Technische Universität München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Lehrstuhl für Metallbau

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit des Schubverbunds in Verbundsicherheitsglas mit unterschiedlichen Folien aus Polyvinylbutyral

Vincent Sackmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. G. H. Müller

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Albrecht, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Mensinger
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. St. Winter

Die Dissertation wurde am 25.09.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 05.03.2008 angenommen.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde die Dauerhaftigkeit des Schubverbundes in Verbundsicherheitsglas mit Polyvinylbutyral-Folien von drei verschiedenen Herstellern untersucht. Dazu wurde in statischen und dynamischen Biegeversuchen die Auswirkung künstlicher Bewitterung durch ultraviolette Strahlung, hohe Temperatur und hohe Luftfeuchtigkeit sowie zyklischer Dauerbelastung auf die Biegesteifigkeit von Balken aus Verbundsicherheitsglas gemessen. Lediglich bei den Probekörpern welche hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt waren, wurde dabei eine signifikante Abnahme der Biegesteifigkeit festgestellt. Darüber hinaus wurden die Zugeigenschaften künstlich bewitterter Folien untersucht. Auch bei diesen Versuchen zeigte sich der großen Einfluss des Feuchtegehalts der Folie auf das Materialverhalten. Neben den Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit des Schubverbundes wurde mittels Kriechversuchen auch der zeit- und temperaturabhängige Schubmodul der drei untersuchten Folien ermittelt. Für die Folie mit der geringsten Steifigkeit wird auf Grundlage des Prinzips der Zeit-Temperatur-Verschiebung eine Formel für den Schubmodul angegeben, welche für die Bemessung von Verbundsicherheitsglas verwendet werden kann.

Abstract

In this thesis the durability of the shear bond in laminated safety glass with different interlayers of polyvinylbutyral from three manufacturers is investigated. In static and dynamic bending experiments the effect of artificial weathering with ultraviolet radiation, high temperature and high humidity and the effect of cyclic long-term loading on the bending stiffness of laminated safety glass beams has been measured. Only in those samples that where exposed to high humidity a significant decline in bending stiffness has been detected. In addition to that, the tensile properties of weathered samples of the interlayers have been investigated. These experiments also showed the influence of moisture content on the material behaviour of the interlayer. Besides the research on the durability of the shear bond, creep experiments have been performed to measure the time-temperature dependent shear modulus of all three interlayers. For the interlayer with the lowest rigidity a formula for the shear modulus is given which is based on time-temperature shift principle of polymers and can be used for the design of laminated safety glass.

Resumen

Esta tesis trata sobre investigaciones de la durabilidad de la conexión de cizalladura en vidrio laminado compuesto de láminas intermedias de butiral de polivinilo provenientes de tres diferentes fabricantes. En experimentos estáticos se midió la rigidez a la flexión de vigas de vidrio laminado con el efecto de envejecimiento acelerado utilizando radiación ultravioleta, alta temperatura y alta humedad de aire. También se midió en experimentos dinámicos el efecto de carga cíclica de larga duración. En aquellas muestras que fueron expuestas a alta humedad se detectó una disminución de la rigidez a la flexión. Se investigó también las propiedades mecánicas de muestras envejecidas de los tres films de butiral de polivinilo. Estos experimentos han mostrado el comportamiento mecánico de los films influido por la retencion de humedad. Aparte de estas investigaciónes se aplicaron experimentos de arrastre para medir los modulos de cizalladura de los tres films, que dependen de la duración de carga y de la temperatura. Para el film con la rigidez menor se presenta una fórmula la cual esta basada en el principio de superposición de tiempo-temperatura y que puede ser usada para el diseño de vidrio laminado.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Stahlbau und ab Oktober 2006 am Lehrstuhl für Metallbau der Technischen Universität München. Ermöglicht wurde diese Arbeit durch ein gemeinsames Forschungsvorhaben des Lehrstuhls für Stahlbau der Technischen Universität München unter Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Albrecht und des Labors für Stahl- und Leichtmetallbau der Fachhochschule München unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ö. Bucak. Bei beiden Professoren möchte ich mich für die wertvolle Unterstützung und die fruchtbare Kooperation bei der Durchführung des Forschungsvorhabens bedanken.

Für die stets wohlwollende Unterstützung und die Betreuung meiner Arbeit bedanke ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Albrecht.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Mensinger danke ich für die Übernahme in das neue Team des Lehrstuhls für Metallbau und für seine Unterstützung während der Endphase der Arbeit.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Winter danke ich für die Bereitschaft das Korreferat zu übernehmen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. G. Müller für die Übernahme des Vorsitzes bei der Prüfungskommission.

Der experimentelle Teil der Arbeit entstand am Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Universität München, am Baustofflabor und am Labor für Stahl- und Leichtmetallbau der Fachhochschule München. Bei allen Mitarbeitern, die durch ihre tatkräftige Mitarbeit und ihre technischen Ratschläge die Versuche erst ermöglicht haben, möchte ich mich bedanken. Besonders möchte ich dabei meinem Kollegen Herrn M. Meißner für die gute Zusammenarbeit und die anregenden Gespräche bedanken.

Besonderer Dank gilt auch meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. H. Gräf und Herrn Dr.-Ing. C. Schuler, die mich in das Forschungsthema Verbundsicherheitsglas eingearbeitet haben und mir stets wertvolle Ratschläge gaben. Ebenso möchte ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen Kollegen und Mitarbeitern am Lehrstuhl und im Ingenieurbüro von Prof. Dr.-Ing. Albrecht für die Unterstützung und die anregenden Diskussionen bedanken.

Last but not least danke ich meiner Familie und meiner Ehefrau Dora für die wertvolle Unterstützung und die Geduld, vor allem in der letzten Phase der Arbeit.

Vincent Sackmann München, März 2008

Inhaltsverzeichnis

1	**Einleitung**	**1**
1.1	Allgemeines	1
1.2	Zielsetzungen	2
1.3	Gliederung der Arbeit	3
2	**Materialeigenschaften von Verbundsicherheitsglas**	**5**
2.1	Zwischenlage aus Polyvinylbutyral (PVB)	5
2.1.1	Allgemeines	5
2.1.2	Chemische Zusammensetzung von PVB-Folien	7
2.1.3	Temperaturabhängige Steifigkeit von amorphen Thermoplasten	8
2.1.4	Glasübergangstemperatur von PVB	9
2.1.5	Linear-viskoelastisches Materialverhalten von PVB	10
2.1.6	Linear-viskoelastisches Materialverhalten bei periodischer Beanspruchung	14
2.1.7	Grenzen des linear-viskoelastischen Materialverhaltens von PVB	16
2.1.8	Zeit-Temperatur-Verschiebung	17
2.1.9	Abweichungen vom Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung	18
2.1.10	Physikalische Alterung	19
2.2	Verbundsicherheitsglas (VSG)	21
2.2.1	Allgemeines	21
2.2.2	Eigenschaften des Glases	22
2.2.3	Herstellung von VSG	23
2.2.4	Haftung zwischen PVB-Folie und Glas	23
2.2.5	Scherfestigkeit der PVB-Folie	24
3	**Tragverhalten von Verbundglas bzw. Verbundsicherheitsglas**	**25**
3.1	Allgemeines	25
3.2	Verbundglasbalken auf Biegung	26
3.2.1	Berechnungsmethode zur Auswertung von Vierpunkt-Biegeversuchen	26
3.2.2	Einfluss des Schubmoduls der Zwischenfolie auf die Biegesteifigkeit	28
3.2.3	Abweichung des Tragverhaltens realer Verbundglasbalken von der Balkentheorie	30
3.2.3.1	Einfluss der Breite und Durchbiegung von Verbundglasbalken	30
3.2.3.2	Einfluss der Auskragung von Verbundglasbalken über den Auflagern	31

3.2.3.3	Vergleichsrechnung zwischen realen Verbundglasbalken und der Näherungslösung nach [Wölfel 1987]	31
3.2.3.4	Weitere Einflüsse auf die Auswertung von Biegeversuchen an Verbundglasbalken	34
3.2.4	Restspannungen in Balken aus VSG nach Entlastung	35
3.2.5	Effektive Torsionssteifigkeit von Verbundglasbalken	36
3.2.6	Tragverhalten von Verbundglasplatten in Abhängigkeit des Schubmoduls	38
3.3	Beurteilung der Biegeversuche zur Ermittlung des Schubmoduls von PVB-Folien	41
4	**Alterung von PVB als Zwischenlage in Verbundsicherheitsglas**	**43**
4.1	Einführung	43
4.2	Atmosphärische Alterung von Kunststoffen	46
4.2.1	Alterung durch UV-Strahlung	46
4.2.2	Alterung durch Erwärmung	48
4.2.3	Alterung durch Feuchtigkeit	48
4.2.4	Sonstige Alterungseinflüsse	49
4.3	Schutz vor Alterung durch Stabilisatoren	50
4.4	Spezielle Aspekte zur Alterung von PVB-Folien	50
4.4.1	Alterung von PVB durch UV-Strahlung	50
4.4.2	Schutz der PVB-Folie in Verbundsicherheitsglas	51
4.4.2.1	Absorption der UV-Strahlung im Glas	51
4.4.2.2	Reflexion der UV-Strahlung durch das Glas	53
4.4.3	Alterung von PVB durch Erwärmung	54
4.4.4	Alterung von PVB durch Feuchtigkeit	55
4.5	Atmosphärische Alterungseinflüsse	56
4.5.1	Solare Einstrahlung im UV-A Bereich in Deutschland	56
4.5.1.1	Allgemeines	56
4.5.1.2	Beziehung zwischen Globalstrahlung und UV-A-Strahlung	57
4.5.1.3	Auswertung von UV-Messungen in München	58
4.5.1.4	UV-A-Strahlung auf vertikale und schräge Flächen	60
4.5.2	Solare Erwärmung von VSG-Scheiben	61
4.5.3	Natürliche Luftfeuchtigkeit	62
4.6	Künstliche Bewitterung zur Alterung von Kunststoffen	63

4.7	Künstliche Bewitterung von PVB in Verbundsicherheitsglas	65
4.7.1	Bestrahlung mit künstlichem Sonnenlicht	65
4.7.2	Lagerung bei hoher Temperatur	69
4.7.3	Lagerung bei hoher Feuchtigkeit	69
5	**Biegeversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB**	**71**
5.1	Einleitung	71
5.2	Versuchsprogramm	71
5.2.1	Allgemeines	71
5.2.2	Versuchsparameter	73
5.2.2.1	Versuchsparameter Kurzzeitversuche	73
5.2.2.2	Versuchsparameter Langzeitversuche	74
5.2.3	Geometrie der Probekörper	74
5.2.4	E-Modul der Glasscheiben	75
5.3	Streuung und statistische Signifikanz	77
5.3.1	Kurzzeitversuche	77
5.3.2	Langzeitversuche	79
5.4	Kurzzeitversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB	79
5.4.1	Einfluss von Bestrahlung und hoher Temperatur	80
5.4.1.1	Relaxationsversuche	80
5.4.1.2	Kriechversuche	82
5.4.1.3	Kontrollversuch zum Vergleich der Relaxations- und Kriechversuche	84
5.4.2	Einflusses von hoher Luftfeuchtigkeit	86
5.4.2.1	Relaxationsversuche	86
5.4.2.2	Kriechversuche	88
5.5	Langzeitversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB	89
5.6	Vergleich mit Untersuchungen anderer Autoren	92
5.6.1	Scherversuche von Ensslen (Universität Bochum)	93
5.6.2	Scherversuche von Schuler (FH München / TU München)	94
5.7	Beurteilung der Biegeversuche zur Untersuchung der Alterung	95
6	**VSG-Scheiben unter zyklischer Dauerbelastung**	**97**
6.1	Einführung	97
6.2	Voruntersuchung zum linear-viskoelastischen Verhalten	97

6.3	Versuchsprogramm der Dauerschwingversuche	99
6.3.1	Vorversuche bis 50.000 Lastwechsel an unterschiedlich gelagerten Scheiben	99
6.3.2	Dauerschwingversuche bis 150.000 Lastwechsel	100
6.4	Vergleich der Versuchsparameter mit der Windbeanspruchung von VSG-Scheiben	103
6.4.1	Maximale Schubspannung in der PVB-Folie von windbelasteten VSG-Scheiben	104
6.4.2	Schätzung des Beanspruchungskollektivs bei Windbeanspruchung	105
6.4.2.1	Vorbemerkung zur Vorgehensweise	105
6.4.2.2	Kleinste Eigenfrequenz von großformatigen VSG-Scheiben	106
6.4.2.3	Vorgehensweise zur Abschätzung der Beanspruchungskollektivs	107
6.4.2.4	Beanspruchungskollektiv der Schubspannung in der PVB-Folie	110
6.4.3	Lastkollektive aus der Literatur zur Prüfung von windbeanspruchten Bauteilen	111
6.5	Untersuchungen anderer Autoren	114
6.6	Abschließende Beurteilung für windbeanspruchte VSG-Scheiben	114
7	**Zugversuche an PVB-Folien**	**117**
7.1	Einleitung	117
7.2	Versuchsprogramm	117
7.2.1	Versuchsaufbau und Probekörper	117
7.2.2	Auswertung der Versuche	119
7.3	Einfluss von Bestrahlung und Temperatur auf die Zugeigenschaften der PVB-Folien	121
7.4	Einfluss von Feuchtigkeit auf die Zugeigenschaften der PVB-Folien	123
7.5	Vergleich von E-Modul und Schubmodul	124
7.5.1	Ermittlung des E-Moduls aus den Zugversuchen	124
7.5.2	Vergleich des E-Moduls mit dem Schubmodul aus Biegeversuchen	124
8	**Zeit- und temperaturabhängiger Verlauf des Schubmoduls**	**127**
8.1	Einführung	127
8.2	Festlegung des Fraktilwerts des Schubmoduls	127
8.2.1	Grundlagen	127
8.2.2	Streuung des Schubmoduls bei Biegeversuchen	129
8.2.3	Einfluss des Schubmoduls auf die Spannung in VSG-Scheiben	130

8.2.4	Bruchwahrscheinlichkeit von VSG unter Berücksichtigung der Streuung des Schubmoduls	131
8.2.5	Alternative Festlegung des Fraktilwerts des Schubmoduls bei Biegeversuchen	132
8.3	Schubmodul der PVB-Folien drei verschiedener Hersteller	133
8.4	Vergleich mit dem Schubmodul aus Untersuchungen anderer Autoren	136
8.5	Funktion zur Beschreibung des Schubmoduls	140
8.6	Schubmodul für die Bemessung von VSG	143
9	**Bemessungswert des Schubmoduls für Einwirkungen aus Wind und Schnee**	**145**
9.1	Ausgangslage	145
9.2	Bemessungswert des Schubmoduls bei Windeinwirkung	145
9.2.1	Bemessungswert des Schubmoduls bei Windeinwirkung nach [E DIN 18008-1]	145
9.2.2	Bemessungswert des Schubmoduls GZTV bei Windeinwirkung	146
9.3	Bemessungswert des Schubmoduls bei Schneeeinwirkung	148
9.3.1	Belastungsdauer und Lufttemperatur	148
9.3.2	Temperatur in der PVB-Folie	149
9.3.3	Bemessungswert des Schubmoduls bei Schneeeinwirkung	152
9.4	Einfluss der Alterung auf den Bemessungswert des Schubmoduls	154
9.4.1	UV-Strahlung und hohe Temperatur	154
9.4.2	Feuchtigkeit	154
9.5	Bemessungswert des Schubmoduls für sonstige Einwirkungen	157
9.5.1	Einwirkungen auf Isoliergläsern	157
9.5.2	Weitere Einwirkungen	157
10	**Zusammenfassung und Ausblick**	**159**
10.1	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	159
10.2	Ausblick auf weitere Forschungen	161
Literatur		**163**
Anhänge A1 bis A5		

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Kapitel 2:

a_L	Faktor der Zeit-Alterungs-Verschiebung
$a_T(T)$	Faktor der Zeit-Temperatur-Verschiebung
b_0	Materialkonstante der physikalischen Alterung
c_1, c_2	Konstanten des Faktors $a_T(T)$ der Zeit-Temperatur-Verschiebung
E, E(t)	Elastizitätsmoduls der PVB-Folie
E_{Glas}	Elastizitätsmodul von Glas
G, G(t)	Schubmodul (Relaxationsmodul ≈ Kriechmodul)
G', G'(ω)	Speichermodul
G", G"(ω)	Verlustmodul
G_i	Elastischer Anteil des i-ten Elements eines linear-viskoelastischen Modells
J(t)	Kriechnachgiebigkeit
J', J'(ω)	Speicher-Kriechnachgiebigkeit
J", J"(ω)	Verlust-Kriechnachgiebigkeit
J_0	Materialkonstante der Funktion des Kurzzeitkriechens
T	Temperatur
t*	Reduzierte Belastungszeit bei physikalischer Alterung
t, t'	Zeit ab Belastungsbeginn
T_0	Referenztemperatur der Zeitverschiebung
t_0	Konstante für physikalische Alterung
t_e	Alterungsdauer (Zeit nach Unterschreitung der Glasübergangstemperatur)
T_G	Glasübergangstemperatur
T_M	Schmelztemperatur
V_F	Freies Volumen zwischen den Molekülen des Polymers
V_M	Volumen der Moleküle im Polymer
α_1, α_2	Wärmeausdehnungskoeffizient des Polymers
β	Skalenfaktor der Kriechnachgiebigkeit
δ	Phasenverschiebung zwischen Schubspannung und Scherwinkel
ε	Längsdehnung
γ	Scherwinkel($\gamma \cong \tan\gamma$ für $\gamma < 0{,}5$ rad)
γ_0	Amplitude des Scherwinkels bei harmonisch schwingender Anregung
η_i	Dynamische Viskosität des i-ten Elements eines linear-viskoelastischen Modells

λ_i	Relaxationszeit oder Retardationszeit des i-ten Elements eines linear-viskoelastischen Modells
μ	Querdehnzahl
τ	Schubspannung
ω	Kreisfrequenz [rad/s] der harmonischen Anregung

Kapitel 3:

b	Breite eines Verbundglasbalken, bzw. längere Seite einer Verbundglasplatte
c	Abstand der Lasteinleitungssteife vom Auflager der Verbundglasbalken
e	Abstand der Schwerachsen der Glasscheiben in einem Verbundglaselement
E_{Glas}	Elastizitätsmodul der Glasscheiben
F, F(t)	Kraft
G, G(t)	Schubmodul der Zwischenlage
h	Dicke der Glasscheiben bei symmetrischen Scheibenaufbau ($h_1 = h_2$)
h_1, h_2	Dicken der Glassscheiben
h_F	Dicke der PVB-Folie
I_1, I_2	Trägheitsmomente der Glasscheiben
I_{eff}	Effektives Trägheitsmoment (Steiner-Anteil) eines Verbundglasbalkens
I_s	Trägheitsmoment des Verbundglasbalkens bei biegeschlaffen Deckschichten
$I_T(G)$	Torsionssteifigkeit eines Verbundglasbalkens (St.-Venant'sche Torsion)
I_{T0}	Torsionssteifigkeit eines monolithischen Glasbalkens (St.-Venant'sche Torsion)
k	Schubbeiwert
L	Stützweite eines Verbundglasbalkens bzw. kürzere Seite einer Verbundglasplatte
p	Belastung
q	Flächenlast
q*	Normierte Flächenlast
R_ε, R_w	Verhältniswerte der Messgrößen (ε, w) aus linearer Balkenberechnung und FEM-Berechnung
S	Sensitivität (Empfindlichkeit) des Schubmoduls gegenüber Änderung von Messgrößen
S_ϑ	Sensitivität des Schubmoduls gegenüber Änderungen der Torsionssteifigkeit eines Verbundglasbalkens
S_ε , S_w	Sensitivität des Schubmoduls gegenüber Änderungen Biegesteifigkeit eines Verbundglasbalkens
V_ϑ	Verbundfaktor bei Torsion eines Verbundglasbalkens
V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$	Verbundfaktor bei Biegung eines Verbundglasbalkens

w	Durchbiegung eines Verbundglasbalkens in Feldmitte
Γ	Schubfaktor
α	Seitenverhältnis b/L einer Glasplatte
ε	Längsdehnung der Glasscheiben in Feldmitte eines Verbundglasbalkens (Mittelwert der Beträge der Dehnungen ε_o, ε_u in den Glasscheiben)
ε_{mono}	Längsdehnung in Feldmitte eines monolithischen Glasbalkens der Dicke $h_1+h_2+h_F$
ε_o, ε_u	Längsdehnung auf der oberen Seite der oberen und der unteren Seite der unteren Glasscheibe eines Verbundglasbalkens (in Feldmitte)
γ	Scherwinkel eines Verbundglaselements
γ_F	Scherwinkel der PVB-Folie
λ	Schlankheit L/(2h) eines Verbundglasbalkens oder einer Verbundglasplatte mit symmetrischen Scheibenaufbau ($h_1 = h_2 = h$)
λ_T	Schubbeiwert der Torsionssteifigkeit
μ_{Glas}	Querdehnzahl der Glassscheiben
σ	Längsspannung in einer Glasscheibe
σ^*	Normierte Längsspannung in einer Glasscheibe
τ_F	Schubspannung der PVB-Folie

Kapitel 4:

B	Dosis (Energie) der diffusen Strahlung auf eine horizontale Fläche auf der Erde
c	Konzentration (hier Wassergehalt)
D	Diffusionskoeffizient
DU	Dobson Unit, Ozongehalt der Atmosphäre (1 DU = 0,01 mm dicke Ozonschicht bei 0 °C und 1 bar Luftdruck)
E	Bestrahlungsstärke (Leistung) auf eine horizontale Fläche auf der Erde
$E_{300\text{-}400\ nm}$	Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich zwischen 300 und 400 nm
E_λ	Spektrale Bestrahlungsstärke mit der Wellenlänge λ
$E_{\lambda = 365\ nm}$	Spektrale Bestrahlungsstärke bei einer Wellenlänge von 365 nm
$f(\lambda)$	Spektrale Empfindlichkeit des UV-Messsonde
G	Dosis (Energie) der Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche auf der Erde
$\overline{G}$	Mittlere jährliche Strahlungsdosis der Globalstrahlung
H_{UV}	Dosis (Energie) der natürlichen UV-Strahlung auf eine horizontale Fläche auf der Erde
$\overline{H_{UV}}$	Mittlere jährliche Strahlungsdosis der natürlichen UV-Strahlung
$H_{UV,\ Messgerät}$	Dosis der UV-Strahlung die mit einem Messgerät gemessen wird

t	Bestrahlungsdauer
T_L	Trübungsfaktor nach Linke
T [%]	Transmissionsgrad des Glases
λ	Wellenlänge der Strahlung
θ	Zenithwinkel der Sonne
ζ	Einfallswinkel der Strahlung in Bezug auf die Flächennormale

Kapitel 5:

c_S	Schallgeschwindigkeit einer Longitudinalwelle in Glas
GA_S	Schubsteifigkeit von Verbundglasbalken
α_p	Irrtumswahrscheinlichkeit des statistischen Tests
ρ_{Glas}	Dichte von Glas

sonstige Symbole wie in Kapitel 3

Kapitel 6:

c_{pe}	Druckbeiwert des Geschwindigkeitsdrucks des Windes
f	Frequenz der Windturbulenz
f_1	Erste Biege-Eigenfrequenz einer VSG-Scheibe
I_v	Turbulenzintensität des Windes
q	Geschwindigkeitsdruck des Windes (Winddruck)
$q'(t)$	Turbulenter Anteil des Winddruckes
$q_{b,3s}$	Maximaler Winddruck einer 3-Sekunden-Böe
$q_{b,3s,tag}$	Maximale tägliche Windböe (Bemessungsböe)
$q_{m,10min}$	10-Minutenmittel des Winddrucks
$S_v(f)$	Spektrale Dichte des Windes
t_b	Mittelungsdauer einer Windböe (i.d.R. 3 Sekunden)
T_{Max}	Tägliches Maximum der Lufttemperatur
v	Windgeschwindigkeit
$v'(t)$	Turbulenter Anteil der Windgeschwindigkeit
$v_{b,3s}$	Maximale Böengeschwindigkeit
v_m	Mittlere Windgeschwindigkeit
$v_{m,10min}$	10-Minutenmittel der Windgeschwindigkeit
$V_{\varepsilon,n}$	Verbundfaktor nach n Lastwechseln
w_0	Amplitude der harmonischen Biegeschwingung $w(t) = w_0 \sin(\omega t)$
$\Delta\tau_F$	Doppelamplitude der Schubspannung der PVB-Folie

δ	Logarithmisches Dämpfungsdekrement
γ_F	Maximaler Scherwinkel der PVB-Folie (Amplitude)
ρ	Dichte der Luft
σ_v	Standardabweichung des turbulenten Anteils der Windgeschwindigkeit
σ_τ	Standardabweichung des turbulenten Anteils der Schubspannung
τ_F	Maximale Schubspannung der PVB-Folie (Amplitude)
$\tau_{F,b,3s}$	Maximale Schubspannung der PVB-Folie bei der Bemessungsböe
$\tau_{F,b,3s,tag}$	Maximale Schubspannung der PVB-Folie bei der maximalen täglichen Windböe
$\tau_{F,m}$	Zeitlich gemittelte Schubspannung der PVB-Folie bei Windbelastung
χ_A^2	Aerodynamische Admittanz

sonstige Symbole wie in Kapitel 2

Kapitel 7:

E, E(t)	Elastizitätsmodul der PVB-Folie
G,G(t)	Schubmodul der PVB-Folie
L_0	Entfernung der Messmarken des Probekörpers zu Beginn des Zugversuchs
f_u	Zugfestigkeit der PVB-Folie (nominale Spannung)
t	Belastungszeit
ε, $\varepsilon(t)$	Dehnung der PVB-Folie
ε_u	Bruchdehnung der PVB-Folie (nominale Dehnung)
μ	Querdehnzahl der PVB-Folie
σ, $\sigma(t)$	Spannung in der PVB-Folie

Kapitel 8:

$a_T(T)$	Temperaturabhängiger Zeit-Verschiebungsfaktor
B(G)	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses des Schubmoduls auf die Beanspruchung in einer VSG-Scheibe
$c_{1,ZTV}$, $c_{1,ZTV}$	Faktoren zur Bestimmung des Zeit-Verschiebungsfaktors $a_T(T)$ zur Ermittlung der Bemessungskurven des Schubmoduls G_{ZTV}
$f(\sigma_{bB})$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibullverteilung der Biegefestigkeit von Floatglas
F_{Bruch}	Bruchwahrscheinlichkeit von Floatglas
G_0	Referenzwert des Schubmoduls der PVB-Folie
$G_{0,crit}$	Kritischer Schubmodul der PVB-Folie mit der größten Verbundwirkung in einer bestimmten VSG-Scheibe

$G_{50\%}$	50-%-Fraktile des Schubmoduls der PVB-Folie
$G_{x\%}$	X-%-Fraktile des Schubmoduls der PVB-Folie
G_{ZTV}	Schubmodul auf Grundlage des Prinzips der Zeit-Temperaturverschiebung
k	Faktor zur Bestimmung der unteren Grenze der 50-%-Fraktile
$V_{\varepsilon,50\%}$	50-%-Fraktile des Verbundfaktors
β	Formfaktor der Weibull-Verteilung der Biegefestigkeit von Floatglas
λ_i	Relaxationszeiten des Schubmoduls G_{ZTV}
θ	Skalenparameter der Weibull-Verteilung der Biegefestigkeit von Floatglas
σ_{bB}	Biegefestigkeit von Floatglas
$\sigma_{bB,c}$	Biegefestigkeit von Floatglas bei der akzeptierten Bruchwahrscheinlichkeit von Floatglas

Kapitel 9:

q_s	Maximale Schneelast
R_{se}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Schnee und Glasoberfläche
R_{si}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Luft und Glasoberfläche
t_{red}	Reduzierte Zeit zur Ermittlung der Kriechverformung bei wechselnder Temperatur der PVB-Folie
t_s	Maximale Liegedauer des Schnees
$v_{Böe}$	Windgeschwindigkeit einer Windböe
Δt_i	Zeitabschnitt mit konstanter Folientemperatur

sonstige Symbole wie in Kapitel 4, 6 und 8

Sonstige Abkürzungen:

DMS	Dehnungsmessstreifen
ESG	Einscheibensicherheitsglas
PVB	Polyvinylbutyral
rel. LF	Relative Luftfeuchtigkeit in [%]
VK	Variationskoeffizient der Stichprobe: $\frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}}$
VSG	Verbundsicherheitsglas
s, h, d, w, m	Sekunde, Stunde, Tag, Woche, Monat

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Durch die flächige Verbindung von Glasscheiben und Zwischenlagen aus Kunststoff zu Verbundglas eröffnen sich dem transparenten Baustoff Glas im Bauwesen neue Einsatzmöglichkeiten als tragendes und schützendes Element. Gegenüber monolithischen Glasscheiben, welche bei Überschreitung ihrer Festigkeit spröde brechen und somit in ihrer tragenden Funktion spontan versagen, zeichnen sich Verbundglasscheiben bei geeigneter Kombination von Glasart, Kunststoff und Lagerungsbedingung durch ihre Resttragfähigkeit bei Bruch einer Glasscheibe aus.

Für den Einsatz in tragenden Verbundgläsern, sind nur solche Kunststoffe geeignet, die eine ausreichende Zähigkeit und Reißfestigkeit aufweisen und unter allen klimatischen Einsatzbedingungen gut an der Glasoberfläche haften. Zudem müssen sie während der gesamten Nutzungsdauer beständig gegenüber Alterung durch ultraviolette Sonnenstrahlung, Temperatur, Feuchtigkeit und atmosphärische Gasen sein.

Für die Herstellung von Verbundgläsern im Bauwesen und im Automobilbau haben sich seit vielen Jahrzehnten Kunststofffolien aus Polyvinylbutyral ("PVB") bewährt. Aufgrund der guten Haftung zwischen Glas und PVB verhindert die Folie bei Bruch einer Glasscheibe die Ablösung größerer Glassplitter, welche in der Nähe befindliche Personen und Gegenstände gefährden können. Aus diesem Grund wird der Verbundwerkstoff aus Glas und PVB-Folie als Verbundsicherheitsglas bzw. abgekürzt als "VSG" bezeichnet. Die Güte der Adhäsion hängt maßgeblich vom Feuchtegehalt der Folie ab. Dringt bei der Lagerung und Herstellung von Verbundgläsern oder durch atmosphärische Bewitterung Luftfeuchtigkeit in die Folie ein, so wird die Haftung mit der Glasoberfläche stark herabgesetzt.

Neben der Splitterbindung bieten Scheiben aus Verbundsicherheitsglas gegenüber monolithischen Glasscheiben auch weitere Vorteile, wie einen erhöhten Schutz vor UV-Strahlung und Schallimmission und, besonders im Verbund mit mehreren Glasschichten, eine stark erhöhte Sicherheit gegen äußere Angriffe.

Bei intakten Verbundglasscheiben überträgt die Zwischenlage aus Kunststoff Schubkräfte zwischen den Glasscheiben. Dieser Effekt, welcher in dieser Arbeit als Verbundwirkung bezeichnet wird, erhöht die Steifigkeit im Vergleich zu unverbundenen Glasscheiben mit der gleichen Gesamtdicke wie die Verbundglasscheibe. Andererseits kann durch die Berücksichtigung der Verbundwirkung bei der Bemessung von Verbundglasscheiben die Dicke der Einzelscheiben reduziert werden und somit bei größeren Glasfassaden wirtschaftliche Einsparungen realisiert werden. Maßgebend für die Verbundwirkung ist die Höhe des Schubmoduls der Zwischenlage, welche aufgrund ihrer polymeren Struktur von der Dauer der Einwirkung und der Umgebungstemperatur abhängt.

Nach dem derzeitigen Stand der Normung ist der Ansatz der Verbundwirkung in Deutschland bauaufsichtlich nicht zugelassen. Im gegenwärtigen Entwurf der neuen Glasbaunorm [E DIN 18008-1] wird jedoch für PVB-Folien zumindest für kurzzeitige Einwirkungen aus Wind ein Schubmodul von $G = 0{,}4\ N/mm^2$ vorgeschlagen. Grundlage dieses Bemessungswertes sind

Scherversuche an kleinformatigen Probekörpern mit der PVB-Folie eines Herstellers und ohne Berücksichtigung von Alterungseffekten [Sobek 2000].

1.2 Zielsetzungen

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses künstlicher Bewitterung durch UV-Strahlung, hohe Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sowie des Einflusses zyklischer Dauerbelastung auf die Verbundwirkung der PVB-Folie in biegebeanspruchten Scheiben aus Verbundsicherheitsglas. Dazu wurden Biegeversuche an neuen und künstlich bewitterten VSG-Balken mit einer Stützweite von 1,0 m durchgeführt und die Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen aus Untersuchungen anderer Autoren verglichen, welche an kleinformatigen Scherproben durchgeführt wurden.

Ein zweites wesentliches Ziel ist die Erstellung einer mathematischen Funktion des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls von PVB-Folien für den gesamten baupraktischen Einsatzbereich. Diese Formel wird im experimentellen Bereich des Versuchsprogramms (Folientemperaturen zwischen 0 und 55 °C und Belastungsdauern zwischen 3 Sekunden und 4 Wochen) durch Ergebnisse aus umfangreichen Kriechversuchen an Balken aus VSG abgesichert. Zudem werden die Ergebnisse mit Schubmodulwerten verglichen, welche von anderen Autoren mit teils sehr unterschiedlichen Versuchsarten ermittelt wurden.

Bei allen Versuchen wurden PVB-Folien drei verschiedener Hersteller untersucht, um mögliche Unterschiede in der Steifigkeit und der Alterungsbeständigkeit zwischen unterschiedlichen PVB-Folien aufzeigen zu können. Bei allen untersuchten PVB-Folien handelt es sich um "Standard-Folien" von drei der vier Firmen, die weltweit PVB-Folien für die Anwendung im Bauwesen herstellen.

Weitere Zielsetzungen dieser Arbeit sind:

- Vergleich der künstlichen UV-Bestrahlung zur Prüfung der Beständigkeit des Verbundes von VSG-Scheiben nach [DIN EN ISO 12543-4] mit der realen UV-Strahlungsbelastung in Deutschland
- Untersuchung der Auswirkung künstlicher Bewitterung auf die Zugeigenschaften von PVB-Folien
- Vergleich der drei baupraktischen Versuchsarten (Biegeversuche, Scherversuche, Torsionsversuche) zur Bestimmung des Schubmoduls in Verbundglasscheiben

Die Untersuchungen zur Verbundwirkung beschränken sich in dieser Arbeit auf zweischichtiges Verbundsicherheitsglas mit symmetrischem Scheibenaufbau, welches aus zwei Glasscheiben gleicher Dicke und einer zwischenliegenden PVB-Folie besteht. Bei mehrschichtigen VSG-Scheiben ändert sich zwar die Spannungsverteilung in den Glasscheiben, die Ergebnisse zur Alterungsbeständigkeit und zur zeit- und temperaturabhängigen Höhe des Schubmoduls gelten jedoch auch für diese Verbundgläser.

Sämtliche Parameterstudien in dieser Arbeit zum Einfluss des Schubmoduls auf die Beanspruchungen in VSG-Scheiben beruhen auf der linearen Theorie 1. Ordnung für kleine Verformungen. Bei großen Verformungen von vierseitig gelagerten VSG-Platten werden

Membranspannungen in den Mittelebenen der Glasscheiben aktiviert. Dadurch wird die Verbundwirkung der Zwischenfolie verringert und die genaue Höhe ihrer Schubsteifigkeit ist für die Bemessung dieser Platten nur noch von nachrangiger Bedeutung.

1.3 Gliederung der Arbeit

Zur Einführung in die Thematik und zum Verständnis der nachfolgenden Ausführungen, werden in Kapitel 2 die wesentlichen Materialeigenschaften von Polymeren im Allgemeinen und PVB-Folien und Verbundsicherheitsglas im Speziellen erläutert. Schwerpunkt bildet dabei das linear-viskoelastische Verhalten von amorphen Thermoplasten, zu denen auch der Kunststoff PVB gehört.

In Kapitel 3 wird das Verbundtragverhalten von Balken und Platten aus VSG erläutert und der Einfluss des Schubmoduls der Zwischenfolie auf die Biegesteifigkeit und die Torsionssteifigkeit der VSG-Elemente aufgezeigt. Dabei wird auf die Besonderheiten bei der Ermittlung des Schubmoduls aus Biegeversuchen an VSG-Balken im Vergleich zu anderen Versuchsarten eingegangen.

Kapitel 4 behandelt die Alterung von Kunststoffen und PVB-Folien mit und ohne den Schutz durch die Einbettung in Verbundglas. Zuerst werden die wichtigsten Umwelteinflüsse die zur Alterung von Kunststoffen führen dargelegt und deren chemischen und physikalischen Auswirkungen auf die Materialeigenschaften von Polymeren beschrieben. Dabei werden die wichtigsten Erkenntnisse der bisherigen Forschung zur Alterung von PVB wiedergegeben und der Schutz von PVB-Folien in Verbundgläsern vor äußeren Umwelteinflüssen erläutert. Abschließend werden die Methoden der künstlichen Bewitterung zur beschleunigten Alterung von Kunststoffen beschrieben und ihre Unterschiede zur natürlichen Bewitterung aufgezeigt. Schwerpunktmäßig wird in Kapitel 4 der Einfluss von solarer UV-Strahlung untersucht und in diesem Zusammenhang die natürliche Strahlungsdosis in Deutschland mit der Strahlungsdosis von künstlichen Bestrahlungsquellen nach [DIN EN ISO 12543-4] verglichen.

Die Biegeversuche an Balken aus Verbundglas mit PVB-Folien unterschiedlicher Hersteller zur Ermittlung des Einflusses künstlicher Bewitterung auf die Verbundwirkung der PVB-Folie sind Gegenstand von Kapitel 5. Es werden die Ergebnisse zum Einfluss von UV-Strahlung, hoher Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit auf die Steifigkeit der PVB-Folie bzw. die Biegesteifigkeit der Probekörper diskutiert und mit den Versuchsergebnissen anderer Autoren verglichen.

Die Untersuchungen zum Materialverhalten der PVB-Folie bei dynamischer bzw. zyklischer Dauerbelastung werden in Kapitel 6 beschrieben. Anhand der Versuchsparameter (Höhe der Schubspannungsamplitude und Lastwechselzahl) wird dargelegt, dass bei Windeinwirkung während einer 50-jährigen Nutzungsdauer keine Abnahme der Schubsteifigkeit der Folie und keine nennenswerte Delamination der Folie von den Glasscheiben zu erwarten ist.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse aus Zugversuchen an gealterten und ungealterten PVB-Folien verschiedener Hersteller dargestellt. Mit diesen Versuchen wurde die Bruchdehnung und die Zugfestigkeit von gealterten Folienproben im Vergleich zu ungealterten Referenz-

proben bestimmt, sowie der Zusammenhang zwischen E-Modul und Schubmodul der PVB-Folie untersucht.

Mit Biegeversuchen an VSG-Balken wurde der Schubmodul der drei untersuchten PVB-Folien ermittelt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in Kapitel 8 präsentiert. Aus dem Schubmodul der Folie mit der geringsten Steifigkeit wird auf Grundlage des in Kapitel 2 erläuterten Prinzips der Zeit-Temperatur-Verschiebung linear-viskoelastischer Polymere eine Formel für den zeit- und temperaturabhängigen Schubmodul ermittelt. Diese Funktion kann zur Bestimmung eines Bemessungswertes des Schubmoduls für alle im baupraktischen Bereich vorkommenden Belastungsszenarien verwendet werden.

Auf Grundlage der in Kapitel 8 ermittelten Formel des Schubmoduls wird in Kapitel 9 der von [Wellershoff 2007] bzw. im Entwurf der Glasbaunorm [E DIN 18008-1] vorgeschlagene Bemessungswert für den Schubmodul bei Wind- und Schneebelastung in Deutschland überprüft.

Zum Schluss werden in Kapitel 10 die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Forschungen gegeben.

2 Materialeigenschaften von Verbundsicherheitsglas

2.1 Zwischenlage aus Polyvinylbutyral (PVB)

2.1.1 Allgemeines

Polyvinylbutyral (PVB) wird fast ausschließlich zur Herstellung von Folien für Verbundsicherheitsglas produziert. Daneben findet PVB in geringem Umfang auch Verwendung in Anstrichen oder Beschichtungen für Metalle, Holz und Textilien, als Bestandteil von Klebstoffen, als Bindemittel für Keramikbauteile und in Tonern und Farben für die Druckindustrie. Nur vier Firmen produzieren PVB-Folien für den Einsatz im Automobilbau und im Bauwesen. Neben den schon seit 1938 eingesetzten Folien zur Erhöhung der Resttragfähigkeit und zur Splitterbindung bei Glasbruch, wurden in jüngerer Zeit auch neue, modifizierte Folienprodukte auf der Basis von PVB auf den Markt gebracht, um weitergehende Anforderungen zu erfüllen. Diese speziellen Folien dienen zur Erhöhung des Schalldämmung, zur Einbettung von Photovoltaikzellen, zum Schutz vor solarer Infrarotstrahlung oder zum besonderen Schutz gegen Hurrikane. Zudem werden aus gestalterischen Gründen neben den farblosen Standard-Folien vermehrt auch gefärbte oder bedruckte Folien oder Folien mit Gewebeeinlagen eingesetzt.

Eine Übersicht über die vier Hersteller und ihre wichtigsten Folienprodukte aus PVB für den Einsatz im Bauwesen gibt Tabelle 2-1 [Dupont 2006], [Saflex 2006], [S-Lec 2006], [Trosifol 2006]. Zwischenlagen auf Basis von PVB werden mit einer maximalen Breite von 3,21 m und Dicken zwischen 0,38 und 2,28 mm (Vielfache von 0,38 mm) hergestellt. PVB-Folien mit einer Dicke von mehr als 1,52 mm stellen im Bauwesen jedoch die Ausnahme dar [Behr 1993]. Angaben zur Herstellung der Folien und zu den besonderen Anforderungen an die Lagerung und Laminierung bei der Herstellung von Verbundsicherheitsglas können z. B. aus [Schuler 2003] oder [Trosifol 2006] entnommen werden.

Für die Versuche in dieser Arbeit wurden drei farblose Standardfolien der Hersteller *Solutia, Kuraray Specialties Europe* und *Dupont* untersucht (Produktionscharge vor 2004). Diese sind mit den Buchstaben "A" (*Solutia Saflex* ®), "B" (*Trosifol MB* ®) und "C" (*Dupont Butacite* ®) bezeichnet, vgl. Tabelle 2-1. Die Folien zur Bestimmung des Schubmoduls aus Biegeversuchen besaßen alle eine Dicke von 1,52 mm.

Auch wenn es sich bei allen Produkten in Tabelle 2-1 um Folien auf der Basis von PVB handelt, können sie Abweichungen in der chemischen und physikalischen Struktur aufweisen. Dies kann zu Unterschieden im zeit- und temperaturabhängigen Steifigkeitsverhalten, in der Zugfestigkeit und Bruchdehnung, in der Alterungsbeständigkeit und in der Dauerhaftigkeit des Verbundes und der Adhäsion zwischen Folie und Glas führen. Aus den Untersuchungen in dieser Arbeit an den drei Standardfolien "A", "B" und "C" können deshalb - ohne Kenntnis der chemischen Zusammensetzung bzw. ohne Ergebnisse aus vergleichenden Versuchen - keine, oder nur eingeschränkt Rückschlüsse auf das Materialverhalten anderer PVB-Folien gezogen werden.

Neben den üblichen Zwischenlagen aus PVB gibt es auch weitere Materialien für polymere Zwischenlagen in Verbundgläsern, wie z. B. "SentryGlas® Plus" von Dupont (steife Folie für Hurrikan-Verglasungen), EVA-Folien (Folien zur Einbettung von Solarzellen und anderer Materialien) und ein- bzw. mehrkomponentige Gießharze (Schallschutz). Diese Zwischenlagen weichen in ihren Materialeigenschaften stark von PVB ab und werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Zu diesen Folien liegen nur wenige Informationen vor, welche z. B. aus [Bucak 2006], [Meißner 2005], [Siebert 1999]) entnommen werden können.

Tabelle 2-1: Übersicht über die Hersteller von PVB-Folien und einige ihrer Folienprodukte für den Einsatz im Bauwesen (Stand 2006)

Firma	Produkt	Einsatzgebiet
Dupont	Butacite ®	Standardfolie = Folie "**C**"
	SentryGlas ® Expressions ™	Bedruckte Folie
	SentryGlas ® Acoustic ™	Schallschutzfolie
Kuraray Specialties Europe	Trosifol ® BG R10/15	Standardfolie = Folie "**B**"
	Trosifol ® BG R20 (ehem. Trosifol ® MB)	Standardfolie, mit stärkerer Haftung (z. B. für ESG)
	Trosifol ® SC	Schallschutzfolie, Verbesserung der Schalldämmung
	Trosifol ® XT 90	besondere Schutzwirkung in Hurrikan-Verglasungen
	Trosifol ® Solar	Einbettung von Solarzellen in VSG
Solutia	Saflex ®	Standardfolie = Folie "**A**" (auch als Schallschutzfolie und als Folie mit besondere Schutzwirkung in Hurrikan-Verglasungen erhältlich)
	Vanceva ® Color Interlayer	Farbige Folie
Sekisui	S-LEC ® Film	Standardfolie
	S-LEC ® SAF	Schallschutzfolie (PVB mit weicher Kernschicht)
	S-LEC ® SCF	Sonnenschutzfolie (Schutz vor Infrarotstrahlung)

Für den Einsatz in Verbundsicherheitsglas werden für PVB-Folien bauaufsichtlich folgende Materialkennwerte gefordert [Bauregelliste DIBt 2006], welche gemäß [DIN EN ISO 527-3] bei einer Temperatur von 23 °C und einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/Minute zu messen sind:

- Zugfestigkeit: > 20 N/mm²
- Bruchdehnung: > 250 %

Diese Werte werden von den Standardfolien der Hersteller in Tabelle 2-1 erfüllt. Anforderungen an die temperatur- und zeitabhängige Steifigkeit der PVB-Folie und die dauerhafte Verbundwirkung zwischen Folie und Glas werden von der Bauaufsicht bisher nicht gestellt.

2.1.2 Chemische Zusammensetzung von PVB-Folien

Das PVB-Harz wird durch Verseifung (basische Hydrolyse) von Polyvinylacetat zu Polyvinylalkohol und der anschließenden Kondensation (Abscheidung von Wasser) mit Butyraldehyd in Gegenwart eines sauren Katalysators hergestellt [Sundararajan 1999], [Butvar 2006], [Hay 2002]. Da beide Prozesse unvollständig ablaufen, ergibt sich die in Bild 2-1 schematisch dargestellte Struktur des Polymers. Auch wenn es sich demnach bei PVB um ein "Terpolymer" aus drei verschiedenen Polymeren handelt, wird im Folgenden nur der Begriff Polymer verwendet.

Die chemische Reaktion zur Herstellung von PVB wird so gesteuert, dass ein Gewichtsanteil von ungefähr 17 bis 20 % Polyvinlyalkohol ohne Reaktion mit Butyraldehyd im Polymer verbleibt. Dieser Anteil ist aufgrund seiner polaren Hydroxyl-Gruppe (O-H) maßgeblich für die gute Haftung des Harzes an Glas, aber auch an anderen Oberflächen, verantwortlich. Zudem haben die OH-Gruppen einen Einfluss auf die zwischenmolekularen Kräfte durch Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen benachbarten Molekülen. Der Gewichtsanteil des nicht verseiften Polyvinylacetats liegt bei ca. 2 bis 3 %. Je nach PVB-Hersteller und Folientyp kann die prozentuale Verteilung der chemischen Bestandteile variieren und zu unterschiedlichen Haftungs- und Steifigkeitseigenschaften der Folien führen.

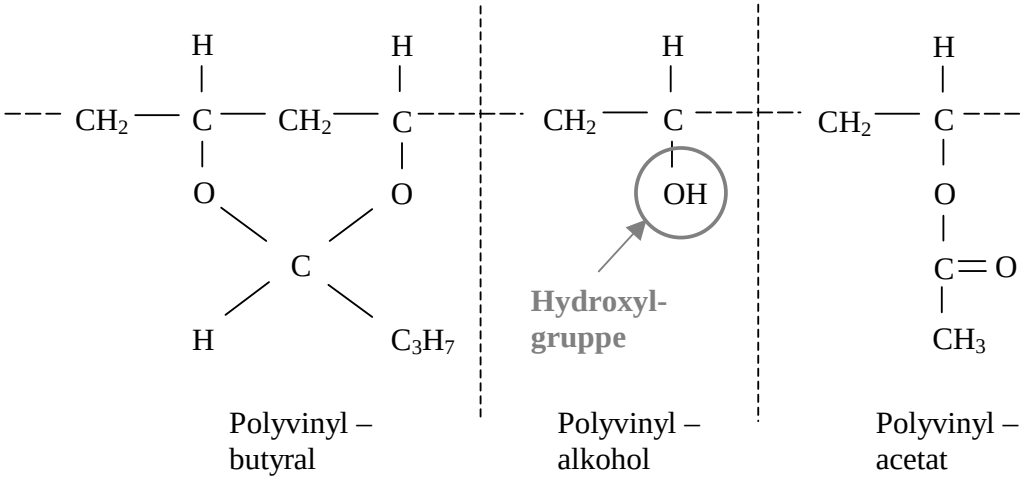


Bild 2-1: Chemische Zusammensetzung von PVB (schematisch), nach [Sundararajan 1999]

Für die Herstellung von Verbundfolien werden dem PVB-Harz Weichmacher, Stabilisatoren und andere Additive beigefügt. Die Weichmacher aus niedermolekularen Stoffen führen zu einer Erweichung und guten Formbarkeit des PVB-Harzes und somit zu einer Vereinfachung der Folienherstellung und der Handhabung bei Transport und Laminierung. Stabilisatoren und sonstige Additive dienen zum Schutz vor Alterung bzw. Oxidation durch Herstellung und Bewitterung. Auch diese Bestandteile des Folienmaterials können zwischen den Herstellern schwanken und zu unterschiedlichen Steifigkeits- und Alterungseffekten führen.

Auch der Anteil der gelösten Feuchtigkeit ist von großer Bedeutung für die Materialeigenschaften (z. B. Haftvermögen) der PVB-Folie. Der optimale Feuchtigkeitsgehalt für die PVB-Folie in Verbundsicherheitsglas liegt bei 0,4 bis 0,5 % [Trosifol 2006], Eine Erhöhung des Feuchtegehalts während der Lagerung der Folie, bei der Herstellung des Verbundsicherheitsglases oder aufgrund natürlicher Bewitterung führt zu einer Beeinträchtigung der Adhäsion zwischen Folie und Glas (siehe Kapitel 2.2.4).

2.1.3 Temperaturabhängige Steifigkeit von amorphen Thermoplasten

Polyvinylbutyral (PVB) gehört zur Klasse der amorphen Thermoplasten. In diesen Kunststoffen liegen die Makromoleküle in einem ungeordneten Zustand vor und sind teilweise verzweigt und miteinander verhakt, aber nicht vernetzt. Da die zwischenmolekularen Kräfte im Vergleich zu den kovalenten chemischen Bindungen innerhalb der Molekülkette sehr schwach sind, können sich die Makromoleküle bei Energiezufuhr durch Erwärmung oder Verformung des Kunststoffes gegenseitig verschieben. Aufgrund ihres molekularen Aufbaus zeichnen sich amorphe Thermoplaste durch ihr ausgeprägtes temperaturabhängiges und viskoelastisches Materialverhalten und ihre nahezu beliebige Formbarkeit bei Erweichung aus. Liegen die Molekülketten eines Thermoplasts bereichsweise in einem geordneten Zustand vor, so spricht man von teilkristallinen Thermoplasten. Diese Kunststoffe weisen eine hohe Elastizität und eine höhere Festigkeit als amorphe Thermoplaste auf.

Ein charakteristisches Maß für das Materialverhalten von Kunststoffen ist der Schubmodul G, (bzw. der dynamische Speichermodul G' nach Kapitel 2.1.6), dessen Temperaturabhängigkeit für die von [Duser 1999] untersuchte PVB-Folie des Typs *Butacite* in Bild 2-2 dargestellt ist. Der Temperaturbereich in dem der Schubmodul stark abnimmt und der Thermoplast erweicht, wird als Erweichungsbereich oder auch als Glasübergangsbereich bezeichnet. Die Temperatur des Erweichungsbereichs hängt im Wesentlichen von der Struktur der Makromoleküle und der Stärke der zwischenmolekularen Kräfte ab. Daneben hängt sie aber auch in geringerem Maße von der Versuchsgeschwindigkeit ab. Durch die Zugabe von Weichmacher liegt der Erweichungsbereich von PVB bei relativ niedrigen Temperaturen von ca. 10 bis 30 °C.

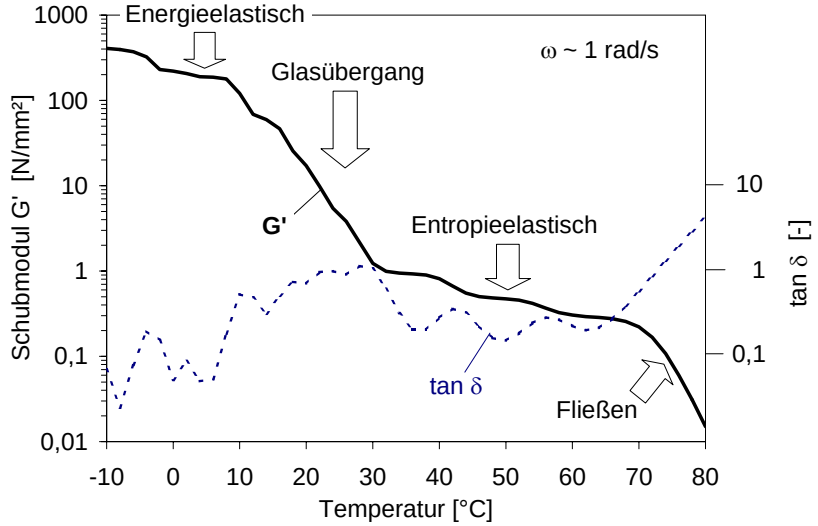


Bild 2-2: Temperaturabhängigkeit des Schubmoduls G' von PVB nach [Duser 1999]

Bei tiefen Temperaturen ist die Beweglichkeit der Moleküle stark eingeschränkt und mechanische Beanspruchungen führen vorwiegend zu elastischen Lage- und Formänderungen der Makromoleküle („Energieelastisches Verhalten"). Eine Erhöhung der Temperatur über den Glasübergangsbereich hinaus, führt zu einer Erweichung des Thermoplasts, da die Beweglichkeit der Makromoleküle nun stark zunimmt. Unter mechanischer Beanspruchungen strecken sich die Molekülketten und richten sich in Kraftrichtung aus. Bei Entlastung streben die Moleküle wieder einen Zustand größerer Unordnung (Zunahme der Entropie) an und nehmen ihre ursprüngliche Lage ein ("Entropieelastisches Verhalten"). Ausrichtung der Moleküle und Rückkehr in ihre ursprüngliche ungeordnete Form sind zeitlich verzögerte Prozesse, welche für das viskoelastische Verhalten von Polymeren verantwortlich sind. Bei weiterer Steigerung der Temperatur können die Molekülketten aufgrund der fehlenden Vernetzung aneinander vorbeigleiten und der Kunststoff verhält sich wie eine Flüssigkeit. Entropieelastisches Verhalten und Fließen gehen kontinuierlich ineinander über, da amorphe Thermoplaste im Vergleich zu teilkristallinen Thermoplasten keinen Schmelzpunkt besitzen. Erst bei sehr starker Erhitzung kommt es zu einer Oxidation und Zersetzung des Polymers durch Kettenspaltung. Die Zersetzung von reinem PVB beginnt ab einer Temperatur von ca. 260 °C [Hay 2002].

2.1.4 Glasübergangstemperatur von PVB

Die Beweglichkeit der Makromoleküle und die temperaturabhängige Steifigkeit eines amorphen Thermoplasts kann mit der Modellvorstellung des freien Volumens beschrieben werden. Nach diesem Modell setzt sich das Gesamtvolumen eines Polymers aus dem von den Makromolekülen eingenommenen Volumen V_M, dass im Wesentlichen durch die Atomradien und das Schwingungsvolumen bestimmt wird, und einem freien Volumen V_F zwischen diesen Molekülen zusammen. Eine Abkühlung einer Polymerschmelze führt zu einer linearen Abnahme des Gesamtvolumens, deren Steigung durch den Wärmeausdehnungskoeffizient α charakterisiert wird. Die Temperatur bei welcher der Wärmeausdehnungskoeffizient einen Sprung macht, wird als Glasübergangstemperatur T_G bezeichnet [Ferry 1970]. Teilkristalline Thermoplasten weisen zudem bei der Schmelztemperatur $T_M > T_G$ noch eine sprungartige

Volumenänderung auf, siehe Bild 2-3. Oberhalb von T_G führt eine Abkühlung der Polymerschmelze aufgrund der Beweglichkeit der Makromoleküle zu einer schnellen Abnahme des freien Volumens. Unterhalb von T_G ist die Beweglichkeit der Makromoleküle jedoch derart eingeschränkt, dass der Thermoplast seinen Glaszustand erreicht und das verbleibende freie Volumen "eingefroren" wird.

Die Glasübergangstemperatur T_G von reinem PVB-Harz liegt zwischen 72 und 78 °C [Butvar 2006]. Durch die Zugabe von Weichmachern sinkt diese Temperatur auf 12 bis 17 °C [Hay 2002] bzw. 15 bis 20 °C [Lee 2001] ab. Je nach Folientyp und Messverfahren (Abkühlgeschwindigkeit) kann dieser Wert schwanken.

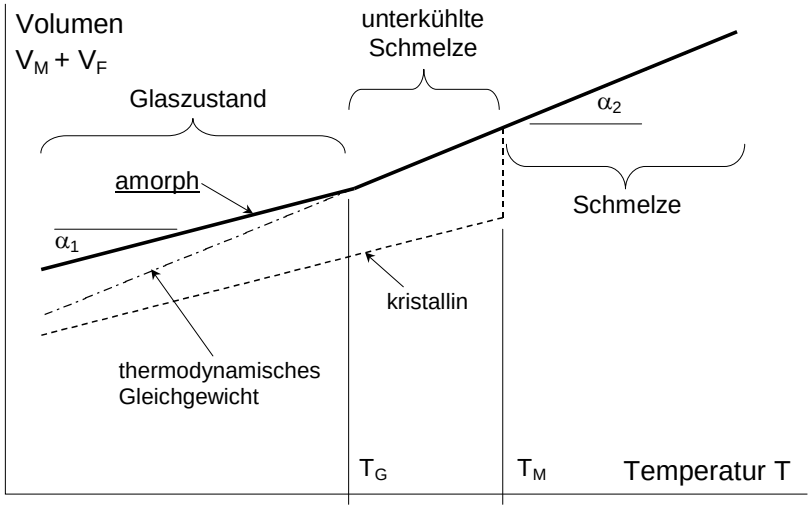


Bild 2-3: Temperaturabhängigkeit des Volumens von amorphen Thermoplasten

Polymerschmelzen welche schnell auf Temperaturen unterhalb von T_G abgekühlt wurden, sind bestrebt durch Verringerung des eingefrorenen freien Volumens V_F wieder einen thermodynamischen Gleichgewichtszustand zu erlangen. Dieser langsame Prozess führt zu einer zunehmenden Versteifung der Polymere und wird als physikalische Alterung bezeichnet [Struik 1977] (vgl. Kapitel 2.1.10).

2.1.5 Linear-viskoelastisches Materialverhalten von PVB

Wird ein amorpher Thermoplast schnell verformt, so werden die entstehenden Spannungen durch Bewegung und Ausrichtung der Molekülketten abgebaut. Dies wird als Spannungsrelaxation bezeichnet. Die Nachgiebigkeit und Dehnung des Kunststoffes unter Krafteinwirkung wird hingegen als Kriechen bzw. Retardation bezeichnet. Diese Vorgänge sind zeitabhängige Funktionen und laufen in der Regel reversibel ab. Bei hoher Temperatur bzw. langer Belastungszeit können jedoch schon geringe Krafteinwirkungen zum Fließen und somit zur irreversiblen Verformung des Kunststoffes führen. In der von [Duser 1999] untersuchten PVB-Folie des Typs *Butacite* traten bis zu einer Temperatur von 70 °C keine irreversible Fließvorgänge auf.

Amorphe Thermoplasten besitzen sowohl die elastische Eigenschaften eines Festkörpers als auch die viskose Eigenschaften einer Flüssigkeit. Man nennt sie daher viskoelastisch. Bleiben die Dehnungen und Spannungen so klein, dass die Spannungs-Dehnungsbeziehung unab-

hängig von der Höhe der Belastung ist, spricht man von linear-viskoelastisch. In diesem Fall werden bei gleichartigen Beanspruchungsverläufen unabhängig von der Belastungsrate zu einer beliebigen Zeit t jeweils konstante Verhältnisse zwischen Dehnung und Spannung und somit gleiche Materialsteifigkeiten (Schubmodul) beobachtet.

Bei linear-viskoelastischem Verhalten gilt für das elastische Verhalten das Hook'sche Gesetz, welches durch eine lineare Feder mit der Federsteifigkeit G_i modelliert werden kann. Die viskose Eigenschaft entspricht bei sehr kleinen Dehnungsraten dem Newton'schen Gesetz, wonach die Schubspannungen in einer Flüssigkeit proportional zur Scherrate sind. Diesem Gesetz entspricht das Modell eines ölgefüllten Dämpfers mit der Viskosität η_i. Bei reiner Schubverformung bestehen bei linear-viskoelastischem Materialverhalten des Polymers folgende Beziehungen zwischen Schubspannung τ und Scherwinkel γ:

Relaxation:
$$\tau(t) = \int_{-\infty}^{t} G(t-t') \frac{d\gamma(t')}{dt'}\, dt' \tag{2.1}$$

G(t-t'): Relaxationsmodul

Kriechen:
$$\gamma(t) = \int_{-\infty}^{t} J(t-t') \frac{d\tau(t')}{dt'}\, dt' \tag{2.2}$$

J(t-t'): Kriechnachgiebigkeit

Gleichungen (2.1) und (2.2) sind integrale Darstellungen des **Boltzmann'schen Superpositionsprinzip,** welches besagt, dass die Dehnungs- bzw. Spannungsantworten verschiedener Einwirkungen unabhängig von der Belastungsgeschichte addiert werden können. Somit lässt sich z. B. der Scherwinkel γ zum Zeitpunkt t für eine beliebige Belastungsgeschichte $\tau(t)$ durch Addition bzw. Integration infinitesimaler Kriechvorgänge ab dem Zeitpunkt t' berechnen (siehe Bild 2-4).

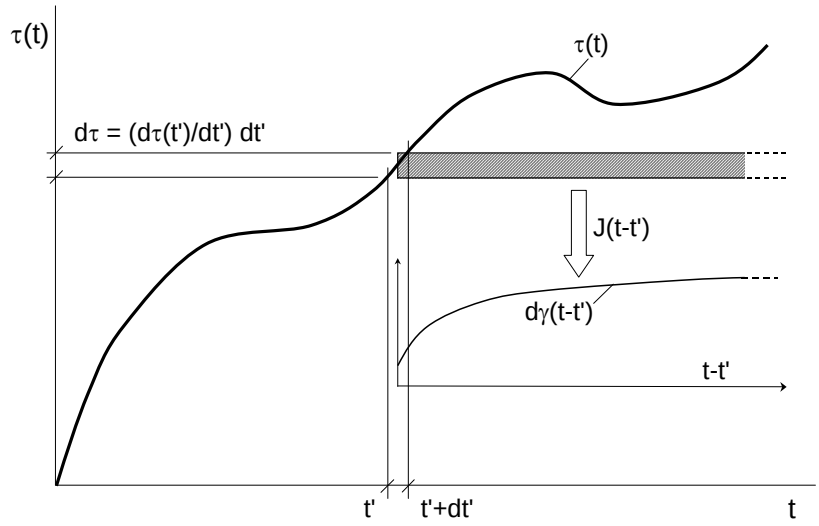


Bild 2-4: Integration infinitesimaler Kriechvorgänge bei zeitlich veränderlicher Schubbeanspruchung $\tau(t)$

Aus dem Boltzmann'schen Superpositionsprinzip folgt für linear-viskoelastische Materialien das sogenannte **Korrespondenzprinzip**. Es besagt, dass die Formeln der Elastizitätstheorie prinzipiell auch für die zeitabhängigen Werte der Dehnungen, Spannungen und der Moduln gelten. So stehen beispielsweise die zeitabhängigen Werte des Schubmoduls G(t) und des Elastizitätsmoduls E(t) bei weichen Polymeren oberhalb der Glasübergangstemperatur (nahezu inkompressibel, Querdehnzahl $\mu \approx 0{,}5$) in folgender bekannter Beziehung der Elastizitätstheorie:

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\mu)} \cong \frac{E(t)}{3} \tag{2.3}$$

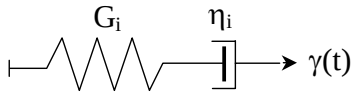
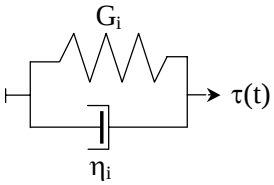
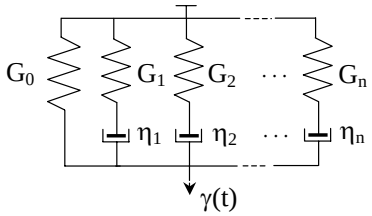
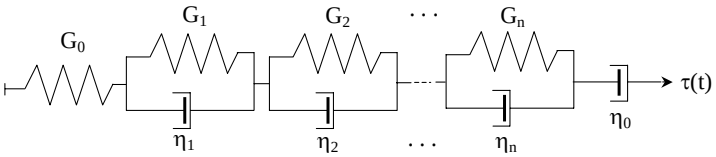
Der Relaxationsmodul oder die Kriechnachgiebigkeit in Gleichung (2.1) bzw. Gleichung (2.2) kann durch eine geeignete Kombinationen von linearen Federn und Dämpfern modelliert werden [Ferry 1970], [Flügge 1975], [Bohmann 1999]. Obwohl diese Modelle für die praktische Anwendung bei der Bemessung von Verbundglasscheiben relativ unhandlich sind und die experimentelle Bestimmung der Parameter aufwendig ist, eignen sie sich zur qualitativen Darstellung von linear-viskoelastischen Relaxations- und Kriechvorgängen.

In Tabelle 2-2 sind zwei mechanische Modelle für die Relaxation bzw. das Kriechen linear-viskoelastischer Materialien zusammengestellt. Das Grundelement zur Modellierung von Relaxationsvorgängen wird als Maxwell-Element bezeichnet. Für Kriechvorgänge wird das sogenannte Kelvin-Voigt-Element verwendet. Um die Relaxation bzw. das Kriechen über einen längeren Zeitraum zu berechnen, müssen diese Grundelemente durch Parallelschaltung bzw. Reihenschaltung zu größeren Modellen zusammengesetzt werden. Die Anzahl der erforderlichen Grundelemente hängt von der Genauigkeit der Berechnung ab. Zur Realisierung von irreversiblen Fließvorgängen bzw. elastischem Materialverhalten können den Modellen noch weitere Federn bzw. Dämpfer hinzugefügt werden.

Der zeitliche Verlauf der Steifigkeitsänderung wird durch die Relaxations- bzw. Kriechzeiten $\lambda_i = \eta_i/G_i$ bestimmt. Je größer diese Konstanten sind, um so langsamer nimmt die Steifigkeit des Werkstoffes ab. Ideal elastische Werkstoffe haben demnach unendlich lange Relaxations- bzw. Kriechzeiten.

Obwohl aus Gründen der Vereinfachung die Federsteifigkeit und die Viskosität der Elemente in den Modellen für Relaxation und Kriechen in Tabelle 2-2 mit den selben Variablen G_i und η_i bezeichnet wurden, haben diese Konstanten nicht den gleichen Wert.

Tabelle 2-2: Mechanische Modelle zur Beschreibung linear-viskoelastischer Materialien

Relaxation: Maxwell-Modell	**Kriechen:** Kelvin-Voigt-Modell
Grundelement i: 	Grundelement i: 
Konstante Schubverformung γ_0	**Konstante Schubspannung** τ_0
DGL: $\frac{1}{G_i}\frac{d\tau}{dt}+\frac{\tau}{\eta_i}=0$	DGL: $G_i\gamma+\eta_i\frac{d\gamma}{dt}=\tau_0$
Lösung der DGL: $\tau(t)=\gamma G_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}}$ mit $\lambda_i=\frac{\eta_i}{G_i}$	Lösung der DGL: $\gamma(t)=\frac{\tau_0}{G_i}\left(1-e^{-\frac{t}{\lambda_i}}\right)$ mit $\lambda_i=\frac{\eta_i}{G_i}$
Relaxationsmodul: $G_i(t)=G_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}}$	Nachgiebigkeit: $J_i(t)=\frac{1}{G_i}\left(1-e^{-\frac{t}{\lambda_i}}\right)$
Allgemeines Relaxationsmodell:  Für eine konstante Schubverformung γ_0 gilt: $G(t)=G_0+\sum_{i=1}^{n}G_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}}$	**Allgemeines Kriechmodell:**  Für eine konstante Schubspannung τ_0 gilt: mit Fließen: $J(t)=\frac{1}{G_0}+\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{G_i}\left(1-e^{-\frac{t}{\lambda_i}}\right)+\frac{t}{\eta_0}$ ohne Fließen: $J(t)=\frac{1}{G_0}+\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{G_i}\left(1-e^{-\frac{t}{\lambda_i}}\right)$

Zwischen dem Relaxationsmodul G(t) und der Kriechnachgiebigkeit J(t) besteht folgende Beziehung [Ferry 1970]:

$$G(t)\le\frac{1}{J(t)} \tag{2.4}$$

Bei langsamen Änderungen der Kriechnachgiebigkeit kann angenommen werden, dass der Relaxationsmodul und der Kriechmodul (Kehrwert der Kriechnachgiebigkeit) ungefähr gleich groß sind [Menges 2002]. Der Kriechmodul kann somit theoretisch auch aus Relaxations-

versuchen bestimmt werden. Mit dem gebräuchlichen Begriff „Schubmodul“ wird in dieser Arbeit deshalb vereinfachend sowohl der Relaxationsmodul als auch der Kriechmodul bezeichnet. Kriech- und Relaxationsversuche des Autors an Biegebalken aus VSG mit Belastungsdauern bis 300 Sekunden zeigten jedoch, dass die Gleichsetzung von Relaxationsmodul und Kriechmodul bei PVB-Folien je nach Versuchstemperatur mit einem Fehler von +/- 20 % behaftet sein kann. Bei längeren Belastungsdauern kann dieser Unterschied möglicherweise auch größer werden.

2.1.6 Linear-viskoelastisches Materialverhalten bei periodischer Beanspruchung

Bei einer periodischen Beanspruchung in Form einer harmonisch schwingenden Schubverformung $\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t)$ mit der Kreisfrequenz ω ist die resultierende Schubspannung auch eine harmonische Schwingung gleicher Frequenz, welche gegenüber der Dehnung jedoch um den Winkel δ phasenverschoben ist.

Nach Gleichung (2.1) ergeben sich für die Schubspannung und die Phasenverschiebung folgende Funktionen (ohne dynamische Überhöhung durch Schwingungsanregung des Bauteils):

$$\begin{aligned}\tau(t) \quad &= \tau_0 \sin(\omega t + \delta) = \tau_0 (\cos\delta \sin\omega t + \sin\delta \cos\omega t) = \\ &= \gamma_0 \left[G' \sin\omega t + G'' \cos\omega t \right] = \gamma_0 \sqrt{G'^2 + G''^2}\, \sin(\omega t + \delta) - \sum_{i=1}^{n} \gamma_0 \frac{\omega \lambda_i G_i}{1 + \omega^2 \lambda_i^2} e^{-\frac{t}{\lambda_i}}\end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} \tag{2.6}$$

G' wird als Speichermodul und G" als Verlustmodul bezeichnet. Bereits nach ein bis zwei Schwingungen konvergiert der letzte, nicht-periodische Term in Gleichung (2.5) gegen Null und kann entfallen (eingeschwungener Zustand). Für das allgemeine Kelvin-Voigt-Modell nach Tabelle 2-2 berechnen sich die dynamischen Moduln G' und G" mit den Gleichungen (2.7) und (2.8).

$$G' = G'(\omega) = G_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega^2 \lambda_i^2 G_i}{\left(1 + \omega^2 \lambda_i^2\right)} \tag{2.7}$$

$$G'' = G''(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega \lambda_i G_i}{\left(1 + \omega^2 \lambda_i^2\right)} \tag{2.8}$$

Während der Speichermodul G' ein Maß für die in einer Schwingungsperiode elastisch gespeicherten Energie im System ist, quantifiziert der Verlustmodul G" die pro Periode in Wärme umgewandelte Energie infolge der Viskosität des Kunststoffes. Je ausgeprägter das viskoelastische Verhalten des Kunststoffes ist, um so größer ist der Verlustmodul und die Phasenverschiebung δ und somit die Hystereseschleife im Spannungs-Dehnungsdiagramm (Bild 2-5). Am ausgeprägtesten ist die Phasenverschiebung bei Temperaturen im Bereich des Glasübergangs. Im ideal elastischen Fall verschwindet die Hysterese und Spannung und

Dehnung verlaufen phasengleich. Fließt der Kunststoff, so sind der Spannung- und Dehnungsverlauf um 90° phasenverschoben.

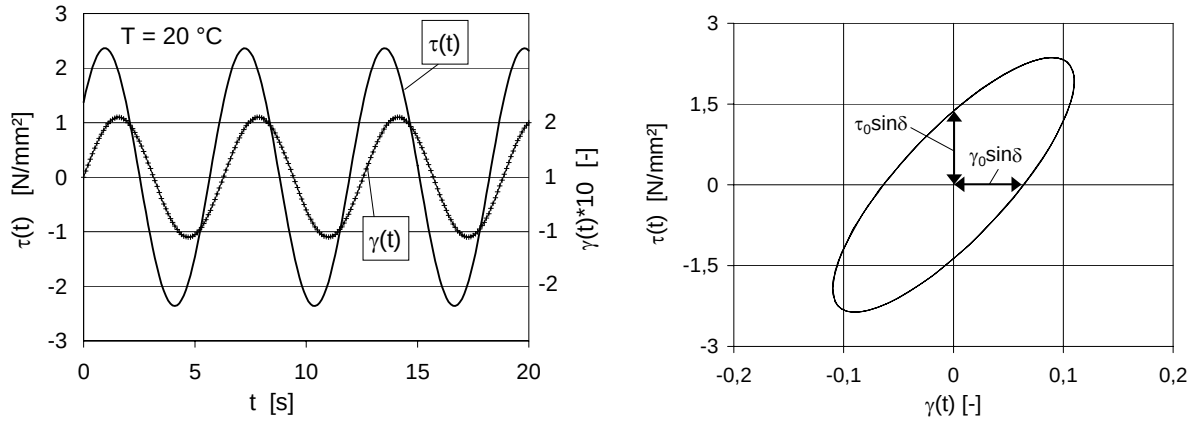


Bild 2-5: Phasenverschiebung zwischen Schubspannung und Scherwinkel bei periodischer Beanspruchung

Aus dem dynamischen Modul G'(ω) bzw. G"(ω) kann mit Gleichung (2.9) die dynamische Kriechnachgiebigkeiten J' bzw. J" berechnet werden.

$$J' = J'(\omega) = \frac{G'}{G'^2 + G''^2} \qquad \text{bzw.} \qquad J'' = J''(\omega) = \frac{G''}{G'^2 + G''^2} \tag{2.9}$$

Nach [Ferry 1970] kann mit Gleichung (2.10) bzw. (2.11) der in Gleichung (2.1) definierte Relaxationsmodul G(t) bzw. die in Gleichung (2.2) definierte Kriechnachgiebigkeit J(t) aus den dynamischen Materialkennwerten G'(ω), G"(ω), J'(ω) und J"(ω) berechnet werden. Dazu ist für die Kreisfrequenz ω der Kehrwert der Zeit t einzusetzen.

$$G(t) = G'(\omega) - 0,4G''(0,4\omega) + 0,014G''(10\omega) \qquad \text{mit } \omega = 1/t \tag{2.10}$$

$$J(t) = J'(\omega) + 0,4J''(0,4\omega) - 0,014J''(10\omega) \qquad \text{mit } \omega = 1/t \tag{2.11}$$

Mit Hilfe dieser Formeln kann für begrenzte Zeitbereiche der Relaxationsmodul bzw. die Kriechnachgiebigkeit aus den Ergebnissen dynamischer Versuche berechnet werden. Dazu wird eine Kunststoffprobe bei unterschiedlichen Temperaturen mit verschiedenen Kreisfrequenzen (i. d. R. zwischen 0,01 Hz und 100 Hz) harmonisch schwingend tordiert und bei jeder Frequenz der Speichermodul G'(ω) und der Verlustmodul G"(ω) ermittelt. Alternativ kann der Relaxationsmodul im linear-viskoelastischen Bereich auch über dynamische Zugversuche abgeschätzt werden, wenn die Querdehnzahl der Kunststofffolie in Gleichung (2.3) näherungsweise bekannt ist ($0,35 < \mu < 0,50$) [Bennison 1999], [Duser 1999], [D'Haene 2001].

2.1.7 Grenzen des linear-viskoelastischen Materialverhaltens von PVB

Die Gültigkeit des linear-viskoelastischen Materialverhalten von amorphen Thermoplasten ist durch folgende dehnungsabhängige Effekte begrenzt:

a) Fließgrenze und Verfestigung:

Bei großen Dehnungen oberhalb der Glasübergangstemperatur tritt eine Versteifung durch zunehmende Orientierung der Molekülketten auf. Bei Scher- oder Zugversuchen zeigt sich dies in einer Änderung des Vorzeichens der Krümmung der Versuchskurve im Spannungs-Dehnungsdiagramm, siehe Bild 2-6 links [Sobek 2000]. Die Dehnung bei der die Verfestigung beginnt hängt von der Versuchsgeschwindigkeit und der Temperatur ab.

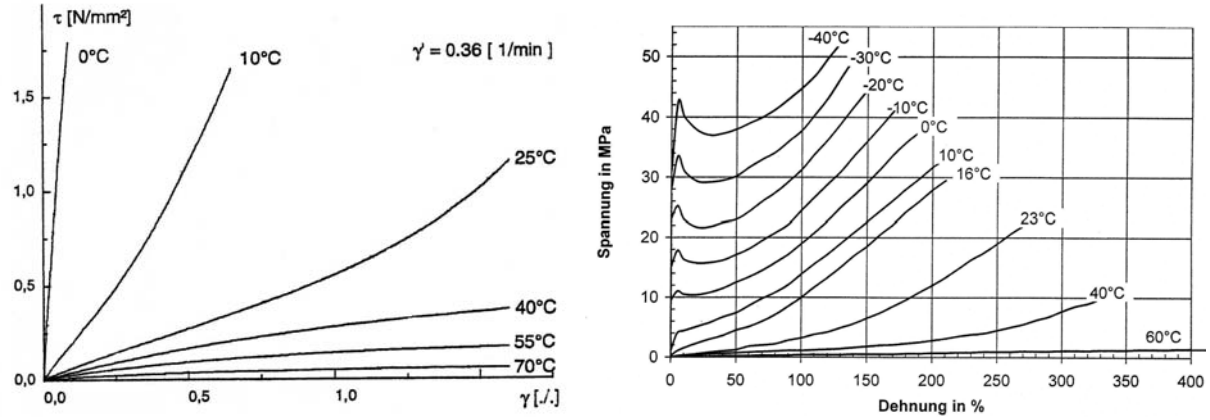


Bild 2-6: Spannungs-Dehnungsdiagramme von PVB, Scherversuche aus [Sobek 2000] (links) und Zugversuche aus [Troplast 1998] (rechts)

Bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur besitzen amorphe Thermoplaste, ähnlich wie teilkristalline Kunststoffe, außerdem eine ausgeprägte Fließgrenze mit nachfolgendem Abfall der Steifigkeit und anschließender Verfestigung, siehe Bild 2-6 rechts [Troplast 1998]. Nach [Young 2001] liegt die Fließgrenze amorpher Kunststoffe im Glaszustand bei einer Dehnung von ungefähr 5 %.

b) Mikrorisse:

Oberhalb einer kritischen Dehnung ε_{krit} treten in Kunststoffen erste Mikrorisse zwischen makroskopischen Gefügepartikeln auf, welche zur Ausbildung von Fließzonen zwischen den Rissen führen. Durch die beginnende Zerstörung des Kontinuums ist kein linear-viskoelastisches Materialverhalten mehr möglich. Für homogene amorphe Thermoplasten beträgt die kritische Dehnung $\varepsilon_{krit} = 0{,}9$ % [Menges 2002]. Ob bereits bei dieser Dehnung auch in PVB-Folien Mikrorisse entstehen, ist nicht bekannt.

Als obere Grenze für die Annahme eines linear-viskoelatischen Materialverhaltens von PVB-Folien wird von verschiedenen Autoren eine Dehnung zwischen $\varepsilon = 0{,}1$ bis 0,5 % [Schuler 2003] und 10 % [Duser 1999] und ein Scherwinkel $\tan\gamma \leq 0{,}5$ [Bohmann 1999] bzw. $\tan\gamma \leq 0{,}9$ ($\gamma \leq 42°$) [Schuler 2003] angegeben. Im konstruktiven Glasbau ($\varepsilon < 0{,}25$ % und $\gamma < 45°$) kann deshalb, von einem linear-viskoelastischen Materialverhalten der PVB-Folie ausgegangen werden.

2.1.8 Zeit-Temperatur-Verschiebung

Eine Änderung der Temperatur gegenüber einer Referenztemperatur T_0 führt, bei gleichbleibendem Druck, näherungsweise zu einer horizontalen Verschiebung der Kurve des Relaxationsmoduls G(t) oder der Kriechnachgiebigkeit J(t) parallel zur Zeitachse (Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung). Bei den dynamischen Materialkennwerten G'(ω), G''(ω), J'(ω) und J''(ω) führt eine Änderung der Temperatur analog zu einer Verschiebung parallel zur Frequenzachse.

Somit kann z. B. aus dem Ergebnis eines bei hoher Temperatur und kurzer Belastungsdauer (bzw. hoher Frequenz) durchgeführten Relaxationsversuchs auf den Relaxationsmodul bei tiefer Temperatur und langer Belastungsdauer (bzw. niedriger Frequenz) geschlossen werden. Jede Kurve des Relaxationsmoduls G(t) bei einer beliebigen Temperatur T kann durch Verschiebung parallel zur Zeitachse in eine Referenz- bzw. Masterkurve bei einer Referenztemperatur T_0 überführt werden. Dazu muss die jeweilige Versuchszeit t mit dem temperaturabhängigen Faktor $a_T(T)$ nach Gleichung (2.12) multipliziert werden [Ferry 1970]. Bei den dynamischen Moduln G'(ω) und G''(ω) muss analog die Versuchsfrequenz ω durch diesen Faktor dividiert werden.

$$\log a_T(T) = \frac{-c_1 (T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)} \tag{2.12}$$

Für eine Vielzahl von Polymeren gibt [Ferry 1970] folgende Werte an: $c_1 = 8{,}86$, $c_2 = 101{,}6$ und $T_0 = T_G + 50$ °C.

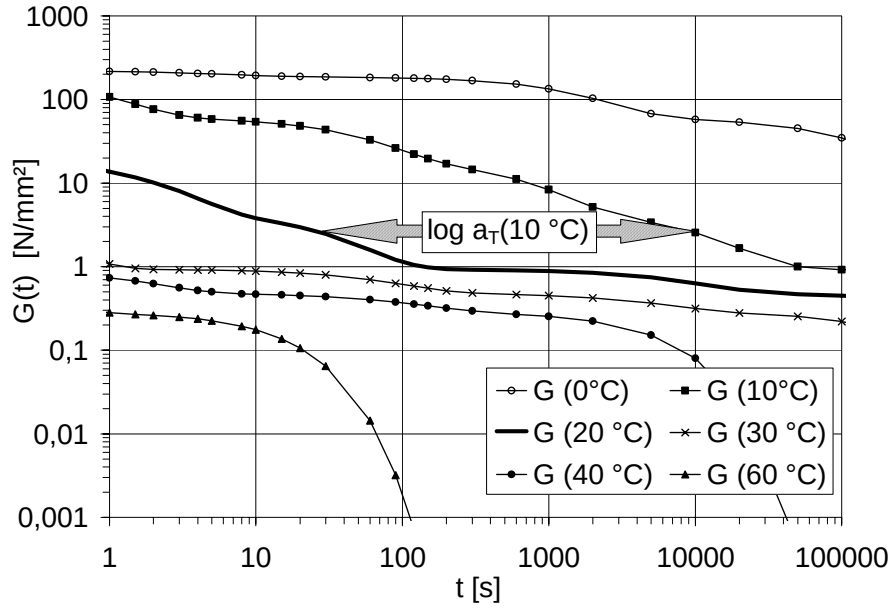


Bild 2-7: Zeit-Temperatur-Verschiebung (Zeitbereich) des Relaxationsmoduls G(t), nach [Duser 1999]

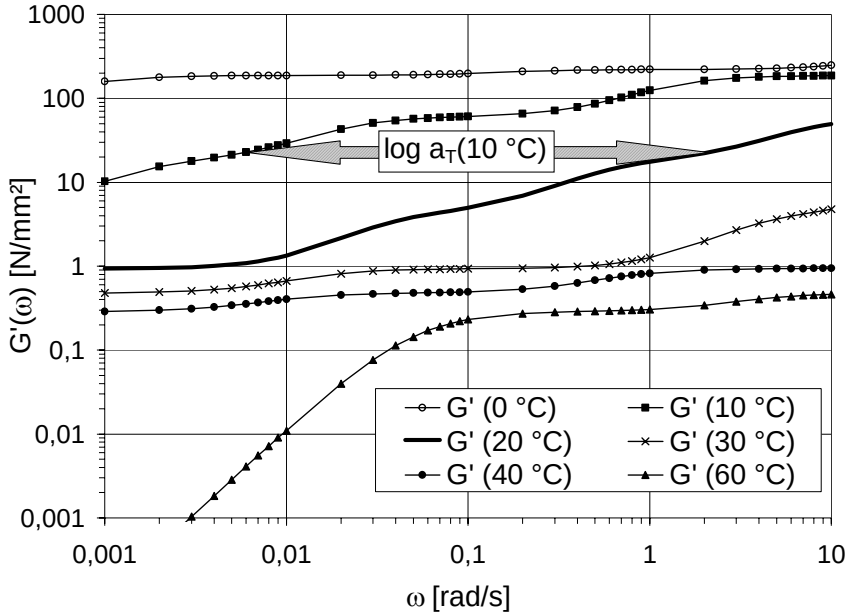


Bild 2-8: Zeit-Temperatur-Verschiebung (Frequenzbereich) des Speichermoduls G'(ω), nach [Duser 1999]

Beispielsweise ist für die von [Duser 1999] untersuchte PVB-Folie ($c_1 = 20{,}1$, $c_2 = 91{,}1$, $T_0 = 20$ °C) in Bild 2-7 und Bild 2-8 der temperaturabhängige Schubmodul G(t) und G'(ω) in Abhängigkeit von der Versuchsdauer t bzw. der Versuchsfrequenz ω dargestellt. Alle Kurven gehen aus einer horizontalen Verschiebung um log $a_T(T)$ aus der Masterkurve bei 20 °C hervor.

2.1.9 Abweichungen vom Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung

Das theoretische Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung nach Kapitel 2.1.8 gilt allgemein nur für sogenannte thermorheologisch einfache Kunststoffe (i. d. R. Kunststoffschmelzen oberhalb T_G), in denen eine Temperaturänderung nicht mit einer Änderung der physikalischen oder chemischen Struktur verbunden ist [Ferry 1970]. Bei teilkristallinen Polymeren, Polymeren im Glaszustand oder Polymeren bei denen eine Temperaturerhöhung zu Änderungen in der chemischen Struktur führt, gilt die horizontale Zeit-Temperatur-Verschiebung mit einem einzigen Faktor $a_T(T)$ nicht mehr im gesamten Temperaturbereich. Außerdem können zur Bildung von Masterkurven auch vertikale Temperatur-Verschiebungen erforderlich sein, welche durch Multiplikation der Parameter G_i in Tabelle 2-2 mit einem einheitlichen Faktor erzeugt werden [Brüller 1975], [O'Connell 1997].

PVB-Folien zeigen bei tiefen Temperaturen unterhalb T_G ein steiferes Materialverhalten, als es sich nach Kapitel 2.1.8 aus der Zeit-Temperatur-Verschiebung von hohen zu niedrigen Temperaturen ergeben würde. In [D'Haene 2001] wird dies mit Wasserstoffbrücken-bindungen zwischen den polaren Hydroxylgruppen benachbarter Makromoleküle erklärt, welche bei Erwärmung aufgebrochen werden. Torsionsversuche an Glasträgern aus Verbund-sicherheitsglas bei Temperaturen zwischen -10 und 40 °C [Kasper 2005] ergaben, dass der Relaxationsmodul von PVB bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur nach der Zeit-Temperatur-Verschiebung in Richtung kürzerer Versuchsdauern höher ist, als die

Referenzkurve des Moduls bei 22 °C. Die Referenzkurve wurde dabei aus Relaxationsversuchen bei Temperaturen zwischen 22 und 40 °C mit Gleichung (2.12) und den Konstanten $c_1 = 14$ und $c_2 = 110$ ermittelt. Eine einheitliche Funktion $a_T(T)$ mit festen Konstanten c_1 und c_2 für alle Temperaturen gibt es für PVB demnach nicht.

2.1.10 Physikalische Alterung

Wie anhand von Bild 2-3 (Kapitel 2.1.4) bereits erläutert wurde, befinden sich Polymerschmelzen, welche auf Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G abgeschreckt wurden, nicht im thermodynamischen Gleichgewicht, da sie einen Überschuss an freiem Volumen aufweisen. Da das Material versucht in den Gleichgewichtszustand überzugehen, verringert sich das eingefrorene freie Volumen und die Beweglichkeit der Makromoleküle nimmt kontinuierlich ab. Dieser langanhaltende Prozess, welcher alle amorphen Werkstoffe bei Temperaturen unterhalb T_G betrifft, wird als "Physikalische Alterung" bezeichnet und führt mit zunehmender Alterung zu einer Versteifung der Polymere [Struik 1977], [Weng 2002]. Diese Form der Alterung kann die gleiche Bedeutung für die Steifigkeitszunahme des Kunststoffes haben, wie eine Verminderung der Temperatur. Je näher die Abschrecktemperatur an der Glasübergangstemperatur liegt, um so geringer ist der Einfluss der Alterung, bis er bei T_G völlig verschwindet. Durch Erhitzung auf Temperaturen oberhalb von T_G wird die physikalische Alterung wieder rückgängig gemacht. Dieser Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden, ohne die mechanischen Eigenschaften des Polymers zu beeinflussen.

Der physikalischen Alterung kann man in den Modellen der Tabelle 2-2 dadurch Rechnung tragen, dass man alle Relaxations- bzw. Kriechzeiten λ_i des Polymers mit einem konstanten Zeitverschiebungsfaktor a_L multipliziert. Dieser hängt bei gleichbleibender Temperatur nur von der Alterungsdauer t_e (verstrichene Zeit zwischen dem Abschrecken des Polymers und dem Beginn der Belastung) ab. Damit ergibt sich für thermorheologisch einfache Polymere beispielsweise eine Zeitverschiebung der Kriechnachgiebigkeit J(t) analog zu dem in Kapitel 2.1.8 erläuterten Prinzips der "Zeit-Temperatur-Verschiebung", siehe Bild 2-9.

Bei sehr kurzen Belastungsdauern $t << t_e$ hat die physikalische Alterung praktisch keinen Einfluss auf die Relaxation oder das Kriechen, und das Boltzmann'sche Superpositionsgesetz nach Gleichung (2.2) kann unverändert angewandt werden. In diesem Fall kann der zeitliche Verlauf der Kriechnachgiebigkeit J(t) eines beliebigen Polymers bei einer konstanten Temperatur unterhalb T_G näherungsweise auch mit der empirischen Gleichung (2.13) ("Kohlrausch"-Gleichung für Kurzzeitkriechen) beschrieben werden [Struik 1977].

$$J(t) = J_0 e^{\left(\frac{t}{t_0}\right)^{\beta}} \tag{2.13}$$

J_0: Materialkonstante
t_0: Faktor, abhängig von der Alterungsdauer t_e
β: Skalenfaktor, für Polymere im Mittel 0,33

Für Langzeitkriechen, d. h. für Belastungsdauern $t \geq t_e$, kann der Einfluss der physikalischen Alterung auf das Kriechen dadurch berücksichtigt werden, dass in Gleichung (2.13) die Belastungszeit t durch die reduzierte Belastungszeit t^* nach Gleichung (2.14) ersetzt wird [Weng 2002].

$$t^* = b_0 \cdot \ln\left(1 + \frac{a_L t}{b_0 + t_e}\right) \tag{2.14}$$

b_0: Materialkonstante
a_L: Zeitverschiebungsfaktor, abhängig von der Alterungsdauer t_e

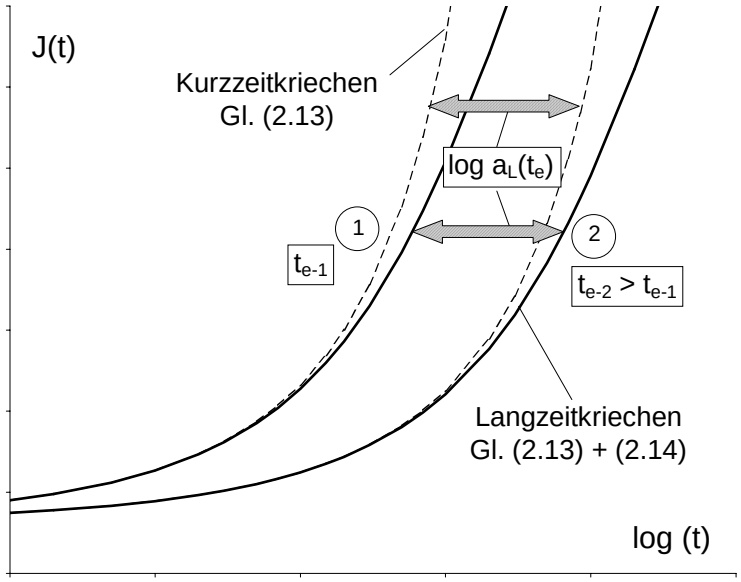


Bild 2-9: Zeitverschiebung der Kurzzeit- und Langzeit-Kriechnachgiebigkeit J(t) durch physikalische Alterung unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G

Kann aufgrund geringer Dehnungen linear-viskoelastisches Materialverhalten angenommen werden, so führt eine Berechnung von Kriechvorgängen nach Gleichung (2.2) ohne Berücksichtigung der physikalischen Alterung stets zu einer auf der sicheren Seite liegenden Überschätzung der Kriechverformungen. Für die Bauteilbemessung darf der Einfluss der physikalischen Alterung also vernachlässigt werden.

Soll jedoch z. B. der Einfluss chemischer Alterung auf das Kriechverhalten verschiedener Polymerproben unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G untersucht werden, so ist auf eine vergleichbare physikalische Alterung zu achten. Dies bedeutet, dass bei den zu vergleichenden Probekörpern die Zeitspanne t_e zwischen einer schnellen Abkühlung und dem Versuchsbeginn ungefähr gleich groß sein muss.

Zur physikalischen Alterung von PVB-Folien mit Weichmacher liegen nach Kenntnis des Autors keine Untersuchungen vor. Zur Überprüfung, ob bei den Kriechversuchen in dieser Arbeit ein Einfluss physikalischer Alterung bei Verbundglaselementen mit PVB-Folie messbar ist, wurden vom Autor Biegeversuche an drei VSG-Balken durchgeführt, welche zuerst auf 40 °C erwärmt und dann auf 0 °C bzw. 10 °C abgekühlt wurden. Die Abkühlungsrate der Klimakammer betrug ungefähr 0,1 °C / Minute. Sobald sich eine konstante

Temperatur der Probekörper von 0 °C bzw. 10 °C eingestellt hatte ("Alterungsbeginn" $t_e \approx 0$ Stunden), wurden nach t_e = 0, 2, 12 und 24 Stunden Kurzzeit-Kriechversuche mit einer Belastungsdauer von t = 300 Sekunden durchgeführt. Dabei konnte keine Änderung der Kriechnachgiebigkeit J(t) bzw. Versteifung der Verbundglasbalken festgestellt werden. Aufgrund der eingeschränkten Versuchsparameter (geringe Abkühlungsrate der Klimakammer, relativ kurze Alterungszeit, geringer Einfluss der Folie auf die Biegesteifigkeit bei tiefen Temperaturen und kurzer Belastungsdauer), lässt sich aus diesen Untersuchungen jedoch keine allgemeine Aussage über den Einfluss physikalischer Alterung auf die Steifigkeit von PVB-Folien treffen.

2.2 Verbundsicherheitsglas (VSG)

2.2.1 Allgemeines

Verbundgläser mit PVB-Folie werden als Verbundsicherheitsglas bezeichnet. Bei Glasbruch werden aufgrund der Haftung zwischen Folie und Glas die Bruchstücke zurückgehalten und dadurch die Verletzungsgefahr von in der Nähe befindlichen Personen verringert. Zudem bewirkt die Folie eine Erhöhung der Resttragfähigkeit, indem sie im Falle eines Glasbruches Zugkräfte aufnimmt. Dazu ist eine ausreichende Zugfestigkeit und Duktilität der Folie erforderlich.

Verwendung findet VSG beim Einsatz von Glas im Überkopfbereich, als absturzsichernde Verglasung, als befahrbare Verglasung, als Glasträger- oder Stützen, oder wenn Verglasungen allgemein äußeren Angriffen widerstehen müssen (z. B. Einbruchhemmung, Durchschusshemmung, Schutz vor umherfliegenden Teilen bei Wind, Hemmung von Sprengwirkungen). Durch einen mehrschichtigen Aufbau von Glasscheiben und Zwischenlagen kann die Tragfähigkeit und der Widerstand gegen äußere Angriffe beträchtlich gesteigert werden.

Die bauaufsichtlichen Anforderungen an das Bauprodukt Verbundsicherheitsglas in Deutschland schreiben eine regelmäßige Produktionskontrolle des Herstellers vor [Bauregelliste DIBt 2006]. Diese umfasst, neben einer visuellen Kontrolle, eine Prüfungen der Beständigkeit der Haftung zwischen Folie und Glas bei hoher Temperatur (2 Stunden bei 100 °C) [DIN EN ISO 12543-4] und eine Prüfung mit einem Kugelfallversuch [DIN 52338]. Letztere Prüfung gilt als bestanden, wenn eine 1 kg schwere Kugel bei einer Fallhöhe von 4 m eine VSG-Scheibe mit einem Scheibenaufbau Glas/PVB/Glas von 3/0,38/3 mm nicht durchschlägt.

Von Herstellern von PVB-Folien und VSG-Scheiben werden, zusätzlich zu den bauaufsichtlich geforderten Kontrollen, weitere Prüfungen vorgenommen, um die Produkteigenschaften der Folie und die Haftung mit dem Glas zu gewährleisten [DIN EN 14449], [Keller 1999]:

- Prüfung der Beständigkeit des Verbundes bei hoher Luftfeuchtigkeit [DIN EN ISO 12543-4], siehe Kapitel 4.7.3
- Pendelschlagversuche zur Prüfung der Stoßfestigkeit [DIN EN 12600]

- Kompressionsschertests zur Prüfung der Zähigkeit der Folie unter kombinierter Druck- und Scherbeanspruchung, siehe Kapitel 2.2.5
- "Pummeltest" zur visuellen Prüfung der Haftung zwischen Folie und Glas (siehe z. B. [Bucak 2006]), Einstufung auf einer Skala zwischen 0 (keine Haftung von Glassplittern) und 10 (bestmögliche, vollflächige Haftung von Glassplittern).

Für weitere Produkteigenschaften wie z. B. Einbruchhemmung oder Durchschusshemmung sind zusätzliche Prüfungen erforderlich, welche in entsprechenden Fachnormen festgelegt sind.

Alle diese Versuche dienen in erster Linie zur optischen Prüfung der Beständigkeit der Haftung zwischen PVB-Folie und Glasfläche einerseits und der Schutzwirkung von VSG gegen äußere Angriffe andererseits. Aufgrund der langjährigen Produktentwicklung und der Prüferfahrung der Hersteller von PVB-Folien und Verbundsicherheitsgläsern kann man nach [Savineau 2001] - bei ordnungsgemäßer und ständig kontrollierter Herstellung - von einem beständigen Verbund und einer ausreichenden Schutzwirkung bei Glasbruch ausgehen. Voraussetzung ist, dass ein übermäßiges Eindringen von Feuchtigkeit in die Folie verhindert wird. Da der Ansatz eines günstig wirkenden Schubmoduls zur Bemessung von VSG-Elementen in Deutschland derzeit bauaufsichtlich nicht zugelassen ist, gibt es jedoch bisher keine geregelten Verfahren zur Prüfung der temperatur-, alterungs- und zeitabhängigen Steifigkeit von VSG.

2.2.2 Eigenschaften des Glases

Bis zum Bruch verhält sich Glas bei üblichen Einsatztemperaturen linear-elastisch. Nach [DIN 1249-10] besitzt nicht vorgespanntes Kalk-Natronsilikatglas (Floatglas) einen E-Modul von E_{Glas} = 73000 N/mm² und eine Querdehnzahl von μ_{Glas} = 0,23. Für thermisch vorgespanntes Glas wird der E-Modul mit 70000 N/mm² angegeben. In der Literatur schwanken die Angaben des E-Moduls zwischen 70000 und 75000 für nicht-vorgespanntes Glas und 70000 und 73000 N/mm² für vorgespanntes Glas [Blank 1979], [Petzold 1990], [Scholze 1988]. Die Werte gelten bei Raumtemperatur und können sich bei anderen Umgebungstemperaturen geringfügig ändern [Scholze 1988].

Eine Untersuchung von [Schneider 2005] zum Verhalten von Glas unter Dauerbelastung zeigt, dass Kalk-Natron-Silikatglas in geringem Maße ein zeitlich veränderliches Materialverhalten aufweist. Dies wird vom Autor auf die Diffusion von Ionen im Glas unter mechanischer Beanspruchung zurückgeführt. Der zeitlich verzögerte Verformungszuwachs kann bis zu 2 % der elastischen Verformung betragen. Dies entspricht einer zeitlichen Abnahme der Steifigkeit bzw. des E-Moduls der Glasscheiben in gleicher Höhe. Aus Belastungsversuchen unterschiedlicher Dauer und Spannungsniveaus wurden Kriechfunktionen ermittelt. Der spontan-elastische Anteil des E-Moduls in diesen Kriechfunktionen betrug zu Versuchsbeginn zwischen 72000 N/mm² und 76000 N/mm².

Für die Bemessung von Glasscheiben ist die Annahme eines konstanten E-Moduls mit E_{Glas} = 70000 N/mm² ausreichend genau. Soll jedoch der Schubmodul einer steifen Zwischenlage aus Steifigkeitsmessungen an Verbundglasträgern ermittelt werden, so ist eine genauere

Voruntersuchung zur Höhe des E-Moduls der Glasscheiben der Versuchskörper erforderlich. Eine Auswertung der Steifigkeitsmessung mit E_{Glas} = 70000 N/mm² kann zu einer Unterschätzung des Anteils der Glasscheiben an der Steifigkeit der Verbundglasträger führen. In diesem Fall wird der Schubmoduls der Zwischenlage überschätzt und eine quantitative Ermittlung des Schubmoduls bei tiefen Temperaturen und kurzen Belastungszeiten möglicherweise verhindert. Zur Kalibrierung der Versuchseinrichtung und zur Ermittlung des E-Moduls der Glasscheiben der in dieser Arbeit verwendeten Probekörper aus VSG wurden deshalb Biegeversuche an Einzelglasscheiben (ESG) durchgeführt, welche der Charge der Probekörper entnommen wurden, siehe Kapitel 5.2.4.

2.2.3 Herstellung von VSG

Zur Herstellung von Verbundglas gibt es zwei Verfahren. Üblicherweis wird der Verbund zwischen PVB-Folie und Glas in einem zweistufigen Laminierungsprozess hergestellt. Mit Walzen wird bei Temperaturen zwischen 35 und 70 °C ein Vorverbund zwischen Folie und Glas hergestellt, bei dem die Luft zwischen Folie und Glas möglichst vollständig herausgedrückt wird. In einer zweiten Stufen werden die vorlaminierten Scheiben wenige Stunden in einem Autoklav bei einem Druck von ca. 13 bar und einer Temperatur von ca. 135 °C gelagert und der Verbundprozess damit abgeschlossen. Alternativ kann bei komplizierten Glasaufbauten (Mehrfachlaminaten, gekrümmte Gläser) oder bei Einbettung von empfindlichen Materialien zwischen den Glasscheiben (z. B. Solarzellen) der Verbund auch in einem einstufigen Vakuumverfahren in einem Gummisack erzeugt werden. Hierbei wird die Verbundglasscheibe erwärmt und durch Erzeugung eines Vakuums so lange entlüftet, bis sich ein Verbund einstellt bzw. das Laminat transparent wird (vgl. [Schuler 2003], [Bucak 2006], [Trosifol 2006]).

2.2.4 Haftung zwischen PVB-Folie und Glas

Wesentlich für die Trag- und Schutzwirkung von VSG ist ein dauerhafter Verbund zwischen der PVB-Folie und den Glasscheiben. Maßgebend für die Adhäsion zwischen Folie und Glasoberfläche ist in chemischer Hinsicht der Gehalt an Polyvinylalkohol im PVB-Harz. Die polaren Hydroxylgruppen (O-H) des Polyvinylalkohols bilden mit polaren Silanol-Gruppen (Si-O-H) auf der Glasoberfläche schwache Wasserstoffbrückenbindungen und bewirken somit eine Haftung zwischen Folie und Glas [Keller 1999]. Voraussetzung für eine gute Haftung ist ein vollständiges Eindringen des Folienmaterials in die mikroskopisch kleinen Unebenheiten der Glasoberfläche, ohne Lufteinschlüsse oder Ansammlung von Feuchtigkeit. Erreicht wird dies durch die Erwärmung und den hohen Druck bei der Herstellung des Verbundsicherheitsglases.

Dringt aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft von PVB Feuchtigkeit in die Folie ein, so wird die Adhäsion zwischen den polaren Gruppen der Kontaktflächen gestört, da die stark polaren Wassermoleküle anstelle der O-H-Gruppen des Polyvinylalkohols mit der Glasoberfläche in Verbindung treten. Aus diesem Grund muss der Wassergehalt in der PVB-Folie während der Lagerung, dem Transport und dem Laminierprozess kontrolliert werden. Überschreitet der Wassergehalt durch eindringende Feuchtigkeit aus der Umgebung einen

optimalen Bereich von 0,4 bis 0,5 %, so vermindert dies die Adhäsion und kann bereits in kurzer Zeit zur Ablösung der Folie von der Glasoberfläche führen (Delamination). Um den optimalen Wassergehalt zu gewährleisten, erfolgt die Lagerung und die Verlegung der PVB-Folie auf den Glasscheiben in klimatisierten Räumen bei 18 bis 20 °C Raumtemperatur und 25 bis 30 % relativer Luftfeuchtigkeit. Neben dem Gehalt an Polyvinylalkohol, dem Herstellungsprozess und dem Wassergehalt der PVB-Folie spielen auch die Zusammensetzung des Glases, der Zustand und die Reinheit der Glasoberfläche, sowie der Salzgehalt des zur Reinigung der Gläser benutzen Wassers eine wichtige Rolle für die Güte der Haftung.

2.2.5 Scherfestigkeit der PVB-Folie

Ein quantitatives Maß für die Stärke der Adhäsion zwischen PVB-Folie und Glas ist die Scherfestigkeit. [Aguilar 2005] hat mittels Kompressionsschertests eine Standardfolie (Dicke 0,76 mm) der Firma Sekisui (vgl. Tabelle 2-1) unter Laborbedingungen (~ 20 °C, ~ 55 % rel. LF) bis zur ersten Ablösung der Folie (Abfall der Scherkraft) untersucht. Die Versuchsgeschwindigkeit betrug 6 mm/Minute. Eine VSG-Scheibe wurden beim Folienhersteller in einem zweistufigen Laminierprozess (Vakuum-Vorverbund und Autoklav-Verbund) unter üblichen Fertigungsbedingungen hergestellt. Probekörper (25 x 25 mm) aus dem Kernbereich der VSG-Scheibe wiesen eine Scherfestigkeit von 10 bis 12 N/mm² auf. Die Scherfestigkeit in einem 2,5 cm breiten Randstreifen der Scheibe betrug zwischen 8 und 10 N/mm². Nach [Aguilar 2005] entsprachen die Ergebnisse einem Industriestandard für die Scherfestigkeit von 10 ± 1 N/mm². Wo dieser Standard definiert ist gibt der Autor nicht an.

Ähnliche Untersuchungen des "Fachkreises für konstruktiven Glasbau", mit PVB-Folien von drei verschiedenen Folienherstellern (Dicke 0,38 mm) und Probekörpern von drei VSG-Herstellern, ergaben bei Raumtemperatur Scherfestigkeiten zwischen 11 und 22 N/mm². Die Geschwindigkeit der Kompressionsschertests betrug 2,5 mm/Minute. Dabei zeigte sich, dass die Scherfestigkeit vom Folientyp und der Folienfeuchte, nicht aber vom VSG-Hersteller abhängt. Zudem war die Scherfestigkeit bei geringeren Temperaturen (0 °C) um ungefähr 5 bis 10 N/mm² höher als bei Raumtemperatur (vgl. [Schuler 2003]).

Nach diesen beiden Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass VSG bei herstellungsüblicher Folienfeuchte und bei Temperaturen bis 23 °C mindestens eine Scherfestigkeit von 8 bis 10 N/mm² besitzt. Mit steigender Temperatur nimmt die Scherfestigkeit jedoch erheblich ab und kann bei 60 °C auf 0,3 N/mm² absinken [Siebert 1999].

3 Tragverhalten von Verbundglas bzw. Verbundsicherheitsglas

3.1 Allgemeines

Ein Verbundglaselement besteht aus zwei oder mehreren biegesteifen und näherungsweisen schubstarren Deckschichten (Glasscheiben), welche durch eine oder mehrere polymeren Zwischenlagen verbunden sind, deren Biege- und Dehnsteifigkeit im Vergleich zu den Glasscheiben vernachlässigt werden kann. Bei Biegung übertragen die Zwischenlagen Schubkräfte und reduzieren die Biegespannungen in den Glasscheiben (Verbundwirkung). Dies führt zu einer Schubverformung γ_F der Zwischenlage, wie sie in Bild 3-1 dargestellt ist. Die Höhe der Verbundwirkung ist anhängig von Schubmodul der Zwischenlage und der Steifigkeit bzw. der Schlankheit der Deckschichten.

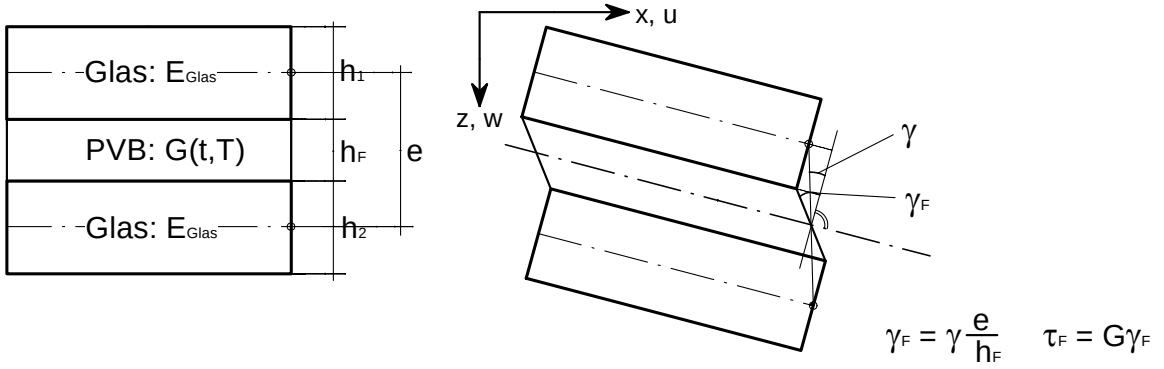


Bild 3-1: Balkenelement eines zweischichtigen Verbundsicherheitsglases

Zur Berechnung von Verbundglasbalken unter Biege- und Torsionsbeanspruchung existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Berechnungsmethoden. Genannt seien hier beispielsweise:

- Lösung der Differentialgleichung des Sandwichbalkens [Hooper 1973], [Stamm 1974].
- Näherungsmethode von [Wölfel 1987], welche auf der Annahme einer konstanten Ersatzbiegesteifigkeit in statisch bestimmt gelagerten Verbundbalken beruht [Möhler 1956].
- Ermittlung effektiver Biege- und Torsionssteifigkeiten von [Güsgen 1998] und [Kasper 2005], auf Grundlage der erweiterten Biege- und Verdrehtheorie unter Berücksichtigung von Schubverformungen nach [Roik 1970].
- Bemessungsmethode von [Kreuzinger 2001], welche für mehrschichtige Holzbauelemente entwickelt wurde.

Für die rechnerische Erfassung von statisch unbestimmten Systemen, wie z. B. Verbundglasplatten, wird i. d. R. die Methode der Finiten Elemente (FEM) verwendet, siehe z. B. [Bohmann 1999], [Duser 1999], [Kutterer 2003], [Siebert 1998]. Damit können auch geometrisch nichtlineare Effekte, wie sie bei großen Durchbiegungen auftreten, erfasst werden.

Die Untersuchungen in diesem Kapitel beschränken sich auf den Einfluss des Schubmoduls G der Zwischenlage auf das Tragverhalten intakter Verbundglaselemente mit zwei gleich dicken

Glasschichten (symmetrischer Scheibenaufbau). Fragen der Stabilität, des Bruchverhaltens und der Resttragfähigkeit werden hier nicht behandelt.

3.2 Verbundglasbalken auf Biegung

3.2.1 Berechnungsmethode zur Auswertung von Vierpunkt-Biegeversuchen

Als einfache und bewährte Methode [Gräf 2003], [Schuler 2003] zur indirekten Bestimmung des Schubmoduls der PVB-Folie aus Biegeversuchen an linienförmig gelagerten Balken aus Verbundsicherheitsglas wird in dieser Arbeit die Berechnungsmethode nach [Wölfel 1987] verwendet (lineare Balkentheorie). Von der Lösung der Differentialgleichungen des Sandwichbalkens von [Stamm 1974] weichen die mit dieser Methode berechneten Spannungen und Verformungen nur um ca. +/- 1 % ab. Bei einer Berechnung der maximalen Schubspannung τ_F in der Zwischenlage nach [Wölfel 1987] ergeben sich jedoch etwas größere Fehler. Hier bietet sich für eine genauere Berechnung die Sandwichtheorie nach [Stamm 1974] an.

Für Biegeversuche an Verbundglasbalken wird üblicherweise der in Bild 3-2 skizzierte Versuchsaufbau des Vierpunkt-Biegeversuches nach [DIN EN 1288-3] gewählt, bei dem die Belastung F über zwei Lasteinleitungssteifen im Abstand c von den Auflagern aufgebracht wird.

Die in dieser Arbeit verwendeten Probekörper aus Verbundsicherheitsglas besaßen eine Breite von 200 mm, einen symmetrischen Scheibenaufbau (Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 mm) und eine Stützweite von L = 1000 mm. Gemessen wurde die Versuchslast F, die Durchbiegung w und die Längsdehnungen ε_o auf der Oberseite der oberen Glasscheiben und ε_u auf der Unterseite der unteren Glasscheibe im Mittelpunkt des Verbundglasbalkens. Aus diesen zeitlich veränderlichen Messwerten kann mit Hilfe des E-Moduls der Glasscheiben (Annahme E_{Glas} = 70000 N/mm²) und der Geometrie des Versuchsaufbaus (Abstand c der Krafteinleitung vom Auflager, Stützweite L, Breite b, Dicke h_1 bzw. h_2 der oberen bzw. unteren Glasscheibe, Dicke h_F der Zwischenlage) der Schubmodul G der Zwischenlage bestimmt werden.

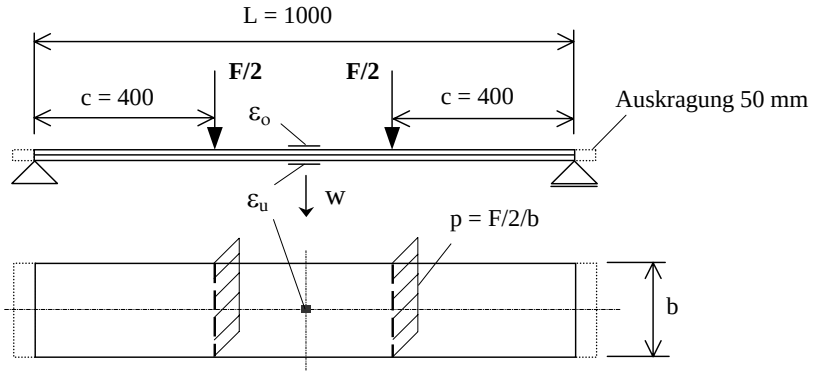


Bild 3-2: Belastungsschema des Vierpunkt-Biegeversuches nach [DIN EN 1288-3], alle Angaben in [mm]

Die effektive Biegesteifigkeit EI_{eff} eines Verbundglasbalkens berechnet sich aus den Dicken und den Trägheitsmomenten I_1 und I_2 der beiden Einzelscheiben nach Gleichung (3.1).

$$EI_{eff} = E_{Glas}\left(I_1 + I_2 + \Gamma I_S\right) \tag{3.1}$$

mit

$$\text{Schubfaktor } \Gamma\text{: } 0 < \Gamma = \frac{1}{1+k} < 1 \tag{3.2}$$

$$I_S = \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} b e^2 \tag{3.3}$$

$$e = \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} + h_F \tag{3.4}$$

Bei symmetrischem Scheibenaufbau ($h_1 = h_2 = h$) gilt für den Vierpunkt-Biegeversuch nach Bild 3-2 bei c/L = 0,4:

$$k = 5,085 \frac{E_{Glas}}{G} \frac{h h_F}{L^2} \tag{3.5}$$

Der Schubbeiwert k entspricht dem Verhältnis der Schubverformung aus Querkraft zur Biegeverformung der Deckschichten. Die Dehnung und die Durchbiegung des Verbundglasbalkens in Feldmitte (x = L/2) ergeben sich zu:

$$\varepsilon = -\varepsilon_o = \varepsilon_u = \frac{Fc}{2E_{Glas} b}\left(\frac{h + \Gamma e}{\frac{1}{3}h^3 + \Gamma h e^2}\right) \tag{3.6}$$

$$w = \frac{FcL^2}{10,170 E_{Glas} b} \frac{1}{\left(\frac{1}{3}h^3 + \Gamma h e^2\right)} \tag{3.7}$$

Wird der Quotient aus Dehnung und Durchbiegung gebildet, so vereinfachen sich Gleichung (3.6) und (3.7) zu Gleichung (3.8), in welcher der E-Modul der Glasscheiben nur noch im Schubfaktor Γ enthalten ist. Die Verwendung dieses Quotienten bringt Vorteile bei der Bestimmung des Schubmoduls von sehr steifen und sehr weichen Zwischenlagen, da der E-Modul der Glasscheiben nur einen sehr geringen Einfluss auf den Quotienten der Messwerte ε und w hat und somit nicht genauer bestimmt werden muss.

$$\frac{\varepsilon}{w} = \frac{5,085}{L^2}\left(h + \Gamma e\right) \tag{3.8}$$

Zur dimensionslosen Darstellung der Biegesteifigkeit eines Verbundglasbalkens werden die Verbundfaktoren nach Gleichung (3.9) bis (3.11) eingeführt (vgl. [Gräf 2003]). Der Verbundfaktor ist definiert als das Verhältnis der Dehnung ε_{mono} (Durchbiegung w_{mono}) eines monolithischen Balkens mit einer Glasdicke von $h_{ges} = h_1 + h_2 + h_F$ ("voller Verbund") zur gemessenen Dehnung ε (Durchbiegung w) eines Verbundglasbalkens mit nachgiebiger Zwischenlage. Die Versuchskraft F ist dabei in den Formeln für die Dehnung ε_{mono} und die

Durchbiegung w_{mono} des monolithischen Balkens enthalten. Bei sehr steifer Zwischenschicht nähern sich die Verbundfaktoren V_ε , V_w bzw. $V_{\varepsilon/w}$ dem Wert 1,0 an.

$$V_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{mono}}{\varepsilon} = \frac{6}{\left(h+e\right)^2}\left(\frac{\frac{1}{3}h^3 + \Gamma h e^2}{\left(h+\Gamma e\right)}\right) \tag{3.9}$$

$$V_w = \frac{w_{mono}}{w} = \frac{6}{\left(h+e\right)^3}\left(\frac{1}{3}h^3 + \Gamma h e^2\right) \tag{3.10}$$

$$V_{\varepsilon/w} = \frac{V_w}{V_\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{w}\frac{w_{mono}}{\varepsilon_{mono}} = \frac{h+\Gamma e}{h+e} \tag{3.11}$$

Löst man die Gleichungen (3.9) bis (3.11) nach dem Schubfaktor Γ auf, so erhält man folgende drei Beziehungen:

$$\Gamma = \frac{h\left(\frac{1}{6}V_\varepsilon\left(h+e\right)^2 - \frac{1}{3}h^2\right)}{e\left(he - \frac{1}{6}V_\varepsilon\left(h+e\right)^2\right)} \tag{3.12}$$

$$\Gamma = \frac{V_w\left(h+e\right)^3}{6he^2} - \frac{h^2}{3e^2} \tag{3.13}$$

$$\Gamma = \frac{V_{\varepsilon/w}\left(h+e\right)}{e} - \frac{h}{e} \tag{3.14}$$

Theoretisch ergibt sich aus allen drei Gleichungen (3.12) bis (3.14) der gleiche Schubmodul G der Zwischenlage nach Gleichung (3.15).

$$G = 5{,}085\frac{E_{Glas}hh_F}{L^2}\frac{\Gamma}{1-\Gamma} \tag{3.15}$$

3.2.2 Einfluss des Schubmoduls der Zwischenfolie auf die Biegesteifigkeit

Bei sehr niedrigem bzw. sehr hohem Schubmodul G der Zwischenlage nähert sich das Verbundtragverhalten den Grenzzuständen "Kein Verbund" bzw. "Voller Verbund" an. In diesen beiden Grenzzuständen hat eine Änderung des Schubmoduls G nur einen sehr geringen Einfluss auf die Biegesteifigkeit des Verbundglasbalkens und somit auf die Verbundfaktoren V_ε , V_w und $V_{\varepsilon/w}$. Je größer die Schlankheit $\lambda = L/(2h)$ des Verbundglasbalkens ist, um so größer ist die Verbundwirkung der Zwischenlage und um so geringer ist der Schubmodul mit dem ein monolithisches Tragverhalten (V_ε und V_w ca. 1,0) erreicht werden kann.

In Bild 3-3 sind in Abhängigkeit des Schubmoduls G der Zwischenlage die Verbundfaktoren V_ε und V_w von Verbundglasbalken mit einer Stützweite von 1,0 m und verschiedenen Glas- und Foliendicken dargestellt. Deutlich erkennbar ist der zunehmend flachere Verlauf der Kurven bei sehr geringen und sehr hohen Schubmoduln. Bei hohen Schubmoduln geht der Verbundfaktor V_ε früher in den flachen Bereich über als der Verbundfaktor V_w.

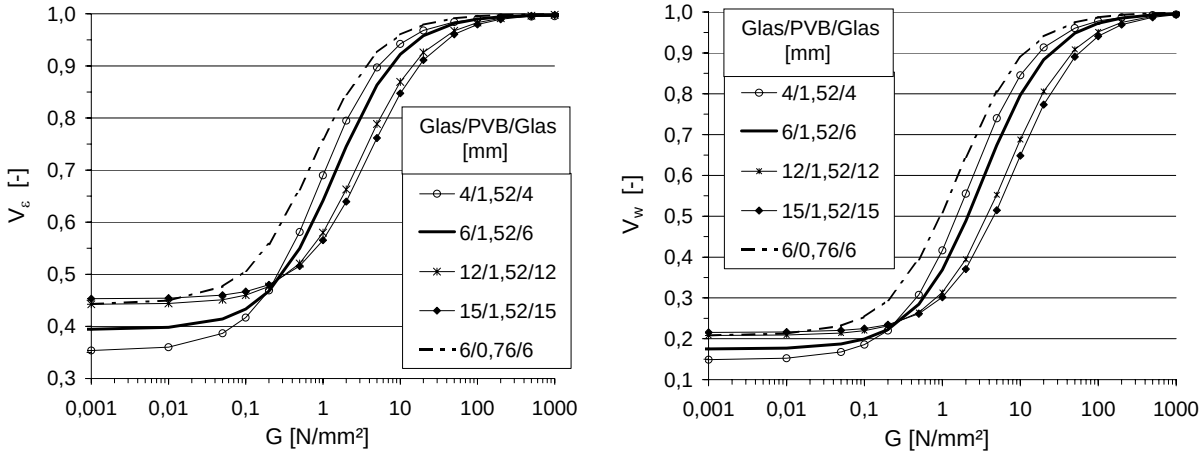


Bild 3-3 Verbundfaktoren V_ε und V_w von Verbundglasbalken als Funktion des Schubmoduls der Zwischenlage, Stützweite 1000 mm

Messungenauigkeiten oder Unterschiede zwischen den realen Steifigkeitsparametern der Deckschichten (E_{Glas}, h, b) und den Rechenannahmen (E_{Glas} = 70000 N/mm², Nennmaße) führen zu Fehlern bei der indirekten Berechnung des Schubmoduls aus den Messgrößen ε und w der Biegeversuche. Der relative Fehler des Schubmoduls infolge infinitesimal kleiner relativer Änderungen der Messgrößen ε (oder V_ε) bzw. w (oder V_w) kann analog zum Fehlerfortpflanzungsgesetz mathematisch durch die dimensionslose Empfindlichkeit (Sensitivität) S_ε bzw. S_w ausgedrückt werden. Allgemein gilt, dass die Berechnung des Schubmoduls aus Dehnungs- oder Durchbiegungsmessungen um so fehleranfälliger ist, je höher die Sensitivität S ist. Basierend auf der in Kapitel 3.2.1 erläuterten Berechnungsmethode von [Wölfel 1987] ist in Gleichung (3.16) die Sensitivität S_ε für die Berechnung des Schubmoduls aus dem Verbundfaktor V_ε nach Gleichung (3.12) und (3.15) gegeben.

$$S_\varepsilon = \left(\frac{\partial V_\varepsilon}{\partial G}\right)^{-1} \frac{V_\varepsilon}{G} \tag{3.16}$$

mit

$$\frac{\partial V_\varepsilon}{\partial G} = \frac{6}{(h+e)^2}\left(\frac{5{,}085 E h^2 h_F l^2 \left(\tfrac{1}{3}h^3 + he^2\right) - 1{,}695 E h^4 h_F l^2 (h+e)}{\left(Gl^2(h+e) + 5{,}085 E h^2 h_F\right)^2}\right) \tag{3.17}$$

In Bild 3-4 sind die Sensitivitäten S_ε und S_w des Schubmoduls für Verbundglasbalken mit einer Stützweite von 1000 mm und den Scheibenaufbauten Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 und 12/1,52/12 mm als Funktion von G dargestellt. Bei beiden Scheibendicken reagiert der Schubmodul G weniger empfindlich gegenüber Änderungen des Messwertes V_w (bzw. w) als gegenüber Änderungen des Messwertes V_ε (bzw. ε). Bei steifer Zwischenlage ist eine Berechnung des Schubmoduls für dicke Verbundglasschreiben theoretisch weniger anfällig gegen Streuungen der Messgrößen ε und w. So ist beispielsweise bei einem Schubmodul der PVB-Folie von 30 N/mm² (Folientemperatur ca. 0 bis 5 °C) die Sensitivität S_ε (S_w) bei einem dünnen Verbundglasbalken (h = 6 mm) mit S_ε = 37 (S_w = 13) größer als bei einem Verbundglasbalken mit 12 mm dicken Glasscheiben S_ε = 20 (S_w = 7), siehe Bild 3-4.

Die Formeln für S_ε und S_w gelten nur für infinitesimal kleine Änderungen der Messgrößen. Bis zu relativen Änderungen des Schubmoduls von $-50\ \% < \Delta G/G < +50\ \%$ können die Formeln jedoch zur Abschätzung der prozentualen Änderung des Schubmoduls bei kleinen Schwankungen der Messgrößen verwendet werden. Eine Änderung der gemessenen Dehnung um +/- 1 % entspricht im o. g. Beispiel somit näherungsweise einer Änderung des daraus berechneten Schubmoduls um +/- 37 %.

Bei Scherversuchen wird die Schubsteifigkeit der Zwischenlage bzw. der Schubmodul aus der Verschiebung zweier Glasscheiben unter Lasteinwirkung bestimmt. Bei diesen Versuchen beträgt die Sensitivität S = 1, da eine relative Änderung der mittels eines Wegaufnehmers gemessenen Verschiebung zu einem gleich großen relativen Fehler bei der Bestimmung des Schubmoduls führt.

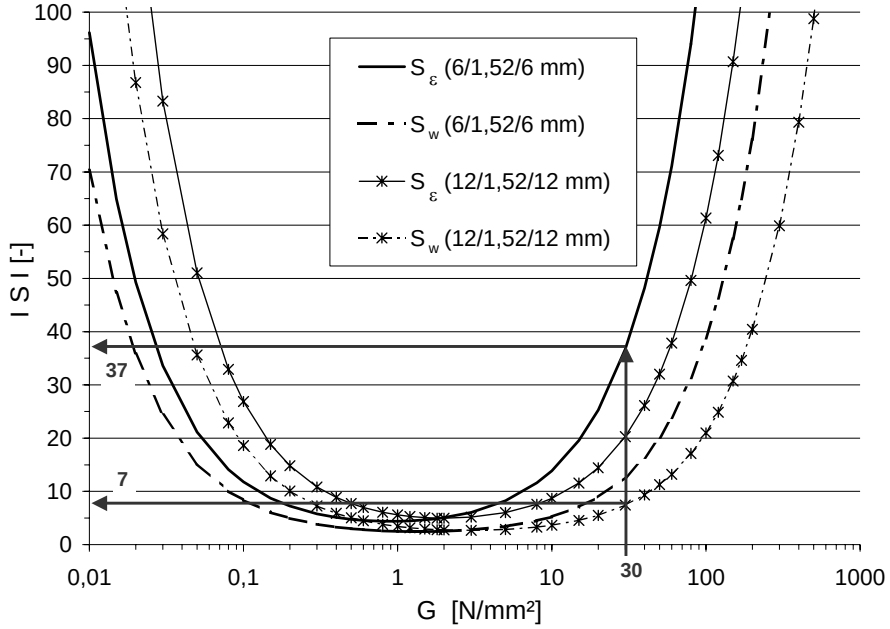


Bild 3-4: Betrag der Sensitivität S_ε und S_w des Schubmoduls, berechnet nach [Wölfel 1987]

3.2.3 Abweichung des Tragverhaltens realer Verbundglasbalken von der Balkentheorie

3.2.3.1 Einfluss der Breite und Durchbiegung von Verbundglasbalken

Aufgrund der Dehnungsbehinderung quer zur Balkenachse verhalten sich breite Balken bzw. Plattenstreifen steifer als ideale Balken, da sich eine zur Balkenbiegung entgegengesetzte Krümmung quer zur Längsachse ausbildet. Mit zunehmender Breite der Glasbalken (Querdehnzahl $\mu_{Glas} = 0{,}23$) reduziert sich die Längsdehnung und Durchbiegung in der Längsachse gegenüber einem idealen Balken um maximal $1/(1-\mu_{Glas}^2)-1 = 5{,}6\ \%$.

Mit zunehmender Durchbiegung nimmt in der Mittelachse der Balken die betragsmäßige Längsdehnung $|\varepsilon_o|$ an der Oberseite zu, während sich die Längsdehnung ε_u an der Unterseite verringert. Wird der Mittelwert aus beiden Dehnungen gebildet, so verbessert sich die Übereinstimmung mit der Balkentheorie. Deshalb wird zur Auswertung der Biegeversuche nach Kapitel 3.2.1 die Dehnung ε als der Mittelwert $(|\varepsilon_o| + \varepsilon_u)/2$ der gemessenen Längsdehnungen an der Ober- und Unterseite der Verbundglasbalken in Feldmitte definiert.

3.2.3.2 Einfluss der Auskragung von Verbundglasbalken über den Auflagern

Die Probekörper für Biegeversuche an Verbundglasbalken nach [DIN EN 1288-3] sind 1100 mm lang und kragen jeweils 50 mm über den L = 1000 mm entfernt stehenden Auflager aus. Bei sehr steifen und sehr weichen Zwischenlagen hat dies keine Auswirkung auf die Messgrößen in Feldmitte. Bei mittleren Schubmoduln von PVB bei Raumtemperatur (G ca. 0,5 bis 1 N/mm²) führt diese Auskragung jedoch zu einer merklichen Verringerung der Durchbiegung in Feldmitte (vgl. [Hooper 1973]). Die Dehnung ε in Feldmitte ist von diesem versteifenden Effekt weniger betroffen.

Aufgrund dieser - für Dehnung und Durchbiegung unterschiedlichen - Abweichungen der realen Probekörper vom Modell des idealen Balkens, führt eine Auswertung von Biegeversuchen nach [DIN EN 1288-3] mit verschiedenen Verbundfaktoren V_ε, V_w und $V_{\varepsilon/w}$ zu verschiedenen Schubmodulwerten.

3.2.3.3 Vergleichsrechnung zwischen realen Verbundglasbalken und der Näherungslösung nach [Wölfel 1987]

Die Abweichung der Messgrößen ε und w in 200 und 360 mm breiten Verbundglasbalken von der Balkentheorie wurden in dieser Arbeit durch Vergleichsrechnungen mit Hilfe der Finiten Element Methode (FEM) überprüft. Es wurden sowohl lineare, als auch geometrisch nichtlineare Berechnungen, mit jeweils unterschiedlichen Modellierungen der Verbundglasbalken, durchgeführt. Bei den FEM-Berechnungen wurden im Gegensatz zur Balkenberechnung nach [Wölfel 1987] die 5 cm lange Auskragung über den beiden Randauflagern berücksichtigt. Der E-Modul bzw. die Querdehnzahl der Glasscheiben wurden mit E_{Glas} = 70000 N/mm² bzw. μ_{Glas} = 0,23 angenommen. Die Belastung F der Verbundglasbalken wurde stets so gewählt, dass sich nach der Berechnung nach [Wölfel 1987] eine Durchbiegung in Feldmitte von 10 mm (= L/100) ergibt. Die Last wird idealisiert als schlaffe Streckenlasten auf die obere Glasscheibe aufgebracht. Dies erfordert bei der Versuchsdurchführung eine nachgiebige Zwischenschicht zwischen den Lasteinleitungssteifen des Laststempels und dem Probeköper.

Die lineare Berechnung der breiten Verbundglasbalken erfolgte mit dem Programm *SOFiSTiK* [Sofistik 2005]. Die Zwischenlage wurde mit dreidimensionalen Volumenelementen abgebildet, an welche mit einem Versatz (halbe Scheibendicke) Schalenelemente zur Abbildung der Glasscheiben angeschlossen wurden (Bild 3-5 links). Um bei sehr geringem Schubmodul der Zwischenlage ($G \leq 0{,}1$ N/mm²) die gleiche Durchbiegung der beiden Einzelglasscheiben zu erzielen, wurden die Schalenelemente in ihren Eckknoten in vertikaler Richtung starr gekoppelt.

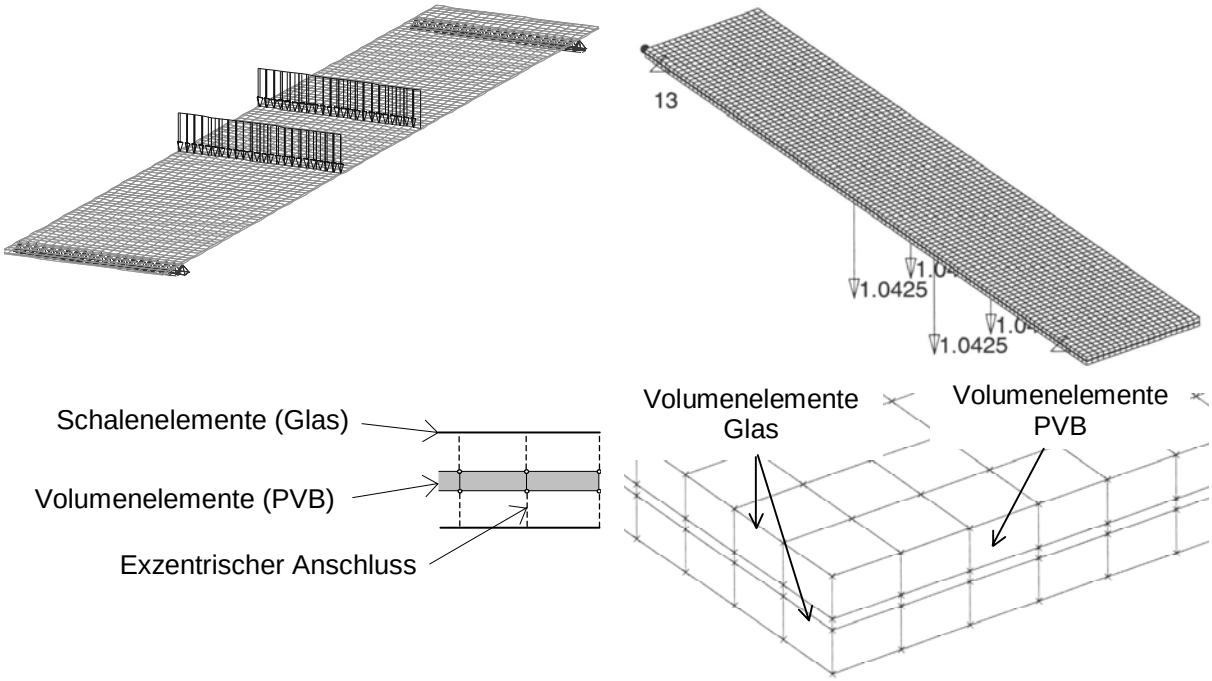


Bild 3-5: Verwendete FEM-Modelle zur Berechnung von VSG-Scheiben. Links: Schalenelemente mit exzentrischem Anschluss an eine Zwischenlage aus Volumenelementen (*SOFiSTiK)*. Rechts: Volumenmodell mit (*MSC/NASTRAN)*

Die nichtlineare Berechnung der Verbundglasbalken erfolgte mit dem Programm *MSC/NASTRAN for Windows 2001* [Nastran 2001] (Bild 3-5 rechts). Alle drei Schichten der Verbundglasbalken wurden mit einer Lage von Volumenelementen (Grundfläche 10 x 10 mm²) generiert, vgl. [Gräf 2003], [Siebert 1999]. Die vertikale Kopplung der Einzelglasscheiben untereinander erfolgte für $G \leq 0{,}1$ N/mm² mittels ausreichend steifen Federelementen. Vergleichende lineare Berechnungen von Verbundglasbalken und nichtlineare Berechnungen von Einzelscheiben ergaben bei beiden Programmen bzw. Modellierungen praktisch gleiche Ergebnisse (Unterschied ε bzw. $w \leq 0{,}1$ %).

Das Ergebnis der Vergleichsrechnung für 200 und 360 mm breite VSG-Balken mit einem Scheibenaufbau Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 mm ist in Tabelle 3-1 zusammengestellt. Darin ist für verschiedene Schubmoduln der Zwischenlage das Verhältnis R_ε der Dehnung bzw. das Verhältnis R_w der Durchbiegung aus der Balkenberechnung nach Kapitel 3.2.1 ("Wölfel") zur Dehnung bzw. Durchbiegung aus der FEM-Berechnung angegeben.

Verbundglasbalken mit einer Breite von 360 mm weichen um ca. 1 % stärker von der Balkentheorie ab, als solche mit einer Breite von 200 mm. Die lineare und geometrisch nichtlineare Berechnung ergeben praktisch die gleiche gemittelte Dehnung $\varepsilon = (|\varepsilon_o| + \varepsilon_u)/2$ und Durchbiegung w in der Mitte der Scheibe. Die Dehnung ε und die Durchbiegung w von 200 mm breiten Verbundglasbalken können deshalb sehr genau mit der linearen Balkentheorie berechnet werden.

Größer als bei der Spannung ist die Abweichung in der Durchbiegung zwischen der Balkentheorie ohne Auskragung und der FEM-Berechnung mit einer Auskragung von jeweils 5 cm. Die maximale Abweichung liegt bei 8 bis 9 %. Die gemittelte Dehnungen ε aus der FEM-Berechnung weichen dagegen nur um 1 bis 2 % vom Ergebnis des Verbundglasbalkens ohne Auskragung ab.

Tabelle 3-1: Verhältnis R_ε (R_w) der Dehnung (Durchbiegung) eines idealen Verbundglasbalkens ("Wölfel") zur Dehnung (Durchbiegung) eines 200 mm und 360 mm breiten, jeweils 5 cm auskragenden Verbundglasbalkens ("FEM"), Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 mm, Stützweite 1000 mm

	Wölfel / FEM, linear				Wölfel / FEM, nichtlinear			
G	b = 200 mm		b = 360 mm		b = 200 mm		b = 360 mm	
[N/mm²]	R_ε	R_w	R_ε	R_w	R_ε	R_w	R_ε	R_w
Kein Verbund	1,007	1,006	1,019	1,018	1,007	1,007	1,022	1,021
0,1	1,018	1,031	1,030	1,043	1,019	1,034	1,034	1,049
1	1,015	1,073	1,023	1,082	1,014	1,074	1,023	1,085
10	1,006	1,017	1,011	1,025	1,005	1,018	1,011	1,028
100	1,010	1,004	1,022	1,014	1,010	1,005	1,023	1,018
Monolithisch	1,006	1,006	1,019	1,018	1,007	1,006	1,020	1,019

Der Einfluss der Glasdicke auf die Messgrößen ε und w in einem 200 mm breiten Verbundglasbalken ist in Bild 3-6 für zwei Glasdicken (Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 und 12/1,52/12) wiedergegeben. Dabei ist wiederum das Verhältnis R_ε (R_w) der Dehnung (Durchbiegung) aus der Balkenberechnung ("Wölfel") zur Dehnung (Durchbiegung) aus der linearen FEM-Berechnung dargestellt.

Die Abweichungen der Balkenberechnung nach [Wölfel 1987] vom Tragverhalten breiter Verbundglasbalken ist bei beiden Scheibenaufbauten ungefähr gleich groß. Eine Verwendung von dicken Versuchsscheiben ($h_1 = h_2 = 12$ mm) bringt demnach keine Vorteile bei der Versuchsauswertung im Sinne von geringeren Abweichungen zwischen einem idealen Balken und den realen Versuchskörpern.

Aufgrund der relativ großen schubmodulabhängigen Abweichung der Durchbiegung w von der Balkentheorie empfiehlt es sich bei Biegeversuchen nach [DIN EN 1288-3] den Schubmodul G der Zwischenlage aus der Dehnung ε bzw. dem zugehörigen Verbundfaktor V_ε zu ermitteln. Der Einfluss der Querdehnungsbehinderung (Plattenwirkung) in den breiten Versuchskörpern kann durch eine Erhöhung der gemessenen Dehnung $\varepsilon = (|\varepsilon_o| + \varepsilon_u)/2$ um 1 % berücksichtigt werden. Bei sehr hohen und sehr tiefen Schubmoduln, also in Bereichen hoher Sensitivität der Versuchsauswertung, siehe Kapitel 3.2.2, deckt diese Korrektur den versteifenden Einfluss der Plattenwirkung theoretisch ab. Bei Verwendung von 360 mm breiten Verbundglasbalken ist zur Abdeckung dieses Einflusses die gemessene Dehnung um 2 % zu erhöhen.

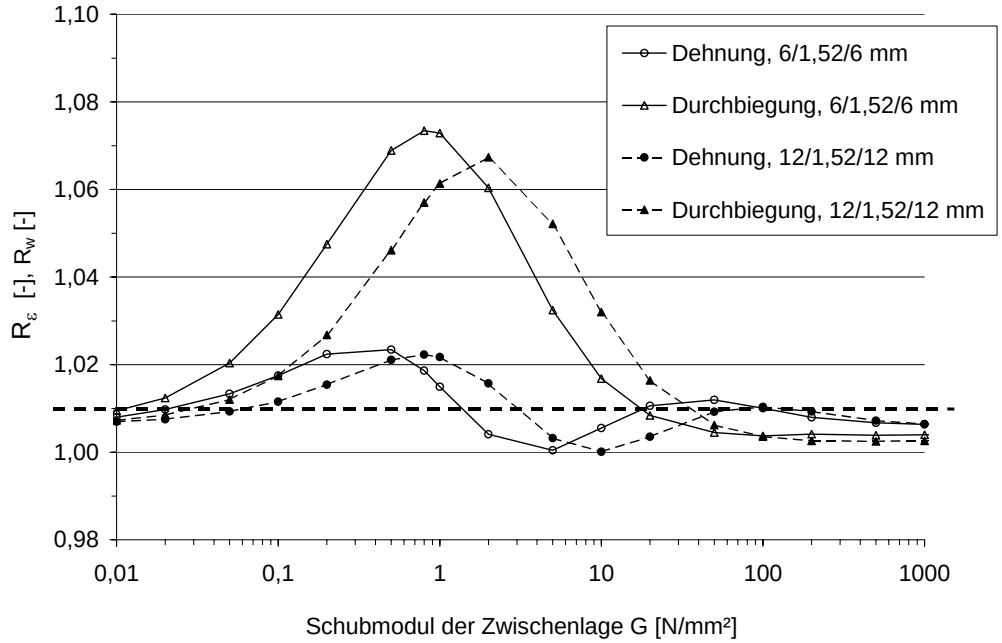


Bild 3-6: Verhältnis R_ε (R_w) der Dehnung (Durchbiegung) eines idealen Verbundglasbalkens (Wölfel) zur Dehnung (Durchbiegung) eines 200 mm breiten auskragenden Verbundglasbalkens (FEM) bei zwei 6 mm bzw. 12 mm dicken Deckschichten

3.2.3.4 Weitere Einflüsse auf die Auswertung von Biegeversuchen an Verbundglasbalken

Außer den oben diskutierten Einflüssen der Plattentragwirkung und der Auskragung der Probekörper über den Auflagern, können auch die folgenden, nicht messbaren Parameter und Unsicherheiten zu Abweichungen zwischen theoretisch berechneten und gemessenen Dehnungen und Durchbiegungen führen:

- E-Modul der Glasscheiben: Bei Raumtemperatur liegt der E-Modul der Glasscheiben i. d. R. über der üblichen Annahme E_{Glas} = 70000 N/mm², vgl. Kapitel 2.2.2. Dies führt zu einer Unterschätzung der Biegesteifigkeit $E_{Glas}I_1 + E_{Glas}I_2$ der Glassscheiben und somit zu einer Überschätzung der Verbundsteifigkeit $E_{Glas}\Gamma I_S$ bzw. des Schubmoduls der Zwischenlage. Um auch bei steifen Zwischenlagen den Schubmoduls G bestimmen zu können, ist deshalb vorab der E-Modul E_{Glas} aus Biegeversuchen an Einzelscheiben aus der Serie der Probekörper zu ermitteln.
- Querdehnzahl der Glasscheiben: Unterschiede in der Querdehnzahl der Glasscheiben zwischen μ_{Glas} = 0,17 und 0,30 haben in schmalen Verbundglasbalken keinen nennenswerten Einfluss auf die gemittelte Dehnung ε (Unterschied < 0,3 %).
- Lasteinleitung: Durch die Krümmung der Verbundglasbalken quer zur Längsachse ist die Durchbiegung an den Rändern höher als in Scheibenmitte. Durch eine weiche lastverteilende Elastomerschicht zwischen den starren Lasteinleitungssteifen und der Glasscheibe wird die Belastung über die gesamte Breite der Scheibe gleichmäßig verteilt (vgl. Bild 3-2, schlaffe Linienlast p = F/2/b). Je härter diese lastverteilende Schicht ist, um so mehr konzentriert sich die Last mittig in der Längsachse des

Verbundglasbalkens. Besteht im Extremfall ein direkter Druckkontakt zwischen der starren Lasteinleitungssteife und der Glassscheibe so wird die Last F/2 als Einzellast in der Längeachse des Balkens eingeleitet. In diesem Grenzfall verringert sich die gemittelte Dehnung ε in Scheibenmitte je nach Steifigkeit des Verbundes zwischen 1 bis 2 %.

- Reibung an den Auflagern: Reibung an den Auflagern kann zu einer Verminderung der Dehnung und Durchbiegung in Balkenmitte führen. Ob und in welcher Höhe bei den Biegeversuchen in dieser Arbeit Reibung die Messergebnisse beeinflusst hat, konnte nicht festgestellt werden.
- Messeinrichtung: Abhängig von der Art der Verkabelung, der Kabellänge, der temperaturabhängigen Empfindlichkeit der Dehnmessstreifen ("k-Faktor" nach [Hoffmann 1987]) und der Einstellung der Messverstärker kann auch die Messeinrichtung kleine systematische Fehler erzeugen. Tiefe Versuchstemperaturen oder eine Verkabelung mit zwei oder drei Leitern je Dehnmessstreifen und langen Kabeln führen zu einer geringen Verminderung der gemessenen Dehnung, welche eine Überschätzung des Schubmoduls der Zwischenlage zur Folge hat.

Wird zur Auswertung des Schubmoduls aus Biegeversuchen vorab der E-Modul an Einzelglasscheiben aus der Serie der Probekörper bestimmt, so werden dabei im Wesentlichen auch die hier genannten Effekte implizit erfasst. Zur Bestimmung des Schubmoduls aus Biegeversuchen sollte deshalb insbesondere bei steifen Zwischenlagen eine Kalibrierung der Versuchseinrichtung bei gleichzeitiger Ermittlung des E-Moduls der Glasscheiben vorgenommen werden.

Durch Tarierung der Messung zum Belastungsbeginn kann der Einfluss des Eigengewichts teilweise eliminiert werden. Mit zunehmender Belastungsdauer führt eine Kriechverformung aus Eigengewicht zu einer geringen Unterschätzung des Schubmoduls der Zwischenlage.

3.2.4 Restspannungen in Balken aus VSG nach Entlastung

Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der PVB-Folie bleiben bei schneller Entlastung Restspannungen bzw. Verformungen in VSG-Balken bestehen. Diese werden je nach Belastungszeit und Temperatur mehr oder weniger schnell abgebaut und verschwinden bei ausreichend langer Entlastungszeit. Beschreiben lässt sich dieses Verhalten durch das in Kapitel 2.1.5 beschriebene Boltzmann'sche Superpositionsgesetz, indem ab dem Zeitpunkt der Entlastung t_1 eine zur Belastung +p entgegengesetzte, betragsmäßig gleichgroße Last -p auf das System aufgebracht wird, welche beliebig lang wirkt (siehe Bild 3-7 links oben). In diesem Fall überlagern sich die zeitlich veränderlichen Spannungen aus Be- und Entlastung und es ergeben sich in der Summe Restspannungen in den Glasscheiben.

Die nötige Entlastungszeit bis zum vollständigen Abbau der Restspannungen lässt sich bei Balken oder Platten aus VSG nicht für alle Belastungsdauern und Temperaturen zweifelsfrei bestimmen, da i. d. R. die Verfügbarkeit der Messeinrichtung begrenzt ist und Versuche mit horizontaler Lage der Versuchskörper durchgeführt werden (Einfluss des Eigengewichts). An Kriechversuchen des Autors an VSG-Balken (Bild 3-7) mit Belastungszeiten von einer

Stunde bzw. zwei Tagen und Versuchstemperaturen zwischen 0 und 40 °C ließ sich aber im Rahmen der Versuchsgenauigkeit die Gültigkeit des Boltzmann'schen Superpositionsgesetz durch Dehnungsmessung in den Glasscheiben nachweisen. Den langsamsten Abbau von Restspannungen zeigten dabei die Versuche bei 10 °C, da hier auch noch nach einer sehr langen Entlastungszeit, welche dem 7 bis 10-fachen der Belastungsdauer entsprach, Restspannungen in Höhe von 5 % der maximalen Spannung am Belastungsende gemessen wurden.

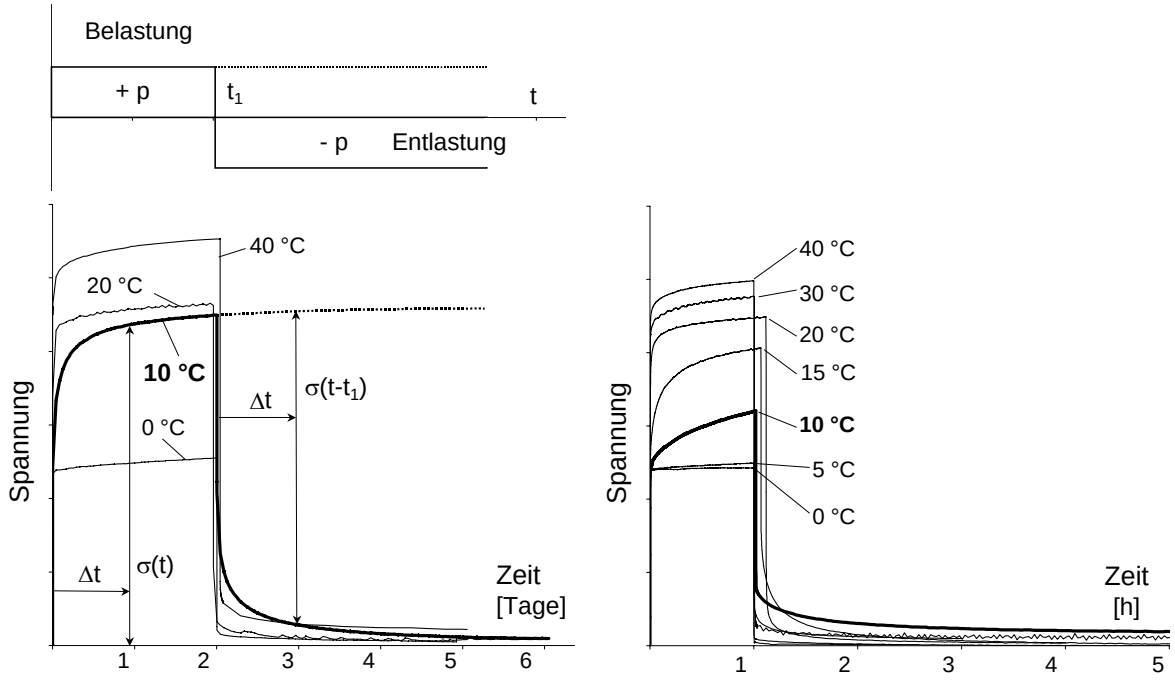


Bild 3-7: Zeitlicher Verlauf der Restspannungen in VSG-Balken nach dem Boltzmann'schen Superpositionsgesetz (siehe linkes Bild: Kurve bei 10 °C). Links: zweitägige Belastung, rechts: einstündige Belastung

3.2.5 Effektive Torsionssteifigkeit von Verbundglasbalken

Verschiedene Autoren wie z. B. [Güsgen 1998], [Kasper 2005], [Stamm 1974] haben Formeln zur Berechnung der Torsionssteifigkeit $I_T(G)$ von beidseitig gabelgelagerten Verbundglasbalken unter der Voraussetzung einer unbehinderten Verwölbung der Deckschichten hergeleitet. In Bild 3-8 ist für die zweischichtigen Glasaufbauten 6/1,52/6 mm und 12/1,52/12 mm der Verbundfaktor V_ϑ in Abhängigkeit des Schubmoduls G dargestellt. Dieser Verbundfaktor ist definiert als das Verhältnis zwischen der Torsionssteifigkeit $I_T(G)$ eines Verbundglasbalkens in Abhängigkeit des Schubmoduls G der Zwischenlage zur Torsionssteifigkeit I_{T0} eines monolithischen Glasbalkens der gleichen Gesamtdicke (nur St.-Vernant'sche Torsion). Die von [Kasper 2005] und [Stamm 1974] abgeleiteten Formeln für einen Balken mit konstantem Torsionsmoment ergeben bei niedrigen Schubmoduln nahezu gleiche Ergebnisse. Von [Güsgen 1998] wurde die Torsionssteifigkeit eines Balkens mit gleichmäßig verteilter Torsionsbelastung hergeleitet. Bei dieser Belastung ist der Verbundfaktor V_ϑ wie bei Biegung abhängig von der Balkenlänge und stets höher als bei einem Verbundglasbalken mit konstantem Torsionsmoment, vgl. Bild 3-8.

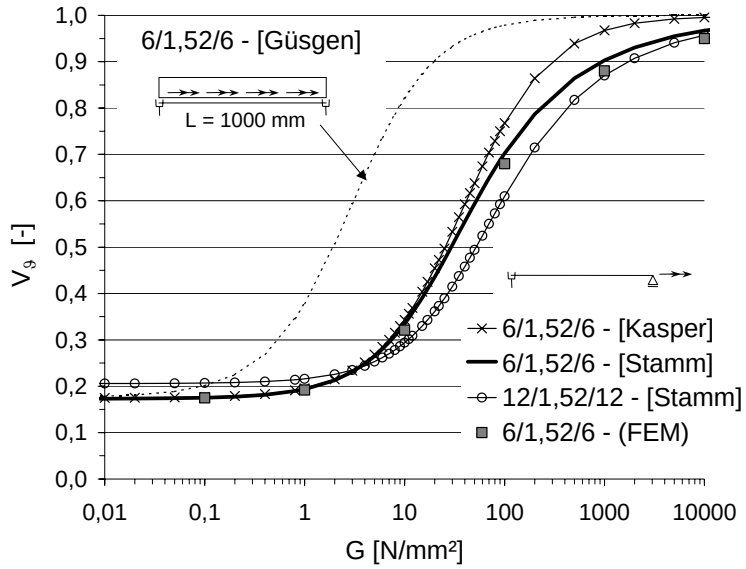


Bild 3-8: Verhältnis der Torsionssteifigkeiten eines 200 mm breiten Verbundglasbalkens und eines monolithischen Balkens gleicher Dicke (Verbundfaktor V_ϑ)

Eine in dieser Arbeit durchgeführten FEM-Berechnung der Torsionssteifigkeit mit *MSC/NASTRAN for Windows 2001* [Nastran 2001] ergab eine gute Übereinstimmung mit dem analytischen Ergebnis nach [Stamm 1974]. Dabei wurden die beiden Glasplatten mit jeweils vier und die Zwischenschicht mit zwei Lagen von Volumenelementen abgebildet. Die maximale absolute Torsionssteifigkeit wurde jedoch wie bei der analytischen Lösung um ca. 4 % unterschätzt.

Im Gegensatz zum Biegeverhalten von Verbundglasbalken wird bei Torsion mit konstantem Torsionsmoment erst bei sehr hohen Schubmoduln ein monolithisches Tragverhalten erreicht. Erst ab G > 200 N/mm² erreicht die Torsionssteifigkeit des Verbundbalkens 90 % des monolithischen Grenzwertes ($V_\vartheta = 0{,}90$). Bei Biegung eine Balkens mit gleichen Abmessungen werden Verbundfaktoren $V_\varepsilon = 0{,}90$ bzw. $V_w = 0{,}90$ schon bei vergleichsweise geringen Schubmoduln von 10 bzw. 20 N/mm² erreicht (Bild 3-3). Bei Torsion mit gleichmäßig verteilter Torsionsbelastung gleicht die Kurve des Verbundfaktors V_ϑ den Kurven V_ε und V_w bei Biegeversuchen.

In Bild 3-9 ist analog Gleichung (3.16) und Bild 3-4 die Sensitivität S_ϑ des Schubmoduls bei Torsion eines Verbundglasbalkens mit konstantem Torsionsmoment dargestellt. Grundlage der Berechnung ist die effektive Torsionssteifigkeit nach Gleichung (3.18) aus [Stamm 1974]. Zum Vergleich ist auch die Sensitivität S_ε und S_w der Vierpunkt-Biegeversuche aus Bild 3-4 eingezeichnet (Stützweite 1000 mm, Breite 200 mm, Glasaufbau 6/1,52/6 mm).

$$I_T(G) \cong 2bhe^2\left(1-\frac{\tanh(\lambda_T b/2)}{\lambda_T b/2}\right)+\frac{2}{3}bh^3 \tag{3.18}$$

mit

$$\lambda_T{}^2 = \frac{G}{G_{Glas}}\frac{2}{h_F h} \tag{3.19}$$

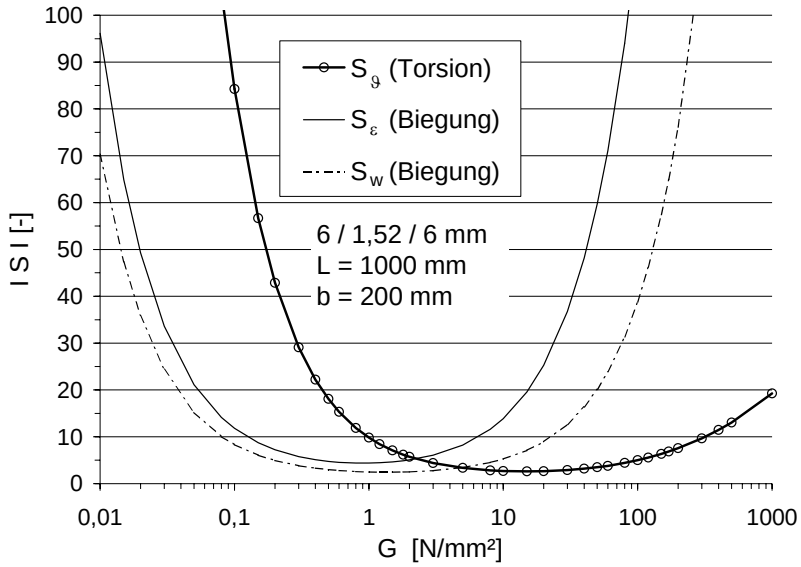


Bild 3-9: Betrag der Sensitivität S_ϑ (Torsionsversuch) bzw. S_ε und S_w (Biegeversuch) des Schubmoduls, berechnet nach [Stamm 1974] bzw. [Wölfel 1987]

Aufgrund der geringen Sensitivität S_ϑ bei Schubmoduln zwischen 10 und 1000 N/mm² unterliegt die Bestimmung des Schubmoduls steifer Zwischenlagen aus der Torsionssteifigkeit geringeren Schwankungen als dessen Ermittlung aus der Biegesteifigkeit. Bild 3-9 zeigt, dass sich Torsionsversuche mit konstantem Torsionsmoment, wie sie von [Kasper 2005] durchgeführt wurden, besonders zur Ermittlung des Schubmoduls von PVB-Folien bei tiefen Temperaturen und kurzer Belastungszeit eignen. Bei relativ weichen Zwischenlagen geht dieser Vorteil gegenüber Biegeversuchen jedoch verloren. Oberhalb der Raumtemperatur steigt bei PVB-Folien ($G < 2$ N/mm²) die Sensitivität S_ϑ im Vergleich zu S_ε oder S_w stark an. Hier ist zur Begrenzung der Streuung der Ergebnisse eine Ermittlung des Schubmoduls aus Biegeversuchen vorzuziehen.

3.2.6 Tragverhalten von Verbundglasplatten in Abhängigkeit des Schubmoduls

Mit zunehmender Durchbiegung von Glasplatten werden Membranspannungen in der Plattenebene aktiviert, welche zu einer Versteifung der Platte führen. Gegenüber einer Lastabtragung durch reine Biegung (lineare Plattenberechnung) wird dadurch die maximalen Durchbiegung und Hauptspannung erheblich reduziert und die Glasplatte kann wirtschaftlicher dimensioniert werden. Sollen die Membranspannungen in Plattenebene rechnerisch erfasst werden, so ist eine geometrisch nichtlineare Plattenberechnung erforderlich.

Maßgebend für die Beanspruchungen in der Platte ist neben der Belastung das Seitenverhältnis ($\alpha = b/L$) der längeren zur kürzeren Seite der Platte. Ab $\alpha > 5$ bis 10 verringert sich der Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Plattenberechnung, und die Tragwirkung nähert sich der eines Balkens an, welcher die kürzere Plattenlänge L überspannt.

In Verbundglasplatten geht mit zunehmender Aktivierung der Membranspannungen die versteifende Wirkung des Verbundes verloren, da die Übertragung der Schubkräfte zwischen den Einzelscheiben nur durch Biegung der Platte verursacht wird. Da sich bei geringen Schubmoduln der Zwischenlage früher günstig wirkende Membrankräfte ausbilden, können in

einer Verbundglasplatte mit steifer Zwischenlage in besonderen Fällen auch höhere Spannungen als in Verbundglasplatten ohne Folienverbund auftreten. Mit einer nichtlinearen Berechnung von Verbundglasplatten ohne Berücksichtigung des Verbundes liegt man demnach nicht immer auf der sicheren Seite [Kutterer 2003], [Gräf 2003].

Das Verbundtragverhalten von zweischichtigen Verbundglasplatten mit vierseitiger gelenkiger Lagerung wurde ausführlich von [Kutterer 2003] untersucht. Basierend auf einer Näherungslösung für Verbundglasbalken und geometrisch nichtlinearen FEM-Berechnungen hat der Autor zwei Näherungsformeln zur linearen und nichtlinearen Berechnung der maximalen Spannung (Hauptzugspannung) in Verbundglasplatten mit konstanter Flächenlast q entwickelt.

In dieser Arbeit wurden für einige Plattenformate $\alpha = b/L$ und Plattenschlankheiten $\lambda = L/(2h)$ die beiden Näherungsformeln für die lineare und nichtlineare Berechnung der maximalen Spannung ausgewertet und verglichen. Wie bei [Kutterer 2003] erfolgt die Darstellung der Ergebnisse mit der dimensionslosen normierten Spannung σ^* nach Gleichung (3.20) und der normierten Flächenlast q^* nach Gleichung (3.21).

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{E_{Glas}} \left(\frac{L}{2h} \right)^2 \tag{3.20}$$

$$q^* = \frac{q}{E_{Glas}} \left(\frac{L}{2h} \right)^4 \tag{3.21}$$

Mit den auf der sicheren Seite liegenden Näherungsgleichungen nach [Kutterer 2003] kann eine Bemessung von Verbundglasplatten entweder linear mit Ansatz des Verbundes ($G > 0$) oder nichtlinear ohne Verbund ($G = 0$) erfolgen. Bei geringer Durchbiegung der Platte (d. h. $q^* < 5$) ergibt eine lineare Berechnung unter Ansatz des Verbundes i. d. R. geringere Spannungen als eine nichtlineare Berechnung. Im Gegensatz dazu liefert bei großer Durchbiegung der Platte ($q^* > 5$) eine nichtlineare Berechnung auch ohne Ansatz eines Verbundes geringere Spannungen.

In Bild 3-10 ist das Ergebnis der Näherungsformeln als dimensionsloser Quotient der normierten Spannung σ^* zur normierten Flächenlast q^* wiedergegeben. Da die lineare Spannungsberechnung unabhängig von der Belastung ist und die Näherungsformel für die nichtlineare Berechnung der maximalen Spannung in Verbundglasplatten nur vom Seitenverhältnis α der Platte und der normierten Flächenlast q^* abhängt, können beide Berechnungsmethoden in einem Diagramm dargestellt werden, wenn auf der Abszisse entweder der Schubmodul G der Zwischenlage (lineare Berechnung mit Verbund) oder die normierte Flächenlast q^* (nichtlineare Berechnung ohne Verbund) aufgetragen wird.

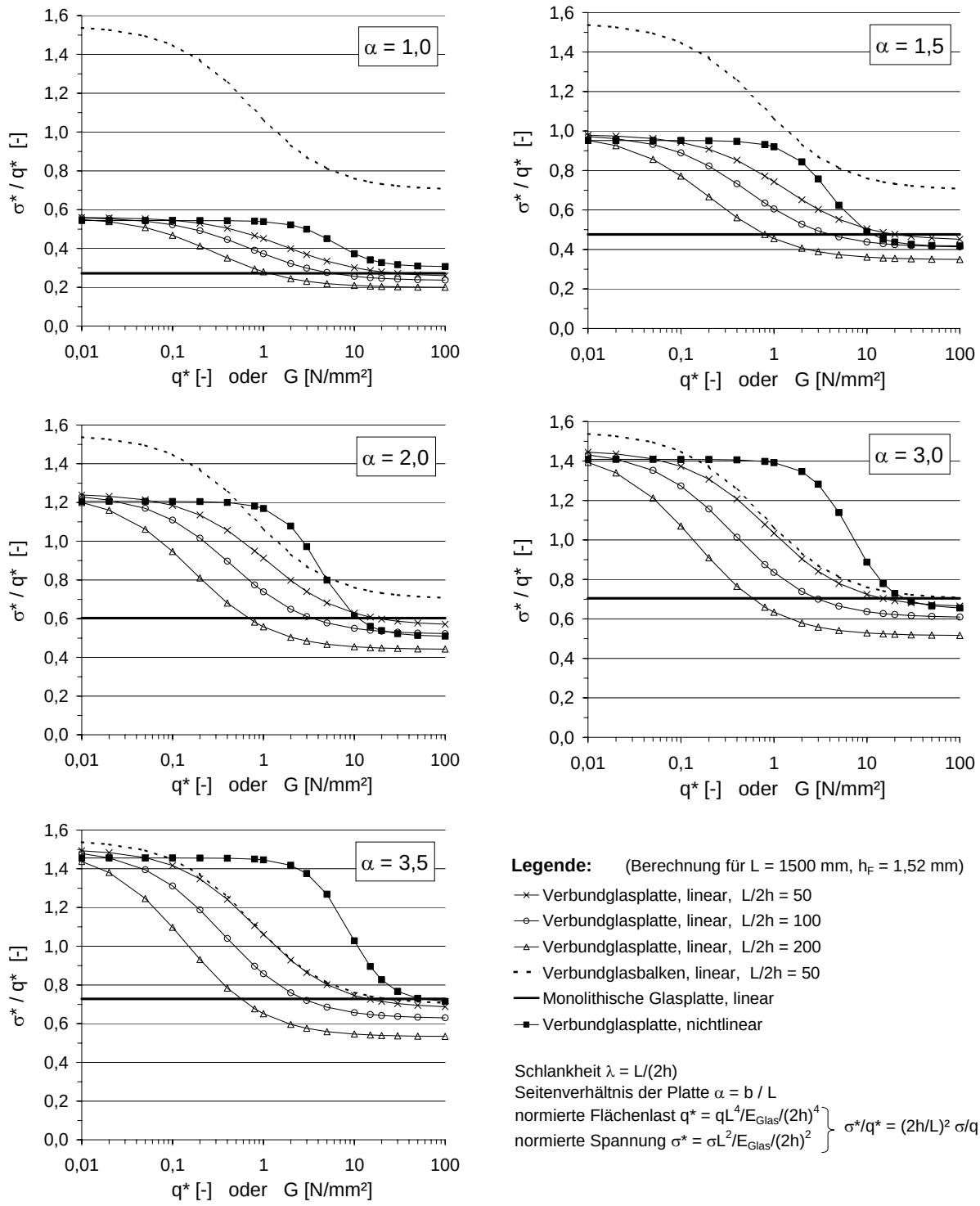


Bild 3-10: Normierte und lastbezogene maximale Hauptzugspannung σ*/q* in Verbundglasplatten und Verbundglasbalken unterschiedlicher Schlankheit λ = L/(2h) in Abhängigkeit vom Schubmodul G der Zwischenlage (bei linearer Berechnung) oder der normierten Flächenlast q* (bei nicht-linearer Berechnung), nach [Kutterer 2003]

Die Berechnungsmethode die den kleineren Quotient σ^*/q^* liefert, führt zu einer wirtschaftlicheren Bemessung der Glasscheiben. Bei einem Schubmodul von 0,4 N/mm² ergibt z. B. eine lineare Berechnung einer Verbundglasplatte mit der Schlankheit von $\lambda = 100$ bis zu einer normierten Last von $q^* \approx 4$ bei allen Plattenformaten eine geringere maximale Spannung als eine nichtlineare Berechnung ohne Verbund.

Die Kurven der Verbundglasplatten und Verbundglasbalken wurden für die Stützweite (bzw. kurze Plattenlänge) L = 1500 mm berechnet. Bei größeren Stützweiten ($L \leq 3200$ mm) ergeben sich bei gleicher Schlankheit um bis zu 5 % geringere Quotienten σ^*/q^*. Je größer das Seitenverhältnis der Platte ist, um so mehr nähern sich die Spannung der linearen Plattenberechnung den Spannungen eines Verbundglasbalkens der Stützweite L an. Ab $\alpha > 3$ können Verbundglasplatten mit kleinen Durchbiegungen somit auch mit einer Balkenberechnung nach Kapitel 3.2.1 wirtschaftlich bemessen werden.

Der Einfluss von Schubverbund und nichtlinearer Berechnung auf die Höhe der "effektiven Spannungen" zur Bemessung von Verbundglasplatten auf Grundlage der Bruchwahrscheinlichkeit (siehe dazu z. B. [Güsgen 1998]) wurden von [Kutterer 2003] nicht untersucht. Nach [Duser 1999] besitzen Verbundglasplatten mit weicher und sehr dünner Zwischenschicht einen ähnlich hohen Bruchwiderstand, d. h. ähnlich hohe "effektive Spannungen", wie monolithische Glasplatten. Bei dicken Zwischenlagen kann der Bruchwiderstand von Verbundglasplatten ($h_{ges} = 2h + h_F$) sogar höher sein, als die von monolithischen Glasplatten der Dicke 2h.

3.3 Beurteilung der Biegeversuche zur Ermittlung des Schubmoduls von PVB-Folien

Zur Bestimmung des Schubmoduls von PVB-Folien eignen sich Biegeversuche aufgrund ihrer einfachen Durchführbarkeit. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei sehr weichen und sehr steifen Zwischenlagen aufgrund der hohen Sensitivität der Versuchsauswertung große Streuungen des indirekt ermittelten Schubmoduls zu erwarten sind. Ohne Bestimmung des E-Moduls der Einzelscheiben, bzw. ohne Kalibrierung der Messeinrichtung mit realen Versuchskörpern ist bei steifen Folien bzw. tiefen Temperaturen und kurzen Belastungszeiten eine quantitative Bestimmung des Schubmoduls i. d. R. nicht möglich (siehe z. B. [Schuler 2003]).

Bei Scherversuchen ist die Streuung des Schubmoduls allein durch die Güte der Messeinrichtung bzw. Messgenauigkeit der Wegaufnehmer bestimmt. Gegenüber Scherversuchen haben Biegeversuche jedoch den Vorteil, dass ihr Versuchsaufbau vergleichsweise einfach ist und sie eher das reale Tragverhalten von auf Biegung beanspruchten großformatigen Bauteilen widerspiegeln.

Zur Bestimmung des Schubmoduls von PVB-Folien bei tiefen Temperaturen und kurzen Belastungszeiten (d. h. hoher Schubmodul) weisen Torsionsversuche mit konstantem Torsionsmoment gegenüber Biegeversuchen eine vergleichsweise geringe Sensitivität bzw. eine geringere Streuung des Schubmoduls auf. Sie eignen sich daher besonders zur Bestimmung des Schubmoduls von steifen Zwischenlagen. Bei höheren Temperaturen und langen Belastungszeiten ($G < 2$ N/mm²) streuen die Ergebnisse jedoch stärker als bei Biegeversuchen.

4 Alterung von PVB als Zwischenlage in Verbundsicherheitsglas

4.1 Einführung

Alle Materialien altern, da sie nach der Definition in [DIN 50035] irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Änderungen unterliegen. Diese zeitabhängigen Änderungen können sich auf die Oberfläche von Materialien beschränken (z. B. Korrosion, Karbonatisierung von Beton) oder nach einer bestimmten Zeit auch das gesamte Bauteil betreffen. Bei organischen Stoffen wie Kunststoffen (Polymere), Textilien und Papier verschlechtern Alterungsvorgänge die Produkteigenschaften wie Farbe, Transparenz, Steifigkeit, Zugfestigkeit und Bruchdehnung schon in relativ kurzer Zeit. Ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen können einige Kunststoffe bereits in wenigen Monaten oder Jahren beim Einsatz im Freien unter gemäßigten klimatischen Bedingungen so weit degradieren, dass sie unbrauchbar werden. Es besteht daher ein großes Interesse an der Ermittlung der Lebensdauer von Kunststoffen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Umwelteinflüsse. In der Erforschung der Alterung von Polymeren wird als Lebensdauer üblicherweise die relative Abnahme einer beliebigen Materialeigenschaft auf ein festzulegenden Bruchteil (z. B. 50 %, "Halbwertszeit") der Ausgangseigenschaft definiert [Gugumus 1995]. Für PVB in Verbundsicherheitsglas könnte beispielsweise die Transparenz, die Zugfestigkeit oder der Schubmodul der Folie als Materialeigenschaft für die Ermittlung der Lebensdauer gewählt werden. Für die Prüfung der Eignung eines Kunststoffes als tragendes Bauteil muss diese Definition der Lebensdauer modifiziert werden, da für diese Produkte Bemessungswerte zu definieren sind, welche während der gesamten Nutzungsdauer mit einer festgelegten Sicherheit nicht unterschritten werden.

Eine schematische Übersicht der vielfältigen Ursachen, Prozesse und Wirkungen der Alterung von Kunststoffen zeigt Tabelle 4-1. Bei der Alterung wird zwischen chemischer und physikalischer Alterung unterschieden. Die chemischen Alterung umfasst alle irreversiblen Vorgänge, die zu einer Änderung der Molekülstruktur durch Spaltung von Bindungen und Bildung neuer, im Ausgangsmaterial nicht vorkommender, chemischer Verbindungen führen. Größtenteils wird die Alterung durch äußere Einflüsse während der Nutzungsdauer der Kunststoffe verursacht. Alterung kann aber auch durch die Materialzusammensetzung und die Herstellung des Polymers ausgelöst oder verstärkt werden. Industrielle Kunststoffe enthalten aufgrund des Herstellungsprozesses niedermolekulare Bestandteile oder Verunreinigungen (z. B. Reste von Katalysatoren). Wenn die Polymerbildung unvollständig abgelaufen ist, können zudem nicht verbrauchte Chemikalien im Kunststoff verbleiben. Auch die hohen thermischen und mechanischen Belastungen während der Umformung zu Fertigprodukten führen zu einer Alterung des Materials.

Tabelle 4-1: Übersicht der Alterungsursachen und Alterungsprozesse von Polymeren

	Chemische Alterung	**Physikalische Alterung**	
Ursachen	Irreversibel	Irreversibel	Reversibel
Atmosphärische Alterung			
Sonnenstrahlung (UV)	Photochemische Alterung bzw. Zersetzung (Photolyse)		
Wärme	Thermische Alterung bzw. Zersetzung (Thermolyse)	Ausscheidung und Verflüchtigung von Inhaltsstoffen (z. B. Weichmacher, Wasser), Mikrorissbildung	
Sauerstoff	Photooxidation, thermische Oxidation		
Feuchtigkeit, Wasser	Hydrolyse, Verlust von Adhäsion	Mikrorissbildung bei Änderung des Wassergehalts	Wasseraufnahme, Quellung
Luftschadstoffe (SO_x, NO_x,O_3)	Oxidation, Ozonrissbildung		
Herstellungsbedingte Alterung			
Unvollständige Polymerbildung, Prozessbedingte Verunreinigung, Mangelnde Verträglichkeit von Inhaltsstoffen	Initiierung oder Förderung chemischer Alterungsprozesse	Entmischung, Nachkristallisation	
Sonstige Alterungsursachen			
Chemikalien, Kontakt mit anderen Werkstoffen, Mikroben, ionisierende Strahlung	Aufspaltung molekularer Bindungen, diverse chemische Reaktionen		
Thermodynamisches Ungleichgewicht [Struik 1977]			Änderung des Kriechverhaltens bei Abkühlung unterhalb T_G
Mechanische Beanspruchungen	Spannungsriss-korrosion	(Ermüdungs-)Risse	

Die als physikalische Alterung bezeichneten Vorgänge im Material können irreversibel oder auch reversibel sein. Unter diesen Begriff der Alterung fallen solche Alterungsprozesse, welche ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung das Gefüge von Polymeren ändern. Beispiele für die irreversible physikalische Alterung sind das Ausscheiden leicht flüchtiger Inhaltsstoffe (z. B. Weichmacher) bei Erwärmung des Kunststoffes, die Bildung von Mikrorissen infolge Austrocknung und die Spannungsrisskorrosion. In [DIN 50035] wird auch die Materialermüdung (Rissbildung, Bruch) infolge äußerer mechanischer Beanspruchung dem Begriff der Alterung zugeordnet.

Mit der Nennung von reversiblen physikalischen Vorgängen in Tabelle 4-1 wird der übliche Definitionsbereich der Alterung nach [DIN 50035] erweitert. Mit der physikalischen Alterung wird bei [Struik 1977] die zunehmende Versteifung von Polymeren bezeichnet, welche auf Temperaturen unterhalb ihrer Glasübergangstemperatur T_G abgekühlt wurden. Durch erneute Erwärmung oberhalb von T_G kann diese günstige Änderung des Materialverhaltens jedoch wieder rückgängig gemacht werden. Als fundamentale Materialeigenschaft der Polymere wurde dieses Phänomen in Kapitel 2.1.10 erläutert.

Im Hinblick auf das hygroskopische Verhalten von PVB wurde in Tabelle 4-1 zudem auch die reversible Feuchtigkeitsaufnahme in die Liste der physikalischen Alterungsvorgänge aufgenommen, da sie ein wichtiger Aspekt bei Untersuchung der Alterungsbeständigkeit von VSG in Bewitterungsversuchen darstellt. Die Wasseraufnahme ist wie bei den meisten Kunststoffen zwar reversibel, sie kann jedoch in VSG zu einem irreversiblen Verlust der Adhäsion zwischen PVB-Folie und Glas führen [Savineau 2001].

Im folgenden Kapitel soll nur die in Tabelle 4-1 als "Atmosphärische Alterung" bezeichneten Ursachen und Vorgänge näher erläutert werden. Der Großteil der Literatur zur Beständigkeit von Polymeren befasst sich ausführlich mit dieser Form der Alterung, da von ihr alle Kunststoffe im Außenbereich mehr oder weniger stark betroffen sind. Die herstellungsbedingte chemische Alterung ist dann von Interesse, wenn sie die atmosphärischen Alterungsprozesse fördert oder - wie im Falle der photochemischen Alterung vieler Kunststoffe - gar erst ermöglicht. Sonstige Alterungsursachen, wie der Angriff chemischer Mittel, die Kontaktreaktionen zwischen verschiedenen Stoffen oder die ionisierende Strahlung, sind Sonderfälle und müssen für jeden speziellen Anwendungsfall eigens untersucht werden.

Bei der Verwendung als Zwischenfolie in VSG-Scheiben unterscheiden sich die Witterungsbedingungen von PVB wesentlich von denen von Kunststoffbauteilen, welche ohne mechanischen Schutz den Einwirkungen der Umwelt direkt und großflächig ausgesetzt sind. Abgesehen von elektromagnetischen Wellen, können alle äußeren Moleküle (z. B. Sauerstoff, Wasser) welche die chemische Alterung verursachen, nur an den freien Kanten der Glasscheiben mit der PVB-Folie in Kontakt treten. In das Innere des Bauteils können die Stoffe aus der Umweltatmosphäre nur langsam durch Diffusion vordringen. Es kann angenommen werden, dass das Glas während der Nutzungsdauer des Bauteils diffusionsdicht ist. Auch errosive Eigenschaften von Wassertropfen, Wind und festen Verunreinigungen der Atmosphäre können unberücksichtigt bleiben. Durch die Lage der Folie zwischen zwei Glasscheiben wird die Lebensdauer von PVB somit gegenüber einer direkten Bewitterung bereits

ohne Anwendung chemischer Schutzmaßnahmen (Zugabe von Stabilisatoren) wesentlich erhöht.

4.2 Atmosphärische Alterung von Kunststoffen

Im Folgenden werden allgemein die wesentlichen Vorgänge bei der atmosphärischen Alterung von Polymeren infolge UV-Strahlung, Temperatur und Feuchtigkeit erläutert, wie sie z. B. ausführlich in [Dolezel 1978], [Jellinek 1978] und [Rabek 1996] behandelt werden. Spezielle Aspekte zur Alterung von PVB bzw. PVB-Folien als Zwischenschichten in Verbundsicherheitsglas werden im Anschluss daran behandelt.

4.2.1 Alterung durch UV-Strahlung

Chemischen Bindungen der Makromoleküle in Polymeren können nur durch energiereiche Photonen kurzwelliger UV-Strahlung unterhalb 400 nm gespalten werden (Photolyse). Bei den meisten Bindungen ist dazu jedoch eine Dissoziationsenergie erforderlich, welche höher ist als die Energie der auf die Erdoberfläche treffenden Photonen der natürlichen Sonnenstrahlung (Absorptionskante ca. 295 nm). In Bild 4-1 ist die Strahlungsenergie der Photonen in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge dargestellt. Zudem wurde der Mittelwert und die Bandbreite der Dissoziationsenergie aus den Angaben in [Dolezel 1978], [Jellinek 1978] und [Rabek 1996] für verschiedene typische Verbindungen in Polymeren eingetragen.

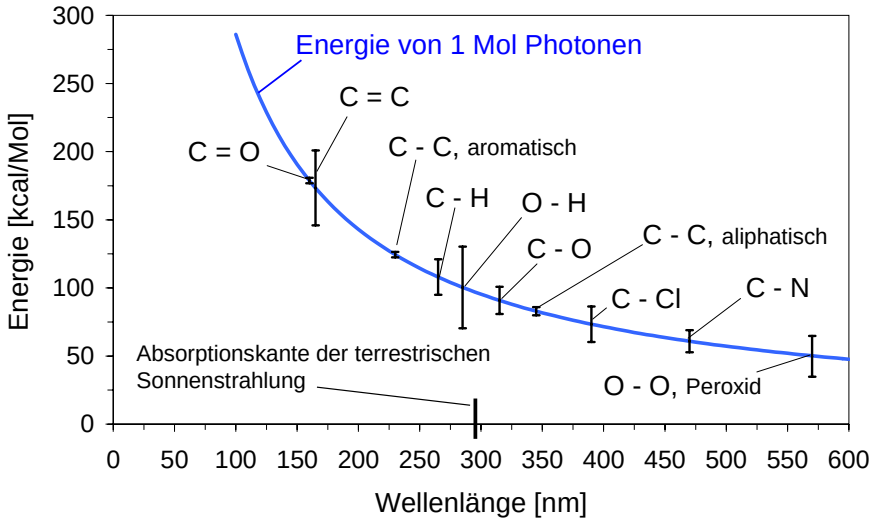


Bild 4-1: Dissoziationsenergie typischer chemischer Bindungen in Polymeren und Strahlungsenergie von Photonen (Wellenlänge)

Zur Anregung der Elektronen in den Makromolekülen und zur Auslösung der photochemischen Abbaureaktionen muss das Polymer Photonen absorbieren. Nur wenige chemische Gruppen in Kunststoffmolekülen, so genannte Chromophore, sind jedoch in der Lage UV-Strahlung oberhalb von 295 nm zu absorbieren. Dabei kann es sich um ungesättigte Verbindungen, (z. B. Carbonyl-Gruppe C=O), niedermolekulare Verunreinigungen, Farbstoffe und Rückstände aus den chemischen und thermischen Herstellungsprozessen bei der Kunststofferzeugung handeln. Erst das Absorptionsvermögen dieser chemischen Bestandteile ("Photoinitiatoren") ermöglicht die energetische Anregung der Moleküle und - begünstigt

durch Folgereaktionen mit Sauerstoff - die Abbaureaktionen in den im reinen Zustand theoretisch photostabilen Polymeren.

Die durch Anregung der Elektronen absorbierte Energie wird entweder in Strahlung (Lumineszenz) oder Wärme umgewandelt oder innerhalb der Molekülketten selbst oder an andere Moleküle weitergeleitet (Energietransfer). Die beiden letzten Fälle führen zur photochemischen Umwandlung des Polymers, wenn die absorbierte Energie durch Spaltung des Makromoleküls an schwachen Kettengliedern oder in chemischen Reaktion mit anderen Molekülen (z. B. Sauerstoff) unter Bildung von reaktionsfreudigen Radikalen, verbraucht wird. Die unmittelbaren Folgereaktionen der Energieumwandlung werden als Primärreaktionen bezeichnet. Nach Abschluss des Energietransferprozesses wird die photochemische Reaktion entweder gestoppt („photostabile Polymere“) oder die photochemische Alterung schreitet in vielfältigen Sekundärreaktionen ("Dunkelreaktionen") der Radikale und Abbauprodukte fort.

Die Anzahl aller möglichen Reaktionen dividiert durch die Zahl der absorbierten Photonen wird als Quantenausbeute bezeichnet. Die Quantenausbeute wird durch die Struktur der Polymermoleküle, das Angebot an Reaktionspartnern, die Mobilität (Diffusionsvermögen) und den gegenseitigen Abstand der Reaktionspartner, die Wellenlänge der Strahlung und die Temperatur bestimmt. Üblicherweise ist die Quantenausbeute viel kleiner als 1,0, d. h. die meisten Photonen werden fast ohne Folgereaktionen absorbiert. Ist die Quantenausbeute in seltenen Fällen größer als 1,0, so weist dies auf eine lichtinduzierte Kettenreaktion im Polymer hin.

Wichtigster Reaktionspartner bei der photochemischen Zersetzung ist der Sauerstoff aus der Umgebungsluft, welcher durch Diffusion in die Polymermatrix eindringt. Er fördert und beschleunigt den photochemischen Umbau der Polymere durch Bildung von reaktionsfreudigen Radikalen aus angeregten Gruppen der Makromoleküle. Dies wird allgemein als Photooxidation bezeichnet. Molekülketten mit gesättigten und unverzweigten Kohlenwasserstoffverbindungen sind am beständigsten gegen Oxidation, während Polymere mit hoher Konzentration an ungesättigten Bindungen (z. B. Elastomere) auch bereits ohne Lichteinwirkung oxidieren können [Dolezel 1978]. Im Ergebnis führen die Reaktionen unter Mitwirkung der Radikale zur Spaltung von Makromolekülen und zur Vernetzung zwischen benachbarten Teilen verschiedener Molekülketten. Diese Reaktionen können auch noch in dunklen Phasen nach der Bestrahlung des Polymers ablaufen. Die Spaltung von Makromolekülen spiegelt sich in einer Verringerung des Molekulargewichts (Verkürzung der Molekülketten), einer Reduktion der Viskosität und einem Verlust der Zugfestigkeit wieder. Die Vernetzung vergrößert das Molekulargewicht und erhöht die mechanische Steifigkeit des Polymers bei gleichzeitiger Minderung der Bruchdehnung (Versprödung).

In teilkristallinen Polymeren ist die Mobilität der Reaktionspartner und des Sauerstoffs in den kristallinen Regionen aufgrund der höheren Moleküldichte behindert. Photooxidative Vorgänge spielen sich demnach bevorzugt in den amorphen Regionen dieser Polymere ab [Rabek 1996].

In photochemischer Hinsicht bedeutend ist die Bildung von ungesättigten Carbonylgruppen C=O bei der Kettenspaltung infolge Photooxidation [Jellinek 1978]. Die Konzentration dieser

ungesättigten Verbindungen ist ein Indikator für das Ausmaß der Alterung und kann mit Hilfe der Infrarot-Spektroskopie bestimmt werden. Aufgrund des Absorptionsvermögens dieser Gruppe im ultravioletten Bereich und der Tatsache, dass die Kettensspaltung bevorzugt an Stellen mit Carbonylgruppen stattfinden können (sog. "Norrish-Typ I, II - Reaktionen"), ist die Photooxidation unter Bildung von Carbonylgruppen ein autokatalytischer Prozess [Reinöhl 1981]. Eine ähnliche Bedeutung für die beschleunigte Alterung von Polymeren hat die Hydroperoxid-Gruppe O-O-H. Auch sie ist gleichzeitig Initiator und Abbauprodukt von oxidativen Prozessen bei der Alterung von Polymeren [Davis 1983].

4.2.2 Alterung durch Erwärmung

Während die photooxidativen Reaktionen durch selektive Absorption und Anregung bestimmter Molekülgruppen verursacht werden, wird die innere Energie des Polymers durch Erwärmung kontinuierlich erhöht, wobei die Makromoleküle in höhere Schwingungszustände versetzt werden. Wird dabei eine bestimmten Energieschwelle überschritten, kann dies zu oxidativen Reaktionen unter Mitwirkung energiereicher Radikale und gar zur Spaltung von Molekülketten führen (Thermolyse). Bei vielen Kunststoffen kann diese Form der Alterung schon bei der Herstellung und Formgebung unter hohen Temperaturen auftreten. Bei Temperaturen unter 100 °C und bei Abwesenheit von Alterungsreaktionen durch ultraviolette Strahlung sind die meisten Kunststoffe jedoch sehr stabil. Eine vergleichsweise mäßige Erwärmung amorpher oder teilkristalliner Polymere kann jedoch die Photooxidation fördern, wenn die innere Energie des Polymers über den Glasübergangsbereich hinaus angehoben wird. Oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G erhöht sich die Mobilität des Sauerstoffs und der niedermolekularen Reaktionsprodukte zwischen den Makromolekülen, so dass photooxidative Reaktionen, ähnlich stark wie in gelösten Polymeren, begünstigt werden [Rabek 1996]. Zudem wird durch die Erwärmung die zur Auslösung photochemischer Reaktionen erforderliche Aktivierungsenergie überwunden. Nach [Krebs 1999] beschleunigt eine Temperaturerhöhung von 10 Kelvin die Geschwindigkeit der photooxidativen Abbaureaktionen ungefähr um den Faktor 2. Thermische und photooxidative Alterung verstärken sich also gegenseitig.

4.2.3 Alterung durch Feuchtigkeit

Bei hoher Umgebungsfeuchte nehmen Kunststoffe verstärkt Wasser auf und lagern dieses in ihrem Gefüge ein. Bei Affinität zwischen polaren Gruppen der Polymermoleküle und dem Dipol des Wassermoleküls wird Wasser teils im freien Volumen, teils zwischen den schwach gebundenen Molekülketten eingelagert, was im letzteren Fall zur Quellung des Kunststoffes führt [Pütz 1977], [Lutterbeck 1984]. Dieser Prozess ist in der Regel reversibel, denn bei Trocknung wird das Wasser unter Schrumpfung des Kunststoffes wieder ausgeschieden. Bei der Quellung oder Schrumpfung entstehen Eigenspannungen, welche zu Mikrorissen führen können. Durch die Anlagerung von Wasser zwischen den Molekülketten erweichen die meisten Kunststoffe. Die Wasseraufnahme wirkt in diesen Fällen wie die Zugabe von Weichmachern. Die zeitliche und örtliche Änderung der Wasserkonzentration c(x,t) wird durch das 2. Fick’sche Diffusionsgesetz nach Gleichung (4.1) beschrieben, das für den eindimensionalen Fall wie folgt lautet [Crank 1975]:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \tag{4.1}$$

Konzentrationsunterschiede im Wassergehalt zwischen Luft und Polymer führen zu einer zeitabhängigen Diffusion der Wassermoleküle in den Kunststoff. Die Geschwindigkeit der Diffusionsvorgänge wird durch den Diffusionskoeffizient D in Gleichung (4.1) bestimmt. Dieser Koeffizient ist bei Polymeren abhängig von der Temperatur, dem Aufbau der Moleküle und dem Molekulargewicht, aber weitgehend unabhängig von mechanischen Beanspruchungen. Eine Erhöhung der Temperatur erhöht die Beweglichkeit der Molekülketten und beschleunigt die Diffusion durch temperaturbedingte mikroskopischen Dichteänderungen in amorphen Regionen. Eine ähnliche diffusionsfördernde Wirkung hat die Zugabe von Weichmachern.

In wenigen Fällen, z. B. bei Polyester, führt die Einwirkung von Wasser zur Aufspaltung von schwachen chemischen Bindungen (Hydrolyse) und zur Auflösung des Polymers. Warmes Wasser und laugen- oder säurehaltiges Wasser fördern diese Zersetzung. Die Wirkung der Feuchtigkeit ist bei einer Temperatur des Kunststoffes oberhalb von T_G wiederum stärker als unterhalb von T_G [Rabek 1996].

In Verbundwerkstoffen (z. B. glasfaserverstärkte Laminate) wird die Wasseraufnahme durch Fehlstellen zwischen Kunststoffmatrix und Verstärkungsfasern begünstigt. Eindringendes Wasser kann die Adhäsion zwischen Harz und Faserwerkstoff stören und osmotischer Druck oder Gefrierdruck in mikroskopischen Hohlräumen kann zu Rissen an der Grenzfläche zwischen Kunststoffmatrix und Faser führen [Lutterbeck 1984].

Hohe Luftfeuchtigkeit in Kombination mit der oxidativen Wirkung von Strahlung und Wärme bewirken in der Regel eine Verstärkung der Alterungseffekte. In einigen Fällen kann dieses Zusammenwirken aber auch zu einer Verbesserung der Materialeigenschaften führen, wie z. B. bei Hart-PVC [Dolezel 1978].

4.2.4 Sonstige Alterungseinflüsse

Luftschadstoffe:

Abgasen wie SO_2 und NO_2 in der Umgebungsatmosphäre führen bei einigen Polymeren zur chemischen Alterung. Ähnlich wie bei der Photooxidation unter Mitwirkung von Sauerstoff werden dabei Molekülketten durch Bildung von Radikalen gespalten oder vernetzt [Jellinek 1978]. Bei Gummi bewirkt bereits der geringe Gehalt an bodennahen Ozon eine Versprödung und führt zur Bildung von Spannungsrissen.

Mechanische Beanspruchung:

Eine mechanische Beanspruchung kann neben der physikalischen Alterung auch die chemische Alterung fördern, da sie die Energieniveaus der molekularen Bindungen erhöht und somit zur Aktivierung chemischer Reaktionen beiträgt. Zusammen mit korrosiven Einflüssen der Atmosphäre können äußere mechanische Beanspruchungen oder Eigenspannungen zur Spannungsrisskorrosion führen oder bei Elastomeren Ozonrisskorrosion verursachen.

Materialdicke:

Da das Angebot an Sauerstoff und die Geschwindigkeit seiner Diffusion im Polymer ein wesentlicher Faktor für die Photooxidation ist, sind in der Regel nur die Oberflächen von Kunststoffen bis zu einer maximalen Tiefe von 1 mm von der Alterung betroffenen [Rabek 1996]. Die Verringerung der Zugfestigkeit ist somit in dünnen Kunststofffolien größer als in dickwandigen Produkten.

4.3 Schutz vor Alterung durch Stabilisatoren

Zum Schutz gegen Alterung durch thermische Oxidation oder Photooxidation werden den meisten industriellen Kunststoffen in geringen Mengen Stabilisatoren hinzugefügt (ca. 0,02 bis 1,5 %). Die beiden wichtigsten Gruppen dieser Additive sind Antioxidanten (Bindung und Deaktivierung der bei der Oxidation entstehenden Radikalen) und UV-Stabilisatoren (Absorption der Strahlung, Bindung von Radikalen, Deaktivierung energetisch angeregter Molekülgruppen) [Krebs 1999]. Diese Stoffe bremsen oder beenden die photochemischen Reaktion durch Umwandlung der absorbierten Energie in Wärme. Von Bedeutung für die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Stabilisatoren ist ihre Größe und ihr molekularer Aufbau, welcher ihr Diffusionsvermögen im Kunststoff, ihre Verträglichkeit mit dem Polymer, ihr Absorptionsvermögen und ihre Abbaurate bei Bewitterung bestimmt.

Durch den üblichen Einsatz von Stabilisatoren gegen thermische und photoinduzierte Oxidation in Polymeren wird die Lebensdauer von Kunststoffen wesentlich verlängert. Beispielsweise haben Untersuchungen an dünnen Folien aus Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) (teilkristalline Thermoplaste) gezeigt, dass durch die Zugabe von UV-Stabilisatoren die Lebensdauer der Folien um den Faktor 5 bis 10 und höher verlängert werden kann [Gugumus 1995]. Bei möglichst reinen Polymeren wurde dabei eine lineare Funktion bzw. eine Potenzfunktion als Korrelation zwischen der Konzentration der Stabilisatoren und der Lebensdauer von künstlich bewittertem PP bzw. PE gefunden. Diese Ergebnisse würden eine Abschätzung der Lebensdauer der untersuchten Folien auf Grundlage des Gehalts an Stabilisatoren erlauben.

4.4 Spezielle Aspekte zur Alterung von PVB-Folien

4.4.1 Alterung von PVB durch UV-Strahlung

Während zur Alterung bzw. Photooxidation durch Sonnenstrahlung von häufig verwendeten Kunststoffen, wie z. B. PVC, PE und PP viele Untersuchungen zur Änderung der Materialeigenschaft vorliegen, gibt es zur Alterung von PVB-Folienmaterial und ihrer chemisch-physikalischen Auswirkung in der Literatur nur sehr wenige Angaben.

In [Reinöhl 1981] wurde die Photooxidation von dünnen Filmen aus PVB-Lösungen und von einer PVB-Folie mit Weichmacher aber ohne UV-Stabilisator untersucht. Dabei wurde die Änderung der Molekülstruktur, der molekularen Bindungen, der Molekülmasse und der Zugfestigkeit des Polymers gemessen. Die Bestrahlung der Proben erfolgte bei 40 °C durch eine Xenon-Bogenlampe und dauerte bis zu 900 Stunden. Es wurden spektroskopisch messbare Änderungen in der Molekülstruktur (Zunahme von Carbonyl-Gruppen C=O und

Abnahme der Hydroxyl-Gruppen O-H) und eine Verminderung der molekularen Masse festgestellt, welche auf strahlungsinduzierte Alterungsprozesse schließen lassen. Die Zugfestigkeit der Folienproben nahm nach 400 Stunden Bestrahlung um fast 90 % ab. Mittels UV-Spektroskopie wurde die spektrale Empfindlichkeit der Proben gegenüber Photooxidation gemessen und dabei mit zunehmender Wellenlänge eine Abnahme der Alterung festgestellt. Bei einer Wellenlänge von 369 nm bzw. 445 nm betrug die spektrale Empfindlichkeit nur noch 1/8 bzw. 1/60 des Wertes bei 326 nm. Aufgrund des fehlenden UV-Stabilisators in den Proben und der ungefilterten Bestrahlung ohne Schutz durch eine Glasscheibe, können die Ergebnisse nicht auf die gegenwärtig eingesetzten PVB-Folien in Verbundsicherheitsglas übertragen werden. Die Untersuchung zeigt jedoch, dass das reine PVB-Material ohne Schutz vor kurzwelliger Strahlung schnell fortschreitender Materialalterung durch Photooxidation unterliegt.

4.4.2 Schutz der PVB-Folie in Verbundsicherheitsglas

4.4.2.1 Absorption der UV-Strahlung im Glas

Beim Durchgang der Sonnenstrahlung durch Glasscheiben wird der kurzwellige Anteil der Strahlung je nach chemischer Zusammensetzung des Glases mehr oder weniger stark geschwächt. Diese Schwächung wird durch Absorption der UV-Strahlung durch die Sauerstoffionen des Glases und Nebengruppenelemente, wie z. B. Eisenionen, verursacht [Scholze 1988]. Reines Quarzglas (starke Bindung der Sauerstoffatome) und eisenfreies Weißglas (keine Absorption durch Eisenionen) lassen natürliche UV-Strahlung ungehindert passieren. Normales Kalk-Natronsilikatglas ist im sichtbaren Bereich und im Infrarotbereich zwischen 400 und 2500 nm optisch durchlässig. Doch schon bei sehr geringen Konzentrationen von Metall-Ionen (z. B. Chrom, Kobalt, Kupfer, Titan und Eisen), aufgrund von natürlichen Verunreinigungen der Glasrohstoffe oder Zugabe in die Glasschmelze, werden einzelne Bereiche des Spektrums durch Anregung von Elektronen absorbiert, so dass diese Gläser farbig erscheinen. Oberhalb von 2500 bis 3000 nm nimmt die Durchlässigkeit von Kalk-Natronsilikatglas ab und ist bei ca. 5000 nm für Wärmestrahlung undurchlässig.

Maßgebend für die Absorption der kurzwelligen Strahlung ist der Gehalt von Eisen (Fe_2O_3) im Floatglas, welches nach [Petzold 1990] als Verunreinigung zwischen 0,01 % ("eisenfreies Glas") 0,04 % ("eisenarmes Glas") und 0,12 % ("normales Floatglas") des Glasgewichtes vorliegen kann. Abhängig von der Ofenatmosphäre (Sauerstoffgehalt) bei der Herstellung der Glasschmelze, liegt das Eisen in unterschiedlichen Verhältnissen von zweiwertigen (Fe^{2+}) zu dreiwertigen Ionen (Fe^{3+}) vor [Scholze 1988].

In [Glebov 1998] wurde das Absorptionsverhalten von Kalk-Natronsilikatglas mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen von Eisen und bei verschiedenen Oxidationszuständen der Glasschmelze untersucht. In den Versuchen wurden spezifische Absorptionskoeffizienten [1/cm/%Fe] von Fe^{2+} und Fe^{3+} für Wellenlängen zwischen 200 und 2000 nm gefunden, siehe Bild 4-2.

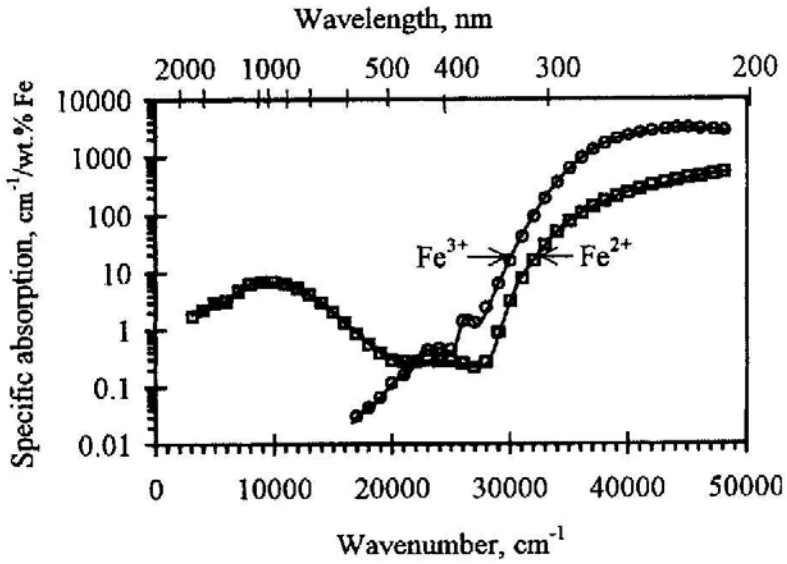


Bild 4-2: Spezifische Absorptionsspektren von Fe^{2+} und Fe^{3+} in Kalk-Natronsilikatglas, aus [Glebov 1998]

Mit diesen spezifischen Absorptionskoeffizienten, dem Gesamteisengehalt (Fe_2O_3), dem Gewichts- bzw. Redox-Verhältnis zwischen Fe^{2+}- und Fe^{3+}- Ionen und der Glasdicke, lässt sich die spektrale Schwächung der kurzwelligen Solarstrahlung berechnen. Nach [Arbab 2005] beträgt das Redox-Verhältnis - ausgedrückt als Gewichtsverhältnis von FeO (Fe^{2+}-Ionen) zu Fe_2O_3 (Fe^{3+}-Ionen) - von typischem Floatglas ca. 0,25 bis 0,30. Daraus lässt sich mit Hilfe der Atommassen folgende Beziehung für die prozentualen Gewichtsanteile von Fe^{2+}- und Fe^{3+} im Glas mit einem Redox-Verhältnis von 0,25 und einem Gesamteisengehalt (Fe_2O_3) von x % aufstellen:

$$x\,\%\ Fe_2O_3 \ \hat{=}\ (0{,}70 \cdot x)\%\ Fe \ \hat{=}\ (0{,}15 \cdot x)\%\ Fe^{2+} + (0{,}55 \cdot x)\%\ Fe^{3+} \qquad (4.2)$$

In Bild 4-3 ist auf der Grundlage von [Glebov 1998] für verschiedene Gesamteisengehalte (0,01 bis 0,20 % des Glasgewichtes) und Glasdicken (6 mm und 12 mm) der Transmissionsgrad T im UV-Bereich von üblichem Floatglas bei einem Redox-Verhältnis von 0,25 und bei senkrechtem Lichteinfall (Luft-Glas-Luft) dargestellt.

Normales Floatglas mit einer Dicke von 6 mm und mit einem Verunreinigungsgrad durch Eisenoxide von 0,12 % absorbiert demnach vollständig die solare UV-B-Strahlung (Wellenlängenbereich 280 bis 315 nm) und schützt Kunststoffe hinter der Scheibe vor photooxidativer Alterung infolge energiereicher Strahlung. 6 mm dickes Weißglas mit einem Gesamteisengehalt < 0,04 % lässt hingegen bei einer Wellenlänge von 315 nm mindestens 40 % der UV-Strahlung passieren.

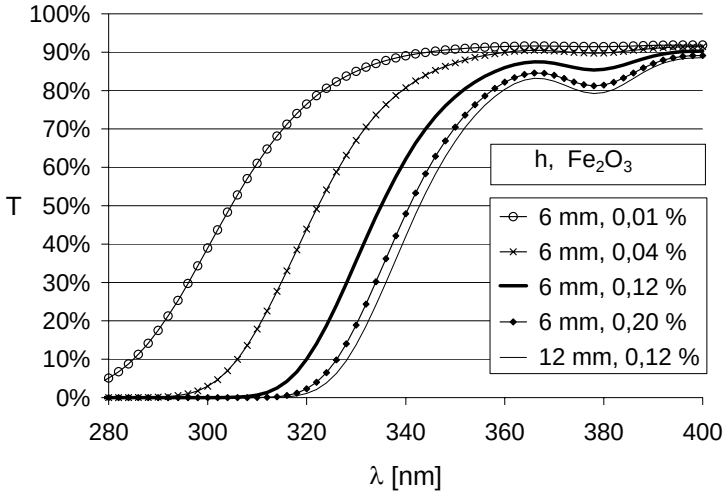


Bild 4-3: Transmissionsgrad T von Kalk-Natronsilikatglas in Abhängigkeit der Wellenlänge λ, der Scheibendicke h und des Gesamteisengehalts Fe_2O_3

Während Glas zumindest teilweise durchlässig für UV-Strahlung ist, absorbiert die PVB-Folie, bzw. die darin enthaltenen Stabilisatoren, die kurzwellige Strahlung unterhalb 360 nm nahezu vollständig (Transmissionsgrad < 2 % bei einer Foliendicke von 0,76 mm) [Glashandbuch 2005].

4.4.2.2 Reflexion der UV-Strahlung durch das Glas

Neben der Absorption wird die Sonnenstrahlung im geringeren Maß auch durch Reflexionen am Glas geschwächt. Ein zunehmender Einfallswinkel ζ gegenüber der Flächennormalen der Glasebene erhöht den Strahlungsweg im Glas und das Reflektionsvermögen an den Oberflächen des Glases. Bei senkrechtem Lichteinfall wird die Strahlung bei einem Brechungsindex des Glases von 1,52 auf jeder Seite um ungefähr 4 % vermindert. Bei vollständiger Verbindung von PVB-Folie und Glas entfällt aufgrund des annähernd gleichen Brechungsindex die Reflexion am Materialübergang (Brechungsindex PVB: 1,48).

Ausgehend von den Fresnel'schen Formeln [Hecht 1989] zur Berechnung der Reflexions- und Transmissionskoeffizienten in Abhängigkeit des Brechungsindexes und des Einfallswinkels kann die Schwächung der auf die PVB-Folie auftreffenden Strahlung berechnet werden. In Bild 4-4 ist der Transmissionsgrad der Strahlung für den Übergang Luft-Glas-PVB und den Übergang Luft-Glas-Luft (mit Berücksichtigung von Mehrfachreflexion) für einen konstanten Brechungsindex von 1,52 dargestellt. Absorptionsvorgänge im Glas wurden dabei nicht berücksichtigt. Erst ab einem Einfallswinkel $\zeta > 60°$ zeigt sich eine zunehmende Schwächung der Lichtstrahlen.

Bei großem Einfallswinkel wird der Einfluss der Schwächung durch Reflexion jedoch dadurch reduziert, dass die Bestrahlungsstärke E [W/m²] der auf die Glasscheibe treffenden Sonnenstrahlung proportional zum Cosinus des Einfallswinkels ζ abnimmt (siehe Kurve „cos ζ" in Bild 4-4).

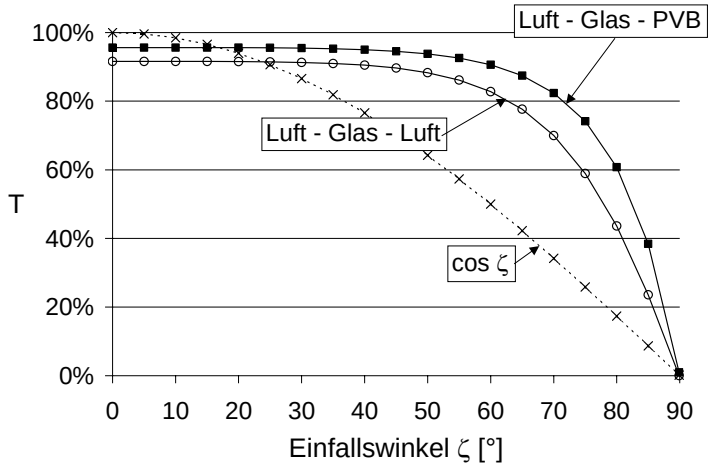


Bild 4-4: Verringerung des Transmissionsgrades T durch Reflexion an den Glasflächen und relative Änderung der Bestrahlungsstärke E ~ cos ζ

4.4.3 Alterung von PVB durch Erwärmung

Eine sechsstündige Erhitzung von PVB auf Temperaturen zwischen 50 bis 200 °C bewirkte nach [Sabaa 1995] eine proportional mit der Temperatur zunehmende chemische Alterung von PVB. Nach Abkühlung der Proben auf Raumtemperatur konnte ab einer Erhitzung auf 100 °C eine Veränderung des Absorptionsspektrum und nach einer Erhitzung auf 50 °C bzw. 150 °C eine Verminderung der Viskosität um 15 bzw. 66 % gemessen werden. Die Autoren detektierten dabei auch eine Verminderung des Acetatgehalts ab einer Erhitzung auf 100 °C und eine zunehmende Abnahme des Brechungsindexes bei einer Erhitzung zwischen 50 und 100 °C. Erklärt wurden diese Beobachtungen mit Kettenspaltungen im Bereich der C=O-Verbindung in der Acetatgruppe im PVB. Der Massenverlust oder die Auswirkungen der Erhitzung auf die mechanische Eigenschaften von PVB wurde nicht untersucht. Da die untersuchten PVB-Proben einen gemessenen Acetatgehalt von 15 bis 27 % aufwiesen, können die Ergebnisse jedoch nicht ohne weiteres auf die im Bauwesen eingesetzten PVB-Folien übertragen werden, welche einen sehr geringen Acetatanteil < 3 % aufweisen (siehe Kapitel 2.1.2).

Bei Untersuchungen in [Hay 2002] hingegen konnte bei kurzfristiger Erhitzung unterhalb von 200 °C weder eine thermische bedingte Alterung (Ausgasung) noch ein Verlust von Weichmacher (Massenverlust) in PVB registriert werden. Gegenstand der Untersuchung waren neue und recycelte PVB-Proben von drei Folienherstellern mit einem üblichen Acetatgehalt von 2 %.

Da [Thinius 1971] wiederum von einem Verlust an Weichmacher in PVB nach über 200 Stunden künstlicher Bewitterung berichtet, lässt sich aus den hier genannten Untersuchungen kein eindeutiger Schluss auf die Auswirkungen erhöhter Temperatur auf den Weichmachergehalt und die molekulare Struktur unterschiedlicher PVB-Produkte ziehen. Es ist aber anzunehmen, dass PVB-Folien, ähnlich wie andere Kunststoffe unter üblichen Umweltbedingungen im Außeneinsatz in Deutschland thermisch stabil sind, bzw. keiner irreversiblen chemischen Alterung unterliegen. Physikalische Alterungserscheinungen wie der Verlust von

Feuchtigkeit bei Austrocknung der Folie oder die Ausgasung leicht flüchtiger Weichmacheranteile können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

4.4.4 Alterung von PVB durch Feuchtigkeit

Aufgrund der polaren Hydroxylgruppe des Polyvinylalkohols, verhält sich PVB hygroskopisch und nimmt proportional zur relativen Luftfeuchtigkeit Wasser aus der umgebenden Atmosphäre auf. Ähnlich wie die Zugabe eines Weichmachers erhöht die Wasseraufnahme die Beweglichkeit zwischen den Molekülketten und führt zu einer Erweichung der PVB-Folie. Im Gegenzug führt eine Trocknung der Folie zu einem Verlust an gelöstem Wasser und somit zu einer Versteifung der PVB-Folie. Bei der Aufnahme und Abgabe von Wasser handelt es sich nach Tabelle 4-1 um eine vorwiegend reversible physikalische Alterung.

Durch Anlagerung von Wasserdipolen an die polaren Silanolgruppen der Glasoberfläche werden außerdem die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Hydroxylgruppen der PVB-Folie und der Glasoberfläche geschwächt. Dies vermindert die Adhäsion zwischen Folie und Glas. Durch die Wasseraufnahme kann in einem schmalen Randbereich einer VSG-Scheibe der Wassergehalt in der PVB-Folie von herstellungsbedingt 0,4 bis 0,5 % (bei ca. 25 % relativer Luftfeuchtigkeit) auf bis zu 2 bis 3 % (bei über 95 % relativer Luftfeuchtigkeit) ansteigen [Keller 1999], [DeJackome 1997]. Dieser hohe Wassergehalt führt zur Trübung der Folie und zur irreversiblen Delamination von der Glasfläche. Bereits ein Wassergehalt von ca. 1 bis 1,5 % kann im "Pummeltest" (vgl. Kapitel 2.2.1) einen Wert von 0 ergeben, was einen totalen Verlust der Adhäsion zwischen PVB-Folie und Glas bedeutet.

Tabelle 4-2: Feuchtegehalt der PVB-Folie von VSG-Proben nach künstlicher und natürlicher Bewitterung, nach [Ensslen 2005]

Versuchsserie, Bezeichnung nach [Ensslen 2005]	Feuchtegehalt 1 cm vom Rand	Feuchtegehalt 5 cm vom Rand
2 Wochen Klimawechselkammer, „Serie B6“ (16 h: 26 °C, 95 % rel. LF, 8 h: -30 °C, 50 - 60 % rel. LF)	0,8 %	0,6 %
2 Wochen Klimawechselkammer, „Serie B7“ (16 h: 80 °C, 95 % rel. LF, 8 h: -30 °C, 50 - 60 % rel. LF)	1,3 %	0,6 %
4 Wochen Klimawechselkammer, „Serie C5“	1,8 %	0,8 %
6 Wochen Klimawechselkammer, „Serie C5“	1,9 %	1,2 %
3 Jahre natürliche Bewitterung in Troisdorf (Köln)	1,0 %	0,6 %
3 Jahre natürliche Bewitterung in Florida, USA	1,3 %	0,8 %
3 Jahre natürliche Bewitterung in Arizona, USA	0,6 %	0,5 %

In [Ensslen 2005] wurde in einem umfangreichen Messprogramm der Feuchtegehalt der PVB-Folie in künstlich und natürlich bewitterten Schubproben aus VSG untersucht. Aus einigen Versuchsserien ist in Tabelle 4-2 der mittlere Feuchtegehalt nach der jeweiligen Bewitterungszeit in einem Abstand von 1 bzw. 5 cm vom Rand der Proben angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass bei kurzfristigen Bewitterungsversuchen nur ein Zusammenwirken von hoher Luftfeuchtigkeit und hoher Temperatur zur einer Delamination der PVB-Folie im Randbereich einer VSG-Scheibe führen kann. Nach mehrjährigen Bewitterungszeiten im Außenbereich kann die Luftfeuchtigkeit ca. 5 bis 8 cm tief in die VSG-Scheibe eindringen.

4.5 Atmosphärische Alterungseinflüsse

4.5.1 Solare Einstrahlung im UV-A Bereich in Deutschland

4.5.1.1 Allgemeines

Aufgrund der mit zunehmender Wellenlänge stark abnehmenden Alterungsempfindlichkeit von PVB (Kapitel 4.4.1) und des Absorptionsvermögen von üblichem Floatglas im UV-B-Bereich (Kapitel 4.4.2.1), ist die UV-A-Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 315 und 400 nm von besonderem Interesse für die photooxidative Alterung von PVB in Verbundsicherheitsglas.

Deshalb wird im Folgenden anhand von Messdaten der Globalstrahlung und der UV-Strahlung die Bestrahlungsstärke im UV-A-Bereich in Deutschland ermittelt. Die jährliche natürliche Strahlungsdosis wird dann in Kapitel 4.7.1 mit der Strahlungsbelastung der eigenen Versuche zur künstlichen Bewitterung verglichen.

Die extraterrestrische Sonnenstrahlung trifft mit einer mittleren Bestrahlungsstärke von 1367 W/m² auf die Erde und wird beim Durchgang durch die Atmosphäre geschwächt. Ursache dafür ist die wellenlängenabhängige Streuung der Photonen an Luftmolekülen ("Rayleigh-Streuung"), die Streuung und Absorption an Aerosolen und die Absorption durch Ozon, Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid [Schulze 1970], [Duffie 1991]. Darüber hinaus hängt die Intensität der Globalstrahlung wesentlich von der Bewölkung und der optischen Dicke der Wolken ab.

Die am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 295 und 2500 nm wird als Globalstrahlung bezeichnet und gilt definitionsgemäß nur für horizontale Empfängerflächen. Sie setzt sich aus direkter Strahlung und diffuser bzw. gestreuter Strahlung zusammen. Da die Streuwirkung der Rayleighstreuung mit der vierten Potenz der Wellenlänge abnimmt, ist der ultraviolette Anteil an der diffusen Strahlung höher als an der direkten Sonnenstrahlung. Je flacher der Einstrahlwinkel zwischen Sonne und Horizont und je stärker die Bewölkung ist, um so höher ist der Anteil der diffusen Strahlung an der Globalstrahlung.

Die spektrale Verteilung der Globalstrahlung für 12:00 Uhr Wahre Ortszeit (= höchster Stand der Sonne) an einen wolkenlosen Tag (21. Juni) in München (48,1° N, 11,6° O, 493 m ü. NN) ist zusammen mit dem Spektrum der extraterrestrischen Strahlung und der diffusen Strahlung in Bild 4-5 dargestellt. Das Spektrum wurde nach dem für die Bedingungen in Deutschland

entwickelten Strahlungsmodell [VDI 3789-3] berechnet. Dabei wurden die im Bild 4-5 angegebenen empirischen Mittelwerte des Wassergehalts, des Ozongehalts, der atmosphärischen Trübung durch Aerosole ("Trübungsfaktor nach Linke") für den Monat Juni nach [VDI 3789-3] verwendet. Sichtbar ist die Reduktion der Solarstrahlung durch Rayleigh-Streuung (< 600 nm), Streuung an Aerosolen (gesamtes Spektrum) und Ozonabsorption (< 350 nm), sowie die starken Absorptionsbande des Wasserdampfes und des Kohlendioxids im langwelligen Bereich (> 700 nm). Im UV-A-Bereich ab 315 nm ist die Absorption durch Ozon vernachlässigbar gering.

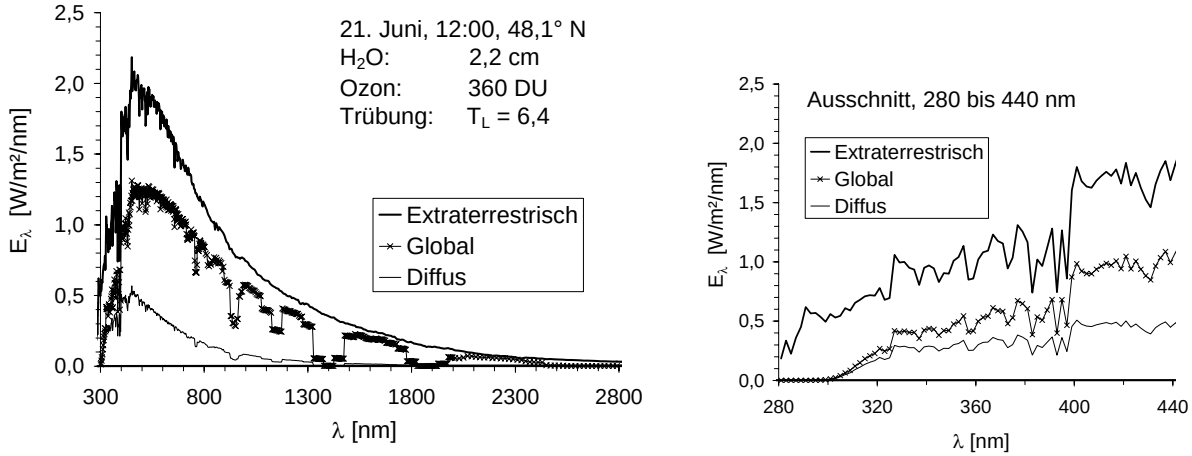


Bild 4-5: Spektrum der extraterrestrischen, globalen und diffusen Sonnenstrahlung nach [VDI 3789-3] (links), vergrößerter Ausschnitt im Wellenlängenbereich von 280 bis 440 nm (rechts)

4.5.1.2 Beziehung zwischen Globalstrahlung und UV-A-Strahlung

Die Globalstrahlung (siehe Kapitel 4.5.1.1) wird in Deutschland regelmäßig an vielen Orten durch den Deutschen Wetterdienst gemessen. Durchschnittswerte der Globalstrahlung aus langjährigen Messreihen von 1980 bis 1994 sind in [DIN 4710] zusammengestellt. In diesem Zeitraum ergab sich im Alpenvorland (Messort: Weihenstephan bei München) mit 1124 kWh/m² (= 404,6 kJ/cm²) die höchste durchschnittliche Jahressumme der Globalstrahlung in Deutschland.

Im Gegensatz zur klinisch bedeutsamen UV-B-Strahlung (280 bis 315 nm) liegen zur UV-A-Strahlung (315 bis 400 nm) im mitteleuropäischen Raum nur wenige publizierte Messdaten vor. Verschiedene Autoren weisen aber auf die gute Korrelation zwischen täglicher Globalstrahlung und UV-A-Strahlung hin, welche eine Abschätzung der UV-A-Belastung ermöglicht. In [Feister 1992] wird der Anteil der UV-Strahlung an der Globalstrahlung für Potsdam mit 3 bis 4 % an normalen Tagen und 5 bis 6 % an bedeckten Tagen angegeben. Im langjährigen Mittel von 1953 bis 2000 betrug das jährliche Verhältnis zwischen UV-A-Strahlung und Globalstrahlung sowohl in Potsdam als auch auf dem Hohenpeißenberg (990 m ü NN) südlich von München 0,057 [Feister 2002]. Die durchschnittliche jährliche Strahlungsdosis (Dosis = zeitliche Integration der Bestrahlungsstärke) betrug 20,6 kJ/cm²/Jahr in Potsdam und 24,8 kJ/cm²/Jahr auf dem Hohenpeißenberg. Aus vierjährigen Strahlungsmessungen wurden in [Feister 2002], getrennt für die Sommermonate Mai bis Oktober und

die Wintermonate November bis April, folgende Regressionsgleichungen für die Berechnung der täglichen UV-A-Strahlungsdosis H_{UV} [J/cm²/Tag] im Wellenlängenbereich zwischen 315 und 400 nm erstellt:

$$H_{UV,\,Sommer} = 15,713 + 0,049 \cdot G + 4,190 \cdot 10^{-6} \cdot B^2 + 7,231 \cdot \frac{B}{G} - 0,259 \cdot \theta \tag{4.3}$$

$$H_{UV,\,Winter} = 24,914 + 0,037 \cdot G + 1,595 \cdot 10^{-5} \cdot B^2 - 0,259 \cdot \theta \tag{4.4}$$

G: tägliche Dosis der Globalstrahlung [J/cm²/Tag]
B: tägliche Dosis der diffusen Strahlung [J/cm²/Tag]
θ: täglicher minimaler Zenitwinkel der Sonne [°]

Zur Berechnung der täglichen UV-Strahlendosis werden als Eingangswerte die tägliche Dosis der Globalstrahlung und der diffusen Strahlung sowie der minimale tägliche Zenitwinkel (~ 12:00 Wahre Ortszeit) benötigt.

4.5.1.3 Auswertung von UV-Messungen in München

Vom Bundesamt für Strahlenschutz ("BfS") und vom Umwelt-Bundesamt werden an vier Stationen in Deutschland täglich in sechsminütigen Abständen die UV-Strahlung und die Globalstrahlung aufgezeichnet [BfS 2000]. Eine dieser Messstationen befindet sich in Neuherberg im Norden Münchens. Von dieser Station wurden dem Autor für den Zeitraum von Juni 2004 bis Dezember 2005 Strahlungsdaten zur Verfügung gestellt [Steinmetz 2006]. Die Auswertung der UV-Strahlung erfolgte im Spektralbereich zwischen 300 und 400 nm. Diese Daten dienen als Grundlage zur folgenden Berechnung der UV-Strahlendosis für eine horizontale Ebene am Standort München. Nach [Klima 2005] war 2005 ein Jahr mit überdurchschnittlich hoher Globalstrahlung in Deutschland, mit dem Maximalwert im Raum München.

Als Beispiel ist in Bild 4-6 links der Tagesgang der UV-Strahlung (300 bis 400 nm) an den wolkenlosen Tagen 07.09.2004, 20.06.2005 und 11.12.2005 dargestellt, Diese Darstellung zeigt deutlich den Einfluss des Zenitwinkels der Sonne, welche neben der Bewölkung den wichtigsten Parameter für die Höhe der Einstrahlung darstellt. Der große Einfluss der Bewölkung ist rechts im Bild 4-6 zu sehen. Sowohl am 04.06.2005 als auch am 09.06.2005 war der Himmel die meiste Zeit bedeckt (Bedeckungsgrad 8/8 bzw. 7/8). Aufgrund der unterschiedlichen Dicke der Wolken ergaben sich aber große Unterschiede in der Strahlungsintensität. Lücken in der Wolkendecke sind durch die Strahlungsspitzen erkennbar. Teilweise ist die Bestrahlungsstärke bei Bewölkung aufgrund von Reflexionen zwischen Boden und Wolken um ca. 10 % größer als bei wolkenlosem Himmel (siehe Messung am 09.06.2005 im Vergleich zur Messung am 20.06.2005) [BfS 2000].

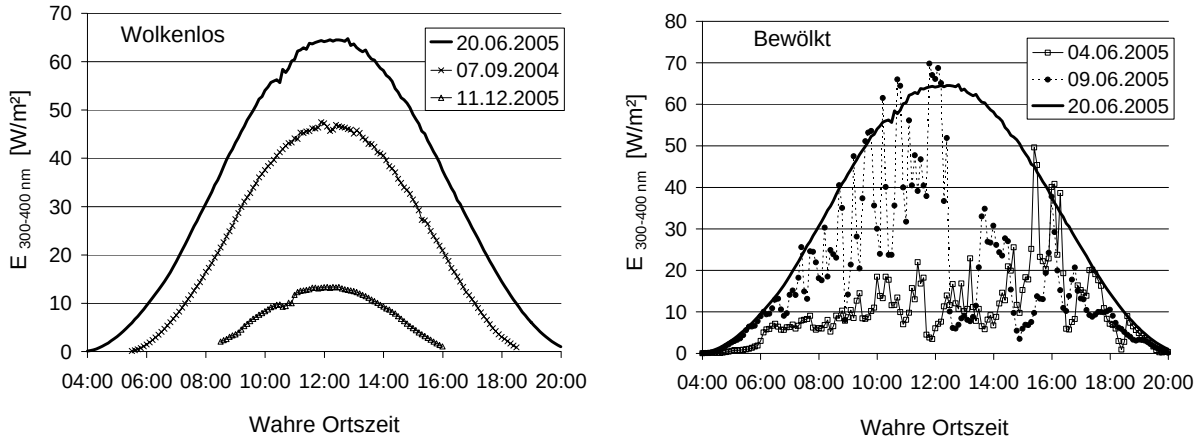


Bild 4-6: Tagesverlauf der UV-Strahlung in Neuherberg (München) an wolkenlosen Tagen (links) und an bewölkten Tagen (rechts)

Für vier verschiedene Tage um 12:00 Ortszeit sind die Spektren zwischen 300 und 400 nm links im Bild 4-7 dargestellt. Aus der Integration dieser Spektren über die Wellenlänge und über die Zeit wurde die tägliche UV-Strahlungsdosis H_{UV} ermittelt (Bild 4-7 rechts) und mit der Tagesdosis der Globalstrahlung G verglichen. Das Ergebnis des Vergleichs ist in Bild 4-8 zu sehen.

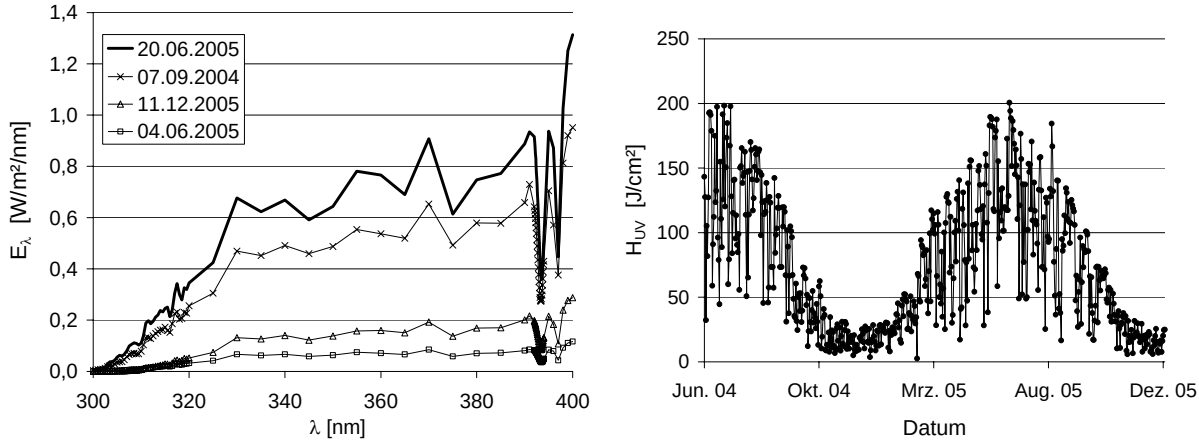


Bild 4-7: Spektrale Verteilung (links) und Tagesdosis (rechts) der UV-Strahlung in Neuherberg (München)

Das Verhältnis H_{UV}/G streut im Winter stärker als im Sommer und ist um so größer je geringer die tägliche Globalstrahlung (hoher Anteil an diffuser Strahlung) ist. Das Verhältnis ist im Monatsmittel saisonal nahezu konstant und im Mittel aller Messtage beträgt $H_{UV}/G = 6{,}2$ %. Dieser Wert liegt ca. 8 % über dem langjährigen Mittelwert nach [Feister 2002] von 5,7 %. Die Ursache der Abweichung liegt im Unterschied der unteren Integrationsgrenze des Wellenlängenbereichs (Fehler ca. 2 - 3 %) und in den normalen jährlichen und örtlichen Unterschieden des Strahlungsangebotes.

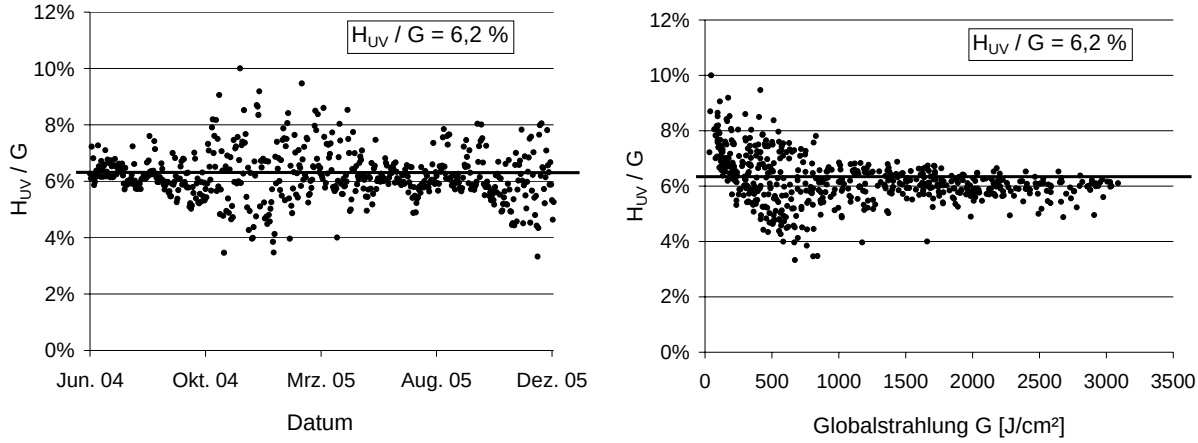


Bild 4-8: Verhältnis H_{UV} / G in Neuherberg (München), im Jahresverlauf (links) und bezogen auf die Globalstrahlung (rechts)

Mit dem höchsten langjährigen Jahresmittelwert (1980-1994) der Globalstrahlung $\overline{G}$ in Deutschland nach [DIN 4710] für Weihenstephan bei München, ergibt sich aus den Messdaten von 2004/2005 eine mittlere jährliche UV-Strahlungsbelastung $\overline{H_{UV}}$ (zwischen 300 bis 400 nm) von

$$\overline{H_{UV}} = \frac{H_{UV}}{G} \cdot \overline{G} = 0{,}062 \cdot 404{,}6 \text{ [kJ/cm²/Jahr]} = 25{,}1 \text{ [kJ/cm²/Jahr]} \quad (4.5)$$

Dieser Wert kann als maximale durchschnittliche Jahresdosis für Deutschland bis 500 m ü NN angesehen werden. In Gebirgslagen steigt die UV-A-Belastung je 1000 Höhenmeter um ca. 9 % an [Blumthaler 1997]. Für eine Umrechnung der Dosis in den nach [DIN 5031-7] definierten UV-A-Wellenlängenbereich von 315 bis 380 nm ist der Wert in Gl. (4.5) um 30 % zu reduzieren.

Bei einer Berechnung mit den Regressionsgleichungen (4.3) und (4.4) ergibt sich mit den Messwerten der Globalstrahlung aus dem Jahre 2005 eine mittlere jährliche Strahlungsdosis von 24,2 kJ/cm². Aufgrund fehlender täglichen Daten der diffusen Strahlung wurde hierbei vereinfacht das tägliche Verhältnis von diffuser Strahlung zur Globalstrahlung mit den monatlichen Mittelwerten aus [DIN 4710] berechnet.

4.5.1.4 UV-A-Strahlung auf vertikale und schräge Flächen

Die jährliche UV-A-Strahlungsdosis auf horizontale Ebenen lässt sich aus den umfangreichen Daten zur Globalstrahlung ausreichend genau abschätzen. Darüber hinaus ist es jedoch auch von Interesse, ob die UV-A-Strahlungsdosis auf vertikale Wandflächen geringer oder höher ist als auf schneefreie horizontale Glasflächen. Langfristige Messungen der UV-Strahlung auf geneigte Flächen liegen nach Kenntnis des Autors nicht vor. Eine alternativ mögliche Berechnung der UV-Dosis mit theoretischen Strahlungsmodellen (z. B. [VDI 3789-3], [SMARTS2]) kann in der Regel nur für einen wolkenlosen Himmel durchgeführt werden, welcher in Mitteleuropa eher die Ausnahme darstellt.

Bei wolkenlosem Himmel ist die jährliche Strahlungsdosis einer nach Süden geneigten Fläche in Süddeutschland größer als auf eine horizontale Fläche (Berechnung nach [VDI 3789-3]).

Die Stärke der UV-Strahlung hängt aber, neben dem Sonnenstand und der Trübung der Atmosphäre, von der Stärke und der sphärischen Verteilung der diffusen Strahlung und somit im Wesentlichen vom Grad der Bewölkung ab. Nach [Webb 1999] ergibt sich bei nahezu isotropischer Verteilung der diffusen Himmelsstrahlung (bedeckter Himmel) die höchste Einstrahlung auf eine horizontale Fläche.

Bei Untersuchungen zur Alterung von UV-empfindlichen Polymerfilmen [Davis 1983] wurde in London der größte Alterungseffekt bzw. die größte UV-Dosis im Sommer bei einem Neigungswinkel von 15° zur Horizontalen ermittelt. An drei klimatisch sehr unterschiedlichen Orten in England und Australien ergab eine horizontale Ausrichtung der Polymerfilme die größte UV-Dosis. In der vertikalen Ebene bzw. bei einem Neigungswinkel von 45 ° wurde bei einer Ausrichtung nach Süden eine um 50 % bzw. 10 % geringere UV-Strahlungsdosis gemessen. Erklärt wurde dies mit dem höheren Anteil der diffusen Strahlung auf horizontale Ebenen, welche einen höheren Prozentsatz an UV-Strahlung besitzt.

Es wird deshalb angenommen, dass die berechnete mittlere horizontale UV-Strahlungsdosis näherungsweise auch für nach Süden geneigten Flächen gilt. Reflektionen zwischen Gebäuden können jedoch lokal zu erhöhter UV-Einstrahlung auf Vertikalverglasungen führen.

4.5.2 Solare Erwärmung von VSG-Scheiben

Durch die Absorption der Sonnenstrahlung heizen sich Glasscheiben und ihre Zwischenlagen auf. Die Temperatur des Glases hängt im Wesentlichen von der Intensität der solaren Einstrahlung und der Einfärbung des Glases ab. Weitere Einflussparameter sind die Umgebungstemperatur und die Windverhältnisse.

In [Sobek 2001] wurde während einer einjährigen Messphase in Stuttgart (48,8° N, 9,2° O) die Globalstrahlung, die Außentemperatur und die Temperatur der PVB-Folie in unterschiedlich geneigten und nach Süden ausgerichteten VSG-Glasscheiben gemessen. Neben Scheiben aus Weißglas wurden Scheiben aus Grünglas und schwarz-emaillierten Glas sowie Isolierglasscheiben untersucht. Bei Glasscheiben welche in allseits geschlossenen Glaskästen montiert waren betrug die maximal gemessene Temperatur in der PVB-Folie ca. 60 °C bei Weißglas, 63 °C bei Grünglas bzw. 72 °C bei schwarz-emaillierten Glas. Waren die Scheiben allseitig von Außenluft umgeben, so lagen die gemessenen Temperaturen um ungefähr 10 °C niedriger.

Anhand der täglichen Maximalwerte dieser Temperaturuntersuchungen wurde in [Sedlacek 2003] die Aufheizung der Glasscheiben in Abhängigkeit von der Globalstrahlung, der Windgeschwindigkeit und der Lufttemperatur in Deutschland ermittelt. Als Aufheizung bzw. „Absorptionstemperatur“ wurde dabei der Unterschied zwischen der Temperatur der PVB-Folie und dem Mittelwert der Lufttemperatur auf beiden Seiten der Probekörper definiert. Für Weißglas, Grünglas bzw. schwarz-emailliertes Glas ergaben sich maximale Absorptionstemperaturen von ungefähr 25 °C, 30 °C bzw. 35 °C.

4.5.3 Natürliche Luftfeuchtigkeit

Die Temperaturabhängigkeit und die ausgeprägte saisonale Schwankung der Wochen- und Monatsmittel der relativen Luftfeuchtigkeit in Deutschland ist in Bild 4-9 a) und b) beispielhaft für den Standort München dargestellt (Daten von 1990 bis 1999 aus [NCDC 2006]). In den Wintermonaten ist die relative Luftfeuchtigkeit höher als in den warmen Sommermonaten und erreicht monatliche Durchschnittswerte von 90 bis 95 %. An Tagen mit sehr hoher relativer Luftfeuchtigkeit über 90 % liegt die Tageshöchsttemperatur in der Regel unterhalb 20 °C.

In den feuchtwarmen Klimaregionen der Tropen und Subtropen ist die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit ungefähr gleich hoch wie in den gemäßigten Breiten. Aufgrund der um ca. 10 bis 20 °C höheren Tagesmittel der Lufttemperatur ist der absolute Wassergehalt der Luft jedoch um ein Vielfaches höher. An einigen Standorten dieser Regionen (z. B. Kolkata, Indien) treten die Phasen hoher Luftfeuchtigkeit während den heißen Sommermonaten auf, siehe Bild 4-9 c) und d). In diesen Standorten kann die kombinierte Wirkung hoher Lufttemperatur, starker Sonneneinstrahlung und hoher absoluter Luftfeuchtigkeit die Alterung witterungsempfindlicher Materialien beschleunigen.

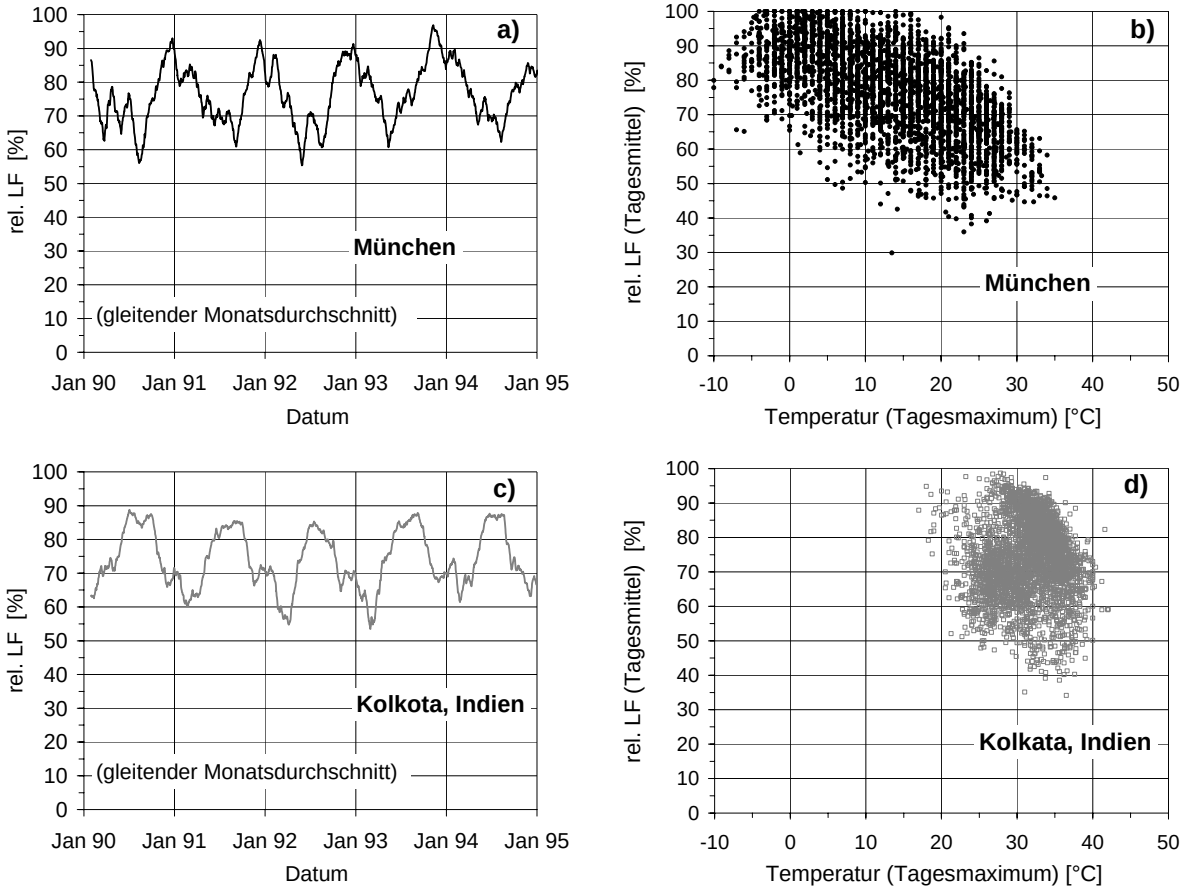


Bild 4-9: Relative Luftfeuchtigkeit in den Standorten München und Kolkota (Indien), gleitender Monatsdurchschnitt a), c) und Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur b), d)

4.6 Künstliche Bewitterung zur Alterung von Kunststoffen

Für die Prüfung der Alterungsbeständigkeit von Kunststoffen, Textilien oder Farben stehen zwei grundlegende Alternativen zur Auswahl - natürliche Bewitterung in Freilandversuchen oder künstliche Bewitterungsversuche im Labor. Die Wahl der geeigneten Alternative richtet sich nach Zielsetzung, Zeit- und Kostenrahmen, so wie Anzahl und Größe der Probekörper des Versuchsprogramms.

Zur Intensivierung von Witterungseinflüssen, zur Beschleunigung von primären Alterungsprozessen und insbesondere zur methodischen und vergleichenden Prüfung einzelner, steuerbarer Parameter eignet sich die künstliche Alterung unter Laborbedingungen. Dafür sollten vorab Kenntnisse der grundlegenden Alterungsprozesse des jeweiligen Werkstoffes vorliegen, um diesen unter vorheriger Eingrenzung der vielfältigen Parameter zielgerichtet prüfen zu können. Anforderungen an die künstliche Bewitterung zur Prüfung von Kunststoffen sind in [DIN EN ISO 4892-1] geregelt.

Für Prüfungen unter realistischen Einsatzbedingungen oder wechselhaften Witterungsverhältnissen mit unterschiedlichen Kombinationen von Sonnenstrahlung, Luftfeuchtigkeit und Temperatur eignen sich Freilandversuche mit natürlicher Bewitterung. Diese sind jedoch mit einer erheblich längeren Versuchsdauer verbunden. Zudem können sie nur schwer reproduziert werden. Die Versuche werden meist in Gebieten mit hoher Sonneneinstrahlung in ariden oder (sub-)tropischen Klimaregionen (z. B. Arizona, Florida) durchgeführt [Ensslen 2005]. In der Regel werden die Probekörper mit einer 45 °- Neigung nach Süden hin ausgerichtet. Eine Intensivierung der direkten Sonnenstrahlung kann durch eine geeignete Anordnung von reflektierenden Spiegeln oder eine automatische Ausrichtung der Proben normal zur Sonne erfolgen. Damit kann eine Erhöhung der Strahlungsdosis im UV-Bereich um den Faktor 3 erreicht werden. [Davis 1983].

Als künstliche Bestrahlungsquellen für Alterungsversuche kommen heutzutage Xenon-Bogenlampen, Hochdruck-Quersilberdampflampen oder auch Niederdruck-Leuchtstoffröhren zur Anwendung. Erstere erreichen in Kombination mit geeigneten Filtern im kurzwelligen und sichtbaren Bereich eine sehr gute Übereinstimmung mit der natürlichen UV-Strahlung und sind Bestandteil kommerzieller Kammern für Bewitterungstests. Leuchtstoffröhren haben nach [Davis 1983] jedoch die höchste Strahlungsintensität im UV-Bereich. Allen Lampen gemein ist, dass ihre Intensität im UV-Bereich im Laufe der Brenndauer abnimmt. Deshalb ist eine regelmäßige Messung der Lampenintensität im UV-Bereich zur Bestimmung der Strahlungsdosis erforderlich. Eine Bestrahlung ist je nach Lampentyp, Abstand zwischen Proben und Lichtquelle und der Möglichkeit zur Kühlung der Proben immer auch mit einer starken Erwärmung der Probekörper verbunden, welche die Einsatztemperatur im Anwendungsfall übersteigen kann. Dies führt in der Regel zu einer Beschleunigung der Alterungsvorgänge, aber auch zu einer Veränderung der chemischen Abbaumechanismen. Überschreitet man die Glasübergangstemperatur, so kann dies zudem zu unerwünschten Nebeneffekten wie Austrocknung der Proben oder Verflüchtigung von Inhaltsstoffen führen.

Parallel zur Bestrahlung in speziellen Bewitterungskammern oder in getrennten Versuchen können die Probekörper zyklisch oder kontinuierlich hoher Luftfeuchtigkeit (Befeuchten der Luft oder Besprühen der Proben) ausgesetzt werden. Teilweise werden dazu werkstoff-

abhängige Bewitterungszyklen in Fachnormen festgelegt. Zur Beschleunigung der Alterung durch Feuchtigkeit wird üblicherweise die Prüftemperatur erhöht, um bei gleichbleibender relativer Luftfeuchtigkeit den absoluten Wassergehalt der Luft zu steigern und die Diffusion der Feuchtigkeit im Polymer zu fördern. Eine starke Erhitzung („Kochtest“) der Kunststoffproben sollte jedoch vermieden werden, da dies bei unter Normalbedingungen temperatur- und feuchtigkeitsbeständigen Kunststoffen zu unrealistischen Schädigungsprozessen führen kann [Lutterbeck 1984].

Die empirische Übertragung bzw. Extrapolation der im Labor in zeitlich begrenzten Bewitterungsversuchen gewonnenen Erkenntnisse auf den langjährigen Einsatz im Außenbereich ist problematisch und ein bis heute nicht gelöstes Problem in der Erforschung der Alterung von Polymeren [Gugumus 1995], [Krebs 1999]. Beim Vergleich von künstlicher und natürlicher Bewitterung ist zwischen der Verstärkung der Einflussfaktoren einerseits und der Beschleunigung der resultierenden Alterungsprozesse andererseits zu unterscheiden. Maßgebend ist die Beschleunigung der Alterungsprozesse, welche durch Prüfung verschiedener quantitativer und qualitativer Materialeigenschaften, wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Verfärbung, Transparenz und Änderung der Molekülstruktur gemessen werden. Für jedes Prüfkriterium kann sich eine unterschiedliche Beschleunigung der Alterungseffekte (Beschleunigungsfaktor) gegenüber natürlicher Bewitterung ergeben. Die Intensität der UV-Strahlung lässt sich relativ leicht durch Wahl geeigneter Lampen, geringer Abstände der Probekörper und fokussierender Wirkung des Versuchsanordnung erhöhen. Die damit verbundene Beschleunigung der Materialalterung ist dagegen nur schwer einzuschätzen. Sie ist abhängig von der Art des Polymers und seiner Zusatzstoffe (Pigmente, Absorber, Stabilisatoren), von der Materialdicke, von den Bedingungen des realen Einsatzklimas und von der zu prüfenden Materialeigenschaft. Die Erhöhung der Intensität ist in der Regel nicht mit einer proportionalen Beschleunigung der Alterungswirkung verbunden und führt zudem zu einer starken Erhitzung der bestrahlten Proben. Je nach Art des Kunststoffes wird teilweise von sehr hohen Beschleunigungsfaktoren bis zum Faktor 130 (für PVC) gegenüber Alterung bei natürlicher Bewitterung berichtet [Davis 1983]. In der Regel liegen die Beschleunigungsfaktoren für die photooxidative Alterung jedoch unter 10. Eine zu starke Erhöhung der Strahlungsintensität sollte vermieden werden, da sich dadurch die Alterungsprozesse wesentlich verändern können (Thermooxidation statt Photooxidation). Andererseits können sekundäre oxidative Alterungsprozesse (Dunkelreaktionen), die ohne Einwirkung von Sonnenstrahlung ablaufen, durch verkürzte Versuchszeiten mit kontinuierlicher, intensiver Bestrahlung eingeschränkt werden und so zu einer Unterschätzung der Materialalterung führen [Gugumus 1995], [DIN EN ISO 4892-1].

Trotz des Einflusses mechanischer Beanspruchungen auf die Alterung von Kunststoffen, wird die natürliche oder künstliche Bewitterung von Kunststoffen in der Regel ohne Belastung der Proben durchgeführt. Auch die in dieser Arbeit durchgeführte künstliche Bewitterung erfolgte, abgesehen vom Eigengewicht der Probekörper, ohne äußere Belastung. Da im baupraktischen Bereich die Dehnung der PVB-Folie in VSG mit intakten Scheiben sehr gering ist, kann auf eine Alterung unter gleichzeitiger Wirkung mechanischer Beanspruchungen verzichtet werden.

Der zeitliche Verlauf der Wirksamkeit von Stabilisatoren in Kunststoffen wie PVB ist nicht bekannt. Es wird vermutet, dass sich die Materialeigenschaften industrieller Kunststoffprodukte erst bei Abbau bzw. dem Ende der Wirkungsdauer der Stabilisatoren signifikant ändern. Ein zeitlich begrenzter Alterungsversuch mit stabilisierten Kunststoffen, bei dem keine signifikante Änderung der Materialeigenschaften festgestellt werden konnte, erlaubt demnach ohne Kenntnis der Stabilisatoren und ihrer Wirkungsdauer keine Extrapolation auf eine langjährige Lebensdauer.

4.7 Künstliche Bewitterung von PVB in Verbundsicherheitsglas

Die künstliche Bewitterung der VSG-Probekörper in dieser Arbeit wurde in Anlehnung an [DIN EN ISO 12543-4] durchgeführt. Diese technische Regel gibt Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit von Verbundglas bzw. Verbundsicherheitsglas gegenüber hoher Temperatur, Feuchtigkeit und Strahlung vor. Zweck der Vorschrift ist es, zu prüfen, ob kurzzeitige extreme Umweltbedingungen zu unerwünschten optischen Änderungen, wie Delamination, Blasenbildung oder Trübungen (ohne Berücksichtigung von Verfärbungen) führen. Eine Prüfung des Einflusses von Umweltbedingungen auf mechanische Eigenschaften, wie z. B. der Schubsteifigkeit, ist nach der technischen Regel nicht vorgesehen. Dennoch wurden die Alterungsversuche in Anlehnung an diese Vorschrift durchgeführt, um einen Vergleich zu vorangegangenen oder parallelen Untersuchungen anderer Autoren [Ensslen 2005], [Meissner 2005] und [Schuler 2003] zu ermöglichen. Zur methodischen Untersuchung einzelner Effekte erfolgte die Bewitterung unter konstant bleibenden Einwirkungen und in drei getrennten Prüfserien:

- Alterung durch künstliche Bestrahlung und hohe Temperatur (Kapitel 4.7.1)
- Alterung durch hohe Temperatur (ohne Bestrahlung) (Kapitel 4.7.2)
- Alterung durch hohe Luftfeuchtigkeit und hohe Temperatur (Kapitel 4.7.3)

4.7.1 Bestrahlung mit künstlichem Sonnenlicht

Die Probekörper für die Biegeversuche (Kapitel 5) und die Folienzugversuche (Kapitel 7) wurden in zwei baugleichen Versuchsständen 3100 Stunden (Stand "A") bzw. 2200 Stunden (Stand "B") lang bestrahlt. Die Folienzugproben wurden zwischen zwei 6 mm dicke Glasscheiben gelegt, um annähernd gleiche Strahlungsbedingungen hinter Glas wie in Verbundglasscheiben zu erreichen. Der Versuchsstand "A" mit den Probekörper für die Biegeversuche ist in Bild 4-10 dargestellt. Der Abstand zwischen Lampen und Proben betrug 1,0 m und die Lampen wurden in einem Raster von 25,0 cm x 23,5 cm angeordnet.

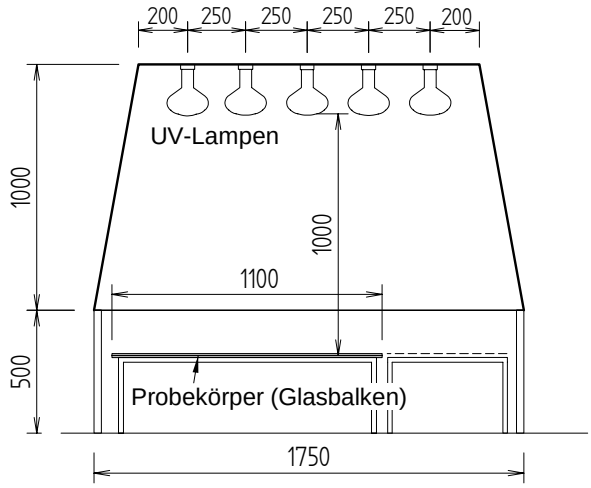


Bild 4-10: Bestrahlungsstand "A", Blick in den geöffneten Stand vor der Inbetriebnahme

Als Strahlungsquelle wurden Hochdruckentladungslampen mit Wolframwendel der Marke *OSRAM ULTRA-VITALUX ® 300 Watt* verwendet, welche in [DIN EN ISO 12543-4] zur Simulation der Sonnenstrahlung empfohlen werden. Die Lampen finden in der Industrie bei der Aushärtung von Kunststoffen, bei der künstlichen Alterung und der Materialprüfung Verwendung. Laut Angaben des Herstellers erzeugt eine rasterförmige Anordnung von 16 Lampen pro Quadratmeter auf einer 50 cm entfernten Fläche eine gleichförmige Bestrahlungsstärke von ungefähr 1000 W/m².

Zur Messung der Intensität der UV-A-Strahlung der Lampen während der Bestrahlungsdauer wurde ein Radiometer mit kalibrierter Messsonde der Firma *Dr. Gröbel UV-Elektronik GmbH* verwendet. In Bild 4-11 ist neben dem Messgerät auch die Kurve der spektralen Empfindlichkeit f(λ) der Messsonde dargestellt. Sie besitzt ihr Maximum bei 360 nm.

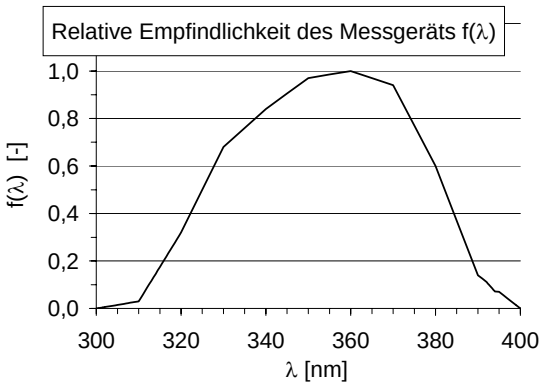


Bild 4-11: UV-A-Messgerät mit spektraler Empfindlichkeit f(λ)

Die Abnahme der Intensität der Lampen in einem Referenzpunkt in beiden Versuchsständen ist in Bild 4-12 zu sehen. Die Intensität der künstlichen Strahlung nahm während 3000 Stunden Bestrahlungsdauer in der gesamten bestrahlten Fläche um 30 % ab.

Zu Vergleichszwecken wurde mit dem gleichen Messgerät an einigen Tagen der Jahre 2004 und 2005 die UV-A-Strahlung zum Sonnenhöchststand (~ 12:00 Wahre Ortszeit) auf einer horizontalen Ebene auf dem Dach des Institutsgebäudes der Technischen Universität

München gemessen. Das Ergebnis dieser Messungen ist rechts im Bild 4-12 dargestellt. Die vertikalen Striche stellen die Variabilität der Bestrahlungsstärke bei Änderung der Bewölkung während der 5- bis 10-minütigen Messdauer dar. Die maximale Intensität der Lampen entsprach ungefähr der sommerlichen Einstrahlung in München zur Mittagszeit. An wolkenlosen Tagen konnten die Messwerte mit den Messungen der BfS [Steinmetz 2006] verglichen werden. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen von maximal 2 % bis 10 %. An Tagen mit teilweiser Bewölkung oder vollkommener Bedeckung waren die Abweichungen teilweise wesentlich größer.

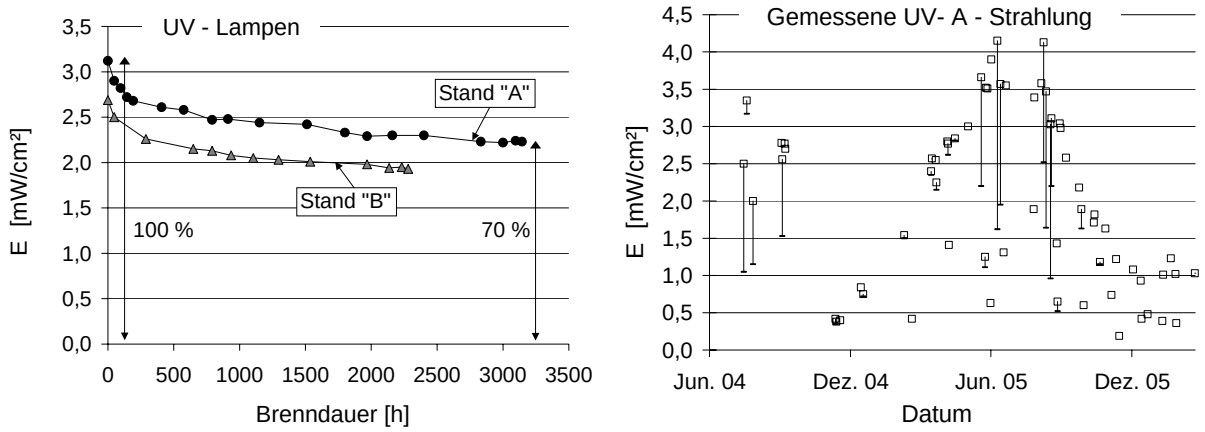


Bild 4-12: Abnahme der Intensität der Lampen (links) im Vergleich zur natürlichen Bestrahlungsstärke zum Sonnenhöchststand (rechts)

Die spektrale Intensität E_λ der emittierten Strahlung der Lampen im kurzwelligen Bereich bis 400 nm wurde in [Kaidbey 1987] gemessen und ist in Bild 4-13 dargestellt. Die Messung erfolgte in einem Abstand von 65 cm zu einer aus vier Lampen bestehenden Strahlungsquelle. Zum Vergleich ist im gleichen Maßstab in Bild 4-13 auch das Spektrum des Sonnenlichtes am 20.06.2005 (wolkenlos) aus Bild 4-7 eingezeichnet. Auffällig ist die ungleiche Verteilung der spektralen Intensität. Wird die Kurve des Lampenspektrums längs der Ordinate mit linearem statt logarithmischen Maßstab aufgetragen (als relative spektrale Bestrahlungsstärke E_λ bezogen auf $E_{\lambda = 365\ nm}$, siehe Bild 4-13 rechts), so sieht man deutlich, dass sich die gesamte Strahlungsleistung im kurzwelligen Bereich auf wenige schmale Emissionsbanden (Quecksilberdampf der Lampen) verteilt und dass die Emission in den zwischenliegenden Bereichen vernachlässigbar klein ist. Die höchste Intensität liegt ungefähr bei einer Wellenlänge von 365 nm. Auf das Emissionsband um diesen Spitzenwert entfallen ca. 55 % der Bestrahlungsstärke im kurzwelligen Emissionsspektrum der Lampen bis 400 nm. Ob die spektrale Verteilung der Lampen im Vergleich zum natürlichen Spektrum günstiger oder ungünstiger im Bezug auf die Alterung von PVB hinter Glas ist, kann hier nicht geklärt werden. Es ist aber zu beachten, dass die Lampen einen hohen Anteil Strahlung unterhalb 295 nm emittieren, der auf der Erdoberfläche nicht vorkommt. Für die Materialprüfung müssen diese Lampen also immer mit Glasfiltern abgedeckt werden.

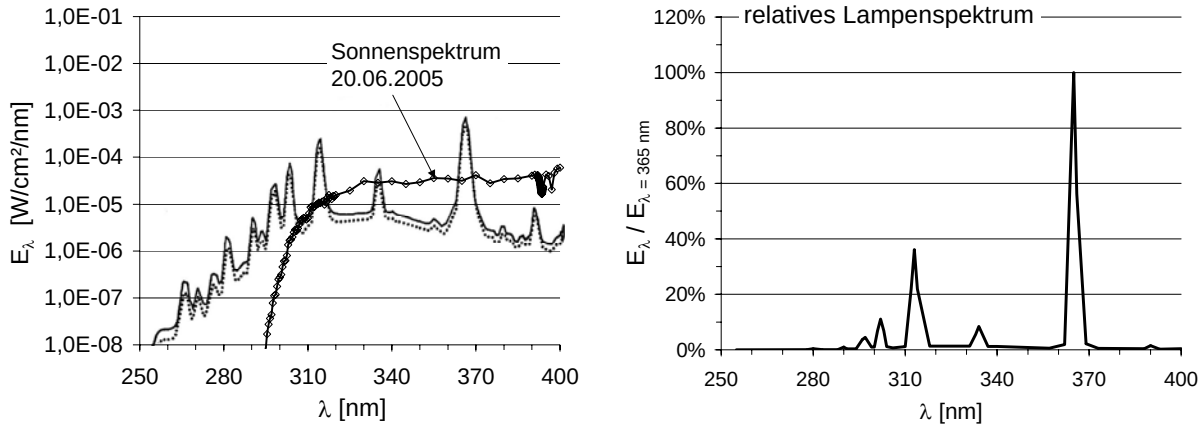


Bild 4-13: Spektrum der Lampen nach [Kaidbey 1987] im Vergleich mit dem natürlichem Sonnenspektrum vom 20.06.2005 (links) und lineare Darstellung als relatives Spektrum (rechts)

Die Intensität der auftreffenden UV-A-Strahlung in den Versuchsständen war ungleichförmig über die Probekörper verteilt. Am Rand der bestrahlten Fläche wurden im Stand "A" zu Beginn der Alterung minimale Bestrahlungsstärken zwischen 1,5 und 1,9 mW/cm² gemessen. Die maximalen Messwerte in der Mittelachse des Versuchsstandes lagen anfangs zwischen 2,3 und 3,8 mW/cm². Im Stand "B" lag die Bestrahlungsstärke zu Beginn der Alterung zwischen 1,6 und 2,7 mW/cm².

Abschließend wird die natürliche Strahlungsdosis nach Gleichung (4.5) mit der gemessenen Bestrahlungsstärke in den Versuchsständen verglichen, um somit die Zeitrafferwirkung der künstlichen Bewitterung zu ermitteln. Dazu ist die natürliche Strahlungsdosis H_{UV} mit dem Korrekturfaktor nach Gleichung (4.6) zu verringern, welcher die Empfindlichkeit des UV-Messgerätes f(λ) nach Bild 4-11 zwischen 300 und 400 nm berücksichtigt. Der Korrekturfaktur wurde für die gemessene UV-Strahlung aller Tage des Jahres 2005 berechnet (siehe Kapitel 4.5.1.3). Er war nahezu konstant und betrug 0,60.

$$\frac{H_{UV,Messgerät}}{H_{UV}} = \frac{\int_{t=0}^{24h}\int_{\lambda=300nm}^{400nm} E_\lambda \cdot f(\lambda)\,d\lambda}{\int_{t=0}^{24h}\int_{\lambda=300nm}^{400nm} E_\lambda\,d\lambda} \cong 0{,}60 \qquad (4.6)$$

H_{UV}: tägliche Strahlungsdosis der UV-Strahlung zwischen λ = 300 und 400 nm

$H_{UV,Messgerät}$: tägliche gemessene Strahlungsdosis der UV-Strahlung zwischen λ = 300 und 400 nm

E_λ: Spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne

f(λ): Spektrale Empfindlichkeit des Messgeräts < 1,0

Nach Integration der nach Bild 4-12 abnehmenden Bestrahlungsstärke E über die jeweilige Bestrahlungsdauer t im Versuchsstand "A" und "B" ergibt sich das in Tabelle 4-3 zusammengestellte Ergebnis. Der in Tabelle 4-3 berechnete Lampenfaktor ist ein Maß für die beschleunigende Wirkung der künstlichen Bestrahlung und ist das Verhältnis zwischen der

künstlichen Strahlungsdosis am Ende der Bestrahlungsdauer und dem 0,6-fachen Wert der natürlichen Dosis von 25,1 kJ/cm² nach Kapitel 4.5.1.3. Er enthält keine Gewichtung des Spektrums nach der Alterungswirkung.

Tabelle 4-3: Umrechnung der gemessenen künstlichen Bestrahlung in Jahre natürlicher Strahlung in Deutschland

	Stand "A"			Stand "B"	
E(t =0)	1,5 mW/cm²	2,3 mW/cm²	3,8 mW/cm²	1,6 mW/cm²	2,7 mW/cm²
effektive Betrahlungs-dauer	0,77 x 3100 h			0,78 x 2200 h	
künstliche Dosis	12,9 kJ/cm²	19,8 kJ/cm²	32,7 kJ/cm²	9,9 kJ/cm²	16,7 kJ/cm²
Anzahl Jahre	0,9	1,3	2,2	0,7	1,1
Lampenfaktor	2,4	3,7	6,1	2,6	4,4

Die UV-A-Strahlendosis, welcher die Probekörper während der Alterung ausgesetzt waren, entsprach somit ungefähr der maximalen natürlichen Einstrahlung auf eine horizontale Fläche in Deutschland von 1 bis 2 Jahren.

4.7.2 Lagerung bei hoher Temperatur

Nach [DIN EN ISO 12543-4] ist bei der künstlichen Bestrahlung eine Temperatur der Probekörper von 45 °C +/- 5 °C einzuhalten. Diese Forderung konnte aufgrund der starken Infrarotstrahlung der Lampen und der Größe des Versuchsstandes, trotz winterlicher Raumtemperatur zwischen 10 und 15 °C und Luftkühlung der Probekörper mittels Ventilatoren, nicht im gesamten Bereich der Probekörperebene erfüllt werden. An den oberen Glasscheiben der VSG-Scheiben wurden im Rand- bzw. Eckbereich des Versuchsstandes Temperaturen zwischen 35 bzw. 50 °C und in der Mitte Temperaturen zwischen 60 und 75 °C gemessen (Messung mit Temperaturfühler). Die Temperatur der oberen Glasscheibe im Stand "B" betrug im Bereich der Folienzugproben maximal 65 °C.

Um den Einfluss von erhöhter Temperatur als **einzigen** Einflussparameter untersuchen zu können, wurden einige Probekörper für die Biegeversuche während 2000 Stunden in einer dunklen Kammer bei einer konstanten Raumtemperatur von 70 °C gelagert. Diese Temperatur entsprach ungefähr der hohen Scheibentemperatur, welche während der Bestrahlung in der Mitte der Versuchsstände gemessenen wurde. Auch die lange Trocknungsdauer von drei Monaten wurde in Anpassung an die Bestrahlungsdauer gewählt.

4.7.3 Lagerung bei hoher Feuchtigkeit

Ein Teil der Probekörper für die Biegeversuche wurde 14 bzw. 28 Tage bei nahezu 100 % relativer Luftfeuchtigkeit und einer Umgebungstemperatur von 52 °C gelagert. Dazu wurden die Probekörper in eine mit Silikon abgedichtete Aluminiumkiste gestellt, deren Boden mit Wasser gefüllt war. Unmittelbar nach der Entnahme wurden die Ränder der Probekörper mit

Aluminium-Butyl-Klebeband verklebt, um möglichst langfristig ein Entweichen der in die PVB-Folie eingedrungenen Feuchtigkeit zu vermeiden (siehe Bild 4-14). Alle Versuche an den feuchtgelagerten VSG-Scheiben erfolgten mit den derart abgedichteten Rändern. Bei Vorversuchen ohne diese Abdichtung war bereits nach wenigen Tagen kein Einfluss der Befeuchtung auf die Steifigkeit der PVB-Folie mehr festzustellen (siehe Kapitel 5.4.2). Die Feuchtigkeitsaufnahme war somit reversibel.

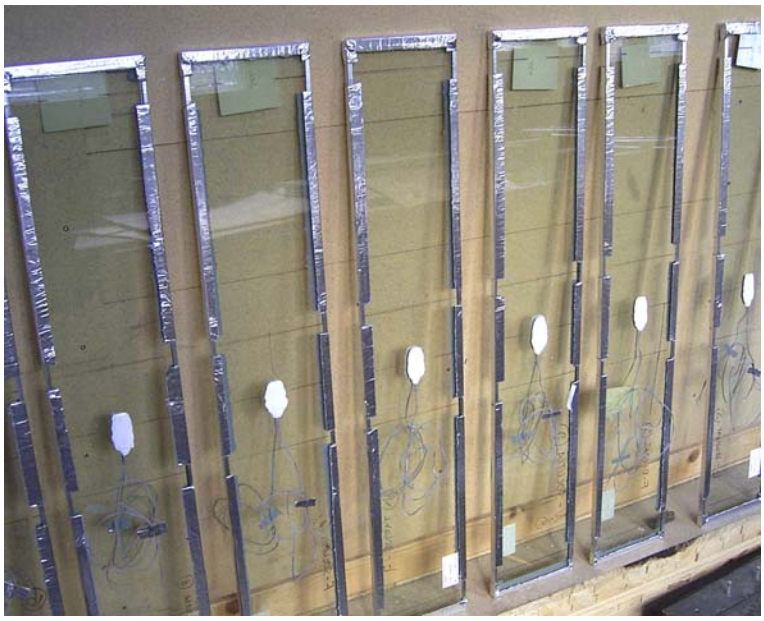


Bild 4-14: Probekörper mit Randverklebung nach Feuchte-Lagerung

Bei Entnahme wiesen die Glasscheiben eine leichte Trübung entlang der Kanten mit einer Breite von ca. 1 cm auf. Die Folie konnte an den Ecken mit der Hand etwas herausgezogen werden, d. h. in einem schmalen Streifen entlang der Glaskanten führte die Feuchtelagerung zur Delamination der Folie.

Zur Überprüfung des Ausmaßes der durchfeuchteten Randzone der Probekörper wurden zwei 30 x 40 cm großen Testscheiben 14 Tage lang unter den oben beschriebenen Bedingungen gelagert und anschließend entlang des Randes verklebt. Zusammen mit einer dritten, unter normalen Laborbedingungen gelagerten, Referenzscheibe, wurden die drei Probekörper zur Messung des Feuchtigkeitsgehalts mittels eines Infrarot-Spektrophotometers an die Firma *Kuraray Specialties/Division Trosifol* versandt (zum Messverfahren siehe [Ensslen 2005]). Im möglichen Messbereich konnte dort kein Anstieg der Feuchtigkeit gemessen werden. Aufgrund der 2 cm breiten Randverklebung der Probekörper und dem 2 cm breiten Mess-flecks des Infrarot-Spektrophotometers, kann deshalb maximal nur ein 2 bis 3 cm breiter Randstreifen Feuchtigkeit aufgenommen haben.

5 Biegeversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB

5.1 Einleitung

Das Ziel der Biegeversuche an den Verbundglasbalken ist, neben der Bestimmung des zeit- und temperaturabhängigen Verlaufs des Schubmoduls von PVB, die Ermittlung des Einflusses künstlicher Bewitterung bzw. Alterung auf die Schubsteifigkeit der Zwischenfolie. Dies erfolgt in dieser Arbeit nicht durch einen Vergleich von Schubmoduln, sondern durch einen Vergleich der gemessenen Biegesteifigkeit von gealterten und ungealterten Probekörpern. Dazu werden die in Kapitel 3.2.1 definierten dimensionslosen Verbundfaktoren V_ε, V_w und $V_{\varepsilon/w}$ verwendet.

5.2 Versuchsprogramm

5.2.1 Allgemeines

Das Versuchsprogramm teilte sich in Kurzzeitversuche mit 300 Sekunden langer Belastungsdauer und Langzeitversuche mit Belastungszeiten zwischen 3 Tagen und 4 Wochen. Die Kurz- und Langzeitversuche erfolgten in zwei Klimakammern mit unterschiedlicher Messeinrichtung. Die Kurzzeitversuche wurden mit konstanter Durchbiegung (Relaxationsversuche) und mit konstanter Last (Kriechversuche) durchgeführt. Dabei wurde die Belastung mittels einer Spindel-Prüfmaschine bzw. mit einem 25,15 kg schweren Gewicht aufgebracht. Bei den Langzeitversuchen handelt es sich nur um Kriechversuche. Die Belastung erfolgte hierbei mit durchschnittlich 30 kg schweren Gewichten. In Bild 5-1 ist die Prüfmaschine für die Relaxationsversuche und der Versuchsaufbau für die Langzeitversuche zu sehen.

Bild 5-1: Prüfmaschine für Kurzzeitversuche und Versuchsaufbau Langzeitversuche

Die Versuche erfolgten als Vierpunkt-Biegeversuche in Anlehnung an die Richtlinie [DIN EN 1288-3]. Der Versuchsaufbau ist zusammen mit den Abmessungen der Probekörper in Bild 5-2 dargestellt. Abweichend von der Richtlinie betrug die Breite der Probekörper nur 200 statt 360 mm.

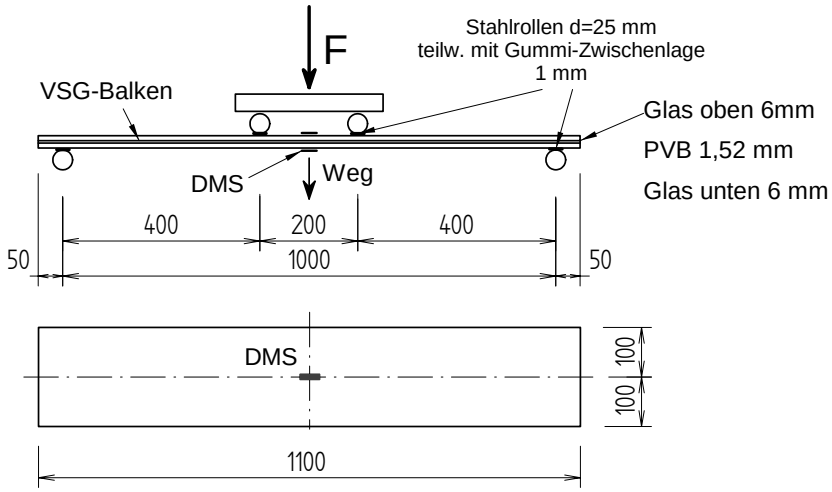


Bild 5-2: Versuchsschema Vierpunkt-Biegeversuch und Probekörper aus VSG

Bei den Kurzzeit- und Langzeitversuchen wurden mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) die Längsdehnungen an der Ober- und Unterseite der Glasscheiben in Feldmitte gemessen. Für die Versuchsauswertung wurden die Beträge der beiden Dehnungen gemittelt. Durch diese Mittelwertbildung werden neben nichtlinearen Effekten bei großen Durchbiegungen (siehe Kapitel 3.2.3) auch Einflüsse aus Temperaturschwankungen in den Klimakammern (Temperaturgang der DMS und temperaturinduzierte Dehnungen der Probekörper) kompensiert.

Bei den Kurzzeitversuchen wurde zudem die Durchbiegung in Feldmitte gemessen. Bei allen Langzeitversuchen und den Kurzzeitversuchen zur Bestimmung der Alterungseinflüsse lag zwischen dem Probekörper und den beiden Auflagerrollen eine 1 mm dicke Gummizwischenlage. Auf die Dehnungsmessung hat diese Zwischenlage keinen Einfluss. Bei der Durchbiegung der Versuchskörper war aufgrund der größeren Belastung nur bei den Relaxationsversuchen eine Erhöhung durch die Einfederung an den Auflagern messbar. Die damit einhergehende Verringerung der gemessenen Biegesteifigkeit lag je nach Versuchstemperatur zwischen 1 und 3 %.

Es wurden Probekörper aus Verbundsicherheitsglas mit Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit gleichem Scheibenaufbau Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 mm und mit "Standardfolien" aus PVB der Hersteller *Solutia* (Folie "**A**"), *Kuraray Specialties Europe* (Folie "**B**") und *Dupont* (Folie "**C**") untersucht, vgl. Kapitel 2.1.1.

Die Probekörper jedes Folientyps werden entsprechend den in Kapitel 4.7 beschriebenen Methoden der künstlichen Bewitterung in vier Versuchsserien mit der Bezeichnung **N**, **UV**, **T** und **F** unterteilt:

- Serie **N**: ohne Alterung bzw. "neue" Probekörper, 5 Stück je Folie
- Serie **UV**: Strahlungsalterung, 3100 Stunden künstliche UV-Bestrahlung, 5 Stück je Folie
- Serie **T**: Temperaturalterung, 90-tägige Dunkellagerung bei 70 °C, 3 Stück je Folie

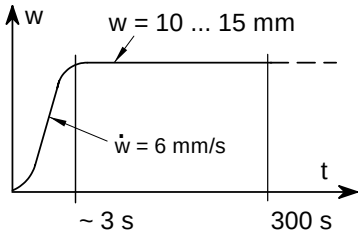
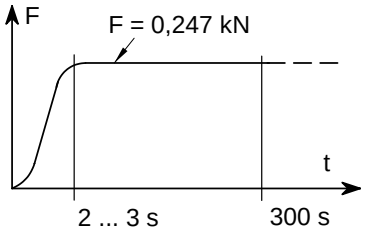
- Serie **F**: Lagerung bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit und 52 °C,
  Serie **F1**: 3 Stück je Folie bei 14-tägiger Lagerung,
  Serie **F2**: 3 Stück je Folie bei 4-wöchiger Lagerung.

5.2.2 Versuchsparameter

5.2.2.1 Versuchsparameter Kurzzeitversuche

Die wesentlichen Versuchsparameter der Kurzzeitversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Versuchsparameter Kurzzeitversuche (Relaxations- und Kriechversuche)

Temperatur T	0 °C	10 °C	20 °C	40 °C	60 °C
ΔT		< +/- 1,5 °C			+/- 2,5 °C
rel. LF [%]		50 % ... 60 %			< 20 %
		Relaxation (konstante Durchbiegung w)		**K**riechen (konstante Last F)	
Versuchs-verlauf					

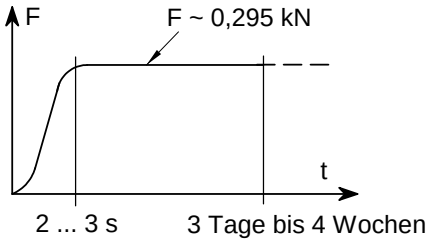
Die Versuche erfolgten in einer Klimakammer mit regelbarer Einstellung der Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ("rel. LF") bis 40 °C. Für höhere Temperaturen wurde ein Heizgerät zur Erwärmung der Luft in der Klimakammer verwendet. Die Messung der Temperatur erfolgte durch einen Messfühler an der Oberfläche der Probekörper. Zur Kompensation von Einflüssen möglicher Temperaturschwankungen in den Verbindungskabeln waren die DMS über drei Leiter mit dem Messverstärker verbunden. Da die Steuerung der Prüfmaschine außerhalb der Klimakammer manuell mittels Fernbedienung erfolgen musste, schwankte bei den Relaxationsversuchen die Durchbiegung w in Feldmitte zwischen 10 und 15 mm. Die Auswertung der Biegeversuche begann i. d. R. erst 3 Sekunden nach Belastungsbeginn, da erst zu diesem Zeitpunkt die Last vollständig auf die Probeköper aufgebracht oder die maximale Durchbiegung erreicht worden ist.

Der maximale Schubwinkel in der Zwischenfolie am Auflager betrug bei den Relaxationsversuchen bei 60 °C ungefähr γ_F = 0,2. Der mit den Biegeversuchen erreichte Schubwinkel war damit viel geringer als der bei Scherversuchen oberhalb der Raumtemperatur erzielbare Wert von γ_F = 0,9 bis 1,6 [Schuler 2003], [Sobek 1998]. Die maximale Dehnung an den Innenseiten der Glasscheiben lag stets unter 0,05 %. Aufgrund dieser geringen Verformungen kann daher, wie in Kapitel 2.1.7 erläutert, von einem linear-viskoelastischen Verhalten der Folie ausgegangen werden.

5.2.2.2 Versuchsparameter Langzeitversuche

Die im Außenbereich aufgestellte Klimakammer für die Langzeitversuche besaß nur eine Temperaturregelung, aber keine Regelung der Luftfeuchtigkeit. Die DMS waren über vier Leiter mit dem Messverstärker verbunden, womit sowohl Temperaturschwankungen in den Kabeln als auch Leitungswiderstände kompensiert werden. Die Versuchsparameter der Langzeitversuche sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt. Wie bei den Kurzzeitversuchen erfolgte die Auswertung der Langzeitversuche erst 3 Sekunden nach Belastungsbeginn.

Tabelle 5-2: Versuchsparameter Langzeitversuche (Kriechversuche)

Temperatur T	0 °C	5 °C	10 °C	20 °C	40 °C	55°C
ΔT	+/- 1 °C	+/- 2 °C	+/- 1,5 °C	+/- 1 °C	+/- 1,5 °C	+/- 3 °C
rel. LF [%]		40 % ... 85 %			< 40 %	< 20 %
Versuchsverlauf						

5.2.3 Geometrie der Probekörper

Alle Probekörper hatten den gleichen nominalen Scheibenaufbau Glas/PVB/Glas = 6/1,52/6 mm. Die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten der Gesamtdicke h_{ges} und der Einzelscheibendicken h_1, h_2 in der Mitte von jeweils 20 Probekörpern eines PVB-Folienherstellers sind in Tabelle 5-3 angegeben. Die Gesamtdicke wurde an jeweils fünf Punkten entlang der beiden Längsseiten der VSG-Scheiben mittels einer Messschraube mit einer Messgenauigkeit von 1/100 mm gemessen. Für die Berechnung des Schubmoduls wurde die durchschnittliche Gesamtdicke in Scheibenmitte verwendet, welche um 5/100 bis 30/100 mm größer als an den Stirnseiten war.

Tabelle 5-3: Dicke der Probekörper, Mittelwert und Variationskoeffizient VK

	VSG mit Folie A		VSG mit Folie B		VSG mit Folie C	
	Mittelwert	VK	Mittelwert	VK	Mittelwert	VK
h_{ges}	13,37 mm	0,5 %	13,30 mm	0,6 %	13,41 mm	0,3 %
h_1	5,91 mm	0,6 %	5,91 mm	0,8 %	5,93 mm	0,6 %
h_2	5,91 mm	0,6 %	5,90 mm	0,8 %	5,92 mm	0,6 %
h_f	1,55 mm	3,7 %	1,49 mm	3,5 %	1,56 mm	3,5 %

Die Dicke der Einzelscheiben konnte erst an den fertigen Probekörpern aus VSG bestimmt werden. Dies erfolgte durch Ultraschallmessung mit Hilfe eines Wanddickenmessgerätes der Firma *Krautkramer-Branson*. Dieses Verfahren erreicht nicht die gleiche Genauigkeit wie die Dickenmessung mit einer Messschraube, da es von den nur näherungsweise bestimmbaren Materialeigenschaften des Glases (Querdehnzahl, Dichte und E-Modul) abhängt. Es ist aber grundsätzlich geeignet die Dicke von Einzelglasscheiben in VSG-Elementen mit zwei Glasschichten zu bestimmen [Behrendt 1997]. Dazu ist eine Kalibrierung des Wanddickenmessgeräts an mindestens zwei unterschiedlich dicken Glasscheiben erforderlich. Wie die zu prüfenden Probekörper, müssen diese Scheiben auch aus ESG des gleichen Herstellers bestehen, um annähernd gleiche Materialeigenschaften zu gewährleisten. Aus der Kalibrierung anhand von drei ESG-Scheiben der Nenndicken 6, 8 und 10 mm wurde eine mittlere Schallgeschwindigkeit von c_S = 5879 m/s ermittelt.

$$c_S = \sqrt{\frac{E_{Glas}}{\rho_{Glas}} \frac{1-\mu_{Glas}}{(1+\mu_{Glas})(1-2\mu_{Glas})}} \tag{5.1}$$

Mit der Geschwindigkeit c_S einer Longitudinalwelle im Kontinuum nach Gleichung (5.1) [Krautkrämer 1986] würde sich bei einer Dichte von ρ_{Glas} = 2,5 g/cm³ und einer Querdehnzahl von μ_{Glas} = 0,23 ein E-Modul von E_{Glas} = 74200 N/mm² ergeben. Bei einer Querdehnzahl von 0,27 würde der E-Modul ungefähr 70000 N/mm² betragen. Zur genauen Bestimmung des E-Moduls von Scheiben aus ESG ist die Ultraschallmessung somit nicht geeignet.

Die Dickenmessung der Einzelscheiben erfolgte an drei Punkten (Feldmitte und 10 cm von den Stirnseiten entfernt) entlang der Längsachse der Scheiben. Dabei wurde ein maximaler Dickenunterschied zwischen den Messpunkten von maximal 0,10 mm gemessen. Dickenunterschiede in Querrichtung der Einzelscheiben wurden mit der Ultraschallmessung nicht festgestellt.

Der geringfügige Einfluss der Kantensäumung der Glasscheiben und die Abweichung von maximal +/-0,5 mm von der Nennbreite b = 200 mm der Probekörper wurde bei der Auswertung der Biegeversuche vernachlässigt.

5.2.4 E-Modul der Glasscheiben

Wie in Kapitel 2.2.2 erläutert, hat der E-Modul der Glasscheiben einen maßgeblichen Einfluss auf die indirekte Ermittlung des Schubmoduls der PVB-Folie aus Biegeversuchen. Zur Kalibrierung der Messeinrichtung und zur Ermittlung des E-Moduls der Glasscheiben wurden deshalb drei Einzelscheiben untersucht, welche aus der Charge der Probekörper entnommen wurden. Dazu wurde jeweils eine ESG-Scheibe zerstört und die Folie mit den Glassplittern bei 60 °C von der intakten Einzelscheibe abgelöst. Die drei Einzelscheiben hatten eine nahezu konstante Glasdicke von 5,96 mm.

Die Steifigkeit der Einzelscheiben wurde in Vierpunkt-Biegeversuchen durch Messung der Dehnungen bei Temperaturen zwischen 0 und 55 °C bestimmt. Der Versuchsaufbau entsprach dem der Langzeitversuche. Aus dem Mittelwert der Biegesteifigkeit von jeweils fünf Biegeversuchen je Einzelscheibe wurde der E-Modul E_{Glas} mittels einer FEM-Berechnung

zurückgerechnet. Das Ergebnis aus der Dehnungsmessung ist in Tabelle 5-4 als Verhältniswert zwischen dem E-Modul zur Zeit t = 3 Sekunden und dem üblichen Bemessungswert E_{Glas} = 70000 N/mm² angegeben (Mittelwert aus insgesamt 15 Versuchen, auf eine Genauigkeit von 0,5 % aufgerundet). Bei Temperaturen unter 40 °C lag der E-Modul der Glasscheiben aus ESG bei Versuchsbeginn (t = 3 s) stets über 70000 N/mm². Der Variationskoeffizient des E-Moduls der Stichprobe der drei Einzelscheiben betrug je nach Temperatur zwischen 0,2 bis 0,7 % und lag nur wenig über der Streuung von fünf Messergebnissen einer Scheibe (0,3 %).

Tabelle 5-4: Verhältnis von E_{Glas} zur Zeit t = 3 Sekunden zu E_{Glas} = 70000 N/mm²

Temperatur	0 °C	10 °C	20 °C	40 °C	55°C
E_{Glas}(t = 3 s) / 70000 N/mm²	1,025	1,015	1,010	1,005	1,000

Bei der Bestimmung des E-Moduls mit dem Versuchaufbau der Kurzzeitversuche ergaben sich um 1 bis 2 % größere Verhältniswerte als nach Tabelle 5-4. Die Ursachen dieser Differenz sind möglicherweise Unterschiede in der Messeinrichtung (3-Leitertechnik gegenüber 4-Leitertechnik, unterschiedliche Messverstärker), da die sonstigen Randbedingungen (Lasteinleitung, Lagerung) bei beiden Klimakammern gleich waren. Die Messung der Durchbiegung zeigte die gleiche Abhängigkeit von der Temperatur wie die Dehnungsmessung. Ein Temperatureinfluss auf die Dehnungsmessstreifen kann somit ausgeschlossen werden.

Zur Bestimmung des Schubmoduls der PVB-Folien aus den Langzeitversuchen in Kapitel 8 wird der Bemessungswert E_{Glas} = 70000 N/mm² mit den temperaturabhängigen Verhältniswerten aus Tabelle 5-4 multipliziert. Fehlende Zwischenwerte der Temperatur werden interpoliert. Der E-Modul gilt ab 3 Sekunden nach Belastungsbeginn und wird für die gesamte Versuchsdauer als konstant angenommen. Das Kriechen der VSG-Scheiben infolge zeitlich verzögerter Abnahme des E-Moduls der Glasscheiben wird somit vernachlässigt.

Bei den Versuchen wurde neben der Temperaturabhängigkeit der Messergebnisse auch eine zeitabhängige Zunahme der Dehnungen und der Durchbiegung festgestellt. Diese war bei allen Temperaturen ungefähr gleich groß. Da die Zunahme sowohl bei der Dehnungsmessung, als auch bei der Wegmessung mit induktivem Wegaufnehmer in gleicher Höhe auftrat, konnte ein Kriechen der Dehnungsmessstreifen als Ursache der gemessenen Dehnungszunahme ausgeschlossen werden.

Die beobachtete zeitliche Änderung der Steifigkeit der Glasscheiben entspricht den Forschungsergebnissen von [Schneider 2005] (Kapitel 2.2.2). Als Beispiel ist in Bild 5-3 die zeitverzögerte relative Zunahme der Dehnung ε(t) im Vergleich zur Ausgangsdehnung ε(t = 3s) dargestellt (Mittelwert aus fünf Biegeversuchen, T = 20 °C). Das Spannungsniveau betrug ungefähr 40 N/mm². Die Dehnungszunahme nach 300 Sekunden lag bei den fünf Versuchen zwischen 0,7 % und 1,2 %. Zum Vergleich ist auch die Kriechfunktion einer 4 mm dicken ESG-Scheibe für Kurzzeitbelastung aus [Schneider 2005] für ein Spannungsniveau von 20 N/mm² dargestellt. Beide Kriechkurven sind auf die Dehnung zur Zeit t = 3 Sekunden bezogen.

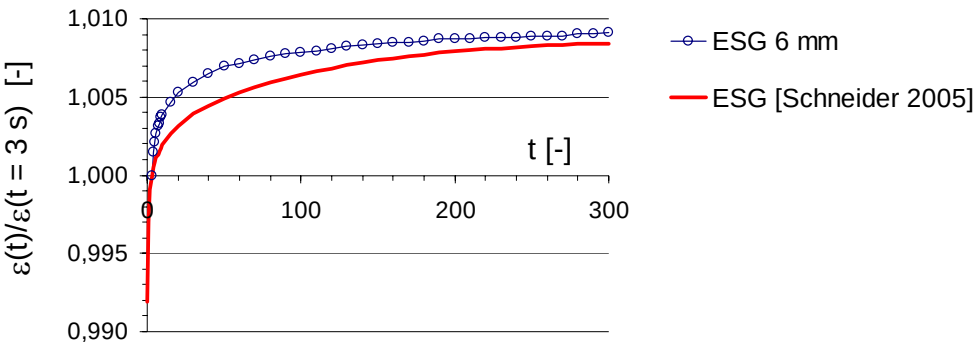


Bild 5-3: Zeitabhängige relative Zunahme der Dehnung ε(t) der Einzelscheiben ("ESG 6 mm") bezogen auf die Dehnung zur Zeit t = 3 s im Vergleich zur Kriechfunktion für ESG nach [Schneider 2005]

5.3 Streuung und statistische Signifikanz

5.3.1 Kurzzeitversuche

Zur Untersuchung der Auswirkung künstlicher Bewitterung auf das Verbundverhalten von Verbundsicherheitsglas wurden die Mittelwerte der Verbundfaktoren V_ε, V_w und $V_{\varepsilon/w}$ der gealterten Probekörper (Serie U, T, F) mit den Mittelwerten der ungealterten Probekörper (Serie N) verglichen. Zur Beurteilung, ob die künstliche Bewitterung zu einer statistisch signifikanten Änderung der Biegesteifigkeit geführt hatte, wurden zweiseitige Signifikanztests für den Mittelwert von jeweils zwei Stichproben aus drei bzw. fünf Versuchen durchgeführt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass bei zwei Stichproben - abgesehen vom unterschiedlichen Alterungszustand der Folie - gleiche Versuchsbedingungen vorlagen, und systematische Abweichungen zwischen den beiden Stichproben vernachlässigbar gering waren. Als zweiseitiges Signifikanzniveau des Tests (Irrtumswahrscheinlichkeit α_p) wurde ein Wert von $\alpha_p/2 = 2{,}5$ % gewählt. Die Standardabweichung wurde aus den beiden zu vergleichenden Stichproben abgeschätzt. Voraussetzung für die Anwendung des Tests ist, dass die Grundgesamtheiten der Verbundfaktoren aller Versuchsserien normalverteilt sind und die gleiche Standardabweichung besitzen. Aufgrund der geringen Streuung der Verbundfaktoren wurde diese Voraussetzung als erfüllt angesehen und musste aufgrund des geringen Stichprobenumfangs zumindest nicht verworfen werden.

Bei einigen Messergebnissen wurde alternativ ein verteilungsfreier zweiseitiger Test zum Vergleich der Lage zweier Stichproben mit unbekannter aber ähnlicher Verteilung nach *Wilcoxon-Mann-Whitney* [Sachs 1997] durchgeführt (Signifikanzniveau $\alpha_p/2 = 2{,}5$ %). Dieser Test führte in den meisten Fällen zu einer vergleichbaren Beurteilung der statistischen Signifikanz.

Der Spanne der Variationskoeffizienten ("VK") der Verbundfaktoren V_ε, V_w und $V_{\varepsilon/w}$ der Serie N (drei Stichproben (Folie A, B, C) mit jeweils fünf Probekörpern) zwischen dem Beginn (t = 3 s) und Ende (t = 300 s) der Kurzzeitversuche ist in Bild 5-4 dargestellt. Die Variationskoeffizienten der drei Verbundfaktoren lagen zwischen 0,2 und 3,7 %. Am geringsten streuten die Messergebnisse V_ε und $V_{\varepsilon/w}$. Deren Variationskoeffizienten war im Mittel nur etwa halb so groß wie die des Verbundfaktors V_w.

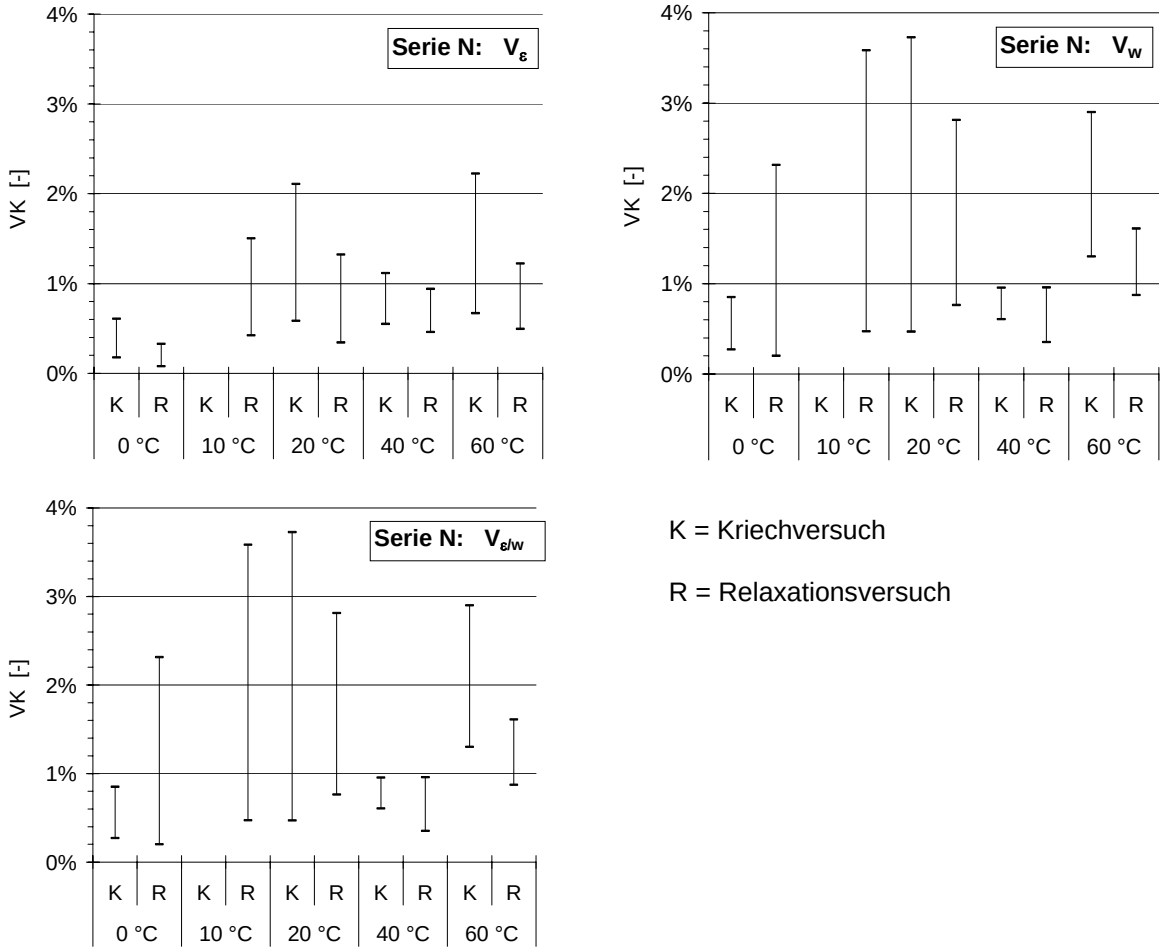


Bild 5-4: Spanne der Variationskoeffizienten (VK) der Verbundfaktoren V_ε, V_w und $V_{\varepsilon/w}$ aller Kurzzeitversuche der Serie N (fünf Probekörper je Folientyp)

Bei einer Temperatur von 0 °C streuten die Messergebnisse V_ε und $V_{\varepsilon/w}$ aus Versuchen an jeweils fünf VSG-Probekörpern in ähnlicher Höhe wie die Messergebnisse der Biegesteifigkeit monolithischer Glasscheiben aus jeweils fünf Biegeversuchen (VK = 0,2 bis 0,6 %). Da bei dieser Temperatur der Einfluss des Schubmoduls der PVB-Folie vernachlässigt werden kann (siehe Kapitel 3.2.2), deutet dies darauf hin, dass die Streuungen des E-Moduls, der Breite der Einzelglasscheiben und der gemessenen Gesamtdicke h_{ges} vergleichsweise sehr gering waren.

Die hier nicht dargestellten Variationskoeffizienten der Verbundfaktoren der künstlich bewitterten Versuchsserien waren i. d. R höher als die der nichtgealterten Serie N. Eine Korrelation zwischen der unterschiedlichen Bestrahlungsstärke (siehe Kapitel 4.7.1) der Probekörper und der Höhe der Verbundfaktoren ließ sich bei der Versuchsserie U aber nicht ausmachen.

Wird statt der Streuung der Verbundfaktoren die Streuung des Schubmoduls der Serie N bei 20 °C betrachtet, so betrug dessen Variationskoeffizient bei Versuchsbeginn (t = 3 s) zwischen 8 und 20 % und bei Versuchsende (t = 300 s) zwischen 2 und 10 %. Aufgrund der hohen Sensitivität des Schubmoduls bei sehr weichen oder sehr steifen Folien ergaben sich bei anderen Temperaturen teilweise sehr viel höhere Streuungen.

5.3.2 Langzeitversuche

Der Variationskoeffizient VK des Verbundfaktors V_ε der Langzeitversuche mit jeweils fünf Probekörpern der Serie N ist in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungszeit in Bild 5-5 dargestellt. Ähnlich wie bei den Kurzzeitversuchen lagen auch bei den Langzeitversuchen die Variationskoeffizienten zwischen 0,2 und 2,0 %.

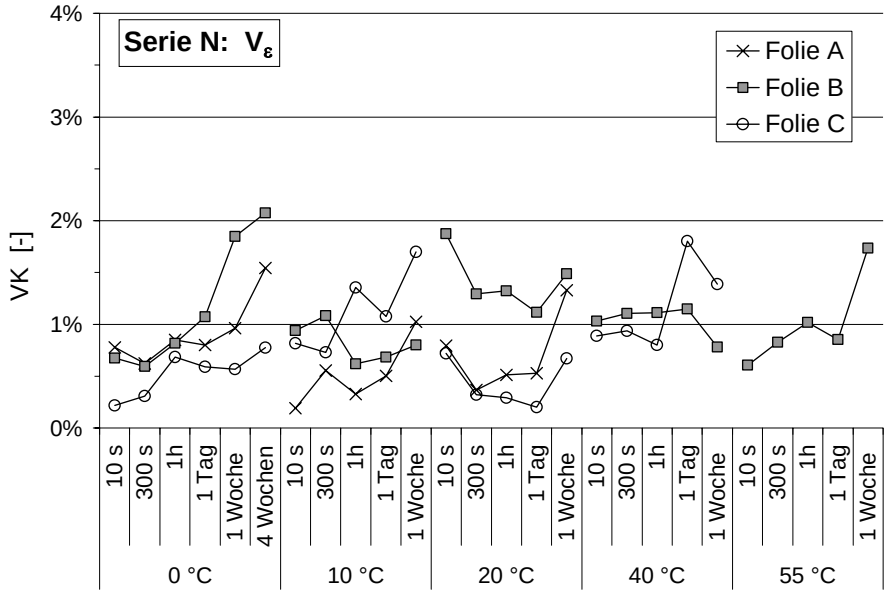


Bild 5-5: Variationskoeffizient (VK) des Verbundfaktors V_ε der Langzeitversuche der Serie N (fünf Probekörper je Folientyp)

Auch bei den Langzeitversuchen wurde eine Normalverteilung des Verbundfaktors V_ε vorausgesetzt und die statistische Signifikanz des Einflusses künstlicher Bewitterung mit dem oben beschriebenen Test überprüft. Der Variationskoeffizient des Schubmoduls der Serie N bei 20 °C lag bei Versuchsbeginn (t = 3 s) zwischen 8 und 12 % und nach einer Woche Belastungsdauer zwischen 2 und 10 %.

Mit Hilfe der in Bild 3-4, Kapitel 3.2.2 dargestellten Sensitivität des Schubmoduls kann aus dem Variationskoeffizient des Verbundfaktors V_ε und dem Mittelwert des Schubmoduls G die Streuung ΔG des Schubmoduls der PVB-Folie in einer Versuchsserie abgeschätzt werden. Dazu ist der Variationskoeffizient VK mit der Sensitivität S_ε und dem Mittelwert von G zu multiplizieren.

5.4 Kurzzeitversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB

In Versuchen mit einer Belastungsdauer von maximal 300 Sekunden wurde die Auswirkung der künstlichen Bewitterung durch Bestrahlung (Serie UV, Kapitel 4.7.1), durch Trocknung bei hoher Temperatur (Serie T, Kapitel 4.7.2) und durch Lagerung bei hoher Luftfeuchtigkeit (Serie F, Kapitel 4.7.3) auf die Biegesteifigkeit der VSG-Balken und damit auf die Schubsteifigkeit der Folien A, B und C untersucht.

Zur Beurteilung der Auswirkung der Alterung werden die Quotienten UV/N, T/N oder F/N aus dem Mittelwert der Verbundfaktoren der gealterten Probekörper einer Versuchsserie UV,

T, oder F und dem Mittelwert der Verbundfaktoren der ungealterten Probekörper der Serie N gebildet. Ist dieser Quotient größer als 1,0 so hat die künstliche Bewitterung zu einer Versteifung der Probekörper bzw. einer Versteifung der PVB-Folie geführt. Dies kann durch eine Austrocknung der Folie oder durch chemische Veränderungen in der Folie (z. B. Vernetzung) verursacht worden sein. Ist der Quotient kleiner als 1,0, so hat sich der Schubmodul der PVB-Folie verringert. Ursache dafür kann ein Anstieg der Feuchtigkeit in der Folie oder eine Alterung durch chemische Zersetzung sein.

Die Darstellung der Ergebnisse aus den Kurzzeitversuchen teilt sich in einen Vergleich der Serien UV, T und N einerseits und in einen Vergleich der Serien F und N andererseits. Da sich die künstliche Bewitterung bei allen drei Folien gleich auswirkte, werden im Folgenden nur die Ergebnisse für Folie A gezeigt. Anhang 1 enthält die Ergebnisse der Kurzzeitversuche mit den Folien B und C.

Es zeigte sich, dass bei kurzen Belastungszeiten Biegeversuche bei einer Folientemperatur von 20 °C (nahe der Glasübergangstemperatur von PVB) am besten geeignet sind, relativ kleine Änderungen des Schubmoduls - wie sie z. B. durch Alterungseffekte verursacht werden - durch Messung der Biegesteifigkeit zu untersuchen. Bei tieferen oder höheren Temperaturen ist der Einfluss des Schubmoduls auf die Biegesteifigkeit so gering, dass eine mögliche Auswirkung der Alterung auf die Steifigkeit der PVB-Folie aufgrund der Streuung der Messergebnisse nicht mehr erkannt werden kann.

5.4.1 Einfluss von Bestrahlung und hoher Temperatur

5.4.1.1 Relaxationsversuche

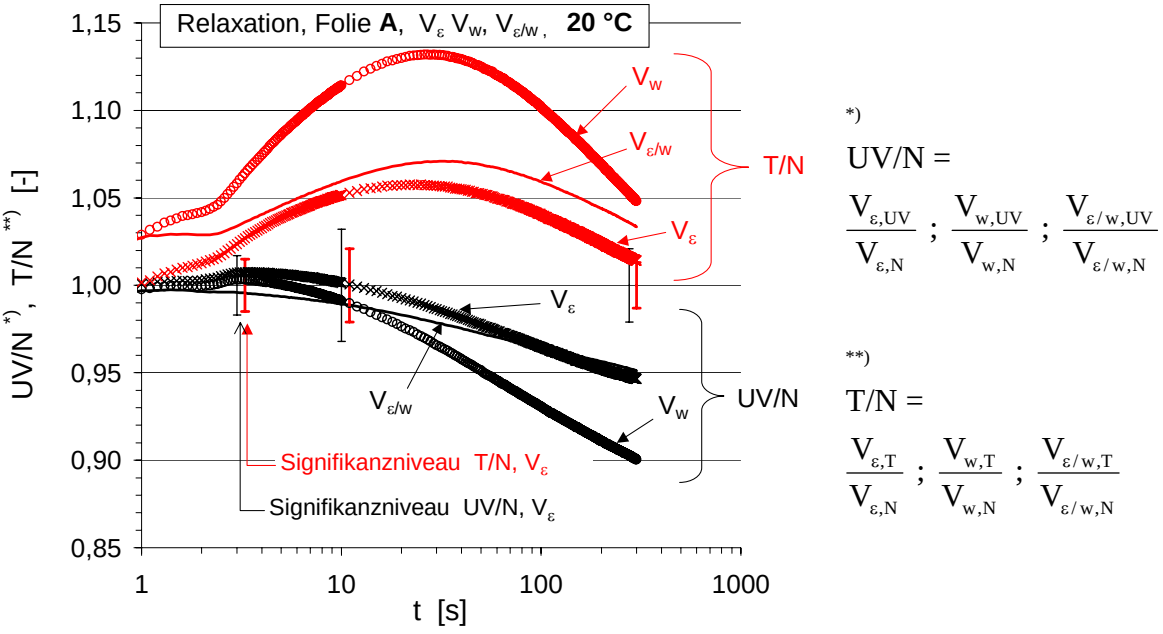


Bild 5-6: Relaxationsversuch bei 20 °C, Folie A: Verhältnis UV/N bzw. T/N der Verbundfaktoren V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$ der Serien UV bzw. T zu den Verbundfaktoren V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$ der Serie N

Der zeitliche Verlauf der Quotienten UV/N bzw. T/N der mittleren Verbundfaktoren V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$ aus den gealterten Versuchsserien UV bzw. T und der ungealterten Serie N ist für die Versuchstemperatur T = 20 °C in Bild 5-6 dargestellt. Zur Beurteilung der statistischen Signifikanz der beobachteten Unterschiede zwischen den Versuchsserien ist, wie auch in allen folgenden Bildern, das zweiseitige Signifikanzniveau α_p = 5 % für den Verbundfaktor V_ε bei t = 3, 10 und 300 Sekunden eingetragen.

Die wichtigsten Ergebnisse aus Bild 5-6 können wie folgt zusammengefasst werden:

1) Durch Trocknung der Versuchskörper bei 70 °C hat sich der Verbundfaktor V_ε der Serie T gegenüber den ungealterten Proben um bis zu 6 % erhöht. Rechnerisch entspricht dies einer Erhöhung des Schubmoduls der PVB-Folie um 30 %. Aufgrund der thermischen Stabilität von PVB kann davon ausgegangen werden, dass dieser Zuwachs nur durch eine Austrocknung der Folie im Randbereich verursacht wurde. Die Größe dieses Randbereichs in welchem sich der Schubmodul erhöht hat ist jedoch nicht bekannt. Die rechnerische Erhöhung des Schubmoduls um 30 % ist demnach nur ein auf die gesamte Schubfläche bezogener gemittelter Wert.

2) Oberhalb einer Belastungsdauer von 10 Sekunden ist die Steifigkeit der bestrahlten VSG-Balken der Serie UV im Mittel geringer als die der Probekörper der Serie N. Die Reduktion von V_ε um durchschnittlich 5 % am Ende der Kurzzeitversuche entspricht einer rechnerischen Reduktion des Schubmoduls um 22 %.

3) Alle drei Verbundfaktoren führen prinzipiell zur gleichen Beurteilung der statistischen Signifikanz der gemessenen Unterschiede zwischen den Versuchsserien. Die gemessenen Unterschiede des Verbundfaktors V_w der gealterten Probekörper und der ungealterten Probekörper sind zwar doppelt so groß wie die Unterschiede der Verbundfaktoren V_ε und $V_{\varepsilon/w}$, sie sind aber auch mit ungefähr doppelt so großen Streuungen verbunden. Die Darstellung der Versuchsergebnisse bei anderen Temperaturen und bei den Folien B und C beschränkt sich daher nur noch auf den von der Durchbiegung unabhängigen Verbundfaktor V_ε.

Bild 5-7 zeigt den Einfluss der Alterung der Serien UV und T auf die Schubsteifigkeit der Folie A bei anderen Temperaturen. Gegenüber einer Temperatur von 20 °C sind die gemessenen Änderungen der Biegesteifigkeit vergleichsweise gering und liegen im Bereich der Streuung der Versuchsergebnisse. Außer bei einer Temperatur von 60 °C liegt der Quotient UV/N geringfügig unterhalb von 1,0. Eine statistisch signifikante Verringerung der Biegesteifigkeit wurde nur bei der Versuchsserie UV bei einer Temperatur von 40 °C festgestellt.

Aufgrund der sehr geringen Differenzen der mittleren Biegesteifigkeiten der Versuchsserien von 1 bis 2 % können bei diesen von 20 °C verschiedenen Temperaturen aus den Kurzzeitversuchen keine Rückschlüsse auf den Einfluss der Alterung gezogen werden.

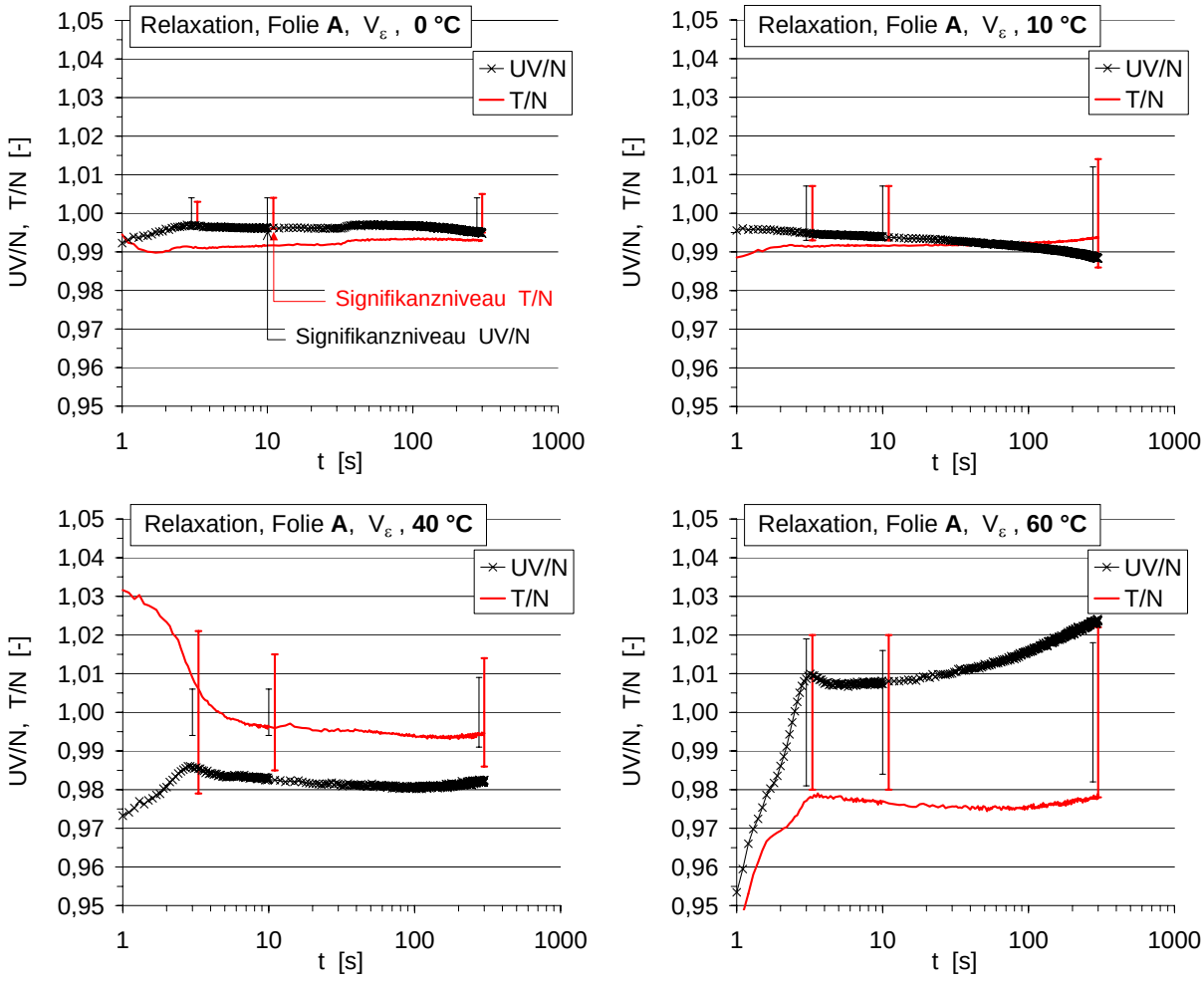


Bild 5-7: Relaxationsversuche bei 0 °C, 10 °C, 40 °C und 60 °C, Folie A: Verhältnis UV/N bzw. T/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. T zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

5.4.1.2 Kriechversuche

Den Verlauf der Quotienten UV/N und T/N der Verbundfaktoren V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$ während der Kriechversuche bei 20 °C zeigt Bild 5-8. Generell sind alle Quotienten größer als bei den Relaxationsversuchen. Im Gegensatz zu den Relaxationsversuchen wurde auch bei der Serie UV während der gesamten Versuchsdauer eine größere mittlere Biegesteifigkeit gemessen als bei der Serie N. Bei den Kriechversuchen ergab die künstliche Bestrahlung eine geringe Steigerung des Verbundfaktors V_ε um 3 % bzw. des Schubmoduls um 19 %. Die Alterung bzw. Austrocknung der PVB-Folie der Versuchsserie T führte zu einer maximalen Erhöhung der Biegesteifigkeit um 8 %, welche theoretisch einer Erhöhung des Schubmoduls um 38 % entspricht.

Das Ergebnis der anderen Temperaturstufen zeigt Bild 5-9. Wie bei den Relaxationsversuchen sind auch bei den Kriechversuchen bei diesen Folientemperaturen die Unterschiede zwischen den mittleren Biegesteifigkeiten der Versuchsserien sehr gering (1 bis 3 %). Eine Messung von Alterungseinflüssen ist bei diesen Temperaturen praktisch nicht möglich.

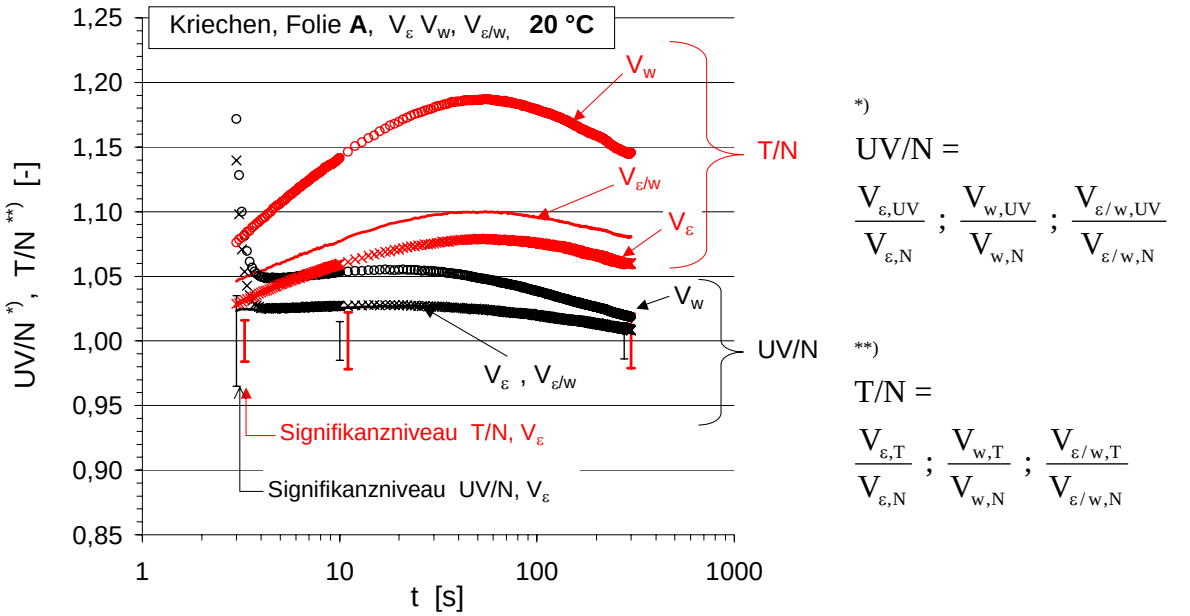


Bild 5-8: Kriechversuch bei 20 °C, Folie A: Verhältnis UV/N bzw. T/N der Verbundfaktoren V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$ der Serien UV bzw. T zu den Verbundfaktoren V_ε, V_w, $V_{\varepsilon/w}$ der Serie N

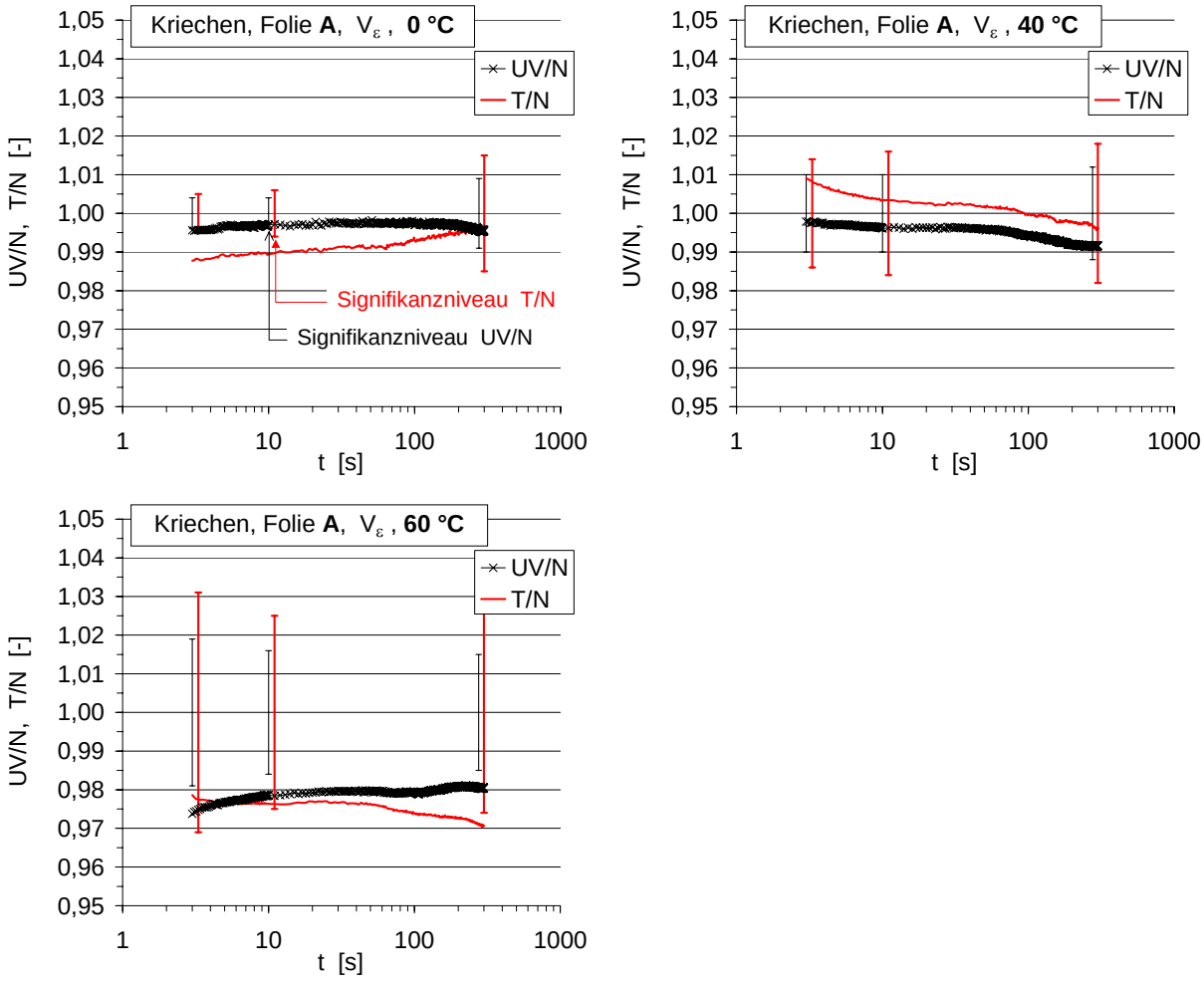


Bild 5-9: Kriechversuche bei 0 °C, 40 °C und 60 °C, Folie A: Verhältnis UV/N bzw. T/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. T zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

5.4.1.3 Kontrollversuch zum Vergleich der Relaxations- und Kriechversuche

Die Ergebnisse der Relaxations- und Kriechversuche der Serie UV bei 20 °C führen zu einer widersprüchlichen Beurteilung der Auswirkung künstlicher Bestrahlung auf die Schubsteifigkeit der PVB-Folie. Bei den Relaxationsversuchen wurde am Ende der Versuchsdauer im Mittel eine Verminderung des Schubmoduls um 20 % gemessen (Bild 5-6). Bei Kriechversuchen wurde an den gleichen Probekörpern jedoch eine signifikante Versteifung der Folie festgestellt (Bild 5-8).

Die Ursache der widersprüchlichen Ergebnisse liegt in den Unterschieden der mittleren Biegesteifigkeit, welche mit den selben Probekörpern einer Versuchsserie zuerst anhand von Relaxationsversuchen und danach mittels Kriechversuchen gemessen wurde. So lag bei allen Folien bei t = 100 Sekunden der Verbundfaktor V_ε der ungealterten Probekörper der Serie N bei den Relaxationsversuchen im Mittel um ca. 2 bis 3 % höher als bei den Kriechversuchen. In den Versuchsserien UV und T kehrte sich dieser Unterschied jedoch um. Die Messung des Verbundfaktors V_ε ergab in dieser Versuchsserie bei den Relaxationsversuchen um 1 bis 3 % niedrigere Mittelwerte als bei den Kriechversuchen. Bei den anderen Temperaturen waren die Unterschiede zwischen den Biegesteifigkeiten welche bei den Kriech- und Relaxationsversuchen gemessen wurden geringern als bei 20 °C. Bei 0 °C, der Temperatur mit dem geringsten messbaren Einfluss des Schubmoduls der PVB-Folie auf die Biegesteifigkeit der Probekörper, war der Mittelwert des Verbundfaktors V_ε bei t = 100 Sekunden bei allen drei Serien N, UV und T bei den Relaxationsversuchen um maximal 0,5 % höher als bei den Kriechversuchen. Dies liegt im Rahmen der Streuung innerhalb einer Versuchsserie und weist darauf hin, dass die Differenzen zwischen den Messwerten der Relaxationsversuchen und der Kriechversuche nur durch unterschiedliche zeitliche Verläufe des Schubmoduls verursacht wurden.

Eine physikalische Ursache des unterschiedlich hohen Schubmoduls der gleichen Serie von Probekörpern bei Kriech- und Relaxationsversuchen konnte nicht nachgewiesen werden. Alle Versuche wurden unter möglichst gleichen Versuchsbedingungen (Geometrie des Versuchsaufbaus, Temperaturregelung, Messeinrichtung) durchgeführt. Temperaturunterschiede, die höhere Durchbiegung bei den Relaxationsversuchen als bei den Kriechversuchen, die unterschiedlich lange Lagerung der Probekörper und der relativ lange Zeitraum zwischen den Versuchen (mehrere Monate) könnten die systematischen Steifigkeitsunterschiede zwischen Kriech- und Relaxationsversuchen verursacht haben. Da sich diese unterschiedlich auf die mittlere Biegesteifigkeit der Serie N einerseits und der Serien UV und T andererseits ausgewirkt haben, könnte dies zu den widersprüchlichen Ergebnissen geführt haben. Aufgrund der geringen Höhe von 1 bis 3 % könnten diese Unterschiede jedoch auch zufälliger Art sein.

Zur Kontrolle der Ergebnisse von Relaxations- und Kriechversuchen wurden mit jeweils fünf Probekörpern der Serien N und UV (nur Folie A) nochmals Biegeversuche bei 20 °C durchgeführt. Dabei wurde eine weitgehende Minimierung möglicher Unterschiede der Versuchsbedingungen angestrebt. Vor den Versuchen wurde alle zehn Probekörper zwei Tage lang unter gleichen Temperaturbedingungen in der Klimakammer gelagert. Die Relaxations- und Kriechversuche erfolgten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen. Die Durchbiegung der

weggesteuerten Relaxationsversuche wurde entsprechend der maximalen Durchbiegung der Kriechversuche gewählt.

Den zeitlichen Verlauf des Quotienten UV/N der Verbundfaktoren V_ε und V_w zeigt Bild 5-10. Bei der Serie UV wurde eine maximale Erhöhung des Verbundfaktors V_ε gegenüber der Serie N um 1 % (Relaxation) bzw. 2 % (Kriechen) gemessen. Bei den Kriechversuchen entspricht dies bei t = 20 s einer theoretischen Erhöhung des Schubmoduls um 10 % (unter der Annahme einer gleichmäßigen Erhöhung über die gesamte Breite der VSG-Balken). Aufgrund der Streuung der Messwerte stellt diese prozentuale Änderung des Schubmoduls die untere Grenze dar, welche mit Biegeversuchen an Stichproben aus fünf Probekörpern bei 20 °C gemessen werden kann.

Bis t = 100 s liegt der Quotient UV/N der beiden Verbundfaktoren V_ε und V_w knapp oberhalb des Signifikanzniveaus. Die künstliche Bestrahlung der Probekörper hat demnach zu einer sehr geringen Erhöhung der Biegesteifigkeit der Probekörper geführt. Da zwischen der Bewitterung durch UV-Strahlung und den Kontrollversuchen ein Zeitraum von 15 Monaten lag, in welchem die Probekörper unter normalen Laborbedingungen gelagert wurden (ca. 20 °C und 50 bis 60 % rel. LF), könnte die gemessene Versteifung auch durch eine irreversible Alterung (Entweichen von Weichmacher, photochemische Versprödung) der Folie verursacht worden sein.

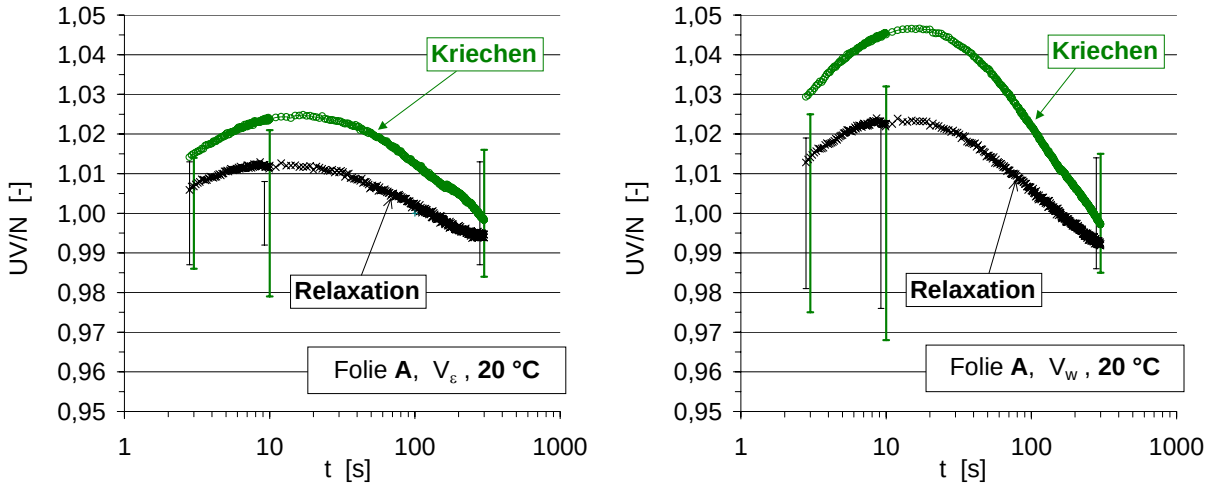


Bild 5-10: Kontrollversuch zum Vergleich der Relaxations- und Kriechversuche (Folie A, 20 °C): Verhältnis UV/N der Verbundfaktoren V_ε und V_w der Serien UV zu den Verbundfaktoren der Serie N

Bei den Kontrollversuchen lagen die Mittelwerte des Verbundfaktors V_ε der Kriechversuche sowohl bei der Serie N als auch bei der Serie UV bei t = 100 s um ca. 5 % oberhalb der entsprechenden Mittelwerte bei den Relaxationsversuchen. Dies bedeutet dass die Steifigkeitsunterschiede zwischen Kriech- und Relaxationsversuchen i. d. R. viel größer sind als die Auswirkung der Alterung der PVB-Folie auf die Biegesteifigkeit der Probekörper. Kreuzweise Vergleiche zwischen Kriech- und Relaxationsversuchen zur Untersuchung von Alterungsprozessen sind daher nicht möglich.

5.4.2 Einflusses von hoher Luftfeuchtigkeit

Jeweils drei Probekörper je Folie wurden zwei Wochen (Serie F1) und vier Wochen (Serie F2) lang bei fast 100 % Luftfeuchtigkeit und 52 °C Lufttemperatur gelagert. Nach ihrer Entnahme wurden die Probekörper an den Rändern dicht verklebt (siehe Kapitel 4.7.3) um ein Entweichen der Feuchtigkeit möglichst langfristig zu vermeiden. Analog zu Kapitel 5.4.1 wurden in Relaxations- und Kriechversuchen die Mittelwerte der Verbundfaktoren V_ε und V_w (Serie F2 nur V_w) ermittelt und mit dem Mittelwert der Verbundfaktoren der Serie N verglichen.

5.4.2.1 Relaxationsversuche

Der in Relaxationsversuchen ermittelte Quotient F1/N und F2/N aus den beiden Verbundfaktoren V_ε und V_w der Serien F1 bzw. des Faktors V_w der Serie F2 und den entsprechenden Verbundfaktoren der Serie N bei 20 °C ist in Bild 5-11 dargestellt. Da bei der Serie F2 nur die Durchbiegung gemessen wurde, wird bei der Darstellung der nachfolgenden Ergebnisse nur der Verbundfaktor V_w wiedergegeben. Der Unterschied der Mittelwerte dieses Verbundfaktors zwischen den Versuchsserien F1 bzw. F2 und der Serie N ist bei 20 °C ungefähr doppelt so groß wie der Unterschied des Verbundfaktors V_ε (siehe Bild 5-11). Gleichzeitig ist aber auch die Streuung von V_w innerhalb einer Stichprobe doppelt so hoch wie die Streuung von V_ε.

Zur Beurteilung der statistischen Signifikanz der Auswirkung der Befeuchtung auf die Biegesteifigkeit der Serien F1 und F2 ist das zweiseitige Signifikanzniveau $\alpha_p = 5$ % für den Verbundfaktor V_w bei t = 3, 10 und 300 Sekunden eingetragen.

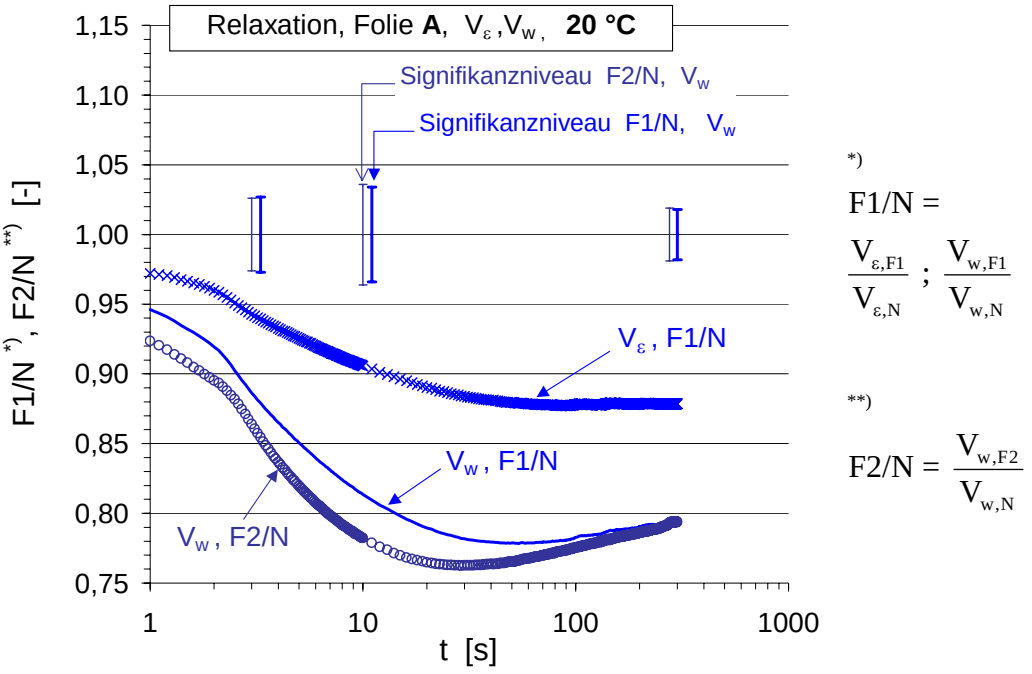


Bild 5-11: Relaxationsversuche bei 20 °C, Folie A: Verhältnis F1/N bzw. F2/N der Verbundfaktoren V_ε und V_w der Serien F1 bzw. F2 zu den Verbundfaktoren V_ε und V_w der Serie N

In Bild 5-11 ist deutlich die Abnahme der Biegesteifigkeit der Probekörper durch die eingedrungene Feuchtigkeit zu erkennen. Der Unterschied der Biegesteifigkeit nach einer 14-tägigen und einer vierwöchigen Lagerung der Probekörper bei hoher Luftfeuchtigkeit ist dagegen sehr gering. Die maximale Abnahme des Verbundfaktors V_w der Serie F1 bei t = 40 s um 22 % entspricht einer Reduktion des Schubmoduls um 56 %. Dieser Wert gilt nur unter der Annahme, dass der Schubmodul gleichmäßig auf der gesamten Breite der Probekörper reduziert wurde. Da die Feuchtigkeitsaufnahme der PVB-Folie nur auf einen wenige Zentimeter breiten Randbereich beschränkt ist (siehe Kapitel 4.7.3) entspricht diese pauschale Reduktion des Schubmoduls jedoch nicht den realen Verhältnissen innerhalb der Folie.

Die Ergebnisse der Relaxationsversuche mit der Folie A bei anderen Temperaturen zeigt Bild 5-12. Die vergleichbaren Ergebnisse der Folien B und C sind in Anhang A1 dargestellt. Aufgrund der starken Abminderung der Schubsteifigkeit der PVB-Folie durch die eindringende Feuchtigkeit konnte teilweise auch bei 10, 40 und 60 °C eine signifikante Verringerung des Verbundfaktors V_w gemessen werden.

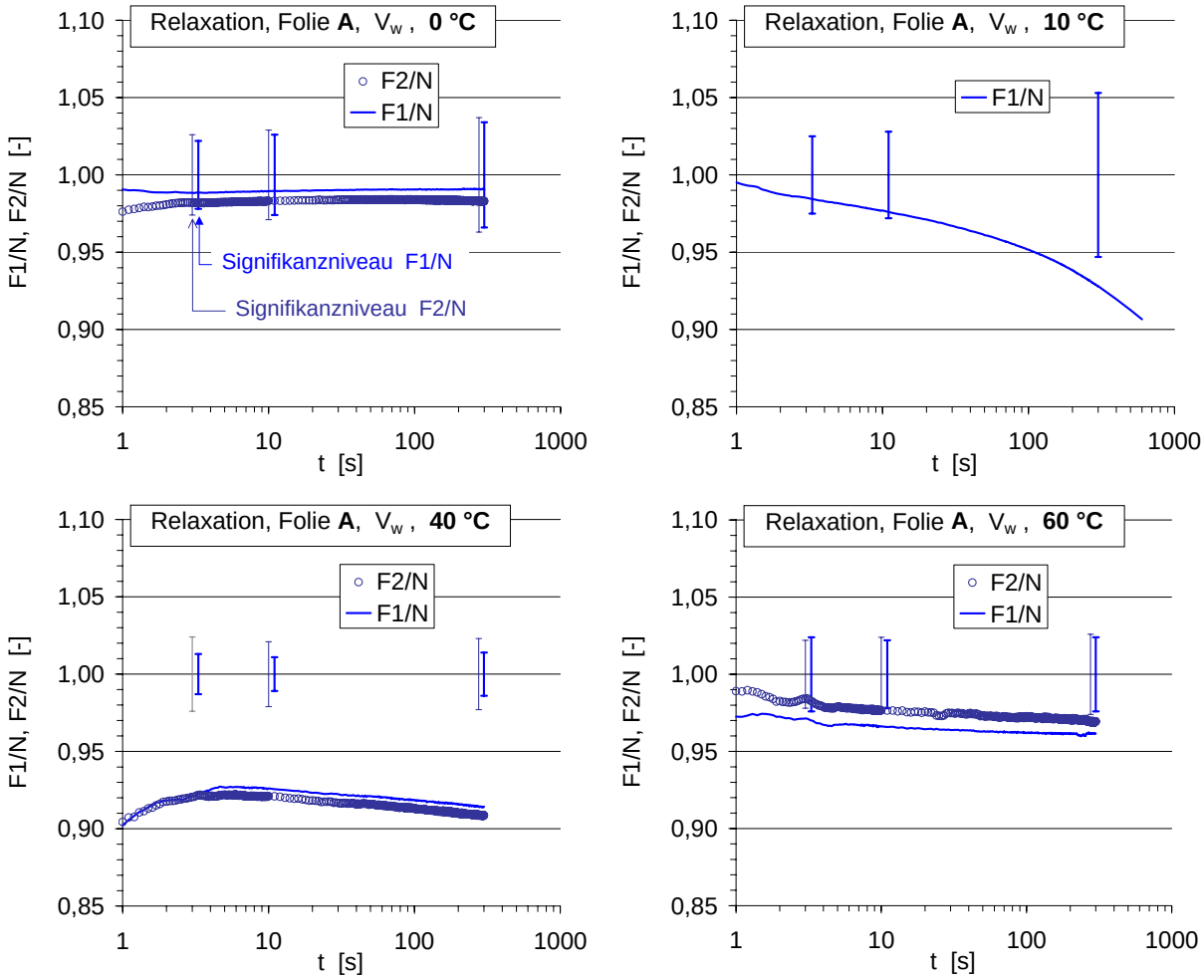


Bild 5-12: Relaxationsversuche bei 0 °C, 10 °C, 40 °C und 60 °C, Folie A: Verhältnis F1/N bzw. F2/N des Verbundfaktors V_w der Serien F1 bzw. F2 zum Verbundfaktor V_w der Serie N

5.4.2.2 Kriechversuche

Der mittels Kriechversuchen gemessene Einfluss eindringender Feuchtigkeit auf den Quotienten F1/N und F2/N des Verbundfaktors V_w zeigt Bild 5-13.

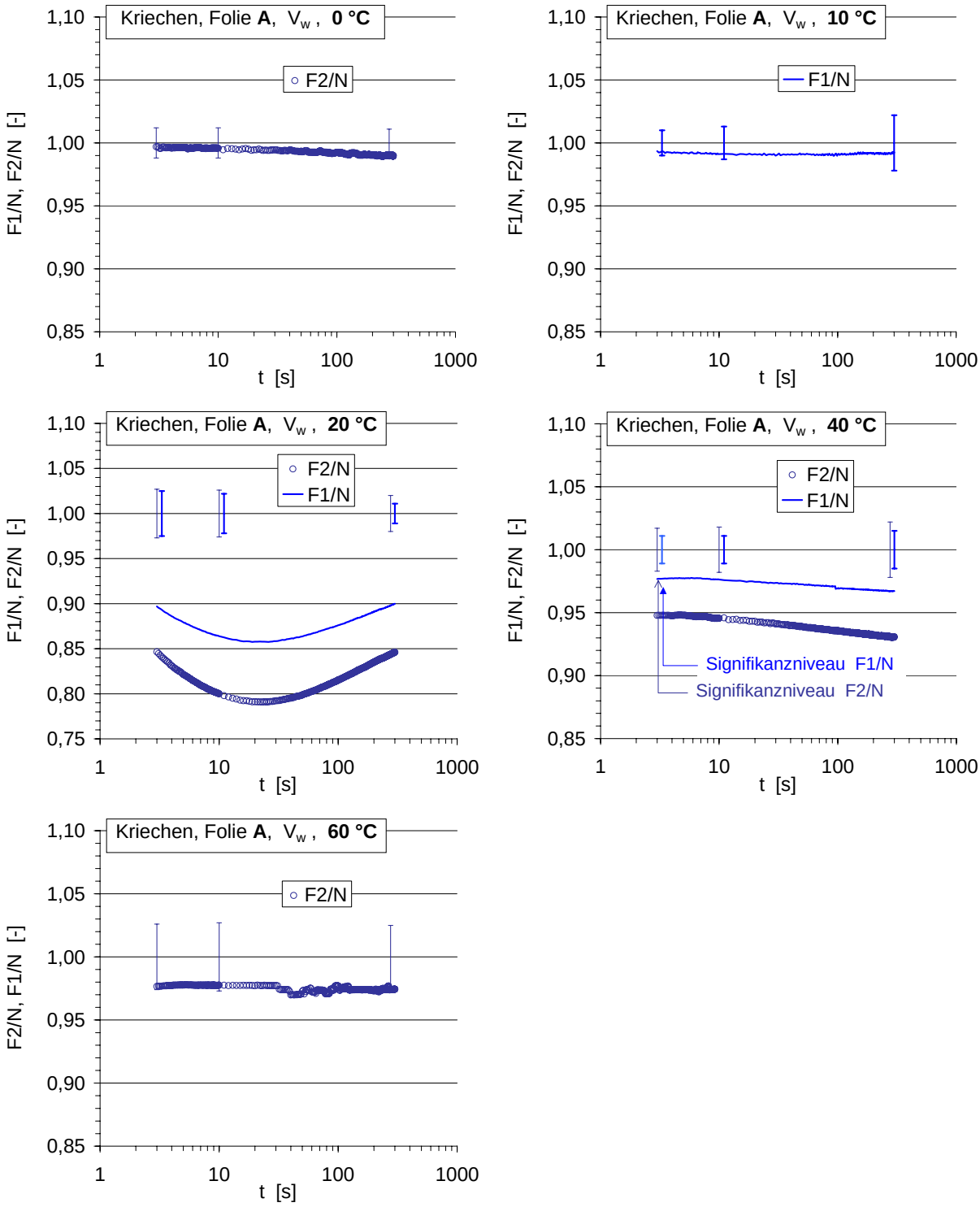


Bild 5-13: Kriechversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, Folie A: Verhältnis F1/N bzw. F2/N des Verbundfaktors V_w der Serien F1 bzw. F2 zum Verbundfaktor V_w der Serie N

Die gemessene Abminderung des Verbundfaktors V_w der Serie F1 durch eindringende Feuchtigkeit war bei den Kriechversuchen bei 20 und 40 °C geringer als bei den Relaxationsversuchen (Bild 5-11 und Bild 5-12). Ursache dafür sind wiederum Unterschiede zwischen den Verbundfaktoren, welche in der gleichen Serie von Probekörpern bei Relaxations- und Kriechversuchen gemessen wurden (siehe Kapitel 5.4.1.3). Bei der Serie F2 ergab sich bei den Kriechversuchen näherungsweise die gleiche Reduktion des Verbundfaktors wie bei den Relaxationsversuchen. Die Kriechversuche zeigten somit wie die Relaxationsversuche eindeutig eine signifikante Abminderung der Biegesteifigkeit von VSG-Balken.

5.5 Langzeitversuche zur Untersuchung der Alterung von PVB

Der Einfluss der künstlichen Bewitterung auf die Biegesteifigkeit bzw. den Verbundfaktor V_ε der Serien UV, T und F1 wurde zusätzlich bei einigen Temperaturen auch in ein bis vier Wochen dauernden Kriechversuchen untersucht, welche hier als "Langzeitversuche" bezeichnet werden. Tendenziell ergaben die Langzeitversuche dieselbe Auswirkung der künstlichen Bewitterung auf die Schubsteifigkeit der PVB-Folie wie die kurzzeitigen Kriechversuche.

Die Ergebnisse der Langzeitversuche mit allen drei Folien bei einer Temperatur von 20 °C sind in Bild 5-14 als Quotient UV/N, T/N und F1/N aus dem mittleren Verbundfaktor V_ε der Serien UV, T und F1 und dem mittleren Verbundfaktor V_ε der Serie N zusammengestellt (mit zweiseitigem Signifikanzniveau $\alpha_p/2 = 2{,}5$ % bei t = 10 Sekunden, 300 Sekunden, 1 Stunde, 1 Tag, 1 Woche). Für Folie B sind zudem die Ergebnisse der Versuche bei 0 und 5 °C in Bild 5-15 und bei 10 und 55 °C in Bild 5-16 dargestellt. Weitere Ergebnisse für die Folien A und C befinden sich im Anhang 2.

Unterhalb einer Belastungsdauer von 300 Sekunden wurde bei 20 °C bei allen Versuchsserien eine signifikante Änderung der Biegesteifigkeit gemessen. Im Gegensatz zum Verhalten bei den Kurzzeitversuchen führte die künstliche Bestrahlung der Serie UV zu einer stärkeren Versteifung der Probekörper als die Trocknung der Probekörper der Serie T. Bei 0 und 20 °C führte die Lagerung bei hoher Feuchtigkeit zu einer signifikanten Reduktion der Biegesteifigkeit. Diese war jedoch bei 20 °C geringer als bei den Kurzzeitversuchen. Aufgrund des zeitlichen Abstands von ungefähr drei Monaten zwischen der künstlichen Bewitterung und den Langzeitversuchen könnte trotz Abdichtung der Ränder Feuchtigkeit aus den Probekörper entwichen sein und sich somit die Schubsteifigkeit der PVB-Folie wieder erhöht haben.

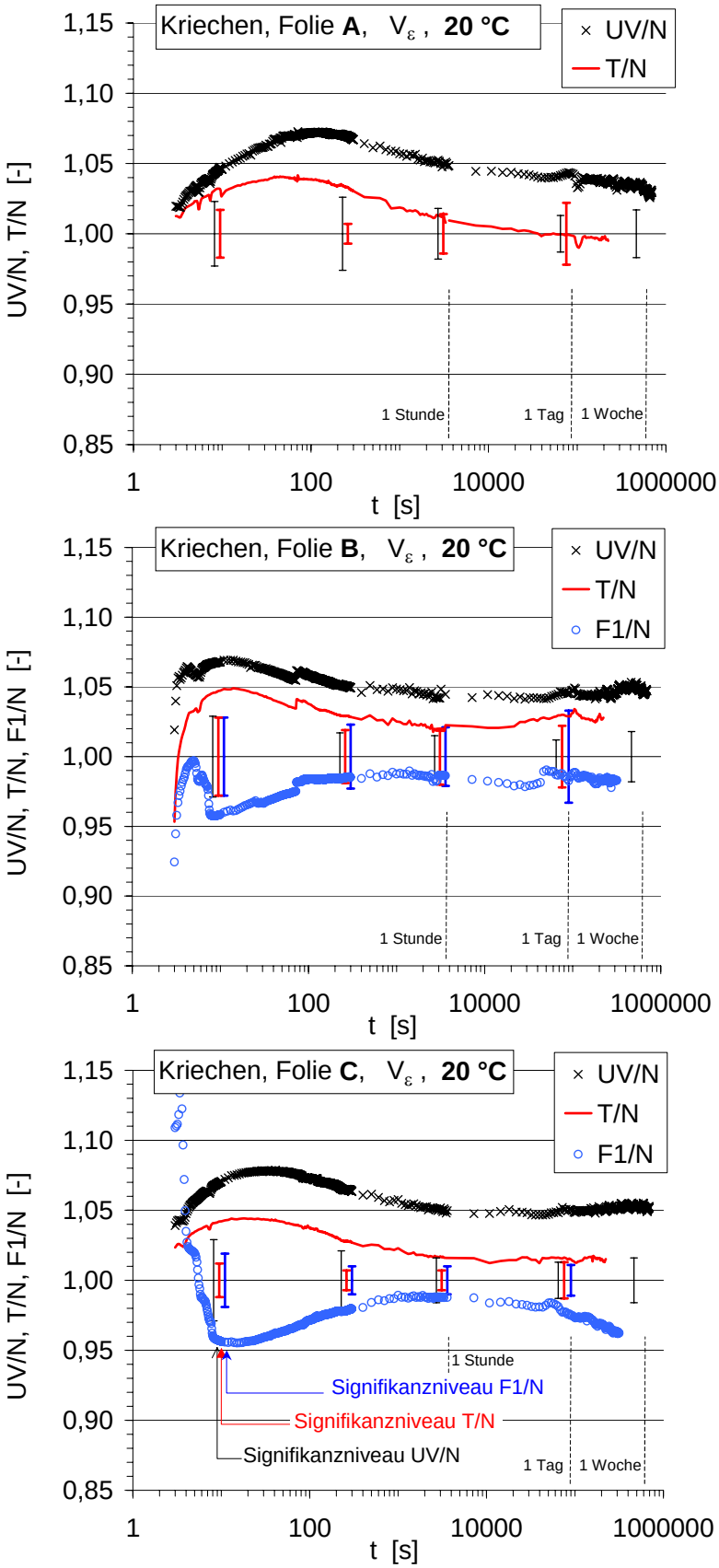


Bild 5-14: Langzeitversuche (Kriechen) bei 20 °C, Folien A, B, C: Quotient UV/N, T/N bzw. F1/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV, T bzw. F1 zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

Auch bei den Langzeitversuchen war die Folientemperatur von 20 °C am besten geeignet um relativ geringe Einflüsse der Alterung auf die Biegesteifigkeit der Probeköper zu messen. Signifikante Änderungen der Biegesteifigkeit infolge künstlicher Bestrahlung wurden auch bei einer Temperatur von 5 und 10 °C festgestellt. Bei der Versuchserie F1 wurde bei 0 °C gegenüber der zu Versuchsbeginn gemessenen Steifigkeit nach einem Tag eine relative Abminderung der Biegesteifigkeit von ungefähr 5 % gemessen (Bild 5-15).

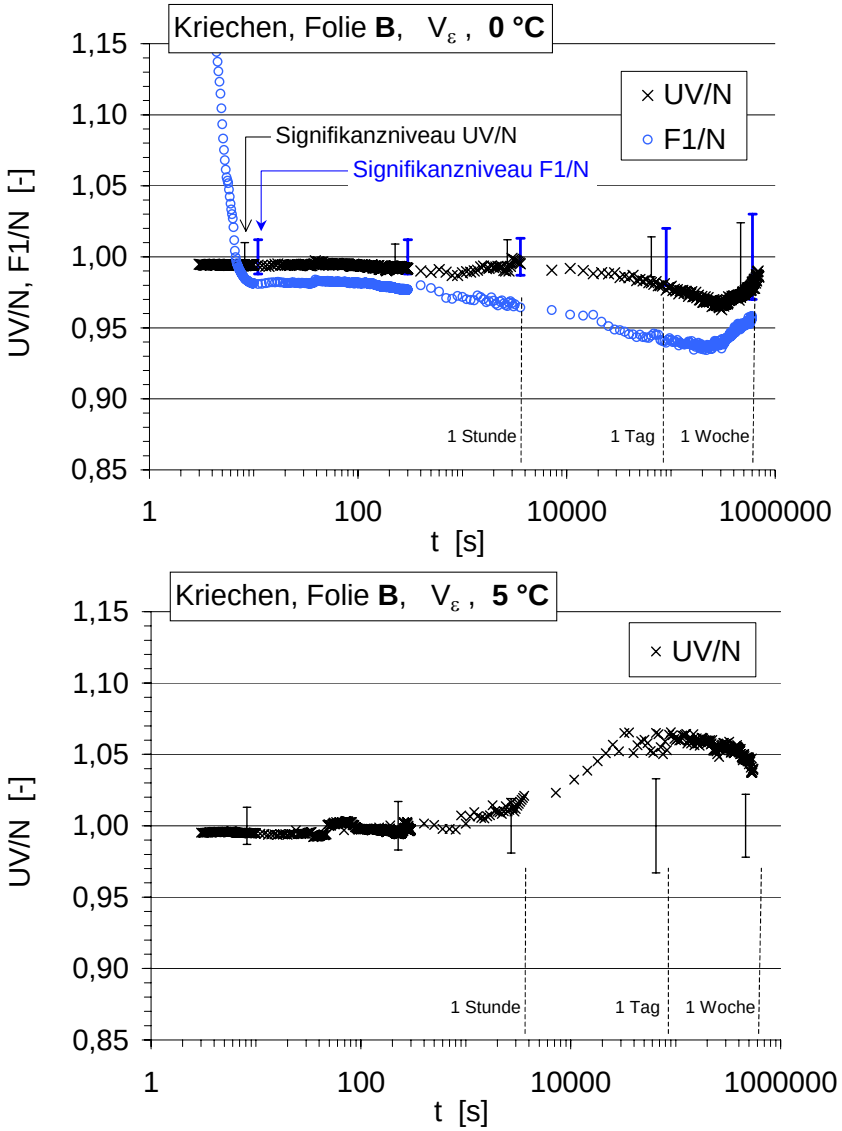


Bild 5-15: Langzeitversuche (Kriechen) bei 0 °C und 5 °C , Folie B: Quotient UV/N und F1/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV und F1 zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

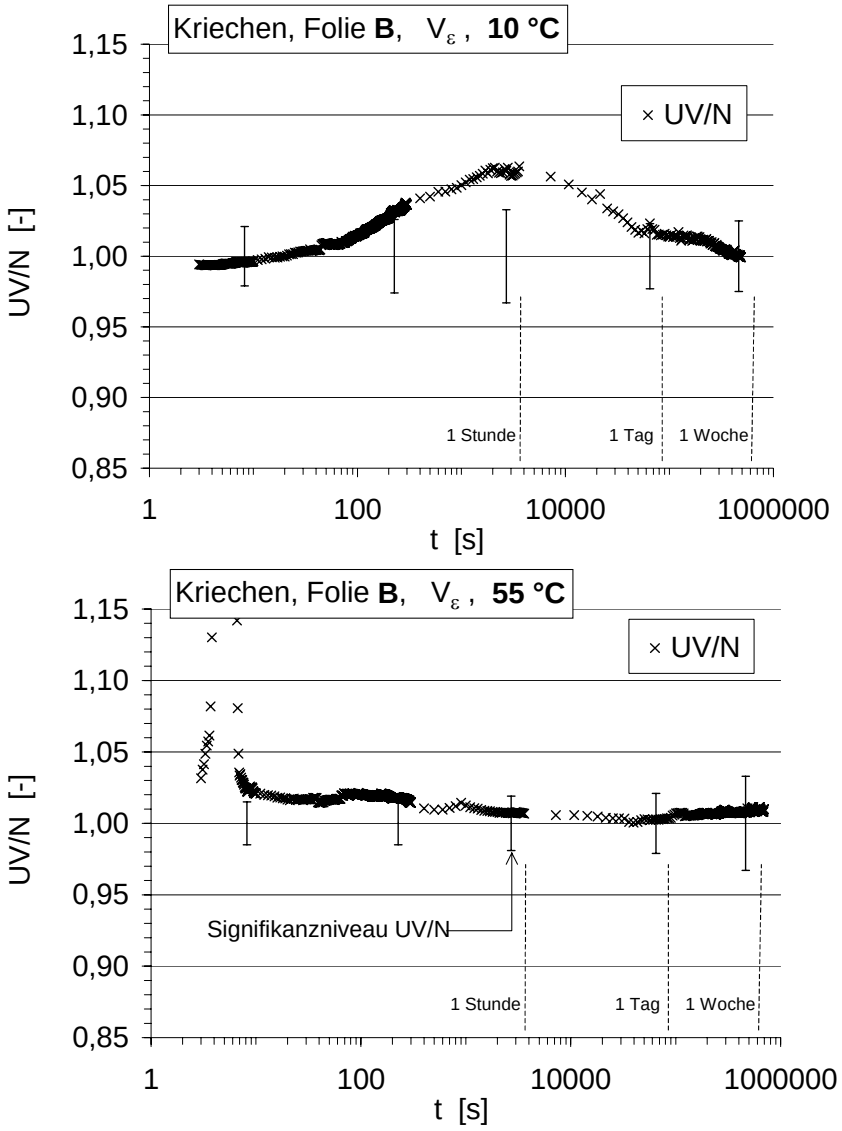


Bild 5-16: Langzeitversuche (Kriechen) bei 10 °C und 55 °C , Folie B: Quotient UV/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

5.6 Vergleich mit Untersuchungen anderer Autoren

Zur Alterung von PVB-Folien in Probekörpern aus VSG gibt es nach Kenntnis des Verfassers zwei weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen, [Ensslen 2005] (siehe auch [Ensslen 2004]) und [Schuler 2003]. Im Unterschied zu den hier vorgestellten Biegeversuchen an VSG-Balken wurden von beiden Autoren die Auswirkung der Alterung auf den Schubmodul der PVB-Folie mittels weggesteuerten Scherversuchen an kleinformatigen Proben aus VSG untersucht. Als Zwischenlage wurde von beiden Autoren das Folienprodukt *Trosifol MB* (siehe Tabelle 2.1, Kapitel 2.1.1) verwendet, welche der in dieser Arbeit mit "B" bezeichneten Standardfolie des gleichen Herstellers entspricht.

5.6.1 Scherversuche von Ensslen (Ruhr-Universität Bochum)

Von [Ensslen 2005] wurde die Änderung des Schubmoduls sowohl von künstlich im Labor als auch von natürlich im Freien bewitterten VSG-Scheiben bei einer Prüftemperatur von 26 °C und bei zwei konstanten Prüfgeschwindigkeiten (0,1 mm/min und 1 mm/min) untersucht. Die kleinen kreisförmigen Probeköper für die Scherversuche hatten einen Durchmesser von 31 mm und wurden als Bohrkerne den bewitterten VSG-Scheiben entnommen. Die in Tabelle 5-5 zitierten Ergebnisse einiger ausgewählter Versuchsserien stammen von solchen Scherproben, welche in einem ca. 4 cm breiten Randstreifen entlang der Kanten der bewitterten VSG-Scheiben lagen.

Die künstliche Bestrahlung der Probekörper erfolgte in Anlehnung an [DIN EN ISO 12543-4] und entsprach somit im Wesentlichen der Bewitterung der Versuchsserie UV. Aufgrund der fehlenden aktiven Kühlung des Versuchsstandes hatten sich die Probekörper im Vergleich zur Serie UV stärker aufgeheizt (70 bis 80 °C). Statt einer kontinuierlichen Lagerung bei hoher Luftfeuchtigkeit (vgl. Serien F) wurde eine Serie von Probekörpern in drei vierwöchigen Zyklen unter wechselnden klimatischen Bedingungen bewittert (2 Wochen lang täglich 16 Stunden bei -30 °C und 50-60 % rel. LF, 8 Stunden bei 80 °C und 95 % rel. LF, gefolgt von 2 Wochen Ruhephasen unter Laborbedingungen). Zwei weitere Serien von Probekörpern wurden zwei Jahre lang natürlich im Freien bewittert. Die Versuchskörper wurde an den Standorten Phoenix, Arizona und Miami, Florida (USA) aufgestellt.

In Tabelle 5-5 ist die minimale und maximale prozentualen Veränderung des Schubmoduls der bewitterten Proben gegenüber dem Schubmodul von unbewitterten Referenzproben während der Versuchsdauer wiedergegeben (Mittelwert aus 3 bis 8 Proben).

Die künstliche Bestrahlung und Trocknung bei 70 °C hatte zu einer beträchtlichen Versteifung der PVB-Folien geführt. Wegen der Lage der Scherproben in einem schmalen, von Feuchtigkeitsverlusten stark betroffenen, Randstreifen der bewitterten Scheiben wurde gegenüber den Biegeversuchen der Serie UV und T eine sehr viel höhere Zunahme des Schubmoduls gemessen. Eine Messung der Folienfeuchte von [Ensslen 2005] hatte ergeben, dass die PVB-Folie in 100 x 100 mm große VSG-Scheiben nach 12 Wochen UV-Bestrahlung bei einer Temperatur von 70 °C vollkommen ausgetrocknet waren (0,05 % Feuchtegehalt).

Die zyklische Bewitterung in der Klimawechselkammer führte zu einer ähnlich hohen Reduktion des Schubmoduls wie sie bei den Biegeversuchen der Serie F1 und F2 festgestellt wurden. Tendenziell stimmen die Ergebnisse der Scherversuche von [Ensslen 2005] und der Biegeversuche aus Kapitel 5.4 und 5.5 überein. Aufgrund der unterschiedlich großen Folienfläche der Probekörper ist ein zahlenmäßiger Vergleich der Schubmodulwerte jedoch nicht möglich.

Die natürliche Bewitterung im Freien führte bei beiden Standorten zu einer Erweichung der Folie, welche aufgrund des feuchten subtropischen Klimas in Florida stärker ausfiel als in Arizona.

Tabelle 5-5: Minimale und maximale prozentuale Veränderung des Schubmoduls von Scherproben infolge künstlicher und natürlicher Bewitterung, Versuchstemperatur 26 °C, nach [Ensslen 2005]

Versuchsserie und Art der Bewitterung	Prüfgeschwindigkeit 0,1 mm/min	Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min
4 Wochen UV-Bestrahlung bei 70 °C	+3 % ... +11 %	+22 % ... +24 %
12 Wochen UV-Bestrahlung bei 70 °C	+35 % ... +42 %	+85 % ... +136 %
3 x 4 Wochen Klimawechselkammer (2 Wochen täglich 16 Stunden -30 °C, 50-60 % rel. LF und 8 Stunden 80 °C, 95 % rel. LF, gefolgt von 2 Wochen Ruhephasen unter Laborbedingungen)	-44 % ... -55 %	-54 % ... -63 %
2 Jahre natürliche Bewitterung in Phoenix, Arizona (trocken-heißes Klima)	-18 % ... 0 %	-18 % ... -10 %
2 Jahre natürliche Bewitterung in Miami, Florida (feucht-warmes Klima)	-34 % ... -25 %	-32 % ... -28 %

5.6.2 Scherversuche von Schuler (FH München / TU München)

Bei [Schuler 2003] erfolgte die künstliche Bewitterung der Probekörper durch UV-Strahlung und hohe Luftfeuchtigkeit in Anlehnung an [DIN EN ISO 12543-4]. Sie entsprach somit der Bewitterung der Serien UV und F1. Lediglich die Dauer der Bestrahlung betrug bei [Schuler 2003] nur 1000 Stunden (statt ca. 3000 Stunden bei der Serie UV). Die 80 mm breiten Probekörper (Scherfläche 40 cm²) wurden nach der Alterung in Scherversuchen bei Temperaturen von 5, 20, 40 und 60 °C mit unterschiedlichen konstanten Prüfgeschwindigkeiten bis zu einem Scherwinkel von $\gamma_F = 0{,}9$ belastet. Aus den Scherversuchen einer Serie von vier bis neun bewitterten Probekörpern wurde bei einer Belastungszeit von 5 Sekunden der Mittelwert des Schubmoduls ermittelt und mit dem mittleren Schubmodul der ungealterten Probekörper verglichen. Der Variationskoeffizient des Schubmoduls der Versuchsserien betrug bei t = 5 s zwischen 0,08 und 0,24. Dies liegt im Bereich der Streuung des Schubmoduls welcher bei den Biegeversuchen der Serie N und UV bei 20 °C gemessen wurde (siehe Kapitel 5.3).

Tabelle 5-6: Prozentuale Veränderung des Schubmoduls von Scherproben infolge künstlicher Bewitterung, nach [Schuler 2003]

Prüftemperatur	5 °C	20 °C	40 °C	60 °C
1000 Stunden UV-Bestrahlung bei 50 °C	*-12,9 %* *)	*-8,1 %* *)	-15,9 %	+56,5 %
14 Tage Lagerung bei 100 % rel. LF bei 50 °C	-50,2%	-62,2 %	-40,9 %	*-4,3 %* *)

*) statistisch nicht signifikant (Test nach *Wilcoxon-Mann-Whitney* zweiseitiges Signifikanzniveau $\alpha_p/2 = 2{,}5$ %)

Die prozentuale Veränderung des Schubmoduls (Mittelwert bei t = 5 s) der bewitterten Probekörper im Vergleich zu den ungealterten Probekörpern ist in Tabelle 5-6 dargestellt. Bei Temperaturen zwischen 5 und 40 °C wurde bei den künstlich bestrahlten Schubproben eine geringe Reduktion des Schubmoduls um durchschnittlich 12 % gemessen. Diese Abnahme der Steifigkeit war jedoch nur bei einer Temperatur von 40 °C statistisch signifikant (zweiseitiger Signifikanztest nach *Wilcoxon-Mann-Whitney* mit einem Signifikanzniveau von $\alpha_p/2 = 2{,}5$ %, siehe Kapitel 5.3.1). Im Gegensatz dazu wurde bei 60 °C bei den künstlich bestrahlten Probekörpern eine Erhöhung des Schubmoduls um 57 % festgestellt. Die Ursache dieser Erhöhung konnte nicht festgestellt werden.

Die Versuche von [Schuler 2003] an bestrahlten Proben aus VSG ergaben nur eine relativ geringe Reduktion des Schubmoduls. Aufgrund der Streuung der Messwerte konnte jedoch - abgesehen von den Versuche bei 40 °C - keine signifikante Abminderung des Schubmoduls durch UV-Strahlung nachgewiesen werden. Die Schubversuche widerlegen deshalb nicht die Ergebnisse der Biegeversuche der Serie UV.

Bei den bei hoher Luftfeuchtigkeit gelagerten Schubproben wurde bei Versuchstemperaturen zwischen 5 und 40 °C eine starke Reduktion des Schubmoduls um durchschnittlich 50 % gemessen. Zudem kam es ab einem Schubwinkel von $\gamma_F = 0{,}5$ zu einer vollständigen Delamination der Folie, da die schmalen Probekörper durch die 14-tägige Lagerung bei 100 % rel. LF stark durchfeuchtet wurden. Die Abminderung des Schubmoduls entspricht in der Größenordnung dem Ergebnis der Biegeversuche der Serie F1 und F2.

5.7 Beurteilung der Biegeversuche zur Untersuchung der Alterung

Trotz der Unterschiede zwischen Relaxations- und Kriechversuchen und der Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Schubsteifigkeit der PVB-Folie aus Biegeversuchen, konnte zumindest bei der Messung bei 20 °C gezeigt werden, dass eine zeitlich begrenzte künstliche Bewitterung durch Bestrahlung und Trocknung (Serie UV und T) zu einer geringen Versteifung der PVB-Folie führt (Bild 5-10 und Bild 5-14). Mit Ausnahme der Langzeitversuche bei 5 und 10 °C konnte bei anderen Versuchstemperaturen kein signifikanter Einfluss der Alterung auf die Schubsteifigkeit der PVB-Folie gemessen werden. Dies liegt an dem geringen Einfluss, welchen der Schubmodul der PVB-Folie auf die Höhe der Biegesteifigkeit der Probekörper hat. Geringfügige Änderungen des Schubmoduls, wie sie durch künstliche Bewitterung verursacht werden, können deshalb bei diesen Temperaturen praktisch nicht gemessen werden.

Welche Alterungseffekte für die gemessene Versteifung aller drei untersuchten PVB-Folien verantwortlich sind, kann durch die rein mechanischen Untersuchungen nicht ermittelt werden. Da sowohl bei den Probekörpern der Serie UV als auch bei den Probekörpern der Serie T eine geringe Zunahme der Biegesteifigkeit beobachtet wurde, kann angenommen werden, dass durch die mehrmonatige Trocknung und Bestrahlung während der Bewitterungsphase Feuchtigkeit aus der Folie entwichen ist. Dies bewirkt erfahrungsgemäß eine Versteifung der PVB-Folie, welche jedoch bei Aufnahme von Feuchtigkeit wieder reversibel ist (vgl. Kapitel 4.4.4).

Ob die Bewitterung der Probekörper auch zu einem irreversiblen Verlust an Weichemacher oder einer photochemisch induzierten Versprödung der Folie geführt hat, konnte durch die Biegeversuche nicht eindeutig nachgewiesen werden. Bei Kurzzeit- und Langzeitversuchen wurde auch nach über einem Jahr nach Ende der künstlichen Bewitterung trotz Lagerung unter normalen Laborbedingungen (ca. 20 °C und 50 bis 60 % rel. LF) noch eine bleibende Versteifung der Probekörper der Serie UV gemessen, vgl. Bild 5-10, Bild 5-15 und Bild 5-16. Dies könnte auf eine irreversible Versteifung der Folie hinweisen, da anzunehmen ist, dass in dieser langen Zeitspanne der Feuchtigkeitsverlust während der Bewitterungsphase wieder ausgeglichen sein müsste. Bei einigen Probekörpern der Serie UV, welche in der Mitte des Versuchsstandes hohen Strahlungsdosen und Temperaturen ausgesetzt waren, wurde wie bei [Ensslen 2005] eine leichte Vergilbung der Folie entlang der Längskanten der Probekörper festgestellt. Möglicherweise könnte auch diese irreversible chemische Änderung zur geringen Versteifung der betroffenen Probekörper beigetragen haben.

Nimmt die PVB-Folie Feuchtigkeit über die freien Kanten der VSG-Scheiben auf, so verringert sich die Schubsteifigkeit der PVB-Folie erheblich. Trotz der unterschiedlichen Größe der Probekörper wurde dieser Effekt bei den hier vorgestellten Biegeversuchen in ähnlicher Höhe wie bei den Scherversuchen anderer Autoren beobachtet. Neben der Erweichung der PVB-Folie reduziert die eindringende Feuchtigkeit das Haftungsvermögen zwischen Folie und Glas. Bei Scherversuchen kann dies auch schon bei geringen Scherwinkeln zu einer Delamination der Folie führen, wenn die durch den erhöhten Wassergehalt der Folie reduzierte Scherfestigkeit der Schubproben überschritten wird. Bei den Biegeversuchen konnte keine Delamination festgestellt werden.

Bei den 200 mm breiten VSG-Balken der Serie F1 wurde bei allen drei Folien nach einer zweiwöchigen Lagerung bei fast 100 % rel. LF ein Abfall der Biegesteifigkeit bzw. des Verbundfaktors V_w gegenüber den unbewitterten VSG-Balken um ungefähr 5 bis 20 % gemessen (T = 20 °C). Unter der Annahme, dass sich der Schubmodul infolge eindringender Feuchtigkeit auf der gesamten Breite der Balken gleichmäßig verringert hat, entspricht die Reduktion der Biegesteifigkeit einer Abminderung des Schubmoduls um ca. 15 bis 50 %. Wird andererseits angenommen, dass die Feuchtigkeit nur in einem begrenzten Randstreifen entlang der Kanten der Scheiben eingedrungen ist und dort den Schubmodul auf annähernd Null reduziert hat, so entspricht die beobachtete Abnahme der Biegesteifigkeit einer Eindringtiefe der Feuchtigkeit von ca. 15 bis 50 mm. Diese Abschätzung beruht auf der Tatsache, dass die Schubsteifigkeit GA_S der Zwischenfolie in Balken aus Verbundglas nach Gleichung (5.2) gleichermaßen vom Schubmodul G wie von der Breite b der schubübertragenden Fläche abhängt (vgl. z. B. [Wölfel 1987]).

$$GA_S = Gb\frac{e^2}{h_F} \tag{5.2}$$

Aufgrund der beidseitigen Auskragung der 200 mm breiten VSG-Balken um 50 mm gilt die hier getroffene Abschätzung mit ausreichender Genauigkeit nur bis zu einer Eindringtiefe der Feuchtigkeit von 50 mm. Vergleichbare Überlegungen auf der Grundlage von FEM-Berechnungen wurden von [Ensslen 2005] durchgeführt, welche zu übereinstimmenden Ergebnissen führten.

6 VSG-Scheiben unter zyklischer Dauerbelastung

6.1 Einführung

In vielen Anwendungen sind Scheiben aus Verbundsicherheitsglas oft über längere Zeiträume zyklischen oder dynamisch veränderlichen Belastungen unterworfen. Beispiele dafür sind VSG-Scheiben in windbeanspruchten Glasfassaden, in begehbaren und befahrbaren Verglasungen, oder als transparente Elemente in Lärmschutzwänden und Einhausungen von Verkehrswegen.

Zur Untersuchung, ob eine zyklische Dauerbelastung zu einer Verminderung der Verbundwirkung durch eine Abnahme der Schubsteifigkeit der PVB-Folie oder durch eine Delamination der Folie vom Glas führt, wurden Balken aus VSG mit bis zu 150.000 Lastwechseln periodisch belastet (Dauerschwingversuche). Die periodische Belastung der VSG-Balken erfolgte weggesteuert in dynamischen Vierpunkt-Biegeversuchen mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Versuchsaufbau (Tabelle 5-1 und Bild 5-2). Die Belastung wurde als harmonische Schwingung $w(t) = w_0 \sin(\omega t)$ aufgebracht. Dazu wurden die Scheiben möglichst spielfrei oben und unten zwischen stählerne Auflagerrollen mit einer 1 mm dicken Gummibeschichtung eingeklemmt. Während der Dauerbelastung wurde in regelmäßigen Abständen die Biegesteifigkeit (Verbundfaktor V_ε) gemessen und der optische Zustand der Scheiben kontrolliert.

6.2 Voruntersuchung zum linear-viskoelastischen Verhalten

In einer Voruntersuchung wurde der Verlauf und die Höhe des Relaxationsmoduls bei harmonisch schwingender Biegebelastung und bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Bei einer harmonisch oszillierenden Biegung eines VSG-Balkens (Folientyp "B") bei einer Temperatur von 21 °C und einer Frequenz $\omega_1 = 1{,}63$ rad/s ($f = \omega/(2\pi) = 0{,}26$ Hz) ergibt sich im eingeschwungenen Zustand der in Bild 6-1 dargestellte Verlauf des Schubmoduls G(t). Dieser wurde aus der Messung der Kraft F(t) und der Dehnung ε(t) mit der in Kapitel 3.2.1 erläuterten Berechnungsmethode [Wölfel 1987] ermittelt. Als E-Modul der Glasscheiben wurde dafür die aus der Kalibrierung der Prüfmaschine gewonnenen Werte angesetzt (vgl. Kapitel 5.2.4).

Deutlich zeigt sich der charakteristische Verlauf des Schubmoduls bei harmonisch schwingender Beanspruchung, welcher bei linear-viskoelastischem Verhalten der Folie nach Kapitel 2.1.6 die Form einer Cotangens-Funktion nach Gleichung (6.1) annimmt.

$$G(t) = \frac{\tau_F(t)}{\gamma_F(t)} = \frac{\gamma_0\left[G'\sin(\omega t) + G''\cos(\omega t)\right]}{\gamma_0 \sin(\omega t)} = G' + G''\cot(\omega t) \tag{6.1}$$

Aus G(t) und F(t) lässt sich der zeitliche Verlauf der maximalen Schubspannung $\tau_F(t)$ und des maximalen Scherwinkels $\gamma_F(t)$ in der PVB-Folie am Auflager des Balkens berechnen. Beide Schwingungsverläufe sind um den Winkel δ phasenverschoben.

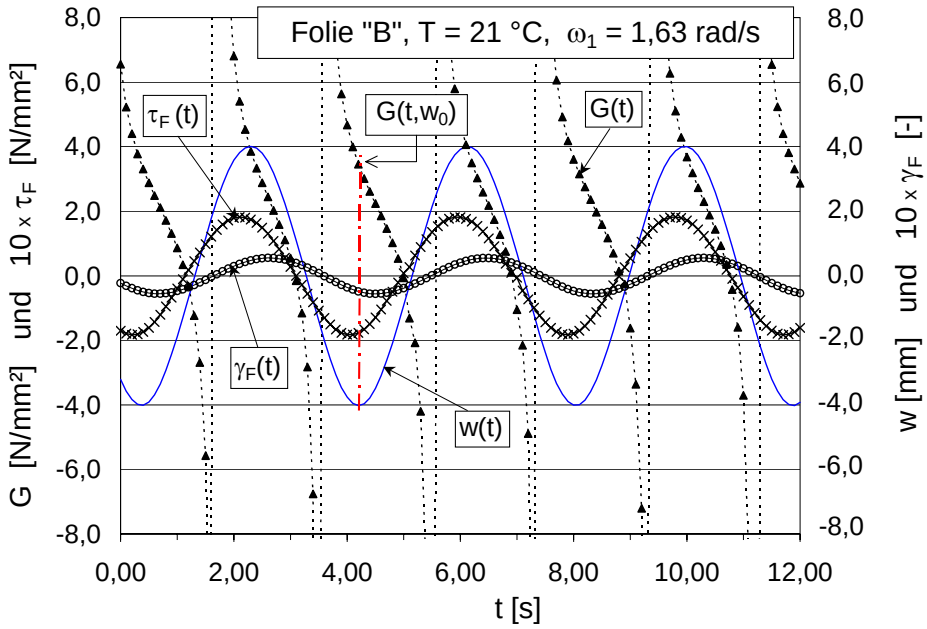


Bild 6-1: Zeitlicher Verlauf des Schubmoduls G(t), der maximalen Schubspannung $\tau_F(t)$ und der maximalen Schubverformung $\gamma_F(t)$ in der PVB-Folie bei einer harmonisch schwingenden Biegung w(t) (ω = 1,63 rad/s, w_0 = 4 mm, Temperatur 21 °C)

Die Temperaturabhängigkeit der Schubmoduln $G(t) = \tau_F(t)/\gamma_F(t)$ und $G' = G'(\omega)$ und der Phasenverschiebung $\tan\delta = G''/G'$ gemäß Kapitel 2.1.6 wurde bei zwei Frequenzen ω_1 = 1,63 rad/s (Amplitude w_0 = 4 mm) und ω_2 = 0,94 Hz (w_0 = 8,5 mm) und Temperaturen zwischen –3 und +41 °C untersucht. Das Ergebnis ist in Bild 6-2 wiedergegeben. Die schnellere Schwingung besitzt eine Schwingungsdauer von ca. 4 Sekunden und ist somit vergleichbar mit der Mittelungsdauer t_b einer Windböe zur Bemessung von Bauteilen (t_b = 2 bis 4 s [DIN 1055-4]). Als charakteristischer Wert für den zeitlich veränderlichen Schubmodul G(t) wurde der Wert gewählt, welcher zur Zeit der größten Biegebeanspruchung w_0 des Balkens auftritt. Dieser Wert wird mit $G(t,w_0)$ bezeichnet (siehe Bild 6-1).

Erwartungsgemäß ist im Glasübergangsbereich der PVB-Folie zwischen 15 und 20 °C die Phasenverschiebung $\tan\delta$ zwischen Schubspannung und Scherwinkel am größten. Zudem sind die Moduln bei der höheren Frequenz um 5 bis 40 % größer als bei der geringeren Frequenz. Der dynamischen Modul G' liegt stets unterhalb des Moduls $G(w_0)$, wobei die Unterschiede zwischen beiden Moduln bei höheren Temperaturen > 30 °C mit abnehmender Phasenverschiebung δ verschwinden. Bei Temperaturen unterhalb von 10 °C ist der Einfluss des Schubmoduls auf die Biegesteifigkeit so gering, dass eine genaue Bestimmung des Schubmoduls bei diesen Frequenzen nicht möglich ist, und die Kurve des Schubmoduls G' sehr flach verläuft.

Der niedrigste Speichermodul $G'(\omega_2 = 0{,}94$ rad/s) liegt bei Temperaturen unterhalb von 15 °C über 10 N/mm². Bei 20 °C beträgt $G'(\omega_2 = 0{,}94$ rad/s) ca. 2 N/mm² und bei 40 °C 0,5 N/mm².

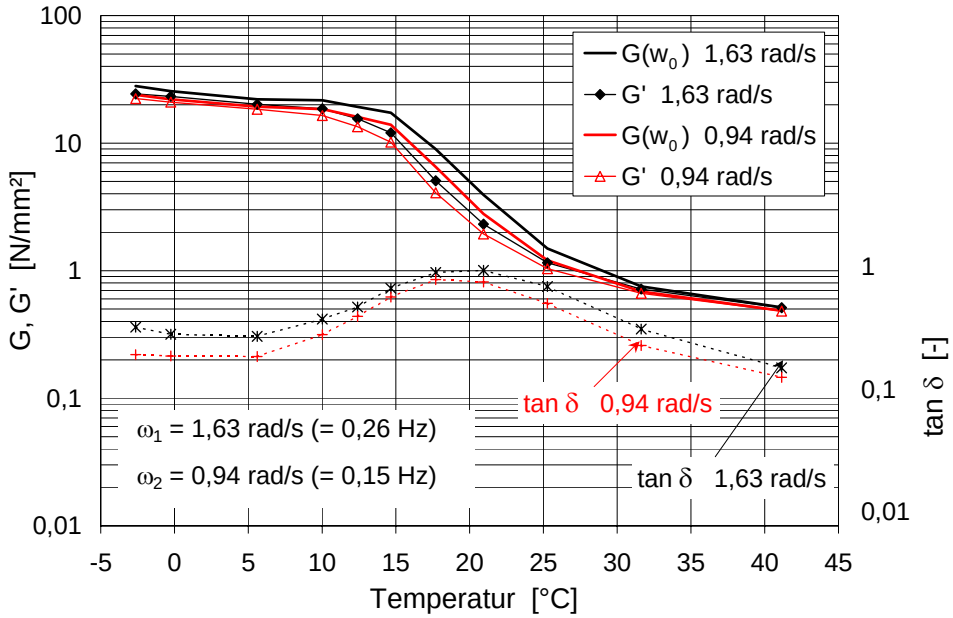


Bild 6-2: Temperaturabhängigkeit der Schubmoduln $G(t,w_0)$ (zum Zeitpunkt der maximalen Biegung w_0) und G' und der Phasenverschiebung tan δ zwischen Schubspannung und Scherwinkel

Da nur zwei Frequenzen untersucht wurden, ist eine Berechnung des zeitlich veränderlichen Schubmoduls G(t) aus den dynamischen Schubmoduln G' und G" nach Kapitel 2.1.6, Gleichung (2.10) nicht möglich. Bei langsamen Änderungen von G(t) und geringen Verlustmoduln (T > 30 °C) entspricht der Schubmodul G(t) zur Zeit $t = 1/\omega$ jedoch ungefähr dem Speichermodul $G'(\omega)$ [Ferry 1970]. Bei einer Temperatur von 40 °C beträgt der Schubmodul G(t) bei einer Belastungsdauer von 1 Sekunde somit ungefähr 0,5 N/mm².

6.3 Versuchsprogramm der Dauerschwingversuche

6.3.1 Vorversuche bis 50.000 Lastwechsel an unterschiedlich gelagerten Scheiben

In einer ersten Serie von Dauerversuchen wurde das Steifigkeitsverhalten von 10 VSG-Balken (Breite 360 mm) unterschiedlicher Dicke (4/1,52/4 und 10/1,52/10 mm) und Lagerungsart bei Temperaturen zwischen 0 und 60 °C untersucht. Vier Balken waren linienförmig gelagert. Die restlichen Balken waren auf biegesteifen Punkthaltern (4 Balken) und punktförmigen Klemmhaltern (2 Balken) gelagert [Schuler 2004].

Beginnend mit einer Temperatur von 20 °C, gefolgt von 0 °C, wieder 20 °C, 40 °C und 60 °C wurden die Probeköper in jeder der fünf Temperaturstufen mit 10.000 Lastwechseln (Doppelamplituden), also insgesamt 50.000 Lastwechsel, belastet. In jeder Temperaturstufe wurde das Verhältnis der Biegesteifigkeit bzw. des Verbundfaktors zu Beginn ($V_{\varepsilon,0}$) und am Ende ($V_{\varepsilon,10.000}$) der kontinuierlichen Dauerbelastung gemessen (Mittelwert aus vier aufeinanderfolgenden Doppelamplituden). Am Ende der Versuchsreihe wurde die Temperatur der Scheiben wieder auf 20 °C gesenkt und nochmals die Biegesteifigkeit ($V_{\varepsilon,50.000}$) gemessen.

Die wichtigsten Versuchsparameter für die Dauerversuche an den linienförmig gelagerten Scheiben sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt.

Tabelle 6-1: Versuchsparameter der Vorversuche an VSG-Balken (linienförmige Lagerung)

Temperatur	Amplitude w_0	Frequenz	$G(t,w_0)$ [N/mm²]	γ_F [-] *)	τ_F [N/mm²] *)
2 Scheiben VSG 4 / 1,52 / 4 mm					
0 °C	+/- 10 mm	0,13 Hz	~ 38	~ 0,01	~ 0,20
20 °C	+/- 10 mm	0,13 Hz	4 ... 11	< 0,04	~ 0,15
40 °C	+/- 10 mm	0,13 Hz	0,4 ... 0,6	~ 0,10	~ 0,05
60 °C	+/- 10 mm	0,13 Hz	0,3 ... 0,4	~ 0,10	~ 0,04
2 Scheiben VSG 10 / 1,52 / 10 mm					
0 °C	+/- 5 mm	0,23 Hz	~ 50	~ 0,01	~ 0,50
20 °C	+/- 5 mm	0,23 Hz	~ 10	~ 0,04	~ 0,40
40 °C	+/- 5 mm	0,23 Hz	~ 0,6	~ 0,10	~ 0,07
60 °C	+/- 5 mm	0,23 Hz	~ 0,5	~ 0,11	~ 0,05

*) Maximalwert (Amplitude) am Auflager der Balken

Bei den linienförmig gelagerten Probekörpern konnte keine signifikante Abminderung der Biegesteifigkeit festgestellt werden. Die Verhältniswerte $V_{\varepsilon,10.000}/V_{\varepsilon,0}$ und $V_{\varepsilon,50.000}/V_{\varepsilon,0}$ lagen im Mittel bei 1,00 und streuten zwischen 0,98 und 1,02.

Bei den punktförmig gelagerten Scheiben ergaben sich größere Streuungen der Verhältniswerte $V_{\varepsilon,10.000}/V_{\varepsilon,0}$. Bei einigen Scheiben und Temperaturstufen wurde eine Verminderung der Biegesteifigkeit um 5 bis 6 % gemessen. Ursache war eine Reduktion der Einspannung der Probekörper an den Auflagern, welche durch die wechselnde Beanspruchung in den Punkt- bzw. Klemmhaltern verursacht wurde. Diese Wechselbeanspruchung führte zu einer Lockerung der Befestigungsschrauben und zu einer bleibenden Verformung der Elastomerschichten in den Punkt- und Klemmhaltern. Diese Versuche waren somit nicht geeignet, die Dauerhaftigkeit der Verbundwirkung der PVB-Folie zu beurteilen.

Eine optische Änderung der Folie, z. B. durch eine Delamination konnte an keiner der zehn Scheiben festgestellt werden. Daraus wird geschlossen, dass bei einer Folientemperatur von 40 °C (rel. LF 50 bis 60 %) bzw. 60 °C (trockene Luft) bis 10.000 Lastwechsel und Schubspannungsamplituden $\tau_F < 0{,}1$ N/mm² keine Delaminationen in Verbundsicherheitsglas mit Standard-PVB-Folien auftritt.

6.3.2 Dauerschwingversuche bis 150.000 Lastwechsel

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Lastspielzahl auf maximal 150.000 Lastwechsel je Probekörper erhöht. Es wurden sieben linienförmig gelagerte Probeköper bei Temperaturen von 0, 20 und 40 °C untersucht. In jeder Temperaturstufe (Reihenfolge siehe Tabelle 6-2) wurden die Balken jeweils 50.000 mal harmonisch schwingend belastet. Zu Beginn ($V_{\varepsilon,0}$), nach 25.000 ($V_{\varepsilon,25.000}$) und nach 50.000 Lastwechseln ($V_{\varepsilon,50.000}$) wurde die Biegesteifigkeit V_ε gemessen. Am Ende der Dauerversuche wurde nochmals in einem dynamischen Versuch eine Messung der Biegesteifigkeit bei 20 °C vorgenommen ($V_{\varepsilon,150.000}$).

Der Scheibenaufbau, der Folientyp und der Alterungszustand (vgl. Kapitel 5.2.1) der sieben VSG-Balken sind in Tabelle 6-2 widergegeben.

Die Versuchsparameter und die Bandbreite der maximalen Schubbeanspruchung der PVB-Folie am Auflager sind in Tabelle 6-3 angegeben. Die Schubspannung am Auflager wurden mit der Sandwichtheorie nach [Stamm 1974] für einen VSG-Balken ohne Auskragung berechnet. Die Schubspannungen an den Enden der Probekörper, welche um 50 mm über die Auflager hinauskragten (siehe Kapitel 3.2.1, Bild 3.2), sind bei steifen Folien stets kleiner als die Schubspannung über dem Auflager (siehe z. B. [Hooper 1973]). Mit zunehmender Weichheit der Folie nimmt dieser Unterschied ab.

Tabelle 6-2: Übersicht der Probeköper für die Dauerschwingversuche

Scheibe Nr.	Glas/PVB/Glas	Alterung / Serie	Folientyp	Reihenfolge Temperaturstufe
N-A-1	8 / 0,76 / 8 mm	"N", ungealtert	Folie A	20 °C → 0 °C → 40 °C
N-A-2	8 / 0,76 / 8 mm	"N", ungealtert	Folie A	0 °C → 20 °C
N-A-3	8 / 0,76 / 8 mm	"N", ungealtert	Folie A	20 °C → 40 °C
N-B-1	8 / 0,76 / 8 mm	"N", ungealtert	Folie B	20 °C → 0 °C → 40 °C
N-B-2	8 / 0,76 / 8 mm	"N", ungealtert	Folie B	20 °C → 40 °C → 0 °C
U-C	6 / 1,52 / 6 mm	aus Serie "U"	Folie C	20 °C → 40 °C → 0 °C
F-C	6 / 1,52 / 6 mm	aus Serie "F2"	Folie C	20 °C → 40 °C → 0 °C

Tabelle 6-3: Versuchsparameter der Dauerschwingversuche an linienförmig gelagerten VSG-Balken

Temperatur	Amplitude w_0	Frequenz	G (w_0) [N/mm²]	γ_F [-]*)	τ_F [N/mm²] *)
0 °C	+/- 8,5 mm	0,15 Hz	17 … 46	0,01 ... 0,03	0,42 ... 0,56
20 °C	+/- 10 mm	0,13 Hz	3 ... 11	0,05 ... 0,15	0,34 ... 0,57
40 °C	+/- 10 mm	0,13 Hz	0,5 ... 0,6	0,15 ... 0,30	0,08 ... 0,17

*) Maximalwert (Amplitude) am Auflager der Balken, Bandbreite aus allen Scheiben und Folientypen

Bild 6-3 zeigt im Überblick den Verlauf des Verbundfaktors Vε (Mittelwert aus vier aufeinanderfolgenden Doppelamplituden) während der Dauerschwingversuche. Bis auf den Probekörper aus der Serie F2 (Lagerung bei hoher Luftfeuchtigkeit, siehe Kapitel 5.2.1) konnte bei keinem der Probekörper eine signifikante Änderung der Biegesteifigkeit beobachtet werden. Die Verhältniswerte $V_{\varepsilon,50.000}/V_{\varepsilon,0}$ lagen zwischen 0,98 und 1,01 (Mittelwert 1,00). Lediglich beim Probekörper "F-C" aus der Serie F2 wurde nach den ersten 25.000 Lastwechseln ein Abfall der Biegesteifigkeit um 7 % gemessen. Es ist anzunehmen, dass diese Reduktion im Wesentlichen durch die hohe Durchfeuchtung während der künstlichen Bewitterung verursacht wurde. Im weiteren Verlauf der Dauerbelastung veränderte sich der Verbundfaktor jedoch nicht mehr und stieg bei der Abschlussmessung sogar leicht an. Die Verhältniswerte $V_{\varepsilon,150.000}/V_{\varepsilon,0}$ lagen bei den ungealterten Probekörpern bei 1,00, beim

gealterten Probekörper "UV-C" der Serie UV bei 0,98 und beim gealterten Probekörper "F-C" der Serie F2 bei 0,97.

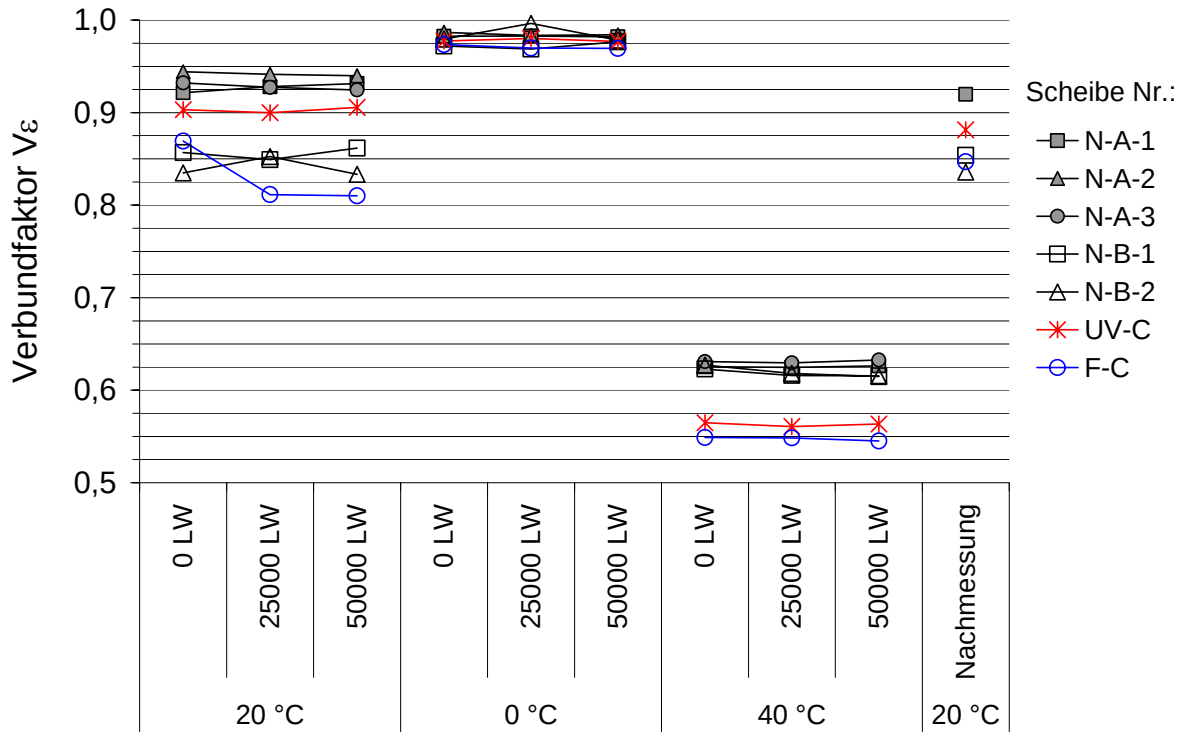


Bild 6-3: Verbundfaktor V_ε zu Beginn, nach 25.000 und 50.000 Lastwechseln (LW) je Temperaturstufe und zum Abschluss der Dauerschwingversuche bei 20 °C.

Im Gegensatz zu den Probekörpern der Dauerversuche bis 50.000 Lastwechsel (Kapitel 6.3.1) wurde an den Rändern aller Probekörper aus Tabelle 6-2 eine Delamination der Folie von den Glasscheiben beobachtet. Bei 20 °C zeigten sich in den Ecken und entlang der Längskanten erste sehr geringe Delaminationen zwischen 10.000 und 50.000 Lastwechsel. Während der Dauerbelastung bei 40 °C vergrößerten sich die delaminierten Bereiche und führte in den Ecken zu wurmartigen, maximal 4 x 5 cm² großen Ablösungen der Folie von den Glasscheiben. Bild 6-4 zeigt die Stirnseite des Probekörpers "N-A-1" nach 150.000 Lastwechsel.

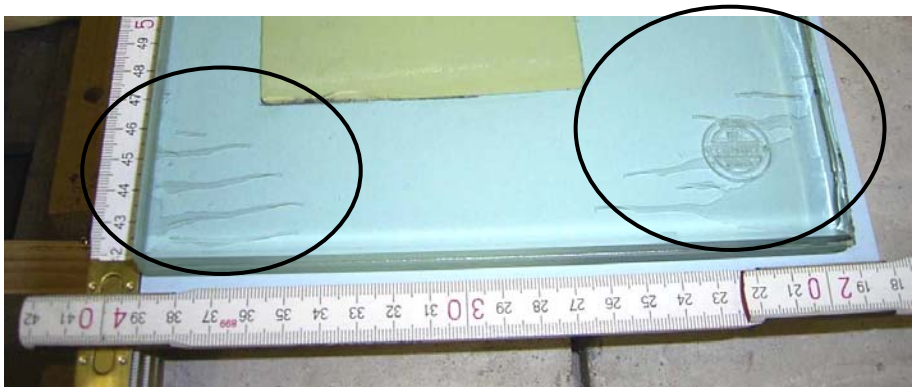


Bild 6-4: Ablösungen in den Ecken nach 150.000 Lastwechseln, Versuchskörper "N-A-1"

Die Ablösung in den Ecken beschränkte sich nur auf den Bereich der Probekörper, welche um 5 cm über die Auflager hinausragte (siehe Kapitel 3.2.1, Bild 3.2). Die Dauerbelastung bei 0 °C erzeugte weder eine neue Delamination noch führte sie zu einer Vergrößerung bereits delaminierter Randbereiche. Aufgrund des geringen Anteils der delaminierten Fläche an der Gesamtfläche der VSG-Balken führte die Delamination zu keiner messbaren Reduktion der Biegesteifigkeit.

Die Versuche zeigen, dass sich bei zyklischer Dauerbelastung die PVB-Folie auch unter Laborbedingungen (50 - 60 % rel. LF) in einem kleinen Bereich an den freien Rändern und besonders den Ecken einer VSG-Scheibe von der Glasoberfläche ablösen kann. Eine nennenswerte Delamination trat unter der gegebenen Lasthöhe und Lastspielzahl jedoch nur bei hohen Temperaturen (40 °C) oberhalb der Glasübergangstemperatur der Folie auf. Die Delamination erfolgte bereits bei Schubspannungen (τ_F = 0,1 bis 0,2 N/mm²), die viel geringer sind als die in Kompressionsscherversuchen bei Raumtemperatur ermittelte Scherfestigkeit von PVB (τ > 8 N/mm² bei 20 °C, siehe Kapitel 2.2.5).

Aufgrund der begrenzten Lastspielzahl und der geringen Anzahl von untersuchten Folientemperaturen lässt sich aus den Versuchen keine Aussage zum möglichen Ausmaß der Delamination bei tiefen und hohen Temperaturen treffen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich bis mindestens 50.000 Lastwechsel (Doppelamplituden um den Nullpunkt) und Schubspannungsamplituden von 0,1 bis 0,2 N/mm² bei 40 °C (0,3 bis 0,6 N/mm² bei 20 °C) die Verbundwirkung der PVB-Folie in VSG-Scheiben bei zyklischer Dauerbelastung nicht verringert. Mit abnehmender Temperatur erhöht sich die zulässige Höhe der Schubspannungsamplitude und der Lastspielzahl. Dies gilt jedoch nur für den Fall, dass die Folie vor dauerhaft hoher Luftfeuchtigkeit oder eindringendem Wasser geschützt ist.

6.4 Vergleich der Versuchsparameter mit der Windbeanspruchung von VSG-Scheiben

Im Folgenden wird die Lastspielzahl (50.000 LW bei 40 °C) und die Höhe der maximalen Schubspannungsamplituden in der PVB-Folie (τ_F = 0,1 bis 0,2 N/mm² bei 40 °C) der Dauerschwingversuchen mit der Beanspruchung einer windbeanspruchten VSG-Scheibe während einer 50-jährigen Nutzungsdauer verglichen.

Der Vergleich beschränkt sich auf relativ große vertikal gelagerte Scheiben in einer Einbauhöhe von 100 m, welche sich auf der windzugewandten Seite (Luv-Seite) einer Hochhausfassade mit anliegender Strömung befinden und somit außerhalb von Wirbelablösungen an Gebäudeecken, Seiten- und Dachflächen liegen. Die Berechnung erfolgt nach [DIN 1055-4] für eine Fassade im Binnenland ("Geländekategorie II") in der Windzone 2.

Vereinfachend wird für die Fassade von einer quasistationären Windbelastung ausgegangen, bei welcher der Druckbeiwert c_{pe} konstant ist und die Belastung der VSG-Scheiben somit proportional zur Windgeschwindigkeit v bzw. zum Geschwindigkeitsdruck $q = 1/2\rho v^2$ des Windes ist [Niemann 2003] (ρ = Dichte der Luft). Auf der sicheren Seite liegend wird ein Druckbeiwert von c_{pe} = +1,0 angenommen, der nach [DIN 1055-4] nur für kleine Flächen von ca. 1 m² gilt. Die Fassade ist geschlossen, so dass Innendruckschwankungen nicht berücksichtigt werden müssen.

Die Windeinwirkung setzt sich bei Mittelungsintervallen zwischen 10 min und 1 Stunde aus einer konstanten mittleren Windgeschwindigkeit v_m bzw. einem konstanten Winddruck $q_m = 1/2\rho v_m^2$ und einem turbulenten Anteil v'(t) bzw. $q'(t) \cong \rho v_m v'(t)$ zusammen. Letzterer Anteil ist ein stationärer Zufallsprozess und kann unter den oben gemachten Annahmen (keine Wirbelablösungen) näherungsweise als Gauß'scher Prozess mit dem Mittelwert 0 und der Varianz σ_v^2 beschrieben werden. Der Quotient aus der Standardabweichung σ_v und der mittleren Windgeschwindigkeit v_m wird als Turbulenzintensität I_v bezeichnet. Sie beträgt bei der Geländekategorie II in 100 m Höhe 0,13 [DIN 1055-4].

Nach [DIN 1055-4] ergibt sich bei einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren ein maximales 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit von $v_{m,10min} = 36$ m/s, ein zugehöriger mittlerer Winddruck von $q_{m,10min} = 0{,}8$ kN/m² und ein maximaler Böendruck von $q_{b,3s} = 1{,}4$ kN/m². Letztere gilt für eine gemittelte Böendauer von 3 Sekunden. Auf eine Beaufschlagung von Sicherheitsbeiwerten wird verzichtet, da hier nur die durchschnittliche Windbeanspruchung während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren untersucht wird.

6.4.1 Maximale Schubspannung in der PVB-Folie von windbelasteten VSG-Scheiben

Für den Böendruck $q_{b,3s} = 1{,}4$ kN/m² und drei ausgewählte Schubmodulwerte G = 0,5, 2 und 10 N/mm² (Mindestwerte für G'(ω = 0,94 rad/s) nach Kapitel 6.2) wurde die maximale Schubspannung $\tau_{F,b,3s}$ in der PVB-Folie an Auflagern von gelenkig gelagerten VSG-Elementen berechnet. Bild 6-5 gibt die maximale Schubspannung $\tau_{F,b,3s}$ von unterschiedlichen VSG-Balken mit Stützweiten L zwischen 1,0 und 3,2 m und mit Schlankheiten λ = L/(2h) zwischen 50 bis 210 wieder (symmetrischer Scheibenaufbau, h = 4, 6, 8, 10 oder 12 mm, h_F = 0,76 mm). Der Bereich der Schlankheit wurde ohne Berücksichtigung der Durchbiegung so gewählt, dass die Biegespannung in Feldmitte der Glasscheiben bei der Belastung $q_{b,3s}$ nicht mehr als 50 N/mm² betrug. Die ist nach [TRLV 2006] die zulässige Spannung für ESG.

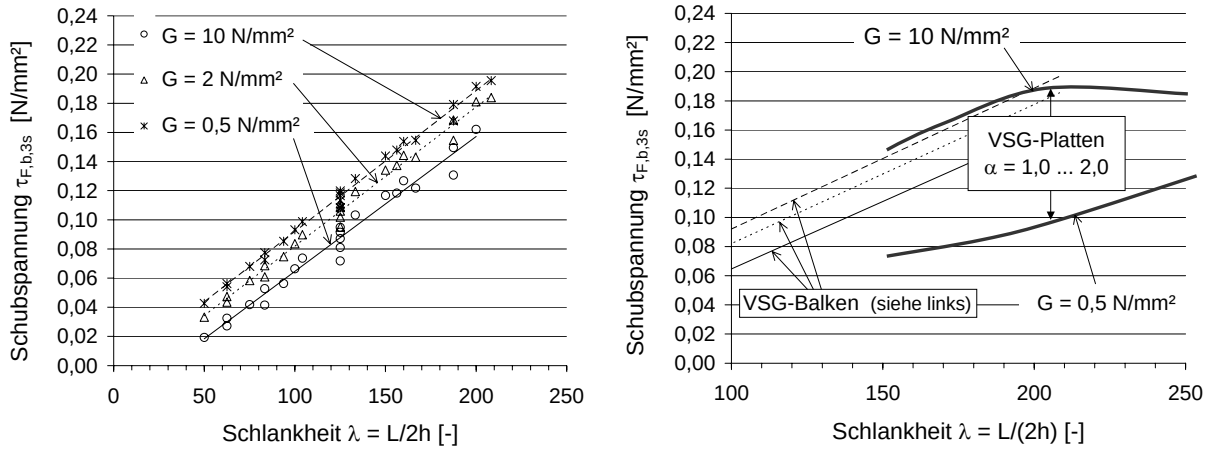


Bild 6-5 : Links: Maximale Schubspannung $\tau_{F,b,3s}$ in der PVB-Folie von VSG-Balken in Abhängigkeit der Schlankheit λ = L/(2h) und für verschiedene Schubmoduln G bei einer Flächenlast von $q_{b,3s}$ = 1,4 kN/m². Rechts: Grenzen der maximalen Schubspannung in VSG-Platten (lineare Berechnung) bei gleicher Belastung

Die Schubspannung $\tau_{F,b,3s}$ am Auflager von VSG-Balken liegt bei einem Böendruck von 1,4 kN/m² zwischen 0,02 und 0,20 N/mm². Mit zunehmender Schlankheit steigt die Schubspannung näherungsweise linear an. Der Einfluss des Schubmoduls G der PVB-Folie auf die Höhe der Schubspannung ist vergleichsweise gering. Allgemein gilt, dass die Schubspannung von der Höhe der Verbundwirkung der Zwischenfolie abhängt. Je schlanker die Glasscheiben sind, um so größer ist die Verbundwirkung der Zwischenfolie bzw. ihr Einfluss auf die Biegesteifigkeit der VSG-Balken. Umgekehrt gilt, dass die Schubspannung in der Folie mit zunehmender Steifigkeit der VSG-Elemente abnimmt.

Mittels FEM-Berechnungen mit dem Programm *SOFiSTiK* (siehe Kapitel 3.2.3.3) wurden VSG-Platten unterschiedlicher Schlankheit $\lambda = L/(2h)$ mit Seitenverhältnissen von $1{,}0 \leq \alpha = b/L \leq 2{,}0$ untersucht ($G = 0{,}5$ und 10 N/mm², $L \leq 3{,}2$ m). Werden die Abmessungen der Platten so gewählt, dass die maximale Biegespannung bei einer Flächenlast von 1,4 kN/m² weniger als 50 N/mm² beträgt (lineare Berechnung), so liegen die maximalen Schubspannungen $\tau_{F,b,3s}$ der PVB-Folie wie bei den VSG-Balken unterhalb von 0,20 N/mm² (siehe Bild 6-5 rechts). Bei hohen Temperaturen ($G = 0{,}5$ N/mm²) sind die Schubspannungen sogar erheblich geringer als bei Balken gleicher Schlankheit.

Unter den oben beschriebenen Einsatzbedingungen liegt die Schubbeanspruchung $\tau_{F,b,3s}$ der PVB-Folie in windbeanspruchten VSG-Scheiben demnach im Bereich der bei den Dauerversuchen bei 40 °C erreichten Schubspannungsamplitude $\tau_F = 0{,}1$ bis 0,2 N/mm² nach Tabelle 6-3. Die Belastung der Probekörper bei den zyklischen Dauerversuchen wurde also ausreichend hoch gewählt, um die maximale Beanspruchung der PVB-Folie in windbelasteten VSG-Scheiben zu simulieren.

6.4.2 Schätzung des Beanspruchungskollektivs bei Windbeanspruchung

6.4.2.1 Vorbemerkung zur Vorgehensweise

Zur Ermittlung der dynamischen Reaktion (Böenreaktion) windbelasteter Bauteile werden üblicherweise zwei Methoden verwendet. Im Falle einer quasistationären Windbelastung können die Maximalwerte der Böenreaktion mit Hilfe der Spektralmethode berechnet werden [Niemann 2003]. Liegen die Eigenfrequenzen eines Bauteils außerhalb der Anregungsfrequenzen des Windes, so wird es ohne Resonanzüberhöhung quasistatisch angeregt. Sowohl der turbulente Anteil des Winddruckes als auch die Böenreaktion können als Gauß'sche Zufallsprozesse idealisiert werden ("Breitbandprozess"). Liegt die erste Eigenfrequenz des Bauteils jedoch im Bereich der Anregungsfrequenzen des Windes, so wird es zu Resonanzschwingungen angeregt ("Schmalbandprozess"). Die Verteilung der Beanspruchungsamplituden wird in diesem Fall durch eine "Rayleigh-Verteilung" charakterisiert. Die Anzahl der Lastwechsel pro Zeiteinheit ergibt sich beim Schmalbandprozesses aus der Eigenfrequenz des Bauteils. Für den Resonanzfall lässt sich somit relativ einfach die Zahl der Lastwechsel und die Höhe der Beanspruchungsamplituden (bzw. Doppelamplituden für Ermüdungsnachweise) während der Nutzungsdauer ermitteln.

Problematisch bei der Anwendung der Spektralmethode ist, dass es für den Breitbandprozess im Gegensatz zum Schmalbandprozess keine zuverlässige und allgemeingültige Methode

gibt, die Zahl der Lastwechsel und Beanspruchungsamplituden aus der statistischen Verteilung der Spitzenwerte der Böenreaktion zu ermitteln [Wyatt 2004]. Bei Verwendung des Verfahrens ist man also auf Annahmen zur Anzahl der Lastwechsel und zur Höhe der Beanspruchungsamplituden angewiesen.

Für Fälle in denen das Spektralverfahren nicht angewendet werden kann, z. B. bei Wirbelablösungen und Sogspitzen auf Dächern (nicht quasistationär) oder bei realistischen Ermüdungsnachweisen von Stahlkonstruktionen, ist man auf die Verwendung von gemessenen oder simulierten Zeitschrieben der Windgeschwindigkeit bzw. der Böenreaktion angewiesen. Aus dem Ergebnis einer dynamischen Berechnung wird dann mittels geeigneter Zählverfahren (z. B. *Rainflow-Verfahren*) das Beanspruchungskollektiv ermittelt. Voraussetzung für die Verwendung dieses allgemeingültigen Verfahrens ist die Wahl zutreffender Zeitschriebe, welche dem realen Beanspruchungsspektrum des Windes entsprechen. Für die Berechnung der Ermüdungsbeanspruchung von Glasscheiben wurde beispielsweise von [Nakagami 2003] das Beanspruchungskollektiv mit Hilfe von eigens erstellten Zeitschrieben ermittelt. Eine Überprüfung der Ergebnisse mit realen Windbeanspruchungen wurde jedoch nicht durchgeführt. Auch geht aus der Arbeit nicht hervor, ob die Korrelation der Winddrücke ("Größenfaktor") bei der Ermittlung der Erregerkraft berücksichtig wurde.

Trotz der Einschränkung der Spektralmethode zur Ermittlung von Beanspruchungskollektiven wird diese Methode in dieser Arbeit zur Abschätzung der Lastwechsel und der Beanspruchungsamplituden bei quasistationärer Windbelastung verwendet. Ersten ist dieses Verfahren relativ einfach durchzuführen und zweitens kann hier mangels umfangreicherer Versuchsdaten kein genauer "Ermüdungsnachweis" für die Adhäsion zwischen PVB-Folie und Glasscheibe geführt werden. Für die hier zu treffende Aussage, ob aus den Ergebnissen der Dauerschwingversuche auf eine Dauerhaftigkeit der Verbundwirkung bei Windbelastung geschlossen werden kann, ist die hier vorgestellte Vorgehensweise nach Meinung des Verfassers ausreichend genau.

Die Vorgehensweise und alle verwendeten Formeln und Ausgangsparameter zur Ermittlung der Lastspielzahl und der Beanspruchungsamplituden auf Grundlage der Spektralmethode sind in Anhang A3 dargestellt. Im Folgenden werden deshalb nur die wesentlichen Annahmen und Ergebnisse der Untersuchung dargestellt.

6.4.2.2 Kleinste Eigenfrequenz von großformatigen VSG-Scheiben

Maßgebend für den Resonanzanteil der Böenreaktion ist die kleinste Biege-Eigenfrequenz f_1 des zu untersuchenden Bauteils. Ab einer Frequenz von $f_1 > 2$ Hz werden Bauteile nur noch in sehr geringem Maße zu Resonanzschwingungen angeregt [Niemann 2003]. Im Widerspruch dazu erzielte [Nakagami 2003] bei der dynamischen Berechnung einer 2 x 3 m großen punktgelagerten Glasscheibe (erste Eigenfrequenz $f_1 = 3{,}6$ Hz) relativ starke Resonanzschwingungen. Deshalb wird hier auch der resonante Anteil der Böenreaktion betrachtet.

In Tabelle 6-4 ist in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses α und eines zeitlich konstanten Schubmoduls G die erste Eigenfrequenz von zwei großformatigen VSG-Scheiben (maximale Spannung 50 N/mm² bei $q_{b,3s} = 1{,}4$ kN/m²) angegeben. Die Eigenfrequenz der vierseitig

gelagerten Platten wurde numerisch mittels dem FEM-Modell der VSG-Platte (s. o.) ermittelt und die der Balken ($\alpha = \infty$) analytisch nach [Stamm 1974] berechnet.

Werden die VSG-Platten linienförmig auf weichen Auflagerprofilen gelagert, so reduziert sich die Eigenfrequenz der starr gelagerten Scheiben. Die Reduktion ist um so geringer, je niedriger die Eigenfrequenz der starr gelagerten Scheibe ist. Die Frequenzen in Tabelle 6-4 wurden für eine zulässige Durchbiegung der Auflagerprofile nach [TRLV] von ca. 15 mm ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass die Platten an den Ecken starr und dazwischen auf entsprechend gewählten Federn gelagert sind.

Tabelle 6-4: Erste Eigenfrequenz f_1 von zwei großformatigen VSG-Scheiben

	G = 0,5 N/mm²			G = 2 N/mm²		
Seitenverhältnis α = b/L	α = 1,0	α = 2,0	Balken $\alpha = \infty$	α = 1,0	α = 2,0	Balken $\alpha = \infty$
a) VSG 8/0,76/8, λ = 200 L = 3200 mm, starr gelagert	6,2 Hz	4,2 Hz	*(3,5 Hz)*	7,4 Hz	4,8 Hz	*(3,8 Hz)*
a) bei Durchbiegung der Auflagerprofile um ≈ 15 mm	4,9 Hz	3,8 Hz		5,2 Hz	4,2 Hz	
b) VSG 6/0,76/6, λ = 250 L = 3000 mm, starr gelagert	5,5 Hz	*(3,7 Hz)*	*(3,1 Hz)*	6,5 Hz	*(4,2 Hz)*	*(3,4 Hz)*
b) bei Durchbiegung der Auflagerprofile um ≈ 15 mm	4,8 Hz			5,2 Hz		

Werte in Klammern: Maximale Spannung bei $q_{b,3s}$ = 1,4 kN/m² ist größer 50 N/mm² (lineare Berechnung)

Bei den untersuchten Scheiben lag die geringste Eigenfrequenz bei einem sehr geringen Schubmodulwert von G = 0,5 N/mm² (G'(ω) bei 40 °C und f = 0,26 Hz aus Kapitel 6.2) bei ca. 3,8 bis 4,2 Hz. In der Regel werden die Eigenfrequenzen höher sein, da bei kurzen Schwingungsdauern der Schubmodul auch bei hohen Scheibentemperaturen größer als 0,5 N/mm² sein wird. Für die Untersuchung der Böenreaktion der Scheibe wird jedoch eine untere Grenze der Eigenfrequenz von 4 Hz gewählt, da die Resonanzanregung der VSG-Scheibe um so stärker ist, je niedriger die erste Eigenfrequenz ist.

6.4.2.3 Vorgehensweise zur Abschätzung der Beanspruchungskollektivs

1. Schritt: Definition der Beanspruchung

Die maßgebliche Böenreaktion die hier untersucht wird ist die maximale Schubspannung τ_F in der PVB-Folie, da sie Ursache einer möglichen Delamination der Folie von den Glasoberflächen ist. Alle Beanspruchungsgrößen erhalten somit die Bezeichnung τ. Bei einer Belastung von $q_{b,3s}$ = 1,4 kN/m² beträgt nach Kapitel 6.4.1 die maximale Schubspannung in VSG-Scheiben $\tau_{F,b,3s}$ = 0,20 N/mm². Aufgrund des hier als linear angenommenen Verhältnisses zwischen Winddruck q und Schubspannung τ_F können alle Beanspruchungen τ_F aus Gleichung (6.2) ermittelt werden.

$$\tau_F = 0,20 \frac{q}{q_{b,3s}} \quad \left[N/mm^2 \right] \tag{6.2}$$

In Analogie zu Untersuchungen der Werkstoffermüdung besteht ein Lastspiel aus einer Doppelamplitude (Differenz $\Delta\tau_F$ zwischen maximaler und minimaler Beanspruchung). Die in Tabelle 6-3 angegebenen Schubspannungen (Amplituden) sind demnach zu verdoppeln. Es wird dabei implizit davon ausgegangen, dass Dauerhaftigkeit der Verbundwirkung bei dynamischer Beanspruchung unabhängig von der mittleren Beanspruchung während eines Lastspiels ist.

2. Schritt: Anzahl der Tagesmaxima der Windböen aus langjährigen Messungen

Die Dauerversuche bis 50.000 Lastwechsel je Temperaturstufe haben gezeigt, dass nur bei hohen Scheibentemperaturen die Gefahr von Ablösungen der Folie von der Glasscheibe besteht. Es werden deshalb hier nur solche Windbeanspruchungen (Windtage) berücksichtigt, bei denen die Scheibentemperatur ca. 40 °C und mehr betragen kann. Nach Untersuchungen von [Sedlacek 2003] zur Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur beträgt die maximale Aufheizung von nicht eingefärbten Gläsern in Deutschland 25 °C (siehe Kapitel 4.5.2). Es werden deshalb hier nur solche Windtage berücksichtigt, an denen die maximalen Lufttemperaturen mindestens 15 °C betragen.

Aus täglichen Daten der bodennahen Windgeschwindigkeit und Lufttemperaturdaten des *Deutschen Wetterdienstes*, der für die mittleren Windverhältnisse in Deutschland typischen Standorte München und Hamburg (beide in Windzone 2) wurden die Häufigkeitsverteilung der maximalen täglichen Böen $q_{b,3s,tag}$ ermittelt. Da die untersuchten Messdaten nur Zeiträume von 20 bzw. 30 Jahre umfassen, wurde die absolute Häufigkeit der Daten linear auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahre extrapoliert. Zudem wurden die Winddrücke auf eine Höhe von 100 m umgerechnet. Die Verteilung der täglichen Böen ist in Bild 6-6 dargestellt. Zudem ist in Bild 6-6 die relative Häufigkeit $h(T_{Max} \geq 15\ °C)$ eingetragen, welche das Verhältnis zwischen warmen Tagen mit maximaler Temperatur über 15 °C und Messtagen mit maximaler Windböe $q_{b,3s,tag}$ darstellt.

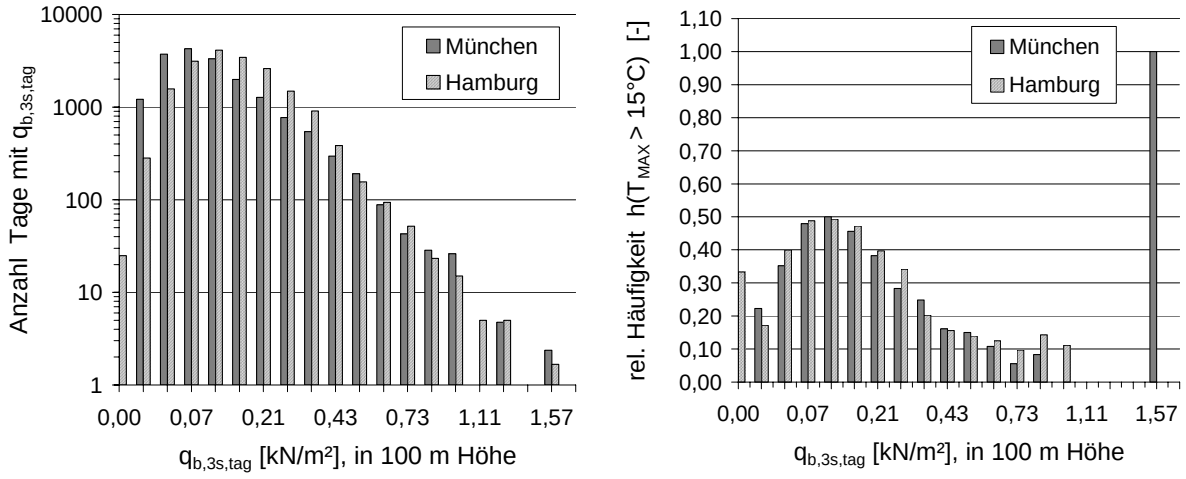


Bild 6-6: Häufigkeitsverteilung der Tagesmaxima der Windböenbeanspruchung $q_{b,3s,tag}$ in 100 m Höhe in München und Hamburg (links) und relative Häufigkeit $h(T_{Max} \geq 15\ °C)$ von Tagen mit einer Maximaltemperatur über 15 °C

Die täglich einmal auftretenden Maximalwerte der zur Einwirkung $q_{b,3s,tag}$ gehörenden Schubspannung stellen eine untere Grenze des Beanspruchungskollektivs der VSG-Scheibe dar (50 x 365 = 18250 Lastwechsel bei quasistatischer Beanspruchung).

An einem Tag werden jedoch mehrere Lastwechsel mit teils ähnlich hohen Belastungen auftreten. Die Abschätzung dieser zusätzlichen Zahl von Beanspruchungen erfolgt im nächsten Schritt mittels der Spektralmethode in Verbindung mit eigenen Annahmen zur Zahl der Beanspruchungsspitzen bzw. Doppelamplituden.

3. Schritt: Anzahl der Lastwechsel und Höhe der Doppelamplituden während eines Mittelungsintervalls von 10 Minuten

Die Reaktion von großformatigen Fassadenelementen kann im idealen Fall einer quasi-stationären Windbelastung mit Hilfe der Spektralmethode in einen quasistatischen Anteil und einen Resonanzanteil aufgespalten werden (Gleichung (6.3)) [Zhou 2002].

$$\left(\frac{\sigma_{\tau,Q}}{\tau_{F,m}}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{\tau,R}}{\tau_{F,m}}\right)^2=4\left(\frac{\sigma_v}{v_m}\right)^2\left\{\int_0^\infty \chi_A^2(f)\frac{S_v(f)}{\sigma_v^2}df+\chi_A^2(f_1)\frac{S_v(f_1)}{\sigma_v^2}\frac{\pi^2}{2\delta}f_1\right\} \tag{6.3}$$

mit

σ_v, $\sigma_{\tau,Q}$, $\sigma_{\tau,R}$: Standardabweichung des turbulenten Anteils der Windgeschwindigkeit v, der quasistatischen Bauteilreaktion (Index Q) und der resonanten Bauteilreaktion (Index R)

v_m, $\tau_{F,m}$: Mittelwert (hier: 10-Minuten-Intervall) der Windgeschwindigkeit und der Bauteilereaktion (τ_F für Schubspannung in der PVB-Folie)

$S_v(f)$: Spektrale Dichte des Windes

χ_A^2: Aerodynamische Admittanz ≤ 1,0, Größenfaktor zur Berücksichtigung der abnehmenden Korrelation der Winddrücke bei großen Bauteilen bzw. Faktor zwischen Flächenlast und Winddruck.

δ: Dämpfung (logarithmisches Dämpfungsdekrement), Annahme: $\delta = 0{,}10$

f: Frequenzen der Windturbulenz

f_1: Kleinste Biege-Eigenfrequenz des Bauteils

Stellt die zeitliche Fluktation der Schubspannung $\tau_F(t)$ einen Gauß'schen Prozess mit der Standardabweichung σ_τ und dem Mittelwert $\tau_{F,m}$ dar, so ergeben nach Anhang A3 bei einer Eigenfrequenz der VSG-Scheibe von 4 Hz im Mittel ca. 1000 Überschreitungen der mittleren Schubspannung $\tau_{F,m}$ in einem Mittelungsintervall von 10 Minuten.

Aus den folgenden zwei vereinfachten Annahmen wird die Zahl der Lastwechsel und der Doppelamplituden der Beanspruchung während eines 10-Minuten-Intervalls bestimmt:

- Jede der 1000 Überschreitungen des Mittelwertes stellt ein Lastspiel dar.
- 10 mal tritt die Amplitude $3\sigma_\tau$, 90 mal die Amplitude $2\sigma_\tau$ und 900 mal die Amplitude σ_τ auf . Die Doppelamplituden sind dann das Doppelte dieser Werte.

4. Schritt: Bestimmung der Gesamtkollektivs

Da die in Schritt 3 ermittelten Doppelamplituden dem Vielfachen des Mittelwerts $\tau_{F,m}$ entsprechen, wird eine Häufigkeitsverteilung der mittleren Windbelastung in einem 10-Minuten-Intervall benötigt. Für die windklimatisch unterschiedlichen Standorte München und Hamburg sind im *Europäischen Windatlas* [Troen 1990] Parameter für die Wahrscheinlichkeitsverteilung (Weibullverteilung) der mittleren Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 100 Meter angegeben. Diese Verteilung wird hier auch für den mittleren Winddruck $q_{m,10min}$ und somit die mittlere Schubbeanspruchung $\tau_{F,m}$ angesetzt. Da aber nur Tage mit maximalen Temperaturen von 15 °C berücksichtigt werden, ist die Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibullverteilung noch mit der relativen Häufigkeit $h(T_{Max} \geq 15\ °C)$ aus Bild 6-6 zu multiplizieren.

Die mit der Weibull-Verteilung ermittelten Spannungsdoppelamplituden bilden gemeinsam mit den Tagesmaxima $\tau_{F,b,3s,tag}$ aus Schritt 2 das Gesamtkollektiv der Schubbeanspruchung in der PVB-Folie der VSG-Scheibe.

6.4.2.4 Beanspruchungskollektiv der Schubspannung in der PVB-Folie

Die mit der oben beschriebenen Vorgehensweise berechneten Beanspruchungskollektive der Standorte München und Hamburg ist in Bild 6-7 wiedergegeben. Beanspruchungen welche mehr als das 0,25-fache der Schubspannung $\tau_{F,b,3s}$ = 0,20 N/mm² betragen, werden demnach in 50 Jahren weniger als 50.000 mal überschritten. Der überwiegende Teil der Schubbeanspruchungen welche die PVB-Folie in VSG-Scheiben bei 50-jähriger Windbeanspruchung und Folientemperaturen von 40 °C erleidet, liegt weit unterhalb der bei den Dauerschwingversuchen erzielten Doppelamplituden $\Delta\tau_F$ = 0,16 bis 0,34 N/mm² (Doppelamplituden $2\tau_F$ um dem Nullpunkt). Schubbeanspruchungen von mehr als 40 % der maximalen Böenbeanspruchung $\tau_{F,b,3s}$ = 0,20 N/mm², treten in großformatigen VSG-Scheiben weniger als 10.000 mal auf.

Der große Unterschied zwischen den Kollektiven in München und Hamburg bei hohen Schubbeanspruchungen beruht auf einem Sturmereignis das während der Messperiode in München bei einer maximalen Tagestemperatur von 15 °C gemessen wurde (siehe Bild 6-6 rechts). Dieses Ereignis führte bei der Berechnung des Kollektivs zu drei 10-Minuten-Intervallen mit hohen Beanspruchungsdoppelamplituden von bis zu $\Delta\tau_F$ = 0,26 N/mm².

Unterschiede in der Weibullverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen Hamburg und München (siehe Anhang A3) haben bei höheren Beanspruchungen $\Delta\tau_F$ > 0,05 N/mm² nur einen geringen Einfluss auf das Beanspruchungskollektiv. Maßgeblichen Einfluss auf die Form des Kollektives bei hohen Beanspruchungen hat lediglich die relative Häufigkeit warmer Tage und die Anzahl seltener Sturmereignisse.

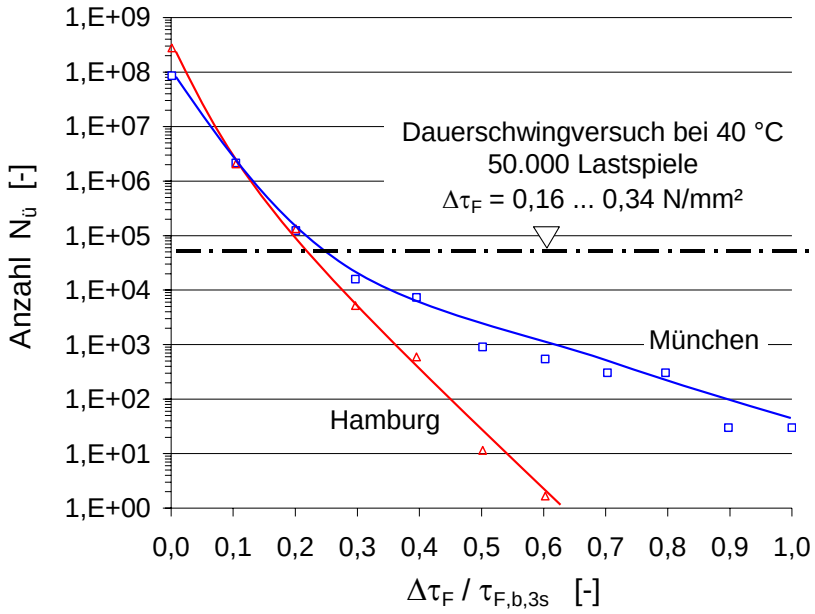


Bild 6-7: Berechnetes Kollektiv der Schubspannung $\Delta\tau$ in großformatigen VSG-Scheiben an "warmen" Tagen (T_{max} > 15 °C) in den Standorten München und Hamburg, Anzahl $N_ü$ der Überschreitungen des Beanspruchungsniveaus $\Delta\tau_F / \tau_{F,b,3s}$

6.4.3 Lastkollektive aus der Literatur zur Prüfung von windbeanspruchten Bauteilen

Einige technische Vorschriften und wissenschaftliche Veröffentlichungen enthalten Angaben zur versuchstechnischen Prüfung von Fassaden- und Dachelementen und deren Befestigungen unter zyklischer Dauerbelastung. Darin werden Lastkollektive angegeben, mit denen die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauteilen bei extremer Windbeanspruchung geprüft werden kann. Da diese Lastkollektive prinzipiell auch für die Prüfung der dauerhaften Verbundwirkung in windbeanspruchten VSG-Scheiben verwendet werden können, werden sie hier kurz vorgestellt.

Die Lastkollektive wurden im wesentlichen für drei Anwendungsfälle entwickelt:

- Nachweis der Ermüdungsfestigkeit der Befestigungselemente von Dachelementen, sowohl in gemäßigten Klimaregionen als auch in Gebieten tropischer Stürme
- Standsicherheit bzw. Resttragfähigkeit von Verglasungen in Gebieten tropischer Stürme ("Hurricane Resistant Glazing")
- Beanspruchungskollektiv der Böenreaktion (Windkräfte) nicht-schwingungsanfälliger Bauwerke in gemäßigten Klimaregionen nach [DIN 1055-4]

Die beiden ersten Anwendungsfälle unterscheiden sich im Hinblick auf die Windverhältnisse stark von den in Kapitel 6.4 getroffenen Annahmen einer quasistationären Windbelastung mit geringer Turbulenzintensität. Auf Dächern führen Wirbelablösungen zu starken Druck-Sog-Schwankungen mit veränderlichen Druckbeiwerten. Dieser Zufallsprozesse lässt sich bei kleinen Bauteilen i. d. R. nicht mehr durch einen Gauß'schen Prozess und eine lineare Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit, Winddruck und Böenreaktion beschreiben.

Tropische Stürme unterscheiden sich in ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit und ihrem zeitlichen Verlauf wesentlich von den mitteleuropäischen Windverhältnissen.

Der dritte Anwendungsfall entspricht den in Kapitel 6.4 beschriebenen Windverhältnissen. Ein Beanspruchungskollektiv ist in [DIN 1055-4] als Überschreitungshäufigkeit der Böenreaktion eines nicht-schwingungsanfälligen Bauwerks angegeben. Nähere Angaben zur Herleitung des Kollektives sind in der Vorschrift nicht zu finden.

Ein Überblick über einige Lastkollektive aus der Literatur, deren Anwendungsfall und deren Lastamplituden gibt Tabelle 6-5. Für die Untersuchung von Bauteilen unter extremen Windverhältnissen (Zeile 1 bis 3 der Tabelle) werden insgesamt 9.000 bis ca. 12.000 Lastwechsel mit abgestuften Belastungsniveaus angegeben. Diese Lastkollektive beruhen auf vereinfachten Kollektiven (Spitzendrücke) von real gemessenen Sturmereignissen. Die maximale Belastung und die Anzahl der Lastwechsel wurde so gewählt, dass die Glasscheibe bzw. die Befestigung des Dachelementes während eines extremen Sturmereignisses nicht versagt. Bei langjährigen Nutzungsdauern tritt mit abnehmender Belastungsamplitude ein Vielfaches der angegeben Lastwechsel auf. Nach einer Untersuchung von [XU 1995] treten auf Flachdächern bei einer 50-jährigen Nutzungsdauer in der Summe ca. 10.000 Sogspitzen auf, deren Lasthöhe mindestens 50 % der maximalen Sogbelastung beträgt.

Die auf Untersuchungen von [Gerhardt 1992] bzw. [Gerhardt 1986] basierenden Lastkollektive (siehe Tabelle 6-5, Zeile 4 und 5) für Soglasten auf Flachdächern bzw. für quasistatische Windbelastung (Staudruck $q = 1/2\rho v^2$ aus dem Kollektiv der Windgeschwindigkeit v) wurden für die in Deutschland geltenden Windverhältnisse erstellt. Die sehr unterschiedlichen Kollektive gelten für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren und bestehen in der Summe aus 15.000 bzw. 100.000 Lastwechseln mit Amplituden von mindestens 40 % der Bemessungslast.

Tabelle 6-5: Lastkollektive aus der Literatur zur Prüfungen windbelasteter Bauteile

Zeile	Vorschrift / Literatur	Anwendungsfall	Kollektiv / Belastungsspanne
1	SFBC (South Florida Building Code) [Vickery 2004] (USA)	"Hurricane Resistant Glazing" Resttragfähigkeit von Verbundglasscheiben nach Bruch der äußeren Scheibe in einem Hurrikan	0,0 bis 0,3 p_{max} : 3500 LW 0,2 bis 0,6 p_{max} : 300 LW 0,5 bis 0,8 p_{max} : 600 LW 0,3 bis 1,0 p_{max} : 100 LW Summe: 4500 LW Sog, 4500 LW Druck
2	"DABM" [Mahendran 1995] (Australien)	Ermüdung von Befestigungen von Dachelementen in Gebieten mit Zyklonen	0,0 bis 1,0 p_{max} : 10000 LW 1 x Überlast 1,6 ... 2,0 p_{max} (1 Zyklus für einen Zyklon)
3	Lastkollektiv von [Mahendran 1995] (Australien)	Ermüdung von Befestigungen von Dachelementen in Gebieten mit Zyklonen ("Kategorie 4 –Zyklone")	0,0 bis 0,4 p_u : 10000 LW 0,0 bis 0,6 p_u : 1250 LW 0,0 bis 0,8 p_u : 140 LW 0,0 bis 1,0 p_u : 10 LW (1 Zyklus für einen 5h-Zyklon)
4	"UEAtc 551"-Richtline [Gerhardt 1992] (Europa)	Ermüdung von Befestigungen von Dachelementen	1 Teilzyklus = 5 Jahre Wind 0,0 bis 0,4 P_{zul} : 1000 LW 0,0 bis 0,6 P_{zul} : 400 LW 0,0 bis 0,8 P_{zul} : 10 LW 0,0 bis 0,9 P_{zul} : 2 LW 0,0 bis 1,0 P_{zul} : 1 LW Summe: 10 x 1415 LW 10 Teilzyklen, nach 3. Zyklus Lasterhöhung bis zum Versagen der Befestigung
5	Lastkollektiv von [Gerhardt 1986] (Deutschland)	Quasistatische Windbelastung	1 Teilzyklus = 5 Jahre Wind 0,0 bis 0,4 p_{max} : 9000 LW 0,0 bis 0,6 p_{max} : 900 LW 0,0 bis 0,8 p_{max} : 90 LW 0,0 bis 0,9 p_{max} : 9 LW 0,0 bis 1,0 p_{max} : 1 LW Summe: 10 Teilzyklen

LW = Lastwechsel, p_{max} = maximale Windlast der jeweiligen Norm, p_u = Bemessungswert der Windlast ("ultimate design load"), P_{zul} = zulässige Belastung der Befestigung

6.5 Untersuchungen anderer Autoren

Einige Autoren, wie z. B. [Albrecht 2000], [Ensslen 2005] und [Schutte 1999] berichten von dynamischen Versuchen an VSG-Scheiben.

Zur Untersuchung der Resttragfähigkeit von VSG-Scheiben im Überkopfbereich einer Lärmschutzeinhausung über einer Autobahn wurden an der TU-München Dauerschwingversuche an intakten und gebrochenen VSG-Platten (teilvorgespanntes Glas - TVG) durchgeführt [Albrecht 2000]. Zur Simulation der Druck-Sog-Welle vorbeifahrender Lastkraftwagen in Tunneln (täglich 5000 Lastwechsel) wurden die 2,0 x 3,3 m großen Probekörper in einer Druckkammer mit +1,5/-0,75 kN/m² periodisch belastet (Frequenz ca. 0,6 Hz). Nach bis zu 150.000 Lastwechsel wurde an den intakten Probekörpern keine Änderung des Tragverhaltens (Steifigkeit) festgestellt. Die Anforderungen an die Resttragfähigkeit nach Bruch der beiden äußeren Glasscheiben (150.000 Lastwechsel ohne Herausfallen größerer Bruchstücke) wurde nur mit einem dreischichtigen Scheibenaufbau (6/1,52/8/1,52/6 mm) erfüllt. Dieser Scheibenaufbau konnte sogar bei Zerstörung der inneren Scheibe noch mindestens 150.000 Lastwechsel ohne Versagen (Herausfallen größer Bruchstücke aus der Rahmenkonstruktion) standhalten. Ein zweischichtiger Scheibenaufbau (10/1,52/10 mm) erfüllte bei einer intakten Glasscheibe zwar noch die Anforderungen an die Resttragfähigkeit, doch nach Bruch beider Scheiben wurde die VSG-Scheibe nach fast 3000 Lastwechsel so stark zerstört, dass sie unter Eigengewicht aus der Auflagerkonstruktion rutschte.

[Ensslen 2005] berichtet von Dauerschwingversuchen an VSG-Balken bis 860.000 Lastwechsel (Frequenz 0,5 Hz). Die Probekörper 4/0,76/4 mm wurden bei einer mittleren Durchbiegung von w = 9 bis 10 mm mit relativ kleinen Amplituden Δw = 5 bis 5,5 mm belastet. Die Scheramplitude der PVB-Folie betrug $\Delta\gamma_F$ = 0,005. Nach Abschluss der Dauerschwingversuche wurden aus den Auflagerbereichen der Scheiben mehrere Scherproben entnommen und in Scherversuchen untersucht. Ein Einfluss der Dauerschwingbelastung auf die Höhe des Schubmoduls konnte dabei nicht festgestellt werden.

Aufgrund von empirischen und rechnerischen Untersuchungen schlägt [Schutte 1999] vor, zur Bemessung von Verbundglasscheiben die Windbelastung in einen statischen Anteil (60 % der Windlast) ohne Verbund und einen dynamischen Böenanteil (40 % der Windlast) mit vollem Verbund aufzuteilen. Grundlage dieses Vorschlages waren Untersuchungen von Verbundglasplatten, welche bei einer Temperatur von 60 °C mit einer Frequenz von 0,25 Hz harmonisch oszillierenden belastet wurden.

6.6 Abschließende Beurteilung für windbeanspruchte VSG-Scheiben

Bei hohen Temperaturen von 40 °C und großen Schubspannungsamplituden in der PVB-Folie von ca. 0,2 N/mm² kann eine Dauerschwingbelastung ab mehr als 10.000 Lastwechseln zu örtlich begrenzten Delaminationen der PVB-Folie in den Ecken und entlang den Längskanten von VSG-Balken führen. Unter labormäßigen Klimabedingungen (50 - 60 % rel. LF) führte jedoch selbst eine Lastspielzahl von 50.000 Lastwechsel zu keinem Abfall der Biegesteifigkeit der untersuchten VSG-Balken. Die auftretenden Delamination stellt bei Linienlagerung der Kanten somit nur eine leichte optische Beeinträchtigung dar und hat

keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Scheiben. Bei Temperaturen ≤ 20 °C konnte bis 50.000 Lastwechsel keine nennenswerte Delamination der Folie beobachtet werden. Gleiches galt bei Dauerversuchen bis 10.000 Lastwechsel, bei denen die Schubspannung bei 40 und 60 °C weniger als 0,1 N/mm² beträgt (Folie "B", siehe Tabelle 6-1). Einen Einfluss der Dauerbelastung auf den statischen und dynamischen Schubmodul der Folie und somit auf die Form der Hysteresen konnte bei keiner Temperatur festgestellt werden.

Bei einer Windböenbelastung $q_{b,3s}$ = 1,4 kN/m² (Einbauhöhe der Scheibe in 100 m Höhe, Windzone 2, Geländekategorie II nach [DIN 1055-4]) beträgt die maximale Schubspannung der PVB-Folie in liniengelagerten und biegebeanspruchten VSG-Elementen ca. 0,2 N/mm² (G ≤ 10 N/mm²) und liegt damit im Bereich der Beanspruchung der Dauerschwingversuche bei 40 °C (siehe Tabelle 6-3). Bis zu einem Belastungsniveau von 40 % der maximalen Schubspannung $\tau_{F,b,3s}$ werden unabhängig von der Einbausituation (Vertikalverglasung oder Verglasung in Sogbereichen auf Dächern) für fast alle der Literatur entnommenen Lastkollektive (Ausnahme Zeile 5 in Tabelle 6-5) und dem vom Verfasser erstellten Kollektiv (siehe Bild 6-7) bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren in einer Größenordnung von 10.000 Lastwechsel erwartet.

Aus den Versuchsparametern und den Ergebnissen der Dauerschwingversuche kann geschlossen werden, dass die Verbundwirkung der PVB-Folie in üblichen windbeanspruchten VSG-Scheiben (vertikaler Einbau in geschlossene Fassade bis 100 m, keine Wirbelablösungen und Sogspitzen, Windzone 2 in Deutschland) dauerhaft gegeben ist.

Zur Eingrenzung der Versuchsparameter wurden die Dauerschwingversuche auf maximal 50.000 Lastwechsel mit konstanter Amplitude um den Nullpunkt der Beanspruchung begrenzt. Eine Aussage zur Dauerhaftigkeit der Verbundwirkung bei höheren Lastspielzahlen und ähnlich hohen Belastungen, wie sie bei besonderen Anwendungen von VSG (z. B. befahrbare Verglasung) auftreten können, ist nicht möglich. Nicht geklärt werden konnten zudem die Fragen, ob es einen temperaturabhängigen Schwellenwert gibt, unterhalb dessen keine Delamination auftreten kann, ob die mittlere Schubspannung in der PVB-Folie einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit hat und ob eine Belastungspause zwischen den Lastwechseln sich günstig oder ungünstig auf die Dauerhaftigkeit des Verbundes auswirkt.

Weitere Forschungsbedarf besteht jedoch insbesondere bezüglich des Einflusses langanhaltend hoher Luftfeuchtigkeit bei hohen und tiefen Temperaturen, da der Wassergehalt der PVB-Folie ein wesentlicher Parameter für das Haftvermögen zwischen Folie und Glas ist. Bei fortschreitender Delamination kann die Feuchtigkeit immer weiter ins Innere der Verbundfläche zwischen Folie und Glas eindringen und so die Delamination beschleunigen.

7 Zugversuche an PVB-Folien

7.1 Einleitung

Für die Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas ist neben dem Bruchbild, der Lagerung der Scheiben und der Adhäsion zwischen Folie und Glas auch die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der Folie von Bedeutung. Mit den gleichen PVB-Folien A, B und C, wie sie auch in den Probekörpern für die Biegeversuche Verwendung fanden, wurden deshalb Zugversuche an kleinen Proben aus reinem Folienmaterial durchgeführt. Anhand dieser Versuche sollte insbesondere untersucht werden, ob eine künstliche Bewitterung durch Bestrahlung, hohe Temperatur und hohe Feuchtigkeit einen Einfluss auf die Zugeigenschaften (Reißfestigkeit und Bruchdehnung) und die Steifigkeit (E-Modul) der Folien hat.

7.2 Versuchsprogramm

7.2.1 Versuchsaufbau und Probekörper

Gemäß [Bauregelliste DIBt 2006] müssen PVB-Folien für den Einsatz in Verbundsicherheitsglas eine Zugfestigkeit von mindestens 20 N/mm² und eine Bruchdehnung von mindestens 250 % aufweisen. Die Prüfung dieser Eigenschaften erfolgt dabei nach [DIN EN ISO 527-3] bei einer Temperatur von 23 °C und einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min.

Abweichend von dieser Richtlinie wurden die Zugversuche in dieser Arbeit bei einer etwas höheren Temperatur von $25\ ^{+3}_{0}$ °C durchgeführt (Erwärmung der Folien durch Lampen in der Einhausung der Prüfmaschine). Je Folie und Alterungszustand wurden fünf Folienproben untersucht und in einer Kunststoffprüfmaschine mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min bis zum Bruch gedehnt. Dies ergab zu Beginn der Versuche eine relativ konstante Dehnrate in den Probekörpern von ungefähr 1,4 %/s.

Die Abmessungen der 1,52 mm dicken Probeköper ist in Bild 7-1 zu sehen. Sie entsprachen dem Typ 5 aus [DIN EN ISO 527-3].

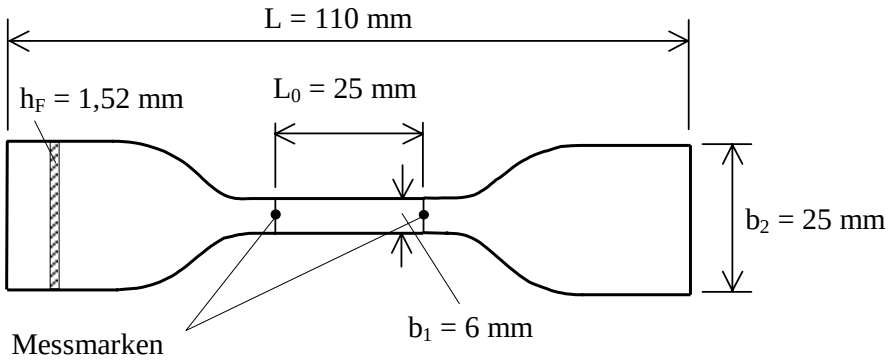


Bild 7-1: Abmessungen der Probeköper für die Zugversuche

Entsprechend der künstlichen Bewitterung wurden folgende Versuchsserien von je fünf Probekörpern untersucht:

- Serie **N**: ohne Alterung bzw. "neue" Probekörper
- Serie **UV**: 2200 Stunden künstliche (UV-)Bestrahlung, vgl. Kapitel 4.7.1
- Serie **T**: Temperaturalterung, 14-tägige Dunkellagerung bei 60 °C (nur Folie C)
- Serie **F**: 2-tägige Lagerung in kaltem Wasser (nur Folie C)
- Serie **FT**: 2-tägige Lagerung in kaltem Wasser, anschließend 2 Wochen Lagerung unter Laborbedingungen (ca. 23 °C, 50 - 60 % rel. LF) (nur Folie C)

Nach der Bewitterung der Probekörper konnte bei allen Probekörpern eine leichte Volumenänderung festgestellt werden. Bild 7-2 zeigt von links nach rechts je ein Probekörper aus der Serie F, N, UV und T (alle Serie C). Während die Wasserlagerung (Serie F) zu einer geringen Quellung bzw. Verlängerung und einer milchig weißen Trübung der Proben führte, schrumpften bzw. verkürzten sich die bestrahlten und getrockneten Proben (Serie UV und T).

Bild 7-2: Probekörper der Folie C nach ihrer Bewitterung, von links nach rechts: Serie F, N, UV und T

Aufgrund der weichen und dünnen Probekörper aus PVB erfolgte die Dehnungsmessung berührungslos mit einem Videoextensiometer (Bild 7-3). Bei dieser Art der Dehnungsmessung wird mit einer speziellen Videokamera die Entfernung zwischen zwei Messmarken (Punkte im Abstand von $L_0 = 25$ mm) gemessen. Aus dem Verhältnis zwischen der Entfernung dieser Messpunkte zum Zeitpunkt t und der Ausgangslänge L_0 wird die nominale Dehnung $\varepsilon(t)$ ermittelt. Die Kraft F(t) wurde mittels einer zusätzlich eingebauten Kraftmessdose gemessen.

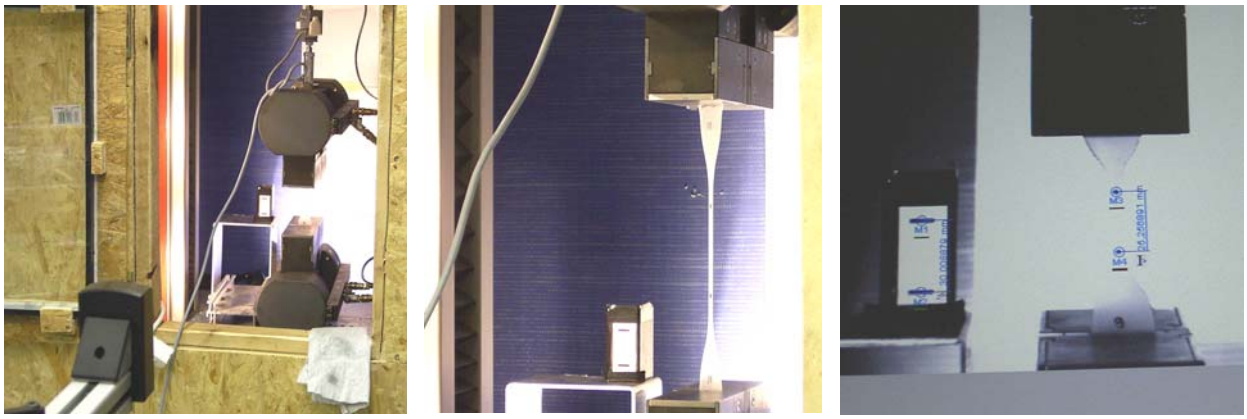


Bild 7-3: Zugversuche mit Videoextensiometer, von links nach rechts: Videokamera und eingehauste Prüfmaschine, PVB-Folie im gedehnten Zustand, Videobild mit Messmarken

7.2.2 Auswertung der Versuche

Die Ergebnisse der Zugversuche werden in Spannungs-Dehnungs-Diagrammen mit nominalen Dehnungen und Spannungen dargestellt. Die Messgrößen werden auf die Ausgangslänge (25 mm) und den Ausgangsquerschnitt (1,52 x 6 mm²) bezogen. Bei großen Dehnungen und den damit einhergehenden großen Formänderungen des Materials werden bei der Untersuchung von Kunststoffen häufig auch sogenannte "wahre" Dehnungen und "wahre" Spannungen als Messgrößen verwendet [Young 2001]. Dabei werden die gemessenen Werte auf die momentane Länge und den momentanen Querschnitt zum Zeitpunkt der Messung bezogen. Bei geringen Dehnungen ($\varepsilon < 10$ %) ist der Unterschied zwischen den nominalen und wahren Messgrößen $\varepsilon(t)$ und $\sigma(t)$ sehr gering (< 10 %) und kann vernachlässigt werden. Gleiches gilt auch für den E-Modul $E(t) = \sigma(t)/\varepsilon(t)$ (Sekantenmodul), welcher entweder aus den nominalen oder den realen Messgrößen berechnet werden kann. Da hier nur die Auswirkungen der Alterung auf die Zugeigenschaften der Folien verglichen und das Dehnungsverhalten bei kleinen Dehnungen untersucht werden soll, erfolgt die Darstellung der Ergebnisse ingenieurmäßig mit nominalen Dehnungen und Spannungen und dem dazugehörigen Sekantenmodul.

Als exemplarisches Ergebnis der Zugversuche sind in Bild 7-4 die Spannungs-Dehnungs-kurven aus fünf Versuchen mit ungealterten Probekörpern der Folie B (Serie N) dargestellt. Aus den Dehnungen und Spannungen zum Zeitpunkt t wird die mittlere Spannung und Dehnung einer Versuchsserie berechnet. Die aus diesen Mittelwerten gewonnenen Spannungs-Dehnungskurven enden zu dem Zeitpunkt, an dem der erste der fünf Probekörper gerissen ist. Zur Untersuchung des Einflusses der künstlichen Bewitterung auf das Dehnungsverhalten der Folie werden die gemittelten Kurven der Versuchsserien miteinander verglichen.

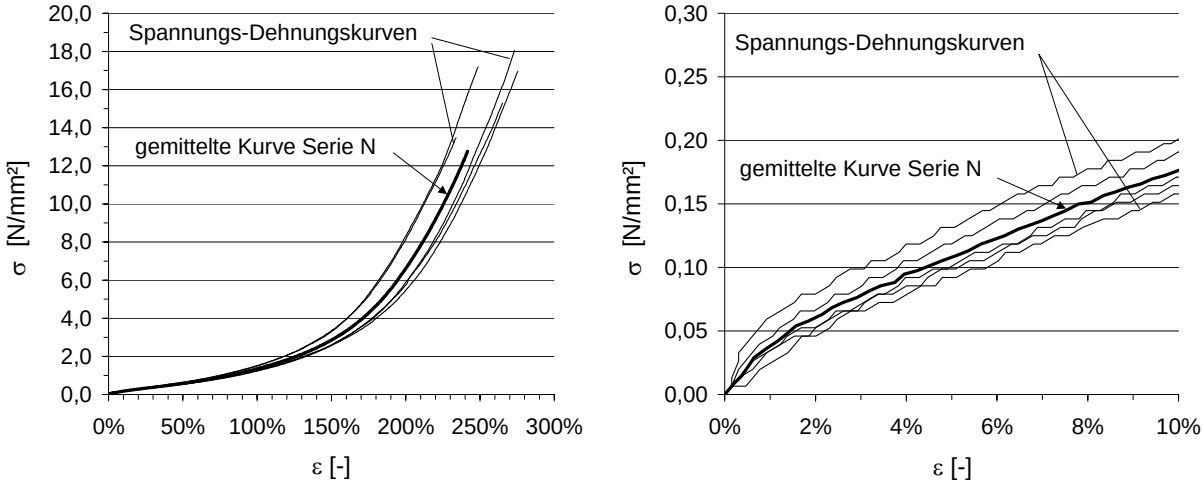


Bild 7-4: Spannungs-Dehnungskurven Serie N, Folie B (links), mit Ausschnitt der Kurven für $\varepsilon \leq 10$ % (rechts)

Typisch für alle Spannungs-Dehnungskurven ist der Wechsel des Vorzeichens der Krümmung bei einer Dehnung von ungefähr 50 %. Unterhalb dieser Dehnung nimmt die Spannung zeitverzögert zu und die Folie zeigt das typische Dehnungsverhalten von linear-viskoelastischen Kunststoffen unterhalb der Glasübergangstemperatur (vgl. Bild 2-6, Kapitel 2.1.7). Bei Dehnungen oberhalb des Krümmungswechsels versteift sich die Folie durch Streckung und Ausrichtung der Molekülketten in Kraftrichtung. Die Spannungen steigen dann bis zum Riss stark an und der aus nominalen Dehnungen und Spannungen berechnete E-Modul (Sekantenmodul) nimmt stetig zu.

Aufgrund des weichen Folienmaterials und der großen Streuung der Messwerte bei kleinen Dehnungen war eine Bestimmung des E-Moduls nach [DIN EN ISO 527-1] zwischen einer Dehnung von $\varepsilon = 0{,}05$ und 0,25 % nicht möglich. Erst ab einer Dehnung von 1 % bzw. einer Versuchsdauer von ca. 1 Sekunde erwies sich eine Bestimmung des E-Moduls als sinnvoll. Ab dieser Dehnung nahm der E-Modul E(t) vergleichbar mit dem Schubmodul G(t) bei Biegeversuchen an VSG-Balken mit zunehmender Belastungszeit ab, wie weiter unten in Bild 7-8 gezeigt wird.

Während bei fast allen Zugversuchen die erforderliche Bruchdehnung von 250 % überschritten wurde, lag die Zugfestigkeit der Probekörper nur zwischen 14 und 20 N/mm². Dies liegt unterhalb der erforderlichen Zugfestigkeit nach [Bauregelliste DIBt 2006]. Eine Ursache dieser Unterschreitung könnte die etwas höhere Versuchstemperatur gewesen sein. Außerdem sind alle Probekörper oberhalb der Messlänge im Bereich der Ausrundungen der Probekörper gerissen (Bild 7-5). Möglicherweise wurde dieser einheitliche Ort der Rissentstehung durch eine leicht schiefe Einspannung der Enden der Probekörper in die Klemmen der Prüfmaschine oder durch eine Vorschädigung beim Ausstanzen der Proben aus der Folie verursacht.

Nach dem Riss bildete sich die große Längendehnung der beiden Bruchstücke der Probekörper fast vollständig zurück. Wenige Stunden nach dem Zugversuch wurde eine bleibende Verlängerung der Probekörper und eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Messmarken um ca. 3 % gemessen (Bild 7-5). Werden die Proben mit der Hand um weniger

als 50 % gedehnt, so bildet sich die Dehnung nach der Entlastung augenscheinlich vollständig zurück.

Bild 7-5: Gerissener Probekörper im Vergleich zu einem ungerissenen Probekörper

7.3 Einfluss von Bestrahlung und Temperatur auf die Zugeigenschaften der PVB-Folien

Der Verlauf der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven der Probekörper der Serie N und UV (bei Folie C auch der Serie T) ist in Bild 7-6 wiedergegeben. Die Mittelwerte der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung sowie die zugehörigen Variationskoeffizienten der Stichproben sind in Tabelle 7-1 zusammengestellt.

Tabelle 7-1: Mittelwerte und Variationskoeffizienten VK der Zugfestigkeit f_u und der Bruchdehnung ε_u der Versuchsserien N, UV, T

	Folie A		Folie B		Folie C		
	Serie N	Serie UV	Serie N	Serie UV	Serie N	Serie UV	Serie T
σ_B [N/mm²]	15,2	16,3	16,2	14,6	19,2	18,4	19,3
VK [%]	5,8	2,9	11,2	6,4	6,0	3,8	5,6
ε_B [%]	280	274	259	280	254	245	257
VK [%]	5,8	3,8	6,8	2,3	2,5	1,4	2,0

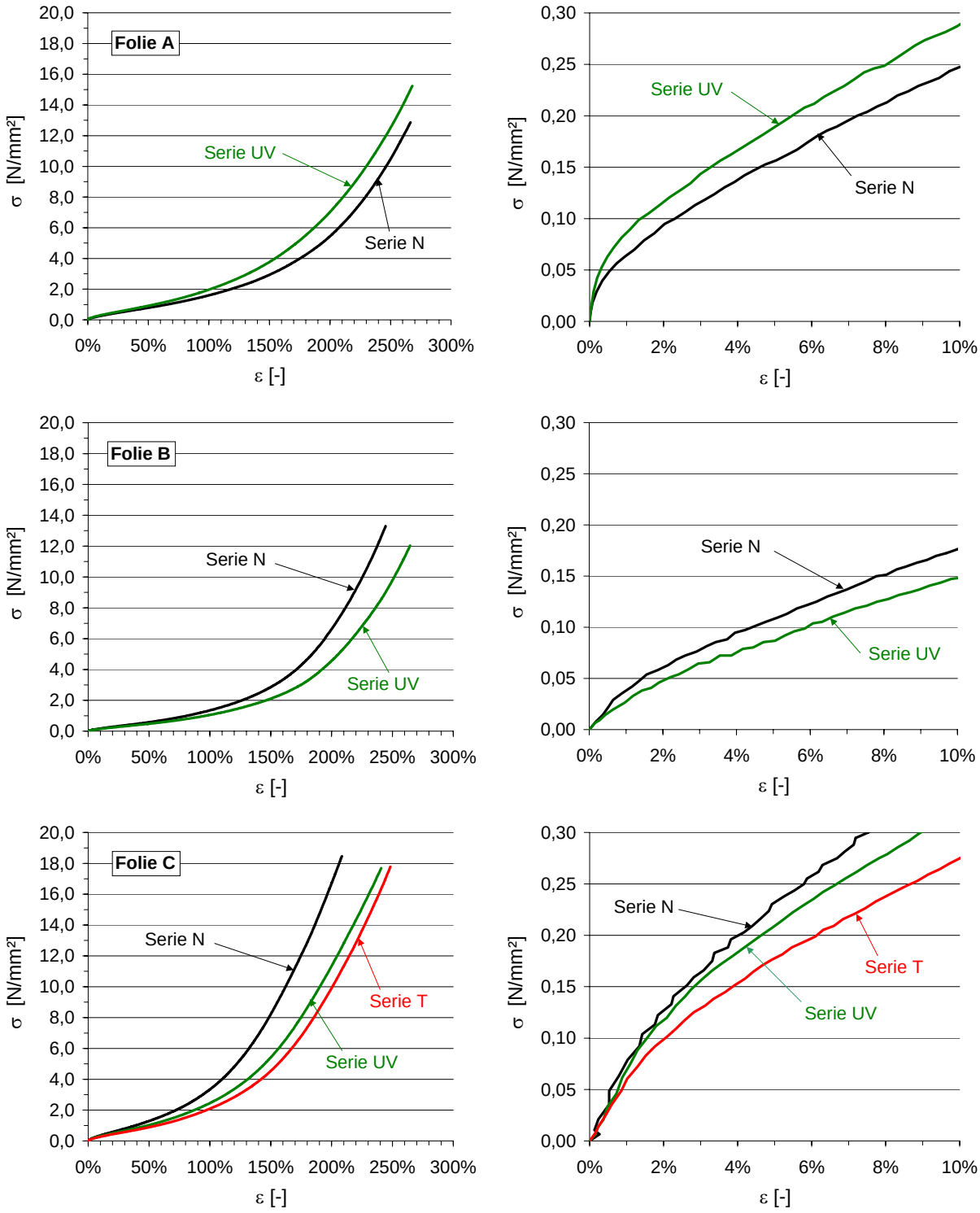


Bild 7-6: Mittlere Spannungs-Dehnungskurven aus je 5 Zugversuchen mit Folie A, B, C, Serie N, UV und T (links), mit Ausschnitt der Kurven für $\varepsilon \leq 10$ % (rechts)

Trotz Unterschieden in den mittleren Spannungs-Dehnungskurven konnte aufgrund der Streuung der Versuchsergebnisse weder bei großen noch bei kleinen Dehnungen (siehe Bild 7-6 rechts, Ausschnitte bis $\varepsilon \leq 10$ %) ein signifikanter und einheitlicher Einfluss der künstlichen Bestrahlung und Trocknung auf die Spannungs-Dehnungskurven, die Zugfestigkeit oder die Bruchdehnung festgestellt werden.

Bei Serie T (Folie C) und teilweise auch bei Serie UV wurde gegenüber der Serie N eine geringe Erhöhung der mittleren Bruchdehnung und Bruchspannung gemessen. Der Variationskoeffizient der Bruchdehnung lag bei allen Versuchsserien zwischen 2 bis 7 % und der Variationskoeffizient der Zugfestigkeit betrug zwischen 3 und 11 %. Die gemessenen Veränderungen waren statistisch nicht signifikant (zweiseitiger verteilungsfreier Test nach *Wilcoxon-Mann-Whitney* [Sachs 1997], Signifikanzniveau $\alpha_p = 5$ %). Da die gemittelten Spannungs-Dehnungskurven zu dem Zeitpunkt enden, an dem der erste Probekörper gerissen ist, liegen die maximalen Spannungen in Bild 7-6 unterhalb der in Tabelle 7-1 angegebenen Werte der Zugfestigkeiten.

7.4 Einfluss von Feuchtigkeit auf die Zugeigenschaften der PVB-Folien

Die zweitägige Lagerung der Probekörper der Folie C in Leitungswasser (Serie F) führte zu einem starken Verlust der Steifigkeit und der Zugfestigkeit der Folienproben. Der Mittelwert der Zugfestigkeit der Serie F sank gegenüber der mittleren Zugfestigkeit der Serie N um 85 %. Die Bruchdehnung hatte sich dagegen im Mittel um ca. 15 % erhöht. Nach zweiwöchiger Lagerung der Probekörper unter Laborbedingungen war die während der Wasserlagerung aufgenommene Feuchtigkeit wieder aus den Proben entwichen und die Folienrpoben der Serie FT besaßen ungefähr wieder die gleichen Eigenschaften wie die der Serie N. Der Verlauf der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven der Probekörper der Serie N, F und FT ist in Bild 7-7 wiedergegeben.

Der Versuch zeigt deutlich den großen Einfluss von Feuchtigkeit auf die Materialeigenschaften der PVB-Folie. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Feuchtigkeitsaufnahme von PVB-Folien reversibel ist und, zumindest bei kurzzeitiger Lagerung in Leitungswasser, zu keiner bleibenden Schädigung des Kunststoffes führt.

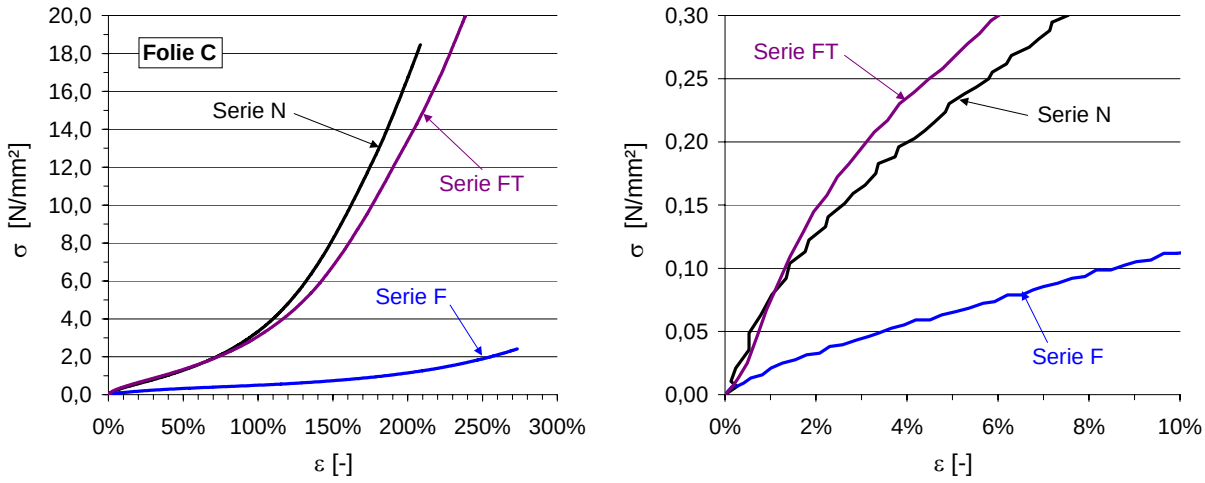


Bild 7-7: Mittlere Spannungs-Dehnungskurven aus je 5 Zugversuchen mit Folie C, Serie N, F und FT (links), mit Ausschnitt der Kurven für $\varepsilon \leq 10$ % (rechts)

7.5 Vergleich von E-Modul und Schubmodul

7.5.1 Ermittlung des E-Moduls aus den Zugversuchen

Die Ergebnisse der Zugversuche haben gezeigt, dass die künstliche Bewitterung durch Bestrahlung und Trocknung zu keiner signifikanten Änderung des Steifigkeitsverhaltens der PVB-Folien geführt hatte. Im Gegensatz zu den Kriechversuchen in Kapitel 5.4.1.2, bei denen eine geringe Erhöhung des Schubmoduls der Folie gemessen wurde, hatte die zeitlich begrenzte Alterung der Folien keinen messbaren Einfluss auf deren E-Modul. Ein Vergleich zwischen den beiden Versuchsarten ist jedoch nicht möglich. Die sehr geringe Dehnung der Folie bei den Biegeversuchen ($\varepsilon < 0{,}05$ %) liegt unterhalb des Bereiches, welcher mit den Zugversuchen an den weichen Proben aus PVB untersucht werden konnte.

Bild 7-8 (links) zeigt den zeitlichen Verlauf des aus jeweils fünf Versuchen der Serie N und Serie F (nur Folie C) gemittelten E-Moduls $E(t) = \sigma(t)/\varepsilon(t)$. Die Darstellung erfolgt nur bis zu einer Dehnung von $\varepsilon = 10$ % (ca. 8 Sekunden nach Versuchsbeginn), bis zur welcher bei PVB-Folien mit Weichmacher linear-viskoelastisches Materialverhalten angenommen werden kann [Bennison 1998], [Duser 1999].

Der Quotient F/N des mittleren E-Moduls der Serie F zum mittleren E-Modul der Serie N liegt zwischen 0,25 und 0,35 (Maximalwert) (Bild 7-8 rechts). Die Wasserlagerung der Folie hat somit bei Dehnungen zwischen 1 und 10 % zu einem Verlust der Steifigkeit um bis zu 75 % geführt.

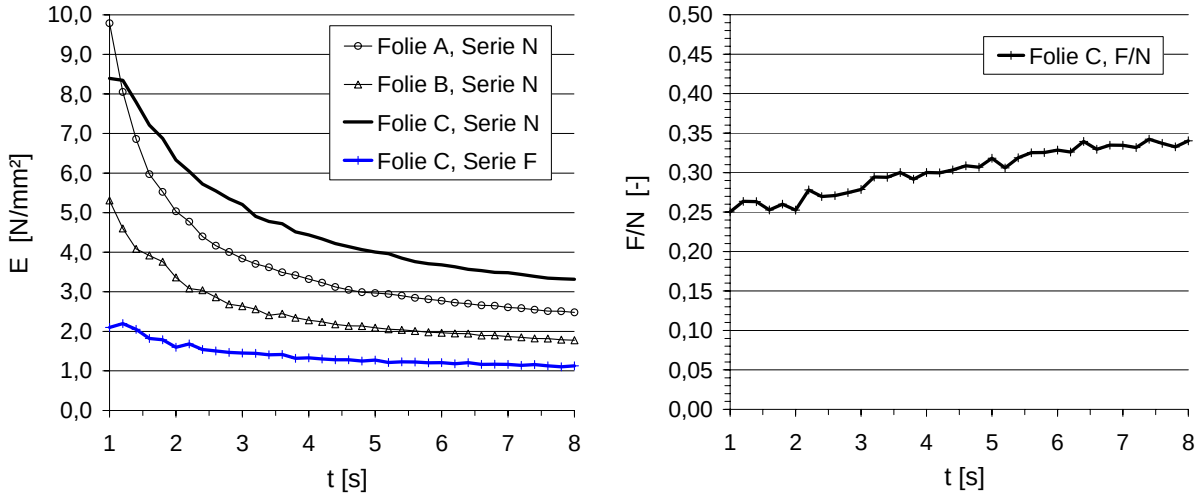


Bild 7-8: Zeitlicher Verlauf des mittleren E-Moduls der Serien N und F (nur Folie C) bis $\varepsilon \approx 10$ % (links), Verhältnis F/N zwischen den E-Moduln der Serie F und N der Folie C (rechts)

7.5.2 Vergleich des E-Moduls mit dem Schubmodul aus Biegeversuchen

Im Folgenden wird der mittlere E-Modul E(t) der Zugversuche mit den Folien A, B und C mit dem zeitabhängigen Schubmodul G(t) der PVB-Folie aus weggesteuerten Biegeversuchen an VSG-Balken verglichen. Für diesen Vergleich stand je Folie nur ein Biegeversuch (Serie N) bei einer Temperatur von 25 °C zur Verfügung. Die VSG-Balken wurden mit der in Bild 5.1 und 5.2 in Kapitel 5.2.1 dargestellten Versuchseinrichtung mit konstant zunehmender Durch-

biegung belastet (Versuchsdauer 3,2 bis 4,0 Sekunden). Aufgrund der zeitabhängigen Abnahme des Schubmoduls führt dies zu einer leicht überproportionalen Zunahme der Scherrate $d\gamma/dt$, welche hier jedoch vernachlässigt wird.

Um beide Versuche, mit ihren unterschiedlich großen Dehnraten vergleichen zu können, wird angenommen, dass sich die Folie bis zu einer Dehnung von 10 % linear-viskoelastisch verhält. In diesem Fall stehen beide Module miteinander nach Gleichung (2.3), Kapitel 2.1.5 in Beziehung (Korrespondenzprinzip), welche besagt, dass der E-Modul je nach Querdehnzahl ($0{,}3 < \mu < 0{,}5$) 2,6 bis 3-mal so hoch ist wie der Schubmodul.

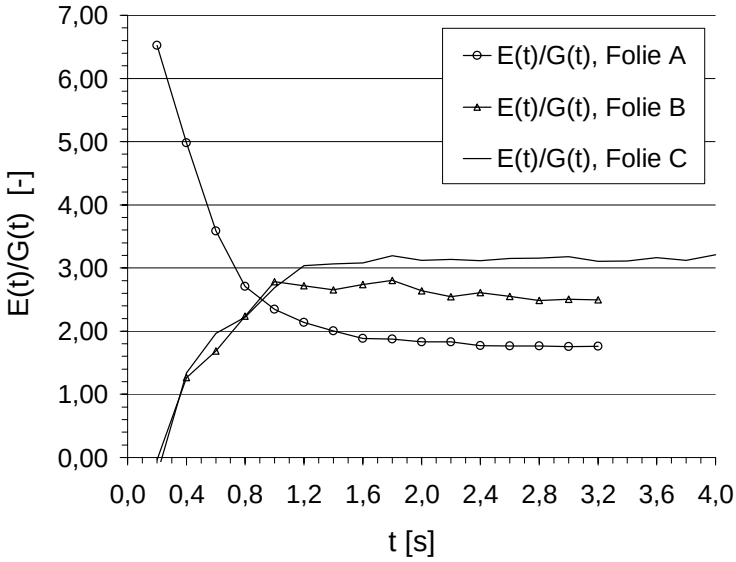


Bild 7-9: Vergleich des E-Moduls E(t) aus Zugversuchen mit dem Schubmodul G(t) aus weggesteuerten Biegeversuchen, ungealterte Folie A, B, C (Serie N), T = 25 °C

Bild 7-9 zeigt das Ergebnis aus dem Vergleich der beiden Moduln. Ab einer Zeit von 1,0 bis 1,6 s nach Belastungsbeginn stellte sich bei allen Folien ein konstantes Verhältnis zwischen E-Modul und Schubmodul ein. Dies lag zwischen 1,8 und 3,1 und damit größenordnungsgemäß im Bereich der nach dem Korrespondenzprinzip zu erwartenden Faktoren.

Einen Nachweis der Gültigkeit des Korrespondenzprinzips konnte mit den wenigen und zeitlich begrenzten Versuchen nicht erbracht werden. Dazu sind größere Versuchsreihen bei verschiedenen Temperaturen erforderlich. Die Ergebnisse der Versuche weisen jedoch darauf hin, dass die Annahme linear-viskoelastischen Materialverhaltens näherungsweise bis zu einer Dehnung der Folie von $\varepsilon = 5$ % zulässig ist.

Zumindest für kurzzeitige Belastungen zwischen 1 und 4 Sekunden kann aus Zugversuchen mit der hier verwendeten Versuchseinrichtung der Schubmodul der Zwischenfolie abgeschätzt werden (siehe Kapitel 2.1.6). Dies ist jedoch im Bereich der Raumtemperatur mit höheren Streuungen und Unsicherheiten verbunden, als eine Bestimmung des Schubmoduls aus Biegeversuchen an VSG-Balken.

8 Zeit- und temperaturabhängiger Verlauf des Schubmoduls

8.1 Einführung

Mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Langzeitversuchen (Kriechversuche) wurden aus den gemessenen Verbundfaktoren V_ε Zeitverläufe des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls G(t, T) ermittelt. Ziel dieser Versuche war es, eine Formel für G(t, T) zu entwickeln, welche mit ausreichender Sicherheit für die Bemessung von biegebeanspruchten VSG-Scheiben verwendet werden kann. Um eine für den gesamten experimentellen Bereich (Temperatur zwischen 0 und 55 °C und Belastungsdauer zwischen 3 s und 4 Wochen) verwendbare Funktion zu erhalten, wurde das in Kapitel 2.1.8 beschriebene Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung ("ZTV") verwendet. Da es sich bei PVB-Folien nicht um einen thermorheologisch einfachen Kunststoff handelt, wurde das Prinzip der ZTV dahingehend modifiziert, dass für Temperaturen oberhalb und unterhalb des Glasübergangsbereichs von PVB unterschiedliche Konstanten c_1 und c_2 für die Ermittlung des Verschiebungsfaktors $a_T(T)$ nach Gleichung (2.12) verwendet wurden. Die Trennung zwischen beiden Temperaturbereichen erfolgt hier versuchsbedingt bei 20 °C (Referenztemperatur T_0). Genaugenommen gelten die Konstanten der Zeit-Temperaturverschiebung nur für den experimentellen Bereich der Kriechversuche, welcher aber einen Großteil des baupraktischen Bereichs abdeckt.

8.2 Festlegung des Fraktilwerts des Schubmoduls

8.2.1 Grundlagen

Bei der Bemessung von monolithischen Glasscheiben ist die Streuung der Einwirkung bzw. der Belastung und die Streuung des Widerstandes bzw. der Biegefestigkeit des Glases zu berücksichtigen. Dies erfolgt in der Regel durch Festlegung von Fraktilwerten und Sicherheitsbeiwerten oder zulässigen Glasspannungen. Die Biegefestigkeit σ_{bB} hängt von der Belastungsdauer, den Umweltbedingungen, der Oberflächenbeschaffenheit des Glases und der Größe der zugbeanspruchten Fläche ab. Sie ist somit kein fester Materialkennwert, sondern wird über einen zulässigen Wert der Bruchwahrscheinlichkeit $F_{Bruch}(\sigma_{bB} \leq \sigma_{bB,c})$ definiert.

Kann ein Bruch der Glasscheibe zu einer Gefährdung von Menschenleben oder zu beachtlichen wirtschaftlichen Folgen führen, so ist die Versagenswahrscheinlichkeit auf 10^{-6} zu begrenzen. Nach [Blank 1993] kann zur Einhaltung dieser Bedingung eine Bruchwahrscheinlichkeit von Kalk-Natronsilikatglas von $F_{Bruch}\ (\sigma_{bB} \leq \sigma_{bB,c}) = 1{,}5*10^{-3}$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha_p = 5\ \%$ akzeptiert werden, wenn die Biegefestigkeit an stark vorgeschädigten kleinformatigen Scheiben ermittelt wird. Die zugehörige Biegefestigkeit beträgt bei dieser Bruchwahrscheinlichkeit $\sigma_{bB,c} = 24{,}7\ N/mm^2$. Diesem Wert liegt eine *Weibull-Verteilung* der Biegefestigkeit σ_{bB} mit der Wahrscheinlichkeitsdichte nach Gleichung (8.1) zugrunde [Blank 1993].

$$f(\sigma_{bB}) = \left(\frac{\beta}{\sigma_{bB}}\right)\left(\frac{\sigma_{bB}}{\theta}\right)^{\beta} e^{-(\sigma_{bB}/\theta)^{\beta}} \tag{8.1}$$

β: Formparameter (Steigung) = 25
θ: Skalenparameter = 32

Gegenüber der Bemessung von monolithischen Glasscheiben muss beim Ansatz der Verbundwirkung der PVB-Folie zur Bemessung von VSG-Scheiben neben der Streuung der einwirkenden Lasten und der Biegefestigkeit des Glases auch die Streuung des Schubmoduls berücksichtigt werden. Einerseits wird die Streuung des Schubmoduls durch Schwankungen der Materialsteifigkeit verursacht, welche von Messungenauigkeiten bei der Ermittlung des Schubmoduls überlagert werden. Diese Unsicherheit wird hier durch Wahl eines geeigneten Fraktilwerts erfasst. Andererseits bestehen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Einwirkungsdauer der Lasten und der Umgebungstemperatur während der Belastungszeit. Zur Berücksichtigung dieser Unsicherheiten sind auf der sicheren Seite liegende Annahmen der Einwirkungsdauern und der klimatischen Bedingungen zu treffen. Für die Bemessung von VSG-Scheiben unter Schnee- und Windbelastung in Deutschland wurde eine entsprechende Vorgehensweise in [Wellershoff 2007] vorgeschlagen.

Die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit von einzelnen Glasscheiben in Verbundsicherheitsglas hängt von der Anzahl der Glasschichten und dem Gefährdungspotential bei Bruch aller Scheiben ab. Im Fall einer zweischichtigen Verbundglasscheibe mit gleichen Scheibendicken muss beim Bruch einer Scheibe die intakte Glasscheibe die doppelte Belastung tragen. Ohne Verbundfolie wird diese Scheibe mit hoher Wahrscheinlichkeit auch bei hoher Biegefestigkeit des Glases brechen. Die Versagenswahrscheinlichkeit einer Einzelscheibe ist in diesem Fall - wie bei monolithischem Glas - auf 10^{-6} ($F_{Bruch} = 1{,}5*10^{-3}$) zu begrenzen. Durch die Verstärkung der intakten Glasscheibe mit einer splitterbindenden PVB-Folie wird je nach Vorspanngrad des Glases und Lagerung der Scheiben eine mehr oder weniger große Steigerung der Tragfähigkeit erreicht (Resttragfähigkeit). In diesem Fall könnte, zumindest bei allseitig liniengelagerter Vertikalverglasung unter Windbelastung, die akzeptierte Bruchwahrscheinlichkeit einer Einzelscheibe erhöht werden.

Zur Bestimmung einer charakteristischen Materialfestigkeit wird in der Regel die 5-% Fraktile der zugrundeliegenden statistischen Verteilung gewählt, für Steifigkeiten von Materialien dagegen die 50-%-Fraktile [DIN EN 1990]. Beim Schubmodul der PVB-Folie handelt es sich um eine Steifigkeit. Da diese jedoch die Biegefestigkeit von Verbundsicherheitsglas beeinflusst wird deshalb im Folgenden untersucht, ob die 50-%-Fraktile des Schubmoduls für eine sichere Bemessung von biegebeanspruchten VSG-Elementen ausreichend ist.

Als ausreichend wird der Fraktilwert $G_{x\%}$ des Schubmoduls angesehen, welche bei gegebener Bemessungslast q_d und bekannter Lastdauer t und Temperatur T zu keiner höheren Bruchwahrscheinlichkeit als $F_{Bruch} = 1{,}5*10^{-3}$ führt.

8.2.2 Streuung des Schubmoduls bei Biegeversuchen

In Bild 8-1 ist der Variationskoeffizient VK des Schubmoduls aus den Biegeversuchen (jeweils 5 Probeköper je Versuch und Folie) dargestellt. Für die Erstellung der Datenpunkte wurde die Streuung des Schubmoduls aller drei Folien und aller Versuchstemperaturen für Belastungszeiten von 3, 10, 60, 300 Sekunden, 2 Stunden, 1 Tag, 1 Woche und 4 Wochen (nur 0 °C) ausgewertet. Erwartungsgemäß steigt die Streuung des Schubmoduls bei den Biegeversuchen mit zunehmender Sensitivität S_ε an (siehe Bild 3-4, Kapitel 3.2.2). Der Variationskoeffizient ist bei Schubmoduln zwischen 0,7 bis 2,5 N/mm² am geringsten (VK < 10 %) und steigt - abgesehen von wenigen Ausreißern bei tiefen Temperaturen - bei niedrigen und hohen Schubmodulwerten auf 20 bis 35 % an. Die Streuung des Schubmoduls war somit ein Vielfaches der Streuung der Biegesteifigkeit bzw. des Verbundfaktors, welche maximal 2 % betrug (Bild 5-5, Kapitel 5.3.2).

Zum Vergleich der Streuungen von Biegeversuchen und Scherversuchen sind in Bild 8-1 die Variationskoeffizienten aus Messungen an Scherproben von [Ensslen 2005] und [Schuler 2003] eingezeichnet. Trotz der theoretisch sehr geringeren Sensitivität von Scherversuchen, sind die Streuungen bei den Scherversuchen teilweise höher als bei den Biegeversuchen. Dies lässt auf höhere Messungenauigkeiten bei der Messung von kleinen Scherverformungen mittels Wegaufnehmer im Gegensatz zur Messung der Biegesteifigkeit mittels DMS schließen.

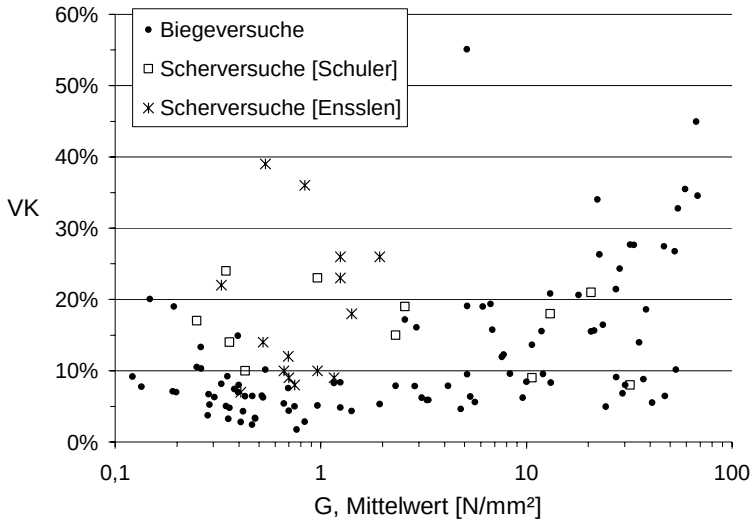


Bild 8-1: Variationskoeffizient VK der Biegeversuche in Abhängigkeit des Schubmoduls (Folie A, B, C) und Vergleich mit dem Variationskoeffizient aus Scherversuchen nach [Ensslen 2005] ("Teil A") und [Schuler 2003] ("Serie NEU", "Serie UV")

Die statistische Verteilung des Schubmoduls der PVB-Folie ist nicht bekannt. Bei geringen Streuungen bis VK = 0,2 kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Bei höheren Streuungen ist eine logarithmische Normalverteilung des Schubmoduls möglicherweise zutreffender und führt i. d. R zu etwas günstigeren (d. h. höheren) Fraktilwerten von Baustoffeigenschaften [Fischer 1995].

Für die weiteren Untersuchungen wird für die Streuung des Schubmoduls in auf Biegung beanspruchten VSG-Scheiben ein Variationskoeffizient von 20 bis 30 % angenommen. Diese Werte gelten nur für die Streuung des Schubmoduls der PVB-Folie aus einer Produktionscharge. Unterschiede zwischen verschiedenen Folienprodukten eines oder mehrer Hersteller sind darin nicht enthalten.

8.2.3 Einfluss des Schubmoduls auf die Spannung in VSG-Scheiben

In Bild 8-2 ist der Einfluss einer Reduktion des Schubmoduls G_0 (Referenzwert oder Mittelwert einer Stichprobe) um 50 % auf die maximale Biegespannung in acht verschiedenen VSG-Elementen unterschiedlicher Schlankheit $\lambda = L/(2h)$ und mit unterschiedlichen Scheibendicken (symmetrischer Scheibenaufbau $h_1 = h_2 = h$) dargestellt.

Die Reduktion des Schubmoduls führt unabhängig vom Scheibenformat zu einer maximalen Erhöhung der Spannung um 19 %, wenn die Foliendicke $h_F = 1{,}52$ mm beträgt. Der Schubmodul G_0, bei dem dieser Grenzwert erreicht wird, wird im Folgenden als $G_{0,crit}$ bezeichnet. Er hängt von der Steifigkeit des VSG-Elements und somit von der Verbundwirkung der Folie ab. Je dünner die Glasscheiben sind, um so mehr erhöht sich die Spannung. Wird in dünnen VSG-Scheiben (h = 4 mm, $h_F = 1{,}52$ mm) der Schubmodul G_0 statt um 50 % um 20 % bzw. 90 % reduziert, so erhöhen sich die Spannungen unabhängig vom Scheibenformat um maximal 6 % bzw. 70 %. Bei dünneren Folien verringern sich diese Grenzwerte.

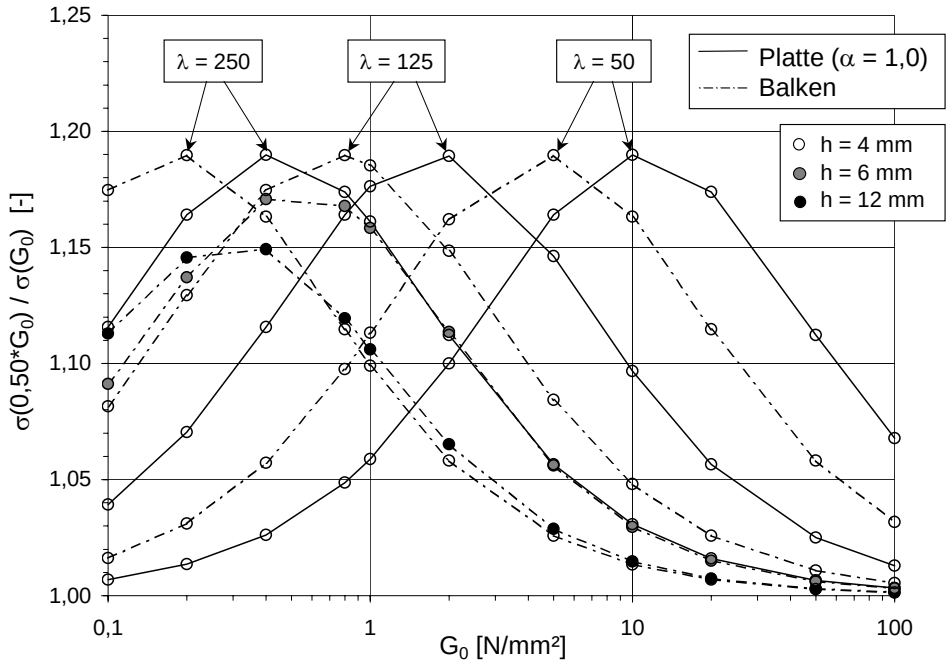


Bild 8-2: Einfluss einer Reduktion des Schubmoduls G_0 um 50 % auf die maximale Biegespannung in VSG-Balken und VSG-Platten ($\alpha = 1{,}0$) , $h_F = 1{,}52$ mm

8.2.4 Bruchwahrscheinlichkeit von VSG unter Berücksichtigung der Streuung des Schubmoduls

Die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit kann unabhängig von der Belastungshöhe durchgeführt werden, wenn die zum Fraktilwert $G_{x\%}$ des Schubmoduls gehörige Zugspannung $\sigma(G_{x\%})$ in der VSG-Scheibe bei einer beliebigen aber konstanten Bemessungslast der Biegezugfestigkeit 24,7 N/mm² des Glases bei F_{Bruch} entspricht. Die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit wurde bei acht unterschiedlichen VSG-Elementen mit den Schlankheiten und Scheibendicken nach Bild 8-2 durchgeführt. Es wurde angenommen, dass die Größe der Scheiben, die Verteilung der Biegezugspannungen, die Lastdauer und die Umweltbedingungen die Weibull-Verteilung der Biegezugfestigkeit von Kalk-Natronsilikatglas nach Gleichung (8.1) nicht beeinflussen.

Die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit $F_{Bruch}(\sigma_{bB}(G))$ einer Glasscheibe in Abhängigkeit der statistischen Verteilung des Schubmoduls erfolgte numerisch nach Gleichung (8.2). Dazu wurde die angenommene statistische Verteilung des Schubmoduls zwischen $0{,}05*G_{0,crit}$ und $2{,}00*G_{0,crit}$ in 40 Klassen i der Klassenbreite $0{,}05*G_{0,crit}$ unterteilt und dann die Wahrscheinlichkeiten des Schubmoduls und der Biegespannung in jeder Klasse miteinander multipliziert und anschließend aufsummiert.

Es ist ausreichend die Bruchwahrscheinlichkeit in einer VSG-Scheibe nur jeweils bei $G_{0,crit}$ zu ermitteln, da bei anderen Schubmodulwerten der Einfluss der Streuung des Moduls auf die Biegezugspannung in der VSG-Scheibe geringer ist.

$$F_{Bruch}\left(\sigma_{bB}\left(G\right)\right) = \sum_{i=1}^{40} p\left(\sigma_{bB}\left(G_i\right)\right) \cdot p\left(G_i\right) \tag{8.2}$$

mit

$p\left(G_i\right)$: Wahrscheinlichkeit von $G_i - 0{,}025G_{0,crit} < G \leq G_i + 0{,}025G_{0,crit}$

$p\left(\sigma_{bB}\left(G_i\right)\right)$: Wahrscheinlichkeit von $\sigma_{bB}\,(G_i - 0{,}025G_{0,crit}) < \sigma_{bB} \leq \sigma_{bB}\,(G_i + 0{,}025G_{0,crit})$

Das Ergebnis der Berechnung für die 50-%-Fraktile des Schubmoduls ist in Tabelle 8-1 für eine Normalverteilung und eine logarithmischen Normalverteilung des Schubmoduls wiedergegeben.

Die Berechnung zeigte, dass die Bruchwahrscheinlichkeit in VSG-Scheiben mit symmetrischem Scheibenaufbau nur von der Dicke h der Glasscheibe und der Dicke h_F der Verbundfolie abhängt. Je dünner die Glasscheiben und je dicker die Folie ist, um so höher ist die Bruchwahrscheinlichkeit. Die Höhe der Bruchwahrscheinlichkeit hängt maßgeblich von der zugrundeliegenden statistischen Verteilung des Schubmoduls ab, welche sich aus Biegeversuchen nicht bestimmen lässt. Bis zu einem Variationskoeffizient von VK = 20 % ist die Bruchwahrscheinlichkeit bei Annahme einer 50-%-Fraktile des Schubmoduls ausreichend gering ($F_{Bruch}(\sigma_{bB}(G)) \leq 1{,}6*10^{-3}$ ... $2{,}7*10^{-3}$). Die Bruchwahrscheinlichkeit bei Annahme einer Normalverteilung des Schubmoduls ist zwar höher als die akzeptierte Bruchwahrscheinlichkeit von $1{,}5*10^{-3}$, aufgrund der Sicherheitsreserven in Verbundsicherheitsglas kann - zumindest bei allseitig gelagerten Vertikalverglasungen - die Biegebemessung mit der

50-%-Fraktile des Schubmoduls erfolgen. Ein Sicherheitsbeiwert zur Abminderung des Schubmoduls ist nicht erforderlich.

Tabelle 8-1: 50-%-Fraktile des Schubmoduls: Bruchwahrscheinlichkeit $F_{Bruch}(\sigma_{bB}(G))$ von VSG-Elementen bei Annahme einer Weibull-Verteilung der Biegezugfestigkeit σ_{bB} von Kalk-Natronsilikatglas nach [Blank 1993]

	G normalverteilt		G log.-normalverteilt	
VSG-Scheibe, h_F = 1,52 mm, symmetrisch ($h = h_1 = h_2$)	VK = 20 %	VK = 30 %	VK = 20 %	VK = 30 %
h = 4 mm Balken, L = 400, 1000 , 2000 mm Platte (α = 1), L = 400, 1000 , 2000 mm	$2{,}7*10^{-3}$	$9{,}8*10^{-3}$	$1{,}6*10^{-3}$	$4{,}9*10^{-3}$
Balken h = 6 mm, L = 1500 mm	$2{,}0*10^{-3}$	$7{,}9*10^{-3}$	$1{,}1*10^{-3}$	$3{,}4*10^{-3}$
Balken h = 12 mm, L = 3000 mm	$1{,}3*10^{-3}$	$5{,}7*10^{-3}$	$0{,}9*10^{-3}$	$2{,}1*10^{-3}$

8.2.5 Alternative Festlegung des Fraktilwerts des Schubmoduls bei Biegeversuchen

Die Streuung der gemessenen Biegesteifigkeit war bei den verwendeten Probekörpern (h = 6 mm) sehr gering (Bild 5-5, Kapitel 5.3.2). Auch bei dünneren VSG-Scheiben (h = 4 mm) (vgl. Bild 8-2) werden sich theoretisch ungefähr gleich hohe Variationskoeffizienten des Verbundfaktors V_ε von maximal VK = 2 % ergeben. Dieser Koeffizient ist im Vergleich zum Variationskoeffizienten der einwirkenden Lasten (Schnee, Wind) sehr gering und entspricht in etwa dem Variationskoeffizienten des E-Moduls von Baustahl (VK = 3 %) [Haldimann 2002]. Gemäß Gleichung (8.3) kann die Beanspruchung einer VSG-Scheibe als ein Produkt aus der Belastung q und einem schubmodulabhängigen Korrekturfaktor B(G) dargestellt werden. In diesem Fall ermittelt sich der Variationskoeffizient $VK_{q,B}$ der Beanspruchung nach Gleichung (8.4) [Kraus 2004], welcher bei stark streuenden Einwirkungen wie Wind und Schnee näherungsweise gleich dem Variationskoeffizienten VK_q der Einwirkung q ist. Dies bedeutet, dass der Einfluss der Streuung des Schubmoduls in VSG-Scheiben vernachlässigt werden kann, wenn die Einwirkungen gemäß den Bemessungsregeln der jeweilige Norm mit ausreichender Zuverlässigkeit (Fraktile, Sicherheitsfaktor) ermittelt wurden.

$$\sigma(q,G) = \sigma(q) \cdot B(G) \tag{8.3}$$

$$VK_{q,B} = \sqrt{\left(1+VK_q^2\right)\left(1+VK_B^2\right)-1} \tag{8.4}$$

Als Bemessungswert für den zeit- und temperaturabhängigen Schubmodul G einer PVB-Folie wird deshalb die 50-%-Fraktile des Schubmoduls $G_{50\%}$ (ohne Alterung) mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α_p = 5 % vorgeschlagen.

Bei Biegeversuchen mit steifen Zwischenlagen und kurzen Belastungsdauern kann eine direkte Ermittlung von Fraktilwerten des Schubmoduls aufgrund der großen Streuung der einzelnen Schubmodulwerte unter Umständen zu negativen Werten führen. Deshalb wird in dieser Arbeit der Bemessungswert des Schubmoduls $G_{50\%}$ indirekt aus der unteren Grenze der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors V_ε nach Gleichung (8.5) bestimmt (vgl. Kapitel 3.2.1). Voraussetzung für die Verwendung der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors ist, dass gleichartige Probekörper mit möglichst gleichen Einzelscheiben (Dicke h_1, h_2, h_F, E_{Glas}) aus einer Produktionscharge verwendet werden.

$$V_{\varepsilon,50\%} = \overline{V_\varepsilon}\left(1 - k \cdot VK\right) \tag{8.5}$$

VK: Variationskoeffizient der Stichprobe (Normalverteilung)

$\overline{V_\varepsilon}$: Mittelwert der Stichprobe (n = 5 Probekörper)

k: Faktor für untere Grenze des 50-%-Fraktils nach [Fischer 1995],
k = 1,044 für α_p = 5 % und n = 5

8.3 Schubmodul der PVB-Folien drei verschiedener Hersteller

In Bild 8-3 ist der zeitliche Verlauf des Schubmodul der Folie C bei 0, 20 und 40 °C wiedergegeben. Die weiteren zeitlichen Verläufe des Schubmoduls der Folien A, B und C mit den Probekörpern der Serie N (ohne Alterung) bei anderen Versuchstemperaturen befinden sich im Anhang 4. Dargestellt sind die Einzelergebnisse G_1 bis G_5 der jeweils fünf Probekörper je Folie und die 50-%-Fraktile der Schubmoduls $G_{50\%}$, welche aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors V_ε berechnet wurde. Für die Berechnung dieses Schubmoduls wurde der E-Modul der Glasscheiben E_{Glas} aus Tabelle 5-4, Kapitel 5.2.4, der Mittelwert der gemessenen Dicke der Einzelscheiben und der Mittelwert der Gesamtdicke von jeweils fünf Probekörper (Kapitel 5.2.3) verwendet. Gut erkennbar ist der große Einfluss von Temperatur und Belastungsdauer auf die Höhe des Schubmoduls, welcher eine Darstellung im doppeltlogarithmischen Maßstab der beiden Achsen erfordert.

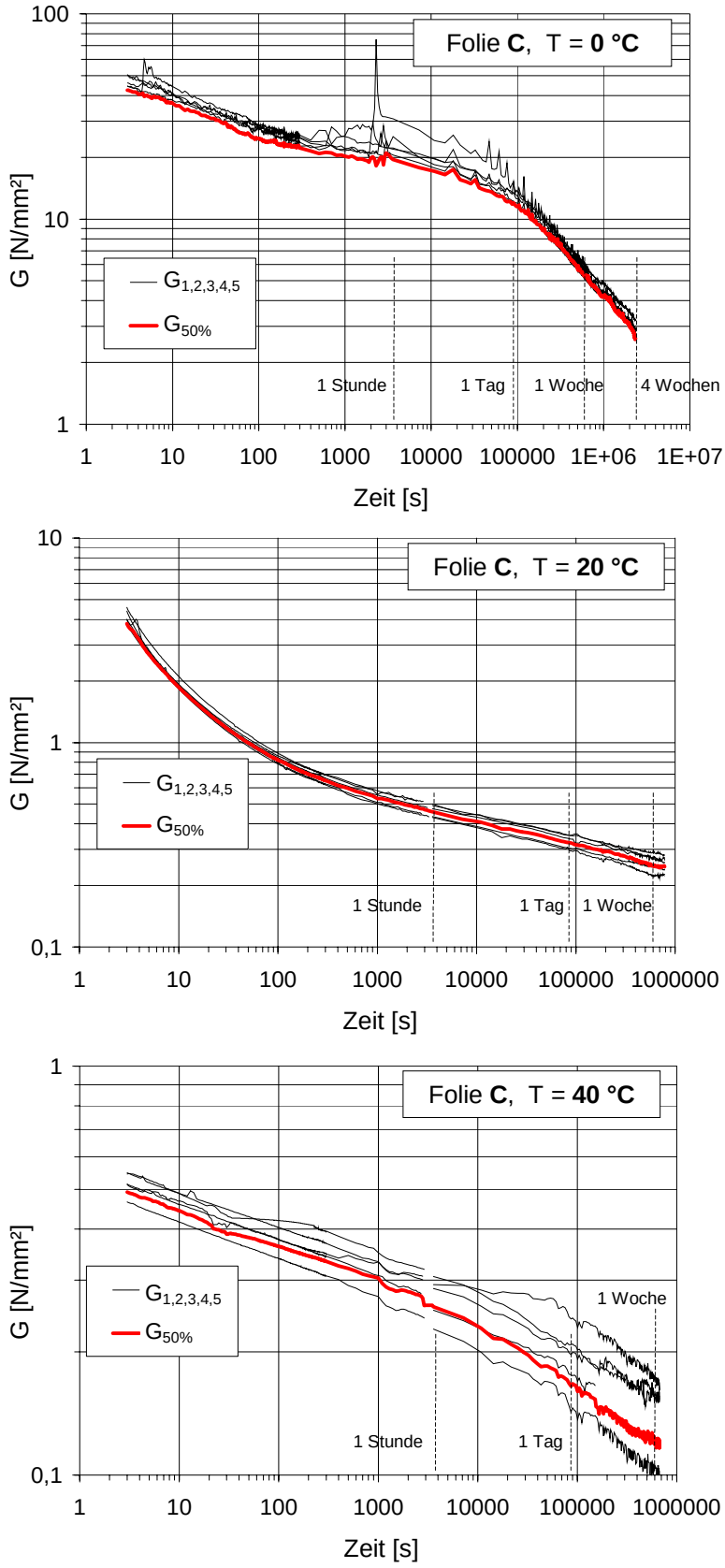


Bild 8-3: Schubmodul G der Folie C (Serie N) bei 0, 20 und 40 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors

In Bild 8-4 ist der zeitliche Verlauf des Schubmoduls $G_{50\%}$ aller drei Folien bei Temperaturen von 0, 10 und 20°C und der Folien B und C bei 40 °C dargestellt. Prinzipiell weisen alle drei PVB-Folien das gleiche zeit- und temperaturabhängige Steifigkeitsverhalten auf. Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Glasübergangs- oder Erweichungsbereich bei allen untersuchten Folien näherungsweise gleich ist. Folie A und C sind bei allen Temperaturen stets steifer als Folie B. Der Schubmodul von Folie C ist maximal doppelt so hoch wie der Schubmodul von Folie B. Der Schubmodul der steifsten Folie A ist maximal dreimal so hoch wie der Schubmodul der weichsten Folie B. Die Unterschiede zwischen den PVB-Folien der drei Hersteller sind signifikant größer als die Streuung der Versuchsergebnisse der Probekörper einer Folie. Bei PVB-Folien handelt es sich demnach nicht um ein einheitliches Bauprodukt, da die Verwendung unterschiedlicher PVB-Folien zu unterschiedlichen Spannungen in VSG-Scheiben führen.

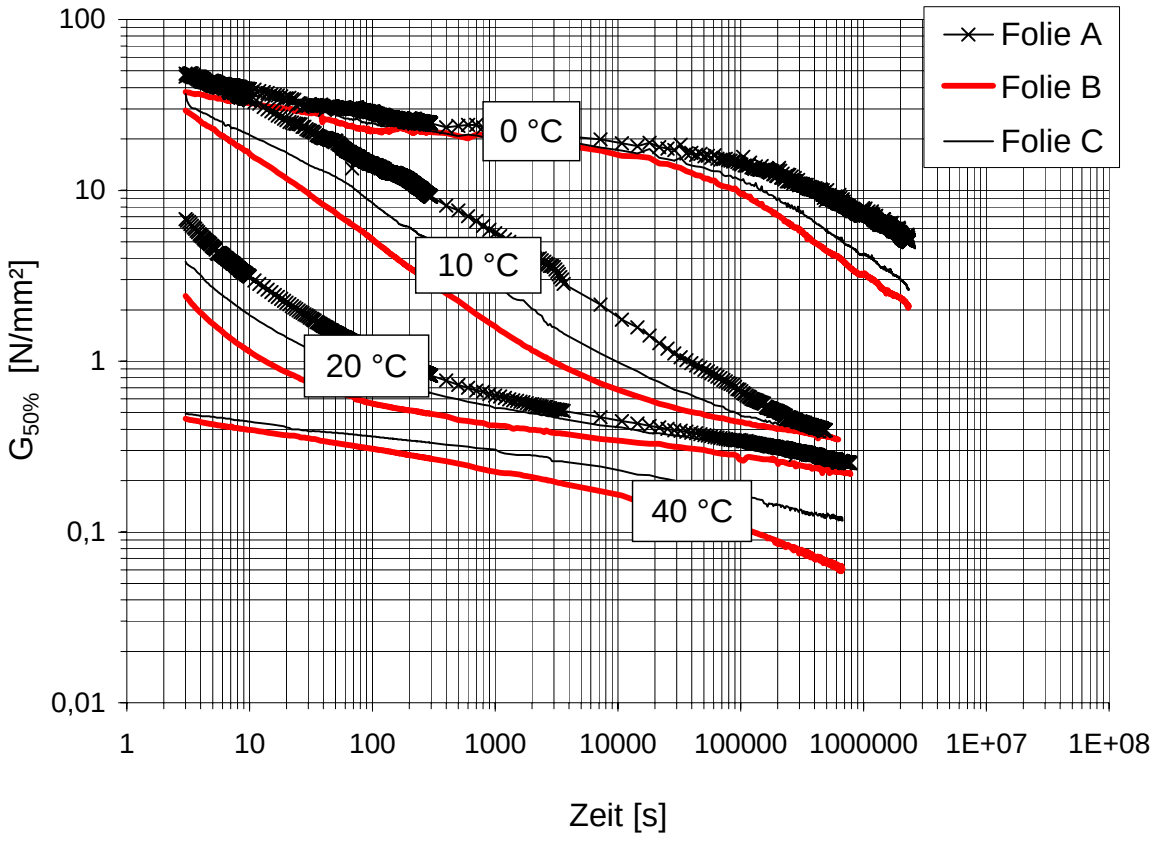


Bild 8-4: Vergleich der Schubmodulwerte $G_{50\%}$ der Folie A, B, und C bei 0, 10 und 20 °C und der Folien B und C bei 40 °C (Serie N)

Maßgebend für die Bemessung von VSG mit den hier untersuchten drei Folien ist demnach der Schubmodul der weichsten Folie B, deren Schubmodul $G_{50\%}$ bei allen untersuchten Temperaturen zwischen 0 und 55 °C in Bild 8-5 dargestellt ist. Aufgrund des geringen Einflusses des Schubmoduls bei tiefen Temperaturen und kurzen Belastungszeiten, kann der Schubmodul oberhalb von 20 N/mm^2 praktisch nicht mehr bestimmt werden. So ergaben sich bei einer Versuchstemperatur von 5 °C bei $t < 300$ s höhere Schubmodulwerte als bei 0° C. Bei Aufheizung von VSG-Scheiben durch Sonnenstrahlung (T = 55 °C) hat die Folie bereits nach wenigen Stunden keine nennenswerte Steifigkeit mehr (G << 0,1 N/mm²).

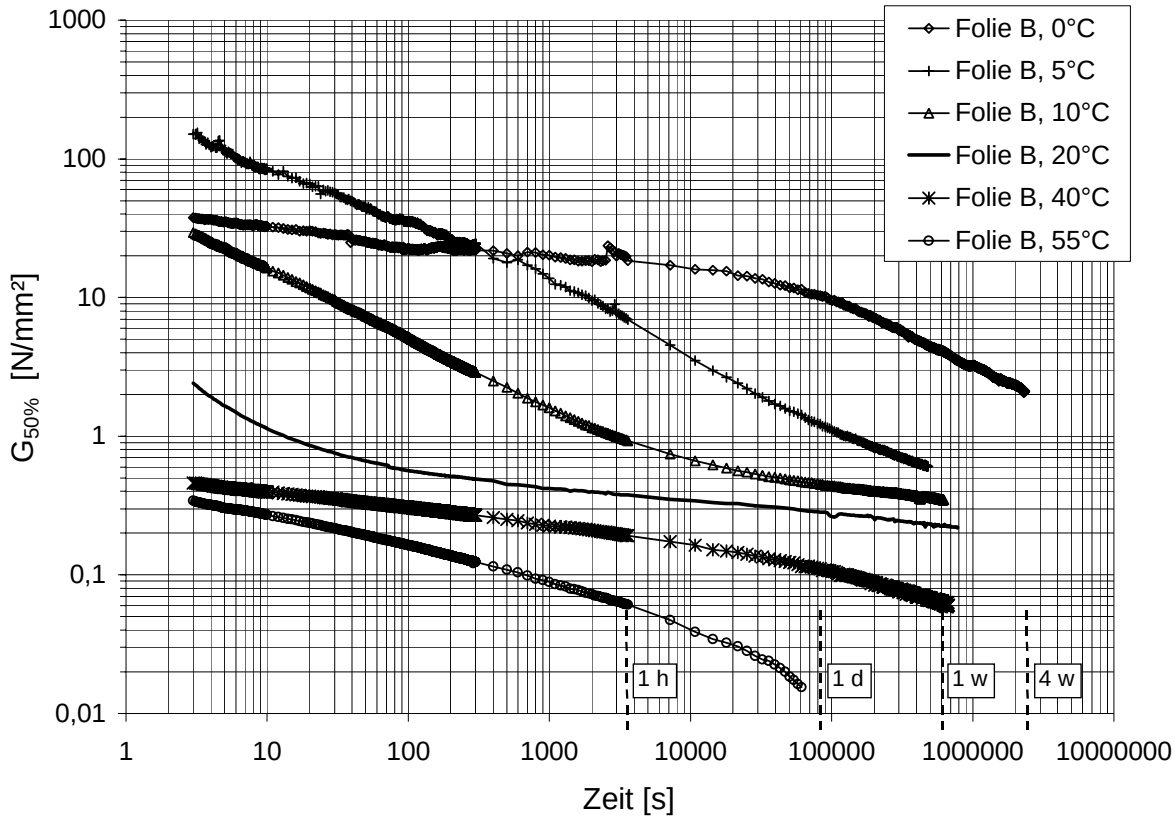


Bild 8-5: Schubmodul $G_{50\%}$ der Folie B bei allen untersuchten Temperaturen

8.4 Vergleich mit dem Schubmodul aus Untersuchungen anderer Autoren

Eine Reihe von Autoren hat mit teils sehr unterschiedlichen Versuchen den zeit- und temperaturabhängigen Schubmodul von ungealterten PVB-Folien untersucht. Die Ergebnisse aus [Duser 1999], [Ensslen 2005], [Kasper 2005], [Schuler 2003] und [Sobek 1998, 2000] werden in Bild 8-6 bis Bild 8-8 mit dem Schubmodul $G_{50\%}$ der Kriechversuche an VSG-Balken mit der Folie B aus Bild 8-5 verglichen. Die Versuchsergebnisse zwischen 0 und 55 °C wurden dafür in drei charakteristische Temperaturbereiche (Temperaturen unterhalb T_G, nahe T_G und oberhalb von T_G) in Bezug auf die Glasübergangstemperatur T_G von PVB unterteilt, welche nach Kapitel 2.1.4 zwischen 12 und 20 °C liegt.

Die vollständigen Informationen zu den Untersuchungen der Autoren können der jeweiligen Literatur entnommen werden. Folgende Aufstellung gibt nur einen knappen Überblick über die wesentlichen Versuchsparameter zur Ermittlung der in den Bild 8-6 bis Bild 8-8 dargestellten Schubmoduln.

- [Bennison 1999], [Duser 1999] (siehe Kapitel 2.1.8), **Dynamische Versuche**:

  Bestimmung des Schubmoduls (Relaxationsmodul) G(t) mit Hilfe des Korrespondenzprinzips aus E'(ω) und E''(ω) aus dynamischen Zugversuchen an PVB-Folien (h_F = 0,76 mm) des Typs *Butacite*. Anwendung des Prinzips der Zeit-Temperatur-Verschiebung im gesamten untersuchten Temperaturbereich zwischen 0 und 70 °C zur Ermittlung einer Masterkurve bei T_0 = 20 °C. Die Anzahl der Versuche und die statistische Auswertung der Daten ist nicht bekannt.

- [Ensslen 2005] (siehe Kapitel 5.6.1), **Scherversuche**:

  Ermittlung des Schubmoduls (Relaxationsmodul) G(t) durch Scherversuche mit konstanter Prüfgeschwindigkeit. Kreisförmige Probekörper aus VSG (4/0,76/4 mm) mit einem Durchmesser von 31 mm mit PVB-Folien des Typs *Trosifol MB*. Der Schubmodul ist der Mittelwert aus Versuchen mit jeweils 4 bis 13 Probeköper (Versuchsserien "A11" bis "A14").

- [Kasper 2005] (siehe Kapitel 3.2.5), **Torsionsversuche**:

  Ermittlung des Schubmoduls (Relaxationsmodul) G(t) durch zeitlich konstante Verdrillung von 360 mm breiten VSG-Balken (8/1,52/8 mm) mit PVB-Folien des Typs *Trosifol MB*. Der Schubmodul bis t = 1800 s ist der untere Wert des Streubereichs aus mindestens 3 Versuchen. Ab t = 3600 s ist bei Temperaturen bis 23 °C der Schubmodul nur ein einzelner Versuchswert.

- [Schuler 2003], **Biegeversuche**:

  Ermittlung des Schubmoduls (Kriechmodul) G(t) durch Biegeversuche mittels konstanter Belastung von vier VSG-Balken unterschiedlicher Stützweite und Scheibendicke mit PVB-Folien des Typs *Trosifol MB* (h_F = 1,52 mm). Der Schubmodul ist eine zeit- und temperaturabhängige Funktion, die stets unterhalb des Mittelwerts von vier Versuchsergebnissen liegt. Als E-Modul der Glasscheiben wurde ein konstanter Wert von E_{Glas} = 70.000 N/mm² angesetzt (keine Kalibrierung der Versuchseinrichtung).

- [Sobek 1998], [Sobek 2000], **Scherversuche**:

  Ermittlung des Schubmoduls (Relaxationsmodul und Kriechmodul) G(t) durch Scherversuche mit konstanten Prüfgeschwindigkeiten oder konstanter Belastung an kreisförmigen Probekörpern aus VSG (10/0,76/10 mm, PVB-Folie vom Typ *Trosifol MB*) mit einem Durchmesser von 30 mm. Je Prüfgeschwindigkeit und Spannungsniveau wurden zwei Versuche durchgeführt. Der Schubmodul aus [Sobek 1998] ist der kleinste gemessene Wert aller Versuche bei der Zeit t. Aus den Messergebnissen der Scherversuche wurden zeit- und temperaturabhängige Funktionen ermittelt, welche den Streubereich aller Versuche nach unten abgrenzen [Sobek 2000].

Bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur, siehe Bild 8-6, gibt es zwischen den Ergebnissen der Autoren erhebliche Unterschiede. Die Verläufe des Schubmoduls aus [Schuler 2003] und insbesondere aus [Duser 1999] liegen bei diesen Temperaturen weit oberhalb der Ergebnisse anderer Autoren. Die Versuchswerte von [Kasper 2005] stimmen bei 0 °C gut mit den Ergebnissen aus den Biegeversuchen des Verfassers überein. Bei 10 °C ergaben sich jedoch bei kurzen und langen Belastungszeiten größere Abweichungen zwischen den Torsionsversuchen und den Biegeversuchen. Die Messergebnisse aus [Sobek 1998] liegen stets unterhalb der Ergebnisse aus den Biegeversuchen. Bei t > 1000 s liegt die in [Sobek 2000] vorgeschlagene Bemessungskurve jedoch mit zunehmender Belastungsdauer oberhalb der Versuchskurve der Folie B bei 10 °C.

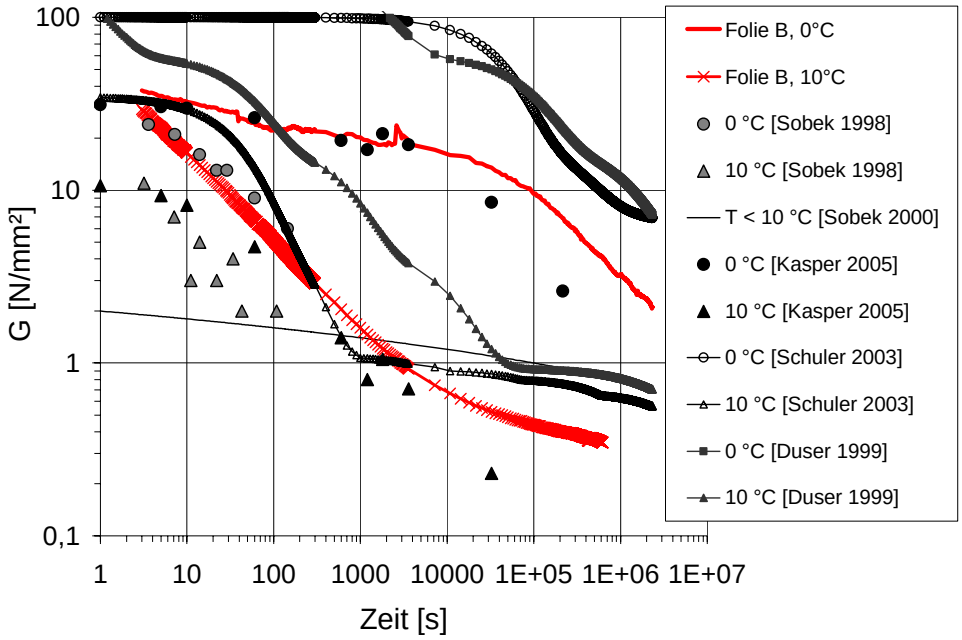


Bild 8-6: Vergleich des Schubmoduls $G_{50\%}$ der Folie B mit den Ergebnissen anderer Autoren im Temperaturbereichen unterhalb T_G (T = 0 und 10 °C)

Bei Temperaturen im Bereich von 20 °C, siehe Bild 8-7, liegen die Messergebnisse der Autoren [Ensslen 2005], [Kasper 2005] und [Sobek 1998] trotz der Temperaturunterschiede in einem großen Zeitbereich nahe beieinander. Die Schubmodulkurven von [Duser 1999] und [Schuler 2003] liegen auch bei 20 °C stets höher als die Ergebnisse der Biegeversuche mit den Probekörpern der Folie B.

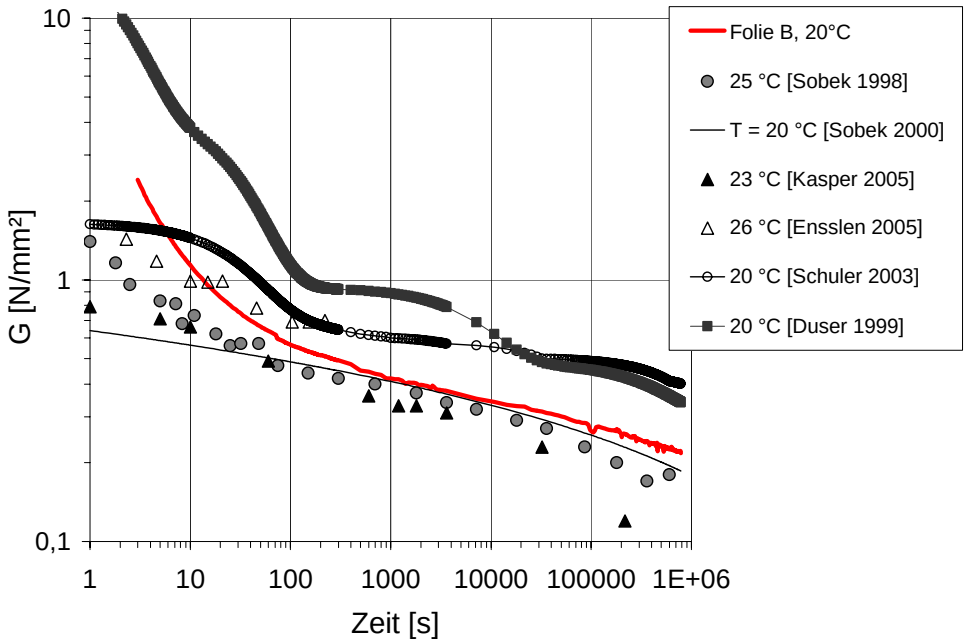


Bild 8-7: Vergleich des Schubmoduls $G_{50\%}$ der Folie B mit den Ergebnissen anderer Autoren im Temperaturbereichen knapp oberhalb T_G (T = 20 bis 26 °C)

Bei hohen Temperaturen, siehe Bild 8-8, stimmen die Ergebnisse aller Autoren bis 100 Sekunden (55 °C) und 1000 Sekunden (40 °C) gut überein. Mit zunehmender Belastungsdauer und bei G < 0,1 N/mm² weichen die Ergebnisse erheblich voneinander ab. Hier nehmen die Schubmodulwerte von [Duser 1999] und [Sobek 2000] sehr schnell ab, so dass nach wenigen Minuten (55 °C) und Stunden (40 °C) praktisch keine Steifigkeit der Folien mehr vorhanden ist.

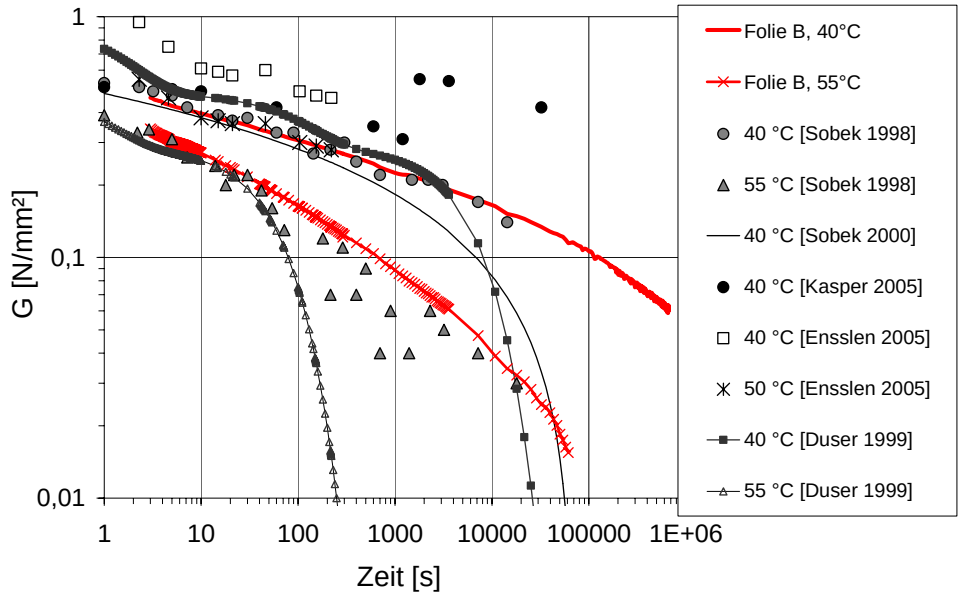


Bild 8-8: Vergleich des Schubmoduls $G_{50\%}$ der Folie B mit den Ergebnissen anderer Autoren im Temperaturbereichen oberhalb von T_G (T = 40 bis 55 °C)

Die Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen der Autoren lassen sich größtenteils mit den sehr unterschiedlichen Versuchsarten (Scherversuche, Biegeversuche und Torsionsversuche an unterschiedlich großen Proben aus VSG, dynamische Versuche an Folienproben) begründen. Da es sich bei den von [Ensslen 2005], [Kasper 2005], [Schuler 2003] und [Sobek 1998] untersuchten Folien des Typs *Trosifol MB* um den gleichen Folientyp wie die hier untersuchte Folie B handelt (nicht jedoch um die gleiche Produktionscharge), können Unterschiede des Folienmaterials als Ursache der unterschiedlichen Messergebnisse ausgeschlossen werde.

Die Ergebnisse der meisten Autoren zeigen, dass Schubmodulwerte größer als 20 bis 30 N/mm² (obere Grenze) und kleiner als 0,05 N/mm² (untere Grenze) in VSG-Elementen nicht mehr mit ausreichender Sicherheit gemessen werden können und deshalb auch nicht verwendet werden sollten. Baupraktisch haben Schubmoduln außerhalb dieser beiden Grenzen zudem keine Bedeutung mehr, da der Einfluss des Schubmoduls auf die Biegesteifigkeit bei üblichen Scheibenformaten bei sehr steifen und sehr weichen Zwischenlagen verschwindend gering ist (vgl. Bild 8-2).

Einige Autoren stellten bei ihren Versuchen fest, dass mit zunehmender Dicke der Folie der Schubmodul abnimmt [Ensslen 2005], [Hooper 1973]. Besonders groß ist der Unterschied des Schubmoduls zwischen Folien der Dicke 0,38 mm und 0,76 mm. Als mögliche Ursache für das steifere Verhalten von dünnen PVB-Folien gibt [Hooper 1973] eine Versteifung des Polymers im Übergangsbereich zwischen Glas und Folie an, welche sich bei dünnen Folien stärker bemerkbar macht als bei dicken Folien. Versuche an Probekörper mit einer Foliendicke von 1,52 mm ergeben demnach Schubmodulwerte, welche auf der sichere Seite liegend auch für dünnere Folien angesetzt werden können.

8.5 Funktion zur Beschreibung des Schubmoduls

Wie in Kapitel 2.1.9 erläutert, ist das Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) bei PVB nicht im gesamten Temperaturbereich mit einem konstanten Faktor $a_T(T)$ anwendbar. Vielmehr werden die Faktoren c_1 und c_2 in Gleichung (2.12), Kapitel 2.1.8 zu Bestimmung von $a_T(T)$ temperaturabhängig oder zumindest über- und unterhalb von T_G unterschiedlich sein. Um dennoch eine einheitliche Funktion für den Schubmodul über- und unterhalb der Glasübergangstemperatur zu finden, wird im Folgenden in Anlehnung an die Arbeit von [Duser 1999] das Prinzip der ZTV in geänderter Form verwendet. Die Änderung besteht darin, dass jeweils unterschiedliche Faktoren c_1 und c_2 für Temperaturen unterhalb von 20 °C (Referenztemperatur) und oberhalb von 20 °C ermittelt werden (Versuchstemperatur nahe T_G). Der sich aus der Anwendung des Prinzips der ZTV ergebende Schubmodul wird im Weiteren als G_{ZTV} bezeichnet.

Aus jeweils zwei Versuchsserien mit Probekörpern der Folie B (T_a = 40 und T_b = 55 °C, T_a = 0 und T_b = 5 °C, T_a = 0 und T_b = 10 °C und T_a = 5 und T_b = 10 °C) wurden - soweit es die Überschneidungen im Wertebereichs des Schubmoduls zwischen diesen Temperaturen und der Referenztemperatur 20 °C zuließen - Faktoren c_1 und c_2 bestimmt. Mit diesen Faktoren wurde abschnittsweise die in Bild 8-9 dargestellte Masterkurve für die Referenztemperatur von T_0 = 20 °C gebildet (siehe auch [Kasper 2005]). Die Masterkurve erstreckt sich über zwölf Zeitdekaden von log(t) = -3 bis log(t) = 9.

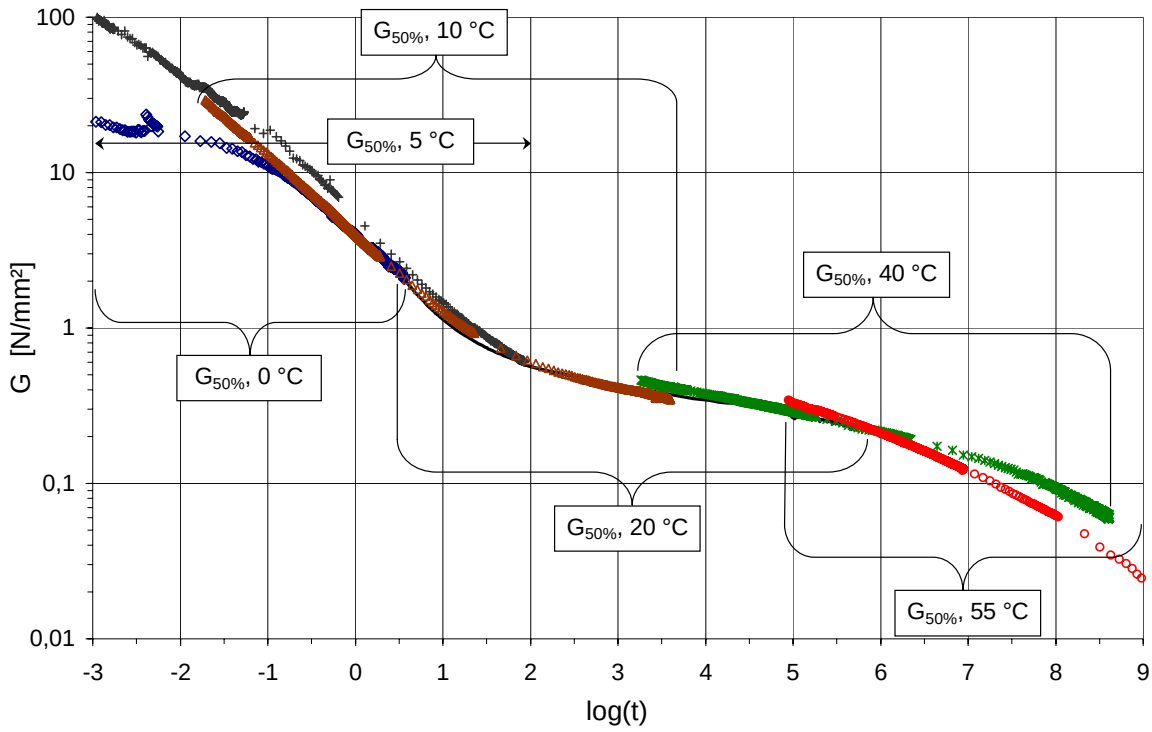


Bild 8-9: Abschnittsweise angepasste Masterkurve der Folie B für die Referenztemperatur T_0 = 20 °C

Die abschnittsweise gültigen Faktoren c_1 und c_2 für die Bildung der Masterfunktion sind in Tabelle 8-2 wiedergegeben. Aus diesen Faktoren wurden auf der sicheren Seite liegende Faktoren $c_{1,ZTV}$ und $c_{2,ZTV}$ jeweils für T > 20 °C und T < 20 °C bestimmt. Auf der "sicheren Seite" liegend bedeutet in diesem Fall, dass sich bei Anwendung des Prinzips der ZTV im experimentellen Bereich zwischen T = 0 und 55 °C und t zwischen 3 Sekunden und 4 Wochen keine höheren Schubmodulwerte ergeben dürfen als gemessen wurden. Um dies zu gewährleisten ist der Betrag des Faktors $a_T(T)$ bei T < 20 °C ausreichend klein (geringe Verschiebung in Richtung der Zeitachse) und bei T > 20 °C ausreichend groß (große Verschiebung in Richtung der Zeitachse) zu wählen.

Tabelle 8-2: Faktoren c_1 und c_2 zur Bildung der Masterfunktion und Faktoren $c_{1,ZTV}$ und $c_{2,ZTV}$ zur Berechnung des Verschiebungsfaktors $a_T(T)$ nach Gleichung (2.12)

T_a	G	T_b	G	c_1	c_2	T	$c_{1,ZTV}$	$c_{2,ZTV}$
0 °C	2,11	5 °C	2,11	11,8	60,4	0 °C	9	51
0 °C	2,11	10 °C	2,11	8,9	50,7	5 °C	9	51
5 °C	2,41	10 °C	2,41	6,6	40,6	10 °C	9	51
5 °C	0,61	10 °C	0,61	12,7	65,0	20 °C		
40 °C	0,46	55 °C	0,34	20,5	167,2	40 °C	23	145
40 °C	0,22	55 °C	0,22	22,2	139,8	55 °C	23	145

Zur Anwendung des Prinzips der ZTV muss die Masterkurve durch eine mathematische Funktion abgebildet werden. Die Approximation der Masterkurve in Bild 8-9 erfolgte mit Hilfe einer Superposition von zwölf Exponentialfunktionen nach Gleichung (8.6). Die Berechnung der einzelnen Parameter G_i und λ_i erfolgt nach der in [Brüller 1976] wiedergegebenen Berechnungsmethode. Nach dieser einfachen Methode wird für jede der 12 Zeitdekaden des experimentellen Bereichs ein Reihenglied i benötigt. Als Relaxationszeit λ_i wird jeweils die obere Grenze der Dekade gewählt. In der Mitte jeder Dekade wird dann an der Stützstelle t_i der Schubmodul $G(t_i)$ der Masterkurve abgelesen. Alle anderen Reihenglieder werden zur Zeit t_i entweder zu 0,0 ($m < i$) oder zu 1,0 ($m > i$) gesetzt. Daraus ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit 12 Gleichungen mit welchen die unbekannten Parameter G_i ermittelt werden können.

$$G_{ZTV} = G_{ZTV}(t,T) = \sum_{i=1}^{12} G_i \exp\left(\frac{-t}{a_T(T)\lambda_i}\right) \tag{8.6}$$

G_i: Elastischer Parameter (Schubmodul in [N/mm²]) des i-ten Elements des Maxwell-Modells (vgl. Tabelle 2-2, Kapitel 2.1.5), siehe Tabelle 8-3

λ_i: Relaxationszeit in [s] des i-ten Elements des Maxwell-Modells, siehe Tabelle 8-3

t: Belastungsdauer mit konstanter Belastung

T: Temperatur der PVB-Folie

$a_T(T)$: Zeit-Verschiebungsfaktor nach Gleichung (2.12), Kapitel 2.1.8 mit $c_{1,ZTV} = 9$ und $c_{2,ZTV} = 51$ für $T < 20$ °C und $c_{1,ZTV} = 23$ und $c_{2,ZTV} = 145$ für $T > 20$ °C

Tabelle 8-3: Parameter G_i und λ_i für G_{ZTV} nach Gleichung (8.6)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G_i	4,786	9,142	5,985	1,195	0,293	0,082	0,077	0,059	0,087	0,084	0,044	0,049
λ_i	0,01	0,1	1	10	100	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

Wie der Vergleich der Kurvenverläufe für G_{ZTV} mit den Versuchsergebnissen $G_{50\%}$ für Folie B in Bild 8-10 zeigt, stimmen die mit Hilfe des Prinzips der Zeit-Temperatur-Verschiebung nach Gleichung (8.6) ermittelten Kurvenverläufe des Schubmoduls G_{ZTV} sehr gut mit den gemessenen Werten $G_{50\%}$ überein. Bei hohen Temperaturen liegt G_{ZTV} bei langen Belastungsdauern unterhalb der Messwerte.

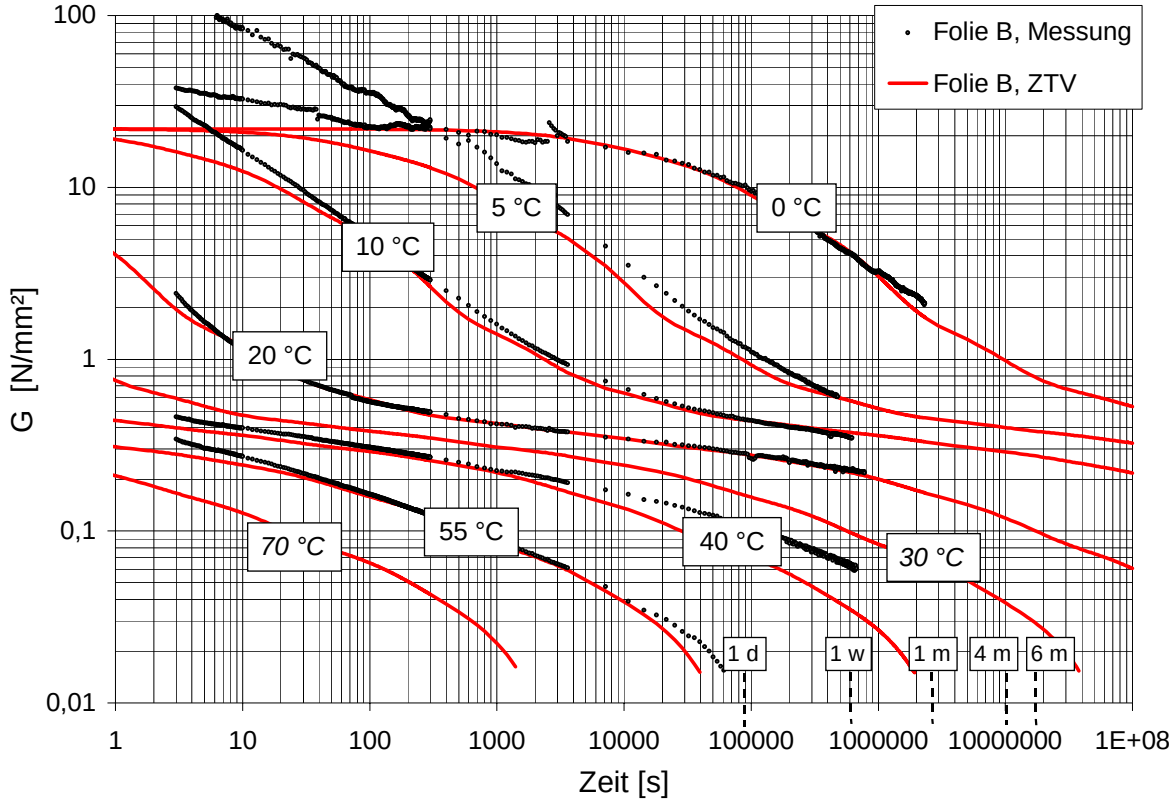


Bild 8-10: Schubmodul G_{ZTV} aus der Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) der Masterkurve bei 20 °C im Vergleich zur Messung des Schubmoduls $G_{50\%}$ von Folie B

8.6 Schubmodul für die Bemessung von VSG

Für die Bemessung von VSG-Scheiben bei Einsatztemperaturen zwischen 0 und 55 °C und einer Belastungsdauer zwischen 3 s und 1 Monat kann die mathematische Funktion für G_{ZTV} nach (8.6) verwendet werden. Zahlenwerte für G_{ZTV} für ausgewählte Temperaturen und Belastungsdauern sind in Tabelle 8-4 angegeben. Die Berechnung von G_{ZTV} für andere Temperaturen ist prinzipiell möglich. Ob sich die daraus ergebenden Schubmoduln auf der sicheren Seite liegen (d. h. ausreichend klein sind) kann ohne weitere Versuche nicht beurteilt werden. Bei Temperaturen bis 70 °C ergibt sich aber eine gute Übereinstimmung mit den in [Sobek 2000] angegebenen Schubmodulkurven (siehe Gleichung (8.7)).

Bei hohen Temperaturen zwischen 20 und 70 °C, die oberhalb der Glasübergangstemperatur von PVB-Folien liegen, kann alternativ zur Verwendung von G_{ZTV} nach Gleichung (8.6) auch der logarithmische Ansatz für den Schubmodul nach Gleichung (8.7) verwendet werden [Sobek 2000]. Der Vorteil dieser Funktion ist, dass sie im Vergleich zum Prinzip der ZTV einfacher zu handhaben ist und bei längeren Belastungsdauern und T > 20 °C auf der sicheren Seite liegende Werte ergibt (d. h. geringerer Schubmodul).

$$G = 0,008\left(100 - T\right) - 0,0011\left(50 + T\right)\log\left(t\right) \tag{8.7}$$

Für lange Belastungszeiten bei Temperaturen bis 20 °C liegen keine Forschungsergebnisse vor. Für die Absicherung der hier vorgeschlagenen Funktion des Schubmoduls G_{ZTV} und insbesondere für die Bemessung von VSG-Scheiben in schneereichen Gebieten sind deshalb

Kriechversuche mit Belastungszeiten von mehreren Monaten notwendig. Der logarithmischen Ansatz nach [Sobek 2000] ist bei tiefen Temperaturen unterhalb von 20 °C nicht geeignet, da er ab einer Belastungsdauer von t = 1000 Sekunden auf der unsicheren Seite liegt.

Bei einer Belastungsdauer von t = 1 s stimmt G_{ZTV} mit einer Abweichung von maximal 10 % mit dem bei den dynamischen Versuchen ermittelten Schubmodul G'(ω) aus Bild 6-2, Kapitel 6.2 überein. Wie dort bereits erläutert, kann mit diesem dynamischen Modul der Schubmodul G(t) abgeschätzt werden, wenn für ω der Kehrwert der Zeit t eingesetzt wird. Nur bei T = 20 °C ergaben sich größere Abweichungen und G'(ω) betrug nur 2,8 N/mm² statt 4,1 N/mm² (G_{ZTV} bei t = 1 s, siehe Tabelle 8-4).

Tabelle 8-4: Schubmodul G_{ZTV} (> 0,05 N/mm²) bei ausgewählten Temperaturen T und Belastungszeiten t aus der Zeit-Temperatur-Verschiebung der Masterkurve für Folie B (kursiv gedruckt = Extrapolation ohne Absicherung durch Versuche)

G_{ZTV} in [N/mm²]	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	30 °C	40 °C	55 °C	70 °C
1 s	*21,9*	*21,8*	*19,0*	*9,12*	*4,06*	*0,75*	*0,44*	*0,31*	*0,21*
3 s	21,9	21,6	16,1	*5,82*	1,95	*0,59*	0,40	0,28	*0,17*
5 s	21,9	21,4	14,6	*4,70*	1,53	*0,53*	0,38	0,26	*0,17*
10 s	21,9	20,9	12,4	*3,12*	1,19	*0,47*	0,36	0,24	*0,13*
60 s	21,8	17,8	6,20	*1,23*	0,64	*0,40*	0,30	0,18	*0,07*
120 s	21,8	15,8	4,67	*0,92*	0,56	*0,38*	0,29	0,15	*0,06*
300 s	21,6	13,0	2,64	*0,68*	0,47	*0,35*	0,26	0,12	
600 s	21,4	10,5	1,71	*0,59*	0,44	*0,32*	0,24	0,10	
1200 s	20,9	7,86	1,31	*0,51*	0,42	*0,30*	0,21	0,08	
1 h	19,3	5,06	0,83	*0,44*	0,38	*0,27*	0,17	0,06	
3 h	16,5	2,63	0,62	*0,40*	0,34	*0,24*	0,13		
10 h	12,9	1,40	0,49	*0,36*	0,30	*0,20*	0,09		
1 Tag	9,56	0,99	0,44	*0,34*	0,28	*0,16*	0,07		
3 Tage	6,07	0,67	0,40	*0,30*	0,25	*0,13*			
1 Woche	4,19	0,57	0,37	*0,28*	0,22	*0,10*			
2 Wochen	2,99	0,51	0,36	*0,26*	0,20	*0,08*			
1 Monat	1,75	*0,46*	*0,33*	*0,24*	*0,17*	*0,07*			
2 Monate	*1,30*	*0,43*	*0,31*	*0,21*	*0,14*				
4 Monate	*0,97*	*0,40*	*0,29*	*0,18*	*0,12*				
6 Monate	*0,82*	*0,38*	*0,28*	*0,17*	*0,10*				

9 Bemessungswert des Schubmoduls für Einwirkungen aus Wind und Schnee

9.1 Ausgangslage

Voraussetzung für die Bestimmung eines Bemessungswertes für den Schubmodul der PVB-Folie ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Einwirkung und der Temperatur in der Folie während der Dauer der Einwirkung. Für Einwirkungen aus Wind und Schnee wurden von [Wellershoff 2007] anhand von Klimadaten und diversen Untersuchungen zum Verbundtragverhalten und zur Folientemperatur in VSG-Scheiben Bemessungswerte des Schubmoduls für den Standort Deutschland bestimmt. Für die Bemessung von VSG-Scheiben schlug der Autor einen Wert von G = 0,4 N/mm² für Windbelastung und G = 0,1 N/mm² (bei T = 20 °C) bzw. 0,6 N/mm² (bei T = 10 °C) für Schneebelastung vor. Der Bemessungswert für Windbelastung wurde in den aktuellen Entwurf der Richtlinie [E DIN 18008-1] aufgenommen. Der Ansatz eines Schubmoduls zur Bemessung von VSG-Scheiben unter Schneebelastung ist hingegen in dem Normenentwurf bisher nicht zugelassen.

Als zeit- und temperaturabhängiger Schubmodul wurde von [Wellershoff 2007] der Schubmodul nach Gleichung (8.7), Kapitel 8.6 verwendet, welcher aus Scherversuchen an kleinformatigen Proben aus VSG ermittelt wurde [Sobek 2001]. Für Temperaturen T ≥ 20 °C stimmt dieser Schubmodul gut mit dem Schubmodul G_{ZTV} aus Gleichung (8.6), Kapitel 8.5 überein und liegt bei hohen Temperaturen und langen Belastungszeiten unterhalb von G_{ZTV} und somit auf der sicheren Seite. Bei der Temperatur T = 10 °C und Belastungsdauern t > 1000 s wurde bei den Kriechversuchen in dieser Arbeit jedoch ein geringerer Schubmodul als nach Gleichung (8.7) gemessen. Bei tiefen Temperaturen und langen Belastungsdauern sollte deshalb für die Bemessung von VSG der Schubmodul G_{ZTV} verwendet werden.

Anhand der in [Wellershoff 2007] beschriebenen Vorgehensweise werden in dieser Arbeit die o. g. Bemessungswerte des Schubmoduls von PVB für Wind- und Schneebelastung auf Grundlage des Schubmoduls G_{ZTV} der Folie B überprüft.

9.2 Bemessungswert des Schubmoduls bei Windeinwirkung

9.2.1 Bemessungswert des Schubmoduls bei Windeinwirkung nach [E DIN 18008-1]

Von [Sedlacek 2003/1] wurde die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Temperatur der PVB-Folie an acht Standorten in Deutschland untersucht. Um die Aufheizung von VSG-Scheiben in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung zu bestimmen, wurden dafür Messungen der Folientemperatur in unterschiedlich eingefärbten VSG-Scheiben ausgewertet (Universität Stuttgart [Sobek 2001]), vgl. Kapitel 4.5.2). Aus diesen Untersuchungen wurde der vereinfachte Zeitverlauf der Windbelastung bei einer Folientemperatur von 20 °C nach Bild 9-1 [Wellershoff 2007] hergeleitet, welcher für die Bemessung von zweischichtigen VSG-Scheiben in Deutschland maßgebend ist. Danach setzt sich die Windeinwirkung aus der drei Sekunden lang wirkenden maximalen Böenbelastung $q_{b,3s}$, dem 10-minütigen Mittelwert der Windbelastung $q_{m,10min}$ und einer über vier

Tage gemittelte Grundlast in Höhe von 25 % der maximalen Böenbelastung $q_{b,3s}$ zusammen. Die Höhe der Laststufen ergeben sich aus dem Quadrat des Böenfaktors der Windgeschwindigkeit ($v_{Böe}/v_m$) für ein Mittelungsintervall von 3 Sekunden, 10 Minuten und 24 Stunden, wobei letzteres Mittelungsintervall für die Dauer von vier Tagen (Durchzugszeit eines Tiefdruckgebiets) angesetzt wurde [Wellershoff 2006].

Die Herleitung des Belastungsszenarios nach Bild 9-1 mit der gleichzeitigen Wirkung der maximalen Bemessungslast $q_{b,3s}$ und der Folientemperatur T = 20 °C beruht auf Temperaturmessungen an schwarz-emaillierten VSG-Scheiben. Sie gilt aber näherungsweise auch für ungefärbte Glasscheiben (Weißglas), da die Messungen von [Sobek 2001] zeigten, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten $v \geq 25$ m/s die Temperatur der PVB-Folie unabhängig vom Absorptionsvermögen (Einfärbung) der Glasscheiben um maximal 5 °C über der Umgebungstemperatur lag.

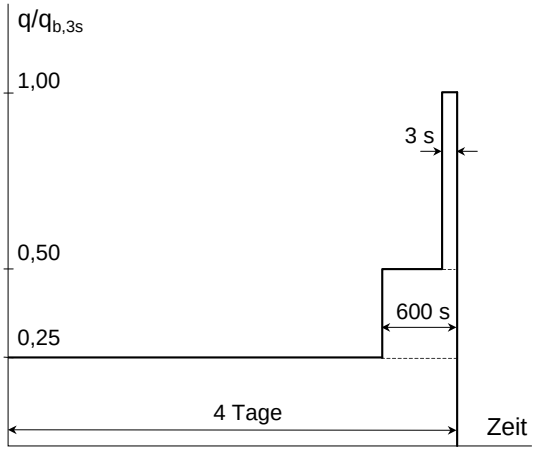


Bild 9-1: Dreistufiger Zeitverlauf der Windbelastung für die Bemessung von VSG-Scheiben in Deutschland (T = 20 °C), nach [Wellershoff 2007]

Aufgrund des linear-viskoelastischen Verhaltens der PVB-Folie können die drei Laststufen $0{,}25q_{b,3s}$, $0{,}25q_{b,3s}$ und $0{,}5q_{b,3s}$ in Bild 9-1 bei der Bemessung von VSG-Scheiben getrennt voneinander betrachtet werden. Für jede Laststufe mit ihrer zugehörigen Lastdauer t lässt sich mit dem Schubmodul nach Gleichung (8.7) die zugehörige Teilbeanspruchung in der VSG-Scheibe bei einer Folientemperatur von 20 °C berechnen. Anschließend werden alle drei Teilbeanspruchungen addiert und ergeben somit die Gesamtbeanspruchung bei Windbelastung.

Ein allgemeingültiger Bemessungswert des Schubmoduls wird dadurch gefunden, dass an einer möglichst schlanken VSG-Scheibe (h = 4 mm, L = 3200 mm) die Beanspruchung bei maximaler Bemessungslast $q_{b,3s}$ berechnet wird. Der Bemessungsschubmodul ist dabei der Wert, welcher zur gleichen Beanspruchung wie beim Belastungsszenario nach Bild 9-1 führt. Dies ist bei einer PVB-Folie mit dem Schubmodul G nach Gleichung (8.7) bei G = 0,40 N/mm² der Fall (siehe Tabelle 9-1).

9.2.2 Bemessungswert des Schubmoduls G_{ZTV} bei Windeinwirkung

Wird statt des Schubmoduls G nach Gleichung (8.7) der Schubmodul G_{ZTV} nach Gleichung (8.6) verwendet, so ergeben sich nach Tabelle 9-1 etwas höhere Werte als der o. g.

Bemessungswert. Ursache der Abweichung ist der Unterschied zwischen dem Schubmodul G_{ZTV} = 1,95 N/mm² und G = 0,60 N/mm² nach Gleichung (8.7) bei einer Belastungszeit bzw. Böendauer von t = 3 s.

Tabelle 9-1: Bemessungswert des Schubmoduls bei Windbelastung von zweischichtigen VSG-Scheiben in Deutschland (T = 20 °C)

	Belastungsszenario Bild 9-1		Belastungsszenario Bild 9-2	
	[E DIN 18008-1], [Wellershoff 2007]	G_{ZTV} aus Biegeversuche	[E DIN 18008-1], [Wellershoff 2007]	G_{ZTV} aus Biegeversuche
G [N/mm²]	0,40	0,57	0,39	0,52

Bei Verwendung des Schubmoduls G_{ZTV} ergab die Verwendung des dreistufigen Belastungsszenario nach Bild 9-1 nicht den geringsten Schubmodul. Deshalb wurde zudem das in Bild 9-2 wiedergegebene Lastbild untersucht. Dieses modifizierte Belastungsszenario besteht aus vier Laststufen, welche sich aus den Mittelungsintervallen der Windgeschwindigkeit bzw. des Winddrucks von t = 3 Sekunden ($0{,}35q_{b,3s}$), t = 60 Sekunden ($0{,}15q_{b,3s}$), t = 10 Minuten ($0{,}25q_{b,3s}$) und t = 4 Tage ($0{,}25q_{b,3s}$) ergeben. Damit liegt der Bemessungsmodul G_{ZTV} für Einwirkungen aus Wind bei ca. 0,5 N/mm².

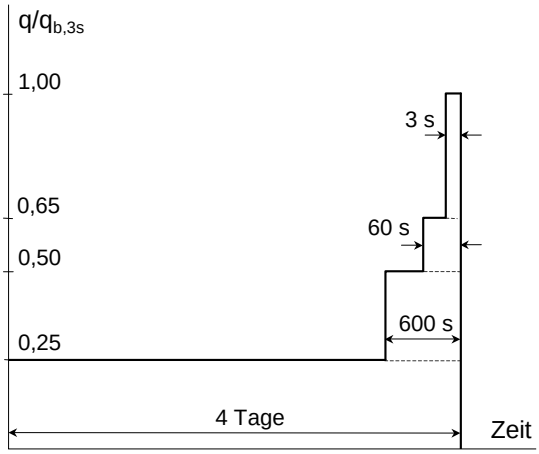


Bild 9-2: Modifizierter, vierstufiger Zeitverlauf der Windbelastung für die Bemessung von VSG-Scheiben in Deutschland mit G_{ZTV} (T = 20 °C)

Wie die Schubmodulwerte in Tabelle 9-1 zeigen, konnte mit den Biegeversuchen in dieser Arbeit der im Normenentwurf [E DIN 18008-1] mit G = 0,4 N/mm² angegebene Bemessungswert für Windbelastung bestätigt werden. Von den drei in dieser Arbeit untersuchten Standardfolien verschiedener Hersteller lag der Bemessungswert des Schubmoduls der weichsten Folien (Folie "B") bei ca. 0,5 N/mm². Dieser Wert liegt 25 % über dem Wert des Normenentwurfs und führt bei linearer Spannungsberechnung in schlanken VSG-Scheiben (λ > 100, h = 4 mm, h_F = 1,52 mm) zu einer nur geringen Spannungsreduktion von max. 6 %. Bei linearer Spannungsberechnung mit dickeren Glasscheiben oder bei nichtlinearer Spannungsberechnung ist die Reduktion der Spannung noch geringer.

9.3 Bemessungswert des Schubmoduls bei Schneeeinwirkung

9.3.1 Belastungsdauer und Lufttemperatur

Von [Christoffer 1990] wurde der zeitliche Verlauf der Schneelast am Boden (bzw. des Wassergehalts der Schneedecke = Wasseräquivalent) aus Wetterdaten von 14 Standorten in Westdeutschland und Berlin zwischen den Wintern 1950/51 und 1979/80 ermittelt. Je nach Standort betrug die längste Liegedauer des Schnees zwischen 25 Tagen in Mannheim und 151 Tagen in Braunlage (Harz).

In Bild 9-3 ist der Zusammenhang zwischen der Liegedauer des Schnees t_s und der Schneelast q_s dargestellt. Die Datenpunkte repräsentieren die Winterperioden mit der jeweils längsten Liegedauer des Schnees und der zugehörigen maximalen Schneelast in den 14 Standorten aus der Untersuchung von [Christoffer 1990]. Deutlich zu sehen ist die positive Korrelation zwischen der Liegedauer des Schnees und der Höhe der maximal gemessenen Schneelast.

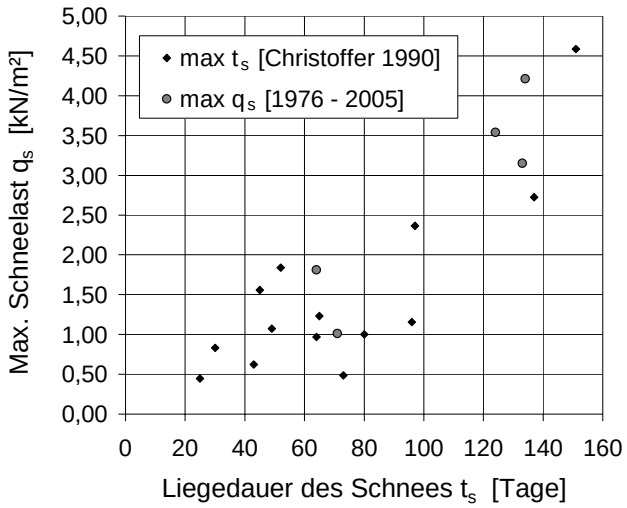


Bild 9-3: Zusammenhang zwischen der Liegedauer des Schnees t_s und der Schneelast q_s in Deutschland: Winterperioden mit der längsten Liegedauer an 14 Standorten zwischen 1950 und 1980 [Christoffer 1990] und Winterperioden mit der höchsten Schneelast an fünf Standorten zwischen 1976 und 2005

In dieser Arbeit wurden zusätzlich Daten des Deutschen Wetterdienstes an den fünf klimatisch unterschiedlichen Standorten Hamburg, Potsdam, Braunlage, Garmisch und Reit im Winkel der Jahre 1976 bis 2005 ausgewertet. Die längste Liegedauer des Schnees lag dabei zwischen 64 Tagen (Hamburg), 99 Tagen (Potsdam), 133 Tagen (Garmisch), 143 Tagen (Reit im Winkel) und 156 Tagen (Braunlage). Neben dem Verlauf der Schneelast (Wasseräquivalent der Schneedecke am Boden) umfassen diese Datenreihen auch den täglichen Maximalwert sowie den Tagesdurchschnitt der Lufttemperatur. Von diesen fünf Standorten wurde jeweils die Winterperiode mit der höchsten Schneelast q_s als Datenpunkt in Bild 9-3 eingetragen.

In Bild 9-4 ist der zeitliche Verlauf der Schneelast am Boden und der zugehörigen Lufttemperatur (Tagesmaximum und Tagesdurchschnitt) in Garmisch (719 m ü NN) im Winter 1998/99 dargestellt. In diesem Winter wurde zwischen 1976 und 2005 die höchste

Schneelast bei vergleichsweise hoher maximaler Lufttemperatur gemessen. Die maximale tägliche Lufttemperatur schwankte stark zwischen -5 und +20 °C und lag um bis zu 10 °C über der durchschnittlichen täglichen Lufttemperatur.

Die Zeitverläufe der Schneelast und der Lufttemperatur während der Winterperiode mit der höchsten Schneelast in den restlichen vier untersuchten Standorten sind im Anhang 5 zusammengestellt.

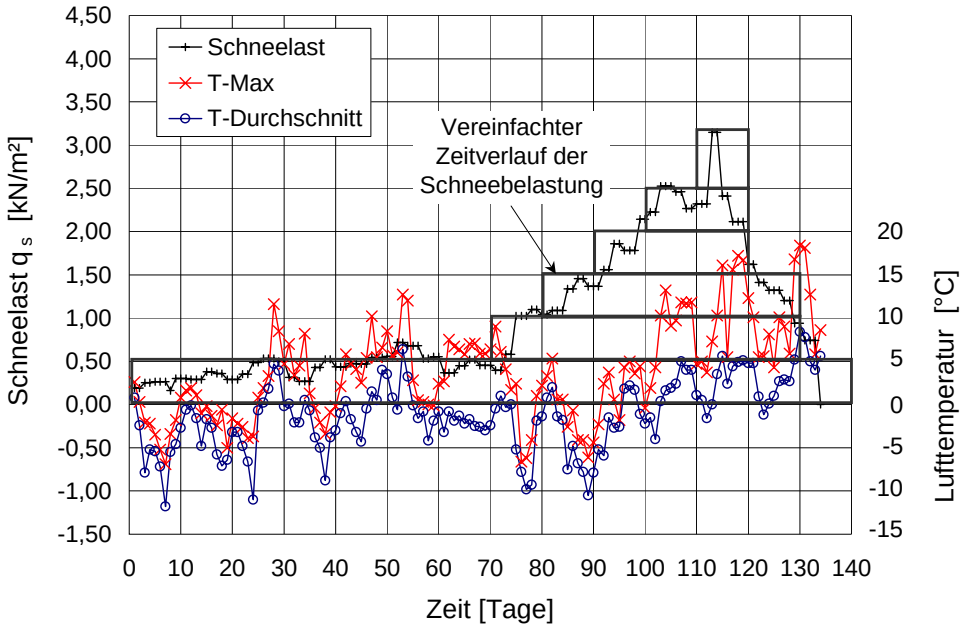


Bild 9-4: Garmisch, Winter 1998/99: Verlauf der Schneelast (Wasseräquivalent), der maximalen Lufttemperatur und der durchschnittlichen Lufttemperatur. Vereinfachung des Zeitverlaufs der Schneelast für die Bestimmung des Bemessungswertes des Schubmoduls

9.3.2 Temperatur in der PVB-Folie

Zur Bestimmung des Schubmoduls der PVB-Folie in einer VSG-Scheibe unter Schneebelastung muss eine ausreichend hohe Folientemperatur gewählt werden, welche zu einem auf der sicheren Seite liegenden Bemessungswert des Schubmoduls führt. Vereinfacht kann dabei angenommen werden, dass die Folientemperatur während der gesamten Dauer der Schneelast konstant ist. Ein genauere Berechnung des Bemessungswertes des Schubmoduls kann durch eine Berücksichtigung der Temperaturschwankungen in der VSG-Scheibe erfolgen. Für die Winterperioden der fünf Standorte die in dieser Arbeit untersucht wurden, wird diese Vorgehensweise in Kapitel 9.3.3 erläutert.

Für die Höhe und die zeitliche Schwankung der Folientemperatur sind drei Anwendungsfälle der VSG-Scheibe zu unterscheiden:

a) Einfachverglasung in freistehenden Dächern mit direktem Kontakt zur Außenluft

b) Einfachverglasung als Raumabschluss von unbeheizten oder beheizten Räumen

c) Isolierverglasung als Raumabschluss mit der VSG-Scheibe auf der Seite des beheizten Raums

Im Fall a) unterliegt die Folientemperatur Schwankungen, welche vom zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur abhängen. Aufgrund der ständigen Kühlung der Glasscheibe auf der Seite des Schnees (maximale Temperatur 0 °C) schwankt die Folientemperatur weniger als die Lufttemperatur und die maximale Folientemperatur wird unterhalb der maximal gemessenen Lufttemperatur liegen. Da keine Messungen zur Folientemperatur in schneebelasteten VSG-Scheiben vorliegen, muss man in diesem Anwendungsfall eine Annahme für die maximale Folientemperatur treffen.

Im Anwendungsfall b) und c) wird üblicherweise angenommen, dass die Raumtemperatur zwischen 12 °C (unbeheizt) und 20 °C (beheizt) beträgt [DIN 4108-3]. Dies führt zu stationären Temperaturbedingungen und einer konstanten Temperatur der PVB-Folie, welche zwischen 0 und 20 °C liegt. Für einige zweischichtige VSG-Scheiben in Einfach- und Isolierverglasung mit theoretisch unendlicher Ausdehnung (d. h. kein Wärmeübergang zwischen den Kanten der VSG-Scheibe und der Rahmenkonstruktion) wurde vom Verfasser die Folientemperatur unter der Annahme einer konstanten Raumtemperatur von 20 °C und einer konstanten Temperatur des Schnees von 0 °C berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-2 wiedergegeben. Die Berechnung erfolgte nach den technischen Regeln [EN 673], [DIN EN 12524] und [E DIN EN ISO 6946]. Der Wärmeübergangswiderstand R_{se} an der zum Schnee zugewandten Oberfläche wurde dabei mit R_{se} = 0,00 m²K/W angesetzt, da angenommen wurde, dass die Außenfläche der VSG-Scheibe die gleiche Temperatur wie der Schnee besitzt. Der Wärmeübergangswiderstand an der luftzugewandten Seite wurde mit R_{si} = 0,10 m²K/W angesetzt.

Wird diese Berechnung auch für den Anwendungsfall a) durchgeführt und angenommen, dass der Wärmeübergang nur über die Glasscheibe erfolgt (unendliche Ausdehnung der VSG-Scheibe), so ergeben sich mit zunehmender Entfernung der PVB-Folie von der schneebedeckten Glasfläche höhere Folientemperaturen. Deshalb wurde für diesen Fall auch die Folientemperatur in dreischichtigen VSG-Scheiben mit Glasdicken bis h = 19 mm berechnet, siehe Tabelle 9-2. Der Wärmeübergangswiderstand der luftzugewandten Seite wurde im Fall a) auf der sicheren Seite zu R_{si} = 0,01 m²K/W (hohe Windgeschwindigkeit von ca. v = 25 m/s) gesetzt. Da im Randbereich der Scheibe die PVB-Folie direkten Kontakt zur Außenluft besitzt, wird die Folie vermutlich höhere Temperaturen aufweisen. Dies müsste durch Messungen an realen VSG-Scheiben unter Schneebelastung näher untersucht werden.

Für den Anwendungsfall einer großformatigen und vollflächig mit Schnee bedeckten Verglasung in einem freistehenden Dach im Außenbereich (Fall a)) wird sich nach Tabelle 9-2 eine maximale Folientemperatur einstellen die ca. 8 bis 10 °C unterhalb der maximalen Lufttemperatur im Winter von 20 °C (vgl. Standort Garmisch) liegt. Unsicherheiten bestehen hinsichtlich des Einflusses des Wärmeaustausches zwischen Folie und Luft über den Rand der VSG-Scheiben, einer Teilbedeckung des Daches mit Schnee, dem Wärmeübergang zwischen Schnee und Glas und dem Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Wärmeübergang zwischen Luft und Glasoberfläche.

Tabelle 9-2: Folientemperatur in VSG-Scheiben (Einzelverglasung und Isolierverglasung) bei Schnee auf der Außenseite (T = 0 °C, R_{se} = 0,00 m²K/W) und Luft auf der Innenseite (T = 20 °C)

Anwendungsfall	Scheibenaufbau	Temperatur der PVB-Folie
Fall a)	4 mm/1,52 mm/4 mm	8,4 °C
Einzelverglasung	19 mm/1,52 mm/19 mm	9,3 °C
R_{si} = 0,01 m²K/W	4 mm/1,52 mm/4 mm/1,52 mm/4 mm	11,8 °C
	19 mm/1,52 mm/19 mm/1,52 mm/19 mm	12,7 °C
Fall b)	4 mm/1,52 mm/4 mm	1,8 °C
Einzelverglasung	19 mm/1,52 mm/19 mm	3,5 °C
R_{si} = 0,10 m²K/W	19 mm/1,52 mm/4 mm	3,9 °C
	4 mm/1,52 mm/4 mm/1,52 mm/4 mm	3,2 °C
	19 mm/1,52 mm/19 mm/1,52 mm/19 mm	5,9 °C
	19 mm/1,52 mm/19 mm/1,52 mm/4 mm	6,5 °C
Fall c) Isolierverglasung R_{si} = 0,10 m²K/W	6 mm/SZR 16 mm/4 mm/1,52 mm/4 mm SZR*) = 16 mm mit Luftfüllung keine Beschichtung	12,3 °C
	6 mm/SZR 16 mm/4 mm/1,52 mm/4 mm SZR = 16 mm mit Luft 1 Beschichtung mit Emissionsgrad ε_1 = 0,02	15,3 °C
	6 mm/SZR 16 mm/4 mm/1,52 mm/4 mm SZR = 16 mm mit Argon 1 Beschichtung mit Emissionsgrad ε_1 = 0,02	16,3 °C
	6 mm/SZR 16 mm/4 mm/1,52 mm/4 mm SZR = 16 mm mit Krypton 1 Beschichtung mit Emissionsgrad ε_1 = 0,02	17,1 °C

*) SZR = Scheibenzwischenraum mit Gasfüllung (Luft, Argon oder Krypton)

In VSG-Scheiben auf der warmen Seite von Isolierverglasungen (Fall c)) ist die Folientemperatur ca. 3 °C geringer als die Lufttemperatur des Raumes. Für VSG-Scheiben in Isolierverglasung kann deshalb konservativ angenommen werden, dass die Folientemperatur 20 °C beträgt, vgl. [Wellershoff 2007]. Dies entspricht einer Raumtemperatur von 23 °C.

Der Anwendungsfall b) braucht nicht weiter betrachtet zu werden, da sich dieser von Fall a) lediglich in der Annahme des Wärmeübergangswiderstand R_{si} zwischen Luft und Glas unterscheidet.

9.3.3 Bemessungswert des Schubmoduls bei Schneeeinwirkung

Zur Berechnung des Bemessungswertes des Schubmoduls anhand der fünf untersuchten Winterperioden der Standorte Hamburg, Potsdam, Braunlage Garmisch und Reit im Winkel wurde der zeitliche Verlauf der Schneelast durch mehrere Laststufen mit konstanter Belastung

abgebildet, siehe Bild 9-4 und Anhang 5. Durch Anwendung des Boltzmann'schen Superpositionsgesetz wurde wie in Kapitel 9.2.1 die Beanspruchung (Spannung) einer dünnen VSG-Scheibe (h = 4 mm) aus jeder Laststufe berechnet. Der Bemessungswert des Schubmoduls ist dann der Schubmodul welcher bei maximaler Schneelast q_s die gleiche Beanspruchung ergibt wie die Summe aller Teilbeanspruchungen aus den einzelnen Laststufen (nur lineare Spannungsberechnung).

Wird dabei angenommen, dass die Folientemperatur während der gesamten Winterperiode konstant ist, ergeben sich die in Tabelle 9-3 dargestellten Bemessungswerte des Schubmoduls. Diese unterscheiden sich zwischen den fünf untersuchten Standorten trotz des unterschiedlichen Verlaufs der Schneelast nur sehr wenig. Maßgebend ist der Einfluss der Folientemperatur.

Tabelle 9-3: Bemessungswert des Schubmoduls G_{ZTV} in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der Schneelast bei konstanter Folientemperatur T_F

Standort	T = 0 °C	T = 5 °C	T = 10 °C	T = 15 °C	T = 20 °C
Hamburg	1,6 N/mm²	0,45 N/mm²	0,32 N/mm²	0,24 N/mm²	0,14 N/mm²
Potsdam	1,4 N/mm²	0,43 N/mm²	0,31 N/mm²	0,23 N/mm²	0,15 N/mm²
Braunlage	1,1 N/mm²	0,41 N/mm²	0,27 N/mm²	0,21 N/mm²	0,13 N/mm²
Garmisch	1,6 N/mm²	0,45 N/mm²	0,32 N/mm²	0,24 N/mm²	0,16 N/mm²
Reit im Winkel	1,1 N/mm²	0,41 N/mm²	0,30 N/mm²	0,21 N/mm²	0,13 N/mm²

Alternativ zur Annahme einer konstanten Folientemperatur wurde auch untersucht, welcher Schubmodul sich bei einer zeitlich schwankenden Folientemperatur ergibt. Bei linear-viskoelastischem Kriechverhalten kann diese Berechnung mit Hilfe der sogenannten "reduzierten Zeit" t_{red} nach Gleichung (9.1) erfolgen, die sich aus dem Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) nach Kapitel 2.1.8 ergibt.

$$t_{red} = \int_0^t \frac{1}{a_T\left(T(t')\right)} dt' \quad \text{bzw.} \quad t_{red} = \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{a_T\left(T_i\right)} \Delta t_i \tag{9.1}$$

Die reduzierte Zeit t_{red} ist die Zeit, in welcher eine konstante Belastung bei konstanter Referenztemperatur T_0 zur gleichen Kriechverformung eines Kunststoffes führt, wie in der realen Zeit t bei zeitlich veränderlicher Temperatur T(t'). Dies bedeutet, dass die Kriechverformung der PVB-Folie mit der Masterkurve des Schubmoduls für T_0 = 20 °C bei tiefen Temperaturen T < 20 °C mit verkürzten Belastungsdauern t_{red} < t und bei hohen Temperaturen T > 20 °C mit erhöhten Belastungsdauern t_{red} > t berechnet werden kann. Bei Verwendung der Masterkurve G_{ZTV} aus Kapitel 8.5 reduziert sich beispielsweise eine 10-tägige Belastungsdauer bei einer Folientemperatur von 20 °C auf erheblich geringere reduzierte Belastungsdauern von 25 Stunden bei T = 15 °C, 1,5 Stunden bei T = 10 °C und 150 Sekunden bei T = 5 °C.

Zur numerischen Berechnung der Beanspruchung einer VSG-Scheibe mit direktem Kontakt zur Außenluft (Anwendungsfall b)) unter konstanter Last q kann der Belastungsprozess mit veränderlicher Folientemperatur in n Perioden der Länge Δt_i unterteilt werden. In diesen Zeitabschnitten wird die Temperatur T_i als konstant betrachtet. Für die Berechnung des Bemessungswertes des Schubmoduls der Folie wurden die Belastungsprozesse in den fünf untersuchten Standorten in relativ große Zeitabschnitte mit eine Länge von Δt_i = 10 Tagen unterteilt. In jedem Zeitabschnitt wurde konservativ die jeweils maximale Folientemperatur aus 10 Beobachtungstagen auf die nächsthöhere Temperaturstufe von 0, +5, +10, +15 oder +20 °C aufgerundet und während des Zeitabschnittes als konstant angesetzt. Als maximale Folientemperatur wurde die maximale tägliche Lufttemperatur einerseits und die durchschnittliche tägliche Lufttemperatur anderseits gewählt. Diese Vorgehensweise wurde für alle Laststufen durchgeführt, um die jeweilige Teilbeanspruchung in der VSG-Scheibe zu berechnen. Abschließend wurden alle Teilbeanspruchungen addiert und der Bemessungswert des Schubmoduls für die maximale Beanspruchung q_s ermittelt. Das Ergebnis der Berechnung ist in Tabelle 9-4 wiedergeben.

Tabelle 9-4: Bemessungswert des Schubmoduls G_{ZTV} in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der Schneelast bei zeitlich veränderlicher Folientemperatur T für VSG-Scheiben, die direkt der Außenluft ausgesetzt sind.

Standort	T = maximale Lufttemperatur*)	T = durchschnittliche Lufttemperatur*)
Hamburg	0,45 N/mm²	0,85 N/mm²
Potsdam	0,36 N/mm²	0,47 N/mm²
Braunlage	0,35 N/mm²	0,35 N/mm²
Garmisch	0,20 N/mm²	0,44 N/mm²
Reit im Winkel	0,32 N/mm²	0,43 N/mm²

*) tägl. Lufttemperatur auf die nächsthöhere Temperaturstufe von 0, +5, +10, +15 oder +20 °C aufgerundet

Wird für die Berechnung des Bemessungswertes auf der sehr sicheren Seite liegend die maximale tägliche Lufttemperatur als Folientemperatur angesetzt, so betrug der geringste Schubmodul im Standort Garmisch G_{ZTV} = 0,20 N/mm². Beim Ansatz der durchschnittlichen Lufttemperatur als Folientemperatur wurde der geringste Schubmodul G_{ZTV} = 0,35 N/mm² im Standort Braunlage berechnet. In diesem Standort war der Unterschied zwischen dem täglichen Maximalwert und dem täglichen Durchschnitt der Lufttemperatur sehr gering, so dass die beiden berechneten Schubmoduln gleich hoch sind.

Werden kleinere Zeitabschnitte zur Berechnung der reduzierten Zeit t_{red} gewählt und wird die gemessene Lufttemperatur nicht aufgerundet, so ergeben sich bei langen Liegedauern des Schnees etwas höhere Bemessungswerte des Schubmoduls. Für die hier untersuchte Winterperiode im Standort Braunlage (bzw. Garmisch) ergibt eine Unterteilung des Belastungsprozesses in tägliche Zeitabschnitte (Δt_i = 24 h) einen Schubmodul von G_{ZTV} = 0,42 N/mm² (Garmisch: 0,27 N/mm²) (Folientemperatur = maximale Lufttemperatur) bzw. 0,55 N/mm² (Garmisch: 0,52 N/mm²) (Folientemperatur = durchschnittliche Lufttemperatur).

Aufgrund dieser Ergebnisse wird für VSG-Scheiben in Deutschland, welche direkt der Außenluft ausgesetzt sind, der konservative Bemessungswert **G = 0,4 N/mm²** (Folie "B") vorgeschlagen. Dieser Wert ist jedoch noch durch direkte Temperaturmessungen in Folien in schneebelasteten VSG-Scheiben zu verifizieren.

In [Wellershoff 2007] wird ein Bemessungswert des Schubmoduls bei Schneebelastung von G = 0,60 N/mm² für VSG-Scheiben in Einzelverglasungen (T ≤ 10 °C) und G = 0,10 N/mm² für VSG-Scheiben in Isolierverglasungen (T ≤ 20 °C) angegeben. Diese Werte wurden für den Standort Braunlage berechnet und beruhen auf der Funktion des Schubmoduls von [Sobek 2001] (siehe Gleichung (8.7)). Letzter Bemessungswert konnte durch die Biegeversuche in dieser Arbeit an Probekörpern mit der Folie B bestätigt werden. Hier betrug der geringste Bemessungswert des Schubmoduls nach Tabelle 9-3 G_{ZTV} = 0,13 N/mm². Bei VSG-Scheiben in Einzelverglasungen beträgt der Bemessungswert des Schubmoduls nach den Berechnungen in dieser Arbeit nur 0,40 N/mm² und liegt damit 33 % unterhalb des von [Wellershoff 2007] angegebenen Schubmoduls. Ursache dieser Abweichung ist nicht der Einfluss der Liegedauer des Schnees oder der Schwankungen der winterlichen Lufttemperatur, sondern der geringere Schubmodul bei Temperaturen unterhalb von 20 °C, der bei den Kriechversuchen in dieser Arbeit bei langen Belastungsdauern gemessen wurde. Eine Abminderung des Schubmoduls von 0,6 N/mm² auf 0,4 N/mm² führt in schlanken VSG-Scheiben mit symmetrischem Scheibenaufbau ($h_1 = h_2 = h = 4$ mm) jedoch nur zu einer relativ geringen Zunahme der Biegezugspannung von ca. 10 %. Bei dickeren Glasscheiben und bei nicht-linearer Bemessung ist die Zunahme der maximalen Biegezugspannung wiederum geringer.

Bei der Bemessung von (schneebedeckten) VSG-Scheiben im Überkopfbereich muss eine ausreichende Resttragfähigkeit bei Bruch einer Scheibe gewährleistet werden. Deshalb ist beim Ansatz der Verbundwirkung der PVB-Folie zu berücksichtigen, dass eine mögliche Verringerung der Scheibendicke nicht zu einer Minderung der erforderlichen Resttragfähigkeit führen darf.

9.4 Einfluss der Alterung auf den Bemessungswert des Schubmoduls

9.4.1 UV-Strahlung und hohe Temperatur

Wie die Biegeversuche an künstlich bewitterten VSG-Scheiben gezeigt haben, führte eine zeitlich begrenzte Einwirkung von hoher Scheibentemperatur und starker UV-Strahlung zu keiner Reduktion des Schubmoduls. Vielmehr wurde eine geringe Versteifung der 200 mm breiten Probekörper gemessen. Beim Ansatz der Verbundwirkung zur Bemessung von VSG-Scheiben unter Schnee- und Windbelastung kann deshalb der Schubmodul ungealterter PVB-Folien zugrunde gelegt werden. Eine Korrektur durch einen Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Alterung ist nicht erforderlich.

9.4.2 Feuchtigkeit

Eindringende Luftfeuchtigkeit führt zu einer Reduktion des Schubmoduls im Randbereich der PVB-Folie in freibewitterten VSG-Scheiben. Die Breite des Randstreifens, der durch die

Aufnahme von Luftfeuchtigkeit aus der Umgebungsluft beeinflusst wird, liegt nach dem derzeitigen Kenntnisstand bei ungefähr 5 cm. [Ensslen 2005] (Kapitel 4.4.4). Als maximale Eindringtiefe wird hier 10 cm angenommen.

An den in Tabelle 9-5 aufgelisteten Platten und Balken aus zweischichtigen VSG-Scheiben mit symmetrischem Scheibenaufbau (h = 4 mm und h_F = 1,52 mm) wurden in dieser Arbeit Parameterstudien zum Einfluss eindringender Feuchtigkeit auf die Verbundwirkung der PVB-Folie durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten mittels linearer Plattenberechnung an einer Viertelplatte mit dem Programm *MSC/NASTRAN for Windows 2001* (siehe Kapitel 3.2.3.3). Konservativ wurde angenommen, dass der Schubmodul in einem 5 und 10 cm breiten und umlaufenden Randstreifen durch die eingedrungene Feuchtigkeit auf 0,01 N/mm² reduziert wurde. Im restlichen Bereich der VSG-Scheibe wurde der Schubmodul zwischen G_0 = 0,1 und G_0 = 5 N/mm² variiert, siehe Bild 9-5.

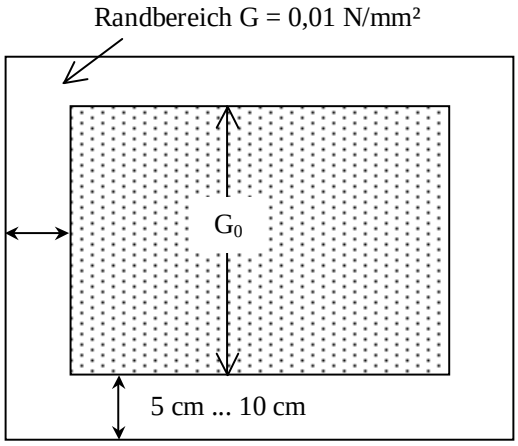


Bild 9-5: Abnahme des Schubmoduls in einem umlaufenden Randbereich von 5 bis 10 cm durch eindringende Feuchtigkeit

Die prozentuale Zunahme der maximalen Durchbiegung und der maximalen Biegezugspannung durch die eindringende Feuchtigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand (d. h. G_0 in der gesamten Folienfläche konstant) zeigt Tabelle 9-5.

Die Zunahme der Durchbiegung ist demnach mehr als doppelt so groß wie die Zunahme der Spannung. Die Erhöhung der Beanspruchung hängt im wesentlichen von der Scheibengröße und der Art der Lagerung ab. Beide Beanspruchungsgrößen sind in zweiseitig gelagerten Plattenstreifen (Balken) erheblich größer als in vierseitig gelagerten Platten. Bis zu einer Eindringtiefe der Feuchtigkeit von 5 cm erhöhen sich die Spannungen bei den untersuchten Scheibenformaten nur um maximal 10 %.

Wird die Spannung in vierseitig gelagerten Platten mittels geometrisch nichtlinearer Plattenberechnung ermittelt, so nimmt die Verbundwirkung der Folie mit zunehmender Durchbiegung der VSG-Scheibe immer mehr ab. Eine örtliche Reduktion des Schubmoduls durch eindringende Feuchtigkeit hat in diesem Fall bei größeren Scheibenformaten (> 1000 x 1000 mm²) keine nennenswerte Auswirkung auf die maximale Biegezugspannung [Ensslen 2005], [Sedlacek 2003/2].

Tabelle 9-5: Prozentuale Zunahme der maximalen Durchbiegung und Spannung bei einer Reduktion des Schubmoduls von G_0 auf 0,01 N/mm² in einem 5 cm und 10 cm breiten umlaufenden Randstreifen (h = 4 mm, h_F = 1,52 mm, lineare Berechnung)

		Randstreifen 5 cm mit G = 0,01 N/mm²		Randstreifen 10 cm mit G = 0,01 N/mm²	
VSG-Scheibe	G_0 [N/mm²]	Spannung	Durchbiegung	Spannung	Durchbiegung
Balken, L = 1000 mm b = 500 mm	2	7,8 %	23,2 %	22,0 %	67,7 %
	1	10,1 %	24,0 %	25,7 %	62,9 %
	0,5	10,6 %	20,9 %	24,3 %	49,5 %
	0,3	9,4 %	16,8 %	20,2 %	37,9 %
	0,1	5,2 %	8,5 %	10,1 %	18,2 %
Balken, L = 1000 mm b = 1000 mm	2	5,9 %	16,3 %	15,3 %	47,4 %
	1	7,4 %	16,7 %	17,5 %	43,8 %
	0,5	7,6 %	14,6 %	16,7 %	35,1 %
	0,3	6,8 %	12,0 %	14,2 %	27,4 %
	0,1	3,8 %	6,2 %	7,3 %	13,7 %
Platte, 1000 x 1000 mm	2	2,5 %	12,4 %	5,4 %	35,9 %
	1	2,8 %	11,2 %	7,2 %	31,1 %
	0,5	3,2 %	9,2 %	8,1 %	24,9 %
	0,3	3,1 %	7,7 %	7,8 %	20,8 %
	0,1	2,5 %	5,3 %	6,3 %	14,8 %
Platte, 2000 x 2000 mm	1	1,3 %	5,1 %	2,2 %	12,4 %
	0,3	1,1 %	4,6 %	2,3 %	10,9 %

Aus den Untersuchungen zum Einfluss der Alterung und aus den Ergebnissen der Berechnung ergeben sich für den Ansatz einer Verbundwirkung bei VSG-Elementen im Außenbereich (freie Bewitterung) folgende Schlussfolgerungen für die lineare Berechnung:

- Bei balkenartigen VSG-Elementen mit einer Breite von weniger als 20 cm sollte auf den Ansatz einer Verbundwirkung verzichtet werden. Bei breiteren Elementen ist die mögliche Reduktion des Schubmoduls in einem umlaufenden Randbereich zu berücksichtigen. Hierzu sind weitere Parameterstudien notwendig.
- Bei vierseitig gelagerten VSG-Platten mit einer Fläche größer als 1000 x 1000 mm² beträgt bei linearer Berechnung die Zunahme der Spannung bei eindringender Feuchtigkeit weniger als 10 %.

9.5 Bemessungswert des Schubmoduls für sonstige Einwirkungen

9.5.1 Einwirkungen auf Isoliergläsern

Besteht eine Scheibe von Isoliergläsern aus VSG, so beeinflusst die Steifigkeit der PVB-Folie bzw. die Biegesteifigkeit der VSG-Scheibe die Höhe der klimatischen Einwirkungen (Druckunterschiede des eingeschlossenen Gasvolumens) und die Aufteilung der äußeren Lasten (z. B. Wind, Schnee) auf die Innen- und Außenscheibe. Nach der technischen Richtlinie [TRLV 2006] sind deshalb zur Bemessung von Isoliergläsern mit VSG-Scheiben die beiden Grenzfälle "kein Verbund" (G = 0) und "voller Verbund" zu untersuchen.

Ob statt der Verwendung dieser Grenzfälle der Ansatz realer Schubmoduln eine wirtschaftlichere Bemessung von Isoliergläser ermöglicht, müsste mittels Parameterstudien untersucht werden. Dabei wäre für den Grenzfall "kein Verbund" der niedrige Schubmodul $G_{50\%}$ der Folie B nach Bild 8-5 bzw. G_{ZTV} nach Gleichung (8.6) anzusetzen. Für den Grenzfall "voller Verbund" wäre dagegen ein möglichst hoher Schubmodul anzusetzen. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten PVB-Folien müsste dazu die obere Vertrauensgrenze der 50-%-Fraktile der steifsten Folie "A" (siehe Bild 8-4) verwendet werden.

9.5.2 Weitere Einwirkungen

Für beliebige Einwirkungen auf VSG-Scheiben, welche nicht von der Steifigkeit der VSG-Elemente abhängen, kann die zeit- und temperaturabhängige Funktion des Schubmoduls G_{ZTV} nach Gleichung (8.6) verwendet werden. Zeitlich veränderliche Einwirkungen auf VSG-Scheiben, welche nicht wie Wind und Schnee klimatisch bedingt sind, lassen sich jedoch i. d. R. nicht durch allgemeingültige und statistisch abgesicherte Belastungsszenarien beschreiben. Solche Einwirkungen sind z. B. Verkehrslasten auf befahrbaren oder begehbaren Verglasungen. Bei diesen Einwirkungen ist zwar die maximale Höhe der Last bekannt, die Belastungsdauer kann jedoch erheblich variieren (z. B. stehende Fahrzeuge oder Fußgängergruppen).

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

In einem umfangreichen Versuchsprogramm wurde das Tragverhalten von Balken aus Verbundsicherheitsglas (VSG) und das Materialverhalten von Polyvinylbutyral-(PVB)-Folien unter Zugbeanspruchung untersucht. Durch den Vergleich von künstlich gealterten zu ungealterten Probekörpern wurde die Auswirkung einer Bewitterung durch Sonnenstrahlung, hohe Temperatur und hohe Luftfeuchtigkeit auf die Verbundwirkung und die Zugeigenschaften von PVB-Folien untersucht. Alle Versuche wurden mit drei Standardfolien von verschiedenen Herstellern durchgeführt, welche für übliche Anwendungen im Bauwesen eingesetzt werden. Aus Kriechversuchen an Balken aus Verbundsicherheitsglas wurde für die Folie mit der geringsten Steifigkeit eine Formel für den zeit- und temperaturabhängigen Schubmodul G erstellt, welche zur Bemessung beliebiger Bauteile aus VSG verwendet werden kann. Auf Grundlage dieser Formel wurden zudem Bemessungswerte des Schubmoduls für Wind- und Schneebelastung in Deutschland berechnet und mit Bemessungswerten aus der Literatur bzw. dem derzeitigen deutschen Normenentwurf [E DIN 18008-1] für die Bemessung von Glas im Bauwesen verglichen.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Einfluss der künstlichen Bewitterung nach [DIN EN ISO 12543-4] auf die Biegesteifigkeit von Balken aus VSG war bei allen drei untersuchten PVB-Folien gleich. Die Versuchsergebnisse anderer Autoren konnten durch die Alterungsversuche in dieser Arbeit bestätigt werden (Kapitel 5.4 bis 5.6).
- Die 4-monatige künstliche Bestrahlung, welche mit einer Erwärmung der Glasscheiben auf 35 bis 75 °C verbunden war, führte, genauso wie eine 3-monatige Dunkellagerung bei 70 °C, zu einer geringen Versteifung der Verbundglasbalken in Kriechversuchen (Kapitel 5.4.1 und 5.5).
- Die Strahlungsdosis der verwendeten Strahlungsquellen - in dem für die Bewitterung von VSG maßgebenden UV-A-Bereich - entsprach einer natürlichen Strahlungsdosis in Deutschland von 1 bis 2 Jahren. Ob die künstliche Bestrahlungsquelle jedoch hinsichtlich der Alterungswirkung mit der natürlichen Strahlung vergleichbar ist, und ob PVB in VSG mit eisenarmen Weißglas früher altert als in VSG mit normalen Glas, konnte aufgrund der unbekannten spektralen Alterungsempfindlichkeit von PVB-Folien in VSG nicht ermittelt werden. (Kapitel 4.5.1 und 4.7.1).
- Wegen des geringen Einflusses der Alterung durch Bestrahlung und hohe Temperatur auf die Biegesteifigkeit der Verbundglasbalken, konnte lediglich bei einer Versuchstemperatur von 20 °C eine geringe, aber statistisch signifikante Änderung der Schubsteifigkeit der Folien gemessen werden. Bei anderen Temperaturen war der Einfluss des Schubmoduls auf die Biegesteifigkeit der Versuchsbalken so gering, dass eine Beurteilung des Alterungseinflusses nicht möglich war (Kapitel 5.4 und 5.5).

- Die genaue Ursache der geringen Versteifung der Probeköper durch künstliche Bestrahlung konnte mit dem Versuchsprogramm nicht geklärt werden. Da sowohl die künstliche Bestrahlung, als auch die Dunkellagerung bei hoher Temperatur zu einer Versteifung der Balken geführt hatten, ist davon auszugehen, dass die Folien im Randbereich der Scheiben ausgetrocknet waren. Dies führt erfahrungsgemäß zu einer Versteifung der Folie. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Alterung irreversibel war und zu einer chemischen Veränderung der Folie (z.B. Vernetzung) oder zu einer Verflüchtigung von Weichmacher geführt hat (Kapitel 5).
- Eine 14-tägige Lagerung von Versuchsbalken bei fast 100 % relativer Luftfeuchtigkeit und ca. 52 °C führte zu einer signifikanten Abnahme der Biegesteifigkeit von maximal 20 %, da die eindringende Feuchtigkeit zu einer Erweichung der PVB-Folie im Randbereich der Probekörper geführt hatte. Eine 28 Tage dauernde Lagerung bei hoher Luftfeuchtigkeit führte zu keiner signifikant stärkeren Reduktion der Biegesteifigkeit als die 14-tägige Lagerung (Kapitel 5.4.2).
- Eine künstliche Bestrahlung (hinter Glas) und Trocknung von Folienproben führten zu keiner signifikanten Änderung des Steifigkeitsverhaltens, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der untersuchten Folien (Kapitel 7.3).
- Eine zweitägige Wasserlagerung von Proben einer PVB-Folie führte bei fast gleichbleibender Bruchdehnung zu einer Reduktion der Zugfestigkeit um 85 %. Durch anschließender Trocknung der Proben bei Raumtemperatur konnte gezeigt werden, dass die Abnahme der Zugfestigkeit reversibel ist. Die Dehnsteifigkeit bzw. der E-Modul der Folien wurde durch die Wasserlagerung um ungefähr 75 % reduziert. Näherungsweise kann diese Abnahme auch für den Schubmodul angenommen werden. Ein Beweis der Vergleichbarkeit beider Moduln steht aufgrund der geringen Versuchszahl und der Schwierigkeit bei der Messung sehr kleiner Dehnungen jedoch noch aus (Kapitel 7.4).
- Dynamische Biegeversuche an Balken aus VSG mit bis zu 150.000 Lastwechseln bei Temperaturen zwischen 0 und 40 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 50 und 60 % und Schubspannungsamplituden in der PVB-Folie zwischen 0,1 und 0,2 N/mm² führten zu keiner signifikanten Abnahme der Biegesteifigkeit. Dennoch wurden bei 40 °C Delaminationen in den Ecken und entlang der Ränder der Balken festgestellt. Bei Windbeanspruchung ist in Deutschland jedoch keine Delamination der Folie zu erwarten, welche die Biegesteifigkeit von Verbundsicherheitsglas reduzieren könnte (Kapitel 6).
- Das lineare viskoelastische Verhalten aller drei untersuchten PVB-Folien konnte durch die Versuche bestätigt werden. Alle drei PVB-Folien wiesen zwar das gleiche zeit- und temperaturabhängige Steifigkeitsverhalten auf, die Höhe der Schubmoduln unterschied sich jedoch in einigen Zeitbereichen um den Faktor 2 bis 3 (Kapitel 8.3)
- Auf Grundlage des Prinzips der Zeit-Temperatur-Verschiebung konnten für eine Referenztemperatur von 20 °C eine Formel für den zeit- und temperaturabhängigen Schubmodul der Folie mit der geringsten Steifigkeit angegeben werden. Die Formel wurde durch Anpassung an Schubmodulwerte von Kriechversuchen bei Temperaturen

zwischen 0 und 55 °C und Belastungsdauern zwischen 3 Sekunden und 4 Wochen ermittelt. Dazu wurden unterschiedliche Konstanten für die Zeit-Temperatur-Verschiebung unterhalb von 20 °C (d. h. unterhalb bzw. nahe der Glasübergangstemperatur) und oberhalb von 20 °C gewählt (Kapitel 8.5).

- Für die Bemessung von Verbundsicherheitsglas kann die 50-%-Fraktile des Schubmoduls verwendet werden, wenn die bemessungsrelevante Kombination aus Lasthöhe, Lastdauer und Folientemperatur mit ausreichender Sicherheit bestimmt wird (Kapitel 8.2).
- Für Windeinwirkung ergab sich für die Folie mit der geringsten Steifigkeit ein Bemessungswert von G = 0,5 N/mm². Damit konnte der Bemessungswert von G = 0,4 N/mm² nach [E DIN 18008-1] bestätigt werden (Kapitel 9.2).
- Untersuchungen zum Verlauf der Schneelast und der Folientemperatur ergaben für VSG-Scheiben in Isoliergläsern über beheizten Räumen (T = 20 °C) eine untere Grenze des Bemessungswerts von G = 0,1 N/mm². Für schneebelastete VSG-Scheiben mit direktem Kontakt zur Außenluft ergab sich für die Folie mit der geringsten Steifigkeit ein Bemessungswert von G = 0,4 N/mm² (Kapitel 9.2).

10.2 Ausblick auf weitere Forschungen

Aus dem Versuchsprogramm ergeben sich folgende Fragestellungen für weitere Untersuchungen an Verbundgläsern mit PVB oder auch anderen Materialien:

- Die angegebene Formel für den zeit- und temperaturabhängigen Verlauf des Schubmoduls wurde durch die Kriechversuche nur für Belastungszeiten bis ungefähr 1 Monat bestätigt. Für den Nachweis des Schubmoduls bei längeren Belastungsdauern, wie z. B. Schnee, sind deshalb mehrmonatige Kriechversuche notwendig. Diese können auf Temperaturen von 0 °C < T ≤ 20 °C beschränkt werden.
- Um realistische Aussagen zur langfristigen Alterungsbeständigkeit treffen zu können, müssten die hier beschriebenen Versuche mit Probekörpern durchgeführt werden, die mehrere Jahre bei natürlicher Bewitterung im Außenbereich gelagert wurden. Diese Probekörper könnten auch aus bestehenden Verglasungen entnommen werden.
- Aufgrund des Einflusses des Eisengehalts der Glasscheiben auf die Energie der eindringenden Sonnenstrahlung im UV-Bereich sollte untersucht werden, ob polymere Zwischenlagen in Verbundglas mit eisenarmen Glas (UV-B-Anteil) eher altern als in Verbundglas mit normalen Eisengehalt (fast ausschließlich UV-A-Strahlung).
- Für den Bemessungswert des Schubmoduls in schneebelasteten VSG-Scheiben im Außenbereich fehlen reale Messungen der Folientemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

- Der Einfluss eindringender Feuchtigkeit auf das Tragverhalten von Elementen aus Verbundglas wurde hier nur an einigen ausgewählten Scheiben mit linearer Plattenberechnung untersucht. Hierzu sind weitere Parameterstudien in Abhängigkeit der Größe das Bauteils, der Lagerungsart und des Membranspannungszustands erforderlich. Ziel sollte die Bestimmung eines Abminderungsfaktors für den Schubmodul der Zwischenfolie sein.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsmethoden können als Grundlage für die Ermittlung des Steifigkeitsverhaltens und der Alterungsbeständigkeit weiterer PVB-Folien oder auch anderer, neuer Zwischenlagen dienen. Biegeversuche mit Verbundglasbalken zur Untersuchung der Alterung oder zum Vergleich des Steifigkeitsverhaltens unterschiedlicher Folienprodukten können dabei auf den Temperaturbereich des Glasübergangs bzw. dem Erweichungsbereich der zu untersuchenden Folie beschränkt werden (bei PVB-Folien ≈ 20 °C). Bei anderen Temperaturen sind geringe Änderungen des Schubmoduls bei kurzen Belastungsdauern mit Biegeversuchen i. d. R. nicht messbar.

Alle bisherigen Versuche zur Untersuchung der Alterungseinflüsse in Verbundsicherheitsglas sind i. d. R. mechanischer Natur gewesen, welche ohne Kenntnis der Zusammensetzung der Folien und der chemisch-physikalischen Alterungsprozesse durchgeführt worden sind. Mit diesen Versuchen können also nur die Auswirkungen zeitlich begrenzter Bewitterungen auf die mechanischen Eigenschaften von Probekörpern gemessen werden. Ohne Kenntnis des Gehalts an Stabilisatoren in den PVB-Folien und deren Wirksamkeit bei dauerhafter Bestrahlung hinter Glas, kann z. B. keine Aussage über das Langzeitverhalten von Verbundsicherheitsglas bei langjähriger Sonneneinstrahlung getroffen werden. Für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen neuer Folien sollten deshalb neben der mechanischen Prüfung auch chemisch-physikalische Untersuchungen zur Alterungsbeständigkeit und zum Diffusionsverhalten der Feuchtigkeit in der Folie durchgeführt werden.

Literatur

[Aguilar 2005] Aguilar, J., Gomez-Dasa, O., Brito, L., Nair, M.T.S, Nair, P.K., 2005. Optical and mechanical characteristics of clear and solar control laminated glass using zinc sulphide and copper sulphide thin films. *Surface & Coatings Technology*. 200 (2005), 2557-2565

[Albrecht 2000] Albrecht, G., Gräf, H., Siebert, G., 2000. Das Verhalten von Verbundsicherheitsglas unter dynamischen Beanspruchungen. *VDI-Berichte*. Nr. 1527, 153-160

[Arbab 2005] Arbab, M., Shelestak, L.J., Harris, C.S., 2005. Value-Added Flat-Glass Products for the Building, Transportation, Markets, Part 1. *American Ceramic Society Bulletin*

[Internet], 01/2005. http://www.ceramicbulletin.org/glass00.asp

[Behr 1993] Behr, R., Minor, J., Norville, H., 1993. Structural Behaviour of Architectural Laminated Safety Glass. *Journal of Structural Engineering*. 119 (1), 202-222

[Behrendt 1997] Behrendt, B., Hübert, Th., 1997. Zerstörungsfreie Materialprüfung an Flachglas mit Ultraschall. *DACH-Zeitung*. 06/1997

[Internet], 02/2005. http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach.htm

[Bennison 1999] Bennison S., Jagota, A., Smith, A., 1999. Fracture of Glass/Poly(vinyl butyral) (Butacite®) Laminates in Biaxial Flexure. *Journal of the American Ceramic Society*. 82(7), 1761-1770

[BfS 2000] Steinmetz, M.(Hrsg.), 2000. *Solare terrestrische UV-Strahlung in Deutschland 2000. Jahresbericht über das solare UV-Messnetz von BfS/UBA*. Jahresbericht Bundesamt für Strahlenschutz und Umwelt-Bundesamt

[Blank 1979] Blank, K., 1979. Thermisch vorgespanntes Glas - Teil 1. *Glastechnische Berichte*. 52 (1), 1-13.

[Blank 1993] *Dickenbemessung von vierseitig gelagerten rechteckigen Glasscheiben unter gleichförmiger Flächenlast*. 2. Aufl. Forschungsbericht, Institut für konstruktiven Glasbau, Heft 3.

[Blumthaler 1997] Blumthaler, M., Ambach, W., Ellinger, R., 1997. Increase in solar UV radiation with altitude. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 39, 130-134

[Bohmann 1999] Bohmann D., 1999. *Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben*. Dissertation. Fakultät für Bauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Schriftenreihe Stahlbau - RWTH Aachen, Heft 43, Aachen: Shaker-Verlag.

[Brüller 1976] Brüller, A., 1976. Einfache temperatur- und spannungsabhängige Bestimmungsgleichungen für das Kriechen von Polymeren. *Rheol. Acta*. 15, 143-147.

[Bucak 2006] Bucak, Ö., Schuler, C., Meißner, M., 2006. Verbund im Glasbau - Neues und Bewährtes. *Stahlbau*. 75 (6), 529-543

[Butvar 2006] Solutia, 2006. *Polyvinyl Butyral Resin. Properties & Uses*. [Internet], 11/2006. http://www.butvar.com

[Crank 1975] Crank, J., 1975. *Mathematics of Diffusion*. 2nd Edition. Oxford: Clarendon Press

[Christoffer 1990] Christoffer, J., 1990. *Ermittlung von Schneelasten in Abhängigkeit von der Liegedauer*. Abschlussbericht 10/1990. Deutscher Wetterdienst Zentralamt Offenbach

[Davis 1983] Davis, A., Sims, D., 1983. *Weathering of Polymers*. London: Applied Science Publishers.

[DeJackome 1997] DeJackome, G.E., 1997. Moisture Induced Delaminations in Automotive Windscreens. In: *Glass Processing Days, 13-15 Sept. 1997, Tampere*

[D'Haene 2001] D'Haene, P., 2001. Structural Glazing - Creep Deformation of PVB in Architectural Applications. In: *Glass Porcessing Days, 18-21 June 2001, Tampere*

[Dolezl 1978] Dolezel B., 1978. *Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi*. (Hrsg. Prof. Dr.-Ing. C.-M. von Meysenbug). München, Wien: Carl Hanser Verlag

[Duffie 1991] Duffie, J., Beckman, W., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.

[Dupont 2006] Dupont, 2006. [Internet], 11/2006. http://www.dupont.com/safetyglass/en/productServices/index.html

[Duser 1999] v. Duser A., Jagota, A., Bennison S., 1999. Analysis of Glass/Polyvinyl Butyral Laminates Subjected to Uniform Pressure. *Journal of Engineering Mechanics*. 125(4), 435-442

[Ensslen 2004] Ensslen, F., Paschke, J., 2004. Untersuchungen zum Einfluss natürlicher und künstlicher Bewitterung auf den Schubmodul von Verbund-Sicherheitsglas. *Bautechnik*. 81 (2), 73-81

[Ensslen 2005] Ensslen, F., 2005. *Zum Tragverhalten von Verbund-Sicherheitsglas unter Berücksichtigung der Alterung der Polyvinylbutyral-Folie*. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum

[Feister 1992] Feisert, U., Grasnick, K.-H., 1992, Solar UV radiation measurements at Potsdam (52°22' N, 13°5' E). *Solar Energy*. 49 (6), 541-548

[Feister 2002] Feister, U., Jäkel, E., Gericke, K., 2002. Parameterization of daily global ultraviolet irradiation. *Photochemistry and Photobiology*. 76 (3), 281-293

[Ferry 1970] Ferry, J.D., 1970. *Viscoelastic Properties Of Polymers*. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.

[Fischer 1995] Fischer, L., 1995. Bestimmung des 5-% Quantils im Zuge der Bauwerksprüfung, Bezugnahme auf DIN-Normen und Eurocodes. *Bautechnik* 72 (11), 712-722

[Flügge 1975] Flügge, W., 1975. *Viscoelasticity*. 2nd Edition. New York: Springer-Verlag

[Gerhardt 1986] Gerhardt, H., Kramer, C., 1986. Wind induced loading cycle and fatigue testing of lightweight roofing systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 23 (1986), 237-247

[Gerhardt 1992] Gerhardt, H., Kramer, C., 1992. Wind safety of single-ply roofs under time varying wind load. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 41-44 (1992), 1515-1524.

[Glashandbuch 2005] *Glashandbuch 2005*. Gelsenkirchen: Flachglas MarkenKreis GmbH [Internet], 01/2006. http://www.flachglas-markenkreis.de

[Glebov 1998] Glebov, L., Boulos, E., 1998. Absorption of iron and water in the Na_2O-CaO-MgO-SiO_2 glasses. II. Selection of intrinsic, ferric, and ferrous spectra in the visible and UV regions. *Journal of Non-Chrystalline Solids*. 242, 49-62

[Gräf 2003] Gräf, H., 2003. *Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbund-sicherheitsglas bei linienförmiger und punktueller Lagerung.* Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau, Technische Universität München

[Güsgen 1998] Güsgen, J., 1998. *Bemessung tragender Bauteile aus Glas*. Dissertation. Fakultät für Bauwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Schriftenreihe Stahlbau - RWTH Aachen, Heft 42, Aachen: Shaker-Verlag

[Gugumus 1995] Gugumus, F., 1995. The performance of light stabilizers in accelerated and natural weathering. *Polymer Degradation and Stability*. 50, 101-116

[Haldimann 2002] Haldimann, M., 2002. *Zuverlässigkeitsbasierte Normenkalibrierung zur Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten der neuen Schweizer Stahlbaunorm SIA 263*. Diplomarbeit. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich

[Hay 2002] Hay, J., Dhaliwal, A., 2002. The characterization of polyvinyl butyral by thermal analysis. *Thermochimica Acta*. 391, 245-255

[Hecht 1989] Hecht, E., 1989. *Optik*. 2. Auflage. Bonn: Addison-Wesley

[Hoffmann 1987] Hoffmann, K., 1987. *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

[Holberndt 2005] Holberndt, T., 2006. *Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für den Nachweis von stabilitätsgefährdeten Glasträgern unter Biege-beanspruchung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag

[Holmes 1997] Holmes, J., 1997. Equivalent time averaging in wind engineering. *Journal of Wind Engineering an Aerodynamics*. 72, 411-419

[Hooper 1973] Hooper, J., A., 1973. On the Bending of Architectural Laminated Glass. *International Journal of Mechanical Science*. 15, 309-323

[Jagota 1999] Jagota, A., Bennison, S., Smith, A., Foss, R., Van Duser, A., 1999. Mechanical Deformation and Fracture of Glass/PVB Laminates. In: *Glass Processing Days, 13-16 June 1999, Tampere*

[Jellinek 1978] Jellinek H. (Hrsg.), 1978. *Aspects of degradation and stabilization of polymers*. Amsterdam: Elsevier

[Kaidbey 1987] Kaidbey, K., 1987. Comparison of sun protection factors obtained with xenon solar simulator and an Ultravitalux lamp. *Photodermatology*. 4, 154-159

[Kasper 2005] Kasper, R., 2005. *Tragverhalten von Glasträgern*. Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

[Keller 1999] Keller, U., Mortelmans, H., 1999. Adhesion in Laminated Safety Glass – What makes it work ?. In: *Glass Processing Days, 13-16 June 1999, Tampere*

[Klima 2005] Müller-Westermeier, G., Riecke, W., 2005. Klimastatusbericht des DWD, 2005. Deutscher Wetterdienst.

[Internet], 05/2006. http://www.ksb.dwd.de

[Kraus 2004] Kraus, O., 2004. *Systemzuverlässigkeit von Hallenrahmen aus Stahl und zeitvarianten Belastungen*. Dissertation. Schriftenreihe Stahlbau - Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Heft 51, Shaker-Verlag

[Krautkrämer 1986] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., 1986. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. Aufl. Berlin: Springer-Verlag

[Krebs 1999] Krebs, Ch., Avondet, M.A., Leu, K., 1999. *Langzeitverhalten von Thermoplasten. Alterungsverhalten und Chemikalienbeständigkeit*. München: Carl Hanser Verlag

[Kreuzinger 2001] Kreuzinger, H., Scholz, A., 2001. *Wirtschaftliche Ausführungs- und Bemessungsmethode von ebenen Holzelementen (Brücken, Decken, Wände).* Schlussbericht, 2. Auflage. Institut für Baustoffe und Konstruktion, Fachgebiet Holzbau, Technische Universität München.

[Kühlmeyer 2001] Kühlmeyer, M., 2001. *Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure. Mit Praxisbeispielen.* Berlin: Springer-Verlag

[Kutterer 2003] Kutterer, M., 2003. *Verbundglasplatten – Näherungslösungen zur Berücksichtigung von Schubverbund und Membrantragwirkung.* Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Leichtbau Entwerfen Konstruieren. Aachen: Shaker-Verlag

[Lee 2001] Lee, J., Juang, Y., Koelling, K., 2001. Rheological Analysis of Polyvinyl Butyral near the Glass Transition Temperature. *Polymer Engineering and Science*. 41 (2), 275-292

[Lutterbeck 1984] Lutterbeck, K., 1984. *Das Verhalten von Kunststoffen unter dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte und – temperatur*. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

[Matzenmiller 1999] Matzenmiller, A., 1999. *Viskoelastizität und Viskoplastizität - Relaxationsvorgänge in Glas*. Seminarunterlage (überarbeitete und erweiterte Fassung der gleichnamigen Seminarunterlagen zum Vortrag von Dr. H. Loch, Fa. Schott Glaswerke). Institut für Mechanik im Fachbereich Maschinenbau der Universität Gesamthochschule Kassel

[Mahendran 1995] Mahendran, M., 1995. Towards an appropriate fatigue loading cycle for roof claddings in cyclone prone areas. *Engineering Structures*. 17 (7), 476-484.

[Meissner 2005] Bucak, Ö., Meißner, M., 2005. *Trag- und Resttragfähigkeits-untersuchungen an Verbundglas mit der Zwischenlage „SentryGlas® Plus*. Abschlußbericht AiF-Forschungsprojekt, München

[Menges 2002] Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., Schmachtenberg, E. *Werkstoffkunde Kunststoffe*. 5. Auflage. München, Wien, Carl Hanser Verlag

[Möhler 1956] Möhler, K., 1956. *Über das Tragverhalten von Biegeträgern und Druckstäben mit zusammengesetzten Querschnitten und nachgiebigen Verbindungsmitteln*. Habilitation, TH Karlsruhe.

[Nakagami 2003] Nakagami, Y., 2004. *Probabilistic Dynamics of Wind Excitation on Glass Facade*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie.

[Nastran 2001] MSC. visualNastran for Windows 2001. MSC.Software Corporation, Los Angeles, USA

[NCDC 2006] National Climate Data Center, National Oceanic & Athmospheric Administration, U.S.Department of Commerce, 2006. [Internet], 10/2006. http://www.ncdc.noaa.gov

[Niemann 2003] Niemann, H.-J., Peil, U. Windlasten auf Bauwerke. In: *Stahlbaukalender 2003*. Berlin: Ernst- und Sohn Verlag

[O'Connell 1997] O'Connell, P., McKenna, G., 1997. Large Deformation Response of Polycarbonate: Time-Temperature, Time-Aging Time, and Time-Strain Superposition. *Polymer Engineering and Science*. 37 (9), 1485-1495

[Petzold 1990] Petzold, A., Marusch, H. , Schramm, B., 1990. *Der Baustoff Glass*. 3.Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen

[Pickett 1997] Pickett, J., Webb, K., 1997. *Calculated and measured outdoor uv doses*. Technical Information Series, GE Research & Development Centre

[Pütz 1977] Pütz, D., 1977. *Kunststoffe in korrosiven Flüssigkeiten – dargestellt an den Beispielen PMMA und GF-UP*. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

[Rabek 1996] Rabek, J., 1996. *Photodegradation of Polymers. Physical characteristics and applications*. Berlin: Springer-Verlag

[Reinöhl 1981] Reinöhl, V. , Sedlar, J., Navratil, M., 1981. Photo-Oxidation of Poly(Vinylbutyral). *Polymer Photochemistry*. 1, 165-175

[Roik 1970] Roik, K., Sedlacek, G., 1970. Erweiterung der technischen Biege- und Verdrehtheorie unter Berücksichtigung der Schubverformung. *Die Bautechnik*. 1/1970, 20-32

[Sabaa 1995] Sabaa, M., El-Din, N., 1995. Thermal degradation of poly(vinyl butyral) laminated safety glass. *Polymer Degradation and Stability*. 47, 283-288

[Sachs 1997] Sachs, L., 1997. *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden*. 8. Auflage. Berlin: Springer-Verlag

[Saflex 2006] Saflex, 2006. [Internet], 11/2006. http://www.saflex.com

[Savineau 2001] Savineau, G., Durability and Postbreakage Behaviour of Laminated Safety Glas . In: *Glass Processing Days, 18-21 June 2001, Tampere*

[Schneider 2005] Schneider, F., 2005. *Ein Beitrag zum inelastischen Materialverhalten von Glas.* Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie

[Scholze 1988] Scholze, H., 1988. *Glas. Natur, Struktur und Eigenschaften*. 3. Auflage Berlin: Springer-Verlag

[Schuler 2003] Schuler, Ch., 2003. *Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung*. Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau, Technische Universität München

[Schuler 2004] Schuler, C., Bucak, Ö., Albrecht, G., Sackmann, V., Gräf, H., 2004. Time and Temperature Dependent Mechanical Behaviour and Durability of Laminated Safety Glass. *Structural Engineering International*. 14 (2), 80-83

[Schulze 1970] Schulze, R., 1970. *Strahlenklima der Erde*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopf Verlag

[Schutte 1999] Schutte, A., Hanenkamp, W., 1999. Zum Tragverhalten von Verbund- und Verbundsicherheitsglas bei erhöhten Temperaturen unter Einwirkung von statischen und dynamischen Lasten. *Bautechnik*. 76 (1), 49-63

[Sedlacek 2003/1] Sedlacek, G., Wellershoff, F., Düster, H., 2003. *Bemessungs-schubmodul für PVB-Folien in Verbundsicherheitsglas unter Klimalasten in Deutschland*. Bericht G 2003/10-06. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

[Sedlacek 2003/2] Sedlacek, G., Wellershoff, F., 2003. *Anwendungsvorschlag zur Bemessung von Verbundsicherheitsglas - Gutachterliche Beurteilung*. Bericht G 2003/10-05. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

[Siebert 1998] Siebert, G.,1999. *Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im konstruktiven Ingenieurbau*. Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau, Technische Universität München

[Simiu 1996] Simiu, E., Scanlan, R., 2003. *Wind Effects On Structures: An Introduction To Wind Engineering*. 3. Auflage. New York: John Wiley & Sons

[S-LEC 2006] Sekisui, 2006. [Internet], 11/2006. http://www.s-lecfilm.com

[SMARTS2] Gueymard, Ch., 1995. SMARTS2, *A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine. Algorhithms and performance assessment.* Florida Solar Energy Center. Programm-Version SMARTS 2.9.5
[Internet], 09/2006, http://rredc.nrel.gov/solar/models/SMARTS/

[Sobek 1998] Sobek, W., Kutterer, M., Messmer, R., 1998. *Rheologisches Verhalten von PVB im Schubverbund*. Forschungsbericht 4/98, Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart

[Sobek 2000] Sobek, W., Kutterer, M., Messmer, R., 2000. Untersuchungen zum Schubmodul bei Verbundsicherheitsglas – Ermittlung des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls von PVB. *Bauingenieur*. 75, 41-46

[Sobek 2001] Sobek, W., 2001. *Temperaturuntersuchungen an Verbundsicherheits-glasscheiben unter Sonneneinstrahlung*. Versuchsbericht 01/2001, Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus, Universität Stuttgart

[Sofistik 2005] SOFiSTiK Statikprogramme Version 21.0, 2005. SOFiSTiK AG, Oberschleissheim

[Stamm 1974] Stamm, K., Witte, H., 1974. *Ingenieurbauten, Bd. 3: Sandwichkonstruktionen*. Wien: Springer-Verlag

[Steinmetz 2006] Persönliche Kommunikation. Strahlungsdaten des UV-Messnetzes der BfS, Neuherberg. Zeitraum 01. Juni 2004 bis 31. Dezember 2005. Bereitstellung durch Herrn Dr. M. Steinmetz, Bundesamt für Strahlenschutz

[Struik 1977] Struik, L. 1977. *Physical aging in amorphous polymers and other materials*. Dissertation. Technische Hochschule Delft. Amsterdam: Elsevier

[Sundararajan 1999] Sundararajan, P. R.., 1999. *Poly(vinyl butyral)*. Polymer Data Handbook. Oxford University Press
[Internet], 12/2004, http://www.oup-usa.org/pdh (Zugang über: http://library.queensu.ca/webeng/guides/polymer/polymer_data.htm)

[Thinius 1971] Thinius, K., 1971. *Stabilisierung und Alterung von Plastwerkstoffen*. Band 2. Berlin: Akademie-Verlag

[Troen 1990] Troen I., Petersen E., 1990. *Europäischer Windatlas*. Roskilde: Ris/o National Laboratory, Meteorological and Wind Energy Department

[Troplast 1998] Troplast AG, Troisdorf, Informationsunterlagen PVB, Stand 1998.

[Trosifol 2006] Trosifol, 2006. [Internet], 11/2006. http://www.trosifol.com

[Vickery 2003] Vickery, P., Lin, J., Twisdale, L., 2003. Analysis of hurricane pressure cycling following missile impact for residential structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 91, 1703–1730

[Webb 1999] Webb, A., Weihs, P., Blumthaler, M,, 1999. Spectral UV irradiance on vertical surfaces: A case study. *Photochemistry and Photobiology*. 69 (4), 464-70

[Wellershoff 2006] Wellershoff, F., 2006. *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen.* Dissertation. Lehrstuhl für Stahlbau, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker Verlag

[Wellershoff 2007] Wellershoff, F., 2007. Bemessungsschubmodulwerte für Verbundglasscheiben. *Stahlbau*. 76(3), 177-188

[Weng 2002] Weng, G.J., Zheng, S.F., 2002. A new constitutive equation for the long-term creep of polymers based on physical aging. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 21, 411-421

[Wölfel 1987] Wölfel, E., 1987. Nachgiebiger Verbund – Eine Näherungslösung und deren Anwendungsmöglichkeiten. *Stahlbau*. 6, 173-180

[Wyatt 2004] Wyatt, T., 2004. Determination of gust action stress cylce count for fatigue checking of line-like structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 92, 359-374

[Xu 1995] Xu, Y., 1995. Determination of Wind-Induced Fatigue Loading on Roof Cladding. *Journal of Engineering Mechanics*. 121 (9), 956 - 963

[Young 2001] Young R., J., 2001. *Polymer Glasses, Mechanical Properties of: Yielding.* Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 7330-7341, Elsevier

[Zhou 2002] Zhou, Y., Kijewski, T., Kareem, A., 2002. Along-Wind Load Effects on Tall Buildings: Comparative Study of Major International Codes and Standards. *Journal of Structural Engineering*. 128 (6), 788-796

Technische Regeln

[Bauregelliste DIBt 2006] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2006. *Bauregelliste A Teil 1*, Ausgabe 2006/1, DIBt Mitteilungen, Sonderheft 33. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik

[DIN 1055-4] DIN 1055, Teil 4, März 2005. Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten

[DIN 1249-10] DIN 1249, Teil 10, August 1990. *Flachglas im Bauwesen. Chemische und Physikalische Eigenschaften*

[DIN 4108-3] DIN 4108, Teil 3, Juli 2001. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*

[DIN 4710] DIN 4710, Januar 2003. *Statistiken meteorologischen Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland*

[DIN 5031-7] DIN 5031, Teil 7, Januar 1984. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik. Benennung der Wellenlängenbereiche*

[DIN 50035] DIN 50035, Teil 1-2, März, April 1989. *Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien*

[DIN 52338] DIN 52338, September 1985. *Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen. Kugelfallversuch für Verbundglas*

[DIN EN 673] DIN EN 673, Juni 2003. *Glas im Bauwesen. Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren*

[DIN EN 1288-3] DIN EN 1288, Teil 3, September 2000. *Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas, Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren)*

[DIN EN 1990] DIN EN 1990, Oktober 2002. *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

[DIN EN 12524] DIN EN 12524, Juli 2002. *Baustoffe und -produkte, Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswerte*

[DIN EN 12600] DIN EN 12600, April 2003. *Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch. Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas*

[DIN EN 14449] DIN EN 14449, Juli 2005. *Glas im Bauwesen. Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Konformitätsbewertung/Produktnorm*

[DIN EN ISO 527-1] DIN EN ISO 527, Teil 1, Juli 2003. *Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 1: Allgemeine Grundsätze*

[DIN EN ISO 527-3] DIN EN ISO 527, Teil 3, Juli 2003. *Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln*

[DIN EN ISO 4892-1] DIN EN ISO 4892, Teil 1, September 2001. *Kunststoffe. Künstliche Bestrahlung oder Bewitterung in Geräten. Teil 1: Allgemeine Anleitung*

[DIN EN ISO 12543-4] DIN EN ISO 12543, Teil 4, August 1998. *Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas. Teil 4: Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit*

[E DIN 18008-1] Entwurf DIN 18008, Teil 1, März 2006. *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln –Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*

[E DIN EN ISO 6946] Entwurf DIN EN ISO 6946, Juni 2005. *Bauteile - Wärmedurchlass-widerstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO/DIS 6946:2005)*

[TRAV 2003] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Januar 2003: *Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen*

[TRLV 2006] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), August 2006 (Entwurf): *Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen*

[VDI 3789-2] VDI 3789, Teil 2, Oktober 1994. *Umweltmeteorologie. Wechsel-wirkung zwischen der Atmosphäre und Oberflächen. Teil 2: Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung.* VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1

[VDI 3789-3] VDI 3789, Teil 3, Oktober 2001. *Umweltmeteorologie. Wechsel-wirkung zwischen der Atmosphäre und Oberflächen. Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich.* VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b

Anhang 1 : zu Kapitel 5.4, Ergebnisse der Kurzzeitversuche

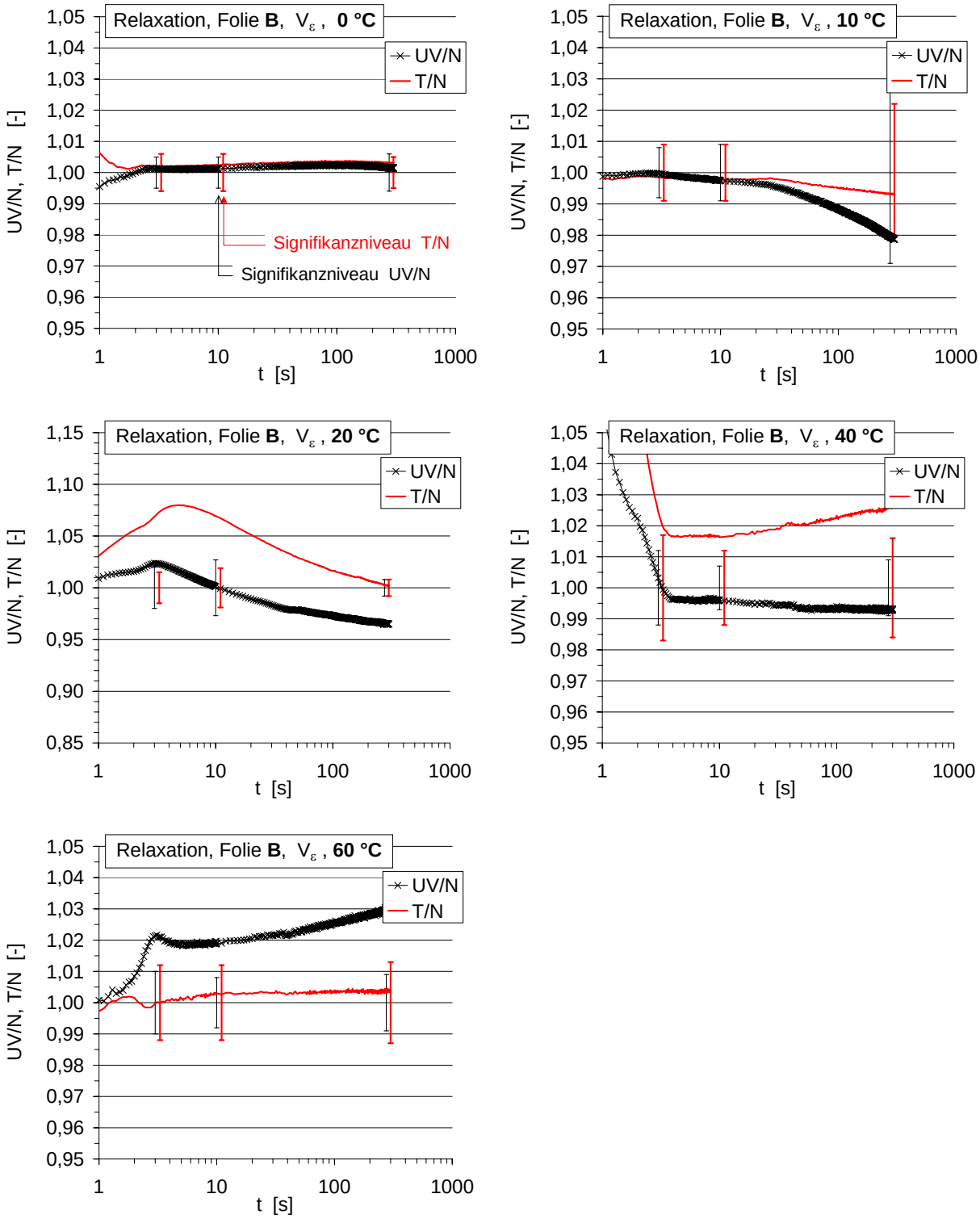


Bild A1-1: Relaxationsversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie B**: Verhältnis UV/N bzw. T/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. T zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

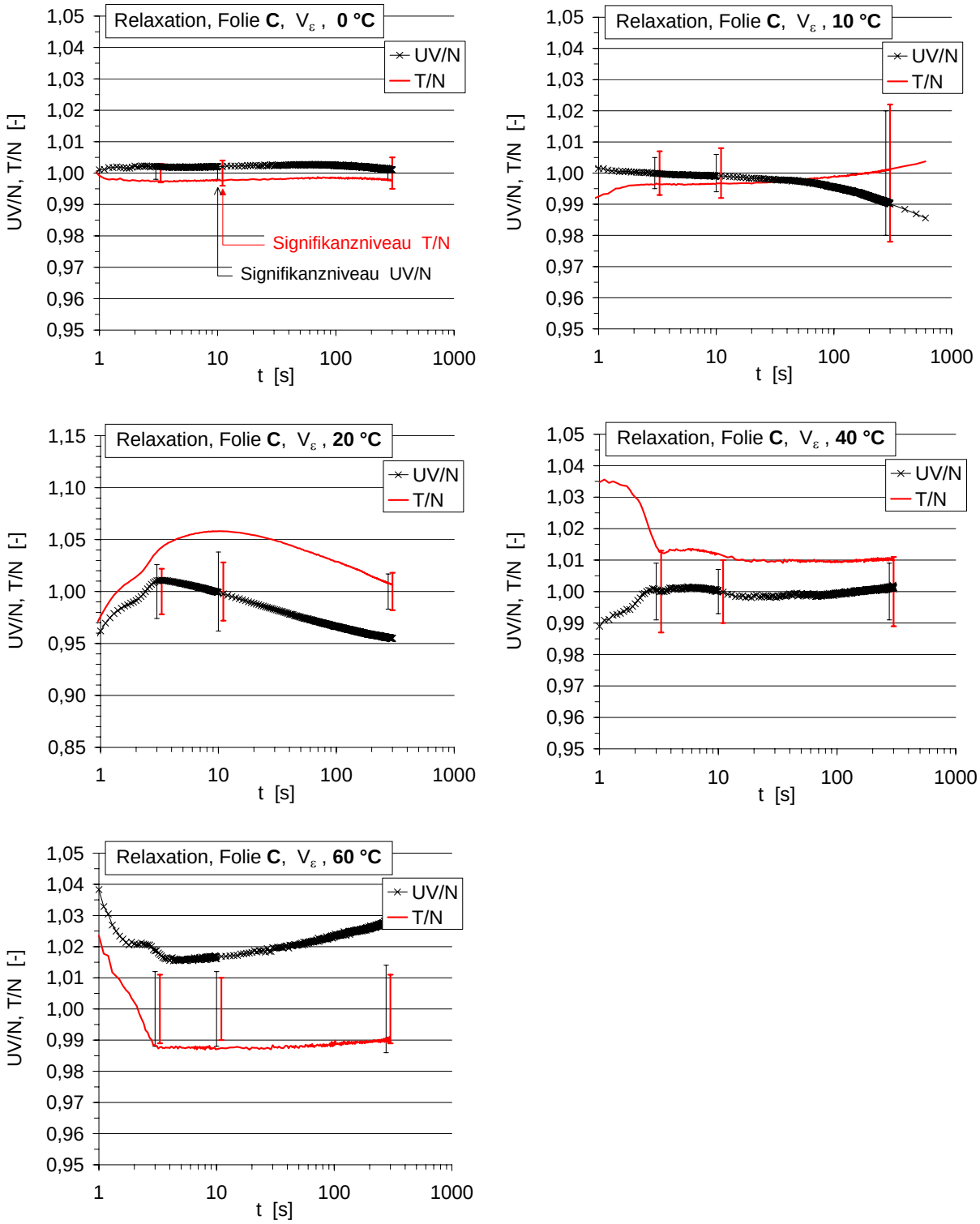


Bild A1-2: Relaxationsversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie C**: Verhältnis UV/N bzw. T/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. T zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

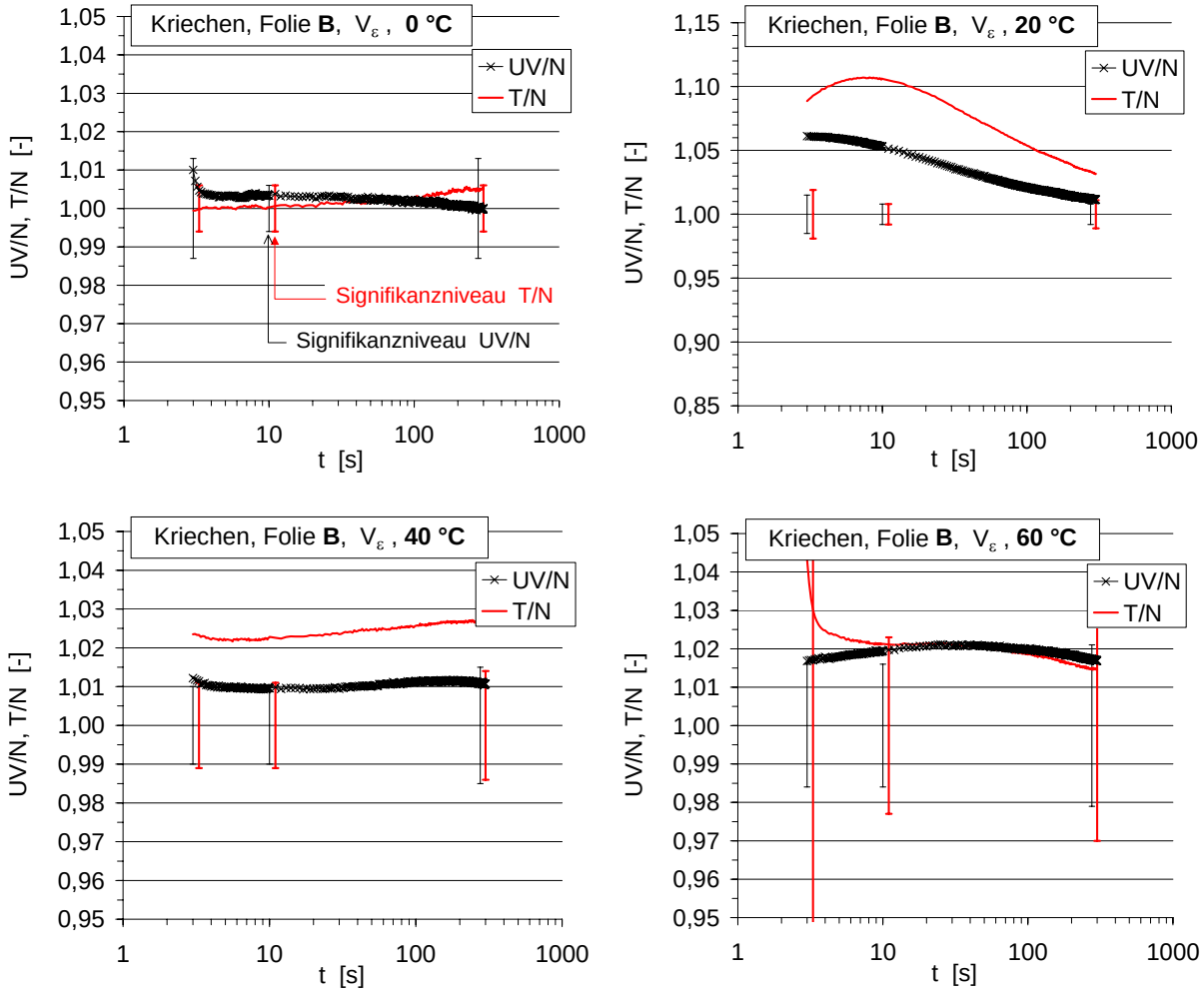


Bild A1-3: Kriechversuche bei 0 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie B**: Verhältnis UV/N bzw. T/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. T zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

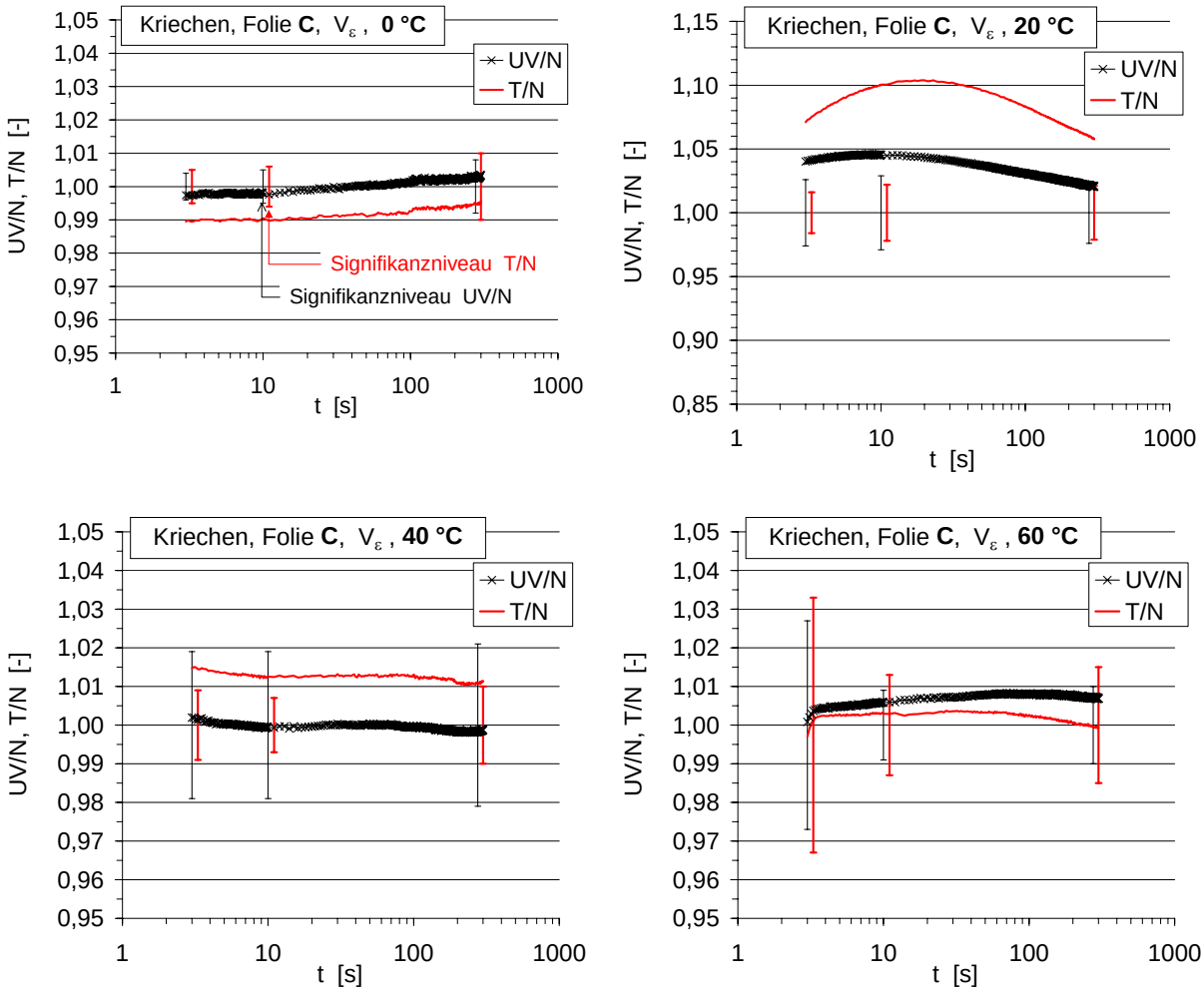


Bild A1-4: Kriechversuche bei 0 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie C**: Verhältnis UV/N bzw. T/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. T zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

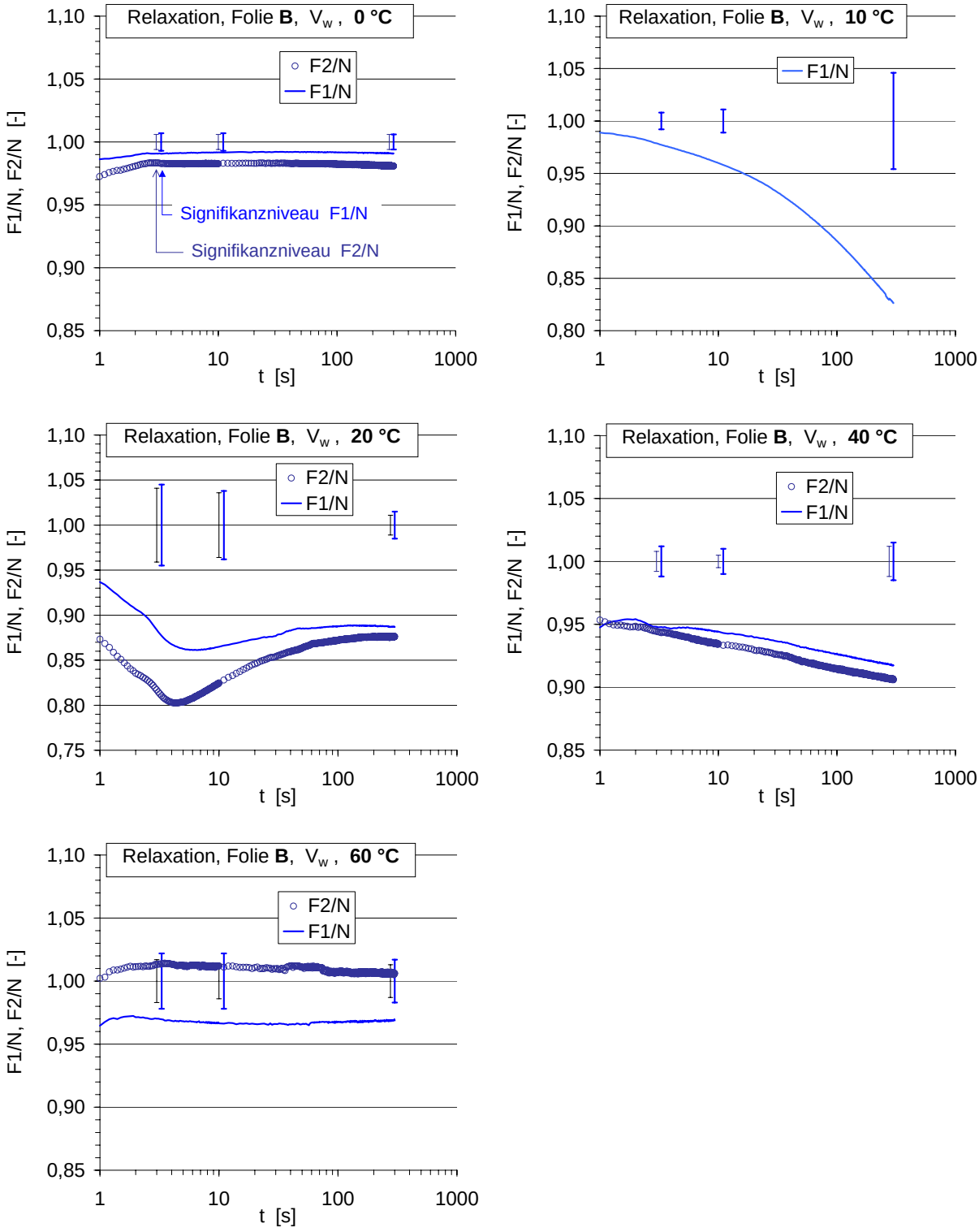


Bild A1-5: Relaxationsversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie B**: Verhältnis F1/N bzw. F2/N des Verbundfaktors V_w der Serien F1 bzw. F2 zum Verbundfaktor V_w der Serie N

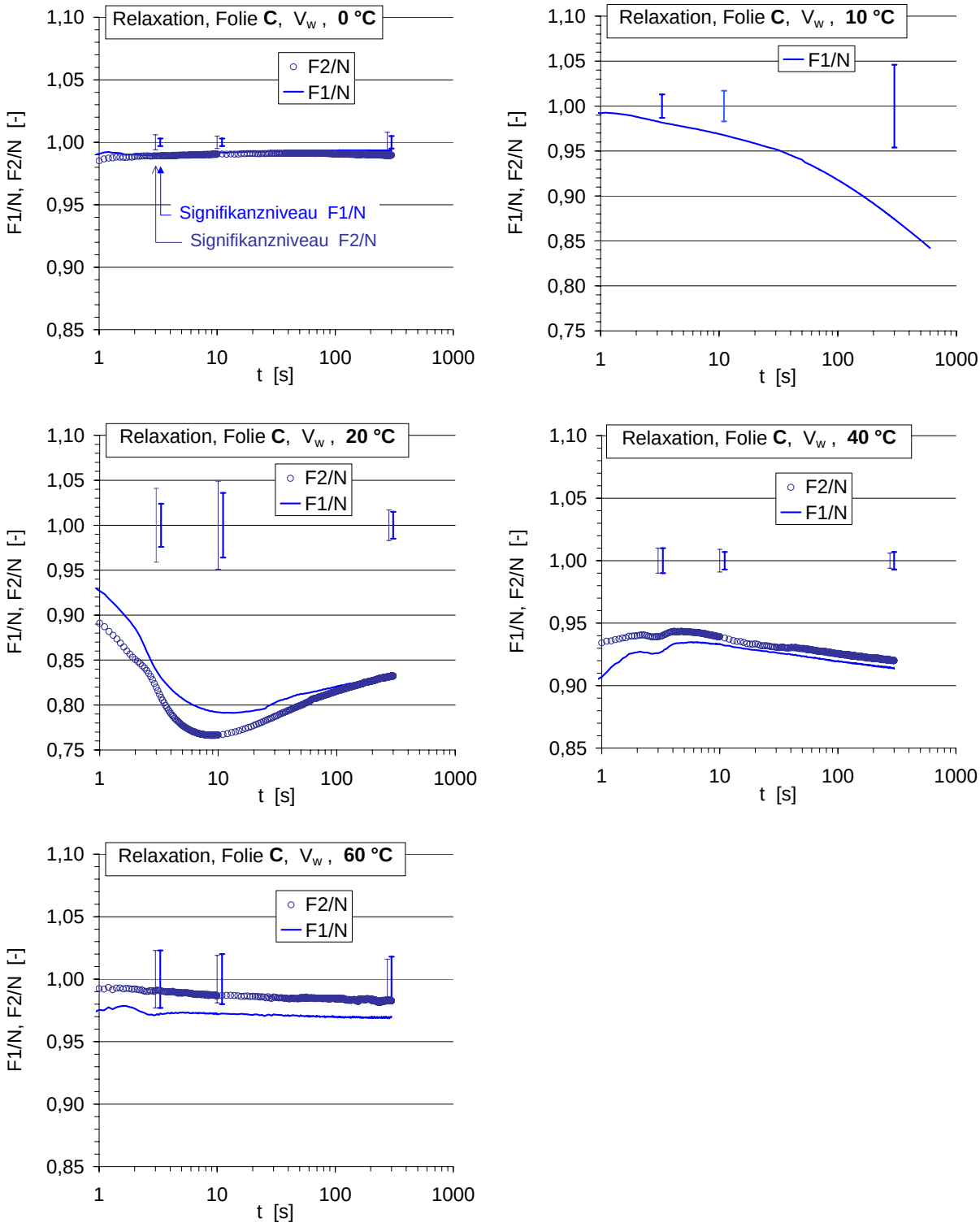


Bild A1-6: Relaxationsversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie C**: Verhältnis F1/N bzw. F2/N des Verbundfaktors V_w der Serien F1 bzw. F2 zum Verbundfaktor V_w der Serie N

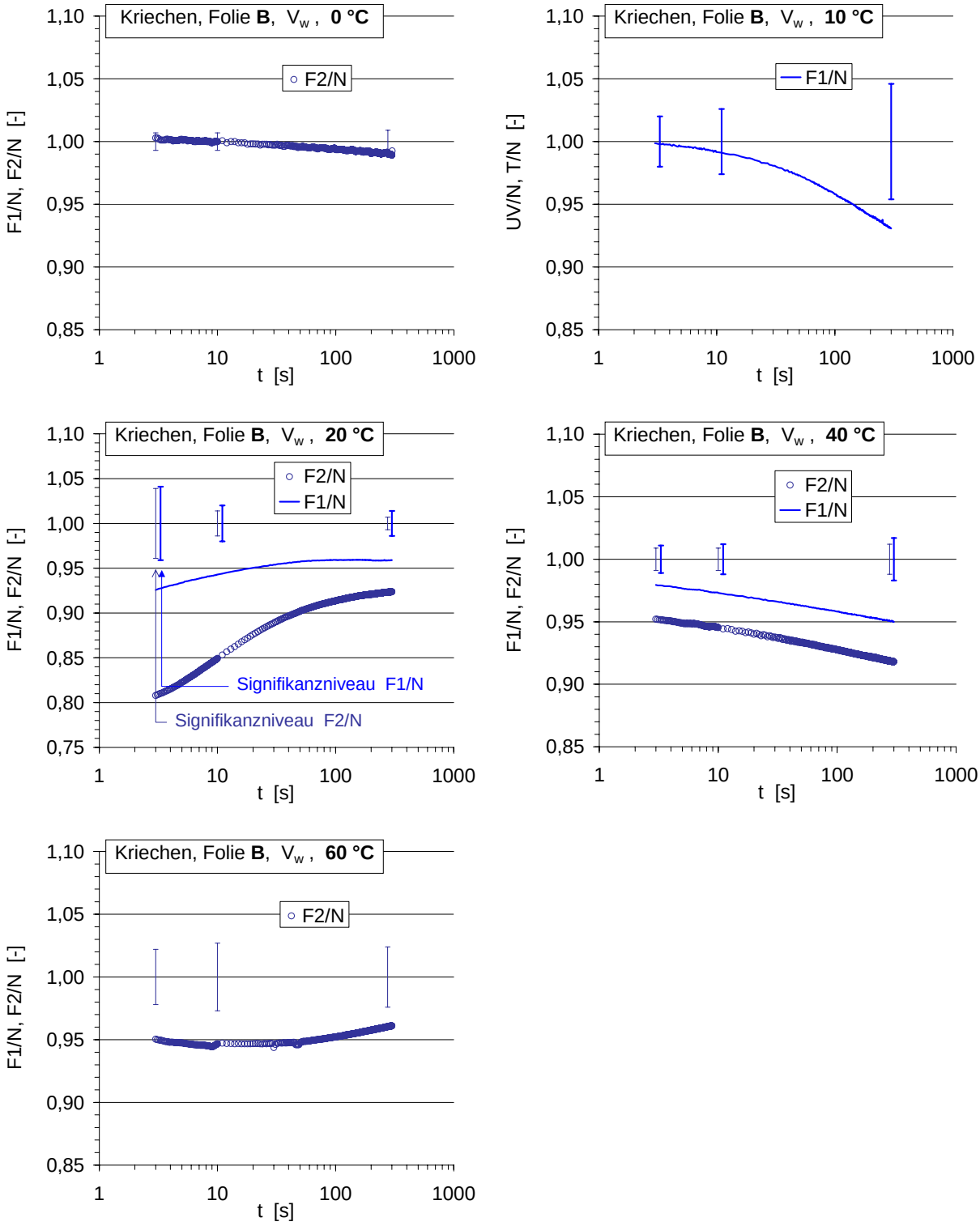


Bild A1-7: Kriechversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie B**: Verhältnis F1/N bzw. F2/N des Verbundfaktors V_w der Serien F1 bzw. F2 zum Verbundfaktor V_w der Serie N

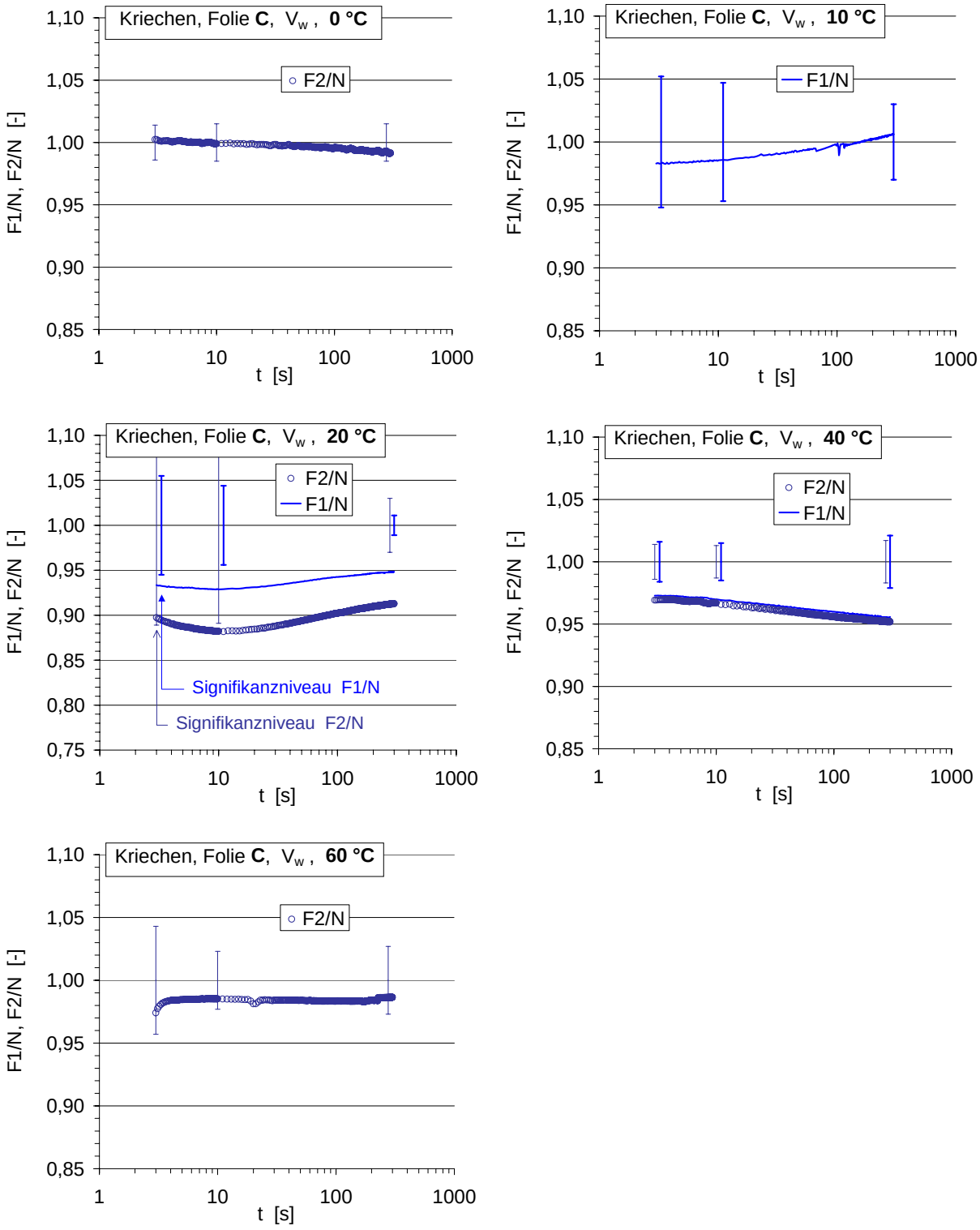


Bild A1-8: Kriechversuche bei 0 °C, 10 °C, 20 °C, 40 °C und 60 °C, **Folie C**: Verhältnis F1/N bzw. F2/N des Verbundfaktors V_w der Serien F1 bzw. F2 zum Verbundfaktor V_w der Serie N

Anhang 2 : zu Kapitel 5.5, Ergebnisse der Langzeitversuche

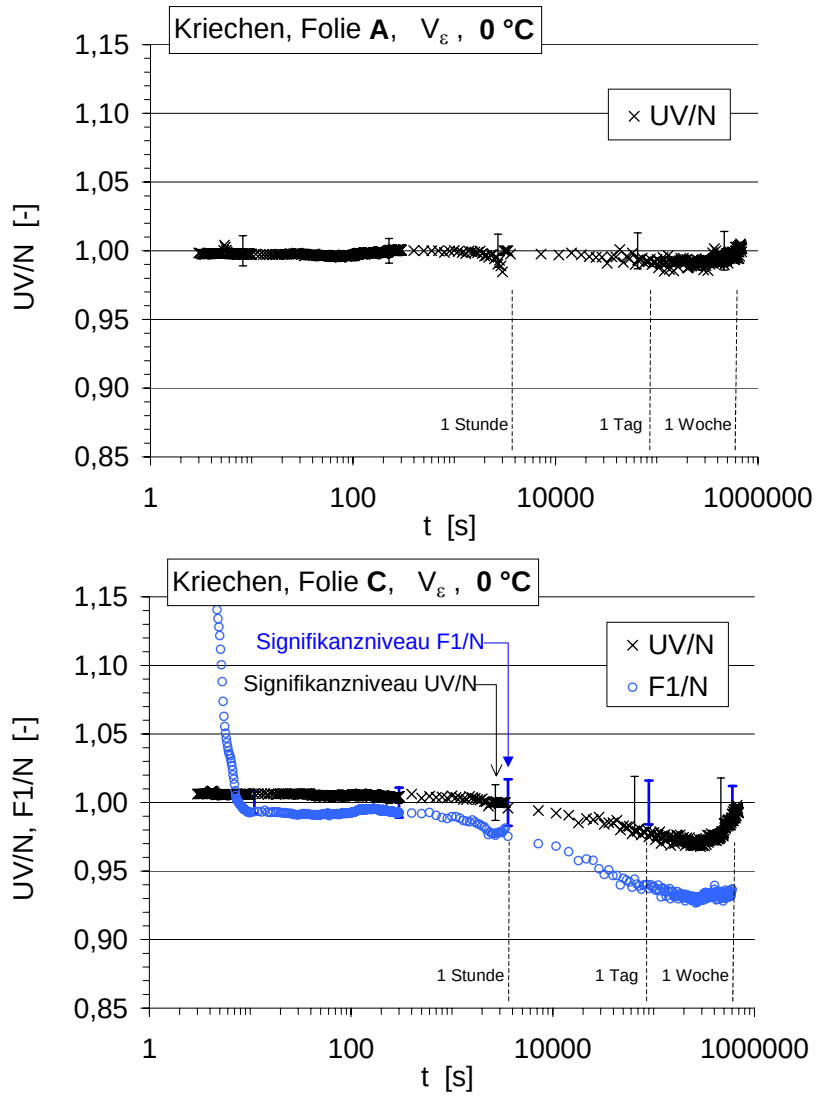


Bild A2-1: Langzeit-Kriechversuche bei 0 °C, **Folien A, C**: Verhältnis UV/N bzw. F1/N des Verbundfaktors V_ε der Serien UV bzw. F1 zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

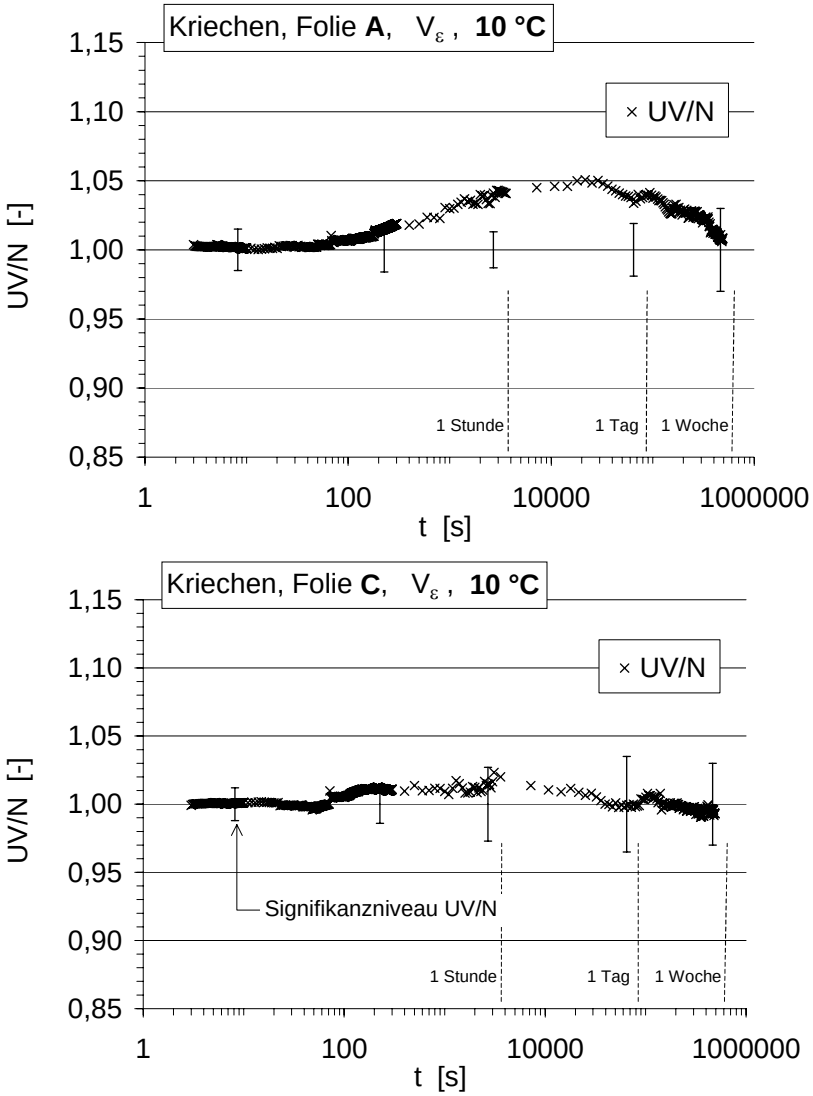


Bild A2-2: Langzeit-Kriechversuche bei 10 °C, **Folien A, C**: Verhältnis UV/N des Verbundfaktors V_ε der Serie UV zum Verbundfaktor V_ε der Serie N

Anhang 3 : zu Kapitel 6.4, Windlastkollektiv für VSG-Scheiben

Voraussetzungen und Rechenannahmen [DIN 1055-4], [Niemann 2003], [Zhou 2002] ... **:**

Windzone 2, Geländekategorie II (Binnenland) nach [DIN 1055-4], Einbauhöhe z = 100 m, Geschlossene Fassade Luvseite c_{pe} = 1,0, c_{pi} = 0, Nutzungsdauer 50 Jahre

Scheibe 3,2 x 3,2 m, kleinste mögliche Eigenfrequenz f_0 = 4,0 Hz (G_{PVB} mind. 0,5 N/mm²), logarithmisches Dämpfungsdekrement δ = 0,10

Mittlere Windgeschwindigkeit: $v_{m,10min} = v_{ref}\,(100/10)^{0,16} = 25(100/10)^{0,16} = 36$ m/s

Turbulenzintensität: $I_v(100\text{ m}) = \dfrac{\sigma_v}{v_m} = 0{,}13$

Wahrscheinlichkeitsdichte $p(v_m) \approx p(q_m)$ der Weibullverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit:

$$p(v_m) = \frac{\beta}{v_0}\left(\frac{v_m}{v_0}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{v_m}{v_0}\right)^{\beta}\right]$$

z = 100 m: München: v_0 = 6,2 m/s, β = 1,44, Hamburg: v_0 = 8,5 m/s, β = 2,42 [Troen 1990]

Normierte spektrale Dichte der Windgeschwindigkeit:

$$f\frac{S_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{6{,}8x}{(1+10{,}2x)^{5/3}} \qquad \text{mit } x = f\frac{L_i(z)}{v_{m,10\,min}} \qquad \text{und } L_i(z) = 300(z/300)^{0,26}$$

Quasistatischer Anteil der Böenreaktion τ_Q (Integrationsgrenze bei f_1)**:**

$$\left(\frac{\sigma_{\tau,Q}}{\tau_m}\right)^2 = 4\left(\frac{\sigma_v}{v_m}\right)^2 \int_0^{f_1} \chi_A^2(f)\frac{S_v(f)}{\sigma_v^2}df = 4\left(\frac{\sigma_v}{v_m}\right)^2 1{,}323 = 0{,}089$$

vereinfacht mit $\chi_A^2(f) \cong 1{,}0$

Resonanzanteil der Böenreaktion τ_R mit f = f_1:

$$\left(\frac{\sigma_{\tau,R}}{\tau_m}\right)^2 = 4\left(\frac{\sigma_v}{v_m}\right)^2 \chi_A^2(f_1)\frac{S_v(f_1)}{\sigma_v^2}\frac{\pi^2}{2\delta}f_1 = 4\left(\frac{\sigma_v}{v_m}\right)^2 0{,}355 = 0{,}024 \quad \text{mit } \chi_A^2(f_1) \cong 0{,}44$$

$\chi_A^2(f_1)$ aus numerischer Integration über die Fläche nach [Holmes 1997]

Resonanzfaktor:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{g_Q^2 \left(\frac{\sigma_{\tau,Q}}{\tau_m}\right)^2 + g_R^2 \left(\frac{\sigma_{\tau,R}}{\tau_m}\right)^2}}{1 + g_Q \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\tau,Q}}{\tau_m}\right)^2}} = \frac{1 + \sqrt{3^2 0,089 + 4,1^2 0,024}}{1 + 3\sqrt{0,089}} = 1,11$$

(d.h. die nur sehr geringe dynamische Überhöhung von ca. 10 % ist vernachlässigbar)

mit den Spitzenwerten:

$g_Q = g_v = 3,0$ [DIN 1055-4] und $g_R = \sqrt{2\ln(600 f_1)} + 0,577 \Big/ \sqrt{2\ln(600 f_1)} = 4,10$

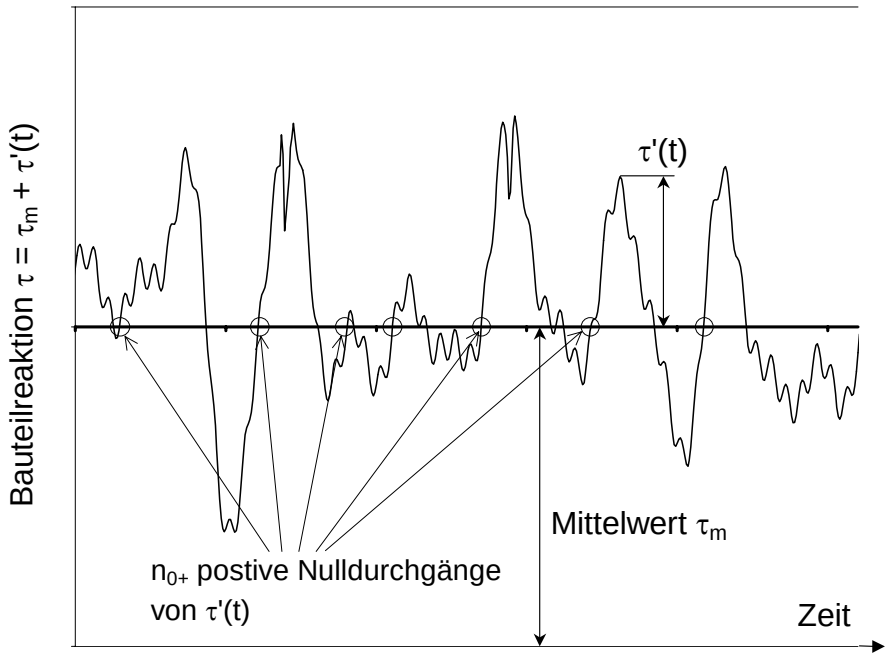


Bild A3-1: Zeitschrieb der Bauteilreaktion $\tau = \tau_m + \tau'(t)$ (schematisch)

Der Erwartungswert f_Q der Frequenz der Beanspruchungsspitzen (Amplituden mit $\tau > \tau_m$) der quasistatischen Böenreaktion τ_Q ist gleich der mittleren Anzahl der positiven Nulldurchgänge ν_{0+} pro Zeiteinheit der Bauteilreaktion $\tau(t)'$ (Gauß'scher Zufallsprozess), siehe (Bild A3-1) [Simiu 1996], [Wyatt 2004].

$$f_Q = \nu_{0+,Q} = \sqrt{\int_0^{f \le f_1} f^2 S_\tau(f)\,df \Big/ \int_0^{f \le f_1} S_\tau(f)\,df} = 0,45 \text{ Hz}$$

Geschätzte Anzahl der Lastwechsel und Amplituden in einer Mittelungsperiode von 10 Minuten (Böenreaktion ist hier die Schubspannung $\tau = \tau_F$ in der PVB-Folie $\rightarrow$ Index τ)**:**

Quasistatische Böenreaktion: (Breitbandprozess)	**R**esonante Böenreaktion, $f_1 = 4{,}0$ Hz (Schmalbandprozess)
$\sigma_{\tau,Q} = \left(2I_v\sqrt{1{,}323}\right)\tau_m = 0{,}30\tau_m$	$\sigma_{\tau,R} = \left(2I_v\sqrt{0{,}355}\right)\tau_m = 0{,}15\tau_m$
a) Betrachtung als getrennte Prozesse	
Mittelwert: $\tau_{m,R} = 0$	Mittelwert: $\tau_{m,R} = 0$
$f_Q = \nu_{0+,Q} = 0{,}45$ Hz	$f_R = f_1 = 4{,}0$ Hz
Lastspielzahl: $n_{Q,i,600} = 600 \cdot 0{,}45 = 270$	Lastspielzahl: $n_{R,i,600} = 600 \cdot 4 = 2400$
Im Mittel zu erwartende Doppelamplitude: (Breitbandprozess, Gauß-Verteilung) $\overline{\Delta\tau_Q} = \sigma_{\tau,Q} = 0{,}30\tau_m$	Im Mittel zu erwartende Amplitude: (Schmalbandprozesses, Rayleighverteilung) $\overline{\Delta\tau_R} = \sqrt{\frac{1}{2}\pi\sigma_{\tau,R}^2} = 0{,}19\tau_m$
b) Betrachtung als überlagerter Prozess	
$\sigma_\tau = \sqrt{\sigma_{\tau,Q}^2 + \sigma_{\tau,R}^2} = 0{,}33\tau_m \cong \sigma_Q$	$f = \frac{\sqrt{f_Q^2\sigma_{\tau,Q}^2 + f_1^2\sigma_{\tau,R}^2}}{\sqrt{\sigma_{\tau,Q}^2 + \sigma_{\tau,R}^2}} = 1{,}8$ Hz

Erwartete Anzahl der Lastspiele (Doppelamplituden): $n_{i,600} = 600 \cdot 1{,}8 = 1080 \approx 1000$

Spitzenwerte in 10 Minuten $\tau_m + k_\sigma\sigma_\tau = \tau_m + k_\sigma 0{,}33\tau_m = \tau_m\left(1 + 0{,}33k_\sigma\right)$

Annahme auf der sicheren Seite für die Verteilung des Spitzenfaktors k_σ in einem 10-Minutenintervall (näherungsweise exponentielle Abnahme der zu erwartenden Zahl der Spitzenwerte)

$k_\sigma = 3$, n = 10	Amplitude: $\tau = 0{,}99\tau_m$	Doppelamplitude: $\Delta\tau = 1{,}98\tau_m$
$k_\sigma = 2$, n = 100	Amplitude: $\tau = 0{,}66\tau_m$	Doppelamplitude: $\Delta\tau = 1{,}32\tau_m$
$k_\sigma = 1$, n = 900	Amplitude: $\tau = 0{,}33\tau_m$	Doppelamplitude: $\Delta\tau = 0{,}66\tau_m$

Anzahl der 10-Minuten-Intervalle mit v_m, Nutzungsdauer 50 Jahre:

$N\left(v_m\right) = p\left(v_m\right) \times h\left(T_{Max} \geq 15°C\right) \times 50$ Jahre × 365 Tage × 24 Stunden × 6 Intervalle

$p(v_m)$: Wahrscheinlichkeitsdichte der Weibullverteilung (s.o.)

$h(T_{Max} \geq 15\ °C)$: Relative Häufigkeit, dass die maximale Tagestemperatur oberhalb von 15 °C liegt (Aufheizung der VSG-Scheiben + 25 °C, max. Folientemperatur 40 °C), aus Wetterdaten in München (20 Jahre) und Hamburg (30 Jahre)

Anhang 4 : zu Kapitel 8.3, Schubmodul der Folien A, B und C

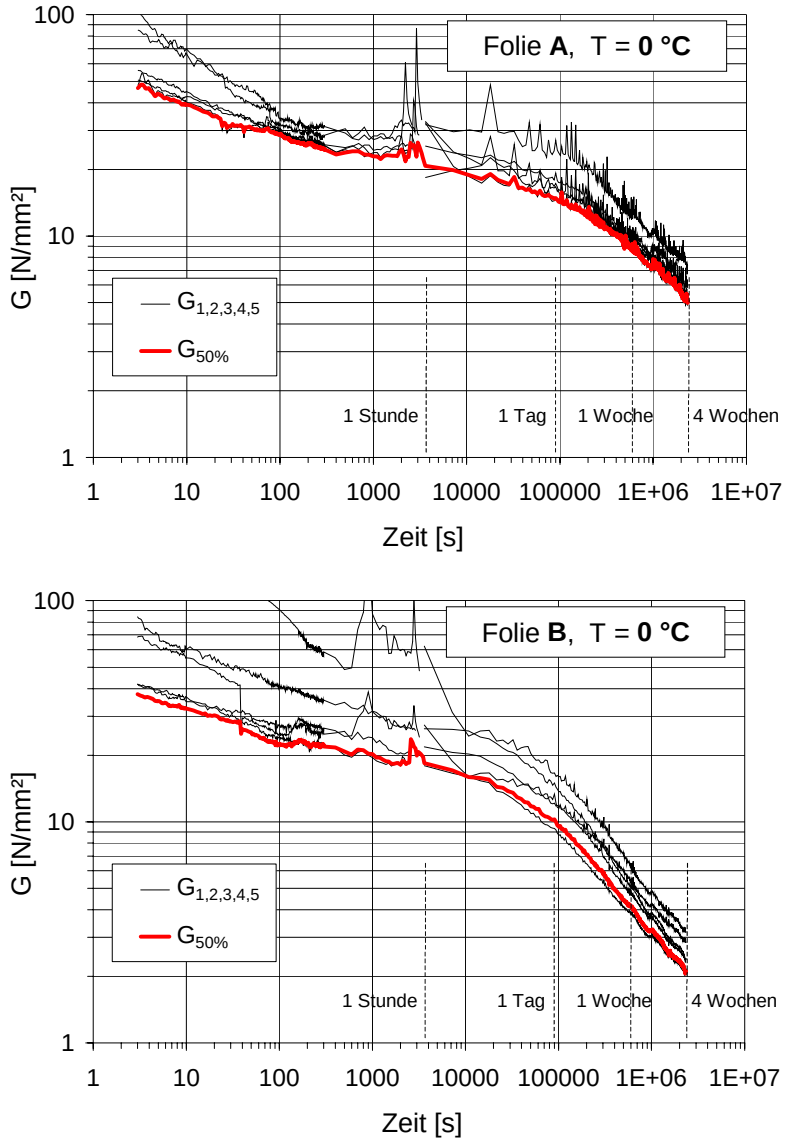
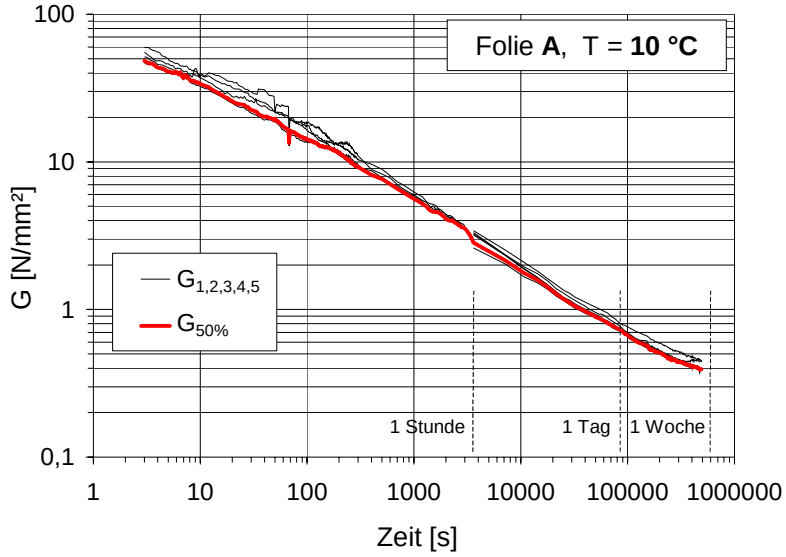
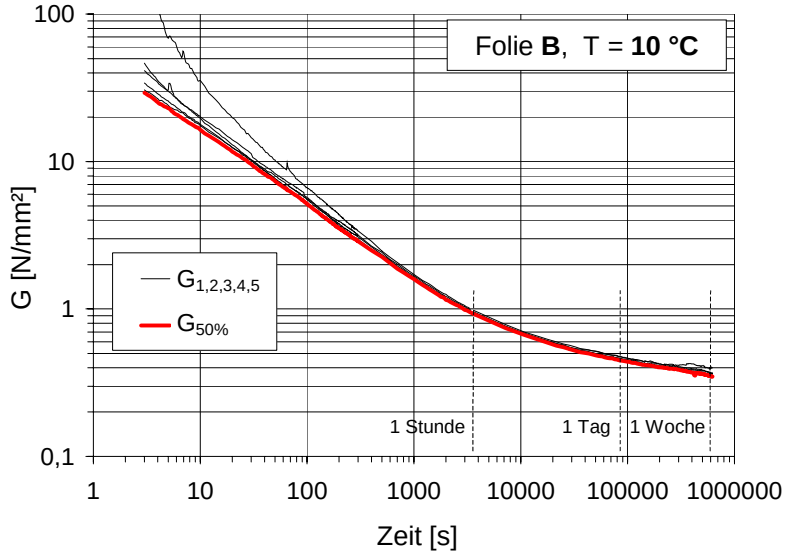


Bild A4-1: Schubmodul G der Folien A und B (Serie N) bei 0 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors





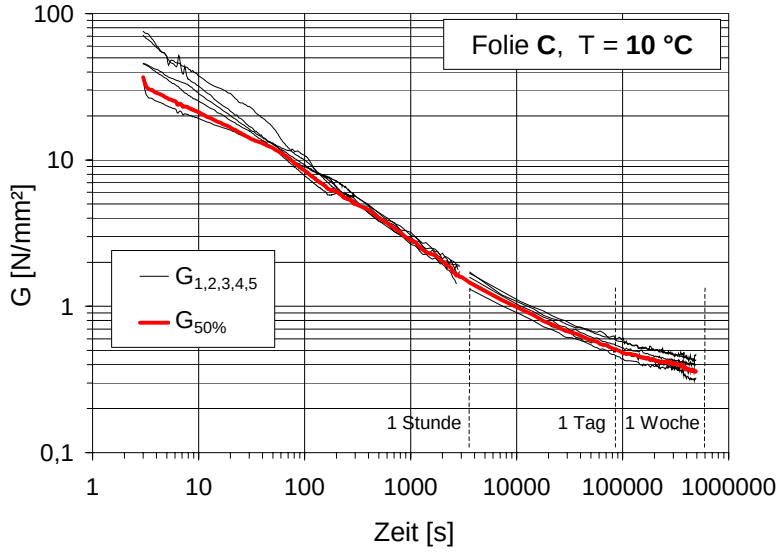


Bild A4-2: Schubmodul G der Folien A, B und C (Serie N) bei 10 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors

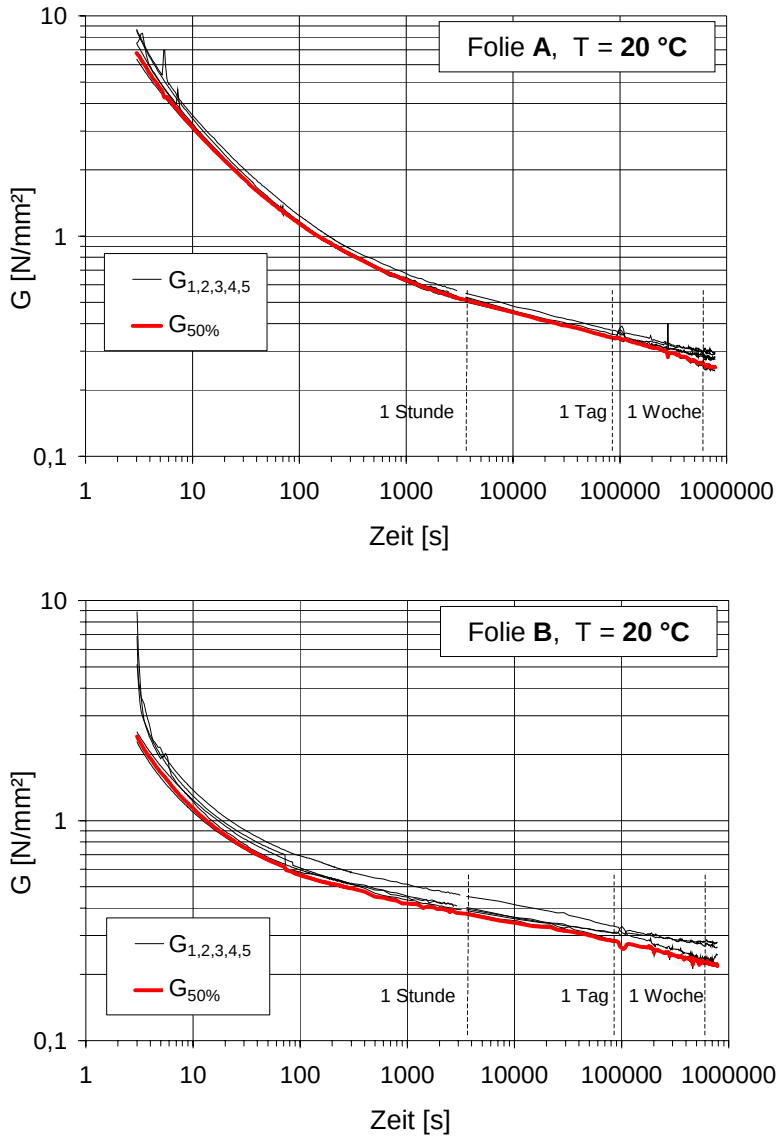


Bild A4-3: Schubmodul G der Folien A und B (Serie N) bei 20 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors

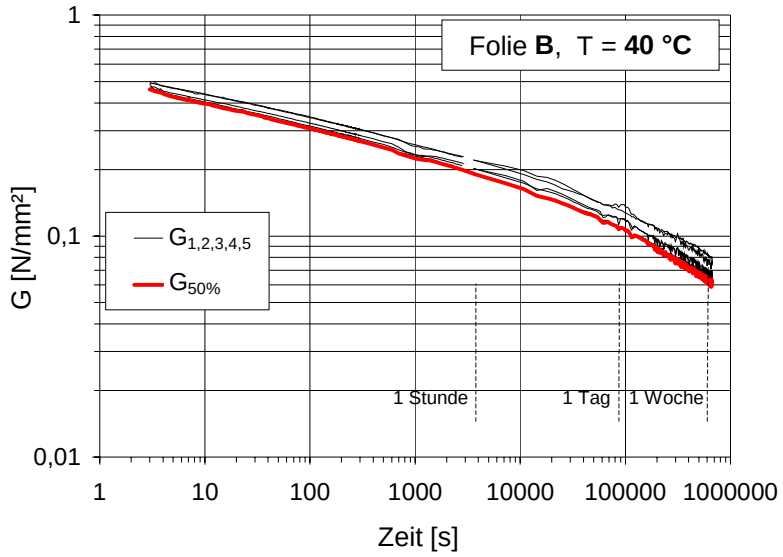


Bild A4-4: Schubmodul G der Folie B (Serie N) bei 40 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors

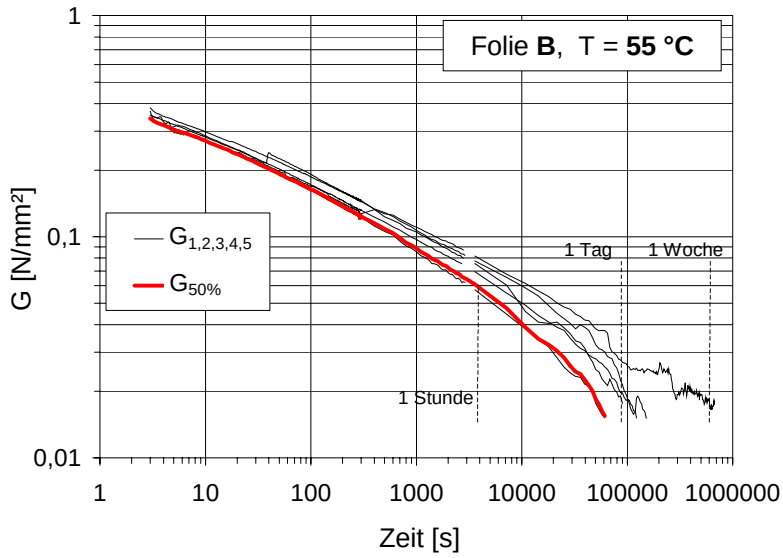


Bild A4-5: Schubmodul G der Folie B (Serie N) bei 55 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors

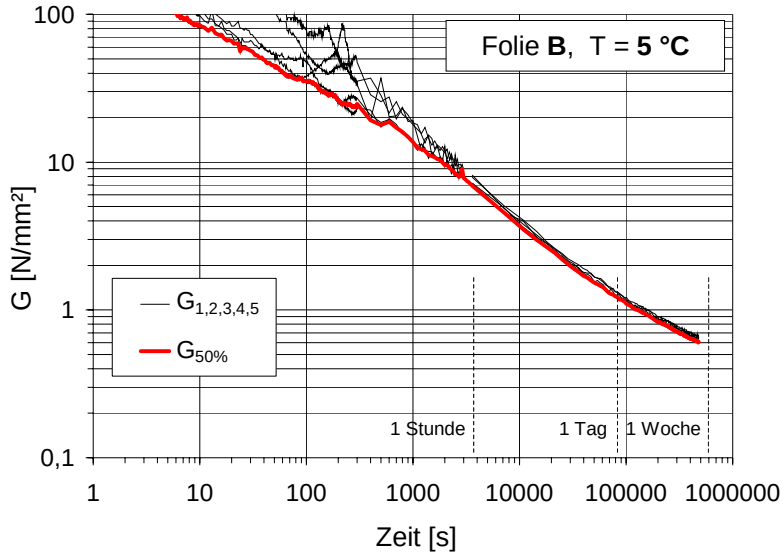


Bild A4-6: Schubmodul G der Folie B (Serie N) bei 5 °C, Einzelwerte G_1 bis G_5 der fünf Probekörper und Bemessungswert $G_{50\%}$ aus der 50-%-Fraktile des Verbundfaktors

Anhang 5 : zu Kapitel 9.3, Schubmodul bei Schneeeinwirkung

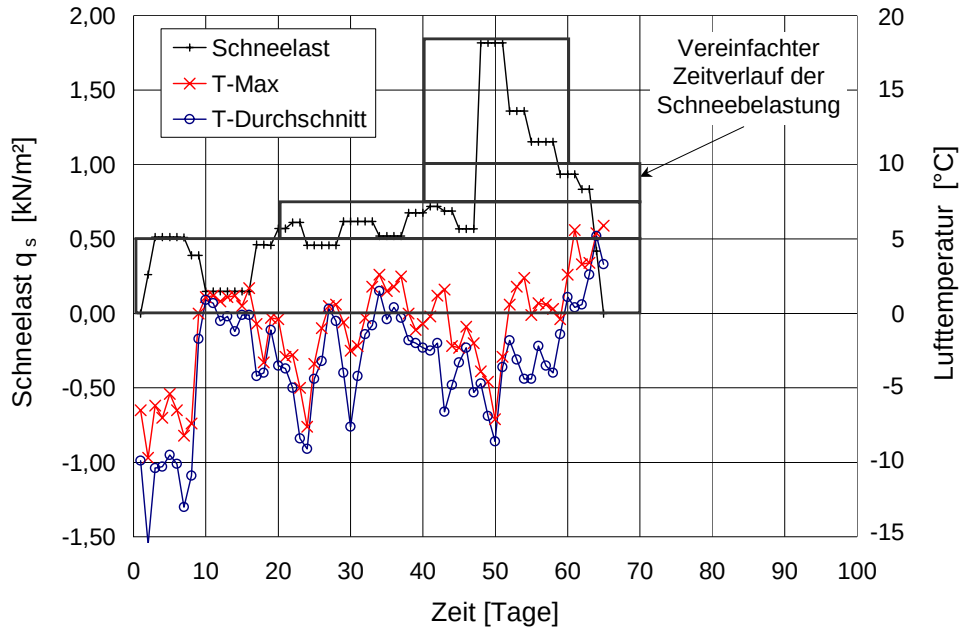


Bild A5-1: Hamburg, Winter 1978/79: Verlauf der Schneelast (Wasseräquivalent), der maximalen Lufttemperatur und der durchschnittlichen Lufttemperatur. Vereinfachung des Zeitverlaufs der Schneelast für die Bestimmung des Bemessungswerts des Schubmoduls

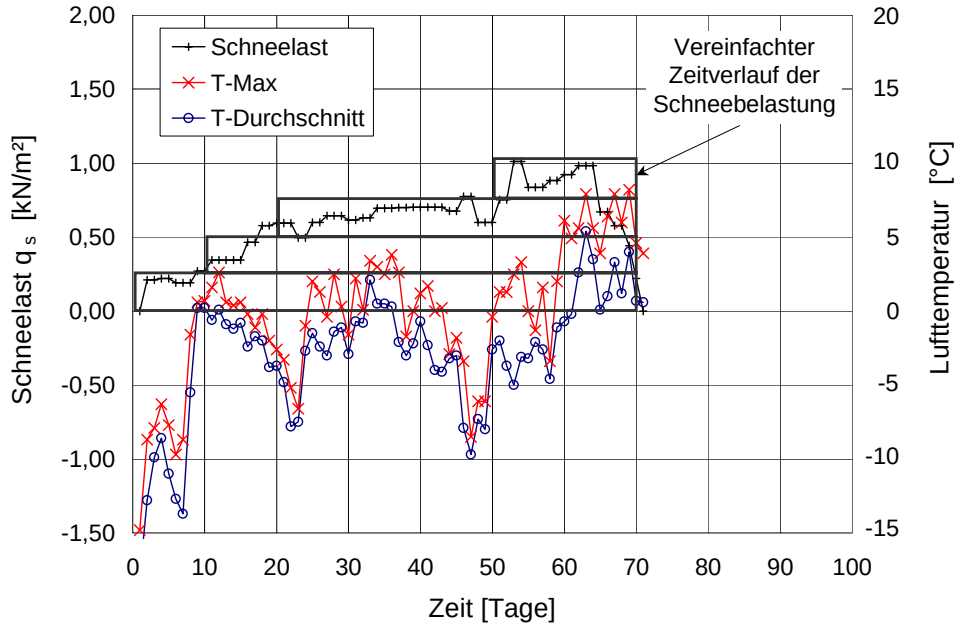


Bild A5-2: Potsdam, Winter 1978/79: Verlauf der Schneelast (Wasseräquivalent), der maximalen Lufttemperatur und der durchschnittlichen Lufttemperatur. Vereinfachung des Zeitverlaufs der Schneelast für die Bestimmung des Bemessungswerts des Schubmoduls

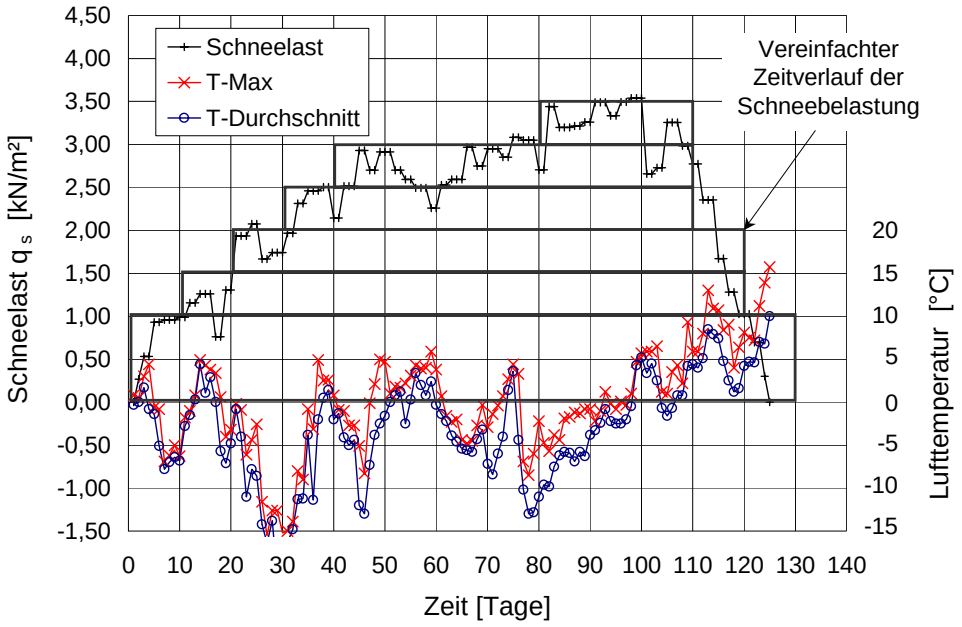


Bild A5-3: Braunlage, Winter 1986/87: Verlauf der Schneelast (Wasseräquivalent), der maximalen Lufttemperatur und der durchschnittlichen Lufttemperatur. Vereinfachung des Zeitverlaufs der Schneelast für die Bestimmung des Bemessungswerts des Schubmoduls

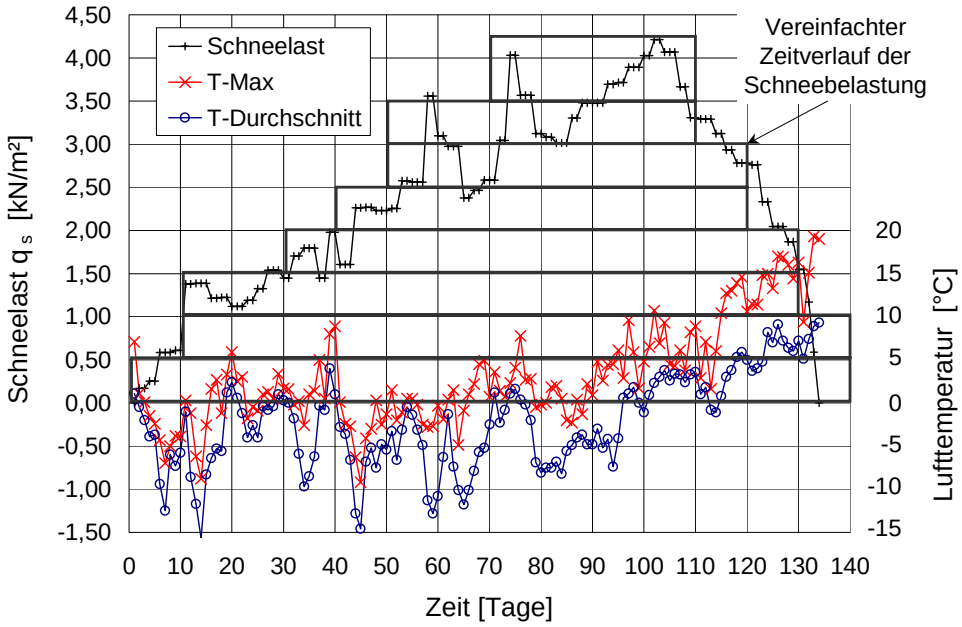


Bild A5-4: Reit im Winkel, Winter 1980/81: Verlauf der Schneelast (Wasseräquivalent), der maximalen Lufttemperatur und der durchschnittlichen Lufttemperatur. Vereinfachung des Zeitverlaufs der Schneelast für die Bestimmung des Bemessungswerts des Schubmoduls