.1	Umsetzung mit der Methode der finiten Elemente	167
7.1.1	Allgemeine Bemerkungen	167
7.1.2	Kontinuumelemente	168
7.1.3	Grenzflächenelemente	168

7.2	Materialgesetze	170
7.3	Kohäsivgesetz der Grenzfläche	173
7.4	Through-Cracked-Tensile Test.....	175
7.4.1	Modellierung	175
7.4.2	Numerische Untersuchungen.....	176
7.4.3	Validierung des numerischen Modells	182
7.4.4	Auswertung und Interpretation.....	185
7.5	Beurteilung der numerischen Untersuchungen	187
8	Zusammenfassung und Ausblick	191
8.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse	191
8.2	Weiterer Forschungsbedarf	193
	Literaturverzeichnis	197
	Anhangsverzeichnis	205

Abbildungsverzeichnis

1.1	Resttragfähigkeit einer punktförmig gelagerten Horizontalverglasung	2
1.2	Resttragfähigkeitsprüfung einer Verglasung in Einbausituation	3
1.3	Aufbau der Arbeit.....	5
2.1	Schematische Darstellung der Deformation eines Körpers	9
2.2	Geometrische Deutung der Dehnung und Schubverformung	11
2.3	Spannungsvektor in der Ausgangs- und Momentankonfiguration	13
2.4	Darstellung des Cauchyschen Spannungstensors	15
2.5	Arbeit am infinitesimalen Volumenelement	18
2.6	Nichtlineare Spannungs-Verzerrungskurve	19
2.7	Kriechversuch an einem Kelvin-Voigt-Körper.....	23
2.8	Relaxationsversuch an einem Maxwell-Körper	24
2.9	Lineare Standardkörper.....	24
2.10	Allgemeines Relaxationsmodell.....	25
2.11	Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip	26
2.12	Erstellen einer Masterkurve mit dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip	27
2.13	Rissöffnungsarten	29
2.14	Schematischer Rissfortschritt	32
2.15	Modellvorstellung der Kohäsivzone.....	34
2.16	Exponentielles Kohäsivgesetz	36
2.17	Bilinearer Ansatz.....	37
3.1	Darstellung unterschiedlicher SiO ₂ -Netzwerke	40
3.2	Temperaturabhängigkeit des Volumens von Glas	40
3.3	Herstellungsprozess von Floatglas.....	43
3.4	Herstellung von vorgespanntem Glas	44
3.5	Bruchbilder von Basis- und Veredelungsprodukten	45
3.6	Vernetzung verschiedener Polymerarten	48
3.7	Einfluss von Temperatur und Vernetzung auf den Elastizitätsmodul	49
3.8	Dreistufiger Herstellungsprozess von Polyvinyl-Butyral.....	51
3.9	Grundelemente des PVB-Harzes.....	52
3.10	Haftung zwischen Glasoberfläche und Polyvinyl-Butyral (PVB).....	54
3.11	Spannungs-Dehnungsverlauf von unterschiedlichen Folien	60
3.12	Detailaufnahme eines Verbundglases	61

3.13	Herstellung von VSG	62
4.1	Verbundwirkung von VSG.....	66
4.2	Einfluss der Verbundwirkung auf die resultierenden Spannungen im Glas ...	68
4.3	Bruchzustände von VSG und dessen Lastabtrag	69
4.4	Validierung des Lastabtrages anhand eines 4-Punkt-Biegeversuchs.....	70
4.5	Bruchzustand II.....	71
4.6	Bruchzustand III	73
4.7	Nachweis der Resttragfähigkeit nach DIN 18008.....	77
4.8	Delamination der PVB-Folie vom Glas infolge einer Biegebeanspruchung..	82
5.1	Durchführung des Pummeltests	87
5.2	Versuchsaufbau des Kompressionsscherversuchs	88
5.3	Peel Test.....	91
5.4	Schematischer ENF-Versuchsaufbau.....	93
5.5	Versuchsdurchführung des ENF Tests und Probekörper nach der Prüfung ...	94
5.6	Schematische Darstellung einer modifizierten ENF-Probe für VSG	94
5.7	Schematischer DCB-Versuchsaufbau	95
5.8	Darstellung der DCB-Probekörper und deren Versuchsdurchführung	96
5.9	Delaminationsverhalten einer DCB-Probe.....	99
5.10	Last-Verformungsverhalten der DCB Tests.....	99
5.11	Probenvorbereitung und Versuchsapparatur des Haftzugversuchs	101
5.12	Kraft-Verformungsverläufe der Haftversuche.....	102
5.13	Versuchsapparatur des Haftscherversuches und geprüfte Probe	103
5.14	Versuchsdurchführung des TCT Tests	105
5.15	Vorgang des Glasbrechens	107
5.16	Aufgebrachte Markierungen auf die TCT-Proben	108
5.17	Delaminationsvermögen der SC-Folie und BG R20-Folie	108
5.18	SC-Folie: Delaminationsfortschritt bis zum Bruch	110
5.19	BG R20-Folie: Delaminationsfortschritt bis zum Bruch.....	110
5.20	SentryGlas [®] -Folie: Delaminationsfortschritt bis zum Bruch.....	111
5.21	Entwicklung der TCB Prüfapparatur	113
5.22	Geometrie-Ermittlung bei einer VSG-Scheibe mit definiertem Bruch.....	114
5.23	Versuchsapparatur mit optischer Bildaufnahme; Systemgeometrie.....	115
5.24	Versuchsablaufübersicht des TCB Tests.....	116
5.25	Darstellung der Kinematik und der Kräfte im TCB Test	117
5.26	Beobachteter Folienriss einer SentryGlas [®] -Folie	119
5.27	Delamination des Probekörpers SC#04.....	120
5.28	Unterschiedliche Delamination an der unteren und oberen Seite der Folie ...	121
5.29	Vorgehen bei der optischen Auswertung des TCT Tests	122
5.30	Kraft-Zeitverlauf der TCB Tests	124

5.31	Versuchsaufbau der Bauteilversuche	128
5.32	Versuchsanordnung des Bauteilversuchs	129
5.33	Bruchbild eines Prüfkörpers	130
5.34	Kraft-Zeitverlauf der Bauteilversuche	132
5.35	Gegenüberstellung der Folien im Kraft-Zeitverlauf	133
5.36	Längenänderung der Folie im Bruchzustand III	136
5.37	Varianten des Kraft-Verformungsverhaltens im TCT Test	141
6.1	Systemzeichnung zur Bestimmung der Energiefreisetzungsrate	144
6.2	TCT-Probekörper	149
6.3	Ergebnisse des Pummeltests	154
6.4	Optische Auswertung der Verformung der Folie	156
6.5	Delaminationsprozess und Verformungsverhalten des TCT Tests	157
6.6	Spannungs-Verformungsverlauf der TCT Tests	159
6.7	Ergebnisse der ausgewerteten Energiefreisetzungsraten	161
7.1	Scheibenelement höherer Ordnung	168
7.2	Quadratisches 2-D Interface-Element mit 6 Knoten	169
7.3	Kontaktelementformulierung bestehend aus Kontakt- und Zielelement	171
7.4	Viskoelastisches Materialgesetz von PVB-Folien als Prony-Serie	172
7.5	Identifizierung des 5-parametrischen Mooney-Rivlin Modells	173
7.6	Deformation der TCT-Probe 1.1.7	175
7.7	Konvergenzstudie zur Diskretisierung des TCT-Modells	177
7.8	Vergleich und Einfluss der Kohäsivgesetze auf die Reaktionskraft	178
7.9	Einfluss der Kontaktsteifigkeit auf die Ergebnisse	181
7.10	Einfluss der Energiefreisetzungsraten und Kohäsionsspannungen	182
7.11	Darstellung der Verschiebung und der Dehnungen einer Probe	183
7.12	Validierung der numerischen Simulation der TCT Tests	186
A.1	Schematischer Ablauf des Algorithmus der optischen Auswertung	209
D.1	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R10; schmal	227
D.2	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R10; breit	227
D.3	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R15; schmal	228
D.4	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R15; breit	228
D.5	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R20; schmal	229
D.6	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R20; breit	229
D.7	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R10; schmal	230
D.8	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R10; breit	230
D.9	TCT-Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R15; schmal	231
D.10	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R15; breit	231

D.11	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R20; schmal	232
D.12	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R20; breit.....	232
D.13	TCT Test: 3. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R10	233
D.14	TCT Test: 3. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R15	233
D.15	TCT Test: 3. Versuchsreihe, Versuchsserie BG R20	234
D.16	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie ES; schmal	235
D.17	TCT Test: 1. Versuchsreihe, Versuchsserie ES; breit.....	235
D.18	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie ES; schmal	236
D.19	TCT Test: 2. Versuchsreihe, Versuchsserie ES; breit.....	236
E.1	Kraft-Zeitverlauf der Bauteilversuche mit VSG aus SC-Folie.....	237
E.2	Kraft-Zeitverlauf der Bauteilversuche mit VSG aus BG R20-Folie	238
E.3	Kraft-Zeitverlauf der Bauteilversuche mit VSG aus SG-Folie.....	238

Tabellenverzeichnis

3.1	Chemische Hauptbestandteile von Kalk-Natronsilikatglas	41
3.2	Mechanische Eigenschaften von Kalk-Natronsilikatglas	42
3.3	Biegezugfestigkeit von (thermisch vorgespanntem) Floatglas.....	45
3.4	Einteilung der Polymere	47
3.5	Zusammensetzung von TROSIFOL® PVB-Folien.....	52
3.6	Physikalische Eigenschaften von TROSIFOL® PVB-Folien	53
3.7	Physikalische Eigenschaften von SentryGlas®-Folien.....	56
3.8	Bruchspannung und -dehnung von Folien mit einem <i>Beckerstab</i>	58
3.9	Bruchspannung und -dehnung von Folien nach DIN EN ISO 527-2.....	59
5.1	Probenumfang der DCB Tests	97
5.2	Ergebnisse der DCB Tests	98
5.3	Probekörper für die Haftfestigkeitsversuche	100
5.4	Ergebnisse der Haftfestigkeit bei $1,0 \text{ mm min}^{-1}$	104
5.5	Probenumfang der TCT Tests	109
5.6	Ergebnisse der technischen Bruchspannung der TCT Tests.....	111
5.7	Probekörpergeometrie der TCB Tests	116
5.8	Ergebnisse der TCB Tests	123
5.9	TCB Ergebnisse: Zugkraft der Folie	125
5.10	Folienspannung und -dehnungen der TCB Versuche	126
5.11	Probekörpergeometrie der Bauteilversuche	129
5.12	Ergebnisse der Bauteilversuche	134
6.1	Veröffentlichte mit dem TCT Test ermittelte Energiefreisetzungsraten	145
6.2	Übersicht der TCT-Probekörper.....	150
6.3	Versuchsprogramm und Anzahl der untersuchten TCT-Proben	151
6.4	Ergebnisse der Haftscherfestigkeit von PVB-Folien	155
6.5	Zusammenstellung der Energiefreisetzungsrate \mathcal{G}	162
6.6	Ergebnisse der Haftung zwischen Folie und Glas	163
7.1	Untersuchte Grenzflächenelemente und Kohäsivgesetze	174
7.2	Einfluss der Kohäsionsspannungen und Energiefreisetzungsraten.....	180
7.3	Vergleich der Ergebnisse der FE Berechnungen mit den TCT Versuchen	188

B.1	Zusammenstellung aller Untersuchungen zur Haftfestigkeit.....	211
B.2	Haftfestigkeitsversuche bei $1,0 \text{ mm min}^{-1}$ Wegrate	212
B.3	Haftfestigkeitsversuche bei 6 mm min^{-1} und 600 mm min^{-1} Wegrate	213
C.1	Versuchsdaten der TCB Tests.....	219
C.2	TCB Ergebnisse zu Beginn der Haltezeit	220
C.3	TCB Ergebnisse am Ende der Haltezeit $1,0\text{h}$	221
D.1	Probenbezeichnungen des TCT Tests.....	224
D.2	Energiefreisetzungsraten der ausgewerteten Probekörper	224
F.1	Prony-Reihe und WLF-Funktion für den Schubrelaxationsmodul	239
F.2	Ermittelte Parameter des 5-parametrischen Mooney-Rivlin Modells.....	240

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BG	Trosifol® Building Grade
BG R10	Trosifol® Building Grade R10
BG R15	Trosifol® Building Grade R15
BG R20	Trosifol® Building Grade R20
BRL	Bauregelliste A Teil 1
DCB Test	Double-Cantilever-Beam Test
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DMS	Dehnungsmessstreifen
DMTA	Dynamisch Mechanisch Thermische Analyse
E-Modul	Elastizitätsmodul
ENF Test	End-Notched-Flexure Test
ES	Trosifol® Extra Strong
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
ESZ	ebener Spannungszustand
EVA	Ethylenvinyl-Acetat
EVZ	ebener Verzerrungszustand
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
HMWV	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung
ISMD	Institut für Statik und Konstruktion
LEBM	linear elastische Bruchmechanik
MLTB	Muster-Liste der Technischen Baubestimmung
PE	Polyethylen
PVB	Polyvinyl-Butyral
SC	Trosifol® Sound Control

SC ⁺	Trosifol [®] Sound Control Plus
SentryGlas [®]	DuPont SentryGlas [®] Type SG 5000
TCB Test	Through-Cracked-Bending Test
TCT Test	Through-Cracked-Tensile Test
TRAV	Technische Richtlinie für absturzsichernde Verglasungen
TRLV	Technische Richtlinie für linienförmig gelagerte Verglasungen
TVG	Teilvorgespanntes Glas
VG	Verbundglas
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

Wichtige Formelzeichen

a, δ, w	Separation, Verschiebung
\mathbb{C}	Elastizitätstensor 4. Stufe
d_f	Dicke der Zwischenschicht des VSG
d_g	Dicke des Glases
E	Elastizitätsmodul
ε_b	Bruchspannung
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Verzerrungstensor
ε	Dehnung
F, P	Kraft im Versuch
$\mathcal{G}, \mathcal{G}_n, \mathcal{G}_t$	Energiefreisetzungsrate
h	halbe Dicke der Zwischenschicht
l, l_0	Länge, Ausgangslänge
λ_i	Hauptstreckung eines Linienelements
n	Anzahl der Proben (Stichprobe)
Π	elastisches Potential
$\boldsymbol{\sigma}$	Spannungstensor
σ_b	Bruchspannung (Zug- oder Druckversagen)
σ_t	technische Spannung
σ_w	wahre Spannung
s	Standardabweichung einer Stichprobe der Zufallsvariable x
τ	Schubspannung
τ_b	Bruchspannung (Scherversagen)
T	Temperatur

T_f	Schmelztemperatur
T_g	Glasübergangs- bzw. Transformationstemperatur
T_n, T_t	Kohäsionsspannungen
t	Zeit
V	Variationskoeffizient
W	Arbeit
\bar{x}	Mittelwert: Erwartungswert der Zufallsvariable x

Wichtige mathematische Operatoren

$\mathbf{1}$	Einheitstensor 2. Stufe, dessen Komponenten auf der Hauptdiagonalen den Wert 1 besitzen und alle anderen Komponenten den Wert 0
:	Doppelte Überschiebung entspricht der zweifachen Verjüngung bei einem Tensorprodukt
$\text{tr}()$	Spur eines Tensors, die der Summe der Komponenten der Hauptdiagonalen entspricht
d	Totales Differential einer Funktion
$\det()$	Determinante eines Tensors 2. Stufe
$\text{grad}()$	Gradient einer partiell differenzierbaren Funktion
∂	Partielle Ableitung einer Funktion

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In der Vergangenheit wurde Architekturglas für Fensterverglasungen von Gebäuden verwendet mit dem pragmatischen Zweck, Helligkeit aufgrund der transparenten Eigenschaft von Glas ins Gebäude zu leiten. In der modernen Architektur sind mittlerweile Verglasungen zu einem gestalterischen Stilmittel avanciert, das bei Fassaden, Dachkonstruktionen oder Überdachungen dem Gebäude und der Gebäudehülle ein oftmals filigranes und charakteristisches Aussehen verleiht.

Ermöglicht wurde dies durch den Einzug des Verbundglases ins Bauwesen. Glas versagt als spröder Werkstoff ohne Vorankündigung, wodurch bei monolithischen Verglasungen eine Gefährdung durch herabfallende Glasbruchstücke entsteht. Verbundglas besteht aus mindestens zwei Glasscheiben und einer polymeren Zwischenschicht. Verbundglas mit einer Zwischenschicht aus Polyvinyl-Butyral (PVB) ist ein geregeltes Bauprodukt und wird als Verbund-Sicherheitsglas (VSG) bezeichnet. Durch die Kombination des Glases mit einem Kunststoff werden die physikalischen Eigenschaften maßgeblich verbessert. Der Verbundwerkstoff versagt nicht mehr schlagartig, sondern kann bei der richtigen Wahl des Kunststoffes einer Belastung weiter standhalten, obwohl alle Glasscheiben gebrochen sind.

Die Fähigkeit des Verbundglases in diesem Zustand in der Konstruktion zu verbleiben und mindestens sein Eigengewicht über einen definierten Zeitraum abtragen zu können, wird als Resttragfähigkeit bezeichnet (siehe Abb. 1.1). Die Anforderungen an die Resttragfähigkeit von Horizontalverglasungen sind in den Normen und den technischen Richtlinien definiert. Die Resttragfähigkeit wird über Bauteilversuche nachgewiesen.

Ein typischer Resttragfähigkeitsversuch ist in Abb. 1.2 abgebildet. Es zeigt ein vollständig gebrochenes VSG, das zusätzlich zu seiner Eigenlast ein Gewicht von 250 kg über einen Zeitraum von 24 h standhalten muss. Für Standardbauteile, die den in den Normen geregelten technischen konstruktiven Randbedingungen entsprechen, müssen keine Resttragfähigkeitsversuche durchgeführt werden. Andere Bauteile hingegen gelten als nicht geregelte Bauprodukte und es bedarf einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE). Diese ist durch die Bauteilversuche sehr zeit- sowie kostenintensiv und wird nach Möglichkeit vermieden.

Aufgrund dessen ist es wünschenswert, den Widerstand und die Standdauer von gebrochenen Verglasungen zu prognostizieren. Hierzu muss der Versagensmechanismus verstanden, untersucht und quantifiziert werden. Mit den derzeit angewandten Resttragfä-



Abbildung 1.1 Resttragfähigkeit einer punktförmig gelagerten Horizontalverglasung aus Verbund-Sicherheitsglas

higkeitsversuchen ist eine solche Prognose nicht ansatzweise möglich. Es lässt sich nur feststellen, ob ein Bauteil den definierten Einwirkungen standhält oder nicht. Wie sich das untersuchte Bauteil unter anderen Randbedingungen verhält, kann nicht vorhergesagt werden.

Die Beurteilung der Resttragfähigkeit wird auch aufgrund des zunehmenden Einsatzes neuer Zwischenschichtmaterialien im Verbundglas immer wichtiger. Dies macht eine Untersuchung des Einflusses der Materialeigenschaften dieser Zwischenschichten auf die Resttragfähigkeit im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten PVB-Folien notwendig. Folgerichtig müssen hierfür Mindestanforderungen an die maßgeblichen Eigenschaften des Verbundglases definiert werden. Dies sind die Haftung zwischen der Glasoberfläche und der Zwischenschicht, die Steifigkeit und die Bruchdehnung der Zwischenschicht. Mit den derzeit anerkannten Prüfmethode, Pendelschlagversuch nach DIN EN 12600, Kugelfallversuch nach DIN 52338 oder Pummeltest, können diese Eigenschaften nicht näher quantifiziert werden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ausgehend von den oben dargestellten Problemstellungen der Resttragfähigkeit von Verglasungen ist es Ziel dieser Arbeit, Prüfmethode zu entwickeln, mit denen ein Vergleich verschiedener Zwischenschichten mit der herkömmlichen PVB-Folie möglich ist, um eine Klassifizierung hinsichtlich der Resttragfähigkeit machen zu können und den experimentellen Aufwand dabei gering zu halten.

Es wird zunächst das mechanische Tragverhalten von gebrochenem Verbundglas charakterisiert.

Im Anschluss werden Prüfmethode entwickelt, anhand derer Aussagen zur Resttragfähigkeit gemacht werden können. Die Prüfungen sollen an Kleinbauteilen erfolgen, einfach und reproduzierbar sein.

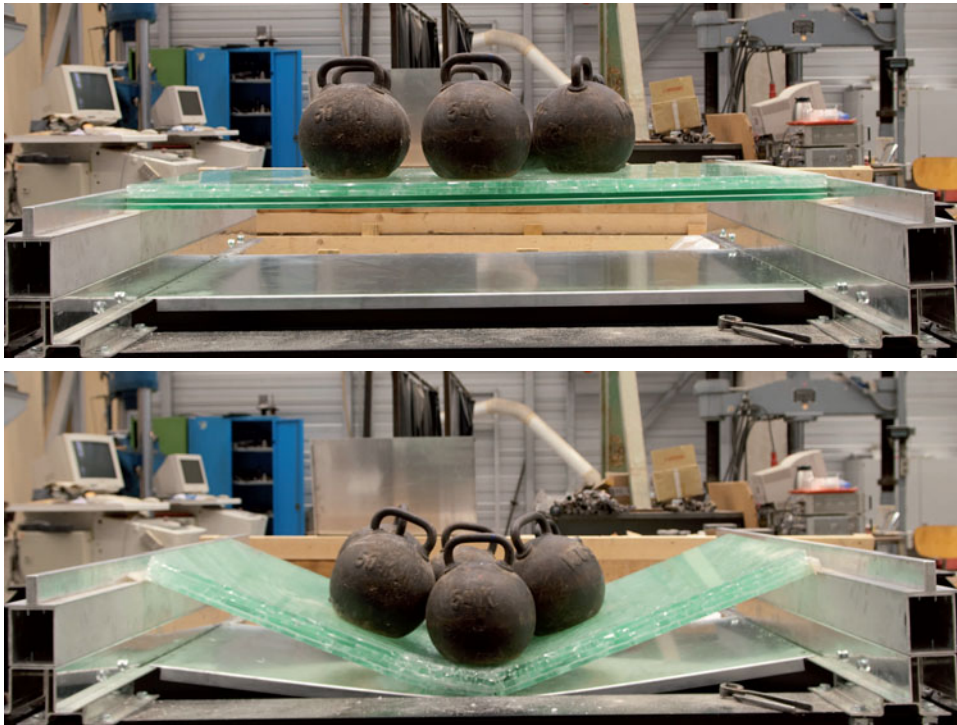


Abbildung 1.2 Resttragfähigkeitsprüfung einer Verglasung in Einbausituation

Da die Resttragfähigkeit sowohl von der Widerstandsfähigkeit der Zwischenschicht (Steifigkeit und Festigkeit) als auch von der Haftung zwischen Glasoberfläche und Zwischenschicht abhängig ist, wurden ausschließlich experimentelle Versuche durchgeführt, die das Verbundglas als Ganzes und nicht die einzelnen Werkstoffe Glas und Kunststoff getrennt voneinander berücksichtigen.

Aufbauend auf den herausgearbeiteten Prüfmethoden soll ein Kriterium abgeleitet werden, das zur Beurteilung der Resttragfähigkeit herangezogen werden kann.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, numerische Berechnungsansätze aufzuzeigen, mit denen die Interaktion zwischen Haftung und Steifigkeit der Zwischenschicht abgebildet werden kann. Ist die Haftung im Vergleich zur Steifigkeit und Bruchdehnung der Zwischenschicht gering, so kommt es zu einem Ablösen der Zwischenschicht von der Glasoberfläche. Dies wird als Delamination bezeichnet und soll in dieser Arbeit mit Kohäsivzonenmodellen numerisch umgesetzt werden.

Die numerischen Berechnungen sollen die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten bilden, deren Ziel eine Prognose der Resttragfähigkeit von gebrochenen Verglasungen ist.

Zusammengefasst werden für die vorliegende Arbeit folgende Zielsetzungen definiert:

- Charakterisierung des Tragverhaltens von VSG,
- Entwicklung einer Prüfmethode zur Klassifizierung der Zwischenschicht von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit,
- Ableitung mechanischer Größen für eine Klassifizierung von Zwischenmaterialien von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit,
- Numerische Berechnung der Delamination von PVB in gebrochenem VSG.

In Abb. 1.3 ist der Aufbau der Arbeit dargestellt.

Untersuchungen zur Resttragfähigkeit														
Aufbau der Arbeit														
Einführung	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Kap. 1: Problemstellung hinsichtlich der Resttragfähigkeit von Verbund-Sicherheitsglas (VSG) </div>													
Grundlagen	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 2: Mechanische Grundlagen <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Kinematik</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Spannung</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Stoffgesetze</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Kohäsivgesetze</td></tr> </table> </td> <td style="width: 33%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 3: Werkstoffgrundlagen <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Glas</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Kunststoffe</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">VSG</td></tr> </table> </td> <td style="width: 33%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 4: Resttragfähigkeit von VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Tragverhalten und Bruchzustände</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Normative Umsetzung</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Stand der Forschung</td></tr> </table> </td> </tr> </table>	Kap. 2: Mechanische Grundlagen <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Kinematik</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Spannung</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Stoffgesetze</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Kohäsivgesetze</td></tr> </table>	Kinematik	Spannung	Stoffgesetze	Kohäsivgesetze	Kap. 3: Werkstoffgrundlagen <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Glas</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Kunststoffe</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">VSG</td></tr> </table>	Glas	Kunststoffe	VSG	Kap. 4: Resttragfähigkeit von VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Tragverhalten und Bruchzustände</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Normative Umsetzung</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Stand der Forschung</td></tr> </table>	Tragverhalten und Bruchzustände	Normative Umsetzung	Stand der Forschung
Kap. 2: Mechanische Grundlagen <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Kinematik</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Spannung</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Stoffgesetze</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Kohäsivgesetze</td></tr> </table>	Kinematik	Spannung	Stoffgesetze	Kohäsivgesetze	Kap. 3: Werkstoffgrundlagen <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Glas</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Kunststoffe</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">VSG</td></tr> </table>	Glas	Kunststoffe	VSG	Kap. 4: Resttragfähigkeit von VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Tragverhalten und Bruchzustände</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Normative Umsetzung</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Stand der Forschung</td></tr> </table>	Tragverhalten und Bruchzustände	Normative Umsetzung	Stand der Forschung		
Kinematik														
Spannung														
Stoffgesetze														
Kohäsivgesetze														
Glas														
Kunststoffe														
VSG														
Tragverhalten und Bruchzustände														
Normative Umsetzung														
Stand der Forschung														
Experimentelle Untersuchungen	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 5: Prüfmethode zur Klassifizierung der Zwischenschicht von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Übersicht über die Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Untersuchungen zu sieben Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Empfehlung von zwei Prüfmethode:</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">TCT Test</td> <td style="text-align: center;">TCB Test</td> </tr> </table> </td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 6: Delaminationsverhalten von PVB im gebrochenen VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Erläuterung des Delaminationsvermögens</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Versuche mit verschiedenen Haftgraden</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Auswertung der Energiefreisetzungsrate</td></tr> </table> </td> </tr> </table>	Kap. 5: Prüfmethode zur Klassifizierung der Zwischenschicht von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Übersicht über die Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Untersuchungen zu sieben Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Empfehlung von zwei Prüfmethode:</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">TCT Test</td> <td style="text-align: center;">TCB Test</td> </tr> </table>	Übersicht über die Prüfmethode	Untersuchungen zu sieben Prüfmethode	Empfehlung von zwei Prüfmethode:	TCT Test	TCB Test	Kap. 6: Delaminationsverhalten von PVB im gebrochenen VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Erläuterung des Delaminationsvermögens</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Versuche mit verschiedenen Haftgraden</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Auswertung der Energiefreisetzungsrate</td></tr> </table>	Erläuterung des Delaminationsvermögens	Versuche mit verschiedenen Haftgraden	Auswertung der Energiefreisetzungsrate			
Kap. 5: Prüfmethode zur Klassifizierung der Zwischenschicht von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Übersicht über die Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Untersuchungen zu sieben Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Empfehlung von zwei Prüfmethode:</td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">TCT Test</td> <td style="text-align: center;">TCB Test</td> </tr> </table>	Übersicht über die Prüfmethode	Untersuchungen zu sieben Prüfmethode	Empfehlung von zwei Prüfmethode:	TCT Test	TCB Test	Kap. 6: Delaminationsverhalten von PVB im gebrochenen VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Erläuterung des Delaminationsvermögens</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Versuche mit verschiedenen Haftgraden</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Auswertung der Energiefreisetzungsrate</td></tr> </table>	Erläuterung des Delaminationsvermögens	Versuche mit verschiedenen Haftgraden	Auswertung der Energiefreisetzungsrate					
Übersicht über die Prüfmethode														
Untersuchungen zu sieben Prüfmethode														
Empfehlung von zwei Prüfmethode:														
TCT Test	TCB Test													
Erläuterung des Delaminationsvermögens														
Versuche mit verschiedenen Haftgraden														
Auswertung der Energiefreisetzungsrate														
Numerische Untersuchungen	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Kap. 7: Numerische Berechnungsansätze der Delamination von PVB in gebrochenem VSG <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Kohäsivzonenmodelle in der Finiten Elemente Methode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Parameterstudien an TCT Tests</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Validierung an den durchgeführten TCT Tests</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Beurteilung der numerischen Untersuchungen</td></tr> </table> </div>	Kohäsivzonenmodelle in der Finiten Elemente Methode	Parameterstudien an TCT Tests	Validierung an den durchgeführten TCT Tests	Beurteilung der numerischen Untersuchungen									
Kohäsivzonenmodelle in der Finiten Elemente Methode														
Parameterstudien an TCT Tests														
Validierung an den durchgeführten TCT Tests														
Beurteilung der numerischen Untersuchungen														
Schluss	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 8: Zusammenfassung <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Numerische Berechnungsansätze</td></tr> </table> </td> <td style="width: 50%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> Kap. 8: Ausblick <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Experimentelle Untersuchungen</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Numerische Untersuchungen</td></tr> </table> </td> </tr> </table>	Kap. 8: Zusammenfassung <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Numerische Berechnungsansätze</td></tr> </table>	Prüfmethode	Numerische Berechnungsansätze	Kap. 8: Ausblick <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Experimentelle Untersuchungen</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Numerische Untersuchungen</td></tr> </table>	Experimentelle Untersuchungen	Numerische Untersuchungen							
Kap. 8: Zusammenfassung <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Prüfmethode</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Numerische Berechnungsansätze</td></tr> </table>	Prüfmethode	Numerische Berechnungsansätze	Kap. 8: Ausblick <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="text-align: center;">Experimentelle Untersuchungen</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Numerische Untersuchungen</td></tr> </table>	Experimentelle Untersuchungen	Numerische Untersuchungen									
Prüfmethode														
Numerische Berechnungsansätze														
Experimentelle Untersuchungen														
Numerische Untersuchungen														

Abbildung 1.3 Aufbau der Arbeit