

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Einleitung | |
| 1.1 | Allgemeines | 1 |
| 1.2 | Problemstellungen | 2 |
| 1.3 | Zielsetzung und Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 | Amorphe Thermoplaste | |
| 2.1 | Einführung | 6 |
| 2.2 | Klassifizierung und molekulare Struktur von Polymeren | 6 |
| 2.3 | Materialverhalten | 9 |
| 2.3.1 | Glasübergangstemperatur T_g | 9 |
| 2.3.2 | Temperatureinwirkung (Energie- und Entropieelastizität) | 11 |
| 2.3.3 | Gummi-elastisches Dehnungsverhalten | 13 |
| 2.3.4 | Einfluß von Vernetzungsgrad und Molekulargewicht | 13 |
| 2.3.5 | Allgemeine Bedeutung von Weichmachern | 14 |
| 2.3.6 | Inkompressibilität | 15 |
| 2.4 | Mechanische Zustandsgleichungen | 15 |
| 2.4.1 | Allgemeines zur Viskoelastizität | 15 |
| 2.4.2 | Lineare Viskoelastizität | 16 |
| 2.4.2.1 | Definition und Grundgleichungen | 16 |
| 2.4.2.2 | Relaxations- und Retardationsversuch | 18 |
| 2.4.3 | Modellvorstellungen zu linear-viskoelastischem Verhalten | 20 |
| 2.4.3.1 | Modell der Spannungsrelaxation (Verallgemeinertes <i>Maxwell</i> -Modell) | 20 |
| 2.4.3.2 | Modell der Retardation (Verallgemeinertes <i>Voigt-Kelvin</i> -Modell) | 22 |
| 2.4.3.3 | Molekulare Zusammenhänge | 23 |
| 2.4.4 | Superpositionsprinzip nach <i>Boltzmann</i> | 24 |
| 2.4.5 | Prinzip der Zeit-Temperatur Verschiebung (ZTV) oder „Thermorheologische Einfachheit“ | 25 |
| 2.4.5.1 | Alterungseinfluß auf das linear-viskoelastische Verhalten | 27 |
| 2.5 | Schubmodulermittlung bei viskoelastischen Werkstoffen | 28 |
| 2.5.1 | Frequenz- und temperaturgesteuertes Verfahren | 28 |
| 2.5.2 | Werkstoffgerechte Kennwertermittlung nach <i>Schmachtenberg</i> | 28 |
| 2.5.3 | Bestimmung der Materialeigenschaften mit dem Sekantenmodul | 29 |
| 3 | Tragverhalten von Verbund-Sicherheitsglas | |
| 3.1 | Einführung | 31 |
| 3.2 | Chemischer Aufbau und Eigenschaften der PVB-Folie | 31 |
| 3.2.1 | Vorbemerkungen | 31 |
| 3.2.2 | Herstellung von organischem (hochmolekularem) PVB-Harz | 33 |
| 3.2.3 | PVB als Zwischenschichtmaterial bei VSG | 34 |
| 3.2.3.1 | Allgemeines | 34 |
| 3.2.3.2 | Bedeutung des Weichmachers für die PVB-Folie | 34 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.2.3.3 | Glasübergangsbereiche von PVB bzw. der PVB-Folie | 35 |
| 3.2.4 | Haftverbund zwischen Glas und PVB-Folie | 36 |
| 3.2.4.1 | Eigenschaften des Haftverbundes von Glas im Bauwesen im Vergleich zu Fahrzeugglas | 38 |
| 3.2.5 | Alternative Zwischenschichtmaterialien bei VSG | 38 |
| 3.3 | Werkstoff Glas | 39 |
| 3.3.1 | Vorbemerkungen | 39 |
| 3.3.2 | Definition und Materialverhalten | 40 |
| 3.3.3 | Festigkeit | 41 |
| 3.3.3.1 | Einfluß des Oberflächenzustandes | 42 |
| 3.3.3.2 | Einfluß der Oberflächengröße | 42 |
| 3.3.3.3 | Einfluß der Belastungsdauer | 43 |
| 3.4 | Nichtlineares Tragverhalten | 43 |
| 3.5 | Schub- bzw. Verbundtragverhalten | 45 |
| 3.5.1 | Kinematik eines Plattenbalkenelements am Auflager | 45 |
| 3.5.2 | Definition der Verbundtragwirkung | 45 |
| 3.5.3 | Bisherige Untersuchungen | 47 |
| 3.5.3.1 | Experimentelle Untersuchungen an kleinformatigem VSG | 48 |
| 3.5.3.2 | Kompressionsschertests bei der HT TROPLAST AG | 49 |
| 3.5.3.3 | Experimentelle Untersuchungen an großformatigem VSG | 50 |
| 3.5.3.4 | Verhalten von VSG bei Stoß | 51 |
| 3.5.3.5 | Resttragfähigkeitsverhalten | 52 |
| 3.6 | VSG-Anwendungen im Bauwesen | 53 |
| 4 | Berechnung von Verbund-Sicherheitsglas | |
| 4.1 | Analytische Berechnungsverfahren | 56 |
| 4.1.1 | Allgemeines | 56 |
| 4.1.2 | Näherungslösung für den nachgiebigen Verbund nach <i>Wölfel</i> | 57 |
| 4.1.2.1 | Anwendbarkeitsvoraussetzungen | 57 |
| 4.1.2.2 | Grundgleichungen | 58 |
| 4.1.2.3 | Berechnung des Schubmoduls, basierend auf Versuchsmeßgrößen | 60 |
| 4.1.3 | Dünne Platten mit großen Verformungen | 60 |
| 4.1.3.1 | Nichtlineare Berechnungsformeln nach DIN EN13474-2 | 60 |
| 4.1.3.2 | Berechnung von VSG-Platten nach <i>Kutterer</i> | 61 |
| 4.2 | Numerisches Berechnungsverfahren | 62 |
| 4.2.1 | Allgemeines | 62 |
| 4.2.2 | Berechnung von Verbundplatten mit der FEM-Software SJ MEPLA | 62 |
| 5 | Bemessung und bauaufsichtliche Situation | |
| 5.1 | Allgemeine Gesichtspunkte | 63 |
| 5.2 | Normungs- und Bemessungssituation für VSG | 64 |
| 5.2.1 | Vorbemerkungen | 64 |
| 5.2.2 | Nachweis der Resttragfähigkeit | 64 |
| 5.2.3 | Derzeitig diskutierte Bemessungsvorschläge | 65 |

| | | |
|----------|--|----|
| 5.2.3.1 | Materialgesetz für den Schubmodul von PVB nach <i>Schuler</i> | 66 |
| 5.2.3.2 | Anwendungsvorschläge des FKG | 66 |
| 5.2.3.3 | Nachweisverfahren von <i>Schutte/Hanenkamp</i> | 68 |
| 5.2.3.4 | Normentwurf DIN EN 13474-2 | 69 |
| 6 | Alterung von Verbund-Sicherheitsglas | |
| 6.1 | Einführung | 70 |
| 6.2 | Alterung von Thermoplasten und der PVB-Folie | 71 |
| 6.2.1 | Allgemeine Zusammenhänge | 71 |
| 6.2.2 | Physikalisch-chemische Alterung | 73 |
| 6.2.2.1 | Photolytische Alterung (Photolyse) | 73 |
| 6.2.2.2 | Thermische Alterung (Thermolyse) | 74 |
| 6.2.2.3 | Oxidation | 75 |
| 6.2.2.4 | Autooxidation | 76 |
| 6.2.2.5 | Diffusion, Wanderung (Migration) von Kleinstmolekülen | 77 |
| 6.2.2.6 | Feuchteaufnahme (Sorption) und Austrocknung (Desorption) | 78 |
| 6.2.3 | Physikalische Alterung | 79 |
| 6.2.4 | Mechanische Belastung als Alterungsursache | 80 |
| 6.2.4.1 | Rißentstehung durch statische Dehnungsdeformation | 80 |
| 6.2.4.2 | Dynamische Beanspruchung im Dehnbereich | 80 |
| 6.2.5 | Stabilisatoren als Zusatzstoffe | 81 |
| 6.3 | Natürliche und künstliche Bewitterungsmethoden | 81 |
| 6.3.1 | Allgemeines | 81 |
| 6.3.2 | UV-Durchlässigkeit (UV-Transmission) der Erdatmosphäre | 82 |
| 6.3.3 | Durchlässigkeit von Licht und von UV-Strahlung bei Einfachglas | 83 |
| 6.3.4 | UV-Transmission von VSG bzw. der PVB-Folie | 85 |
| 6.3.5 | Natürliche Bewitterung | 85 |
| 6.3.6 | Künstliche Bewitterung (zeitraffende, künstliche Alterung) | 87 |
| 6.3.7 | Korrelation zwischen künstlichen und natürlichen Prüfungen | 88 |
| 6.4 | Bisherige Untersuchungen zur Alterung VSG | 89 |
| 6.4.1 | Klimabasierte Alterung | 89 |
| 6.4.1.1 | Allgemeines | 89 |
| 6.4.1.2 | Herstellerunabhängige Untersuchungen | 89 |
| 6.4.1.3 | Bewitterungstests bei der HT TROPLAST AG | 90 |
| 6.4.1.4 | Aussagen anderer Folien- bzw. VSG-Hersteller | 93 |
| 6.4.2 | Mechanische Alterung infolge Dauerschwingung | 94 |
| 7 | Versuchsbestimmte Schubmoduli von neuem und gealtertem, kleinformatigem VSG | |
| 7.1 | Einführung | 95 |
| 7.2 | Übersicht des Versuchsprogramms | 95 |
| 7.3 | Allgemeines zu den Probekörpern | 96 |
| 7.4 | Beschreibung der einzelnen Versuchsabschnitte | 97 |
| 7.4.1 | Teil A: Grundlagenuntersuchungen | 98 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 7.4.2 | Teil B: Klimatische Einflußgrößen auf den Folienfeuchtegehalt | 99 |
| 7.4.3 | Teil C: Künstliche und natürliche Bewitterung (gemäß der Praxis) | 101 |
| 7.4.4 | Teil D: Dynamisch-mechanisch gealtertes VSG | 104 |
| 7.5 | Versuchsaufbau und -durchführung | 106 |
| 7.5.1 | Allgemeines | 106 |
| 7.5.2 | Aussagen zur Begrenzung des Scherwinkels γ_s im Versuch | 108 |
| 7.5.3 | Wahl der Versuchsgeschwindigkeit | 108 |
| 7.5.4 | Modifizierte Versuchsvorrichtung zur Eignungsüberprüfung | 108 |
| 7.5.4.1 | Wahl des Versuchsaufbaus | 109 |
| 7.5.5 | Bestimmung des Feuchtegehaltes in der PVB-Folie | 110 |
| 7.5.6 | Bestimmung der PVB-Foliendicke und der Glasstärken | 111 |
| 7.6 | Auswertung der Versuche | 112 |
| 7.6.1 | Allgemeines | 112 |
| 7.6.2 | Auswertung der Scherversuche | 112 |
| 7.6.3 | Bemerkungen zur Statistik | 116 |
| 7.7 | Versuchsergebnisse | 117 |
| 7.7.1 | Voruntersuchungen für die Scherversuche | 117 |
| 7.7.2 | Grundlagenversuche (Teil A) | 118 |
| 7.7.3 | Feuchtegehaltrelevante Einflußfaktoren für die PVB-Folie (Teil B) | 123 |
| 7.7.4 | Künstliche und natürliche Alterung (Teil C) | 126 |
| 7.7.4.1 | Feuchtegehalt der PVB-Folie | 126 |
| 7.7.4.2 | Scherversuche nach zeitraffender Bewitterung im Labor | 128 |
| 7.7.4.3 | Vergleich zwischen der Alterung im Wärmeschrank und im Solarium | 132 |
| 7.7.4.4 | Scherversuche nach 2-jähriger Freibewitterung in Arizona und Florida | 134 |
| 7.7.4.5 | Vergleich zwischen zeitraffender und natürlicher Bewitterung | 137 |
| 7.7.5 | Dynamisch-mechanische Alterung (Teil D) | 138 |
| 7.8 | Zusammenfassung der Erkenntnisse | 140 |
| 7.8.1 | Zeit- und temperaturabhängiger Einfluß auf den G-Modul (Teil A) | 140 |
| 7.8.2 | Alterungseinflüsse auf den G-Modul (Teile B, C und D) | 140 |
| 7.8.3 | Bewertung der Versuchsmethode | 142 |

8 Untersuchungen an großformatigen, zweiseitig liniengelagerten Gläsern

| | | |
|---------|---|-----|
| 8.1 | Einführung | 143 |
| 8.2 | Versuche bei kurzzeitiger, zügiger Belastungseinwirkung | 144 |
| 8.2.1 | Versuchsbeschreibung | 144 |
| 8.2.2 | Probekörper | 144 |
| 8.2.3 | Versuchsaufbau und -durchführung | 145 |
| 8.2.4 | Versuchsauswertung | 149 |
| 8.2.4.1 | Bemerkungen zur Statistik | 149 |
| 8.2.5 | Versuchsverlauf | 151 |
| 8.2.6 | Versuchsergebnisse | 153 |
| 8.2.6.1 | Zerstörungsfreie Versuche bis 500 N | 153 |
| 8.2.6.2 | Biegebruchversuche und Resttragverhalten | 159 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 8.2.7 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 163 |
| 8.3 | FE-Berechnung der zügigen Kurzzeit-Versuche | 164 |
| 8.3.1 | Allgemeines | 164 |
| 8.3.2 | Berechnung mit dem allgemeinen FEM-Programm ANSYS 7.0 | 165 |
| 8.3.2.1 | Verwendete Elementtypen | 165 |
| 8.3.2.2 | Kalibrierung der verwendeten Elementtypen | 165 |
| 8.3.2.3 | FE-Modellierungsoptionen für die VSG-Plattenstreifen und Einfluß des Glasaufbaus auf die Berechnungsergebnisse | 168 |
| 8.3.2.4 | Ermittlung eines zeitinvarianten Schubmoduls für die PVB-Folie, basierend auf den Biegeversuchen an VSG-Plattenstreifen | 169 |
| 8.3.3 | Vergleich der erzielten Schubmoduli aus Scher- und Biegeversuch | 172 |
| 8.3.4 | Berechnung mit dem FEM-Programm SJ MEPLA, Version 2.0 | 174 |
| 8.3.5 | Vergleich der Ergebnisse aus Versuch, FE-Rechnung und der Näherungslösung für den nachgiebigen Verbund nach <i>Wölfel</i> | 177 |
| 8.3.6 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 180 |
| 8.4 | Retardationsversuche - Langzeitliche Lasteinwirkung | 181 |
| 8.4.1 | Einführung | 181 |
| 8.4.2 | Probekörper | 181 |
| 8.4.3 | Versuchsaufbau und -durchführung | 181 |
| 8.4.4 | Versuchsauswertung | 183 |
| 8.4.5 | Versuchsergebnisse | 184 |
| 8.4.6 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 188 |
| 8.5 | FE-Berechnung der Retardationsversuche | 188 |
| 8.5.1 | Einführung | 188 |
| 8.5.2 | Kalibrierung der Modellparameter | 188 |
| 8.5.3 | Diskretisierung und Ergebnisse | 189 |
| 9 | Untersuchungen an großformatigen, vierseitig liniengelagerten Glasplatten | |
| 9.1 | Einführung | 191 |
| 9.2 | Versuchstechnische Untersuchungen | 192 |
| 9.2.1 | Versuchskörper | 192 |
| 9.2.2 | Versuchsaufbau | 192 |
| 9.2.3 | Versuchsdurchführung | 195 |
| 9.2.4 | Bemerkungen zur Statistik | 196 |
| 9.2.5 | Versuchsergebnisse | 196 |
| 9.3 | Geometrisch lineare und nichtlineare Berechnungen | 199 |
| 9.3.1 | Numerische und analytische Vergleichsberechnungen | 199 |
| 9.3.1.1 | Monolithischer Glasaufbau | 199 |
| 9.3.1.2 | VSG-Aufbau (Sandwichplatte) | 201 |
| 9.3.2 | FE-Untersuchung der Einspannwirkung an den Plattenrändern | 203 |
| 9.3.3 | FEM-Studien zum Kurzzeit-Tragverhalten der Glasplatten | 204 |
| 9.3.3.1 | Bestimmung des Schubmoduls der Verbundglasplatten im Versuch | 204 |
| 9.3.3.2 | Einfluß des Folienschubmoduls | 205 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9.3.3.3 | Vergleich zwischen VSG-Platten und monolithischen Glasplatten | 209 |
| 9.3.4 | FEM-Studien zum zeitabhängigen Tragverhalten der VSG-Platten | 210 |
| 9.3.5 | Vergleich der Ergebnisse mit derzeitigen Bemessungsansätzen | 212 |
| 9.4 | Zusammenfassung | 216 |
| 10 | Diskussion der Ergebnisse | |
| 10.1 | Einführung | 217 |
| 10.2 | Klimabasierte Alterung bei großen VSG-Scheiben | 217 |
| 10.2.1 | Einfluß von UV-Strahlung und hoher Umgebungstemperatur | 217 |
| 10.2.2 | Maßnahmen gegen UV-Abbau | 217 |
| 10.2.3 | Einfluß von hoher Umgebungsfeuchte und erhöhter Temperatur | 218 |
| 10.2.3.1 | Einachsiger Lastabtrag | 219 |
| 10.2.3.2 | Zweiachsiger Lastabtrag | 222 |
| 10.2.4 | Ausblick auf einen Bemessungsvorschlag | 226 |
| 10.3 | Bemessung von ungealtertem VSG | 227 |
| 10.3.1 | Zeit- und temperaturabhängiges Materialgesetz für die PVB-Folie | 227 |
| 10.3.2 | Vorschlag für die Bemessung von großen Verbundglasscheiben | 232 |
| 10.3.2.1 | Einachsiger Lastabtrag | 232 |
| 10.3.2.2 | Zweiachsiger Lastabtrag | 233 |
| 11 | Zusammenfassung und Ausblick | 235 |
| | Literatur | 238 |
| | Anhang | 254 |