

# Inhaltsverzeichnis

|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                | <b>xv</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                  | <b>xix</b> |
| <b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>                        | <b>xxi</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                                         | <b>1</b>   |
| 1.1 Problemstellung .....                                   | 1          |
| 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....                 | 2          |
| <b>2 Mechanische Grundlagen</b>                             | <b>7</b>   |
| 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         |
| <b>3 Werkstoffgrundlagen</b>                                | <b>39</b>  |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Resttragfähigkeit von Verbund-Sicherheitsglas</b>                                  | <b>65</b> |
| 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        |
| <b>5</b> | <b>Klassifizierung der Zwischenschicht von VSG hinsichtlich der Resttragfähigkeit</b> | <b>83</b> |
| 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 Prüfmethoden .....  | 134        |
| 5.12     | Empfehlungen .....                                             | 138        |
| <b>6</b> | <b>Delaminationsverhalten von PVB im gebrochenen VSG</b> ..... | <b>143</b> |
| 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        |
| <b>7</b> | <b>Numerische Berechnungsansätze der Delamination</b> .....    | <b>167</b> |
| 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        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>              | <b>191</b> |
| 8.1      | Zusammenfassung der Erkenntnisse .....           | 191        |
| 8.2      | Weiterer Forschungsbedarf .....                  | 193        |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                      | <b>197</b> |
|          | <b>Anhangsverzeichnis</b>                        | <b>205</b> |

Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von  
gebrochenen Verglasungen

Investigation of the residual load-bearing behaviour of  
fractured glazing

Franz, J.

2015, XXIII, 240 S. 120 Abb., 42 Abb. in Farbe.,

Softcover

ISBN: 978-3-662-48555-2