

Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht

Steffen Feirabend



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Steffen Feirabend
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Juli 2010

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart
2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek, für die Anregung zu dieser Arbeit, seiner kreativen Kritik und Unterstützung, sowie für die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Für die Unterstützung bei der Herstellung der Versuchskörper möchte ich mich bei den Firmen BGT Bischoff Glastechnik AG, Du Pont de Nemours (Deutschland) GmbH und Haver & Boecker recht herzlich bedanken.

Allen Mitgliedern des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren möchte ich für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für ihre Geduld und Unterstützung.

Stuttgart, im Juli 2010

Steffen Feirabend

Kurzfassung

Das spröde Verhalten von Glas verlangt innovative Lösungen, um die Standsicherheit von gebrochenen Glasbauteilen sicherzustellen. Glasbauteile müssen im gebrochenen Zustand unter einer definierten Einwirkung über einen festgelegten Zeitraum standsicher bleiben. Diese Anforderung gilt für das einzelne Bauteil als auch für das Gesamttragwerk. Die Tragfähigkeit im gebrochenen Zustand wird als Resttragfähigkeit bezeichnet. Um diese Resttragfähigkeit zu erzielen bzw. zu steigern, werden Verbundsicherheitsglas-Systeme (VSG-Systeme) eingesetzt. Hierbei werden zwei oder mehrere Glasscheiben mittels Zwischenschicht(en) zu einem Laminat zusammengefügt. Der Zustand, in dem sich diese Glasscheiben befinden, bestimmt das Tragverhalten des Laminats. Daher wird der Zustand eines Laminats wie folgt unterschieden:

Zustand I: alle Glasscheiben intakt

Zustand II: Glasscheibe(n) gebrochen, jedoch mindestens eine intakt

Zustand III: alle Glasscheiben gebrochen

Nach eingetretenem Bruch der Glasscheiben besitzen VSG-Systeme zumeist eine gewisse Resttragfähigkeit. Jedoch werden die Zeitdauer, die ein gebrochenes VSG-System in der Lagerung verbleibt, sowie die maximal aufnehmbare Resttraglast von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Zu diesen Einflussfaktoren zählen: die Glaserzeugnisse (Floatglas, TVG, ESG), die Lagerungsbedingungen des VSG-Systems, die Geometrie des Laminataufbaus, die verwendete Zwischenschicht (PVB-Folie, SentryGlas® Plus Interlayer, Gießharz, EVA), die Art und die Geschwindigkeit der Lasteintragung, die Temperatur der einzelnen Schichten des VSG-Systems und das Bruchbild infolge der Glasschädigung. Bei einer ungünstigen Überlagerung dieser Faktoren besteht die Gefahr, dass keine Resttragfähigkeit vorhanden ist. Diese ist jedoch für den Einsatz von Verglasungen im Überkopfbereich, bei absturzsichernden sowie bei begehb- und betretbaren Verglasungen zwingend erforderlich.

In der vorliegenden Arbeit werden VSG-Systeme untersucht. Dabei stehen insbesondere VSG-Systeme aus ESG im Vordergrund, da diese Systeme auf Grund der hohen Zugfestigkeit von ESG im unebrochenen Zustand I und der sehr geringen Resttragfähigkeit infolge der kleinen Bruchstücke im Zustand III ein großes Verbesserungspotential bieten.

Durch eingebettete Bewehrungselemente in der Zwischenschicht können diese Systeme im Zustand III eine Resttragfähigkeit aufweisen. Für die Versuchskörper werden Gewebe und Lochbleche aus Edelstahl als Bewehrungselemente in den Zwischenschichten (PVB-Folie und SentryGlas®

Plus Interlayer) einlamiert. Die Betrachtung des Tragverhaltens erfolgt unter Berücksichtigung der temperatur- und zeitabhängigen Eigenschaften der Zwischenschichten. In Vier-Punkt-Biegeversuchen wird das Trag- und Resttragverhalten unter kurzzeitiger Lasteinwirkung bei Temperaturen von 23°C, 40°C und 70°C untersucht. Zusätzliche Biegekriechversuche geben Aufschluss über die Resttragfähigkeit unter Dauerlast.

Die Arbeit zeigt auf, dass das mechanische Verhalten der Zwischenschicht und somit das Trag- und das Resttragverhalten eines VSG-Systems von der Bauteiltemperatur, der Einwirkungsart und der Einwirkungsdauer geprägt werden. Eine eingebettete Bewehrung in der Zwischenschicht vermag dieses Verhalten insbesondere im Zustand III erheblich zu verbessern. Die Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix kombiniert die hohe Dehnsteifigkeit und Festigkeit der Bewehrung mit dem guten Haftungsvermögen der Zwischenschicht. Dies führt zu einer erhöhten Biegesteifigkeit und einer gesteigerten Tragfähigkeit im Zustand III.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuchen münden in einen Bemessungsvorschlag für gebrochene VSG-Systeme, mit Hilfe dessen die Resttragfähigkeit für ein Glasbauteil ohne Bauteilversuch vorab abgeschätzt werden kann.

Anhand des Laminataufbaus wird eine bilineare Momenten-Krümmungs-Beziehung für das VSG-System im Zustand III definiert. Mit dieser lassen sich Aussagen über die vorhandene Momententragfähigkeit und die zu erwartenden Biegeverformungen treffen.

Basierend auf der Fließlinientheorie wird die erforderliche plastische Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Belastung und der Lagerungsbedingungen bestimmt. Durch eine geeignete Wahl des Laminataufbaus mit einer entsprechenden Bewehrungseinlage kann so eine Resttragfähigkeit sichergestellt werden.

Die ermittelte Resttragfähigkeit von bewehrten VSG-Systemen ist bedeutend höher als bei unbewehrten Systemen mit PVB-Folie oder SentryGlas® Plus als Zwischenschicht. Dies führt bei der Verwendung von bewehrten VSG-Systemen zu reduzierten Glasdicken und somit zu gewichtsminimierten Konstruktionen.

Bewehrte VSG-Systeme ermöglichen ein „fail-safe“ Sicherheitskonzept für das sprödbrechende Glas. Dieses Konzept beruht auf dem Grundsatz, dass ein System nicht durch den Ausfall eines einzelnen Elements versagen darf und alternative Lastabtragungsmechanismen zur Verfügung stehen. Dies ist durch die eingebettete Bewehrung gegeben.

Darüber hinaus kann die Bewehrung in einem VSG-System auch als gestalterisches Element herangezogen werden. Die Bewehrung kann eine

Gebäudehülle je nach Art der Lichtverhältnisse strukturieren, transparent erscheinen lassen oder durch Reflexionen verändern. Auch bauphysikalische Aspekte hinsichtlich Sonnenschutz, Blendschutz und Energieeintrag in ein Gebäude können hierdurch Berücksichtigung finden. Der Einsatz von bewehrten VSG-Systemen als angriffshemmende Verglasung ist ebenfalls denkbar.

Abstract

The brittleness of glass calls for innovative solutions which improve the post-breakage behavior of structural glass elements. Laminated glass guarantees a certain residual strength after the failure of one or several panes of the laminate and has therefore been frequently used in recent times for overhead glazing, glass floors, glass fins and impact resisting glass as well as for all-glass structures. In order to better define the behaviour of laminated glass (LG), it is useful to distinguish three different states:

State I: no pane is broken

State II: several panes are broken, but at least one remains intact

State III: all panes are broken

The demand for high structural performance, due to the increasing size of glass panes and all-glass structures, has led to a frequent use of fully tempered (FT) glass, which is characterized by a high tensile strength. However, fully tempered laminated glass has almost no residual strength in state III. This is due to the break-up into small fragments and the low stiffness and strength of the interlayer currently used. High residual strength in state III may be achieved by establishing the following interlayer performances: high tensile strength, high extensional stiffness, high elongation at rupture and good adhesion. The properties of today's synthetic interlayer materials (e.g. polyvinylbutiral - PVB, SentryGlas® Plus - SGP) depend on time and temperature. If the temperature of the interlayer exceeds the glass transition temperatures T_G the stiffness and strength decreases. Moreover, the synthetic interlayer material creeps under long-term loadings. The resulting increased deflections of an LG unit have to be taken into account to prevent the glass from sliding out of the supports in state III.

Improved residual strength is achieved by embedding reinforcement in the synthetic interlayer material. The reinforcement - stainless steel-wire meshes, thin perforated metal sheets and fabrics of high-strength fibres - is integrated in the interlayer. This reinforcement-interlayer-matrix combines the high tensile and high extensional stiffness of the reinforcement with the high degree of adhesion of the synthetic interlayer material.

In state III this reinforcement-interlayer-matrix acts similarly to reinforcement in concrete. An applied bending moment is transferred via a force couple: tension in the matrix and compression in the glass fragments. The synthetic interlayer ensures the bonding of all components, thus allowing the transfer of shear forces between the reinforcement and the

glass fragments. The reinforcement increases the post-breakage flexural stiffness, limits the deflection and makes the post-breakage behaviour of the laminated glass more predictable. As the support conditions of the LG unit determine the nature of the load transfer, the reinforcement-interlayer-matrix may also have to transfer additional membrane forces.

The post-breakage behaviour of laminated glass has been investigated, considering the temperature of the laminate, the type of interlayer used and the influence of the reinforcement. In a four-point-bending test, the residual strength of pre-damaged laminated glass (FT) has been investigated under short-term loading. Steel-wire meshes or thin, perforated metal sheets are integrated in the interlayer (PVB or SGP). The temperature of the samples varies between 23°C, 40°C and 70°C, in order to model the real glass temperature and to investigate the change of properties around the glass transition temperatures T_G . The samples are supported on two rollers to achieve pure bending and to avoid membrane forces during testing.

These tests show that laminated samples without reinforcement have a certain residual strength, only if the sample temperature T is below the transition temperature T_G of the interlayer. Particularly, samples laminated with PVB interlayer show almost no residual strength. Only samples with embedded reinforcement develop sufficient residual strength throughout the chosen temperature range.

The four-point-bending creep test has been carried out to investigate how the panes deflect over time due to permanent loading. Higher temperature increases the mid-span deflection under the same permanent loading condition. At 23°C, the samples with embedded reinforcement show less creep deflection than those without. Only reinforced LG units have sufficient long-term stiffness at 40°C. The stiffness could be further increased if the reinforcement is anchored at the supports, thus activating membrane forces and reducing creep effects.

The stress and elongation distribution within the LG unit due to a bending moment can be derived from the interlayer, glass and reinforcement properties in state III. This approach leads to a bi-linear moment-curvature relationship, which enables the prediction of the existing moment resistance and the deflection of an LG unit. Based on the yield line method, the required moment resistance of a LG unit in state III can be determined.

The glass reinforcement acts not only as a structural but also as an architectural device. It provides the building envelope with a fine pattern as well as with a sunscreen. The degree of transparency as well as the degree of sun-screening may be controlled by an appropriate choice of mesh width and diameter. If stainless steel reinforcement is used, a silvery, reflective

building envelope is achieved in daylight, while at night the same building is characterized by high transparency, when illuminated from within.

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Gliederung	2
2	Werkstoffgrundlagen	5
2.1	Glas	5
2.1.1	Festigkeit	7
2.1.2	Vorgespanntes Glas	12
2.1.3	Bruchstücke von Einscheibensicherheitsglas	13
2.2	Zwischenschicht	16
2.2.1	Polyvinylbutyral-Folien als Zwischenschicht	16
2.2.2	SentryGlas® Plus als Zwischenschicht	20
2.2.3	Vergleich der Zwischenschichten	21
2.3	Bewehrung	23
2.3.1	Gewebe	27
2.3.2	Lochblech	30
2.4	Zusammenfassung	32
3	Verbundsicherheitsglas	33
3.1	Definition	33
3.2	Geschichte	33
3.3	Herstellung	34
3.4	Anwendung	35
3.4.1	Überkopfverglasungen	35
3.4.2	Vertikalverglasungen	35
3.4.3	Sonderverglasungen	36
3.5	Zustandsdefinition eines VSG-Systems	37
3.6	VSG im ungebrochenen Zustand I	37
3.6.1	Einwirkungen	37
3.6.2	Lastabtragung	39
3.7	VSG im teilweise gebrochenen Zustand II	40
3.7.1	Schädigung	41
3.7.2	Lastabtragung	44

3.8	VSG im gebrochenen Zustand III	45
3.8.1	Lastabtragungsmodelle	45
3.8.2	Ermittlung der Momententragfähigkeit	48
3.9	Zusammenfassung	53
4	Resttragfähigkeit	55
4.1	Anforderungen an die Resttragfähigkeit	55
4.1.1	Überkopfverglasung	56
4.1.2	Vertikalverglasung	58
4.1.3	Bauteiltemperatur	60
4.2	Einflussfaktoren auf die Resttragfähigkeit	63
4.2.1	Versagensszenarien im Zustand III	64
4.2.2	Einfluss der Temperatur und der Dauer	65
4.2.3	Einfluss der Glaserzeugnisse und der Schädigung	67
4.3	Methoden zur Steigerung der Resttragfähigkeit	69
5	Versuche an Verbundsicherheitsglas	71
5.1	Versuchskörper	71
5.1.1	Glas	71
5.1.2	Zwischenschicht	71
5.1.3	Bewehrung	71
5.1.4	Aufbau und Geometrie	73
5.1.5	Herstellung	74
5.2	Versuchsprogramm	76
5.3	Vier-Punkt-Biegeversuche ohne Vorschädigung	76
5.3.1	VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht	77
5.3.2	VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht	79
5.3.3	Steifigkeit im Zustand I	80
5.3.4	Vergleich der Versuchsergebnisse	81
5.4	Vier-Punkt-Biegeversuche mit Vorschädigung	83
5.4.1	VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht	84
5.4.2	VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht	86
5.4.3	Einfluss der Versuchstemperatur	89
5.4.4	Verformungsfigur	91
5.4.5	Einfluss der Traversengeschwindigkeit	92
5.4.6	Einfluss der zyklischen Be- und Entlastung	93
5.4.7	Einfluss der Glasoberfläche bei SGP	94
5.4.8	Einfluss der Vorschädigung auf die Resttragfähigkeit	94
5.5	Biegekriechversuche	96

5.5.1	VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht	98
5.5.2	VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht	100
5.5.3	Kriechfaktoren	104
5.6	Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen	105
6	Berechnungsmodelle zur Ermittlung der Resttragfähigkeit	109
6.1	Momenten-Krümmungs-Beziehung	109
6.1.1	Schubstarrer VSG-Querschnitt	109
6.1.2	Nachgiebiger Bewehrungsverbund	112
6.1.3	Zeit- und temperaturabhängige Verformung	115
6.2	Fließlinientheorie	121
6.2.1	Vier-Punkt-Biegeversuch gemäß Fließlinientheorie	125
6.2.2	Resttragfähigkeit bei Rechteckplatten unter Flächenlast	126
6.2.3	Resttragfähigkeit bei Rechteckplatten unter Punktlast	141
6.3	Schlussfolgerung	143
7	Zusammenfassung und Ausblick	145
8	Literatur	151
9	Normen und Technische Regeln	159
Anhang		A-1
A1	Versuchskörper	A-1
A2	Vier-Punkt-Biegeversuch ohne Vorschädigung	A-3
A3	Vier Punkt-Biegeversuch mit Vorschädigung	A-11
A4	Vier-Punkt-Biegekriechversuch	A-43
A5	Einaxialer Zugversuch der Bewehrungselemente	A-53

Bezeichnungen

Lateinische Großbuchstaben

A	Fläche
A_a	Arbeit der äußeren Kräfte
∂A_a	virtuelle Arbeit der äußeren Kräfte
D	Druckkraft
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
F_u	Bruchkraft
F_M	Mittelwert der Kraft
G	Schubmodul, Energiefreisetzungsrate
G_c	Risswiderstandskraft
K_I	Spannungsintensitätsfaktor
K_{Ic}	Bruchzähigkeit
M	Moment
O_B	Oberfläche
P	Punktlast
S	Auflagerlast, Konstante
T	Temperatur
T_G	Glasübergangstemperatur
W	Arbeit der inneren Kräfte
∂W	virtuelle Arbeit der inneren Kräfte
Z	Zugkraft

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Risslänge, Länge
b	Breite
d	Dicke, Durchmesser, statische Nutzhöhe
e	Abstand, Hebelarm
f_m	Mittendurchbiegung
g	Eigengewicht
i	Verhältnis von Feldmoment zu Stützmoment
l	Länge, Bruchlinienversatz
m	plastisches Moment im Feldbereich
m'	plastisches Moment im Stützbereich
m_{req}	erforderliches plastisches Moment
n	Stichprobenanzahl
p	Abstand, Teilung
p_A	Flächenlast

Bezeichnungen

p_L	Linienlast
r	Rissweite
s	Standardabweichung
w	Maschenweite, Lochdurchmesser, Windlast
x	Druckzonenhöhe, Geometrievariable, Konstante
t	Zeit
z	innerer Hebelarm, virtuelle Verschiebung

Griechische Großbuchstaben

Π_G	gesamte potentielle Energie
Π	potentielle Energie des Körpers
Γ	Oberflächenenergie
Y	Geometriefaktor
Θ	Drehung

Griechische Kleinbuchstaben

α	Verbundfaktor, Winkel
γ	Sicherheitsbeiwert, Winkel
γ_o	spezifische Oberflächenenergie
ε	Dehnung
ε_y	Fließdehnung
ε_u	Bruchdehnung
κ	Krümmung
κ_y	Fließkrümmung
κ_u	Bruchkrümmung
ν	Querdehnzahl
σ	Spannung
σ_c	kritische Zugspannung für Risswachstum
τ	Schubspannung
ϕ	Wichtungsfaktor
φ_T	Kriechfaktor

Indizes

G	Glas
L	Zwischenschicht
R	Bewehrung, Widerstand
b	unten
k	charakteristisch
m	Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix
o	zum Zeitpunkt $t = 0$, anfänglich
t	oben
x	x-Achse
y	y-Achse

Abkürzungen

A	Luftseite bei der Floatglasherstellung
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESG	Einscheibensicherheitsglas
ESP	engineered stress profile
EG	Edelstahlgewebe
EL	Edelstahllochblech
PVB	Polyvinylbutyral
SGP	SentryGlas [®] Plus
Rv	versetzte Rundlöcher
T	Zinnbadseite bei der Floatglasherstellung
TVG	Teilvorgespanntes Glas
VG	Verbundglas
VSG	Verbundsicherheitsglas
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

Geometrie



Eingespannter Plattenrand



Gelenkig gelagerter Plattenrand



Freier Plattenrand



Unbegrenzter Plattenrand/Ausschnitt aus einer Platte



Fließlinie

1 Einführung

1.1 Motivation

Der Werkstoff Glas besitzt ein sprödes Materialverhalten, sein Versagen bleibt bei makroskopischer Betrachtung unangekündigt. Für die Sicherheit im konstruktiven Glasbau ist daher das Tragverhalten von gebrochenen Glasbauteilen entscheidend. Die Fähigkeit einer Verglasung, im gebrochenen Zustand unter einer definierten Einwirkung standsicher zu bleiben, wird als Resttragfähigkeit bezeichnet. Heute werden Verbundsicherheitsglas-Systeme (VSG-Systeme) eingesetzt, um diese Resttragfähigkeit zu erzielen bzw. zu steigern. Für diese Systeme werden zwei oder mehrere Glasscheiben mittels Zwischenschicht(en) zu einem Laminat zusammengefügt. Lamine sind schichtweise aufgebaute Verbundwerkstoffe, wobei die Schichten bei VSG-Systemen aus Glasscheiben und Zwischenschichten bestehen. Beim Bruch einer oder mehrerer Scheiben werden die Bruchstücke durch die Zwischenschicht gehalten und die noch intakten Scheiben übernehmen den Lastabtrag. Nach eingetretenem Bruch aller Glasscheiben besitzen VSG-Systeme eine gewisse Resttragfähigkeit. Die Zeitdauer, die ein vollständig gebrochenes VSG-System in der Lagerung verbleibt, und die dabei aufnehmbare Resttraglast werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Zu diesen Einflussfaktoren zählen: die Glaserzeugnisse (Floatglas, TVG, ESG), die Lagerungsbedingungen des VSG-Systems, die Geometrie des Laminataufbaus, die verwendete Zwischenschicht (Polyvinylbutyral-Folie, SentryGlas[®] Plus Interlayer), die Art und die Geschwindigkeit der Lasteintragung, die Temperatur der einzelnen Schichten des VSG-Systems sowie das Bruchbild infolge der Glasschädigung. Bei einer ungünstigen Überlagerung dieser Faktoren besteht die Gefahr, dass keine ausreichende Resttragfähigkeit der Verglasung vorhanden ist. Diese ist jedoch für den Einsatz von Verglasungen im Überkopfbereich, bei absturzsichernden sowie bei begeh- und betretbaren Verglasungen zwingend erforderlich.

Die Resttragfähigkeit einer Verglasung muss meist durch Bauteilversuche nachgewiesen werden. Diese Versuche sind Teil eines zeit- und kostenintensiven Zustimmungsverfahrens im Einzelfall (ZiE). Die diesem Zustimmungsverfahren zugrunde gelegten Normen und Regelwerke gehen dabei auf die zeit- und temperaturabhängigen Einflüsse der verwendeten Zwischenschichten nur bedingt ein.

Neben dem zeit- und temperaturabhängigen Verhalten der Zwischenschicht nimmt die Größe der Glasbruchstücke entscheidend Einfluss auf die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen.

Die Entwicklung im konstruktiven Glasbau hin zu transparenten, filigranen Gebäudehüllen und Bauteilen erfordert den Einsatz hochfester Gläser. Es werden daher vermehrt vorgespannte Gläser verwendet. Die Biegezugfestigkeit von Glas lässt sich durch das Einprägen eines Eigenspannungszustands - dem Vorspannen - steigern. Die Bruchstückgröße nimmt mit dem Vorspanngrad ab, so dass Einscheibensicherheitsglas (ESG) sowohl die höchste Biegezugfestigkeit als auch die kleinste Bruchstückgröße aufweist. Je kleiner die Glasfragmente sind und umso dehnweicher die Zwischenschicht ist, desto geringer ist die Restbiegesteifigkeit des gebrochenen Glasbauteils. Daher hat ESG als Einzelscheibe und selbst bei der Anwendung in einem VSG-System ein sehr schlechtes Resttragverhalten und kann nur bedingt eingesetzt werden.

Hieraus ergibt sich die folgende Zielsetzung für die vorliegende Arbeit.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von VSG-Systemen, die auch im gebrochenen Zustand eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Diese so genannte Resttragfähigkeit ist erforderlich, um die Standsicherheit von geschädigten Verglasungen zu gewährleisten.

Bei der Entwicklung stehen VSG-Systeme aus ESG im Vordergrund, da diese auf Grund der hohen Biegezugfestigkeit von ESG im ungebrochenen Zustand und der geringen Resttragfähigkeit infolge der kleinen Bruchstücke ein großes Verbesserungspotential bieten.

Durch eingebettete Bewehrungselemente in der Zwischenschicht soll die Resttragfähigkeit gesteigert werden. Weisen bewehrte VSG-Systeme mit ESG ein Resttragverhalten auf, so geht von ihnen bei Spontanbruch kein erhöhtes Gefahrenpotential aus im Vergleich zu anderen Glaserzeugnissen. Dies würde den vermehrten Einsatz von VSG-Systemen aus ESG im konstruktiven Glasbau ermöglichen und zu geringeren Glasdicken und gewichtsminimierten Konstruktionen führen.

1.3 Gliederung

In Kapitel 2 werden die Eigenschaften der Verbundpartner Glas, Zwischenschicht und Bewehrung erörtert. Dabei wird bei Glas insbesondere auf die Festigkeit und das Bruchverhalten eingegangen. Als Zwischenschichten werden Polyvinylbutyral und SentryGlas[®] Plus betrachtet. Diese werden

hinsichtlich ihres zeit- und temperaturabhängigen Tragverhaltens beleuchtet. Das Einbetten einer Verstärkung in die Zwischenschicht wird anschließend diskutiert. Mögliche Bewehrungsarten werden aufgezeigt. Die einzelnen Komponenten werden in Kapitel 3 zum bewehrten oder unbewehrten VSG-System zusammengeführt.

Ein VSG-System kann sich je nach Schädigungsgrad in einem von drei Zuständen befinden:

Zustand I: alle Glasscheiben intakt

Zustand II: Glasscheibe(n) gebrochen, jedoch mindestens eine intakt

Zustand III: alle Glasscheiben gebrochen

Für diese drei Zustände wird die Lastabtragung bei einer Biegebeanspruchung diskutiert, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Zustand III liegt. Hier wird insbesondere auf die Spannungs- und Dehnungsverteilung im Laminatquerschnitt eingegangen.

Die Anforderungen der Normen und Regelwerke an Verglasungen im Zustand III und die Einflussfaktoren auf die Resttragfähigkeit werden in Kapitel 4 aufgezeigt. Aus den möglichen Versagensszenarien von VSG-Systemen im Zustand III werden Methoden zur Steigerung der Resttragfähigkeit abgeleitet.

Das durchgeführte Versuchsprogramm wird in Kapitel 5 erläutert. Es werden die Trag- und die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen sowohl mit als auch ohne Bewehrungseinlage untersucht. Die Variation der Versuchstemperatur zeigt dabei den Temperatureinfluss auf das Trag- und Resttragverhalten im Vier-Punkt-Biegeversuch. Die Biegekriechversuche geben Aufschluss über das Verhalten unter Dauerlast.

In Kapitel 6 werden Berechnungsmodelle vorgestellt. Mit Hilfe von Momenten-Krümmungs-Beziehungen können Aussagen über Verformungen und Momententragfähigkeit getroffen werden. Die Fließlinientheorie wird herangezogen, um die erforderliche Resttragfähigkeit eines Glasbauteils ohne Bauteilversuch vorab abschätzen zu können.

Das abschließende Kapitel 7 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf die Anwendbarkeit von bewehrten VSG-Systemen.

2 Werkstoffgrundlagen

2.1 Glas

„Nimm 60 Teile Sand, 180 Teile Asche aus Meerespflanzen, 5 Teile Kreide und du erhältst Glas.“ Diese eigentlich noch heute gültige Rezeptur zur Herstellung von Glas findet sich auf einer Tontafel aus dem Jahr 650 v. Chr. und stammt aus der Bibliothek des assyrischen Königs Assurbanipal in Ninive [58]. Bei der heutigen Glasproduktion wird zunächst eine ca. 1500°C heiße Schmelze durch das Erhitzen eines Gemenges, das sich hauptsächlich aus Siliziumoxid, Alkali- und Erdalkalioxiden zusammensetzt, erzeugt. Die Schmelze hat die Besonderheit, amorph - also im Wesentlichen ohne Kristallbildung - zu erstarren. Glas ist bei hohen Temperaturen dünnflüssig und wird umso zähflüssiger, je tiefer die Temperatur fällt. Der Strukturzustand von erstarrtem Glas ist mit dem Zustand von Flüssigkeiten und Schmelzen vergleichbar. Sie besitzen wie Glas keine richtungsabhängigen Eigenschaften. Thermodynamisch gesehen wird Glas daher als unterkühlte Schmelze bezeichnet. Die Transformationstemperatur T_G - das ist der Übergangsbereich zwischen Schmelze und Feststoff - liegt bei vielen Glasarten bei ca. 600°C und wird auch als Glasübergangstemperatur bezeichnet. Auf Grund seiner amorphen Struktur besitzt Glas keinen festen Schmelzpunkt.

Die im Bauwesen am häufigsten verwendete Glasart ist Kalknatronsilicatglas. Durch eine Verringerung des Eisenoxidanteils kann die leicht grünliche Eigenfarbe von Kalknatronsilicatglas reduziert werden. Dieses Glas wird dann als eisenarmes Glas oder Weißglas bezeichnet [58]. Bei Brandschutzverglasungen wird oft Borosilicatglas verwendet. Auf Grund des zusätzlichen Anteils an Boroxid weist Borosilicatglas im Gegensatz zu Kalknatronsilicatglas eine erhöhte Temperaturwechselbeständigkeit auf.

Die Formgebung von Glas kann in vielfältiger Art und Weise erfolgen. Historische Glasherstellungsverfahren sind das Blasen von Gläsern und das Mondglas- oder Schleuderverfahren, aus dem auch die Butzenscheiben stammen, die mittels Bleifassung zu Fenstern zusammengesetzt wurden [58]. Erst 1697 entwickelte Bernard Perrot das Gussglasverfahren, um großflächige ebene Glasscheiben herzustellen. Dazu wird die Glasschmelze auf vorgewärmte Kupferplatten ausgegossen und mittels Metallwalzen gleichmäßig verteilt und geglättet. Heute werden die meisten Flachgläser im Floatglasverfahren hergestellt. Hierbei fließt die Glasschmelze auf ein flüssiges Zinnbad zum Abkühlprozess. Dabei dehnt es sich zu einem

Glasband mit konstanter, prozessgesteuerter Dicke aus. Infolge dieses Herstellungsprozesses besitzt Floatglas eine als Zinnseite (T) und eine als Luft- oder auch Atmosphärenseite (A) bekannte Oberfläche. Der Unterschied in den Glasoberflächen durch eingelagerte Zn-Atome auf der Zinnseite ist für die spätere Beschichtung und Verbundglasherstellung von Relevanz. So können die Zn-Atome bei Beschichtungen zu unerwünschten Flecken und Verfärbungen führen, wohingegen sie bei der Verbundglasherstellung mit der Zwischenschicht SentryGlas® Plus günstige Haftungseigenschaften aufweisen.

Glas mit ungestörtem Gefüge besitzt wegen seiner hohen atomaren Bindungskräfte eine sehr hohe mechanische Festigkeit.

Flachglas ist das im Bauwesen am häufigsten verwendete Glaserzeugnis. Dieses Alkalikalksilicatglas kann als Spiegelglas, Fensterglas, Gussglas und Profilbauglas mit und ohne Drahteinlage hergestellt werden. Flachglas dient als Basisprodukt für die weitere Glasverarbeitung. Die mechanischen Eigenschaften von Flachglas sind wie folgt definiert [DIN 1249]:

Tab. 2.1: Mechanische Eigenschaften von Flachglas [DIN 1249] und [19]

Eigenschaften		Glas	Normung/Quelle
Dichte	[kg/m ³]	2500	-
Elastizitätsmodul	[N/mm ²]	73000 (entspanntes Glas) 70000 (vorgespanntes Glas)	DIN 52303-1 bzw. [DIN EN 1288]
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	700-900 390-590	DIN 51067 bzw. [DIN EN 993] [19]
Querdehnzahl	[]	0,23	-
Ritzhärte nach Mohs	[]	5-6	[DIN EN 101]
Wärmeausdehnungs-Koeffizient	[10 ⁻⁶ /K]	9	DIN 52328 bzw. [DIN ISO 7991]

Die Bezeichnungen der Glaserzeugnisse sind leider in den Normen und Richtlinien nicht einheitlich. So verwenden die Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen [TRLV] die Begriffe der alten Bauregelliste A Teil 1 [DIBt BRL07], die sich wiederum auf die jeweiligen Teile der [DIN 1249] beziehen.

Die europäische Norm [DIN EN 572] und die neue Bauregelliste A Teil 1 [DIBt BRL08] benützen jedoch hiervon abweichende Definitionen. Im

Normenentwurf für die Glasbemessung [E DIN 18008] wird auf diese neuen Bezeichnungen verwiesen: Floatglas, gezogenes Flachglas, Ornamentglas, Draht(ornament)glas, poliertes Drahtglas, Profilbauglas mit und ohne Drahteinlage. Diese Begriffe dienen in der vorliegenden Arbeit zur Definition der Glaserzeugnisse. Die hierbei diskutierten Glaserzeugnisse sind:

„Floatglas: planes, durchsichtiges, klares oder gefärbtes Kalk-Natronsilikatglas mit feuerpolierten Oberflächen, hergestellt durch kontinuierliches Aufgießen und Fließen über ein Metallband.“

„Gezogenes Flachglas: planes, durchsichtiges, klares oder gefärbtes Kalk-Natronsilikatglas, das im kontinuierlichen, anfangs vertikalen Ziehverfahren in üblicher Dicke und mit beidseitig feuerpolierten Oberflächen hergestellt wird.“

„Ornamentglas: planes, durchscheinendes, klares oder gefärbtes Kalk-Natronsilikatglas, das durch kontinuierliches Gießen und Walzen hergestellt wird.“

„Draht(ornament)glas: planes, durchscheinendes, klares oder gefärbtes Kalk-Natronsilikatglas, das durch kontinuierliches Gießen und Walzen hergestellt wird und in das während der Herstellung ein an allen Kreuzungspunkten verschweißtes Stahl-Drahtnetz eingelegt wird. Die Oberflächen dürfen ornamentiert oder glatt gewalzt sein.“

2.1.1 Festigkeit

Glas besitzt eine sehr hohe theoretische Festigkeit σ . Diese lässt sich basierend auf dem Hookeschen Gesetz, dem Abstand d zwischen den Atomen und der spezifischen Oberflächenenergie γ_0 wie folgt beschreiben:

$$\sigma = \sqrt{\frac{E \gamma_0}{d}} \quad (2.1)$$

Diese theoretische Festigkeit kann jedoch auf Grund von mikro- und makroskopischen Defekten im Gefüge experimentell nicht erzielt werden. Die in Versuchen erzielte geringe (Biege-)Zugfestigkeit geht mit einer relativ großen Druckfestigkeit einher.

Durch Gefügestörungen im Glasinneren sowie durch mikro- und makroskopische Oberflächendefekte entstehen bei einer mechanischen Beanspruchung Kerbeffekte, die hohe Spannungskonzentrationen an den Rissspitzen aufweisen. Diese können beim Werkstoff Glas im Gegensatz zu duktilen Werkstoffen nicht durch plastische Verformung abgebaut werden. Es kommt daher zum Risswachstum an der Rissspitze.

Um diese Effekte des allmählichen stabilen Risswachstums hin zu einer instabilen, katastrophalen Rissausbreitung zu beschreiben, bedient man sich bei Spröbruch der linear-elastischen Bruchmechanik.

Griffith postuliert ein Rissausbreitungskriterium mit Hilfe der Energiebilanz [47]. Dabei leitet er seine Theorie des Risswachstums an einer zugbeanspruchten Scheibe mit einer elliptischen Öffnung der Länge $2a$ - dem so genannten Griffith-Riss - her (Abb. 2.1).

Der Energieansatz nach Griffith besagt Folgendes: Die gesamte potentielle Energie Π_G setzt sich zusammen aus der potentiellen Energie Π des Körpers und der Oberflächenenergie Γ des Risses. Die potentielle Energie Π besteht aus der Formänderungsenergie W und der Arbeit der äußeren Kräfte A_a .

$$\Pi_G = \Pi + \Gamma = W - A_a + \Gamma \quad (2.2)$$

Ein Riss schreitet nur dann voran, wenn mindestens so viel potentielle Energie Π freigesetzt wird, wie zur Schaffung neuer Oberflächen ∂O_B benötigt wird.

$$\frac{\partial}{\partial O_B} \Pi_G = \frac{\partial}{\partial O_B} (\Pi + \Gamma) = \frac{\partial}{\partial O_B} (W - A_a + \Gamma) \quad (2.3)$$

Wird nun von festgehaltenen Rändern der Scheibe ausgegangen, so leisten die äußeren Kräfte keine Arbeit, d.h. die Energie für den Rissfortschritt kommt aus der im Körper gespeicherten Formänderungsenergie W . Diese setzt sich aus der Formänderungsenergie einer Scheibe ohne Riss W_0 und einer Minderung W_1 infolge des Risses zusammen.

$$\Pi_G = \Pi + \Gamma = W_0 + W_1 + \Gamma = W_0 - \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E'} + 4a\gamma_0 \quad (2.4)$$

$$E' = E_G \text{ für den ebenen Spannungszustand ESZ} \quad (2.5)$$

$$E' = \frac{E_G}{1-\nu^2} \text{ für den ebenen Verzerrungszustand EVZ} \quad (2.6)$$

Die Formänderungsenergie W_0 einer unendlich großen Scheibe ohne Fehler ist unabhängig vom Rissfortschritt. Daher folgt für das Risskriterium bei einem Oberflächenzuwachs bei konstanter Scheibendicke d folgende Bedingung am Instabilitätspunkt:

$$\frac{\partial}{\partial 2a} \Pi_G = \frac{\partial}{\partial 2a} (\Pi + \Gamma) = -\frac{\pi \sigma^2 a}{E'} + 2\gamma_0 = 0 \quad (2.7)$$

Daraus folgt die kritische äußere Zugspannung, die bei gegebener Risslänge $2a$ einen kritischen, d.h. instabilen Rissfortschritt auslöst:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E'\gamma_0}{\pi a}} \quad (2.8)$$

Der Riss breitet sich demnach instabil aus, wenn bei einer infinitesimalen Rissverlängerung mehr potentielle Energie vom Körper freigesetzt wird, als Bedarf an Oberflächenenergie benötigt wird (Abb. 2.1). Mit der Betrachtung nach Griffith kann man die Festigkeit eines Körpers bei Bekanntheit seines größten Risses der Länge $2a$ vorhersagen.

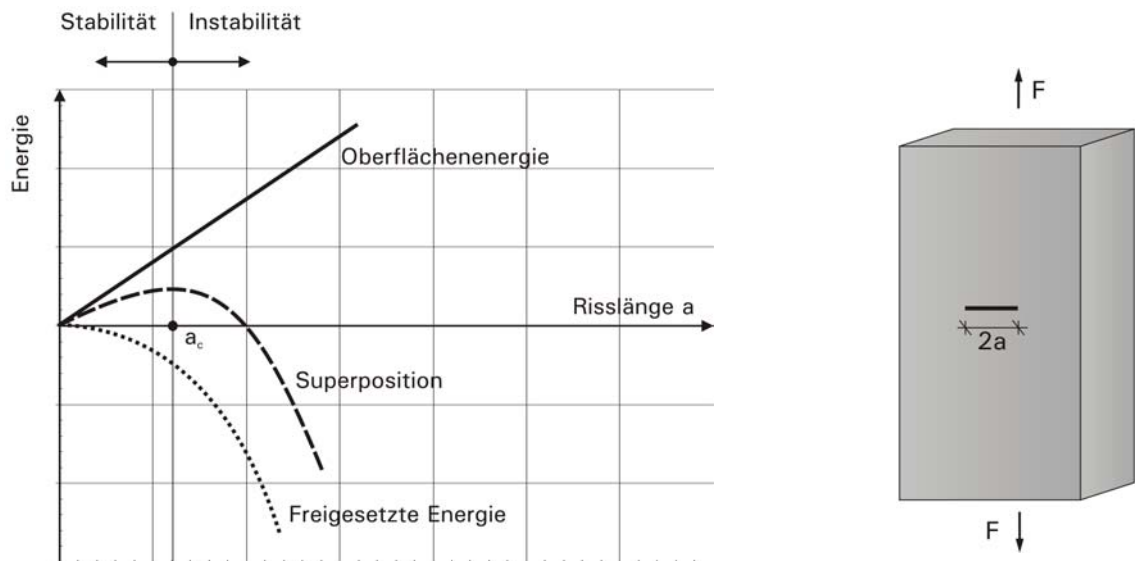


Abb. 2.1: Instabilitätskriterium nach Griffith [47] und zugehöriger Griffith-Riss

Das materialabhängige Spröbruchkriterium nach Griffith lässt sich auch mit der Energiefreisetzungsrate G_c darstellen.

$$G_c = \frac{\partial \Gamma}{\partial O_B} \quad (2.9)$$

Irvin betrachtet den Spannungsintensitätsfaktor K und die Energiefreisetzungsrate G beim Rissfortschritt. Risse lassen sich in der linearen Bruchmechanik aus einer Kombination der drei charakteristischen Beanspruchungsarten (Modi) der Bruchmechanik approximieren (Abb. 2.2): Zugbeanspruchung senkrecht zur Rissfläche (Modus I), Scherung quer zur Rissfläche (Modus II) und Scherung längs zur Rissfläche (Modus III) [31].

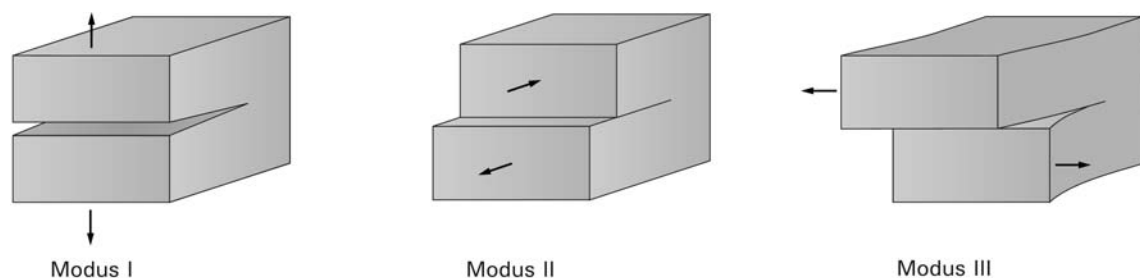


Abb. 2.2: Die drei charakteristischen Beanspruchungsarten

Für die Rissausbreitung in einer Glasscheibe ist der Modus I die häufigste Ursache. Die Rissfläche und die Rissausbreitung orientieren sich dabei senkrecht zur maximalen Zughauptspannung. Man erhält nach Irvin aus der gespeicherten potentiellen Energie Π die infinitesimale Energiefreisetzungsrate G , auch Rissfortschrittskraft genannt:

$$G = -\frac{\partial \Pi}{\partial O_B} \quad (2.10)$$

Daraus leitet sich die Bedingung für den sicheren Zustand eines Bauteils bei aufgebrachtener Energiefreisetzungsrate G ab:

$$G \leq G_c \quad (2.11)$$

Der von Irvin definierte Spannungsintensitätsfaktor K_I für den Sprödbbruch im Modus I lautet:

$$K_I^2 = GE' \quad (2.12)$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.13)$$

Der sichere Zustand eines Bauteils ist gewährleistet, wenn für den Spannungsintensitätsfaktor Folgendes gilt:

$$K_I \leq K_{Ic} = \sqrt{G_c E'} \quad (2.14)$$

Um ein beliebiges, ebenes Rissproblem mit dem Spannungsintensitätsfaktor K_I zu beschreiben, wird der Geometriefaktor Y eingeführt:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a Y} \quad (2.15)$$

Der Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic} , auch als Bruchzähigkeit bekannt, kann experimentell bestimmt werden. Er ist jedoch keine reine Materialkenngröße, sondern wird auch von der Probengeometrie beeinflusst.

Treten neben den senkrecht zur Bruchfläche wirkenden Zugkräften auch Scherkräfte auf, so spricht man von einem „mixed mode“. Aus den Spannungsintensitätsfaktoren K der einzelnen Beanspruchungsmodi muss dann ein zusammenfassendes Kriterium formuliert werden.

Erfolgt während der Rissausbreitung ein Wechsel zwischen den einzelnen Beanspruchungsarten (Modi) oder herrscht eine Kombination daraus vor, so ändern sich die Richtung und die Orientierung der Rissfläche.

Bei Glasbauteilen sind Defekte an der Oberfläche, im Bereich von Bohrungen oder am Glasrand auf Grund von Herstellung und Nutzung unvermeidbar. Diese Defekte bilden die Grundlage für eine Rissausbreitung im Glas. Das Risswachstum bei lang anhaltender mechanischer Beanspruchung oder durch chemische Vorgänge im Bereich des Rissgrunds mindert die Beanspruchbarkeit eines Glasbauteils ab. Daher sind die Ergebnisse, die an

ungealterten Proben in Kurzzeitversuchen ermittelt werden, ungeeignet, um die reale Beanspruchbarkeit über die Lebensdauer eines Bauteils abzubilden.

Im Sicherheitskonzept des konstruktiven Glasbaus werden Einflüsse aus Alterung und Einwirkungsdauer sowie die höhere Wahrscheinlichkeit eines relevanten, tiefen Risses mit zunehmender Oberfläche eines Glasbauteils berücksichtigt. Auch die Rissorientierung im Spannungsfeld ist maßgebend für die Bauteilfestigkeit. Deshalb werden die Biegezugfestigkeiten meist in einem Doppelring-Biegeversuch mit einem homogenen biaxialen Spannungszustand ($\sigma_1 = \sigma_2$) ermittelt [26]. Ist der Einfluss der Glaskante von Bedeutung, so wird die Biegezugfestigkeit in einem Vier-Punkt-Biegeversuch ($\sigma_1 \neq \sigma_2$) bestimmt. Mit Hilfe der statistischen Auswertung nach Weibull lassen sich aus Messreihen Prognosen über das Festigkeitsverhalten von Glasbauteilen treffen [21]. Dabei wird die Fehleranzahl pro Volumeneinheit oder pro Oberfläche mit der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Fehlergröße betrachtet. Für die Bemessung eines Glasbauteils können also nur Bruchteile der theoretischen Materialfestigkeit des Werkstoffs Glas mit einem ungestörten Gefüge angesetzt werden.

Die derzeitigen Glasbemessungsregeln beruhen auf dem Prinzip der zulässigen Biegezugspannungen. Dabei werden die rechnerisch ermittelten Spannungen im Glas infolge einer Einwirkung mit den zulässigen Glasbiegezugspannungen verglichen. Die zulässigen Spannungen ergeben sich aus den im Versuch ermittelten charakteristischen Spannungen, die mit einem globalen Sicherheitsbeiwert von $\gamma = 2,4$ [40] abgemindert werden.

In der [TRLV] werden für Vertikalverglasungen aus Spiegel- und Gussglas höhere zulässige Spannungen angesetzt als bei Überkopfverglasungen. Dies beruht auf der unterschiedlichen Lasteinwirkungsdauer. Für Überkopfverglasungen sind meistens ständig wirkende Lasten (Eigengewicht, Schnee) maßgebend, wohingegen für Vertikalverglasungen kurzzeitige Einwirkungen (Windbelastungen, Anprall) meist bemessungsrelevant sind. Die unterschiedliche Lastdauer und deren Einfluss auf das Risswachstum findet somit Berücksichtigung.

Im Normenentwurf „Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln“ [E DIN 18008] findet ein modernes Bemessungskonzept Einzug in den konstruktiven Glasbau. Der Nachweis beruht auf dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte, wobei der Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen sind. Last- und Widerstandsseite werden jeweils mit Teilsicherheitsfaktoren beaufschlagt. Zusätzlich berücksichtigen Kombinationsbeiwerte das gleichzeitige Auftreten mehrerer Einwirkungen.

2.1.2 Vorgespanntes Glas

Als Basisprodukt für das thermische Vorspannen dient meist Floatglas. Das Glas wird bei dieser Temperaturbehandlung im Vorspannofen über seine Transformationstemperatur T_G hinaus erwärmt und anschließend beidseitig mittels Luftdüsen rasch abgekühlt. Das aus der raschen Abkühlung resultierende Temperaturprofil und der im Querschnitt vorherrschende Viskositätszustand haben das Einprägen eines Eigenspannungszustandes zur Folge. Die oberflächennahen Schichten erstarren bei Beginn der Abkühlung und ziehen sich zusammen. Dabei verbleibt der Kern noch in zähflüssigem Zustand, was wiederum eine Spannungsrelaxation an den Oberflächen ermöglicht. Nach weiterer Abkühlung erstarrt auch das Innere der Glasscheibe, sie wird jedoch beim Zusammenziehen durch die bereits erstarrten Oberflächenschichten behindert. Eine Spannungsrelaxation ist nun nicht mehr möglich. Infolge der Dehnungsbehinderung werden die oberflächennahen Glasschichten überdrückt (Abb. 2.3 A1). Das thermische Vorspannen von Glas induziert somit eine Druckspannung an der Oberfläche und eine Zugspannung im Kern der Glasscheibe [40]. Durch die eingeprägte Druckspannung werden Defekte an der Glasoberfläche überdrückt. Dies führt bei vorgespannten Gläsern zu höheren zulässigen Biegezugspannungen und ermöglicht dadurch eine höhere Momentenbeanspruchung (Abb. 2.3 A2 & B, Tab. 2.2).



Abb. 2.3: Glas unter Biegebeanspruchung

Je nach Grad der Vorspannung unterscheidet man zwischen voll vorgespannten Scheiben, auch Einscheibensicherheitsglas (ESG) genannt, und teilvorgespanntem Glas (TVG).

Neben dem thermischen Vorspannen gibt es das im Bauwesen selten angewendete chemische Vorspannen. Dieses wird hauptsächlich bei dünnen

Glasscheiben eingesetzt. Durch eine Behandlung der Scheiben in einem Salzbad findet an der Oberfläche ein einstufiger Ionenaustausch statt. Dabei werden Na-Ionen durch größere Ka-Ionen in der dünnen Oberflächenschicht des Glases ersetzt. Die neu eingelagerten Ka-Ionen bewirken eine hohe Druckvorspannung an der Glasoberfläche.

In [23] werden „engineered stress profiles“ (ESP) in Glas vorgestellt. Bei ESP führt ein zweistufiger Ionenaustausch zu einer maximalen Druckvorspannung unterhalb der Glasoberfläche anstatt direkt an dieser. Dadurch kann ein Risswachstum, beginnend an der Glasoberfläche, in der Druckzone gestoppt werden. Durch diese Art der chemischen Vorspannung kündigt sich ein Versagen des spröden Werkstoffs durch Risse an. Mit diesem Vorspannverfahren kann zudem das Traglastniveau von ESP-Glas mit einer hohen Wahrscheinlichkeit vorbestimmt werden.

Tab. 2.2: *Biegezugfestigkeit von Kalknatronsilicatgläsern*

	Charakteristische Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Zulässige Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Normung und Richtlinien
Floatglas	45	18 (Überkopfverglasung: 12)	[DIN EN 572]; [TRLV]
ESG aus Floatglas	120	50	[DIN EN 12150]; [DIN 18516]; [TRLV]
ESG aus emailliertem Floatglas (Zugoberfläche)	75	30	[DIN EN 12150]; [DIN 18516]; [TRLV]
ESG aus Ornamentglas, gezogenes Flachglas	90	37	[DIN EN 12150], [TRLV]
TVG aus Floatglas	70	29	[DIN EN 1863], [G1]
TVG aus emailliertem Floatglas (Zugoberfläche)	45	18	[DIN EN 1863], [G1]

2.1.3 Bruchstücke von Einscheibensicherheitsglas

Öffnet sich bei ESG ein Riss von der Glasoberfläche bis in die Zugzone hinein, so bricht das voll vorgespannte Glas schlagartig. Auslöser für den Glasbruch kann einerseits eine Zugbeanspruchung infolge einer äußeren Belastung oder eine lokale Oberflächenverletzung sein. Wird z.B. durch Anschlagen eine lokale Kerbe, die bis in die Zugzone reicht, erzeugt, so fraktioniert die komplette Glasscheibe in kleine stumpfkantige Glaskrümel. Die Größe dieser Bruchstücke ist dabei abhängig von der in der Scheibe gespeicherten elastischen Energie nahe der Risspitze. Diese Energie ergibt

sich zum einen auf Grund des Vorspannprozesses aus dem eingepprägten Eigenspannungszustand und zum anderen aus der elastischen Verformung der Scheibe, wenn sie äußeren Belastungen ausgesetzt ist. Von der Risspitze ausgehend bricht die Scheibe von innen heraus und setzt die gespeicherte Energie frei. Über den Querschnitt der Höhe d betrachtet, eilt die Bruchausbreitung in der Zugzone dem Versagen in der Druckzone voraus (Abb. 2.4). Beim Erreichen der Druckzone tritt ein Wechsel zwischen den einzelnen Beanspruchungsarten ein. Dabei entstehen die hierfür charakteristischen Lanzettbrüche in der Rissfläche [31]. Die Bruchausbreitungsgeschwindigkeit in Scheibenebene steigt laut [6], [26] auf bis zu 1500 m/s an. Beim Erreichen der maximalen Geschwindigkeit tritt eine Bruchlinienverzweigung auf. Die Ausbreitung dieser neu entstandenen Bruchlinien erfolgt nun wiederum bis zum Erreichen der maximalen Geschwindigkeit. Dann erfolgt erneut eine Verzweigung. Je höher die vorhandene Energie im System, umso schneller erfolgt eine Bruchlinienverzweigung und führt folglich zu kleineren Bruchstücken. Es gibt somit einen Schwellenwert für die gespeicherte Energie bzw. für den Grad der Vorspannung, unterhalb dessen keine Bruchlinienverzweigungen erreicht werden. Bei gleicher Schädigungsursache kann man daher auf Grund des Bruchbilds auf den Grad der Vorspannung zurückschließen [6], [31].

ESG, das mittels Körner vorgeschädigt wird, zeigt ein nicht so feines Bruchbild wie ESG, das bei einem Biegeversuch zerstört wird. Die Verformung bei der Biegebeanspruchung erhöht die gespeicherte Energie im System und führt zu einem feinkrümeligeren Bruchbild. Da die Tragfähigkeit im gebrochenen Zustand vom Bruchbild abhängig ist, wird nach der Art der Schädigung unterschieden.

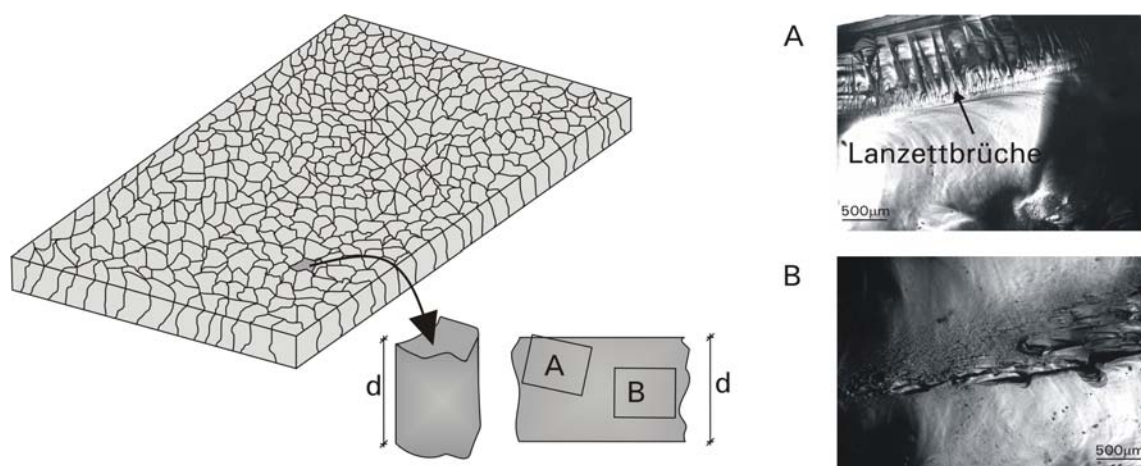


Abb. 2.4: Rissflächenbilder von ESG-Bruchstücken

Um beim thermisch vorgespannten Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas (ESG) eine Mindestvorspannung zu gewährleisten, wird gemäß [DIN EN 12150] das Bruchbild von definierten Testscheiben beurteilt. Hierfür werden

die Mindestanzahl der Bruchstücke innerhalb eines Zählfeldes sowie die Maximallänge der Bruchstücke überprüft. Auf Grund der unterschiedlichen Abkühlung beim Vorspannen des ESG am Rand und an den Ecken werden diese Bereiche bei diesem Test als nicht relevant betrachtet und daher nicht untersucht.

Die Glasbruchstücke einer mittels Körner geschädigten ESG-Scheibe weisen Lanzettbrüche im Übergangsbereich der inneren Zugzone zur äußeren Druckzone auf. Des Weiteren sind Gefügestörungen nahe der Glasoberfläche erkennbar (Abb. 2.4A). Dieses augenscheinlich geschichtete Glasgefüge stellt den Ausgangspunkt für weitere Glasschädigungen im fraktionierten Zustand dar.

Die Beurteilung von teilvorgespanntem Kalknatronglas (TVG) auf Grund des Bruchbilds ist ungleich schwerer. TVG muss ein grobes Bruchbild besitzen und darf nicht in viele einzelne Glasbruchstücke analog zum ESG zerfallen. Eine Bruchlinienverzweigung und dabei entstehende Inselbildung sollte bei TVG vermieden werden. Laut [DIN EN 1863] sind 5 Scheiben zu prüfen, wobei mindestens 4 nicht mehr als 2 Inselbruchstücke aufweisen dürfen. Als Inseln werden Bruchstücke bezeichnet, deren Flächen/Massenäquivalent $\geq 100 \text{ mm}^2$ sind, sonst spricht man von kleinen Bruchstücken. Das so genannte Flächen/Massenäquivalent ist definiert als Quotient aus dem Gewicht der Bruchstücke mit dem Produkt aus Scheibendicke und Dichte. Keine dieser Inseln darf ein Flächen/Massenäquivalent $\geq 1.000 \text{ mm}^2$ besitzen und das Flächen/Massenäquivalent aus der Summe aller kleinen Bruchstücke darf nicht $\geq 5.000 \text{ mm}^2$ sein. Sollte eine der 5 Versuchsscheiben dies nicht erfüllen, so darf sie nicht mehr als 3 Inseln aufweisen und gleichzeitig muss das Flächen/Massenäquivalent aller Inseln und Bruchstücke $\geq 50.000 \text{ mm}^2$ sein. Diese genaue Betrachtung des Bruchbilds soll die Produktqualität sicherstellen, um die gewünschte hohe Resttragfähigkeit von TVG zu erzielen und das Herabfallen von Bruchstücken auf Verkehrsflächen zu verhindern.

Eine zerstörungsfreie Prüfung der Vorspannung ist mittels spannungsoptischer Messung möglich. Glas, das infolge äußerer Belastungen und/oder thermischer Behandlung einen Spannungszustand erfährt, weist bei einfallenden Lichtstrahlen Doppelbrechungen auf. Das spannungsoptische Grundgesetz nach Maxwell-Wertheim ermöglicht die Messung der Hauptspannungsdifferenzen im Glas [40].

Auf Grund des Eigenspannungszustands von ESG und TVG müssen die Kantenbearbeitung und der Zuschnitt der Scheibe einschließlich Bohrungen vor dem Vorspannprozess abgeschlossen sein.

2.2 Zwischenschicht

Bei der Herstellung von Verbundglas (VG) und Verbundsicherheitsglas (VSG) werden die einzelnen Glasscheiben mit einer Zwischenschicht bei hohem Druck und hoher Temperatur im Autoklaven flächig miteinander verklebt (Kapitel 3.1). Bei dieser flächigen Verklebung spricht man meist von einer Laminierung. Die Zwischenschicht stellt den Verbund zwischen den einzelnen Glasscheiben her und bindet bei Glasbruch die einzelnen Bruchstücke. Sie ist daher sowohl für die Tragfähigkeit als auch für die Resttragfähigkeit von entscheidender Bedeutung. Für VSG-Systeme kommen meist Kunststoffe, deren Materialeigenschaften stark temperatur-, zeit- und feuchtigkeitsabhängig sind, zum Einsatz. Auch die Einflüsse aus UV-Strahlung und das Kriechverhalten sind bei der Wahl der Zwischenschicht zu beachten. Ebenso ist deren Feuchtigkeitsverhalten, z.B. bei Bewitterung von freien Kanten des VSG-Systems, zu berücksichtigen.

2.2.1 Polyvinylbutyral-Folien als Zwischenschicht

Die heute am häufigsten verwendete Zwischenschicht für Verbundsicherheitsglas ist eine Folie aus Polyvinylbutyral (PVB). Bei PVB handelt es sich um einen amorphen Thermoplasten mit lang gestreckten, verzweigten Makromolekülketten. Unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G frieren die mikrobrownschen Bewegungen der Moleküle eines Polymers ein [25]. Die zwischenmolekularen Kräfte sorgen dann für einen relativ steifen Werkstoff (Abb. 2.5). Die Molekülketten liegen als verschlungenes Knäuel vor - man spricht von einem amorphen Zustand oder auch Glaszustand. Da amorphe Thermoplaste glasklar sind, werden sie auch als synthetische oder organische Gläser bezeichnet.

Zustände eines amorphen Thermoplasts

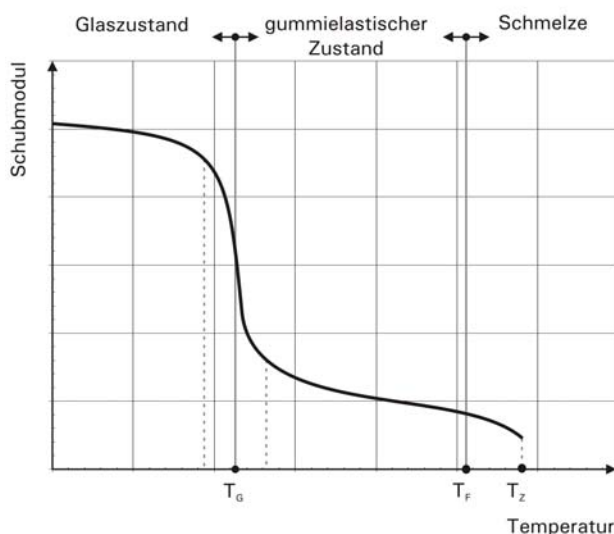


Abb. 2.5: Zustandsänderung von amorphen Thermoplasten [61]

Mit steigender Temperatur treten in den Makromolekülen so genannte sekundäre Dispersionsgebiete auf, in denen Seitengruppen oder Hauptketten beweglich werden und Konformationsänderungen vollziehen können. Je ausgeprägter diese sekundären Dispersionsgebiete sind, umso schlagzäher ist der Kunststoff. Bei Steigerung der Temperatur und der damit einhergehenden Makromolekülbewegungen verringert sich seine Festigkeit. Gleichzeitig steigert sich die Dehnbarkeit des Kunststoffs. Oberhalb der Glasübergangstemperatur werden die zwischenmolekularen Kräfte schwächer, der Thermoplast verhält sich gemäß seiner Bezeichnung bei Wärme (thermos) formbar (plastisch). Bei weiterer Steigerung der Temperatur geht dieser Werkstoff kontinuierlich in einen Schmelzzustand über. Wird die Schmelze nach Erreichen der Fließtemperatur T_F weiter erhitzt, so werden die Makromolekülketten zerstört. Der Werkstoff zersetzt sich bei der Zerstörungstemperatur T_z [46], [61].

PVB gehört zu der Gruppe der Polyvinylacetale. Polyvinylbutyral wird in einem mehrstufigen Prozess hergestellt. Aus Acetylen und Essigsäure werden zunächst Vinylacetate als Monomere gewonnen, die nach der Polymerisation Polyvinylacetat bilden. Dies wird mit Hilfe von Methanol zu Polyvinylalkohol umgesetzt. Durch Acetalisierung von Butyraldehyd entsteht Polyvinylbutyral (PVB). Dieses Polyvinylbutyral besitzt jedoch noch keine ausreichende Elastizität und Zähigkeit, um als Zwischenschicht bei Verbundsicherheitsglas zu fungieren. Daher werden geeignete Weichmacher - meist Ester des Triethylenglycols - hinzugegeben. Der Weichmacheranteil (ca. 25% [41]) bestimmt zu einem gewissen Teil die Glasübergangstemperatur T_G , ist also produkt- bzw. herstellerabhängig. Die Haftung der Folie auf Glas wird durch Ausbildung von Wasserstoffbrücken des Polyvinylalkohols der OH-Gruppe des Polyvinylbutyrals und den wasserunverträglichen Gruppen der Glasoberfläche erzielt [28]. Des Weiteren werden den PVB-Folien oft geringe Mengen Kaliumsalze (ca. 0,4% [41]) beigegeben, um eine zu starke Haftung am Glas zu verhindern.

Die Haftung der Zwischenschicht kann durch Verschmutzungen auf der Glasoberfläche beeinträchtigt werden. Auch die Beschaffenheit der Glasoberfläche selbst hat einen erheblichen Einfluss auf die Haftung. Unterschiedliche Rauigkeiten der Glasoberfläche führen zu unterschiedlichen mechanischen Verzahnungen von Glas und Polymerfolie.

Die Glasübergangstemperatur T_G liegt bei PVB laut [35] zwischen 10°C und 15°C , wobei der Hersteller DuPont für sein PVB-Produkt (Butacite®) einen Temperaturbereich von 18°C bis 23°C angibt [14]. Diese Glasübergangstemperatur T_G ist nicht als absolute Temperatur zu verstehen, sondern stellt vielmehr einen Übergangsbereich der Materialeigenschaften dar. Unterhalb der Glasübergangstemperatur verhält sich PVB im einaxialen Zugversuch

nahezu elastisch-plastisch (Abb. 2.6: $T_1 < T_G$). Bis zur Fließdehnung ε_y weist es ein annähernd linear-elastisches Verhalten auf. Nach einer anschließenden kurzen Entfestigungsphase erfolgt eine Wiederverfestigung bis zum Erreichen der Bruchspannung σ_u . Oberhalb der Glasübergangstemperatur (Abb. 2.6: $T_2 > T_G$) verringert sich der Elastizitätsmodul E_L von PVB. Der Spannungs-Dehnungsverlauf ist nicht mehr linear-elastisch. In diesem Temperaturbereich ist das viskose Verhalten stark ausgeprägt.

Einfluss der Glasübergangstemperatur T_G

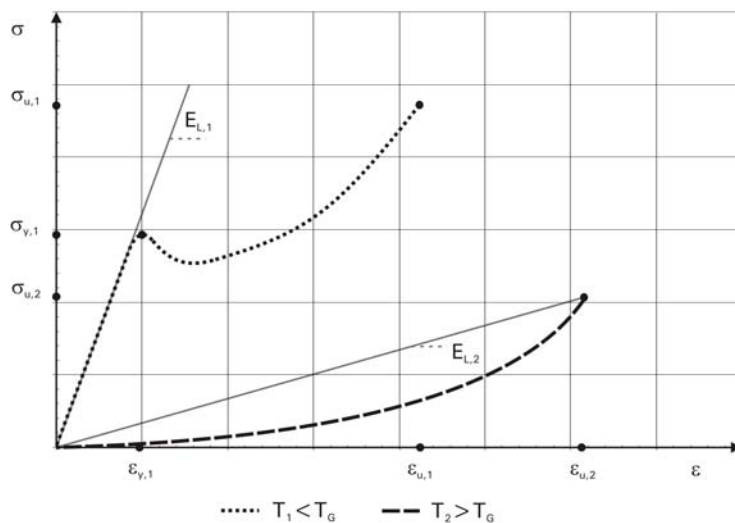


Abb. 2.6: Einfluss der Versuchstemperatur auf den Spannungs-Dehnungsverlauf der Zwischenschicht im einaxialen Zugversuch

Zugversuche an PVB-Folien [35] bei Temperaturen zwischen -15°C und 21°C zeigen deutlich die temperaturabhängigen Materialeigenschaften auf. Die Zugfestigkeit nimmt mit geringer Verformungsgeschwindigkeit ab, gleichzeitig erhöht sich dabei die Bruchdehnung ε_u . Die Wiederverfestigung im Zug- wie auch im Scherversuch wird auf die fortgeschrittene Ausrichtung der Molekülketten zurückgeführt.

Untersuchungen von sprengwirkungshemmenden Verglasungen bei Raumtemperatur haben gezeigt, dass bei sehr hohen Verformungsgeschwindigkeiten auch PVB-Folien (Butacite[®]) ein elastisch-plastisches Verhalten mit Ent- und Wiederverfestigungsphase oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G besitzen können. Bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten nimmt die Bruchdehnung ab, jedoch steigen die Zugfestigkeit und die Bruchenergie an. Der Elastizitätsmodul E_L der Zwischenschicht erhöht sich auf Grund der hohen Verformungsgeschwindigkeit von ca. 10 N/mm^2 auf ca. 278 N/mm^2 [4].

Bei einem intakten Laminat ist die Qualität der Schubübertragung zwischen den einzelnen Schichten für die Gesamttragfähigkeit maßgebend. Die Zwischenschicht übernimmt diese Aufgabe zwischen den einzelnen

Scheiben eines VSG-Systems. Da PVB jedoch ein stark temperatur- und zeitabhängiges Schubverhalten aufweist, gilt seiner Erforschung besonderes Interesse. Es gibt eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich diesem Thema gewidmet haben. In [3], [17], [37] und [59] sind zeit- und temperaturabhängige Schubmodule gegeben. Diese Forschungsarbeiten zeigen Abweichungen bei den angegebenen Schubmodulen auf, die vermutlich auf unterschiedliche PVB-Folientypen, Foliendicken, Versuchsaufbauten und -abläufe zurückzuführen sind.

Die in [37], [38] und [39] ermittelten und in [62] beurteilten Grenzfunktionen geben die zeit- und temperaturabhängigen Sekundenschubmoduli vor:

$$G(T \geq 20^\circ\text{C}) = 0,008(100 - T) - 0,0011(50 + T)\log(t) \quad [\text{Nmm}^2, \text{s}, ^\circ\text{C}] \quad (2.1)$$

$$G(T \leq 10^\circ\text{C}) = 2,0 - 0,2\log(t) \quad (2.2)$$

Die logarithmische Beschreibung des Schubmoduls in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsdauer liefert laut [62] einen auf der sicheren Seite liegenden unteren Grenzwert. Dieser kann als Grundlage für eine VSG-Bemessung dienen. Fällt die Temperatur unter die Glasübergangstemperatur von PVB, so werden die Kurzzeitversuche mit der logarithmischen Beschreibung sehr konservativ approximiert. Durch Exponentialfunktionen, die auf rheologischen Modellen der Maxwellkette und Zeit-Temperatur-Verschiebungsbeziehungen basieren, kann eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen für diesen Temperaturbereich erzielt werden. Jedoch ist die Bestimmung der hierfür nötigen Parameter äußerst aufwändig und wurde bisher nur in Torsionsschwingungsversuchen an Proben aus PVB durchgeführt. Die Übertragung auf PVB-Folien in VSG-Systemen unter Biegebeanspruchung gilt es noch eingehend zu prüfen [59]. Da jedoch bei der baupraktischen Anwendung von VSG-Systemen stets mit einer Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur von PVB zu rechnen ist, ist die logarithmische Ermittlung der PVB-Schubmoduli zur Glasbemessung hinreichend genau [78]. In dem Normenentwurf der [E DIN 18008] zur Bemessung für kurzzeitige Belastungen darf ein Schubmodul von 0,4 N/mm² angesetzt werden.

Die langfristigen klimatischen Einflüsse auf das Materialverhalten von PVB-Folien werden in [17] und [57] betrachtet. Demnach führt eine hohe Umgebungsfeuchte zu einem Feuchteintritt am Rand des VSG-Systems. Hingegen führt trockenes, heißes Klima zu einer Austrocknung. Ein hoher Wasseranteil in der Folie mindert den Schubmodul und kann ein Adhäsionsversagen zur Folge haben. Diese Delaminationserscheinungen gehen dabei stets vom Glasrand aus. Eine geringe Umgebungsfeuchte, gepaart mit UV-Strahlung und hohen Temperaturen, kann ein sprödes Materialverhalten bewirken.

2.2.2 SentryGlas® Plus als Zwischenschicht

Die Firma DuPont hat eine neue Zwischenschicht für Verbundglas mit dem Produktnamen SentryGlas® Plus entwickelt. Da dieses Produkt nicht in der Bauregelliste A Teil 1 [DIBt BRL08] aufgenommen ist und auch keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung besitzt, werden die mit ihr hergestellten Glasprodukte in Deutschland als Verbundgläser (VG) bezeichnet. Da diese Glasprodukte jedoch gemäß [DIN EN ISO 12543] im Falle eines Glasbruchs eine Resttragfähigkeit bieten und das Risiko von Schnitt- und Stichverletzungen gering ist, wird in dieser Arbeit hierfür trotzdem der Begriff VSG-Systeme verwendet.

Der Hersteller von SentryGlas® Plus gibt keine Auskünfte zur genauen chemischen Zusammensetzung seines Produkts. Er bezeichnet es als „Ionoplast“. Die Werkstoffeigenschaften lassen den Rückschluss auf einen Thermoplast zu. Laut [10], [9] handelt es sich bei SentryGlas® Plus um einen teilkristallinen Thermoplasten. Dieser besteht aus amorphen und kristallinen Bereichen. Die Veränderungen der amorphen Phase werden durch die Glasübergangstemperatur T_G und die Fließtemperatur T_F gekennzeichnet. Für die kristalline Phase ist die Schmelztemperatur T_m der Kristallite maßgebend, wobei stets $T_G < T_m$ gilt [61], [46]. Die kristallinen Bereiche im Polymer bewirken jedoch meist ein opakes Erscheinungsbild, das SentryGlas® Plus jedoch nicht aufweist.

Die SentryGlas® Plus Zwischenschicht - im Folgenden SGP genannt - besitzt im Vergleich zu PVB eine hohe Steifigkeit bei Raumtemperatur. Bei der Verbundglasherstellung wird SGP als Plattenware und PVB als Rollenware verwendet. Der Herstellungsprozess von VSG-Systemen mit SGP ist dem mit PVB-Folien ähnlich. Bei der Produktion ist auf eine abgestimmte Luftkonditionierung zu achten. Die Glasoberfläche hat laut Herstellerangaben erhebliche Auswirkungen auf die Qualität der Haftung von SGP. Die Zinnseite (T) von Floatglas sollte stets im Verbund mit SGP stehen, da SGP mit den Zn-Ionen eine gute Haftung ausbilden kann. Bei mehrlagigem Aufbau der Verbundgläser stellt sich daher die Frage nach dem Umgang mit der Luftseite (A).

Die zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduli der Zwischenschicht SGP weichen deutlich von denen von PVP ab. SGP zeigt sich in den baupraktischen Temperaturbereichen deutlich schub- und biegesteifer (Tab. 2.3). Dies lässt sich auf die im Vergleich zu PVB erhöhte Glasübergangstemperatur $T_{G,SGP} = 55^\circ\text{C}$ zurückführen [4], [14]. Bei vielen baupraktischen Anwendungen liegt die Bauteiltemperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur. Daher könnte bei der Bemessung der günstig wirkende Schubmodul von SGP angewendet werden.

Tab. 2.3: SGP-Schubmodul in Abhängigkeit von Belastungsdauer und Temperatur [3]

G_{SGP} [N/mm ²]	3 s	60 s	1 h	1 Tag	1 Monat	> 1 Jahr
20°C	125	96,0	42,7	21,6	9,7	6,5
30°C	65,7	35,4	14,6	6,9	3,1	2,9
40°C	22,2	11,6	5,1	2,9	2,8	2,0
50°C	7,1	3,8	2,9	2,6	2,0	2,0

Bei Versuchen [4] an sprengwirkungshemmenden Verglasungen bei Raumtemperatur mit sehr hohen Verformungsgeschwindigkeiten erweist sich SGP unterhalb der Glasübergangstemperatur [4] als nahezu elastisch-plastisch mit einem relativ konstanten Elastizitätsmodul von ca. 500 N/mm². Die Fließspannung und die Bruchenergie steigen mit der Belastungsgeschwindigkeit an, wobei die Bruchdehnung abnimmt.

Einaxiale Zugversuche an gealterten Versuchskörpern bei Temperaturen $T = 23^\circ\text{C} < T_G$ zeigen die Auswirkungen der Umwelteinflüsse auf die Zwischenschicht. Die UV-gealterten Versuchskörper weisen ein spröderes Materialverhalten mit einer erhöhten Fließspannung σ_y auf. Demgegenüber mindert eine Wasserlagerung die Fließspannung σ_y ab und erhöht die Bruchdehnung ε_u im Vergleich zu den Ergebnissen von ungealterten Referenzproben [10], [9].

2.2.3 Vergleich der Zwischenschichten

Im konstruktiven Glasbau werden meistens Thermoplaste als Zwischenschichtmaterial verwendet. Die in den Verglasungen auftretenden Bauteiltemperaturen beeinflussen die Materialeigenschaften dieser Thermoplaste grundlegend. So ändern Thermoplaste bei Über- bzw. Unterschreiten der Glasübergangstemperatur ihre mechanischen Eigenschaften (z.B. Steifigkeit, Festigkeit, Kriechverhalten). Bei SGP liegt diese mit $T_{G,SGP} = 55^\circ\text{C}$ bedeutend höher als bei PVB mit $T_{G,PVB} = 10\text{-}23^\circ\text{C}$. Neben den bereits aufgeführten Schubmoduli unterscheiden sich auch die weiteren physikalischen Eigenschaften dieser beiden Zwischenschichtmaterialien.

Nach [3] kann sowohl bei PVB als auch bei SGP von einer Querdehnzahl von ca. 0,5 ausgegangen werden. Der Normenentwurf [E DIN 18008] sieht dies ebenso für VSG-Systeme mit PVB für kurz andauernde Belastungen vor. Legen wir näherungsweise ein elastisches Materialverhalten zu Grunde, so bedeutet dies für den Elastizitätsmodul E:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.3)$$

$$E \approx 3G \quad (2.4)$$

Für die in [3], [17], [37], [59] angegebenen Schubmoduli ergeben sich daraus folgende Elastizitätsmoduli:

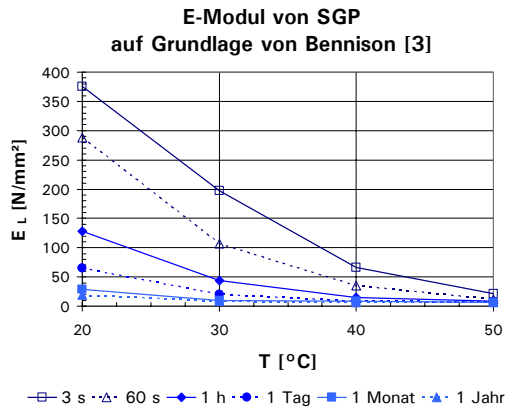


Abb. 2.7: E-Moduli von SGP in Abhängigkeit von Temperatur und Lastdauer [3]

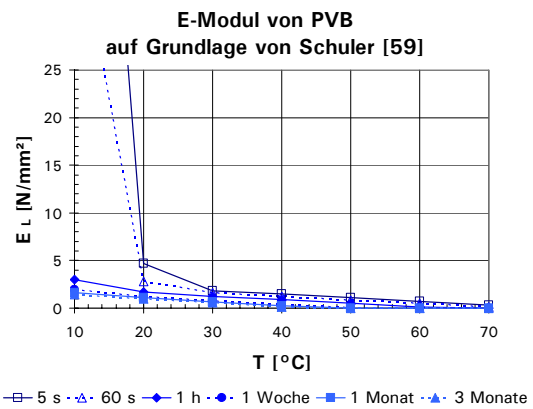
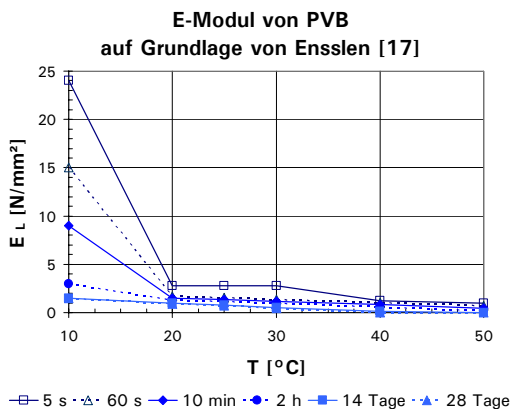
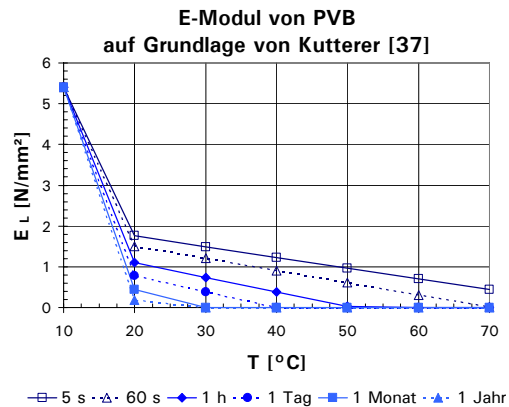
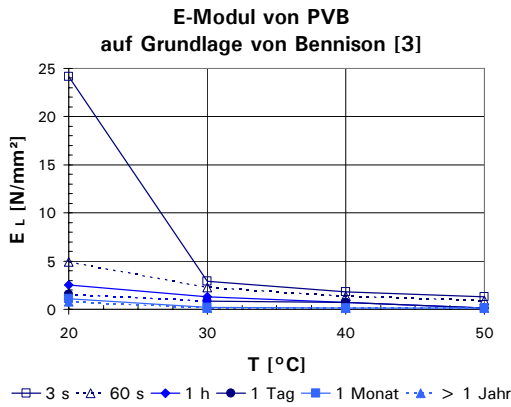


Abb. 2.8: E-Moduli von PVB in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsdauer [3], [17], [37], [59]

Im Folgenden sind die Herstellerangaben von SGP und PVB gegenübergestellt:

Tab. 2.4: Vergleich der physikalischen Eigenschaften von SGP und PVB

		SentryGlas® Plus [14]		TROSIFOL® MB [28]	
Zugfestigkeit	[N/mm ²]	34,5	[ASTM D638]	> 23	[DIN EN ISO 527]
Bruchdehnung	[%]	400	[ASTM D638]	> 280	[DIN EN ISO 527]
E-Modul	[N/mm ²]	300	[ASTM D5026]	-	-
Dichte	[g/cm ³]	0,95	[ASTM D792]	1,07	[DIN 53479]
Wärmeausdehnungs- Koeffizient	[10 ⁻⁴ K ⁻¹]	1,0-1,5	[ASTM D696]	2,2	-
Dicken	[mm]	1,52; 2,28		0,38; 0,76; 1,14; 1,52	

Außer den bereits erwähnten Zwischenschichten aus PVP und SGP kommen weitere Materialien zum Einsatz.

Gießharze werden häufig für schalldämmende und schalldämpfende VG-Systeme eingesetzt. Das Gießharz wird im Gegensatz zu PVB-Folien und SGP-Platten in flüssigem Zustand zwischen die Scheiben eingefüllt. Die Aushärtung und Verklebung mit den Glasscheiben erfolgt bei einkomponentigen Gießharzen durch UV-Bestrahlung. Bei mehrkomponentigen Gießharzen reagieren die Einzelkomponenten miteinander und bilden gleichzeitig die Verklebung mit den Scheiben. Gießharze besitzen eine sehr geringe Steifigkeit. Die relativ weiche Verbindung mittels Gießharz zwischen den Glasscheiben eines VG-Systems gewährleistet eine hohe Scheibenmasse mit geringer Biegesteifigkeit. Auftreffende Schallwellen werden absorbiert und deren Schallenergie in Wärmeenergie dissipiert. Heute werden jedoch vermehrt Schallschutzfolien auf PVB-Basis eingesetzt.

In Verbundgläsern mit Photovoltaik-elementen werden die einzelnen Solarzellen meistens in Ethylenvinylacetat (EVA) oder in Gießharz eingebettet [73]. Untersuchungen [44] zum Resttragverhalten dieser VSG-Systeme aus PVB-, EVA-Folien und Gießharz haben gezeigt, dass Systeme mit Gießharzen die geringste Reststandzeit aufweisen. Der Vergleich in [70] und [67] von VSG-Systemen mit Gießharzen und PVB-Folie als Zwischenschicht bestätigt dieses Ergebnis: VSG-Systeme mit Gießharz besitzen das ungünstigere Resttragverhalten. Daher werden im Weiteren lediglich die PVB- und die SGP-Zwischenschicht betrachtet.

2.3 Bewehrung

Glas und Beton sind in ihrer optischen Wirkungsweise auf den Menschen zwei sehr unterschiedliche Werkstoffe – Glas steht meist für Transparenz, Reflexion, Offenheit, und Leichtigkeit – Beton hingegen mit seiner in der

Regel grauen Oberfläche, vermittelt eine gewisse Schwere und Geschlossenheit. Viele mechanische Eigenschaften dieser Werkstoffe sind sich dagegen sehr ähnlich, insbesondere wenn man hochfeste Betone mit Glas vergleicht. Beide besitzen annähernd dieselbe Wichte, haben eine hohe Druckfestigkeit und eine geringe Zugfestigkeit. Auch das Versagensverhalten ist bei beiden Werkstoffen sehr spröde. Auf Grund der ähnlichen Materialeigenschaften stellt sich die Frage, ob sich das Tragverhalten von VSG-Systemen im gebrochenen Zustand nicht mit Hilfe einer Bewehrung analog zum Stahlbeton steigern lässt.

Bei einem biegebeanspruchten Stahlbetonbauteil wird die Momentenbeanspruchung durch ein Kräftepaar - bestehend aus einer Zugkraft in der Bewehrung sowie einer Druckkraft im Beton - abgetragen. Ein VSG-System im gebrochenen Zustand muss das wirkende Biegemoment ebenfalls durch ein Kräftepaar abtragen, wobei Teile des gebrochenen Glases als Druckzone wirken und die Zwischenschicht die Zugkraft und Splitterbindung übernehmen muss. Das Tragverhalten eines gebrochenen VSG-Systems ist daher abhängig von der Dehnsteifigkeit und der Zugfestigkeit der verwendeten Zwischenschichten. Um die Resttragfähigkeit zu steigern, müssen die Eigenschaften der dehnweichen Zwischenschichten durch geeignete Maßnahmen verbessert werden. Bereits in [65] wird das Integrieren von dehnsteifen und hochfesten Bewehrungselementen in die Zwischenschicht diskutiert. Die Möglichkeit einer Textilverstärkung von einzelnen Floatglasscheiben mittels aufgeklebter Glas-, Aramid- oder Carbonfasern wird in [77] untersucht. Diese Systeme besitzen eine hohe Trag- und Resttragfähigkeit; sie weisen jedoch wegen der verwendeten Duroplast-Klebstoffe (z.B. Epoxidharze) eine sehr eingeschränkte bzw. keine Transparenz auf. Die Analogie zum Stahlbetonbau ist auch bei hybriden Glasträgern mit integrierten Edelstahlprofilen in der Zugzone zu erkennen. Die in [8], [43] und [71] untersuchten Glasträger besitzen im gebrochenen Zustand eine hohe Duktilität und überschreiten dabei teilweise die erzielte Tragfähigkeit des intakten Zustands.

Die denkbaren Bewehrungsarten können sehr unterschiedlich zwischen den einzelnen Glasscheiben angeordnet werden. Sie können als Langfasern (Filamente) oder als Kurzfasern (Spinnfasern) in der Zwischenschicht - der so genannten Matrix - liegen. Ebenso kann die Bewehrung aus Geweben, Gelegen, Gewirken, Gestriken, Nonwovens oder perforierten Platten bestehen (Abb. 2.9). Platten können zudem durch versetzte Schnitte unter gleichzeitiger Streckung zu räumlichen Strukturen (z.B. Streckmetall) verformt werden. Der Bewehrungsanteil in der Zwischenschicht-Matrix beeinflusst neben der Tragwirkung auch die Transparenz und gegebenenfalls den Reflexionsgrad des VSG-Systems und demzufolge auch

bauphysikalische Belange. Der Energieeintrag in ein Gebäudes lässt sich demnach mit bewehrten VSG-Systemen reduzieren.

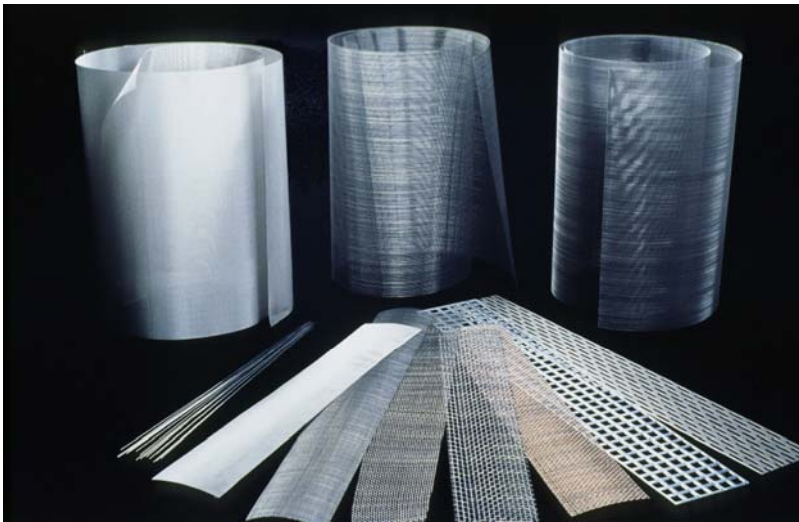


Abb. 2.9: Bewehrungsbeispiele

Einlamiertes Streckmetall, wie es bei der Fassade des KfW Hauptgebäudes in Frankfurt zum Einsatz kam [1], bedingt sehr dicke Zwischenschichten, hat jedoch den Vorteil von Licht- bzw. Durchsichtsteuerung, je nach Einfallswinkel. Um diese bewehrungsabhängige Eigenschaft zu charakterisieren, wird im Folgenden die Parallelprojektion einer Bewehrung auf die dahinter liegende Glasoberfläche betrachtet. Das Verhältnis der offenen Fläche der Bewehrung in Bezug auf die Gesamtfläche wird als offene Siebfläche (A_o) bezeichnet. Neben der Sonnen- und Sichtschutzfunktion könnten Bewehrungen auch als Träger von Dünnschicht-Solarmodulen im VSG-System fungieren.



Abb. 2.10: Bewehrung: A mit und ohne Edelstahlgewebe EGI, B Carbonfaserrovings

Die Bewehrung ist bei entsprechendem Abstand des Betrachters und bei geeigneter Wahl der Maschenweite und des Drahtdurchmessers mit dem Auge kaum sichtbar (Abb. 2.10 A). Die Winkelsehschärfe, d.h. der kleinste Winkel, unter dem zwei Objekte als getrennt wahrgenommen werden können, liegt bei einem Menschen mit guter Sehschärfe bei $1/60^\circ$. Folglich

tritt eine fein strukturierte Bewehrung – insbesondere ein Gewebe im Überkopfbereich – stark in den Hintergrund und ist fast nicht wahrnehmbar. Die Bewehrung in einem VSG-System kann auch als gestalterisches Element genutzt werden. Sie kann eine Gebäudehülle je nach Art der Lichtverhältnisse strukturieren, transparent erscheinen lassen oder durch Reflexionen verändern. So gilt die Glasfassade des Shanghai Oriental Art Centers [13] als bisher erste großflächige Anwendung von Lochblechen in VSG-Systemen. Diese erfolgte aus gestalterischen und bauphysikalischen Gründen. Ein gezielter Einsatz von Bewehrung zur Steigerung der Resttragfähigkeit eines VSG-Systems ist dabei nicht bekannt.

Eine wirkungsvolle Bewehrung sollte eine hohe Zugfestigkeit und eine hohe Dehnsteifigkeit besitzen. Daher werden bei den Vorversuchen in [67] Glas-, Carbonfasern, Stahl-, Edelstahldraht und Lochbleche in die PVB- oder Gießharzmatrix bei der VSG-Herstellung einlaminiert. Gleichzeitig müssen diese Materialien eine gute Haftung mit der Zwischenschicht ausbilden, um die Einleitung von Zugkräften über die Verbundwirkung in die Bewehrung sicherzustellen. Neben den statischen Gesichtspunkten sind der Herstellungsprozess und die Dauerhaftigkeit entscheidend für die Entwicklung eines neuen Bauprodukts. Luftblasen im Laminat sind zu vermeiden, um eine vollflächige Verklebung der Scheiben zu gewährleisten. Ebenso sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen im VSG-System bei der Herstellung im Autoklaven und später im eingebauten Zustand infolge absorbierter Wärmestrahlung zu berücksichtigen [52]. Neben dem Einfluss der Wärmedehnung muss auch die Temperatur- und UV-Stabilität der Bewehrung sichergestellt werden. Daraus folgt, dass ungeschützte, aromatische Polyamide (Aramid) in Form von Fasern wie z.B. Kevlar[®] (Produktname der Firma DuPont) als Bewehrungsmaterial ausscheiden.

Die mögliche Dicke der einlaminierten Bewehrung ist begrenzt. Sie leitet sich aus der Dicke der verwendeten Zwischenschicht ab. Die Dicke der integrierten Bewehrung muss stets kleiner sein als die Gesamtdicke der Zwischenschicht. Ein bewehrtes VSG-System, bestehend aus zwei Glasscheiben und zwei 0,76 mm dicken PVB-Folien, kann daher nur eine begrenzte Bewehrungsdicke in die Zwischenschicht-Matrix einbinden. Die Form und Größe der Öffnungen in einer Bewehrung und der Anteil der offenen Siebfläche beeinflussen das Aufkommen von Blasen bei der Herstellung und die Kraftübertragung in dieser Bewehrungs-Zwischenschicht-Matrix. Der Lochanteil der Bewehrungslage sollte so gewählt werden, dass eine allseitige Einbindung der Bewehrung ermöglicht wird, um einen stofflichen Verbund und evtl. eine mechanische Verzahnung der Bewehrung in der Matrix sicherzustellen.

Im Folgenden wird das Hauptaugenmerk auf Edelstahl drahtgewebe und Edelstahllochbleche gelegt, da diese sich auf Grund ihrer mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit, Bruchdehnung und Haftung), der vorliegenden Produktvielfalt, der optischen Qualität, der Dauerhaftigkeit und der einfachen Integrierbarkeit in den Fertigungsprozess von VSG-Systemen auszeichnen.

2.3.1 Gewebe

Das Ausgangsprodukt für textile Gewebe bilden Natur- und Chemiefasern. Bei den Naturfasern unterscheidet man zwischen Pflanzen- und Tierfasern. Die Chemiefasern können aus natürlichen und synthetischen Polymeren hergestellt werden. Die Fasern aus anorganischen Rohstoffen (z.B. Glas und Metall) zählen auch zu den Chemiefasern. Die wichtigste Gruppe der Chemiefasern bilden die Synthefasern, die durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition aus synthetischen Polymeren hergestellt werden [18].

Tab. 2.5: Materialeigenschaften von Fasern [5], [12], [27], [54]

	Edelstahlfasern		Aramidfasern		Carbonfasern			Glasfasern		
	1.4310	1.4301	N	HM	HAT	IM	HM	E	R/S	AR
Streckgrenze [10 ³ N/mm ²]	> 0,2	> 0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Zugfestigkeit [10 ³ N/mm ²]	0,5 - 0,75	0,5 - 0,7	2,7	2,4 - 2,7	3 - 5	4 - 5	2 - 4	3,4 - 3,7	4,3 - 4,9	3 - 3,5
Bruchdehnung [%]	>45	>50	3,3	1,5 - 2,4	1,2 - 1,4	1,1 - 1,9	0,4 - 0,8	3,3 - 4,8	4,1 - 5,4	2,0 - 4,3
E-Modul [10 ³ N/mm ²]	150		58	120 - 146	200 - 250	250 - 350	350 - 450	72 - 77	75 - 88	21 - 74
Dichte [g/cm ³]	7,9		1,44		1,75 - 1,91			2,45 - 2,6		2,68 - 2,7
Wärmeausdehnungs- koeffizient [10 ⁻⁶ /K]	16		-3,5		axial: -0,1 - -1,3 radial: 7 - 18			5	4	5

Die Naturfasern (z.B. Baumwollfasern), die in ihrer Länge begrenzt sind, werden mit Hilfe fadenbildender Methoden zu Spinnfasergarnen weiterverarbeitet, wobei eine Drehung um ihre Längsachse zur Stabilität

zwingend erforderlich ist. Chemiefasern liegen hingegen meist als Endlosfasern bzw. Filamente vor. Die Garne aus Filamenten werden als (Multi-)Filamentgarne bezeichnet. Sie werden üblicherweise gedreht hergestellt. Die Drehung bestimmt den Elastizitätsmodul des Garns im Vergleich zur Einzelfaser bzw. zum Filament. Eine hohe Drehung reduziert den Elastizitätsmodul des Garns. Garne können zu Geweben, Gelegen, Gewirken, Gestriken und Zwirnen weiterverarbeitet werden [68].

Neben den häufig für technische Anwendungen eingesetzten Garnen aus Glas-, Carbon-, Polyester- und Polyamidfasern können zudem Metallfasern als Ausgangsprodukt für Gewebe genutzt werden. Stahlfasern besitzen im Vergleich zu Carbon- und Glasfasern eine geringere Festigkeit, sie weisen jedoch eine zumeist bedeutend höhere Bruchdehnung und Duktilität auf (Tab. 2.5). Dieses duktile Verhalten kündigt ein mögliches Versagen frühzeitig an.

Gewebe können unterschiedliche Maschenformen (z.B. Quadrat-, Lang-, Breit-, Nullmaschen) besitzen. Bei der Gewebeherstellung wird die parallel zur Webrichtung verlaufende Richtung als Kette und die hierzu senkrecht stehende als Schuss bezeichnet. Die Bindungs- bzw. Webart beschreibt die Verkreuzung der Kett- und Schussdrähte. Die Industriedrahtgewebe werden gemäß [DIN ISO 9044] als Leinwand-(glatte) Bindung oder als Körperbindung hergestellt (Abb. 2.11). Der Abstand zwischen zwei benachbarten Fäden bzw. Drähten wird als Maschenweite (w) bezeichnet. Der Drahtdurchmesser (d) kann sich durch Beanspruchungen infolge des Webprozesses geringfügig reduzieren. Auch die Drahtform kann sich dabei leicht verändern. Der Abstand zwischen den einzelnen Maschen wird als Teilung (p) bezeichnet. Neben der Leinwand- und der Körperbindung gibt es die Atlasbindung als dritte Grundbindungsart. Aus einer Kombination dieser drei Grundbindungsarten lässt sich eine Vielzahl von weiteren Bindungsarten ableiten. Bei einigen Geweben besitzen die Kett- und Schussdrähte unterschiedliche Dicken. Durch die Bindungsart, die Maschenweite und Teilung der Kett- und Schussdrähte wird deren Welligkeit bestimmt. Diese wiederum hat Auswirkungen auf die Steifigkeit eines Gewebes. Ein gewellter Draht möchte sich bei einer äußeren Zugeinwirkung gerade ziehen. Die damit verbundene dehnungslose Verformung wird von dem dazu senkrecht verwobenen Draht behindert. Je nach Welligkeit und Bindungsart besitzt ein Gewebe eine sehr komplexe mechanische Wechselwirkung. Unterschiedliche Dehnsteifigkeiten und Querdehnungen in Kett- und Schussrichtung sind die Folge. Daher werden diese beiden Richtungen als Anisotropiehauptachsen bezeichnet. In [48] ist ein Stoffgesetz für einen linear-elastischen, orthogonal anisotropen Werkstoff gegeben, wobei die Werkstoffkonstanten aus den Messwerten von zwei zweiachsigen, draht- bzw. fadenparallelen Zugversuchen ermittelt werden. Das gewählte

Ausgangsspannungsverhältnis von Kett- und Schussrichtung hat dabei nur einen geringen Einfluss auf die ermittelten Werkstoffkenngrößen. Die Anzahl der Be- und Entlastungen wirkt sich dagegen stärker aus. Je häufiger das Gewebe einen Be- und Entlastungszyklus durchläuft, umso mehr sind die Drähte gerade gezogen und desto steifer ist das Gewebe. Die meisten Gewebe besitzen auf Grund der Herstellung eine größere Drahtwelligkeit in Schussrichtung und sind daher auch dehnsteifer in Kettrichtung. Bei einer äußeren Schubbeanspruchung kommt es zu einer Winkeländerung der Kett- und Schussdrähte des Gewebes. Der Schubmodul von Geweben lässt sich aus nicht-drahtparallelen, zweiachsigen Zugversuchen ermitteln, wobei das Ausgangsspannungsverhältnis ungleich eins sein muss.

Die mechanische Wirkungsweise eines Gewebes ist sehr komplex. Es lässt sich nur bedingt von den Materialeigenschaften eines einzelnen Drahts bzw. Garns auf die Eigenschaften des Gewebes zurückschließen.

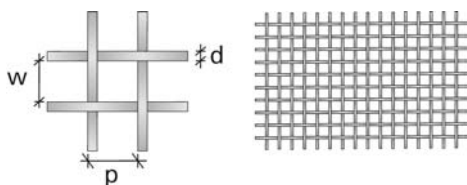


Abb. 2.11: Geometrie von Stahlgewebe mit Leinwandbindung

Gewebe aus Edelstahl draht stellen eine mögliche Bewehrungsart für VSG-Systeme dar. Edelstahl weist eine hohe Zugfestigkeit und Dehnsteifigkeit bei gleichzeitiger Dauerhaftigkeit auf. Durch die Variation von Drahtdurchmessern und Maschenweiten lassen sich die gewünschten Eigenschaften des Gewebes bzw. der Bewehrung bestimmen. Mit Hilfe von Nachbehandlungen (Strecken, Glühen und Kalandern) des Gewebes können die mechanischen Eigenschaften im Weiteren beeinflusst werden. Edelstahlgewebe besitzen eine hohe ästhetische Qualität, die sie als gestalterisches Element auszeichnet.

Edelstahlgewebe werden heute vielfach im Fassadenbau eingesetzt, um Fassaden je nach Beleuchtungssituation und Blickwinkel eine geschlossene bzw. transparente Erscheinung zu geben. Neben der gestalterischen Funktion bei Gebäudehüllen übernehmen sie Sicht- und Sonnenschutzaufgaben. Edelstahlgewebe werden auch vermehrt bei der Innenraumgestaltung und beim Bau von Großvolieren eingesetzt. Es kommen meist Drahtdurchmesser von 1 - 7 mm zum Einsatz. Diese Edelstahlgewebe werden auch als Architektur-Drahtgewebe bezeichnet [27]. Auf Grund der großen Drahtdurchmesser dieser Qualitäten ist deren Einbetten in die Zwischenschicht-Matrix eines VSG-Systems jedoch nicht sinnvoll.

Drahtgewebe wurden ursprünglich für die Sieb- und Filtertechnik entwickelt. Sie kommen hauptsächlich in der Chemie- und der Nahrungsmittelindustrie,

in der Luft- und Raumfahrt sowie im Fahrzeugbau zum Einsatz. Die Drahtdurchmesser dieser Sieb- und Filtergewebe liegen zwischen 0,02 - 4 mm bei Variation der Maschenweiten von 0,067 - 16 mm [27]. Somit bietet sich hier eine Vielzahl von bereits vorhandenen, industriell gefertigten Bewehrungen, die das Dickenbegrenzungskriterium erfüllen.

Edelstahl ist ein linear-elastischer Werkstoff, der nach Erreichen der Fließgrenze als ideal plastisch angesehen werden kann. Die mechanischen Eigenschaften eines Edelstahlgewebes unterscheiden sich jedoch - auf Grund der Drahtwelligkeit und der Interaktion von Kett- und Schussrichtung - von den Eigenschaften eines Einzeldrahts. Daher muss mit Hilfe von zwei axialen Zugversuchen das Werkstoffverhalten ermittelt und die Anwendbarkeit eines linear-elastischen, orthogonal anisotropen Werkstoffgesetzes geprüft werden. Liegt ein symmetrischer Aufbau des bewehrten VSG-Systems vor, so ist das Gewebe im ungebrochenen Zustand nahezu unbelastet. Erst beim Bruch der Scheibe(n) wird die Tragwirkung des Gewebes aktiviert und der Erstbelastung unterzogen. Demzufolge ist der Einfluss der Be- und Entlastungszyklen auf das Gewebe hier meist vernachlässigbar.

Um die Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche an bewehrten VSG-Systemen analysieren zu können, müssen die mechanischen Kenngrößen der Bewehrung bekannt sein. Im einaxialen Zugversuch lassen sich die Eigenschaften der Gewebe ermitteln. Bei diesen Versuchen variieren die Festigkeit, die Dehnsteifigkeit und die Bruchdehnung der Gewebe in Abhängigkeit von der Orientierung der Kett- und Schussrichtung zur Belastungsrichtung. Bei der Herstellung der bewehrten VSG-Systeme ist darauf zu achten, dass die Gewebe stets richtig angeordnet werden, um das gewünschte Tragverhalten zu erzielen.

Bei zwei axialer Lastabtragung sollten jedoch die Gewebe auch in zwei axialen Zugversuchen untersucht werden, um die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln.

2.3.2 Lochblech

Unter Lochblech wird im Allgemeinen ein Blech mit gestanzten Löchern verstanden. Die Löcher sind bei Standardprodukten meist rund oder rechteckig und in versetzten (v), geraden (g) oder diagonal (d) versetzten Reihen angeordnet (Abb. 2.12). Durch die Stanzung weisen die Rundlöcher eine fast zylindrische Schnittzone mit einer sich daran anschließenden, nach unten konisch aufweitenden Bruchzone auf. Durch diese leicht konische Lochform sollte das Verhältnis von Stegbreite zu Plattendicke stets größer als eins sein, um ein Brechen der Stege beim Stanzen zu vermeiden [45]. Als Materialien werden meist Metalle wie Stahl, Edelstahl, Aluminium,

Kupfer oder Titanzink verwendet. Bei sehr dicken oder harten Materialien kommen Schneidbrenner, Laser- oder Wasserstrahlverfahren zum Einsatz.

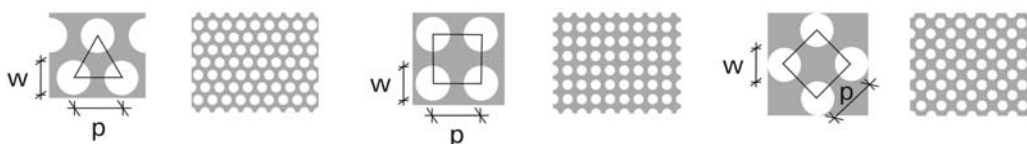


Abb. 2.12: Typische Lochblechgeometrien mit Rundlöchern: Rv, Rg, Rd

Neben dem verwendeten Material bestimmen die Lochgröße und die Anordnung der Löcher entscheidend die mechanischen Eigenschaften von Lochblechen. So ist bei Lochblechen ein geometrisch bedingtes Anisotropieverhalten zu beobachten. In [16] wurden Zugversuche an Lochblechen mit versetzten Rundlöchern (Rv) unternommen. Dem Lochblech wurden Zugproben mit unterschiedlicher Orientierung entnommen und untersucht. Der Ausrichtungswinkel der Löcher in Bezug zur Richtung der aufgetragenen Zugkraft beeinflusste den Elastizitätsmodul, die Bruchkraft und den Dehnungsverlauf der Proben (Abb. 2.13). Auch die Versagensform wird vom Ausrichtungswinkel bestimmt. So versagen die Proben mit einem Ausrichtungswinkel γ zur Zugrichtung von 0° , 60° , 120° jeweils senkrecht mit der maximal erreichten Bruchkraft. Die Bruchlinie von Proben mit 15° , 75° , 135° bzw. 30° , 90° , 150° versagen hingegen leicht geneigt zur Senkrechten und besitzen höhere Bruchdehnungen.

Im einaxialen Zugversuch wird die Dehnsteifigkeit in Beanspruchungsrichtung durch die Lochung im Vergleich zu einer unperforierten Platte abgemindert. Die Tragfähigkeit eines Lochblechs lässt sich vereinfacht aus der winkelabhängigen effektiven Querschnittsfläche A_{eff} des perforierten Querschnitts bilden. Dabei wird nur die Fläche der metallischen Stege senkrecht zur Zugrichtung betrachtet [16] unter Vernachlässigung der Kerbwirkungen am Lochrand und der ungleichmäßigen Spannungs- und Dehnungsverteilung innerhalb der metallischen Stege. Aus der effektiven Querschnittsfläche A_{eff} und der Festigkeit des Werkstoffes lässt sich die Tragfähigkeit abschätzen.

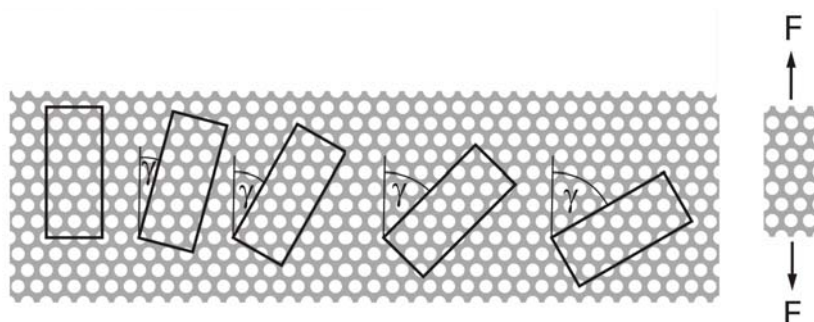


Abb. 2.13: Orientierung des Lochblechs im einaxialen Zugversuch

Der Spannungsverlauf in einer unendlich großen, zugbeanspruchten Scheibe mit einem elliptischen Loch und den Halbachsen a und b wurde von Kolosov und Inglis Anfang des 20. Jahrhunderts analysiert. Ein Rundloch in einer perforierten Platte stellt den Sonderfall $r = a = b$ dar. Ein weiterer Grenzfall tritt ein, wenn $a \gg b$ ist. Diese nahezu ebene Ellipse stellt den Griffith-Riss mit der Länge $2a$ und der sehr, sehr kleinen Halbachse b dar (Abb. 2.1). Diese Betrachtungsweise ermöglicht die analytische Spannungsberechnung in der Nähe der Risspitze in der Bruchmechanik [47].

2.4 Zusammenfassung

Die Besonderheiten der Verbundpartner – Glas, Zwischenschicht und Bewehrung – werden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften in Kapitel 2 erörtert. Dabei wird bei Glas insbesondere auf die Festigkeit und das Bruchverhalten eingegangen. Die verwendeten Zwischenschichten sind Thermoplaste mit zeit- und temperaturabhängigen Materialeigenschaften. Oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur nimmt die Festigkeit und Steifigkeit stark ab. Das Einbetten von Bewehrungselementen in die Zwischenschicht-Matrix soll beim Glasbruch den Festigkeits- und Steifigkeitsabfall kompensieren. Es werden die Vor- und Nachteile möglicher Bewehrungselemente aufgezeigt.

3 Verbundsicherheitsglas

3.1 Definition

Verbundglas (VG) ist laut [DIN EN ISO 12543] „ein Aufbau, bestehend aus einer Glasscheibe mit einer oder mehreren Scheiben aus Glas und/oder Verglasungsmaterial aus Kunststoff, die durch eine oder mehrere Zwischenschichten miteinander verbunden sind“. Verbundsicherheitsglas (VSG) ist ebenso ein Laminat aus mindestens zwei Scheiben, „bei dem im Fall eines Bruchs die Zwischenschicht jedoch dazu dient, Glasbruchstücke zurückzuhalten, die Öffnungsgröße zu begrenzen, eine Restfestigkeit zu bieten und das Risiko von Schnitt- und Stichverletzungen zu verringern“.

Ob ein VG als VSG bezeichnet werden kann, wird in den Regelwerken unterschiedlich definiert. Die [DIN EN 12600] beurteilt dies anhand des erzielten Bruchbilds beim Pendelschlagversuch. Wenn hierbei zahlreiche Risse entstehen, die einzelnen Bruchstücke aber noch zusammengehalten werden, so spricht diese Norm von einem VSG. Die Anlage 11.8 der Bauregelliste A Teil 1 [DIBt BRL08] fordert dagegen für VSG-Systeme das Bestehen des Kugelfallversuchs gemäß [DIN 52338] und der Beständigkeitsprüfung nach [DIN EN ISO 12543]. Die Bauregelliste definiert lediglich PVB als gültige Zwischenschicht für ein VSG-System, wohingegen die Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen [TRLV] auch andere Zwischenschichten zulassen, deren Verwendbarkeit z.B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nachgewiesen ist. Im Folgenden werden sowohl Lamine mit PVB als auch SGP als VSG-Systeme bezeichnet.

3.2 Geschichte

Die Erfindung des Verbund(sicherheits)glases beruht auf einem Zufall. Im Jahr 1903 ließ der französische Künstler und Chemiker Edouard Benedictus einen Flakon fallen, der ursprünglich eine Nitrocellulose-Lösung enthielt. Zu seiner Überraschung fand er den Flakon nicht in 1.000 Scherben zerborsten vor, sondern die ausgetrocknete Lösung hinterließ einen Cellulosefilm, der die Scherben zusammenhielt. Aus dieser zufälligen Entdeckung der Splitterbindung und Resttragfähigkeit von Glas mit Hilfe eines Verbundpartners entwickelte er mit Cellulose laminiertes Glas, das 1909 unter dem Namen Triplex als Patent angemeldet wurde. Zeitgleich forschte unabhängig hiervon der Brite John C. Wood an Verbundgläsern mit

Gießharzen. Hierfür erhielt auch er 1905 ein Patent. Die erste industrielle Massenapplication von Verbundglas waren die Linsen von Gasmasken im Ersten Weltkrieg. Mit dem Einsatz von Verbundglas für Windschutzscheiben begann Henry Ford 1927 das Verletzungsrisiko der Insassen von Autos zu mindern. Neben der Anwendung im Fahr- und Flugzeugbau hat sich auch im Bauwesen die Anwendung von VSG-Systemen etabliert. Transparente und filigrane Gebäudehüllen sowie Ganzglaskonstruktionen erfordern heute den Einsatz von VSG-Systemen.

3.3 Herstellung

Zunächst werden im Verlegeraum die gereinigten Glasscheiben mit den entsprechenden Zwischenschichten - meist PVB-Folien - gemäß dem gewünschten Laminataufbau lose aufeinander geschichtet. Danach passiert dieser Aufbau den so genannten Vorverbund. Beim heutigen Herstellungsprozess von VG und VSG wird zwischen zwei Vorverbund-Verfahren unterschieden. Beim Walzenverfahren wird bei Temperaturen von bis zu 70°C die Luft mittels Walzen aus den Zwischenräumen gepresst. Es wird gleichzeitig eine gewisse flächige Haftung der Schichten erzielt. Das aufwändigere Vakuumsack- oder auch Vakuumringverfahren beschränkt sich meist auf gekrümmte Verbundscheiben oder Sonderverglasungen mit mehrlagigem Aufbau. Dabei wird der vorerst noch lose Laminataufbau aus dem Verlegeraum zunächst in einen Sack eingepackt. Das anschließende Absaugen der Luft erzeugt ein Vakuum im Sack. Dadurch werden die Scheiben zusammengepresst und das Risiko von Blasenbildung im Laminat wird vermieden. Durch eine zusätzliche Temperierung auf ca. 100°C entsteht im Vakuumsack ein Vorverbund.

Die eigentliche Verklebung findet bei beiden Vorverbundverfahren anschließend im Autoklavenprozess statt. Der vollflächige Verbund des Laminats wird unter 12 bar Druck und einer Temperatur von 140°C erzielt. Die Qualität des Laminats ist vom Temperatur- und Druckverlauf sowie der Dauer im Autoklaven abhängig. Insbesondere die Aufheiz- und Abkühlungsdauer haben erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften des Endprodukts. Die einzelnen Faktoren sind abhängig von der Art und der Dicke des verwendeten Glases und der Zwischenschicht. So kann die Dauer des Autoklavenprozesses zwischen 1 h und 6 h variieren. Bei thermisch vorgespannten Gläsern kann es auf Grund des Vorspannprozesses zu erhöhten Planitätsabweichungen kommen, die gegebenenfalls bei der Verbundglasherstellung zu berücksichtigen sind [28].

3.4 Anwendung

VSG-Systeme werden für Glasbauteile eingesetzt, um einen aktiven (z.B. absturzsichernde Verglasungen) bzw. passiven Schutz (z.B. Überkopfverglasungen) zu bieten. In den Regelwerken werden die Verglasungen je nach Neigung zur Vertikalen eingeteilt in Überkopf- und Vertikalverglasungen. Ab einer Neigung $> 10^\circ$ zur Vertikalen sprechen die Technischen Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen [TRLV] von einer Überkopfverglasung.

3.4.1 Überkopfverglasungen

Überkopfverglasungen werden nach ihrer Zugänglichkeit unterschieden. Meist sind diese Verglasungen betret- oder begehbar, lediglich bei kleinen Glasflächen (z.B. Vordächern) ist eine Wartung ohne Zugang möglich.

Betretbare Überkopfverglasungen sind solche, die ausschließlich zu Reinigungs- und Wartungsarbeiten betreten werden. Dies erfolgt nur von entsprechend eingewiesenem Personal in größeren zeitlichen Abständen unter Einhaltung einer Höchstlast. Das Betreten der Verglasung erfolgt üblicherweise nur von einer Person mit geeignetem gereinigtem Schuhwerk und mitgeführtem Werkzeug von höchstens 4 kg Gewicht und einem wassergefüllten 10-Liter-Kunststoffeimer. Weitere Anforderungen wie Absturz- und Seilsicherung des Wartungspersonals, Rutschsicherung und Schutz des Verkehrsraums sind den Regelungen der Berufsgenossenschaften zu entnehmen [GS-BAU-18]. Die Betretbarkeit, d.h. Zugänglichkeit zu Wartungszwecken, sollte bei der Planung von Überkopfverglasungen stets beachtet werden.

Begehbare Glasflächen sind allgemein zugänglich und müssen deshalb sowohl höhere Lasten als auch entsprechende Verschmutzungen bzw. Kratzer aufnehmen können. Meist handelt es sich dabei um begehbare Überkopfverglasungen wie z. B. Treppenstufen, Podeste oder Glasfußböden. Um den Anforderungen zu genügen, bestehen diese Verglasungen in der Regel aus VSG-Systemen mit mindestens drei Glasschichten, wobei die oberste lediglich als dünne Verschleisscheibe dient und meist als statisch nichttragend anzusetzen ist. Im gebrochenen Zustand ist eine zeitlich begrenzte Resttragfähigkeit mit reduziertem Sicherheitsniveau nachzuweisen.

3.4.2 Vertikalverglasungen

Fassaden, Fenster, Türen, Brüstungen, Geländerausfachungen und Zwischenwände werden meist als Vertikalverglasung ausgeführt. Sie besitzen eine absturzsichernde Funktion, wenn sie eine Verkehrsfläche gegen eine tiefer gelegene Ebene abgrenzen. Überschreitet in Deutschland

der Niveauversatz zwischen der Verkehrsebene und der tiefer gelegenen Ebene die Vorgaben der Landesbauordnung, so wird für die Scheiben eine absturzsichernde Wirkung gefordert.

Für Glasbauteile mit absturzsichernder Wirkung gelten die „Technischen Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen“ [TRAV]. Die Anforderungen an die Verglasung und die Versuchsdurchführung sind darin geregelt.

Die absturzsichernden Verglasungen werden in drei Kategorien unterteilt: A Absturzsicherung durch die Verglasung ohne tragenden Brüstungsriegel oder vorgesetztem Holm; B Absturzsicherung durch die Verglasung, deren Einzelscheiben durch einen aufgesteckten, durchgehenden Handlauf verbunden sind, und C Absturzsicherung, die nicht zur Abtragung von Horizontallasten in Holmhöhe, sondern lediglich zur Ausfachung dient. Diese Kategorie ist in die Gruppen C1, C2 und C3 unterteilt. Für alle Kategorien A–C ist die Tragfähigkeit unter statischen Einwirkungen und stoßartigen Belastungen nachzuweisen.

3.4.3 Sonderverglasungen

Das wachsende Bedürfnis vieler Bauherren nach Schutz vor Bedrohungen und der gleichzeitige Wunsch nach Transparenz fördert die Entwicklung von angriffshemmenden Verglasungssystemen. Dabei unterscheidet man diese Verglasungen hinsichtlich einer mutwilligen Einwirkung in: durchwurfhemmende, durchbruchhemmende, durchschusshemmende und sprengwirkungshemmende Verglasungen [DIN EN 356].

Je nach Belastungsart besteht eine angriffshemmende Verglasung aus einem mehrschichtigen, meist asymmetrischen VSG-System, das sich z.B. aus vorgespannten Glasscheiben, Kunststoffscheiben und zähelastischen Zwischenschichten zusammensetzt. Die Rahmenkonstruktionen müssen den gleichen Belastungsanforderungen genügen. Deshalb werden tiefe Glaseinstände verwendet, um die Verglasung im Rahmen zu halten. Auch weit entfernt vom Explosionsort sind die Verletzungsgefahren infolge von umherfliegenden Glassplittern sehr hoch. Daher gilt es, diesen Splitterflug durch VSG-Systeme zu minimieren und eine gewisse Resttragfähigkeit der VSG-Systeme zu erzielen.

Einerseits versucht man diesen enormen Belastungen durch Verstärkungen der Glasaufbauten und Rahmensysteme zu trotzen, andererseits haben flexible und nachgiebige Seilfassaden vielversprechende Ergebnisse bei Explosionsversuchen ergeben. Die Energie der Druckwelle wird in Bewegungsenergie der Seilfassade umgewandelt. Auch ein gezieltes Versagen von Verglasungen durch den Einsatz von ESP-Glas kann die Auswirkungen einer Druckwelle mindern [23].

Generell kann ein entsprechendes Verglasungssystem die Folgen eines Angriffs nur minimieren, nicht aber verhindern.

3.5 Zustandsdefinition eines VSG-Systems

Der Zustand, in dem sich ein VSG-System befindet, bestimmt die Lastabtragung und wird im Folgenden als Merkmal definiert:

Zustand I: Alle Glasscheiben sind ungeschädigt. Die Lastabtragung erfolgt gemäß einem Laminat mit dehnweichen Zwischenschichten und biegesteifen Scheiben.

Zustand II: Eine oder mehrere Scheiben des Laminats sind gebrochen. Der verbleibende, intakte Scheibenverbund trägt hauptsächlich die äußere Belastung ab.

Zustand III: Alle Scheiben sind gebrochen. Die Biegetragwirkung erfolgt über ein Kräftepaar mit der Druckkraft im gebrochenen Glas über die Risse hinweg und der Zugzone in der Zwischenschicht und der evtl. eingebetteten Bewehrung.

Eine analoge Definition der Schädigungszustände erfolgt durch Kot in [32], [33], [34] und [35]. Dabei wird eine Resttragfähigkeit von VSG-Systemen aus ESG auf Grund der erzielten Versuchsergebnisse ausgeschlossen [36]. Diese Resttragfähigkeit wird in der hier vorliegenden Arbeit jedoch mittels Bewehrung in der Zwischenschicht-Matrix erzielt.

Im Weiteren beschränkt sich die Betrachtung der Zustände und der Lastabtragung auf VSG-Systeme mit zweilagigem Scheibenaufbau, da dies im Bauwesen, abgesehen von begehbaren Verglasungen und Sonderkonstruktionen, den Regelfall darstellt.

3.6 VSG im ungebrochenen Zustand I

Der ungebrochene Zustand I stellt den Sollzustand für ein VSG-System dar. Dieser Zustand wurde schon umfassend in zahlreichen Forschungsarbeiten untersucht und wird in dieser Arbeit nur der Vollständigkeit halber kurz erläutert. Im Einzelnen wird auf [7], [10], [11], [17], [37], [62], [59], [60], [76] verwiesen. Für die VSG-Bemessung im Zustand I gelten je nach Anwendungsfall die jeweils gültigen Normen und Regelwerke: z.B. [TRLV], [TRPV], [TRAV], [E DIN 18008], [ASTM E1300].

3.6.1 Einwirkungen

Eine Scheibe ist definiert als ein ebenes, flächiges Bauteil, dessen Abmessungen in zwei Richtungen groß und in einer - der Dickenrichtung -

klein ist. Vertikalverglasungen unterliegen infolge ihres Eigengewichts einer Beanspruchung in Scheibenebene. Auch Zwänge, die durch behinderte Temperaturendehnungen, fehlende Toleranzen und Verformungen der Unterkonstruktion entstehen, führen zu einer Scheibenbeanspruchung und somit zu Normalspannungen im Glas. Eine reine Scheibenbeanspruchung erfahren Glasscheiben jedoch nur in den seltensten Fällen.

Platten hingegen werden durch Kräfte in Dickenrichtung belastet. Sie besitzen die gleiche geometrische Erscheinungsform wie Scheiben, unterscheiden sich jedoch von diesen durch die Richtung der Lasteinwirkung und erfahren infolgedessen ausgeprägte Biegebeanspruchungen.

Glasscheiben wirken bei äußerer Belastung häufig als punkt- oder liniengelagerte Platte. Die Haupttragwirkung von Überkopf- oder begehbaren Verglasungen ist die Plattentragwirkung. Daher wird in der vorliegenden Arbeit lediglich das (Rest-)Tragverhalten von VSG-Systemen, die als Platte wirken, betrachtet.

Tab. 3.6: Einwirkungen auf Verglasungen

	Direkte Einwirkung	Indirekte Einwirkung
Kurzzeitig	Anprall von Personen/Körpern Windböe Druckwelle z.B. Explosion, Fahrzeug	Brandeinwirkung Verformung der Unterkonstruktion infolge von kurzzeitiger, direkter Einwirkung
Mittlere Lastdauer	Wind Verkehr	Zwangsbeanspruchung infolge behinderter Temperaturendehnung Druckdifferenz bei Isolierglasscheiben zw. Scheibenzwischenraum und Atmosphäre Verformung der Unterkonstruktion infolge von direkter Einwirkung bei mittlerer Lastdauer
Quasi ständig bzw. lang andauernd	Schnee Füllgut z.B. Wasser Eigengewicht	Tragwerkssetzung Umwelteinwirkung Verformung der Unterkonstruktion infolge von quasi ständiger, direkter Einwirkung

Die Einwirkungen auf ein VSG-System können je nach Anwendung sehr unterschiedlich sein. Im Allgemeinen unterscheidet man bei den Sicherheitskonzepten und Bemessungsregeln für Tragwerke [DIN 1055] zwischen ständigen, veränderlichen und dynamischen Einwirkungen. Zusätzlich wird in direkte und indirekte Einwirkungen unterteilt. Sie wirken

punkt-, linienförmig oder flächig auf die Verglasung. Bei VSG-Systemen sind in Anbetracht des zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens der Zwischenschicht die Einwirkungsdauer und die Bauteiltemperatur von großer Bedeutung. Daher werden die Einwirkungen auf eine Verglasung unterschieden (Tab. 3.6). Neben den statischen und dynamischen Einwirkungen sind auch Umwelteinflüsse (z.B. Feuchteinwirkungen, UV-Strahlung, Brandeinwirkungen, chemisch angreifende Medien) zu berücksichtigen, da sie die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen können.

3.6.2 Lastabtragung

Die Lastabtragung eines VSG-System ist abhängig von den Eigenschaften der einzelnen Laminatschichten und deren Verbundwirkung. Ein zweilagiges VSG-System kann als Sandwichelement betrachtet werden. Sandwichelemente besitzen zwei Deckschichten mit einer meist dehnweichen Kernschicht. Weist die Kernschicht im Vergleich zu den Deckschichten eine geringe Dehnsteifigkeit auf, so wird das im Querschnitt wirkende Biegemoment als Kräftepaar in den beiden Deckschichten abgetragen. Der Querkraftabtrag erfolgt bei dünnen Deckschichten über die Kernschicht. Diese Sandwichtragwirkung kommt bei den meisten VSG-Systemen nur zum Teil zum Tragen, da die einzelnen Glasscheiben eine hohe Biegesteifigkeit im Verhältnis zur Gesamtbiegesteifigkeit des Sandwichbauteils aufweisen. Die Lastabtragung erfolgt durch direkte Biegung der einzelnen Glasscheiben und nur zu einem Teil durch ein Kräftepaar aus Zug- und Druckkraft in den Deckschichten. Die dünne Kernschicht – hier Zwischenschicht genannt – übernimmt die Schubübertragung zwischen den Glasscheiben [69]. In Abhängigkeit von der Qualität dieser Schubübertragung stellen sich unterschiedliche Spannungszustände im Verbundquerschnitt infolge einer Biegebeanspruchung ein (Abb. 3.1).

Mit den beiden folgenden Systembetrachtungen werden die oberen und unteren Grenzwerte für die Scheibenbeanspruchung ermittelt: Die Annahme einer nicht vorhandenen Schubübertragung einerseits wird durch lose aufeinander geschichtete Glasscheiben mit den jeweiligen Dicken d_1, d_2, \dots, d_i approximiert. Der starre Verbund andererseits wird durch eine monolithische Scheibe der Dicke $d = \sum d_i$ dargestellt.

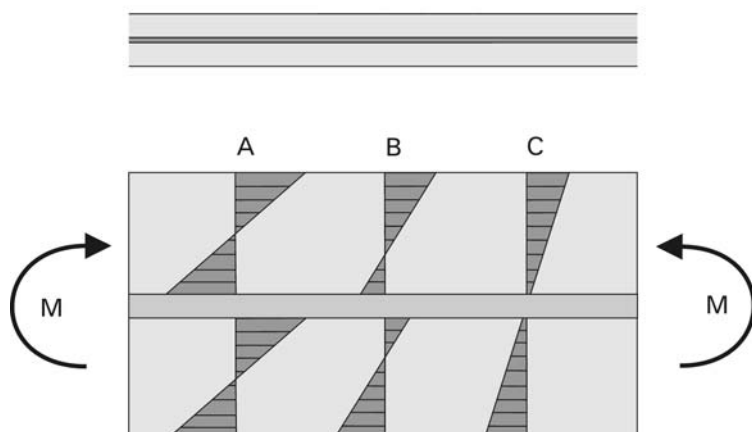


Abb. 3.1: Zustand I mit der Spannungsverteilung in den Glasscheiben bei Biegebeanspruchung des Systems: A lose geschichtet, B Teilverbund, C monolithisch

Die Art der Lagerung eines VSG-Systems ist, neben der Schubübertragung durch die Zwischenschicht, entscheidend für dessen Tragfähigkeit und Durchbiegung. Kann sich auf Grund der Lagerung und der Scheibengeometrie ein Membranspannungszustand einstellen, so werden neben der Biege- auch Membrantragwirkungen genutzt. Bei verminderter Schubsteifigkeit des VSG-Systems bedingt durch erhöhte Temperatur oder Belastungsdauer reduziert sich die Tragfähigkeit eines VSG-Systems nicht. Das System entzieht sich vielmehr durch seine größere Verformbarkeit der reinen Biegebeanspruchung. Bei nachgiebigem Verbund wird dieser nichtlineare Bereich früher erreicht als bei einem starren Verbund. Daher schlägt [37] vor, die Verformungen und Spannungen einer vierseitig gelagerten VSG-Platte mit PVB unterhalb eines bezogenen Lastwerts stets mit einer linearen Berechnung unter Berücksichtigung eines Teilverbunds zu ermitteln. Oberhalb dieser Lastgrenze ist die Membrantragwirkung bestimmend. Die Berücksichtigung des Schubverbunds kann dann entfallen und somit auch die Abschätzung des temperatur- und belastungsabhängigen Schubmoduls der Zwischenschicht.

3.7 VSG im teilweise gebrochenen Zustand II

Ist ein VSG-System nur teilweise gebrochen, so befindet es sich im Zustand II. Die intakte Glasscheibe trägt hauptsächlich die äußere Belastung ab. Gegebenenfalls wirken die Glasbruchstücke beim Lastabtrag mit. Dabei wird unterschieden, ob die gebrochene Scheibe durch eine äußere Einwirkung eine Zug- oder eine Druckbeanspruchung erfährt. Die Glasbruchstücke können Zugkräfte nur bedingt, Druckkräfte jedoch sehr gut über die Rissfläche weiterleiten (Abb. 3.2).

3.7.1 Schädigung

Bei einer Schädigung ist zu unterscheiden, ob es sich um eine Oberflächenbeschädigung oder um einen Bruch der Glasscheibe handelt. Bei ESG hat eine Oberflächenbeschädigung auf Grund des eingepprägten Eigenspannungszustands meist den Bruch der Glasscheibe zur Folge.

Bei Oberflächenbeschädigungen unterscheidet man chemische und mechanische Einwirkungen [72], [42]. Bestimmte alkalische (z.B. Beton) und saure (z.B. Kieselsäure) Medien können die Glasoberfläche chemisch angreifen und führen zu flächigen Verätzungen. Auf der Baustelle kann der Funkenflug bei Arbeiten mit Trennschleifern oder Schweißgeräten in Glasnähe zu punktuellen, eingebrannten Metallteilchen im Glas führen.

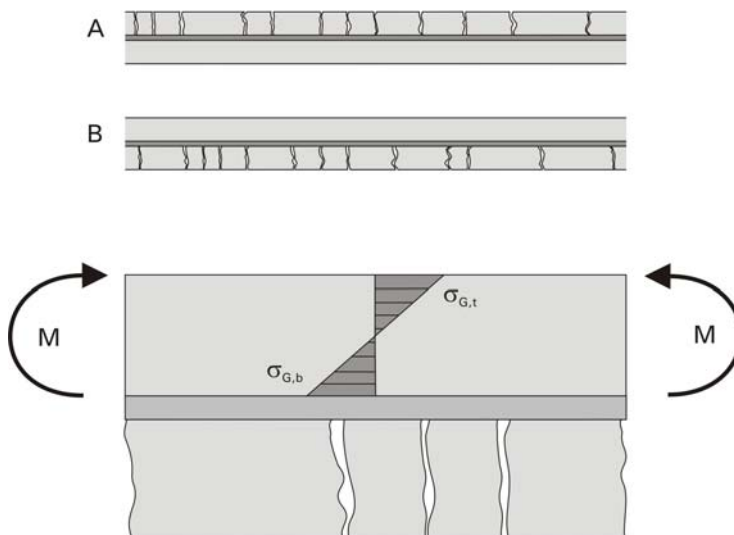


Abb. 3.2: A Schädigung oben, B Schädigung unten; Zustand II mit Spannungszustand unter Biegebeanspruchung

Die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen das Eindringen eines anderen wird in der Mohs-Härteskala definiert. Nur ein gleich harter oder härterer Werkstoff als Glas vermag es die Glasoberfläche mechanisch zu verletzen.

Mechanische Oberflächendefekte stellen stets Risse im Sinne der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Bruchmechanik dar. Die Schädigungen treten schon bei den Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen von Glasscheiben auf. So verursacht z.B. das Zuschneiden und Bohren von Gläsern stets mikroskopisch kleine Anrisse. Auch die unsachgemäße Behandlung von Glasscheiben bei Lagerung, Transport, Einbau und Reinigung kann zu Kratzern an der Oberfläche führen. Durch die anschließende Nutzung - insbesondere bei begehbaren Verglasungen - treten Schädigungen an der Oberfläche auf.

Kommt es zum Bruch einer Glasscheibe, so unterscheidet man zwischen den Bruchursachen. Auf Grund von größeren Temperaturdifferenzen (z.B. Teilbeschattung, lokale Erwärmung, etc.) kann es zu einem thermischen Glasbruch kommen. Die Bruchlinie verläuft dabei bei Floatglas zunächst mit einem rechtwinkligen Einlauf zur Glaskante und einem senkrechten Durchlauf zur Oberfläche bis in die lokale Wärme-/Kältezone. Sie stellt somit die kürzeste Verbindung beider dar. Erst im weiteren Verlauf erfährt die Bruchlinie einen Richtungswechsel. Die Ausgangsbruchlinie kann dabei nicht durch Sekundärlinien übersprungen werden. Ein Sonderfall ist der so genannte „thermische Wurmsprung“, der innerhalb der Glasscheibe beginnt und endet [72].

Die Einwirkungen, die zu einem mechanischen Glasbruch führen, können punkt-, linienförmig oder flächig erfolgen. Das entstehende Bruchbild ist abhängig von der Art der verwendeten Glasscheiben (Drahtglas, Floatglas, TVG, ESG), den Lagerungsbedingungen, der Geometrie, der gespeicherten elastischen Energie sowie der Art und der Geschwindigkeit der Lasteintragung (Abb. 3.3).

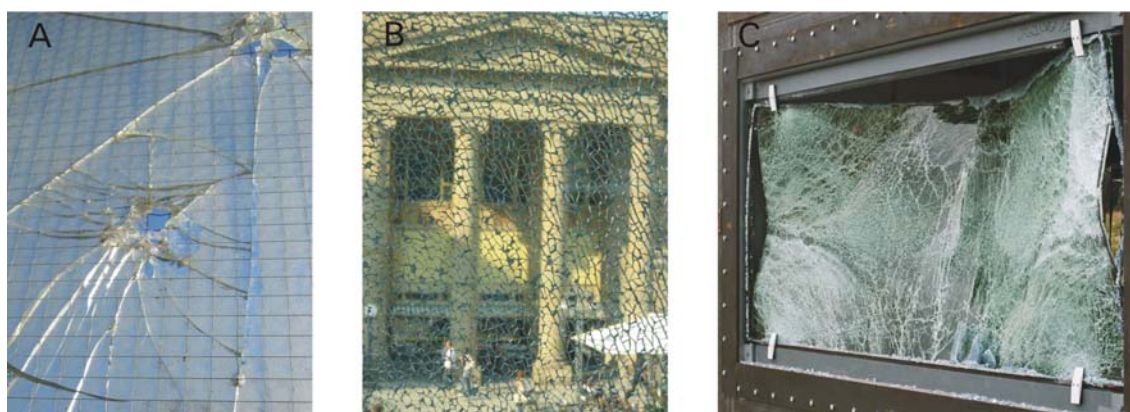


Abb. 3.3: A Schäden an Drahtglas infolge von Stoßkörpern, B VSG aus ESG im Zustand II, C VSG aus TVG im Zustand III infolge einer Druckwelle

Drahtglas und ESG weisen bei Schädigungen und Bruchbildern Besonderheiten auf. Am Glasrand von Drahtglas können bei der Herstellung und durch Alterung Spannungskonzentrationen auftreten. Schon beim Zuschnitt des Drahtglases entstehen durch den Trennungsvorgang von Glas und Draht vermehrt Vorschädigungen. Feuchtigkeit an freien Glaskanten kann zur Korrosion des Drahts führen. Die voluminöseren Korrosionsprodukte induzieren innere Druckkräfte auf das vom Draht umschlossene Glas. Schädigungen sind die Folge. Auch bei der Erwärmung des Glases kommt es auf Grund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungen von Stahl und Glas zu inneren Spannungszuständen, die zum Glasbruch führen können. Da der Draht herstellungsbedingt meist nicht in der Schwerachse des Drahtglases liegt, können die Vorschädigungen je nach äußerer

Belastung in der kritischen Zugzone auftreten. Drahteinlagen in Glas können somit Kerbwirkungen verursachen und die Tragfähigkeit herabsetzen. Trotz dieser Anfälligkeit für Schädigungen und einer geringen zulässigen Biegezugspannung ([TRLV] Überkopfanwendung: 8 N/mm²) wird Drahtglas oft bei Brandschutzverglasungen und bei stoßbelasteten Verglasungen eingesetzt, da der stoffliche Verbund aus Glas und Drahteinlage die Bruchstücke bindet. Daraus resultiert eine höhere Resttragfähigkeit als bei einer Einzelscheibe ohne Drahteinlage [2], [72].

ESG zeichnet sich durch sein stets feinkrümeliges Bruchbild aus. Neben thermischen und mechanischen Einflüssen besteht auch die Gefahr eines Spontanbruchs durch einen sich ausdehnenden Nickel-Sulfid-Einschluss (NiS) im Glas. Die Phasenumwandlung von NiS findet bei Temperaturen unter 379°C statt. Je tiefer die Temperatur ist, umso langsamer geht die Phasenumwandlung vonstatten. Die Umwandlung von α -NiS in β -NiS hat eine Volumenvergrößerung zur Folge. Es kommt zu einer Zwangsbeanspruchung der Scheibe. Befindet sich ein Einschluss in der Zugspannungszone des Vorspannprozesses (Abb. 2.3 A1), so führt die Phasenumwandlung zu einer Zwangsbeanspruchung, die ein spontanes Versagen der ESG-Scheibe zur Folge hat. Das feinkrümelige Bruchbild weist im Bereich des Bruchursprungs den so genannten Bruchschmetterling auf. In dessen Mitte befindet sich der bruchauslösende Einschluss. Um diese Gefahr zu minimieren, kann ESG dem so genannten Heißlagerungstest unterzogen werden. Dabei sind die Scheiben gemäß [DIN EN 14179] bei einer mittleren Glastemperatur von $290 \pm 10^\circ\text{C}$ mindestens 2 Stunden in einem Ofen zu halten. Die Gläser, die diese auch als „heat soak test“ bezeichnete Prüfung bestehen, werden als ESG-H zertifiziert.

Werden die einzelnen Glasscheiben mittels Zwischenschichten zu einem Laminat zusammengefügt, so gibt es weitere Schädigungsszenarien. Es wird dabei grundsätzlich zwischen intralaminarem - in der Laminatschicht selbst (z.B. Riss/Bruch einer Glasscheibe oder Zwischenschicht) - und interlaminarem - zwischen den Laminatschichten (z.B. Delamination zweier Laminatschichten) - Versagen unterschieden.

Bei Verglasungen im Bauwesen ist die Splitterbindung durch eine entsprechende Zwischenschicht von höchster Bedeutung. Durch hohe Haftung der Glasbruchstücke an dieser Schicht lässt sich ein optimaler Personenschutz verwirklichen. Im so genannten Pummeltest wird die Haftung der Bruchstücke geprüft. Hierfür wird ein auf -18°C abgekühltes VSG-System (2 x 4 mm) systematisch mit einem Hammer geschädigt. Die Fläche, an der die Bruchstücke haften bleiben, wird mit der glassplitterfreien Folienfläche verglichen. Die Pummelwerte variieren zwischen 0 und 10, wobei ein Pummelwert von 10 eine 100%-Haftung von Glassplittern

bedeutet. Die Pummelwerte für die in den Versuchen (Kapitel 5) verwendete PVB-Folie TROSIFOL[®] MB liegen zwischen 6 und 9 [28]. Die Pummelwerte der verwendeten Probekörper mit SGP weisen laut DuPont einen Pummelwert von 6 auf, wobei es sich beim Test um ein VSG-System aus 2 x 6 mm handelt.

Im Gegensatz zum Bauwesen liegen im Fahrzeugbau für Zwischenschichten - insbesondere bei Windschutzscheiben - im Schadensfall andere Anforderungen vor. So werden hier Zwischenschichten mit kontrolliert reduzierter Haftung, aber hoher Penetrationsfestigkeit eingesetzt. Dies birgt den Vorteil, dass sich die Zwischenschicht bei einer stoßartigen Schädigung partiell von den Glasbruchstücken lösen und dehnen kann. Somit kann sich die geschädigte Windschutzscheibe im Bereich eines Stoßkörpers (evtl. Kopf eines Insassen) besser ausbeulen [28]. Gleichzeitig wird durch die meist allseitige, geklebte Randlagerung eine gewisse Resttragfähigkeit sichergestellt.

3.7.2 Lastabtragung

Die Lastabtragung erfolgt im Zustand II hauptsächlich durch die intakte(n) Glasscheibe(n) des VSG-Systems. Eine zusätzliche Mitwirkung der gebrochenen Glasscheiben kann sowohl bei Floatglas und TVG als auch bei ESG stattfinden. Insbesondere wenn die fraktionierte Scheibe in der Druckzone liegt, ist ihr Anteil an der Lastabtragung nicht unerheblich. Unter diesem Gesichtspunkt ist auch die Mitwirkung der Verschleißscheibe bei begehbaren Verglasungen zu betrachten. Bei Vier-Punkt-Biegeversuchen von VSG-Systemen mit TVG und PVB als Zwischenschicht wirkt sich die Beteiligung der vorgeschädigten Glasscheibe in der Zugzone bei der Lastabtragung aus [65]. Im Versuchsverlauf entstehen in der vorgeschädigten Scheibe weitere Glasbrüche. Bei VSG-Systemen mit ESG können die bedeutend kleineren Glasbruchstücke lediglich in der Druckzone zum Lastabtrag beitragen. Liegen diese in der Zugzone, so ist keine nennenswerte Lastabtragung möglich. Nur eine anfängliche Versteifung bei geringem Lastniveau ist zu erkennen. Generell ist die Mitwirkung der gebrochenen Glasscheibe an der Lastabtragung umso größer, je steifer und dünner die Zwischenschicht ist [65].

Da im Vorfeld eines Glasbruchs keine zuverlässige Aussage über den Ort der Schädigung im Laminataufbau getroffen werden kann, muss die Glasbemessung vom ungünstigsten Fall ausgehen. Daher erfolgt der Nachweis der Tragfähigkeit im Zustand II nur an der intakten Glasscheibe mit der gebrochenen als zusätzliche Belastung. Die Wahrscheinlichkeit des zeitgleichen Zusammentreffens eines Glasbruchs mit einer extremen äußeren Einwirkung ist gering. Gleichzeitig ist auch eine Mitwirkung der

Glasfragmente in der Druckzone vorhanden. Daher kann laut [FKG] beim Nachweis einer begeh- oder betretbaren Verglasung im Zustand II mit erhöhten zulässigen Biegezugspannungen gerechnet werden.

3.8 VSG im gebrochenen Zustand III

Der Zustand III eines VSG-Systems ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Glasscheiben gebrochen sind. Die Zwischenschicht ist weitgehend intakt, wobei sich einige Glasbruchstücke bereits abgelöst haben können (Abb. 3.4).

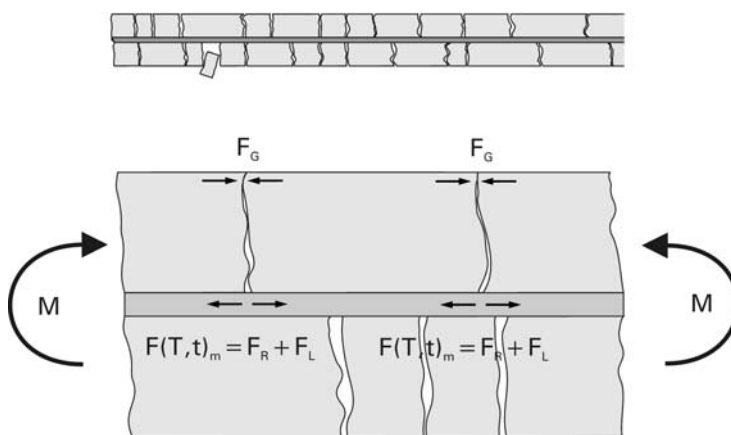


Abb. 3.4: Zustand III unter Biegebeanspruchung

3.8.1 Lastabtragungsmodelle

Die Lastabtragung im Zustand III unterscheidet sich grundlegend von einem intakten System. Die Biegetragwirkung erfolgt durch ein Verkanten der Bruchstücke untereinander, einem Lastabtrag über Kräftepaare in der Zwischenschicht und den Glasfragmenten oder einer Kombination hieraus. Die Rissverzahnung der Bruchstücke, die an der Zwischenschicht haften, ermöglicht den Querkraftabtrag.

Der räumliche Bruchlinienverlauf in den einzelnen Glasscheiben und ihre Orientierung zueinander bestimmen die Lastabtragung (Abb. 3.5). Bei sich kreuzenden Bruchlinien können die einzelnen, an sich intakten Glasschollen die Lastabtragung analog zu einzelnen Plattenstreifen übernehmen. Je nach Versatzlänge mindern übereinander verlaufende Bruchlinien die Resttragfähigkeit ab. Ist kein Bruchlinienversatz mehr vorhanden oder liegt ein feinkrümeliges Bruchbild vor, so bestimmen die Eigenschaften der Zwischenschicht entscheidend das Resttragverhalten des VSG-Systems.

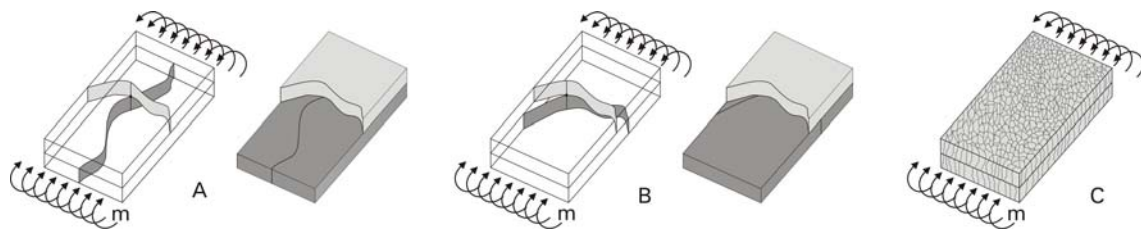


Abb. 3.5: Bruchlinienbild und -verlauf: A kreuzend; B übereinander; C feinkrümelig

Besteht ein Versatz der Länge l zwischen den Bruchlinien der oberen und unteren Scheibe, so kann sich folgende Lastabtragung bei einem äußeren Biegemoment M - hier dargestellt durch das Kräftepaar F_1 und F_2 - einstellen (Abb. 3.6).

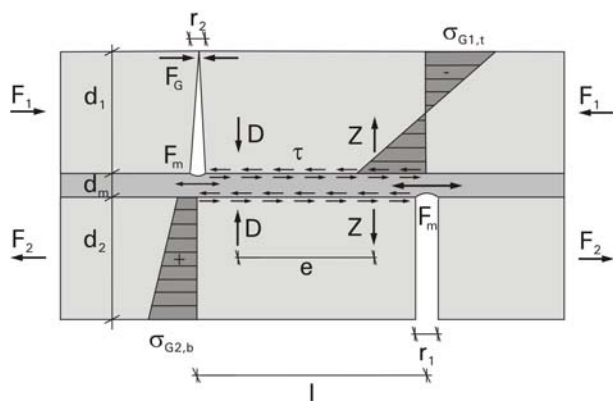


Abb. 3.6: Lastabtragung bei Biegebeanspruchung im Zustand III bei Bruchlinienversatz

Bei einer Bruchlinie (Rissöffnung r_1) in der Zugzone trägt die darüber liegende Glasscholle die äußere Belastung ab. Dies kann jedoch nur erfolgen, wenn der Bruchlinienversatz und somit die Verbundlänge für die Krafteinleitung ausreichend ist, ansonsten erfährt die Zwischenschicht eine verstärkte Zugbeanspruchung F_m .

Für eine Bruchlinie (Rissöffnung r_2) in der Druckzone gilt ein ähnlicher Zusammenhang. Je kürzer der Abstand der Bruchlinien, desto größer ist die Zugbeanspruchung in der Zwischenschicht und die Druckbeanspruchung F_G der Glasbruchstücke an der oberen Glasoberfläche. Die Abstützung der Glasbruchstücke und deren Haftverbund mit der Zwischenschicht ermöglichen ein Kräftepaar in Zwischenschichtdickenrichtung (Abb. 3.7). Dessen Zugkomponente Z ist umso größer, je kürzer der Bruchlinienversatz ist. Diese Zugkraft mindert die Adhäsionswirkung zwischen Glasoberfläche und Zwischenschicht ab und kann folglich zu Delaminationen führen.

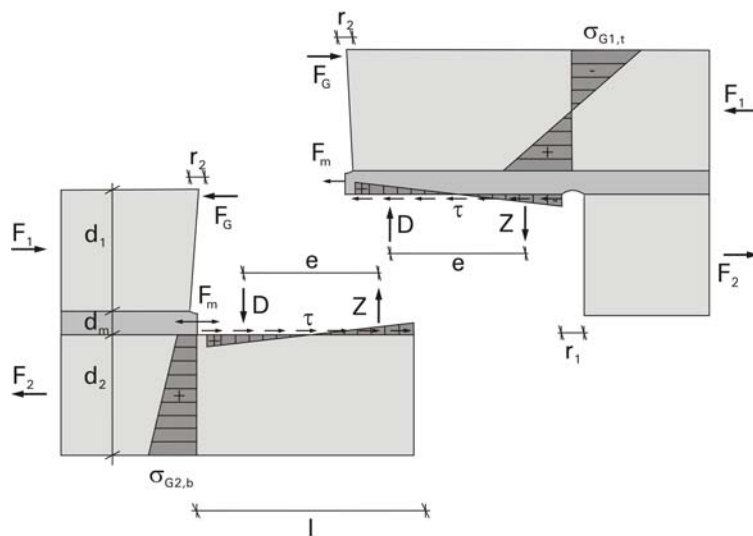


Abb. 3.7: Komponenten der Lastabtragung bei Biegebeanspruchung im Zustand III

Bei ausreichender Versatzlänge l ist die Kräfteinleitung in die Glasbruchstücke gegeben und kann unter Belastung zunächst zum weiteren Zugversagen des Glases infolge $\sigma_{G2,b} > \sigma_c$ führen, wie die Versuche in [65] zeigen.

Liegen die Bruchlinien der Scheiben direkt übereinander oder liegt ein feinkrümeliges Bruchbild vor, so stellt sich ein Kräftepaar - bestehend aus einer Zugkraft in der Zwischenschicht F_m sowie einer Druckkraft F_G am Rand des gebrochenen Glases - ein (Abb. 3.8). Auch hier bestimmen die Dehnsteifigkeit, die Zugfestigkeit und das Adhäsionsvermögen der Zwischenschicht sowie die Druckkraftübertragung über die Rissfläche entscheidend das Resttragverhalten.

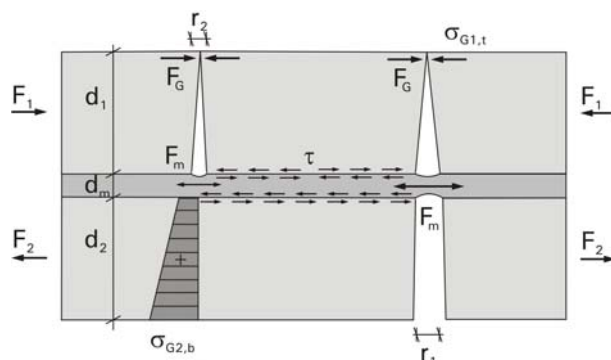


Abb. 3.8: Lastabtragung bei Biegebeanspruchung im Zustand III ohne Bruchlinienversatz

Ein hoher Schädigungsgrad im Zustand III ist entweder durch eine große Anzahl von Bruchlinien oder durch das direkte Übereinanderliegen einzelner Bruchlinien gekennzeichnet. Da das Bruchlinienbild und dessen Orientierung nur bedingt vorhersagbar sind, muss vom ungünstigsten Schadensszenario bei der Bemessung im Zustand III ausgegangen werden.

Je nach Dehnsteifigkeit, Adhäsionsverhalten der Zwischenschicht und Bruchlinienversatz kommt es entweder durch Delamination, Reißen der Zwischenschicht oder durch Ausmuschelung und Bruch des Glases zum Systemversagen.

3.8.2 Ermittlung der Momententragfähigkeit

Für die Ermittlung der Momententragfähigkeit im Zustand III wird vom ungünstigsten Schadensszenario – dem feinkrümeligen Bruchbild – ausgegangen. Die Bruchlinien der Glasscheiben liegen dabei direkt übereinander. Die gebrochene Glasscheibe in der Zugzone kann bei der Lastabtragung vernachlässigt werden, da durch die Rissöffnungen nur geringe Zugkräfte übertragbar sind.

Annahme eines eben bleibenden Querschnitts

Der Spannungsverlauf im verbleibenden VSG-Querschnitt beruht auf der Annahme eines ebenen und normal zur Mittellinie bleibenden Querschnitts nach Bernoulli. Das Spannungs-Dehnungsverhalten von gebrochenem Glas unter Druckbeanspruchung wird als linear angenommen. Die gebrochene Scheibe in der Zugzone wird vernachlässigt und nur als eine zusätzliche äußere Belastung angesehen (Abb. 3.9).

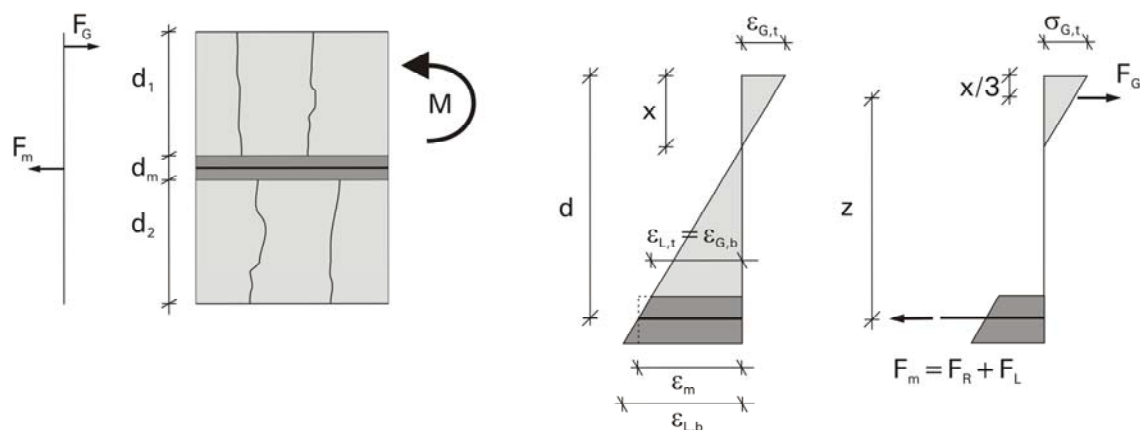


Abb. 3.9: Dehnungs-, Spannungs- und Kräfteverlauf im VSG-Querschnitt infolge Biegebeanspruchung

Die Kraft in der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix setzt sich aus den Komponenten in der Bewehrung F_R und Zwischenschicht F_L zusammen:

$$F_m = F_R + F_L \quad (3.1)$$

Ist keine Bewehrung in der Zwischenschicht eingebettet, so gilt:

$$F_m = F_L \quad (3.2)$$

Das horizontale Kräftegleichgewicht im Querschnitt bedingt Folgendes:

$$F_m = F_G \quad (3.3)$$

Wobei die Druckzone dreiecksförmig angenommen wird

$$F_G = \frac{1}{2} x b E_G \varepsilon_{G,t} \quad (3.4)$$

Gilt $\varepsilon_{y,R} < \varepsilon_{y,L}$ und ist die Fließspannung $\sigma_{y,R}$ noch nicht erreicht, so lässt sich die Kraft in der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix wie folgt ermitteln:

$$F_m = F_L + F_R = E_L A_L \varepsilon_L + E_{R,1} A_R \varepsilon_R \quad (3.5)$$

Folgende Spannungs-Dehnungs-Annahmen von Glas, Bewehrung und Zwischenschicht liegen dem Ansatz zu Grunde:

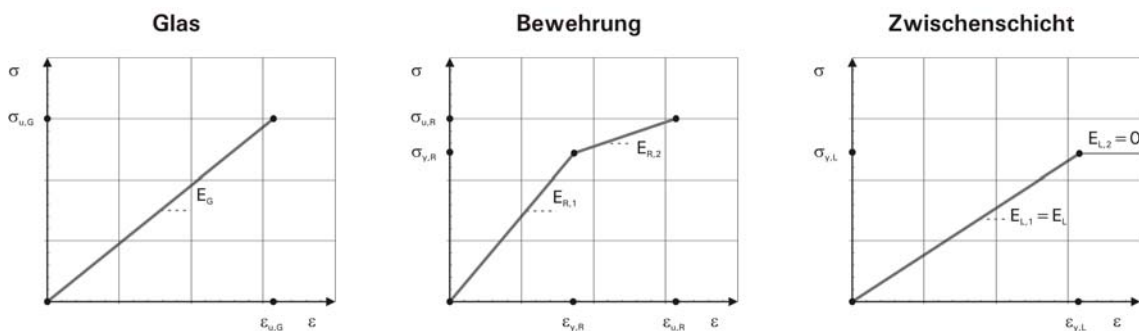


Abb. 3.10: Spannungs-Dehnungs-Annahme von Glas, Bewehrung und Zwischenschicht

Die Geometrieverträglichkeit hat zur Folge, dass die Dehnung der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix am Glasrand $\varepsilon_{L,t}$ der Glasranddehnung $\varepsilon_{G,b}$ entsprechen muss, sonst tritt Delamination ein.

$$\varepsilon_{L,t} = \varepsilon_{G,b} \quad (3.6)$$

Für die gemittelte Dehnung ε_m in der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix gilt folgende Beziehung:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_L = \frac{\varepsilon_{L,t} + \varepsilon_{L,b}}{2} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_R \quad (3.8)$$

und somit:

$$F_m = \varepsilon_m (E_L A_L + E_{R,1} A_R) = \varepsilon_m S \quad (3.9)$$

Das Momentengleichgewicht liefert folgende Bedingung:

$$F_m = F_G = \frac{M}{z} = \frac{M}{\left(d - \frac{x}{3} \right)} \quad (3.10)$$

Die Dehnungsverteilung über den Querschnitt führt zu folgender Geometriebedingung:

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{G,t}}{\varepsilon_{G,t} + \varepsilon_m} \quad (3.11)$$

Aus diesen drei Bedingungen - horizontales Kräftegleichgewicht, Momentengleichgewicht und Dehnungsverteilung - lassen sich bei einer Momentenbeanspruchung die Spannungs- und Dehnungsverteilung in einem gegebenen Querschnitt eindeutig bestimmen. Aus dem Momentengleichgewicht

$$F_G = \frac{1}{2} x b E_G \varepsilon_{G,t} = \frac{M}{\left(d - \frac{x}{3}\right)} \quad (3.12)$$

folgt:

$$M = \frac{1}{2} x b d E_G \varepsilon_{G,t} - \frac{1}{6} x^2 b E_G \varepsilon_{G,t} \quad (3.13)$$

Das horizontale Kräftegleichgewicht (3.3) führt zu:

$$F_m = \varepsilon_m S = \varepsilon_m (E_L A_L + E_{R,1} A_R) = \frac{M}{\left(d - \frac{x}{3}\right)} \quad (3.14)$$

Dies liefert die Druckzonenhöhe x:

$$x = 3d - \frac{3M}{S \varepsilon_m} \quad (3.15)$$

Die Gleichungen (3.13) und (3.15) führen zu:

$$0 = (6M) \varepsilon_m^2 + \left(\frac{9bE_G M^2}{S^2}\right) \varepsilon_{G,t} - \left(\frac{9bdE_G M}{S}\right) \varepsilon_{G,t} \varepsilon_m \quad (3.16)$$

Die Gleichungen für die Druckzonenhöhe x (3.15) und die Dehnungsverteilung (3.11) liefern die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,t}$:

$$\varepsilon_{G,t} = \left(\frac{3d\varepsilon_m S - 3M}{3M - 2d\varepsilon_m S}\right) \varepsilon_m \quad (3.17)$$

Die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,t}$ eingesetzt in Gleichung (3.16) führt zu einer quadratische Gleichung für die Dehnung ε_m

$$0 = (4dS^3 + 9bd^2 E_G S^2) \varepsilon_m^2 - (6MS^2 + 18bdE_G MS) \varepsilon_m + 9bE_G M^2 \quad (3.18)$$

und damit zu einer eindeutigen Lösung für die mittlere Dehnung ε_m der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix, für die Randstauchung $\varepsilon_{G,t}$ und für die Druckzonenhöhe x :

$$\varepsilon_m = \frac{3MS^2 + 9bdE_GMS}{4dS^3 + 9bd^2E_GS^2} + \sqrt{\left[\frac{3MS^2 + 9bdE_GMS}{4dS^3 + 9bd^2E_GS^2} \right]^2 - \frac{9bE_GM^2}{4dS^3 + 9bd^2E_GS^2}} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{G,t} = \left(\frac{x}{d-x} \right) \varepsilon_m \quad (3.20)$$

Für die Druckzonenhöhe x gilt die Gleichung (3.15).

Die maximale Druckspannung im Glas resultiert aus der Randdehnung:

$$\sigma_{G,t} = \varepsilon_{G,t} E_G \quad (3.21)$$

Die Krümmung ergibt sich wie folgt:

$$\kappa_o = \frac{\varepsilon_m + \varepsilon_{G,t}}{d} \quad (3.22)$$

Annahme eines nicht eben bleibenden Querschnitts

Bleibt der Querschnitt durch zeit- und temperaturabhängige Schubverformung der Zwischenschicht nicht eben, so lässt sich die mittlere Dehnung der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix $\varepsilon_m(t, T)$ mit dem hier eingeführten Verbundfaktor α wie folgt linear approximieren:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_L = \varepsilon_R = \alpha \varepsilon_{G,b} \quad (3.23)$$

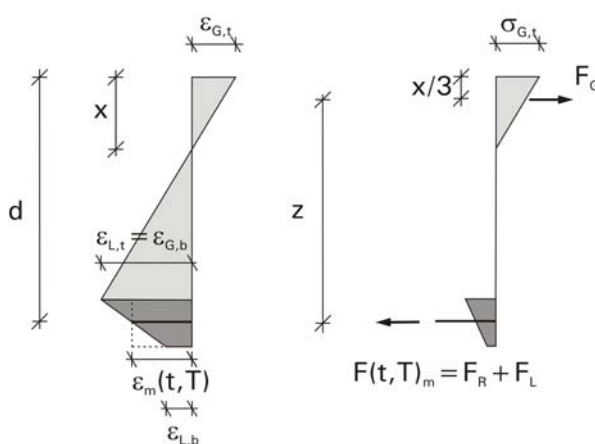


Abb. 3.11: Dehnungs- und Spannungsverlauf im VSG-Querschnitt infolge Biegebeanspruchung

Die Dehnungsverteilung über den Querschnitt (Abb. 3.11) führt zur Geometriebedingung:

$$\frac{x}{\left(d - \frac{d_m}{2}\right)} = \frac{\varepsilon_{G,t}}{\varepsilon_{G,t} + \varepsilon_{G,b}} \quad (3.24)$$

Aus den drei Bedingungen - horizontales Kräftegleichgewicht, Momentengleichgewicht und Dehnungsverteilung - lassen sich die Spannungs- und Dehnungsverteilung in einem gegebenen Querschnitt eindeutig bestimmen.

Es gelten auch hier die Gleichungen (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) und (3.16).

Die Gleichungen für die Druckzonenhöhe x (3.15) und die Dehnungsverteilung (3.24) liefern die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,t}$:

$$\varepsilon_{G,t} = \left(\frac{3d\varepsilon_m S - 3M}{3M - 2d\varepsilon_m S - \frac{d_m}{2} \varepsilon_m S} \right) \frac{\varepsilon_m}{\alpha} \quad (3.25)$$

Aus der Dehnungsverteilung sowie dem Kräfte- und dem Momentengleichgewicht ergibt sich eine quadratische Gleichung für die Dehnung ε_m :

$$0 = \left((4d + d_m)S^3 + \frac{9bd^2 E_G S^2}{\alpha} \right) \varepsilon_m^2 - \left(6MS^2 + \frac{18bd E_G MS}{\alpha} \right) \varepsilon_m + \frac{9b E_G M^2}{\alpha} \quad (3.26)$$

Damit kann die eindeutige Lösung für die mittlere Dehnung ε_m der Zwischenschicht mit Bewehrung, für die Randstauchungen ε_G und für die Druckzonenhöhe x ermittelt werden:

$$\varepsilon_m = \frac{3MS^2 + 9bd E_G MS \alpha^{-1}}{(4d + d_m)S^3 + 9bd^2 E_G S^2 \alpha^{-1}} + \sqrt{\left[\frac{3MS^2 + 9bd E_G MS \alpha^{-1}}{(4d + d_m)S^3 + 9bd^2 E_G S^2 \alpha^{-1}} \right]^2 - \frac{9b E_G M^2 \alpha^{-1}}{(4d + d_m)S^3 + 9bd^2 E_G S^2 \alpha^{-1}}} \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_{G,b} = \frac{\varepsilon_m}{\alpha} \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_{G,t} = \left(\frac{x}{d - \frac{d_m}{2} - x} \right) \varepsilon_{G,b} \quad (3.29)$$

Für die Druckzonenhöhe x gilt die Gleichung (3.15).

Die zugehörige Glasrandspannung ergibt sich gemäß Gleichung (3.21).

Die Krümmung der fraktionierten Glasschicht lautet:

$$\kappa(\alpha) = \frac{\varepsilon_{G,t} + \varepsilon_{G,b}}{d - \frac{d_m}{2}} \quad (3.30)$$

3.9 Zusammenfassung

Die Zustandsdefinition eines VG- oder VSG-Systems orientiert sich am Schädigungsgrad. Die Lastabtragung des Systems in den einzelnen Zuständen wird erörtert, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Zustand III - dem Bruch aller Scheiben - liegt. Nun gilt es, die Anforderungen und die Einflussfaktoren in diesem Zustand III zu erfassen, um die Lastabtragung mit geeigneten Maßnahmen zu steigern und damit die Sicherheit im konstruktiven Glasbau zu erhöhen.

4 Resttragfähigkeit

4.1 Anforderungen an die Resttragfähigkeit

In [E DIN 18008] wird die Resttragfähigkeit wie folgt definiert: „Fähigkeit einer Verglasungskonstruktion im Falle eines festgelegten Zerstörungszustandes unter definierten äußeren Einflüssen (Last, Temperatur, usw.) über einen festgelegten Zeitraum ausreichend standsicher zu bleiben“. Dieser Zeitraum wird oft auch als Reststandzeit bezeichnet.

Eine einzelne, geschädigte Glasscheibe kann durch Verkanten und Abstützen der einzelnen Bruchstücke bei günstigen Randbedingungen über einen gewissen Zeitraum hin standsicher sein. Jedoch ist diese Resttragfähigkeit sehr begrenzt. Daher müssen Glasbauteile, die einen aktiven (z.B. absturzsichernde Verglasungen) bzw. passiven Schutz (z.B. Überkopfverglasungen) bieten, stets aus VSG-Systemen bestehen.

Die Normen und technischen Richtlinien geben vor, wie die Tragfähigkeit von Glasbauteilen zu ermitteln ist. Dabei wird zwischen Überkopf- und Vertikalverglasungen unterschieden. Die zu verwendenden Glasarten, die Mindestdicke der Zwischenschicht und die Mindestglaseinstände sind meistens durch die Regelwerke vorgegeben. Entsprechen die Verglasungen nicht den Vorgaben der Regelwerke und liegt keine allgemeine baurechtliche Zulassung vor, so ist eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erforderlich. Für die ZiE ist neben einem rechnerischen Nachweis meist auch eine experimentelle Ermittlung der Tragfähigkeit im gebrochenen und unebrochenen Zustand zu erbringen. Die Bestimmung der Resttragfähigkeit des gebrochenen bzw. teilweise gebrochenen Glasbauteils erfolgt durch aufwändige Versuche. Die Regelwerke geben hierfür die Prüflast und die Art der Schädigung vor, unterscheiden sich jedoch sehr bei der Angabe der Prüftemperatur. Eine mögliche Alterung der Glasbauteile - insbesondere der Zwischenschicht - durch UV-Strahlung und Feuchte werden in den Prüfbedingungen zur Resttragfähigkeit nicht definiert. Lediglich beim rechnerischen Nachweis des intakten Glasbauteils ist die Wirkungsweise der Zwischenschicht klar definiert. Die günstige Tragwirkung durch die flächige Verklebung mittels Zwischenschicht darf derzeit bei der Glasbemessung im Zustand I in Deutschland nicht angesetzt werden, wohingegen die amerikanische Norm [ASTM E1300] den Schubverbund bei VSG-Systemen bei kurzzeitig wirkenden Lasten durch einen Faktor in der Glasbemessung berücksichtigt.

Kann eine Verglasung die geforderte Resttragfähigkeit nicht gewährleisten, so ist die Verkehrssicherheit bei Glasbruch durch konstruktive Maßnahmen (z.B. durchsturzssichernde Netze) zu gewährleisten.

4.1.1 Überkopfverglasung

Für Überkopfverglasungen sind gemäß [TRLV] und [TRPV] rechnerische Spannungsnachweise zu erbringen und konstruktive Durchbildungen zu beachten, um eine Resttragfähigkeit zu gewährleisten. So darf laut der [TRLV] für Einfachverglasungen und für die untere Scheibe von Isolierverglasungen nur VSG aus Spiegelglas oder VSG aus TVG verwendet werden. Drahtglas ist nur zulässig, wenn ein Mindestglaseinstand von 15 mm gegeben ist und die maximale Stützweite auf 70 cm begrenzt wird. Besitzt ein VSG eine Stützweite von mehr als 80 cm, so muss die Gesamtdicke der PVB-Folie mindestens 0,76 mm betragen. VSG-Systeme mit einer Stützweite $l > 1,2$ m sind allseitig linienförmig zu lagern, wobei das Seitenverhältnis nicht größer als 3 zu 1 sein darf.

Die [TRPV] fordert für Einfachverglasungen ein VSG mit symmetrischem Glasaufbau aus TVG mit je mindestens 6 mm Scheibendicke und einer PVB-Zwischenschicht mit mindestens 1,52 mm Foliendicke. Das maximal zulässige Stützraster und der minimale Randabstand der punktförmigen Tellerhalterungen sowie die Geometrie sind dabei vorgegeben.

Der Aufbau von VSG-Systemen für eine liniengelagerte, begehbare Überkopfverglasung muss aus drei Scheiben bestehen, wobei die oberste rechnerisch als nicht tragend anzusehen ist. Sie muss mindestens 10 mm dick sein und aus TVG oder ESG bestehen. Die unteren Scheiben des VSG müssen eine Scheibendicke von je mindestens 12 mm aufweisen und aus Spiegelglas oder TVG bestehen. Die Mindestnennstärke der verwendeten PVB-Folie beträgt 1,52 mm. Die Verglasung ist durch seitliche Halterungen - die Mindestauflagerbreite beträgt 30 mm - in ihrer Lage zu sichern. Bei begehbaren Verglasungen ist eine Einzellast mit lotrechter Verkehrsflächenlast nachzuweisen. Die Einzellast wirkt auf einer Aufstandsfläche von 100 mm x 100 mm. Beträgt die Verkehrsflächenlast maximal 3,5 kN/m², so wirkt gleichzeitig eine Einzellast von 1,5 kN. Bei einer höheren Verkehrsflächenlast von bis zu 5 kN/m² ist eine erhöhte Einzellast von 2 kN anzusetzen.

Überkopfverglasungen, die nicht der [TRLV], der [TRPV] oder einer allgemeinen baurechtlichen Zulassung entsprechen, erfordern eine Zustimmung im Einzelfall [G1], [G4]. Diese sieht in den meisten Fällen aufwändige Bauteilversuche vor. Die Versuche müssen die statisch-konstruktiven Verhältnisse am Bauwerk (Glasaufbau, Stützweiten, Auflagerung, Einspannungen) ausreichend genau wiedergeben. Einflüsse,

die bei der Originalausführung nicht dauerhaft gewährleistet sind, jedoch das Versuchsergebnis verfälschen könnten (z.B. Verklebung, Versiegelung der Fugen), sind im Versuchsaufbau nicht zulässig.

Nach der „Zusammenfassung der wesentlichen Anforderungen an zustimmungspflichtige Überkopfverglasungen der Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg“ [G1] ist die ausreichende Standsicherheit von Überkopfverglasungen bei Glasbruch unter Einwirkung von planmäßigen Lasten (Eigenlast, Schnee usw.) in der Regel durch Bauteilversuche nachzuweisen. Bei einer Einfachverglasung müssen folgende Versuchsschritte durchgeführt werden: Aufbringen der Prüflast (0,5-fache Bemessungslast, mindestens jedoch $0,5 \text{ kN/m}^2$); Brechen aller VSG-Scheiben durch Anschlagen – es ist ein statisch ungünstiger Rissverlauf anzustreben; Dokumentation des Rissbildes und Ermittlung der Standzeit. Der Versuch darf nach 24 h abgebrochen und als erfolgreich gewertet werden.

Für Überkopfverglasungen, die nur zur Durchführung von Reinigungs- und Wartungsarbeiten betretbar sind und deren unterhalb der Verglasung befindlichen Verkehrsflächen während der Arbeiten gesperrt sind, gelten die oben genannten Regeln sowie die Vorschriften von Berufsgenossenschaften [GS-BAU-18]. Diese sehen die Prüfung der Betretbarkeit vor. Dafür wird ein mit Glaskugeln gefüllter Leinensack mit der Masse 50 kg aus 1,2 m Höhe auf die Versuchsverglasung abgeworfen. Die Prüfung erfolgt schrittweise: Zunächst wird die oberste Glasscheibe der Verglasung unter der planmäßigen Betretungslast gebrochen und mindestens 15 min belassen. Dann wird der Stoßkörper auf die im ersten Prüfungsteil vorgeschädigte Verglasung abgeworfen. Der Stoßkörper wird anschließend durch eine Betretungslast von 100 kg auf einer Aufstandsfläche von $20 \times 20 \text{ cm}$ ersetzt. Nach einer Resttragdauer von weiteren 15 min gilt die Verglasung als bedingt betretbar. Die [GS-BAU-18] untersucht ebenso durchsturzsichernde Verglasungen, die nicht ohne zusätzliche Hilfsmittel betreten werden können. Dabei wird der oben beschriebene Stoßkörper aus 0,6 m Höhe abgeworfen und 15 min auf der vorgeschädigten Verglasung belassen. Die Auftreffstellen sind jeweils so zu wählen, dass die entstehende dynamische Beanspruchung die größte Versagenswahrscheinlichkeit zur Folge hat.

Kann die Sperrung der Verkehrsfläche unterhalb der bedingt betretbaren Verglasung nicht gewährleistet werden, so gelten zusätzliche Anforderungen an die Überkopfverglasung. Bei Glasbruch müssen diese Verglasungen die Personenlasten aufnehmen können und gleichzeitig das Herabfallen großer Glasteile auf die Verkehrsfläche darunter verhindern. Es werden experimentelle Nachweise der Stoßsicherheit und der Resttragfähigkeit analog zu begehbaren Verglasungen geführt.

Die „Anforderungen an begehbare Verglasungen; Empfehlungen für das Zustimmungsverfahren“ [DIBt 2/2001] geben folgende Vorgaben: Als ausreichend darf bei linienförmiger Randlagerung im Allgemeinen ein Glaseinstand von mindestens 30 mm gelten, bei allseitig gelagerten Scheiben mit einer Stützweite von höchstens 400 mm genügen davon abweichend mindestens 20 mm. Die Aufnahme der Lasten ist unter der Annahme nachzuweisen, dass die oberste Glasplatte nicht mitträgt und ein günstig wirkender Schubverbund zwischen den Einzelscheiben des VSG-Systems nicht vorhanden ist.

Die ausreichende Stoßsicherheit und das Tragverhalten bei Glasbruch sind in der Regel durch Bauteilversuche zu belegen. Beim Nachweis der Stoßsicherheit wird ein Stoßkörper mit der Masse von 40 kg verwendet. Die Aufschlagfläche auf der Verglasung bildet eine in den Stoßkörper eingedrehte Sechskantschraube M8/SW13. Vor dem Abwurf des Stoßkörpers ist auf die Verglasung die halbe planmäßig gleichmäßig verteilte Verkehrslast in Form von Personenersatzlasten (1 kN pro Personenersatzlast; Aufstandsfläche 200 mm x 200 mm) in ungünstigster Laststellung aufzubringen, wobei mindestens von einer Personenersatzlast auszugehen ist. Die Auftreffpunkte des Stoßkörpers sind ungünstig zu wählen, damit maximale Glas- und Halterschädigungen hervorgerufen werden, d.h. an Orten mit maximaler Spannung und Durchbiegung (Feldmitte, Rand- und Eckbereiche, Auflagernähe und Glasbohrungen). Die Fallhöhe des Stoßkörpers beträgt 800 mm. Je Stoßszenario sind mindestens zwei Versuchsverglasungen zu untersuchen. Sollte der Stoßkörper die Verglasung nicht vollständig durchstoßen, die VSG-Verglasung nicht von den Lagern rutschen und sind die herabfallenden Bruchstücke nicht größer als in [DIN 1249] beschrieben, so gilt der Nachweis der Stoßsicherheit als bestanden. Der Nachweis der Resttragfähigkeit wird an den durch die Abwürfe des Stoßkörpers geschädigten VSG-Systemen unter der halben Verkehrslast und dem Eigengewicht des Stoßkörpers erbracht. Sind durch die Stoßversuche noch nicht alle Einzelscheiben zerstört, so sind die noch ungeschädigten Glasschichten durch Anschlagen zu brechen, wobei statisch ungünstige Rissverläufe anzustreben sind. Falls innerhalb einer Standzeit von mindestens 30 min keine Bruchstücke herabfallen, die größer sind als in [DIN 1249] beschrieben, gilt der Resttragfähigkeitsnachweis als erbracht.

4.1.2 Vertikalverglasung

Falls eine Vertikalverglasung den [TRLV] oder einer allgemeinen baurechtlichen Zulassung entspricht, ist keine Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Soll diese Vertikalverglasung die Absturzsicherung übernehmen, so muss sie den Anforderungen der [TRAV] genügen oder im Einzelfall geprüft werden.

Die [TRAV] unterteilt die absturzsichernden Verglasungen in drei Kategorien: A, B und C (C1, C2, C3). Für Kategorie A können bei Einfachverglasung nur VSG, bei Isolierverglasungen als innere, der stoßzugewandten Seite ebenfalls VSG oder ESG zur Anwendung kommen. Besteht bei Isolierverglasungen die Angriffsseite aus VSG, so dürfen für die äußere Scheibe alle Glasprodukte verwendet werden. Besteht die Angriffsseite nicht aus einem VSG-System, so muss die äußere Scheibe aus einem solchen bestehen. Für alle Einfachverglasungen der Kategorien B und C dürfen nur VSG-Systeme verwendet werden. Lediglich bei allseitiger linienförmiger Lagerung dürfen bei den Untergruppen C1 und C2 auch ESG-Verglasungen zur Anwendung kommen. Die angriffsseitige Scheibe darf nur in ESG oder VSG ausgeführt werden. Für Isolierverglasungen der Kategorie C3 gelten die Regeln der Kategorie A.

Der Nachweis der Tragfähigkeit der Verglasung und ihrer unmittelbaren Befestigung unter stoßartigen Einwirkungen erfolgt meist im Pendelschlagversuch in Anlehnung an [DIN EN 12600]. Hierbei wird ein Pendel, bestehend aus einem Zwillingreifen unter 4 bar Druck mit der Masse von 50 kg, gegen die Verglasung gestoßen. Analog hierzu wird in der amerikanischen Norm [ANSI Z97] der Pendelschlagversuch mit einem gefüllten Lederball definiert, um den weichen Stoß abzubilden. Die Pendelfallhöhe variiert laut [TRAV] je nach Kategorie: 900 mm bei Kategorie A; 700 mm bei Kategorie B; 450 mm bei Kategorie C. Für die Pendelschlagversuche sind je nach Art und Lagerung der Verglasungen zwei bis vier Auftreffstellen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Eingrenzungen zu untersuchen mit dem Ziel, die maximale Glas- und Halterbeanspruchung (z.B. Auflagernähe, am freien Scheibenrand, Scheibenmitte, Kragarm-Ende) zu erzielen. Im Regelfall sind mindestens zwei Scheiben je Ausführungsvariante zu prüfen.

Bei Isolierverglasungen der Kategorie A, deren Innenscheibe aus ESG besteht, muss die Außenscheibe dem Pendel mit einer Fallhöhe von 450 mm standhalten, auch wenn die Innenscheibe aus ESG bei den Versuchen mit der Pendelfallhöhe von 900 mm nicht zu Bruch ging.

Beschädigte Verglasungskonstruktionen sind durch einen weiteren Pendelschlag mit einer Fallhöhe von 100 mm zu überprüfen. Der Stoß muss auf dieselbe Auftreffstelle ausgeführt werden. Wenn die Verglasung weder vom Stoßkörper durchschlagen oder aus den Verankerungen gerissen wird, noch Bruchstücke herabfallen, welche die Verkehrsflächen gefährden könnten, gilt die Pendelschlagprüfung als bestanden. VSG-Systeme dürfen nach den Pendelschlagversuchen in Anlehnung an [DIN EN 12600] keine Risse mit einer Öffnungsweite von mehr als 76 mm aufweisen. Monolithische Außenscheiben von Isolierverglasungen dürfen bei den Versuchen nicht brechen.

4.1.3 Bauteiltemperatur

Die Temperaturen, die in einem VSG-System bei der baupraktischen Anwendung auftreten können, unterliegen je nach Anwendung den tages- und jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Umgebungslufttemperatur und der solaren Einstrahlung. Glasfärbungen, Bedruckungen und Einlagen in der Zwischenschicht sowie die Belüftungssituation und Orientierung der Verglasung am Einbauort können die maximal auftretenden Zwischenschichttemperaturen zusätzlich erhöhen.

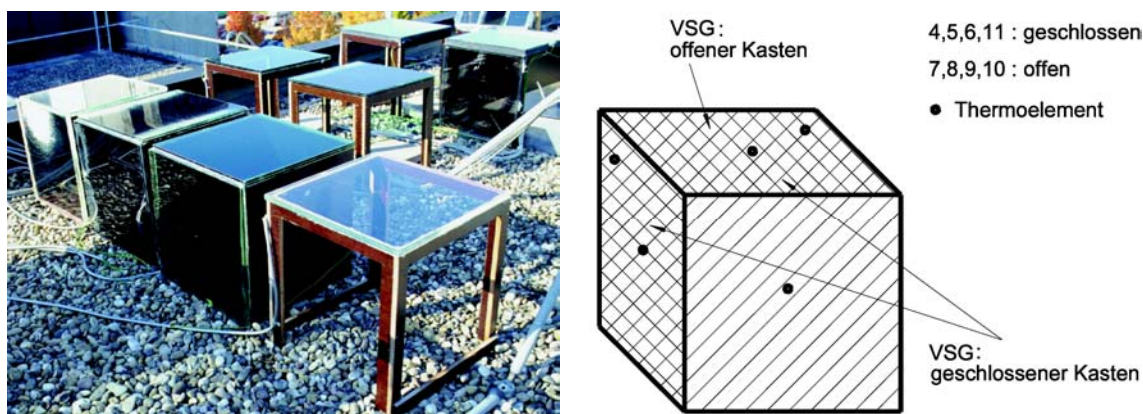


Abb. 4.1: Messung der Zwischenschichttemperatur ohne und mit Hinterlüftung [78]

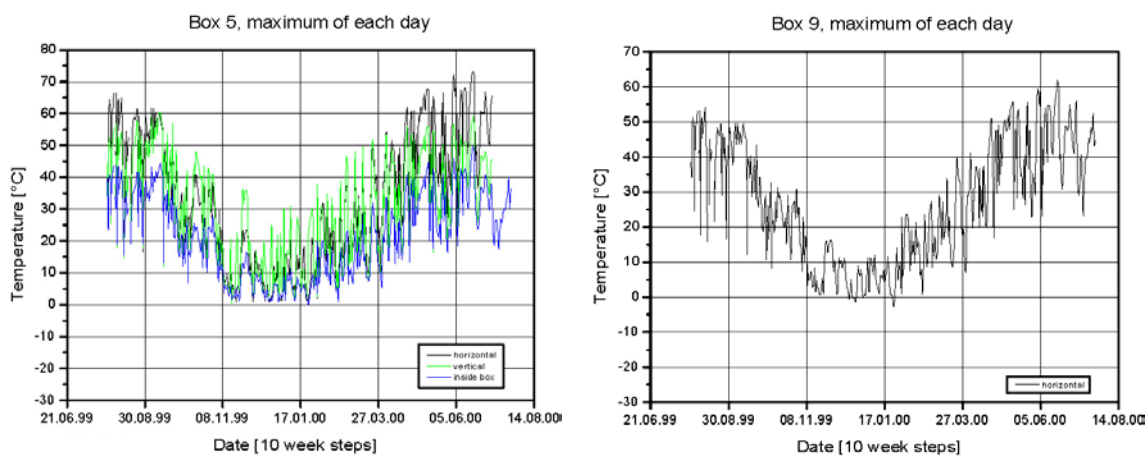


Abb. 4.2: Maximale Bauteiltemperaturen von VSG-Systemen mit Schwarzemailglas ohne (Kasten 5) und mit Hinterlüftung (Kasten 9) [78]

Die im Freilandversuch in Stuttgart ermittelten Temperaturen in der Zwischenschicht von VSG-Systemen liegen zwischen ca. -24°C und ca. 74°C [78] (Abb. 4.1, Abb. 4.2).

Die maximale Temperatur in der Zwischenschicht tritt bei nicht hinterlüfteten, horizontal gelagerten VSG-Systemen mit schwarz emailliertem Glas auf. An einem heißen und sonnigen Sommertag ist die Zwischenschichttemperatur in horizontal gelagerten VSG-Systemen ohne Hinterlüftung um ca. 10°K höher als bei Systemen mit Hinterlüftung (Abb.

4.3, Abb. 4.4). Die Orientierung zur Sonne bewirkt bei horizontal gelagerten VSG-Systemen im Vergleich zu vertikal gelagerten Systemen eine bis zu 15°K erhöhte Zwischenschichttemperatur.

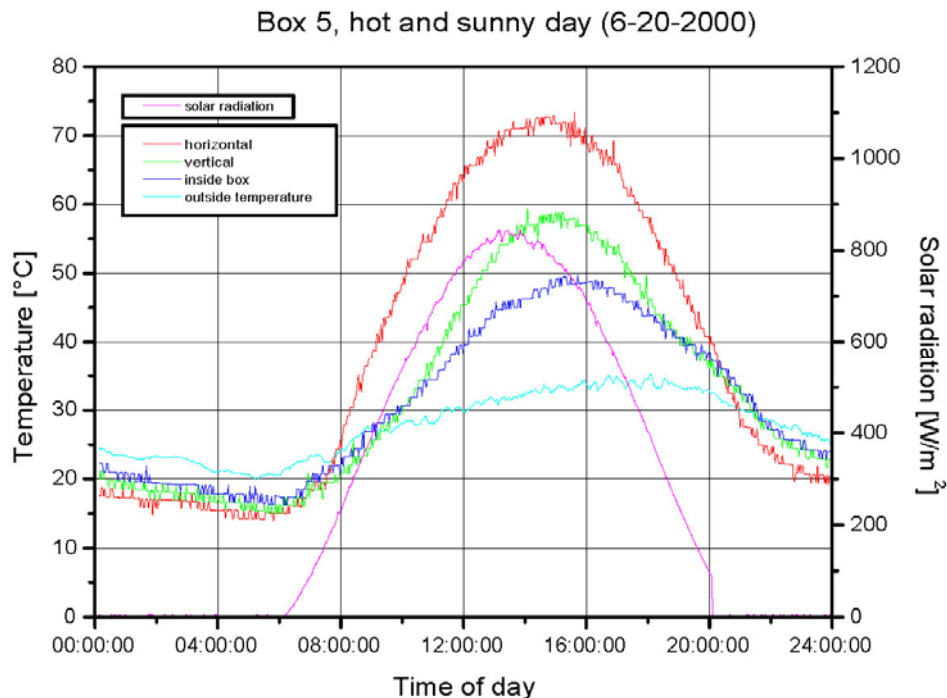


Abb. 4.3: Temperaturverlauf an einem heißen und sonnigen Sommertag ohne Hinterlüftung (Kasten 5) [78]

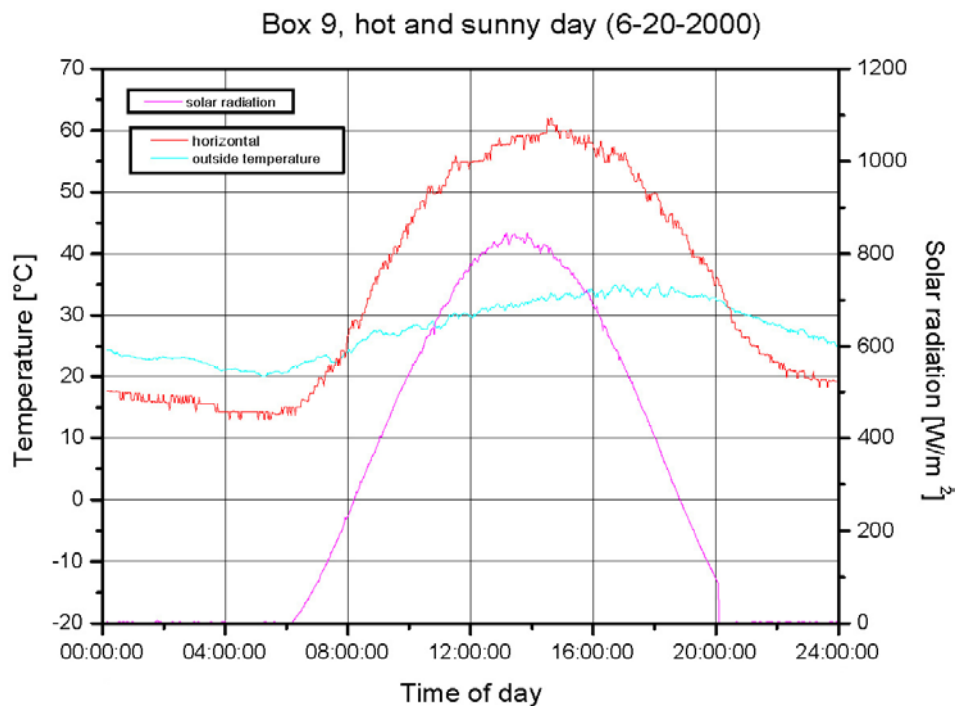


Abb. 4.4: Temperaturverlauf an einem heißen und sonnigen Sommertag mit Hinterlüftung (Kasten 9) [78]

Der Temperaturverlauf in der Zwischenschicht ist affin zum Verlauf der Globalstrahlung, der so genannten „solar radiation“. Es ist dabei ein zeitlicher Versatz der Maxima zu erkennen.

An einem heißen und sonnigen Sommertag in Deutschland ist die Zwischenschichttemperatur über eine Dauer von ca. 10 Stunden höher als 40°C. Die PVB-Zwischenschicht weist bei dieser Temperatur und einer ständigen Einwirkung laut [3], [17], [37] und [59] einen Schubmodul von weniger als 0,3 N/mm² auf. Es liegt nur ein Teilverbund im Laminat vor.

Die Berücksichtigung der Temperatur des VSG-Systems und insbesondere der Zwischenschicht ist in den Technischen Regeln und Normen bei der Bestimmung der (Rest-)Tragfähigkeit nicht einheitlich geregelt. So macht die [TRLV] keine Angaben zu der Bauteiltemperatur an sich und verbietet den Ansatz des günstig wirkenden Schubverbunds beim Nachweis im Zustand I. Lediglich die [TRPV] gibt für die rechnerische Ermittlung der Bemessungsbeanspruchungen im ungebrochenen Zustand I Grenztemperaturen von -20°C und 80°C vor. Die Pendelschlagversuche gemäß [TRAV] sind bei Raumklima durchzuführen. Bei Prüfungen vor Ort entscheidet die Prüfstelle, ob die klimatischen Prüfbedingungen als regulär gelten können.

Nach der „Zusammenfassung der wesentlichen Anforderungen an zustimmungspflichtige Überkopfverglasungen der Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg“ [G1] ist bei Überkopfverglasungen, die zur Durchführung von Reinigungs- und Wartungsarbeiten betretbar sind, folgende zusätzliche Anforderung zu beachten: Die Glasscheiben sind unter „Sommer-Bedingungen“ zu prüfen. Sofern keine genaueren Temperaturwerte vorgegeben werden können, ist von einer Glastemperatur von 50°C auszugehen.

Die [GS-BAU-18] fordert die Einhaltung realistischer Umwelt-, Witterungs- und Temperatureinflüsse bei der Durchführung der Prüfung von Betretbarkeit oder Durchsturzicherheit von Bauteilen. Dabei können die Temperatureinflüsse auch durch eine vergrößerte Fallhöhe des Stoßkörpers abgebildet werden. Wie dies zu erfolgen hat, wird jedoch nicht dargelegt.

Gemäß den „Anforderungen an begehbare Verglasungen; Empfehlungen für das Zustimmungsverfahren“ [DIBt 2/2001] müssen die Versuche beim Nachweis der Stoßicherheit in der Regel bei Raumtemperatur durchgeführt werden. Gegebenenfalls sind jedoch auch Prüfungen bei erhöhten Temperaturen zu berücksichtigen. Ein definiertes Temperaturspektrum gibt es hierfür aber nicht.

Der Pendelschlagversuch nach [DIN EN 12600] fordert, dass die Prüfkörper vor Beginn mindestens 12 h bei 20±5°C zu konditionieren sind und dass die Versuche ebenfalls bei 20±5°C durchzuführen sind. Dagegen sieht die [DIN

EN 356] für Sicherheitssonderverglasungen und die [DIN 52338] für den Kugelfallversuch für Verbundglas jeweils eine Prüftemperatur von $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ vor.

Im Fahrzeugbau werden die Versuchskörper gemäß [DIN 52306] für den Kugelfallversuch an Sicherheitsscheiben für Fahrzeugverglasungen auf -20°C , 23°C und 40°C mit jeweiliger Toleranz von $\pm 2^{\circ}\text{C}$ temperiert. Dasselbe gilt für die Pfeilfallversuche gemäß [DIN 52307] an Sicherheitsscheiben für Fahrzeugverglasungen.

Laut [ANSI Z97] müssen die Versuchskörper für den Pendelschlagversuch eine Temperatur zwischen 70°F ($21,1^{\circ}\text{C}$) und 85°F ($29,4^{\circ}\text{C}$) aufweisen.

Für die Zug- und Scherversuche laut [ETAG 002] müssen die Prüfkörper bei $-20\pm 2^{\circ}\text{C}$, $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ und $70\pm 3^{\circ}\text{C}$ bei Fassaden getestet werden. Für Glasdächer kann eine Prüftemperatur von bis zu $80\pm 3^{\circ}\text{C}$ erforderlich sein.

Bei den hier aufgeführten Versuchen kommen meist VSG-Systeme mit PVB zum Einsatz. Die Glasübergangstemperatur dieser Zwischenschicht variiert je nach Hersteller zwischen 10°C bis 23°C [14], [35] und liegt gegebenenfalls ober- oder unterhalb der Versuchstemperatur. Eine Vereinheitlichung des zu betrachtenden Temperaturspektrums für den jeweiligen Anwendungsfall – insbesondere in Hinblick auf zukünftige Zwischenschichten mit erhöhten Glasübergangstemperaturen – ist daher wünschenswert, um ein Über- bzw. Unterschätzen der Resttragfähigkeit zu vermeiden. Die Forderung, dass die Glasscheiben unter „Sommer-Bedingungen“ zu prüfen sind, die das Merkblatt [G1] der Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg für zustimmungspflichtige Überkopfverglasungen vorgibt, zielt in die richtige Richtung. Diese Forderung ist jedoch zu erweitern: Verglasungen müssen unter den tatsächlichen Temperaturbedingungen geprüft werden. Dies bedeutet, dass für VSG-Systeme im Außenbereich ein Temperaturspektrum von -25°C bis 75°C zu betrachten ist. Die Maximaltemperatur kann bei nicht eingefärbten VSG-Systemen auf Grund verminderter Wärmeabsorption abgemindert werden.

4.2 Einflussfaktoren auf die Resttragfähigkeit

Die Zeitdauer, die ein gebrochenes VSG-System unter einer definierten Belastung standsicher verbleibt, wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst und ist daher vorab schwer abzuschätzen (Abb. 4.5). Zu diesen Einflussfaktoren zählt das Bruchbild, das aus den verwendeten Glasscheiben (Floatglas, TVG, ESG) und der Schädigungsart resultiert, die Art der Lagerung des VSG-Systems, die Geometrie des Laminataufbaus, die Belastung auf das VSG-System, die Art der zähelastischen Zwischenschicht(en) (PVB-Folie, SentryGlas[®] Plus Interlayer, EVA,

Gießharz) und die Bauteiltemperatur. Bei einer ungünstigen Überlagerung dieser Faktoren besteht die Gefahr, dass ein Systemversagen eintritt.

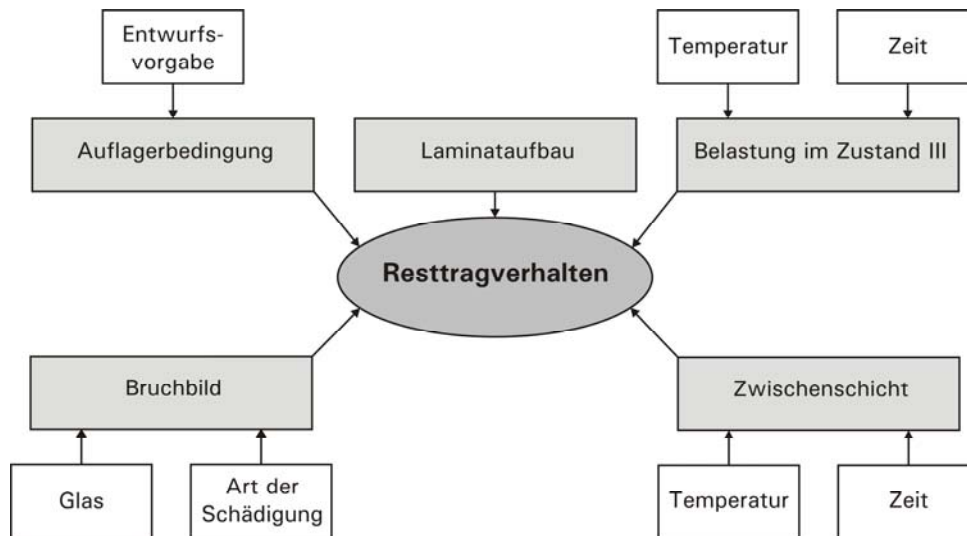


Abb. 4.5: Einflussfaktoren auf das Resttragverhalten

4.2.1 Versagensszenarien im Zustand III

Eine dehnweiche Zwischenschicht reduziert die Biegesteifigkeit und führt zu großen Systemverformungen und möglicherweise zum Abrutschen aus der Auflagerung und zum Systemkollaps. Kleinere Glasbruchstücke erhöhen dieses Risiko.

Eine weitere Versagensform ist die Delamination der Zwischenschicht-Matrix vom fraktionierten Glas oder von der Bewehrung auf Grund der Überschreitung der maximalen Verbundspannung.

Auch das intralaminare Versagen der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix kann zum Systemkollaps führen. So hat das Reißen der Bewehrung und/oder der Zwischenschicht das Systemversagen zur Folge.

Ist die maximale Druckspannung am Glasrand erreicht, schnüren Ausmuschelungen und Abplatzungen den Querschnitt ein, was wiederum zum Verlust der Biegesteifigkeit oder zum Reißen der Zwischenschicht bzw. Bewehrung und anschließendem Systemkollaps führen kann.

Auch durch Abscheren der Zwischenschicht an lokalen Lasteinleitungen oder punktuellen Lagerungen kann es zum Systemkollaps kommen. Scharfkantige Bruchstücke – insbesondere bei Floatglas und TVG – können bei größeren Verformungen und Rotationen die Zwischenschicht entlang der Bruchlinien an- bzw. zerschneiden.

4.2.2 Einfluss der Temperatur und der Dauer

Die Steifigkeit und die Festigkeit der Zwischenschicht verringern sich bei ansteigenden Temperaturen, insbesondere wenn diese über der Glasübergangstemperatur der Zwischenschicht liegen. Dies führt zu einer geringeren Resttragfähigkeit des VSG-Systems. Bei längerer Belastungsdauer machen sich zusätzlich die Kriechvorgänge im VSG-System bemerkbar. Alterungsprozesse der Zwischenschicht können dazu führen, dass auch bei niedrigen Temperaturen das Adhäsionsvermögen im Laminat abnimmt und Delamination auftreten kann.

Neben dem Einfluss der Zwischenschichttemperatur auf die Tragfähigkeit des VSG-Systems im Zustand I, II und III besteht auch ein Korrelationseffekt zwischen Temperatur und Wind- (Abb. 4.6) bzw. Schneelast. Dieser Effekt wurde in [75], [74] und [63] quantifiziert und liefert für die Zwischenschichttemperatur T_L und der täglichen maximalen Böenwindgeschwindigkeit v_{\max} [m/s] folgende Grenzfunktion für die Glasbemessung im Zustand I in Deutschland:

$$T_L = \frac{T_a + 23^\circ\text{C}}{2} + T_\Delta \quad \text{für geheizte Räume (Annahme: } T_i = 23^\circ\text{C)} \quad (4.1)$$

$$T_L = T_a + T_\Delta \quad \text{für unbeheizte Räume (Annahme: } T_i = T_a) \quad (4.2)$$

$$T_\Delta = 22,5 - 17,5 \tanh\left(\frac{v_{\max} - 19,5}{2,8}\right) \frac{T_a}{T_{a,\max}} \quad \text{für } T_L > 0^\circ\text{C} \quad (4.3)$$

$$T_\Delta = 0 \quad \text{für } T_L \leq 0^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

T_a [°C] tägliche maximale Lufttemperatur aus DWD-Wetterdaten

$T_{a,\max}$ [°C] maximale Lufttemperatur in 28 Jahren aus DWD-Wetterdaten

Die ermittelten Differenztemperaturen T_Δ von schwarz emaillierten VSG-Systemen bilden mit der zugehörigen täglichen Böenwindgeschwindigkeit die Punktemenge unterhalb der Grenzfunktion in Abb. 4.6. Die Grenzfunktion hüllt die Messwerte ein. Die Temperatur- und Windmessungen sind [78] entnommen. Die Messungen erfolgten an den horizontal und vertikal gelagerten VSG-Systemen in Kasten 5 und 9 (Abb. 4.1 bis Abb. 4.4).

Für Weiß- und Grünglas sind die maximalen Differenztemperaturen geringer als bei Schwarzemailglas. Während der Messdauer von einem Jahr betrug laut [75] die Differenztemperatur bei Weißglas weniger als 25°K und bei Grünglas weniger als 32°K.

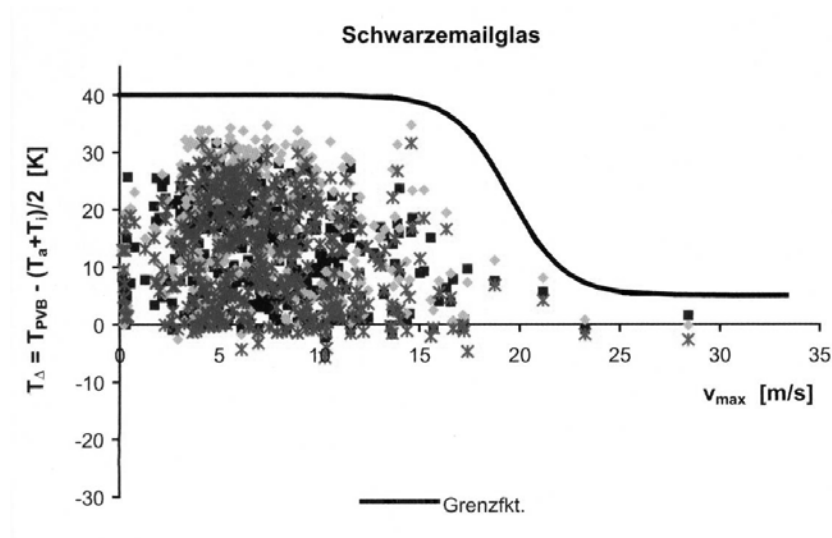


Abb. 4.6: Korrelation von Böenwindgeschwindigkeit v_{max} und Temperatur T_{Δ} [75]

Da eine einlamierte Bewehrung analog zur Emaillierung eine höhere Wärmeabsorption und somit eine höhere Zwischenschichttemperatur als reines Weiß- und Grün­glas bedingt, ist die Grenzfunktion (4.3) auf bewehrte VSG-Systeme übertragbar.

In [75] werden drei Windlastszenarien für die Bemessung von VSG im Zustand I vorgegeben (Tab. 4.1). Je Bemessungstemperatur sind die Windlastanteile additiv zu überlagern, wobei die Bemessungs­böenwindlast w_{max} gemäß Norm zu bestimmen ist.

Tab. 4.1: Windlast gemäß [75]

Lastszenario	T_L [°C]	Windlast (additiv)		
		4 Tage	10 min	3 s
1	20°C	0,25 w_{max}	0,25 w_{max}	0,5 w_{max}
2	50°C	0,125 w_{max}	0,125 w_{max}	0,25 w_{max}
3	80°C	0,08 w_{max}	0,08 w_{max}	0,16 w_{max}

Die repräsentativen Starkwindereignisse mit zugehörigen Zwischenschichttemperat­uren können auf die Anforderungen an die Resttragfähigkeit übertragen werden. Bei einer Bauteiltemperatur von 50°C ist demnach lediglich 50% des Windlastkollektivs anzusetzen.

Das gleichzeitige Eintreten der Schädigung des VSG-Systems, einer erhöhten Bauteiltemperatur und eines Starkwindereignisses ist unwahrscheinlich, somit liegt der Bemessungsansatz nach [75] auch für VSG-Systeme im Zustand II und III unter Windlast auf der sicheren Seite.

Auch die maximale Schneelast tritt nicht gleichzeitig mit der maximalen Zwischenschichttemperatur auf. Diese liegt bei Schneelast unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G der Zwischenschichten PVB und SGP. Eine mögliche Wasserlast durch Niederschläge trägt im Regelfall ebenfalls zur Kühlung der Verglasung bei. Diese Kühlung mindert die Zwischenschichttemperatur und wirkt sich somit günstig auf die Trag- und Resttragfähigkeit des VSG-Systems aus.

Nicht jede Einwirkung korreliert mit der Bauteiltemperatur. So besitzen betret- und begehbare Überkopfverglasungen auf Grund der Verkehrslast ein von der Zwischenschichttemperatur unabhängiges Belastungsszenario. Ebenso weisen VSG-Systeme bei subtropischem Klima stets hohe Zwischenschichttemperaturen unabhängig von anderen Einwirkungen auf.

Die Temperaturvorgaben für Versuche an VSG-Systemen sind in den Normen und Regelwerken sehr unterschiedlich. Da eine erhöhte Zwischenschichttemperatur jedoch Auswirkungen auf das Trag- und Resttragverhalten hat, wurde bei den in Kapitel 5 beschriebenen Versuchen an VSG-Systemen die Prüftemperatur und die Belastungsdauer variiert.

4.2.3 Einfluss der Glaserzeugnisse und der Schädigung

Die Glaserzeugnisse bestimmen das Bruchbild eines VSG-Systems im Zustand III entscheidend. TVG und Floatglas zerbrechen meist in großflächige Glasschollen. Liegen die Bruchlinien dabei übereinander, so resultieren die Verformungen des VSG-Systems hauptsächlich aus der Rotation an diesen wenigen diskreten Stellen und der damit verbundenen Starrkörperdrehung der intakten Glasschollen (Abb. 4.7). An diesen Rotationsstellen konzentriert sich auch die Zugbeanspruchung und somit die Dehnung der Zwischenschicht. Durch eine starke Rissöffnung ist auch die Querkraftabtragung über die Rissflächen stark vermindert. Diese Rissöffnung kann je nach Dehnsteifigkeit und Haftungsvermögen der Zwischenschicht zur Delamination, zum Zugversagen, zum Abscheren oder zur Ausmuschelung der Druckzone führen.

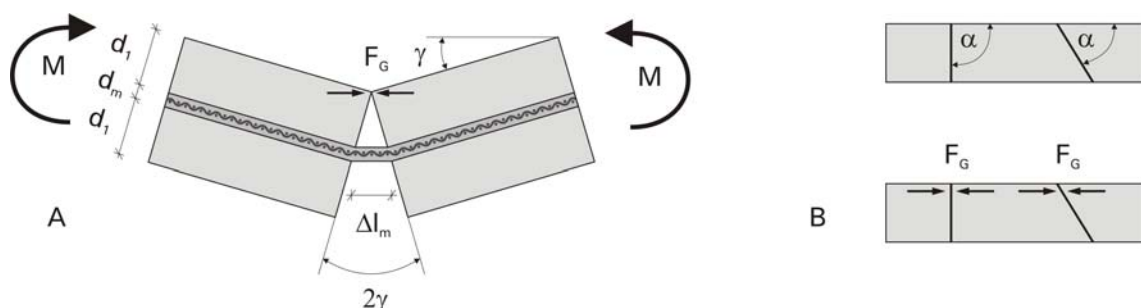


Abb. 4.7: A. Risskonzentration bei TVG und Floatglas B. Risswinkel zur Oberfläche

Die Druckkräfte F_G werden über den Kontakt der Glasbruchstücke in der Druckzone abgetragen. Dabei ist es auch von Bedeutung, unter welchem Winkel α die Rissfläche zur Glasoberfläche steht (Abb. 4.7B). Bei thermischen Sprüngen im Floatglas oder TVG und beim Bruch von ESG ist dieser nahezu rechtwinklig zur Glasoberfläche, da aus energetischen Gründen die freigesetzte potentielle Energie stets zum kürzesten Rissverlauf führt. Bei einem Bruch infolge einer äußeren Stoßeinwirkung kann dieser Winkel α insbesondere bei Floatglas stark variieren [72].

Ein rechtwinklig zur Glasoberfläche verlaufender Riss lässt eine bessere Kraftübertragung über die Rissfläche erwarten. Diese Vermutung wird im Vier-Punkt-Biegeversuch bei Raumtemperatur mit 100 mm breiten, vorgeschädigten, bewehrten VSG-Systemen in [67] bestätigt. Die Vorschädigung erfolgt einerseits durch Anritzen mit dem Glasschneider (Cutter) und anschließendem Brechen beider Glasscheiben und andererseits durch beidseitiges Anschlagen mit dem Körner in Feldmitte. Bei allen Versuchskörpern sind unlegierte Stahlgewebe (SG: 1.0586, $d = 25$ mm, $w = 56$ mm) im 1 mm dicken Gießharzverbund (Kömmerling: Ködilan PCR) eingebettet.

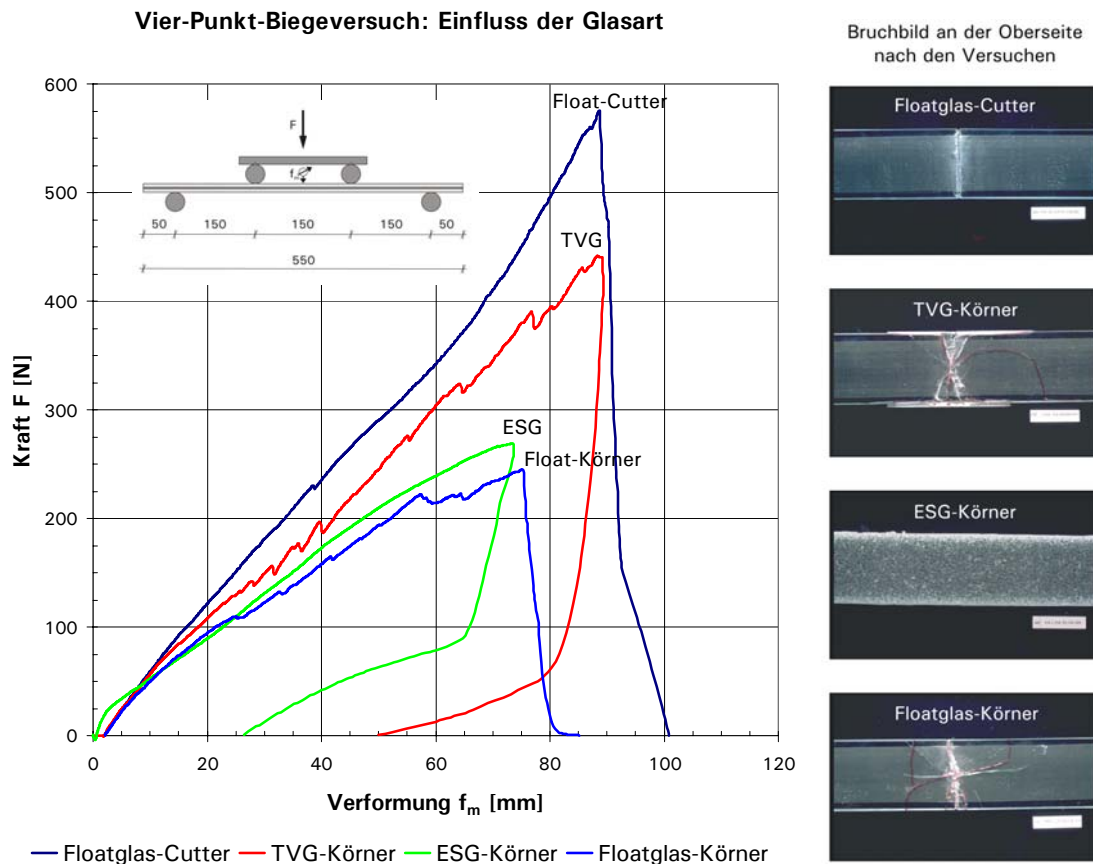


Abb. 4.8: Einfluss der Glasart und Schädigung auf die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen mit Stahlgewebe (SG) im Zustand III [67] [mm]

Ein ungünstiges Bruchbild bei einem bewehrten VSG-System mit Floatglas (2 x 6 mm) kann demzufolge zu einer geringeren Resttragkraft führen als bei demselben System mit ESG (Abb. 4.8). Unbewehrte Referenzproben – jedoch mit PVB als Zwischenschicht (1,52 mm) – liefern bei gleichen Vorschädigungen bedeutend geringere Resttraglasten. VSG-Systeme mit Floatglas oder TVG erreichen dabei Resttraglasten von ca. 70 N, unbewehrte Versuchskörper mit ESG besitzen keine Resttragfähigkeit. Die Vier-Punkt-Biegeversuche in [36] an unbewehrten VSG-Systemen mit PVB als Zwischenschicht zeigen den Einfluss der Glasart und bescheinigen Laminaten aus ESG ebenfalls keine Resttragfähigkeit.

Der Vergleich der Resttragfähigkeiten der unterschiedlichen Versuchskörper in [67] zeigt, dass bewehrte VSG-Systeme im Gießharzverbund mit ESG es ermöglichen, eine hohe Tragfähigkeit im Zustand I mit einer hohen Redundanz im Zustand III zu kombinieren. Es ist daher zu vermuten, dass sich dieses Erkenntnis auf VSG-Systeme mit steiferen Zwischenschichten übertragen lässt.

Die in [9] durchgeführten Versuche an unbewehrten VSG-Systemen aus TVG oder ESG zeigen den Einfluss der verwendeten Glasart bei SGP als Zwischenschicht. Bei diesen Bauteilversuchen an punktgelagerten Überkopfverglasungen besitzen nur VSG-Systeme aus TVG eine ausreichende Resttragfähigkeit bei einer Versuchstemperatur von 60°C. Dieses Verhalten ändert sich grundlegend bei 0°C. Das VSG-System aus TVG delaminiert und die scharfkantigen Bruchstücke schneiden die Zwischenschicht ein, was zum Reißen der Zwischenschicht und letztendlich zum Systemkollaps führt. Die unter diesen Temperaturbedingungen bedeutend steifere Zwischenschicht ermöglicht jedoch die Resttragfähigkeit bei der Verwendung von ESG ohne erkennbare Delaminationserscheinungen. Laut [9] untersucht der Hersteller DuPont derzeit die Verbesserung der Haftungseigenschaften der Zwischenschicht SGP mit Glas. Dabei werden sowohl Haftvermittler angewandt als auch die chemische Zusammensetzung von SGP variiert.

4.3 Methoden zur Steigerung der Resttragfähigkeit

Die äußeren Randbedingungen auf ein VSG-System im Zustand III lassen sich nur bedingt beeinflussen. So ist die Bauteiltemperatur eines VSG vom Einbauort und der Tages- und Jahreszeit abhängig. Sie bewirkt in Korrelation mit der Belastungsart und –dauer eine eventuelle Minderung der erforderlichen Resttraglast.

Das Bruchbild im Zustand III kann durch die Wahl der Glasart beeinflusst werden. Daher sehen die Technischen Regeln meist die Verwendung von

TVG und Floatglas im konstruktiven Glasbau vor, um ein feinkrümeliges Bruchbild wie bei ESG zu vermeiden. Jedoch kann eine Schädigung mit entsprechendem Energieeintrag sowohl bei TVG als auch bei Floatglas zu vielen kleinen Bruchstücken führen (Abb. 3.3 C).

Eine für die Redundanz des Systems sinnvoll gewählte Auflagerbedingung (z.B. allseitig linienförmig) ist oft nicht praktikabel. Daher können zusätzliche konstruktive Sicherungsmaßnahmen, z.B. durch Einspannungen am Glasaufleger, die Resttragfähigkeit steigern.

Je mehr Scheiben das Laminat bilden, umso geringer ist die Ausfallwahrscheinlichkeit aller Scheiben. Dieser Ansatz führt jedoch zu unwirtschaftlichen Lösungen und erhöhtem Eigengewicht. Ein asymmetrischer Laminataufbau mit der dickeren Glasscheibe in der Druckzone vergrößert den inneren Hebelarm d und steigert die Resttragfähigkeit im Zustand III.

Eine Zwischenschicht mit hoher Dehnsteifigkeit und Zugfestigkeit, gepaart mit guten Haftungseigenschaften für die relevanten Bauteiltemperaturen, birgt neben dem gewählten Laminataufbau das größte Verbesserungspotential zur Steigerung der Resttragfähigkeit. Daher werden im folgenden Versuchsprogramm Bewehrungselemente in die Zwischenschicht eingebettet, um die Vorteile beider Verbundpartner in einer Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix zu nutzen. Es gilt dabei, die Einflüsse von Temperatur und Zeit auf das Resttragverhalten dieser VSG-Systeme zu ergründen.

5 Versuche an Verbundsicherheitsglas

Im Folgenden wird die Resttragfähigkeit von bewehrten und unbewehrten VSG-Systemen aus ESG mit PVB oder SGP als Zwischenschicht unter kurzzeitiger und lang andauernder Belastung bei unterschiedlichen Versuchstemperaturen betrachtet. Die dieser Betrachtung zugrunde liegenden Versuche wurden am Zentrallabor (ZL) des Konstruktiven Ingenieurbaus an der Universität Stuttgart durchgeführt.

5.1 Versuchskörper

5.1.1 Glas

Die symmetrisch aufgebauten VSG-Systeme bestehen aus zwei 6 mm dicken ESG-Scheiben, die von der Firma Bischoff Glastechnik hergestellt wurden. Die eingebettete Bewehrung hat einen umlaufenden Randabstand von 10 mm, um die Einflüsse infolge veränderter Bruchstückform von ESG am Glasrand zu minimieren.

5.1.2 Zwischenschicht

In den Versuchen kommen folgende Zwischenschichten zum Einsatz:

- PVP-Folie TROSIFOL[®] MB, Foliendicken 0,76 mm und 1,52 mm, Reißfestigkeit $> 23 \text{ N/mm}^2$ und Reißdehnung $> 280\%$ [28]
- SentryGlas[®] Plus von DuPont, Plattendicken 1,52 mm und 2,28 mm, Reißfestigkeit $> 34,5 \text{ N/mm}^2$ und Reißdehnung $> 400\%$ [14]

5.1.3 Bewehrung

Für die Versuche wurden zwei Gewebe gewählt, die eine unterschiedliche Bruchdehnung aufweisen. Dies soll aufzeigen, ob die unterschiedliche Duktilität der Bewehrung Auswirkungen auf die Duktilität des bewehrten VSG-Systems im Zustand III hat. Eine Bewehrung aus Lochblech soll dessen erhöhte Biegesteifigkeit und die Verbundwirkung in der Zwischenschicht-Matrix im Vergleich zum Gewebe beleuchten.

Es kamen zwei Edstahlgewebe (EG) der Firma Haver & Boecker und ein Edstahllochblech (EL) der Firma MEVACO (Abb. 5.1) zum Einsatz:

- EGI – Edstahlgewebe I: Drahtdurchmesser: $d = 0,25 \text{ mm}$; Maschenweite: $w = 0,63 \text{ mm}$; ausgeprägte Kett-/Schussrichtung – (Mittelwert aus je 3 Zugversuchen laut Hersteller: Schussrichtung

$R_m = 1473 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_u = 4,7\%$; Kettrichtung $R_m = 1173 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_u = 15\%$)

- EGII – Edelstahlgewebe II: Drahtdurchmesser: $d = 0,20 \text{ mm}$; Maschenweite: $w = 0,32 \text{ mm}$; keine ausgeprägte Kett-/Schussrichtung – (Mittelwert aus je 3 Zugversuchen laut Hersteller: Schussrichtung $R_m = 897 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_u = 27 \%$; Kettrichtung $R_m = 830 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_u = 24,3\%$)
- ELI – Edelstahllochblech I: Lochung Rv 5-7; Blechdicke: $d = 0,50 \text{ mm}$

Die mechanischen Eigenschaften der Bewehrung wurden am ZL im einaxialen Zugversuch bestimmt. Die in Tab. 5.1 angegebenen Werte basieren auf je 3 Zugversuchen. Die gemessenen Werte wurden mittels einer t-Verteilung unter einer 95% Eintretungswahrscheinlichkeit ausgewertet:

Tab. 5.1: Geometrische und mechanische Bewehrungseigenschaften aus Versuchen am ZL (Anhang A5)

Typ	EGI	EGII	ELI
Edelstahl	1.4310	1.4310	1.4301
Offene Siebfläche [%]	51	37	46,3
Drahtdurchmesser bzw. Blechdicke d [mm]	0,25	0,2	0,5
Querschnitt A [cm ² /m]	0,65	0,76	1,43
Elastizitätsmodul E [N/mm ²]	118.098	79.577	57.851
Fließspannung $f_{yk} = R_{p0,2}$ [N/mm ²]	1.017	464	332
Bruchspannung $f_{uk} = R_m$ [N/mm ²]	1.367	842	587
Bruchdehnung ε_{uk} [%]	2,0	17,7	31,7

Das Edelstahlgewebe EGI wurde bereits in [66] am Otto-Graf Institut (FMPA) im einaxialen Zugversuch getestet und lieferte annähernd dieselben Ergebnisse wie am ZL. Die Mittelwerte der FMPA aus 5 Versuchen sind wie folgt: $E = 122.221 \text{ N/mm}^2$; $R_{p0,2} = 1.169 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 1.481 \text{ N/mm}^2$; $\varepsilon_u = 2\%$.

Auf Grund der unterschiedlichen Eigenschaften in Kett- und Schussrichtung wurde beim Zuschnitt der Bewehrungsstreifen auf die Orientierung der Edelstahlgewebe geachtet.

Vor der Herstellung der VSG-Versuchskörper wurde die Bewehrungs Oberfläche mit Aceton entfettet und mit Leitungswasser abgewaschen.



Abb. 5.1: VSG-Systeme mit EGII, EGI und ELI

Die drei gewählten Bewehrungsarten sind nach der Herstellung in die Zwischenschicht vollflächig eingebettet. Die metallische Oberfläche, die im Haftverbund mit der Zwischenschicht steht, ist stets größer gewählt als die Oberfläche, die die Zwischenschicht mit dem fraktionierten Glas in der Druckzone in Zustand III eingeht. Ist die Verbundwirkung der Zwischenschicht mit Metall gleich der mit Glas, so tritt bei einem interlaminaren Versagen eine Delamination in der Verbundfuge von Glas und Zwischenschicht auf. Laut [53], [55], und [56] bildet SGP einen sehr guten Haftverbund mit Metallen aus. Auch PVB weist gute Haftungseigenschaften mit Metallen auf [20].

5.1.4 Aufbau und Geometrie

Die Versuchskörper haben eine Länge von 500 mm und eine Breite von 100 mm. Sie besitzen folgenden Aufbau (Tab. 5.2, Abb. 5.2):

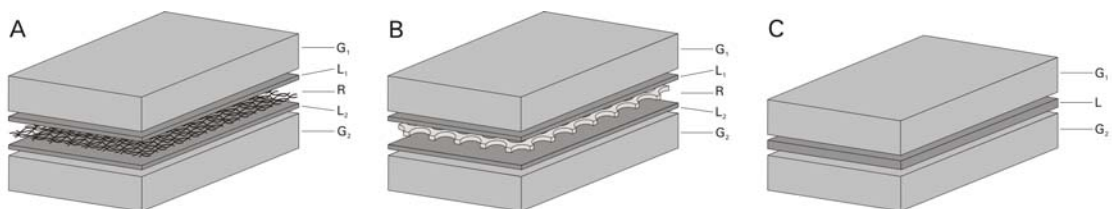


Abb. 5.2: VSG-Systeme: A mit Gewebe; B mit Lochblech; C unbewehrt

Tab. 5.2: Aufbau und Anzahl der verwendeten Versuchskörper

Typ	Aufbau					Anzahl
	G ₁	L ₁	R	L ₂	G ₂	
						$\Sigma = 103$
SGP	6 mm ESG	1,52 mm SGP	-	-	6 mm ESG	16
SGPII	6 mm ESG	2,28 mm SGP	-	-	6 mm ESG	5
SGP-EGI	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGI	1,52 mm SGP	6 mm ESG	12
SGP-EGII	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGII	1,52 mm SGP	6 mm ESG	13
SGP-ELI	6 mm ESG	1,52 mm SGP	ELI	1,52 mm SGP	6 mm ESG	3
PVB	6 mm ESG	1,52 mm PVB	-	-	6 mm ESG	4
PVB-EGI	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGI	0,76 mm PVB	6 mm ESG	17
PVB-EGII	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGII	0,76 mm PVB	6 mm ESG	19
PVB-ELI	6 mm ESG	1,52 mm PVB	ELI	1,52 mm PVB	6 mm ESG	14

5.1.5 Herstellung

Die Versuchskörper wurden auf Grund der hygroskopischen Eigenschaften der Zwischenschichten im klimatisierten Verlegeraum der Firma Bischoff Glastechnik vorbereitet.

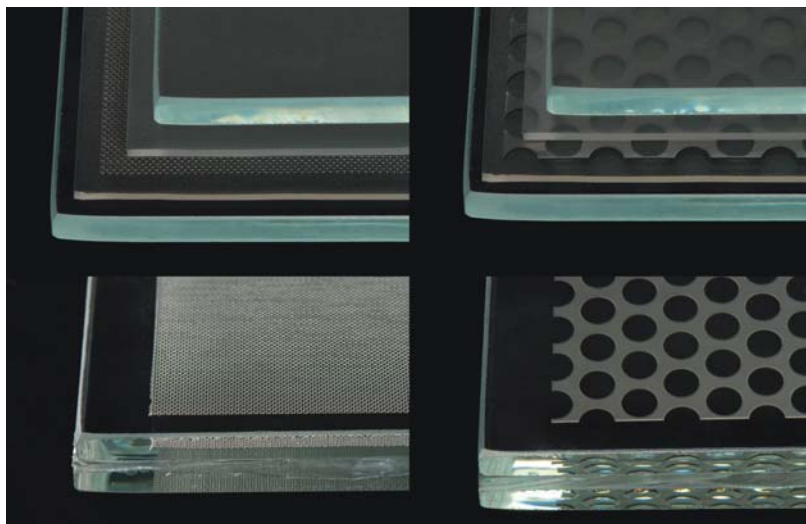


Abb. 5.3: Von oben nach unten: Schichtenaufbau der VSG-Systeme vor und nach dem Laminieren; links mit Edelstahlgewebe EGII; rechts mit Lochblech ELI

Zuerst wurden die Scheiben mit Wasser gereinigt und anschließend mit Tüchern getrocknet und abgeblasen, um Rückstände auf der Glasoberfläche zu vermeiden. Die Zinn- und Luftseite der Scheiben wurde mittels einer UV-Lampe überprüft, um die Orientierung der Gläser und somit die Qualität der

Haftung sicherzustellen (Kapitel 2.2.2). Die Einzelkomponenten des Glasverbunds wurden aufeinander geschichtet und fixiert (Abb. 5.3). Anschließend wurde mittels Walzverfahren der Vorverbund hergestellt, bevor die Versuchskörper im Autoklaven den endgültigen Verbund erlangten (Abb. 5.4).

Wegen der kleinen Dimensionen der Versuchskörper wurde auf das aufwändigere Vakuumsackverfahren für die Herstellung des Vorverbunds verzichtet. Dies führte bei einigen Versuchskörpern zu kleinen Blasen im Laminataufbau. Insbesondere Versuchskörper mit 2 x 0,76 mm PVB-Folien und ELI neigten zu starker Blasenbildung. Deshalb wurde dieses relativ dicke Bewehrungselement ELI in eine Zwischenschicht aus 2 x 1,52 mm PVB-Folien eingebettet. Versuchskörper mit Blasen wurden in den anschließenden Versuchen nicht verwendet.

Obwohl die Versuchskörper nach dem Vorverbundverfahren mit Klammern fixiert waren, haben sich einige Bewehrungselemente – insbesondere bei SGP-Zwischenschichten – während des Autoklavenprozesses verschoben. SGP ist während des Autoklavenprozesses fließfähiger als PVB. Dies wurde auch in [53] beim Einbetten von kleinen Inserts aus Metall in ein VSG-System festgestellt. Die Fließfähigkeit kann von Vorteil sein, um eine vollflächige Haftung zu erzielen und um Blasen im VSG-System zu vermeiden. Sie kann jedoch unter Umständen auch dazu führen, dass sich die Bewehrung während des Laminierens verschiebt. Versuchskörper mit verschobenen Bewehrungselementen wurden bei den nachstehend beschriebenen Versuchen nicht untersucht.



Abb. 5.4: Herstellung: A Vorverbund; B Fixierung nach Walzverfahren; C Autoklav

Die Glasoberflächen sind gemäß den Herstellerangaben zu orientieren. Bei VSG-Systemen mit SGP soll stets die dem Zinnbad zugewandte Oberfläche des ESG den Verbund eingehen: A-T-SGP-T-A. Bei der Verwendung von PVB sind jedoch nach [28] die zu laminierenden vorgespannten Scheiben gleichsinnig zu orientieren. Dies führt zu folgendem Aufbau: A-T-PVB-A-T.

Durch den Vorspannprozess ist mit Planitätsabweichungen bei ESG-Scheiben zu rechnen. Die Auswirkungen auf die Qualität der Haftung

werden bei den relativ kleinen Dimensionen der Versuchskörper als vernachlässigbar angesehen.

5.2 Versuchsprogramm

Die Versuche an Probekörpern mit unterschiedlichen Zwischenschichten und Bewehrungsarten geben Aufschluss über die Trag- und Resttragfähigkeit von bewehrten VSG-Systemen. Der Einfluss von diversen Temperaturniveaus und von der Belastungsdauer wurde untersucht. In Vier-Punkt-Biegeversuchen wurden sowohl die Tragfähigkeit von ungeschädigten als auch von vorgeschädigten VSG-Systemen unter kurzzeitiger Belastung betrachtet. Mit Hilfe von Vier-Punkt-Biegekriechversuchen konnten Erkenntnisse über das Langzeitverhalten unter Dauerlast gewonnen werden.

5.3 Vier-Punkt-Biegeversuche ohne Vorschädigung

Die Vier-Punkt-Biegeversuche an ungeschädigten VSG-Versuchskörpern wurden bei konstanter Traversengeschwindigkeit von 0,2 mm/s und Versuchstemperaturen von 23°C und 70°C an einer Materialprüfmaschine Zwick 1474 durchgeführt (Tab. 5.3, Abb. 5.5). Nach Möglichkeit wurden die Versuche beginnend mit Zustand I bis zum Erreichen des Zustandes III gefahren. Da sich die Biegesteifigkeit der VSG-Systeme jedoch beim Übergang in den Zustand III schlagartig verringert und die Prüfmaschine daraufhin zum Teil abbrach, benötigten einige Versuche einen Neustart im Zustand III.

Tab. 5.3: Versuchskörper zur Ermittlung der Tragfähigkeit

Typ	Aufbau					Anzahl
	G ₁	L ₁	R	L ₂	G ₂	
						Σ = 18
SGP	6 mm ESG	1,52 mm SGP	-	-	6 mm ESG	2
SGPII	6 mm ESG	2,28 mm SGPI	-	-	6 mm ESG	2
SGP-EGII	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGII	1,52 mm SGP	6 mm ESG	2
PVB	6 mm ESG	1,52 mm PVB	-	-	6 mm ESG	2
PVB-EGI	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGI	0,76 mm PVB	6 mm ESG	4
PVB-EGII	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGII	0,76 mm PVB	6 mm ESG	4
PVB-ELI	6 mm ESG	1,52 mm PVB	ELI	1,52 mm PVB	6 mm ESG	2

Die auf Rollen gelagerten Versuchskörper mit einer Spannweite von 400 mm wurden durch einen Lastwagen belastet. Die Mittendurchbiegung wurde mittels Ohmscher Wegaufnehmer ermittelt (Anhang A2).

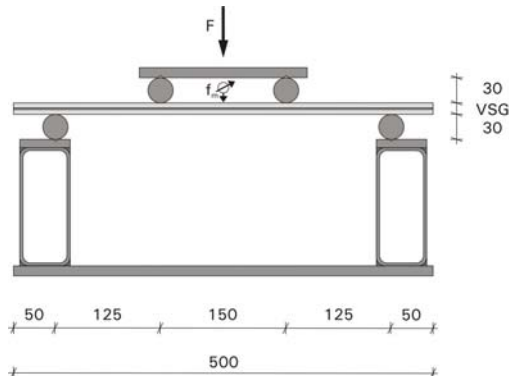


Abb. 5.5: Vier-Punkt-Biegeversuchsaufbau [mm]

5.3.1 VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht

Im ungebrochenen Zustand I bei 23°C weisen VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht sehr hohe Biegesteifigkeiten auf. Das nahezu monolithische Verhalten führt bei Laststeigerung erwartungsgemäß zum Bruch der in der Zugzone liegenden unteren ESG-Scheibe. Dies kennzeichnet den Übergang vom Zustand I in den Zustand II bei einer Biegebeanspruchung. Die Bruchstücke sind infolge der hohen Traglast und somit gespeicherten Energie sehr klein. Im Zustand II weist dieses VSG-System die Biegesteifigkeit einer intakten 6 mm Einzelscheibe auf. Dies belegt eine FE-Vergleichsberechnung (SOFiSTiK) mit einer 6 mm Einzelscheibe. Die gebrochene Scheibe in der Zugzone wirkt analog zu [65] bei der Lastabtragung nicht mit. Im Zustand II ist kein Einfluss der Zwischenschichtdicke erkennbar, da sowohl die Graphen des VSG-Systems mit 2,28 mm als auch mit 1,52 mm Dicke im Zustand II die gleiche Biegesteifigkeit aufweisen (Abb. 5.6). Im Zustand III besitzen die unbewehrten VSG-Systeme mit SGP bei 23°C eine Resttragfähigkeit. Mit 2,28 mm SGP-Zwischenschichtdicke wird eine höhere Resttragfähigkeit erzielt als mit 1,52 mm.

Die Versuche im Rahmen des AIF-Forschungsvorhabens „Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundglas mit der Zwischenlage SentryGlas® Plus“ [9] zeigen auch, dass bei der Verwendung von SGP ein nahezu monolithisches Tragverhalten im Zustand I bei 23°C vorliegt. Demnach besitzen VSG-Systeme mit SGP als Zwischenschicht ein nahezu monolithisches Tragverhalten bei Bauteiltemperaturen von bis zu 40°C.

SGP: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

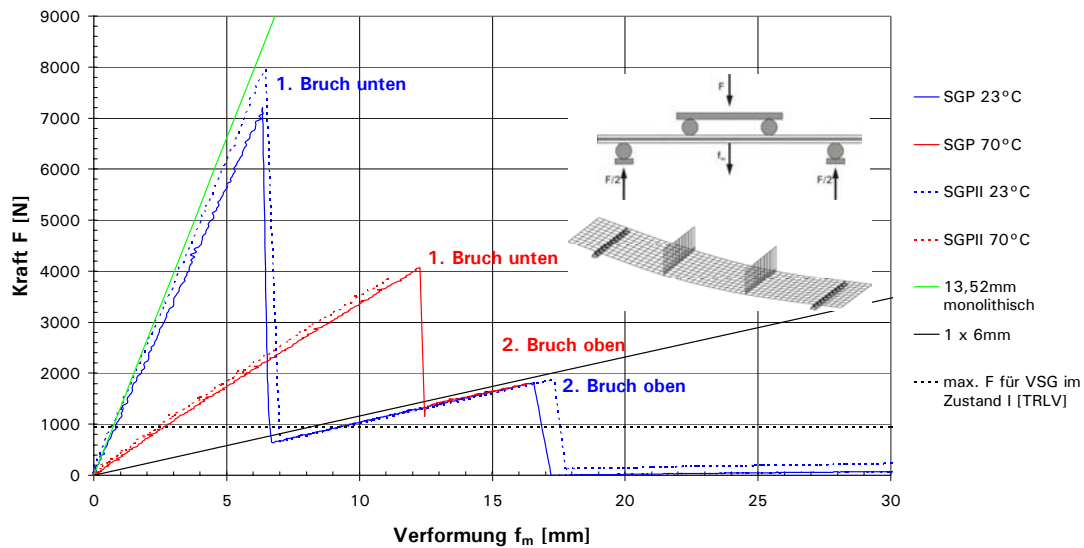


Abb. 5.6: Vier-Punkt-Biegeversuch: Versuchskörpertyp SPG und SPGII

SGP-EGII: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

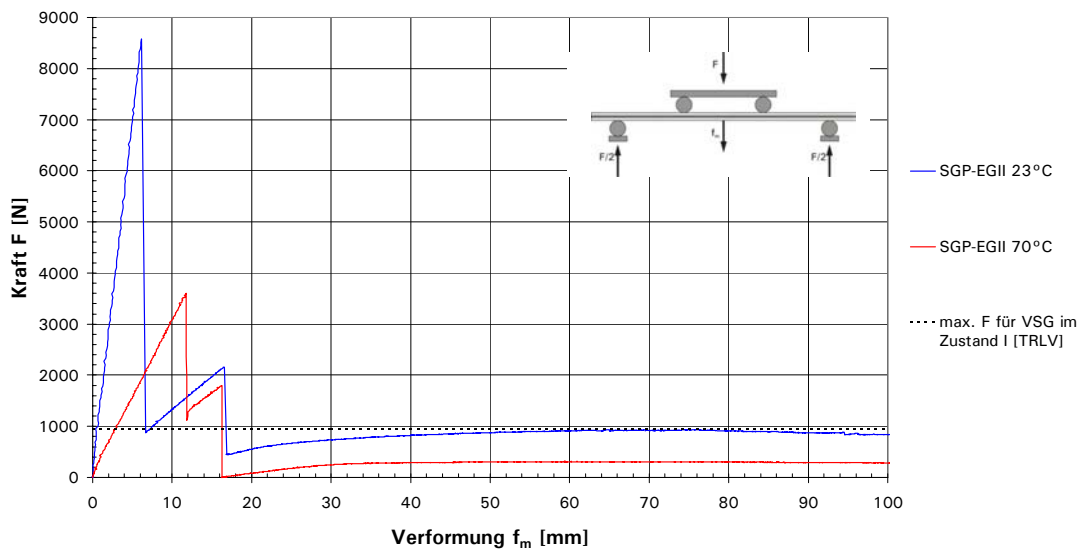


Abb. 5.7: Vier-Punkt-Biegeversuch: Versuchskörpertyp SPG und SPG-EGII

Bei einer Versuchstemperatur von 70°C besitzt ein VSG-System im Zustand I eine bedeutend geringere Biegesteifigkeit als bei 23°C. Erreicht das VSG-System die maximale Traglast, so bricht die Scheibe in der Zugzone. Die obere intakte 6 mm ESG-Scheibe übernimmt den Lastabtrag im Zustand II. Der anschließende Bruch der oberen Scheibe geht mit dem Verlust der Resttragfähigkeit unabhängig von den Zwischenschichtdicken einher. Die Dehnsteifigkeit der SGP-Zwischenschicht oberhalb der Glasübergangstemperatur T_G ist zu gering, um die erforderliche Restbiegesteifigkeit

im System zu gewährleisten. Eine Verbesserung kann bei einer Bauteiltemperatur von 70°C nur durch eine eingebettete Bewehrung in der Zwischenschicht erzielt werden (Abb. 5.7). Hierfür wurde in dieser Versuchsreihe das Edeltahlgewebe EGII eingelegt. Bei 23°C erzielt dieses VSG-System im Zustand III eine Resttraglast von 938 N. Diese Last entspricht annähernd der maximalen Bemessungslast eines VSG-Systems aus $2 \times 6 \text{ mm}$ ESG im Zustand I gemäß [TRLV].

5.3.2 VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht

Die Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht verhalten sich im Zustand I beim Vier-Punkt-Biegeversuch wesentlich biegeweicher als Versuchskörper mit SGP (Abb. 5.10).

PVB: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

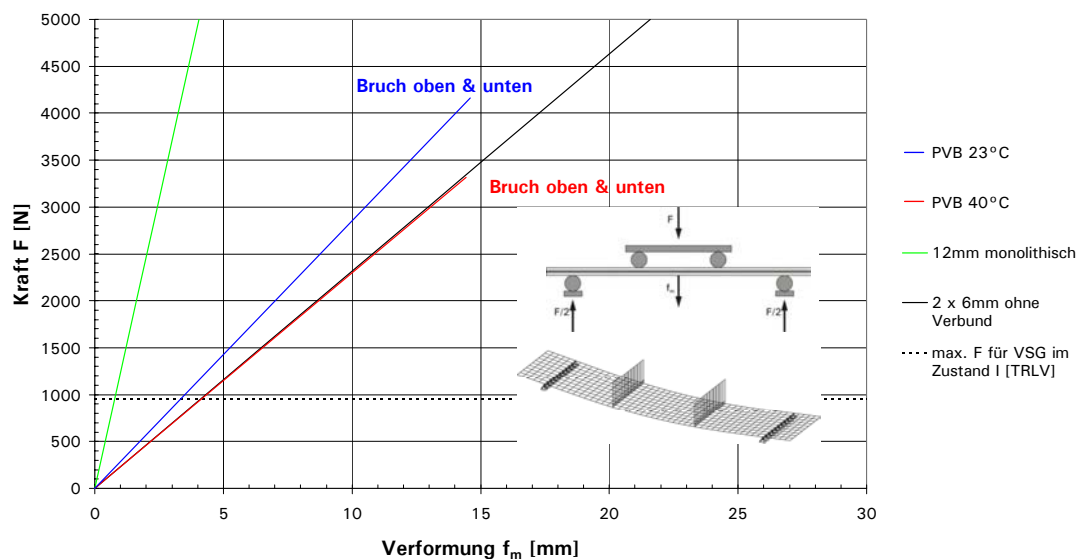


Abb. 5.8: Vier-Punkt-Biegeversuch: Versuchskörpertyp PVB

Bei 70°C haben VSG-Systeme mit PVB nahezu den Grenzzustand von lose aufeinander geschichteten Glasscheiben ohne wirksamen Verbund erreicht. Beim Überschreiten der maximalen Traglast versagen daher meistens beide Scheiben gleichzeitig. Der Übergang von Zustand I zu Zustand III erfolgt nahtlos ohne das Durchlaufen des Zustands II. Weder bei 23°C noch bei 70°C besitzen unbewehrte VSG-Systeme mit PVB als Zwischenschicht eine Resttragfähigkeit.

Dagegen besitzen VSG-Systeme mit eingebetteter Bewehrung in der PVB-Zwischenschicht im Zustand III eine Resttragfähigkeit, die sich bei erhöhter Versuchstemperatur erwartungsgemäß verringert (Abb. 5.9).

PVB-EGII: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

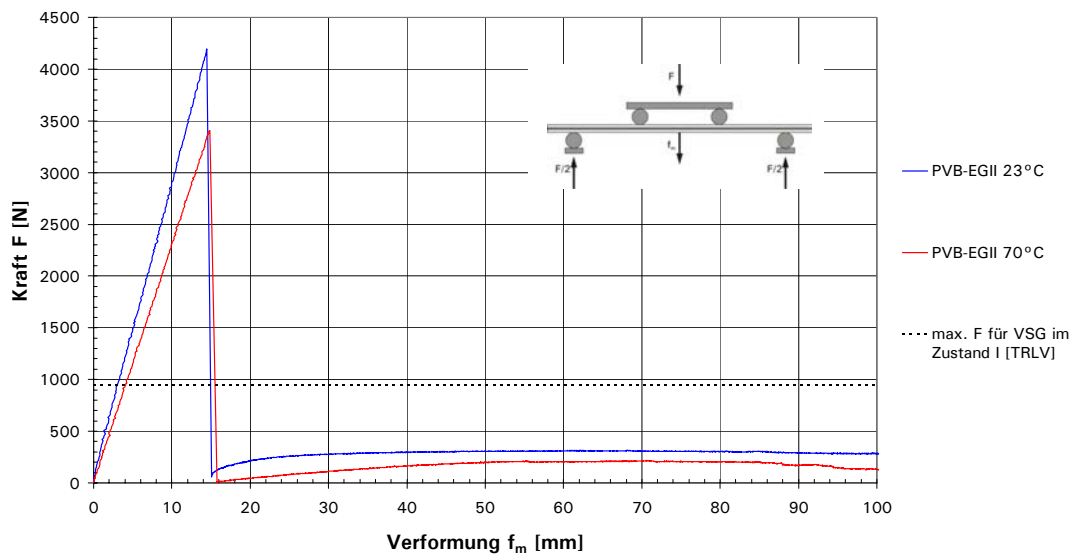


Abb. 5.9: Vier-Punkt-Biegeversuch: Versuchskörpertyp PVB-EGII

Im ungebrochenen Zustand I liegt die Bewehrung bei symmetrisch aufgebauten VSG-Systemen in der Nulllinie des Laminatquerschnitts und hat daher nur geringen Einfluss auf die Systemsteifigkeit. Lediglich die Versuchskörper mit eingebettetem ELI in der 2 x 1,52 mm dicken PVB-Zwischenschicht weisen im Vergleich zu den Versuchskörpertypen PVB-EGI und PVB-EGII mit jeweils 2 x 0,76 mm PVB-Folien eine etwas abgeminderte Biegesteifigkeit auf. Eine dickere PVB-Zwischenschicht mindert die Biegesteifigkeit des VSG-Systems im Zustand I (Anhang A2).

5.3.3 Steifigkeit im Zustand I

Die im Versuch ermittelten Mittendurchbiegungen f_m im Zustand I der unbewehrten Systeme (Tab. 5.4) werden mit den Ergebnissen von FE-Berechnungen mit variiertem Schub- und Elastizitätsmodul verglichen (Tab. 5.5).

Tab. 5.4: Versuch: Verformung f_m infolge $F = 3000$ N bei Probekörpertyp SGP und PVB

f_m [mm] bei $F = 3000$ N	23°C	70°C
SGP [d = 1,52 mm]	2,64	8,93
PVB [d = 1,52 mm]	10,55	13,07

Das VSG-System wird mittels ANSYS Scheibenelementen Shell63 modelliert. Es wird ein linear-elastisches Materialgesetz für die kurzzeitige Belastung im Zustand I angenommen. Die Berechnungen erfolgen aus Symmetriegründen am halben System. Sie zeigen die Mittendurchbiegung f_m

in Abhängigkeit von dem Elastizitätsmodul E_L der Zwischenschicht bei einer Belastung von $F = 3000$ kN auf. Es wird bei einer kurzzeitigen Belastung eine Querdehnzahl von $\nu = 0,5$ für die Zwischenschicht angenommen.

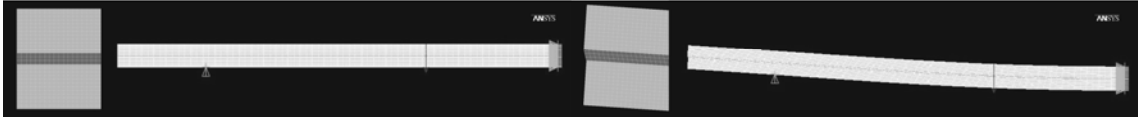


Abb. 5.10: FE-Modell des halben Systems mit Randverformung: A unbelastet; B belastet

Tab. 5.5: FE-Berechnung: Verformung f_m infolge $F = 3000$ N bei Variation des E-Moduls der Zwischenschicht

E_L [N/mm ²]	500	350	250	25	5	2	0,25	0,1
f_m [mm] bei $F = 3000$ N	2,46	2,54	2,64	4,78	8,55	10,64	12,84	13,45

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Rechenergebnissen zeigt, dass die in [3] und [37] angegebenen zeit- und temperaturabhängigen Schubmodule weitgehend zutreffend sind. Diese Berechnungen mit ANSYS sowie die Grenzwertbetrachtungen für vollen Verbund und ohne Verbund mit SOFiSTiK zeigen: Der verwendete Vier-Punkt-Biegeversuchsaufbau erweist sich als tauglich für die Bestimmung der Tragfähigkeit.

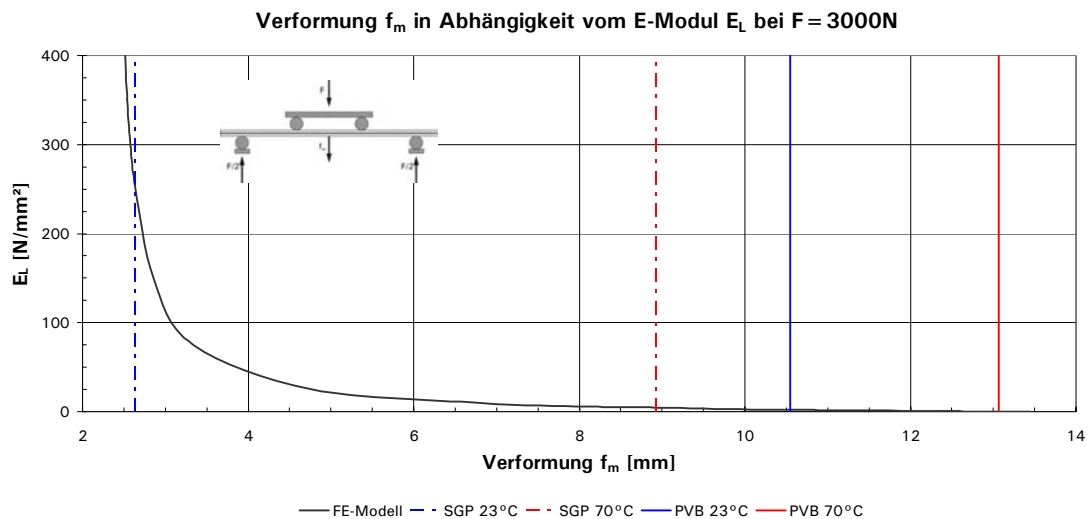


Abb. 5.11: Einfluss des E-Moduls der Zwischenschicht auf die Verformung f_m infolge einer Belastung $F = 3000$ N

5.3.4 Vergleich der Versuchsergebnisse

Die im Versuch erzielte maximale Tragkraft im Zustand I (Tab. 5.6) ist ein Vielfaches der Resttragkraft im Zustand III. Diese hohe ermittelte Tragfähigkeit muss jedoch vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass es sich bei

den verwendeten Versuchskörpern um ungealterte VSG-Systeme von begrenzter Größe handelt. Die Wahrscheinlichkeit, dass größere Oberflächendefekte in der Zugzone liegen, ist als gering einzustufen. Somit können verhältnismäßig hohe Traglasten im Versuch erzielt werden. Der Vergleich der ermittelten Resttraglast eines VSG-Systems mit der maximalen Bemessungslast im Zustand I gibt daher mehr Aufschluss über die Wirksamkeit der Zwischenschicht und der darin eventuell eingebetteten Bewehrung. Auch die Regelwerke weisen die Resttragfähigkeit im Versuch nur unter einem Bruchteil der Bemessungslast nach (Kapitel 4.1). In der Praxis tritt in den seltensten Fällen ein Bruch infolge Überschreitung der Bemessungslast auf. Die Ursachen für Glasschäden an ESG-Verglasungen sind meist Vandalismus oder Spontanbruch (z.B. infolge von Eisenoxideinschlüssen oder Temperaturspannungen). Es gilt daher im Weiteren zu prüfen, welche Resttragfähigkeit ein vorgeschädigtes VSG-System aufweist.

Tab. 5.6: Zusammenfassung der Ergebnisse

Typ	Traglast im Zustand I $F_{k,zI}$ [N]	Traglast im Zustand II $F_{k,zII}$ [N]	Resttraglast im Zustand III $F_{k,zIII}$ [N]	Versuchstemp- peratur		Resttrag- fähigkeit	
				23°C	70°C	Ja	Nein
SGP	7190	1819	181	x		x	
	4069	1783	-		x		x
SGPII	7947	1880	376	x		x	
	3859	-	-		x		x
SGP-EGII	8585	2160	938	x		x	
	3598	1798	310		x	x	
PVB	4160	--	-	x			x
	3314	--	-		x		x
PVB-EGI	4136	-	667	x		x	
	3489	1792	248		x	x	
PVB-EGII	4193	-	317	x		x	
	3453	-	231		x	x	
PVB-ELI	3225	1579	356	x		x	
	3051	1804	164		x	x	

5.4 Vier-Punkt-Biegeversuche mit Vorschädigung

Durch Anschlag mittels Körner am Glasrand wurde – zuerst an der Unter- und dann an der Oberseite – das VSG-System planmäßig vorgeschädigt. Die anschließenden Versuche wurden bei einer Versuchstemperatur von 23°C, 40°C und 70°C und konstanter Traversengeschwindigkeit von 0,2 mm/s gefahren. Die Versuchskörper (Tab. 5.7) wurden dazu vorab im Klimaschrank 2 h auf die Versuchstemperatur erwärmt. Der Versuch selbst wurde in einer umschließenden, gedämmten Holzkiste gefahren, wobei ein integriertes Fenster die Beobachtung während des Versuchs ermöglichte. Mittels Temperaturfühler wurde die definierte Versuchstemperatur der Zwischenschicht im Klimaschrank und während des Versuchs auf $\pm 2^\circ\text{K}$ sichergestellt. Um die Ergebnisse der Versuche statistisch auswerten zu können, wurden je Versuchskörpertyp und je Versuchstemperatur drei Versuche gefahren. Daneben wurden an einigen Versuchskörpertypen Zusatzbetrachtungen durchgeführt. Da unbewehrte VSG-Systeme mit PVB-Folie keine Resttragfähigkeit im Zustand III aufweisen, wurden für die Versuche an vorgeschädigten VSG-Systemen keine unbewehrten Versuchskörper mit PVB-Folie verwendet.

Tab. 5.7: Versuchskörper zur Ermittlung der Resttragfähigkeit

Typ	Querschnittsaufbau					Anzahl $\Sigma = 66$
	G ₁	L ₁	R	L ₂	G ₂	
SGP	6 mm ESG	1,52 mm SGP	-	-	6 mm ESG	12
SGPII	6 mm ESG	2,28 mm SGP	-	-	6 mm ESG	3
SGP-EGI	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGI	1,52 mm SGP	6 mm ESG	10
SGP-EGII	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGII	1,52 mm SGP	6 mm ESG	9
SGP-ELI	6 mm ESG	1,52 mm SGP	ELI	1,52 mm SGP	6 mm ESG	3
PVB-EGI	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGI	0,76 mm PVB	6 mm ESG	11
PVB-EGII	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGII	0,76 mm PVB	6 mm ESG	10
PVB-ELI	6 mm ESG	1,52 mm PVB	ELI	1,52 mm PVB	6 mm ESG	9

Der Versuchsaufbau des Vier-Punkt-Biegeversuchs an vorgeschädigten VSG-Versuchskörpern erfolgte analog zu dem an ungeschädigten (Abb. 5.12).

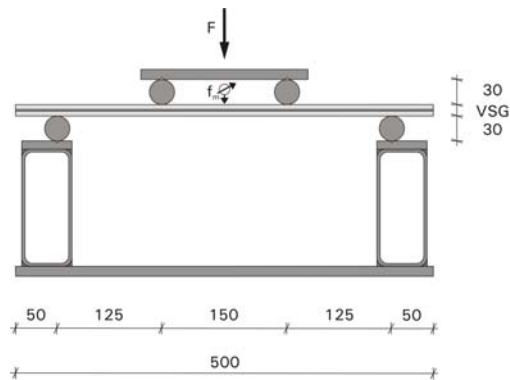


Abb. 5.12: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Resttragfähigkeit [mm]

5.4.1 VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht

In den Testreihen weisen die unbewehrten Versuchskörper mit SGP unterhalb der Glasübergangstemperatur T_G der Zwischenschicht eine Resttragfähigkeit auf. Der Einfluss der größeren Zwischenschichtdicken bei VSG-Systemen mit SGPII und der damit einhergehenden erhöhten Biegesteifigkeit ist lediglich bei 23°C Versuchstemperatur zu erkennen (Abb. 5.13). Bei 40°C verschwindet dieser Einfluss und bei 70°C ist kein Resttragverhalten vorhanden (Abb. 5.15, Abb. 5.16).

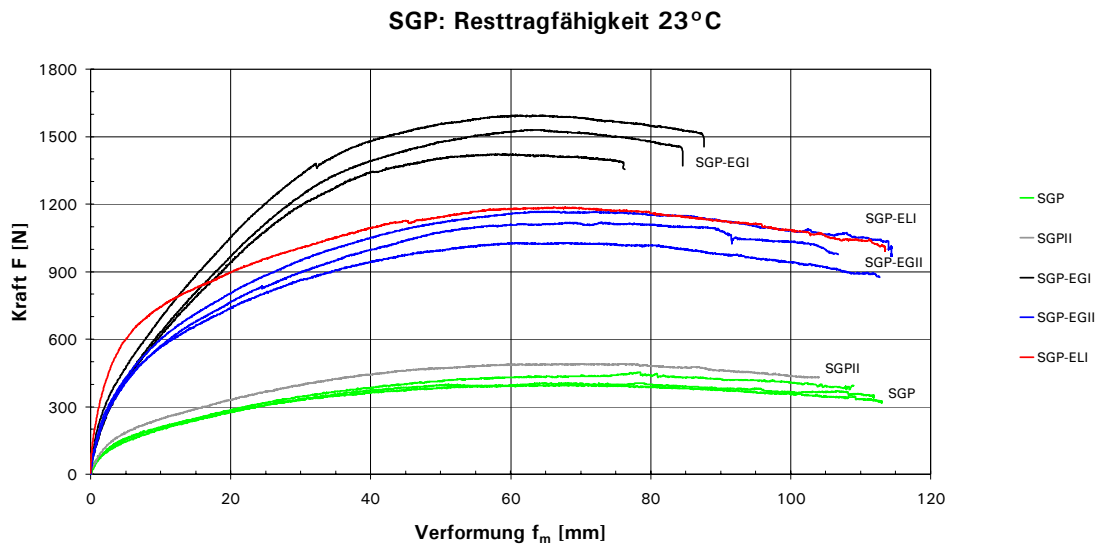


Abb. 5.13: Vier-Punkt-Biegeversuch: VSG-Systeme mit SGP bei 23°C

VSG-Systeme mit EGI zeigen in allen drei Temperaturbereichen sehr hohe Resttraglasten. Diese hohen Resttraglasten gehen jedoch mit einer geringeren Duktilität einher. Unter allen drei betrachteten Temperaturniveaus kam es zum Gewebebruch. Bei 23°C Versuchstemperatur versagte zudem die Zwischenschicht spröde (Abb. 5.14). Dies wird auf die geringe Bruchdehnung in Schussrichtung des Gewebes und die höhere Sprödigkeit

der Zwischenschicht bei niederen Temperaturen zurückgeführt. Der Bruch in der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix trat stets zwischen oder unter den beiden Lastschneiden – also im Bereich des maximalen Moments – auf.

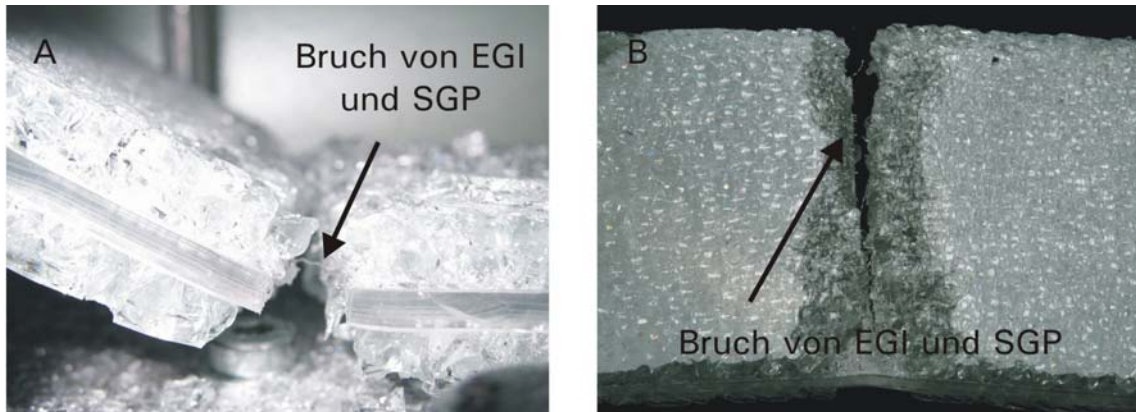


Abb. 5.14: Bruch von EGI und SGP bei 23°C Versuchstemperatur

Die Versuchskörper mit EGII weisen ebenfalls eine hohe Resttraglast bei gleichzeitig hoher Duktilität auf. Das Versuchsende wurde durch das Abrutschen von den Auflagern oder das Erreichen der maximalen Wegaufzeichnung der Ohmschen Wegaufnehmer erreicht, ein Gewebebruch oder Reißen der Zwischenschicht trat nicht ein.

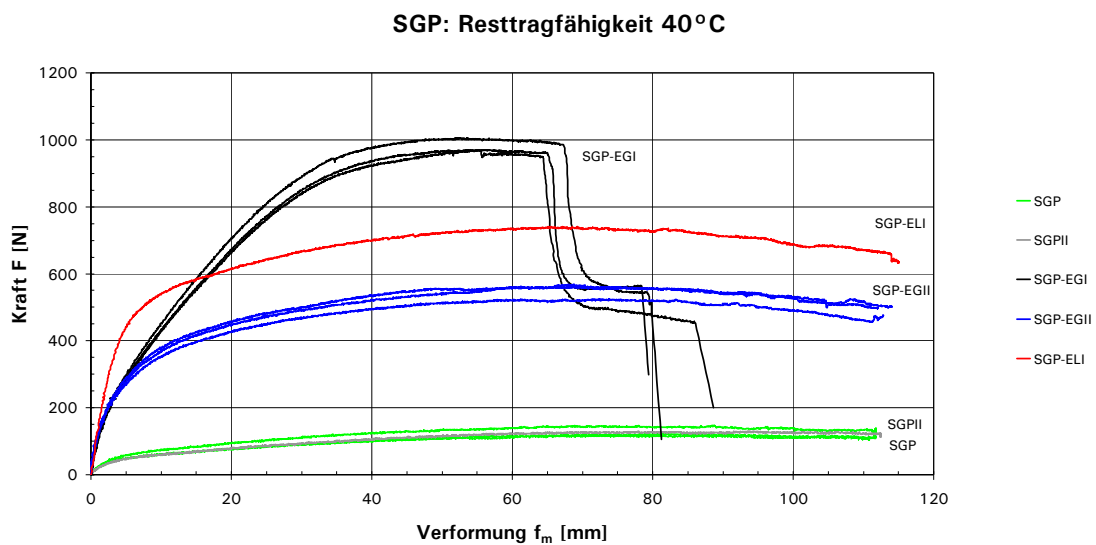


Abb. 5.15: Vier-Punkt-Biegeversuch: VSG-Systeme mit SGP bei 40°C

Bei den definierten Versuchstemperaturen wurde auch jeweils ein Versuchskörpertyp SGP-ELI untersucht. Erwartungsgemäß liefern die mit biegesteifem Lochblech bewehrten VSG-Systeme eine erhöhte Anfangsbiegesteifigkeit im Vergleich zu den VSG-Systemen mit biegeweichen Geweben. Die erzielten maximalen Resttraglasten mit eingebettetem ELI liegen jedoch unterhalb der Ergebnisse, die mit EGI erreicht werden. Der Versuchsverlauf

zeigt in allen Temperaturbereichen ein duktiles Resttragverhalten für SGP-ELI auf.

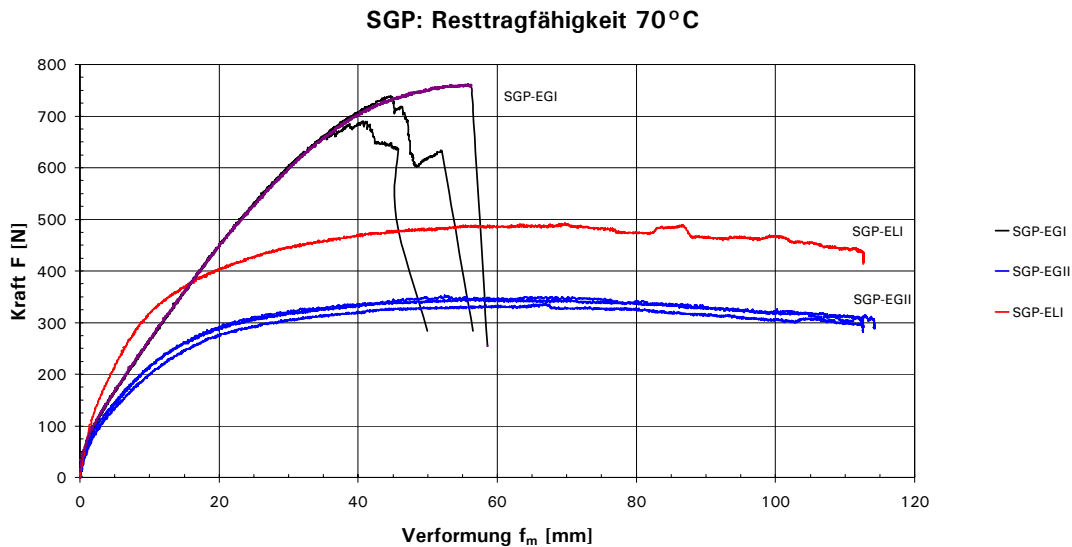


Abb. 5.16: Vier-Punkt-Biegeversuch: VSG-Systeme mit SGP bei 70°C

5.4.2 VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht

Die Testreihen mit vorgeschädigten, bewehrten Versuchskörpern mit PVB zeigen: Infolge der schub- und dehnweicheren Zwischenschicht sind die Resttraglasten geringer als bei entsprechend bewehrten Versuchskörpern mit SGP (Abb. 5.17, Abb. 5.18). Der Einfluss der Bewehrung auf den Versuchsverlauf und die erzielte Resttraglast ist jedoch ähnlich.

Da unbewehrte VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht im Zustand III keine Resttragfähigkeit aufweisen, werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet.

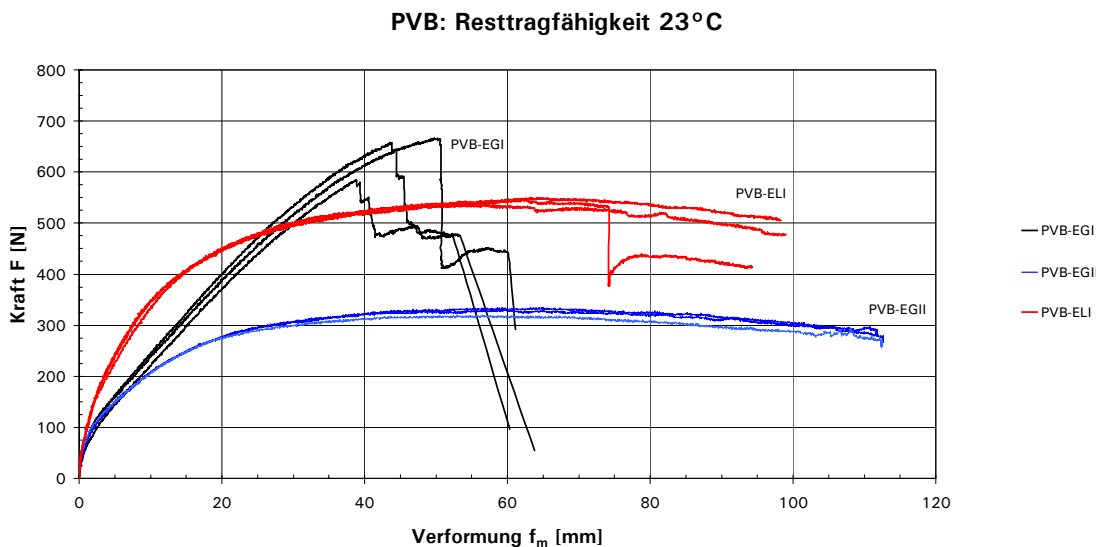


Abb. 5.17: Vier-Punkt-Biegeversuch: VSG-Systeme mit PVB bei 23°C

Die Biegesteifigkeit des Lochblechs macht sich bei 23°C Versuchstemperatur in der Anfangsbiegesteifigkeit beim Versuchskörpertyp PVB-ELI bemerkbar. Die höchsten Resttraglasten erzielen mit EGI bewehrte VSG-Systeme. Sowohl bei 23°C als auch 40°C trat das Versagen durch einen Gewebebruch ein.

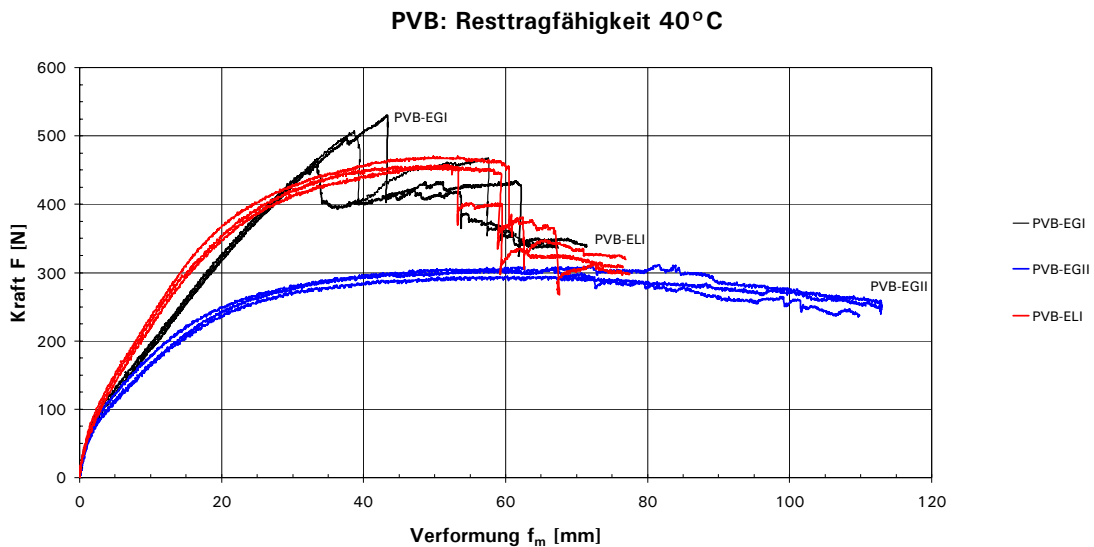


Abb. 5.18: Vier-Punkt-Biegeversuch: VSG-Systeme mit PVB bei 40°C

Bei 70°C Versuchstemperatur bestimmt die Verbundwirkung der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix mit dem fragmentierten Glas das Resttragverhalten entscheidend. Die erforderliche Bruchlast kann nicht über die PVB-Zwischenschicht in die Bewehrung eingeleitet werden (Abb. 5.19). Das Versuchsende wurde hier durch das Abrutschen von den Auflagern oder das Erreichen der maximalen Wegaufzeichnung bestimmt.

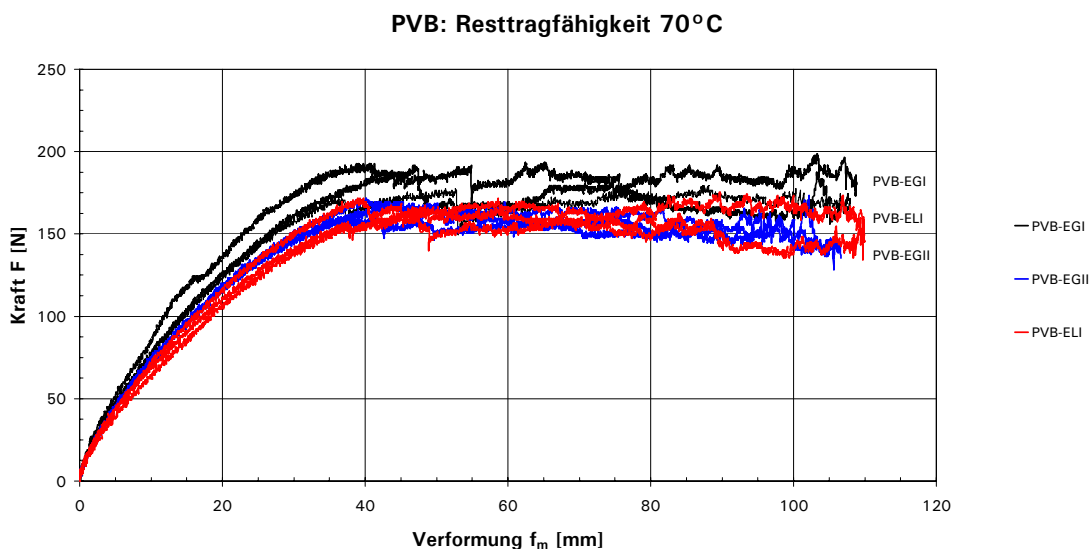


Abb. 5.19: Vier-Punkt-Biegeversuch: VSG-Systeme mit PVB bei 70°C

Bei einer Versuchskörpertemperatur von 70°C kann nahezu kein Unterschied zwischen den einzelnen Versuchsverläufen erkannt werden. Durch die bei dieser Temperatur stark verminderte Schubübertragung [64] kann die einlamierte Bewehrung nur begrenzt aktiviert werden. Die durchschnittlich erzielte maximale Resttraglast beträgt bei EGII und ELI je $F_{M,\max} = 171\text{ N}$ bzw. bei EGI $F_{M,\max} = 196\text{ N}$. Die Resttraglast führt bei der Annahme eines starren Schubverbunds zu einer Längsschubspannung in der Verbundfuge von $\tau = 0,14$ bzw. $0,16\text{ N/mm}^2$. Dies entspricht der in [64] maximal erzielten Schubspannung bei Scherversuchen an Diamantbohrkernen bei einer Versuchsgeschwindigkeit von 3 mm/min unter 70°C (Abb. 5.20). Somit bestimmt die Verbundspannung die aufnehmbare Resttraglast bei 70°C unabhängig von der hier eingebetteten Bewehrungsart.

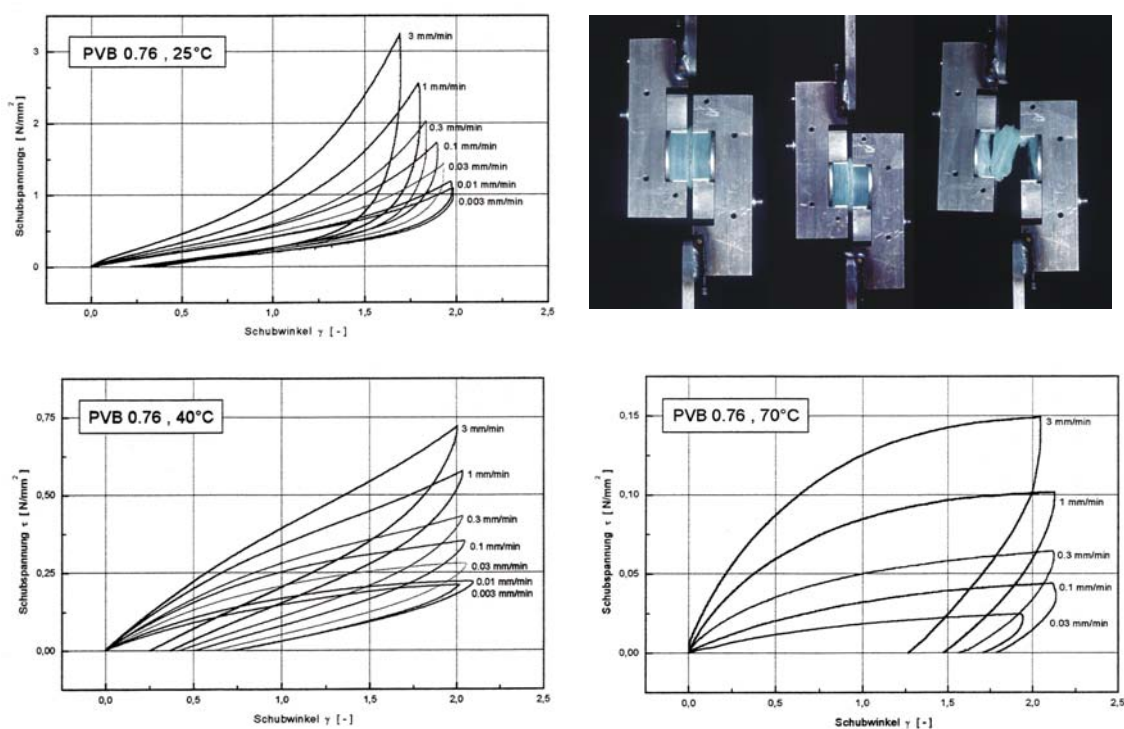


Abb. 5.20: Scherversuche von PVB bei 25°C , 40°C und 70°C [64]

Bei Raumtemperatur können sehr hohe Lasten mittels Drähten über eine kurze Verankerungslänge in ein VSG-System eingeleitet werden. Dies zeigen die Auszugsversuche von eingebetteten Drähten und Geweben in der $1,52\text{ mm}$ dicken PVB-Zwischenschicht eines VSG-Systems im Zustand I [20].

Die in Abb. 5.21 angegebenen Auszugskräfte F_{\max} des untersuchten Gewebes sind auf einen einzelnen Draht des Gewebes in Auszugsrichtung bezogen. Dies ermöglicht den Vergleich mit den Auszugskräften einzelner gerader und gewellter Drähte.

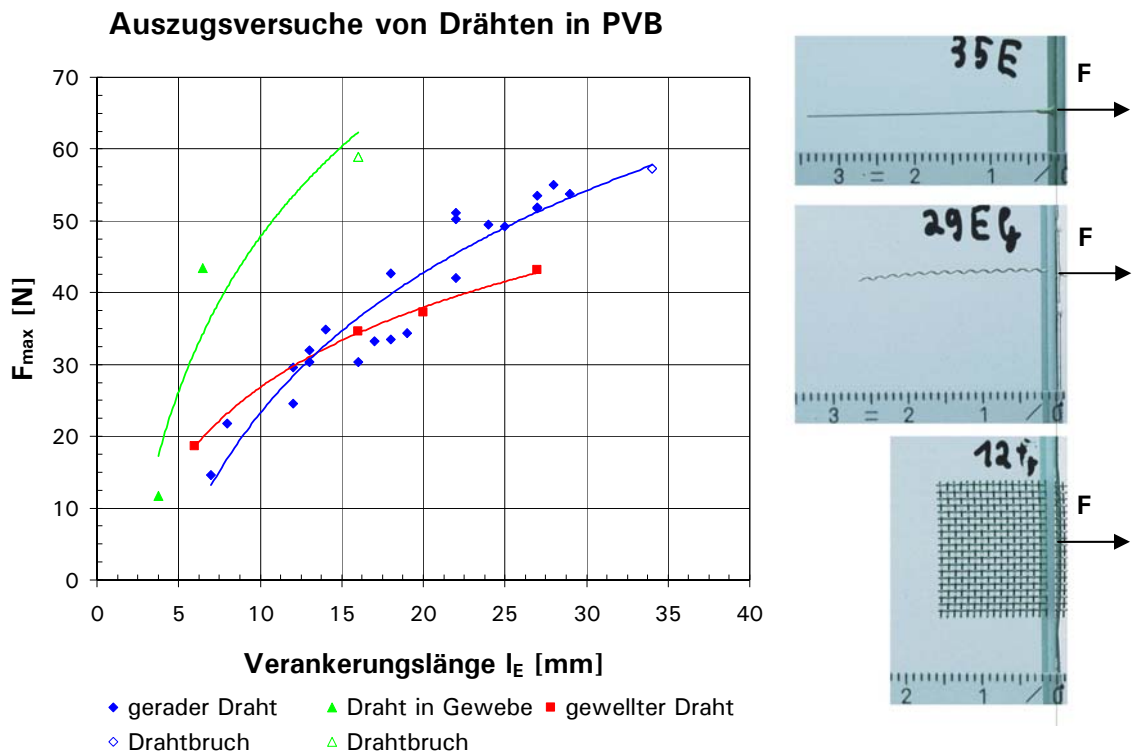


Abb. 5.21: Auszugsversuche von Bewehrung aus VSG im Zustand I [20]

Das verwendete Gewebe EGI (Auszugsgeschwindigkeit $v = 0,3$ mm/s) weist im Vergleich zu Einzeldrähten die besten Verbundeigenschaften auf. Eine Analogie zum Stahlbeton ist erkennbar. Mittels angeschweißter Querstäbe an Bewehrungsstahl kann die Verankerungslänge in Beton verkürzt werden. Bei bewehrten VSG-Systemen mit Geweben wirken sich die verwobenen Drähte quer zur Zugkraft ebenso günstig auf die Verankerungslänge aus (Abb. 5.21). Bei Raumtemperatur ist die erforderliche Verankerungslänge zur Einleitung der Kraft F eines Drahts des Gewebes etwa halb so lang wie die eines geraden Einzeldrahts. Mit einer Verankerungslänge von $l_e = 16$ mm kann die maximale Zugkraft eines Drahts des Gewebes in das VSG-System eingeleitet werden. Für einen einzelnen geraden Draht wird eine Verankerungslänge von $l_e = 34$ mm benötigt.

5.4.3 Einfluss der Versuchstemperatur

Das maximal aufnehmbare Biegemoment $M_{k,\max}$ der Versuchskörper im Zustand III ergibt sich aus der Einwirkung $F_{k,0,95}$ und dem Eigengewicht g . Das Biegemoment $M_{k,\max}$ ist abhängig von der Versuchstemperatur (Abb. 5.22). Im Vergleich zum maximal aufnehmbaren Biegemoment steht das Bemessungsmoment eines intakten VSG-Systems aus 2×6 mm ESG ohne Verbundwirkung gemäß [TRLV] mit einer zulässigen Glasbiegezugspannung von $\sigma_{zul} = 50$ N/mm². Die Resttraglast im Zustand III steht somit in Relation

zur Bemessungslast im Zustand I. Der Zustand III stellt für ein VSG-System einen außergewöhnlichen Zustand dar, der im Vergleich zum Zustand I ohne Sicherheitsbeiwerte zu betrachten ist.

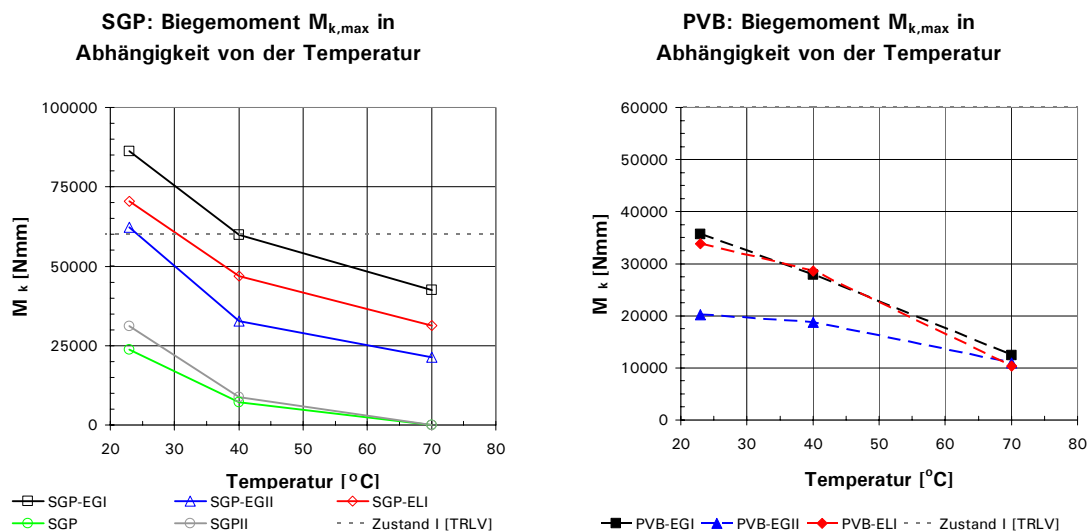


Abb. 5.22: Vergleich der maximal aufnehmbaren Biegemomente von VSG-Systemen bei unterschiedlichen Versuchstemperaturen

Das maximal aufnehmbare Biegemoment $M_{k,max}$ der betrachteten bewehrten VSG-Systeme mit SGP als Zwischenschicht ist bei 23°C stets höher als das Bemessungsmoment. Bei einer Versuchstemperatur von 40°C können dies nur bewehrte VSG-Systeme mit EGI gewährleisten. Das maximal aufnehmbare Biegemoment der mit EGII und ELI bewehrten VSG-Systeme beträgt jedoch noch mehr als die Hälfte des Bemessungsmoments. Einem Anstieg der Versuchstemperatur auf 70°C folgt der weitere Abfall der erzielten Resttraglasten. Lediglich VSG-Systeme mit EGI und ELI können unter diesen Umständen noch mindestens 50% der Bemessungslast aufnehmen. Unbewehrte VSG-Systeme mit SGP hingegen weisen keine Resttragfähigkeit auf. Auffallend ist der nahezu affine Verlauf der Biegemomente $M_{k,max}$ der einzelnen VSG-Systeme. Die Ergebnisse spiegeln die starke Temperaturabhängigkeit der Zwischenschicht und ihren Einfluss auf die Resttragfähigkeit wider. Lediglich die Höhe der erzielten Resttraglast wird von der Bewehrungsart und der Zwischenschichtdicke bestimmt.

Bei allen Versuchen ist die Glasübergangstemperatur von PVB bereits überschritten. Bei gleicher Versuchstemperatur ist die Zwischenschicht PVB hierbei dehnweicher als SGP. Daher sind die maximal aufnehmbaren Biegemomente $M_{k,max}$ der Versuchskörper aus PVB geringer als bei Proben mit SGP. Bei 23°C sowie 40°C können nur mit EGI und ELI bewehrte Versuchskörper mehr als 50% der Bemessungslast abtragen. Bei einer Versuchstemperatur von 70°C ist die erzielte maximale Resttraglast unabhängig von der Bewehrungsart. Das Verbundverhalten der

Zwischenschicht PVB bestimmt das erzielte maximal aufnehmbare Biegemoment $M_{k,max}$.

Die Resttraglasten von bewehrten VSG-Systemen mit SGP bei 70°C Versuchstemperatur entsprechen annähernd den Ergebnissen von bewehrten VSG-Systemen mit PVB bei 23°C.

5.4.4 Verformungsfigur

Bei höheren Versuchstemperaturen und fortgeschrittener Versuchsdauer – insbesondere bei VSG-Systemen mit PVB-Zwischenschicht – verändert sich die Verformungsfigur. Die anfängliche Krümmung wird durch eine Rotation unter den beiden Lastschneiden abgelöst. Diese Rotation ist verbunden mit einer Starrkörperverdrehung und Translation der Plattenteile (Abb. 5.23). Die Rissbildung an der Oberseite der Versuchskörper zeigt dies deutlich. Bei 70°C Versuchstemperatur bilden sich nur wenige Risse in der Druckzone. Dagegen sind die beiden Rotationspunkte deutlich zu erkennen (Abb. 5.24).

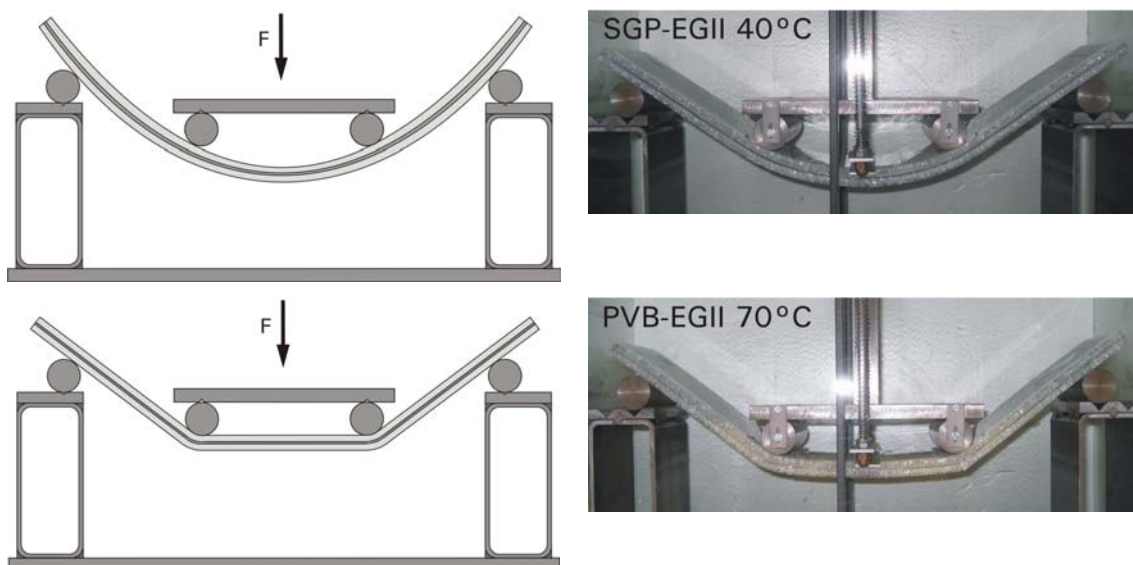
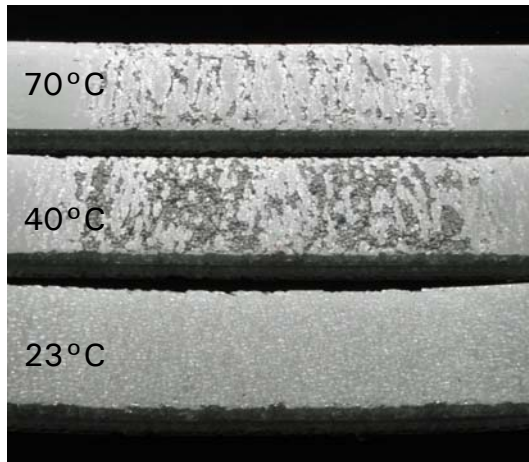


Abb. 5.23: Krümmung und Rotation

Generell weisen die bewehrten VSG-Systeme mit PVB im Gegensatz zu SGP ausgeprägte Rotationspunkte mit konzentrierter Rissöffnung unterhalb der Lastschneiden auf (Abb. 5.25 A). Dieses Verhalten nimmt mit steigender Versuchstemperatur zu.

SGP-EGII



PVB-EGII

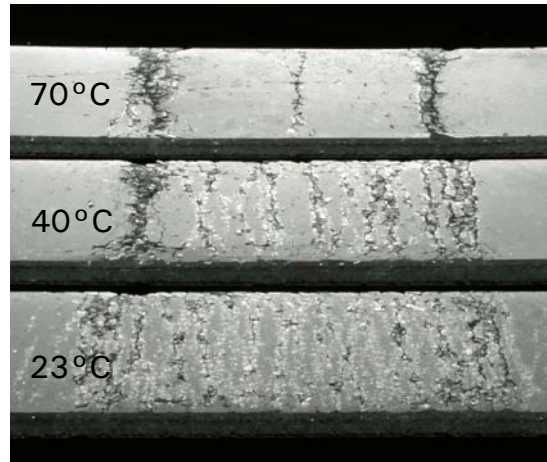


Abb. 5.24: Oberflächenrisse zwischen den Lastschneiden bei 23°C, 40°C und 70°C

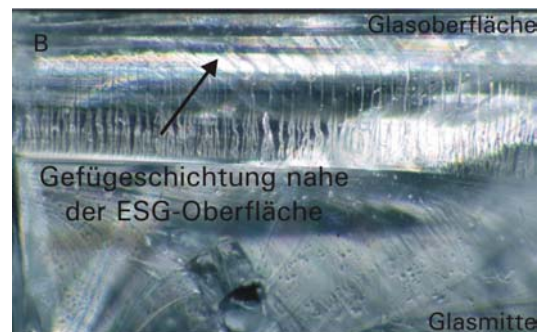
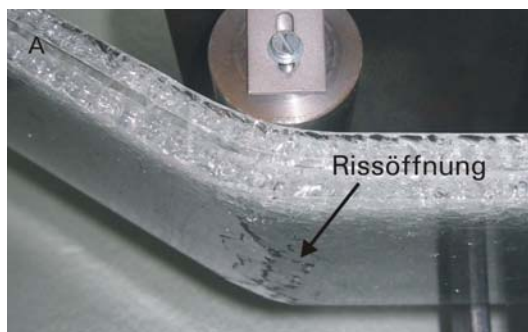


Abb. 5.25: A Risskonzentration, B Rissfläche eines ESG-Bruchstücks

Bei der Rissbildung in der Druckzone blättern die obersten Schichten des ESG ab. Dies wird auf das augenscheinlich geschichtete Glasgefüge an der Glasoberfläche des ESG zurückgeführt (Abb. 5.25 B). Siehe hierzu auch die in Kapitel 2.1.3 betrachtete Rissfläche der Glasbruchstücke von ESG.

5.4.5 Einfluss der Traversengeschwindigkeit

Es ist ein Einfluss der Traversengeschwindigkeit auf die maximale Resttraglast und der Biegesteifigkeit zu erkennen (Abb. 5.26). Versuche mit 2 mm/s; 0,2 mm/s und 0,02 mm/s Traversengeschwindigkeit bei 23°C Versuchstemperatur zeigen eine Abnahme der Biegesteifigkeit und der maximalen Resttragkraft bei geringeren Versuchsgeschwindigkeiten. Lediglich beim Versuchskörper mit SGP wirkt sich die von 0,2 mm/s auf 2 mm/s gesteigerte Traversengeschwindigkeit nicht auf die Resttraglast und die Biegesteifigkeit aus. Laut [9] macht sich der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei intakten VSG-Systemen mit SGP als Zwischenschicht erst oberhalb der Glasübergangstemperatur bemerkbar.

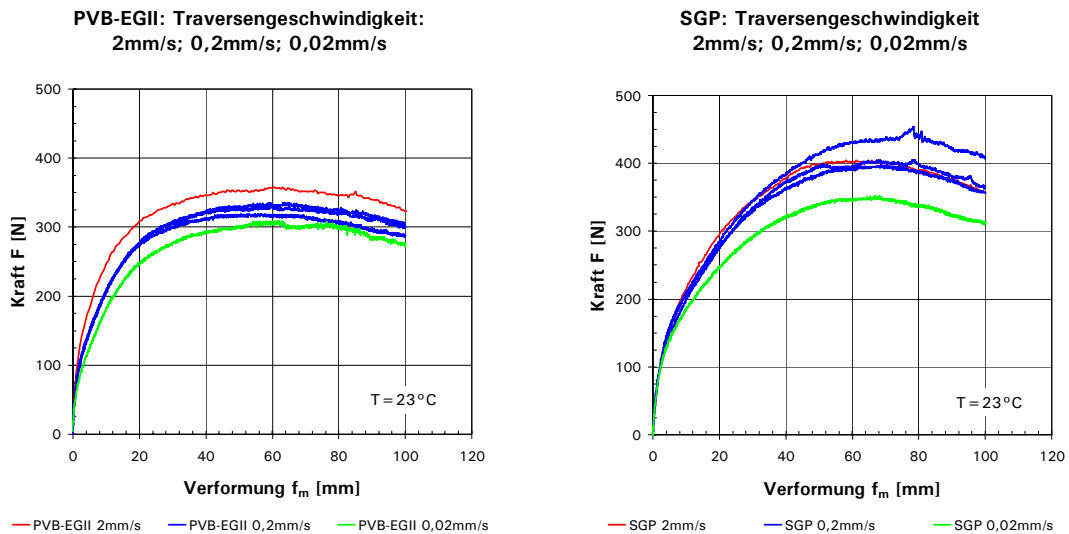


Abb. 5.26: Einfluss der Traversengeschwindigkeit

Auf Grund dieser erwarteten zeitlichen Einflüsse, die auf das viskoelastisch-plastische Materialverhalten der Zwischenschicht zurückgeführt werden, sollen Biegekriechversuche Aufschluss über das Langzeitverhalten geben.

5.4.6 Einfluss der zyklischen Be- und Entlastung

Derzeit ist gemäß Normen und Richtlinien kein Nachweis des Resttragverhaltens unter zyklischer Be- und Entlastung zu erbringen. Um diesen Einfluss jedoch zu erfassen, wurden unbewehrte Versuchskörper des Typs SGPII mehrfach in kurzer Abfolge be- und entlastet (Abb. 5.27).

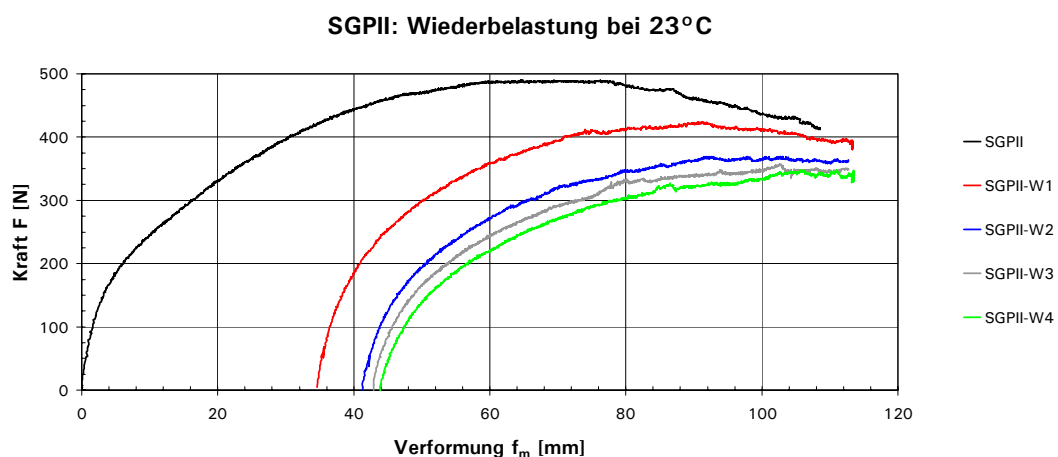


Abb. 5.27: Wiederbelastung bei SGPII

Bei zyklischer Be- und Entlastung stellte sich eine Minderung der maximal erzielbaren Resttraglast F_{\max} ein. Nach der Entlastung verbleibt eine

Mittenverformung infolge des visko-elastisch-plastischen Verhaltens der Zwischenschicht. Bei mehrfacher Wiederbelastung nähern sich die Systemsteifigkeit und die erzielte Resttraglast F_{\max} immer stärker einem Grenzwert an. Eine gewisse Resttragfähigkeit unter zyklischer Be- und Entlastung ist also bei diesem VSG-System vorhanden.

5.4.7 Einfluss der Glasoberfläche bei SGP

Laut Hersteller soll der Haftverbund von SGP mit der Zinnseite (T) einer Floatglasscheibe stets besser sein als mit der Luftseite (A). Um den Einfluss der Glasoberfläche auf die Qualität des Laminats zu untersuchen, wurden zusätzlich Versuchskörper hergestellt, deren Luftseite (A) der SGP-Zwischenschicht zugewandt ist. Bei 23°C Versuchstemperatur kann im Vier-Punkt-Biegeversuch kein Einfluss auf die Resttragfähigkeit infolge der Orientierung der Glasoberfläche erkannt werden (Abb. 5.28). Jedoch ist der Stichprobenumfang zu klein, um eine gesicherte Aussage zu treffen.

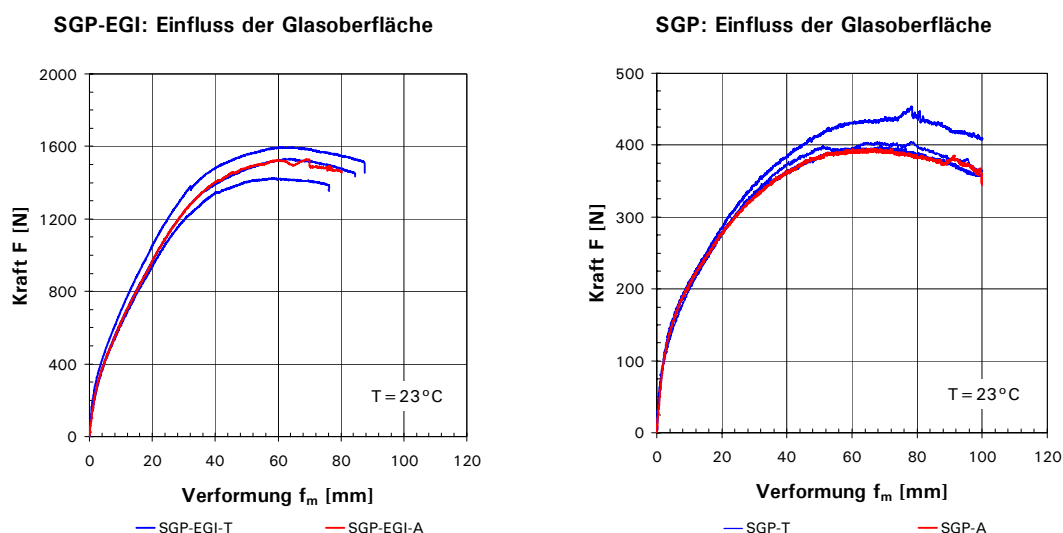


Abb. 5.28: Einfluss der Glasoberfläche auf die Qualität des Laminats mit SGP

5.4.8 Einfluss der Vorschädigung auf die Resttragfähigkeit

Im Folgenden werden die erzielten Resttraglasten der untersuchten Probekörper miteinander verglichen. Die Resttraglasten der zu Versuchsbeginn intakten Versuchskörper sind den vorgeschädigten gegenübergestellt. Dabei stellen die angegebenen erzielten maximalen Resttraglasten F_{\max} jeweils den Mittelwert aus allen Versuchen dar (Abb. 5.29). Es wurden mehr Versuche an vorgeschädigten als an anfänglich intakten Proben durchgeführt. Die Aussagegenauigkeit steigt bei erhöhtem Stichprobenumfang an.

Die Versuche an intakten Versuchskörpern werden beginnend im Zustand I bis hin zum Zustand III mit konstanter Versuchsgeschwindigkeit von 0,2 mm/s gefahren. Durch die hohe eingetragene Energie im intakten Zustand I und dem anschließenden plötzlichen Bruch der Scheibe(n), ergeben sich kleinere Bruchstücke als bei planmäßig vorgeschädigten Versuchskörpern. Das plötzliche Versagen führt zu einem hohen Steifigkeitsverlust beim Übergang zum Zustand III und somit zu einer Impulsbelastung für das VSG-System, wodurch es zum Abplatzen von Glassplittern kommen kann.

Die in die ESG-Scheiben bis zum Bruch eingetragene Energie infolge Biegebeanspruchung ist bei einer Versuchstemperatur von 23°C höher als bei 70°C. Dies liegt an der höheren Verbundwirkung der Zwischenschicht bei niederen Temperaturen. Kleinere Bruchstücke sind bei niederen Temperaturen die Folge. Die geringere Bruchstückgröße kann - gepaart mit der zusätzlichen Impulsbelastung - zu geringeren Resttraglasten als bei vorgeschädigten VSG-Systemen führen.

Das planmäßige Vorschädigen der Versuchskörper mittels Körneranschlag führt zu einem homogeneren Bruchbild. Bei einer Versuchstemperatur von 23°C erzielen die vorgeschädigten Versuchskörper meist höhere Resttraglasten, dieses Bild kehrt sich bei 70°C um.

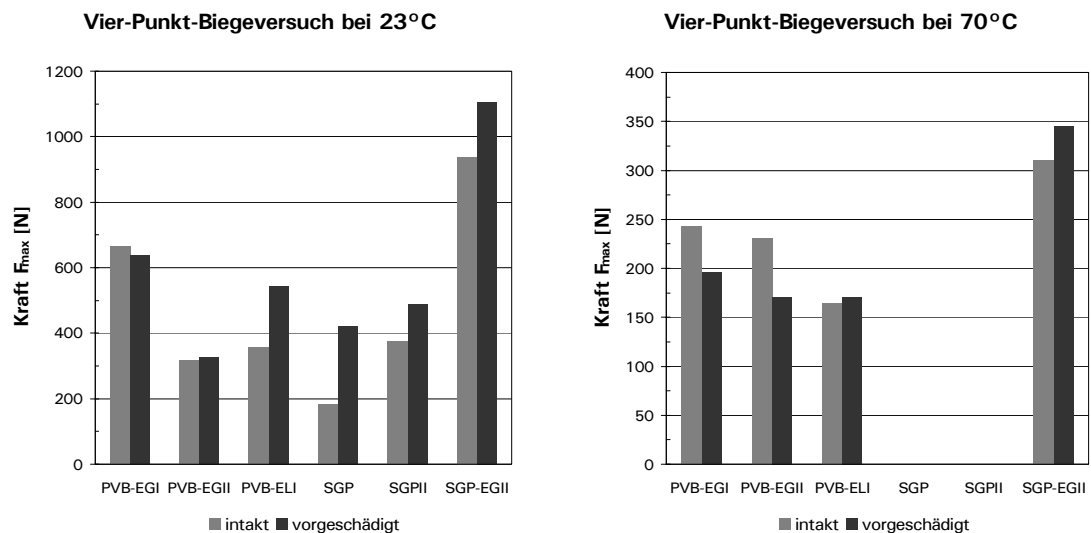


Abb. 5.29: Resttraglasten bei intakten und vorgeschädigten Versuchskörpern

Eine Resttragfähigkeit sowohl bei 23°C als auch bei 70°C lässt sich nur mit einer Bewehrungseinlage in der Zwischenschicht erzielen. Dies gilt für vorgeschädigte sowie für zu Versuchsbeginn intakte VSG-Systeme.

Ein VSG-System aus ESG wird meist durch lokale Stoßbelastungen (z.B. Vandalismus) oder durch Zwangsbeanspruchungen in den Zustand III überführt. In diesem Zustand wirkt mit hoher Wahrscheinlichkeit nur ein

Bruchteil der Bemessungslast für den Zustand I. Die Verglasung muss daher ein Resttragvermögen bei abgeminderter Bemessungslast aufweisen. Analog hierzu sind auch die Prüflasten bei Versuchen zur Resttragfähigkeit in den Normen und Regelwerken (Kapitel 4.1) abgemindert.

5.5 Biegekriechversuche

Die Reststandzeit eines VSG-Systems ist von großer Bedeutung, um das Gefahrenpotenzial eines Systemkollapses im Zustand III vorherzusagen. Daher wurde das Langzeitverhalten unter konstanter Lasteinwirkung betrachtet. In Vier-Punkt-Biegekrechversuchen wurde die Zunahme der Verformung vorgeschädigter VSG-Systeme über den Zeitraum von vier Tagen beobachtet. Um die temperaturabhängigen Eigenschaften der Zwischenschichten zu erfassen, wurden die Versuche im Klimaschrank bei 23°C und 40°C ausgeführt. Die ständige Einwirkung je VSG-System betrug dabei 50% der bei 40°C ermittelten charakteristischen Resttraglast $F_{k,40^\circ\text{C}}$ (Kapitel 5.4, Anhang A3). Auf Grund der starken Langzeitverformung von VSG-Systemen mit PVB wurden bei geeigneten Probekörpertypen zusätzlich Lastniveaus betrachtet.

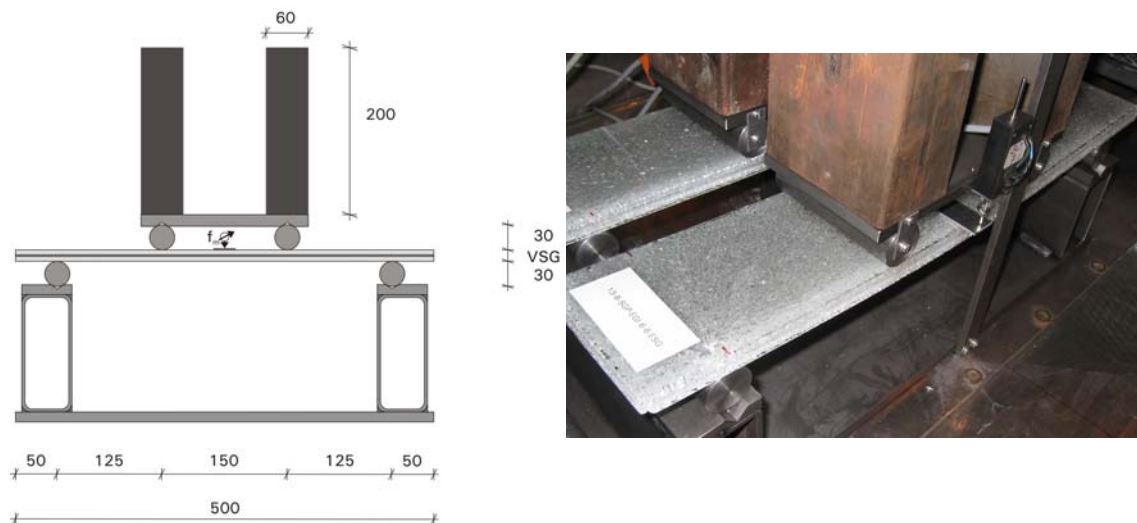


Abb. 5.30: Versuchsanordnung: Vier-Punkt-Biegekrechversuch [mm]

Die Versuchsanordnung ähnelt dem Vier-Punkt-Biegeversuch unter kurzzeitiger Belastung (Abb. 5.30, Anhang A4). Die Belastung wurde mittels zweier mit Bleikugeln gefüllten Behältern über den Rollen des Lastwagens aufgebracht. Die Durchbiegungsmessung erfolgte in Feldmitte mittels ohmscher Wegaufnehmer. Bei der Entlastung nach vier Tagen verblieb der Lastwagen ($G = 23 \text{ N}$) für einen weiteren Tag auf dem VSG-System.

Die Längsschubspannung $\tau_{F,0}$ in der Verbundfuge infolge der Belastung F wird unter der Annahme einer schubstarrten Verbindung von Glas und Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix ermittelt. Die Kraft F_m wird über die Länge $l_2 = 125$ mm eingeleitet. Eine mögliche zusätzliche Rückverankerung durch den beidseitigen Überhang von $l_3 = 50$ mm wird dabei nicht angesetzt. Auf Grund des Eigengewichts wirkt eine zusätzliche Längsschubspannung $\tau_{g,0} = 0,012$ N/mm² (Tab. 5.8).

Tab. 5.8: Versuchskörper mit zugehöriger Belastung und Versuchsverlauf

Typ	Belastung F [N]	Längsschub $\tau_{F,0}$ [N/mm ²]	Lastniveau $F / F_{k,40^\circ\text{C}}$ [%]	Resttraglast $F_{k,40^\circ\text{C}}$ [N]	Versuche		Versagen	
					23 °C	40 °C	Ja	Nein
SGP	52	0,035	50	104	x			x
						x	x	
SGP-EGI	474	0,331	50	948	x			x
						x		x
SGP-EGII	257	0,178	50	513	x			x
						x		x
PVB	-	-	-	-	x		x	
						x	x	
PVB-EGI	145	0,112	33	437	x			x
						x		x
PVB-EGII	218	0,169	50	437	x			x
						x		x
PVB-ELI	145	0,108	50	290	x			x
						x		x
PVB-ELI	218	0,163	75	290	x			x
						x		x
PVB-ELI	224	0,157	50	449	x			x
						x	x	

Die Versuchskörper wurden nach der Laminierung ca. 1 Jahr bei Raumtemperatur gelagert. Vor Versuchsbeginn wurden sie 24 h im

Klimaschrank auf die Prüftemperatur aufgeheizt, um eine mögliche Versteifungen der Zwischenschicht infolge physikalischer Alterungseffekte beim Kriechversuch gemäß [DIN EN ISO 899] zu mindern. Bei physikalischer Alterung treten morphologische Änderungen ohne Beeinflussung des chemischen Aufbaus der Molekülketten ein. Bei der Kunststoffherstellung erstarren amorphe Kunststoffe in einer unterkühlten Schmelze. Dieser thermodynamisch instabile Zustand hat physikalische Alterungsvorgänge zur Folge, die im Gegensatz zur chemischen Alterung reversibel sind [15].

5.5.1 VSG-Versuchskörper mit SGP als Zwischenschicht

Unbewehrte Versuchskörper mit SGP zeigen bei 23°C eine Resttragfähigkeit über den gesamten Prüfzeitraum hinweg (Abb. 5.31). Jedoch nehmen die Verformungen bei 40°C Versuchstemperatur bereits nach ca. 10 min stark zu und führen nach ca. 1000 min zum Systemkollaps (Abb. 5.32). Unbewehrte VSG-Systeme mit SGP als Zwischenschicht eignen sich demnach nicht für lang andauernde Belastungen unter erhöhter Bauteiltemperatur.

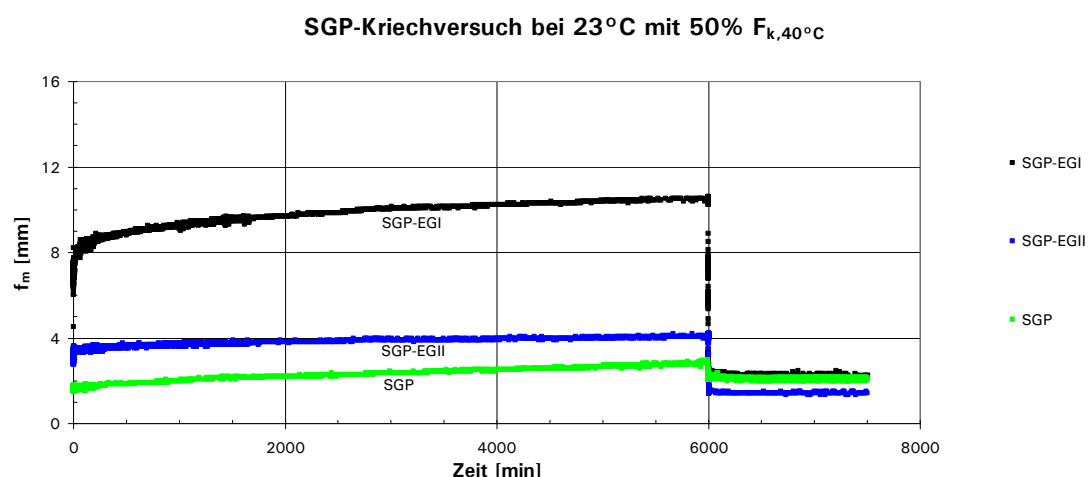


Abb. 5.31: SGP: Vier-Punkt-Biegekriechversuch bei 23°C

Die beiden mit Edelmetallgewebe bewehrten VSG-Systeme zeichnen sich durch eine hohe Biegesteifigkeit über die komplette Versuchsdauer aus. Erwartungsgemäß führen höhere Belastungen wie z.B. bei Versuchskörpertyp SGP-EGI und höhere Versuchstemperaturen zu größeren Durchbiegungen. Nach der Teilentlastung nach 4 Tagen wird das viskoelastisch-plastische Materialverhalten der Zwischenschicht deutlich sichtbar. Bei 23°C wie auch bei 40°C Versuchstemperatur trat bei SGP-EGI und SGP-EGII kein Systemversagen auf.

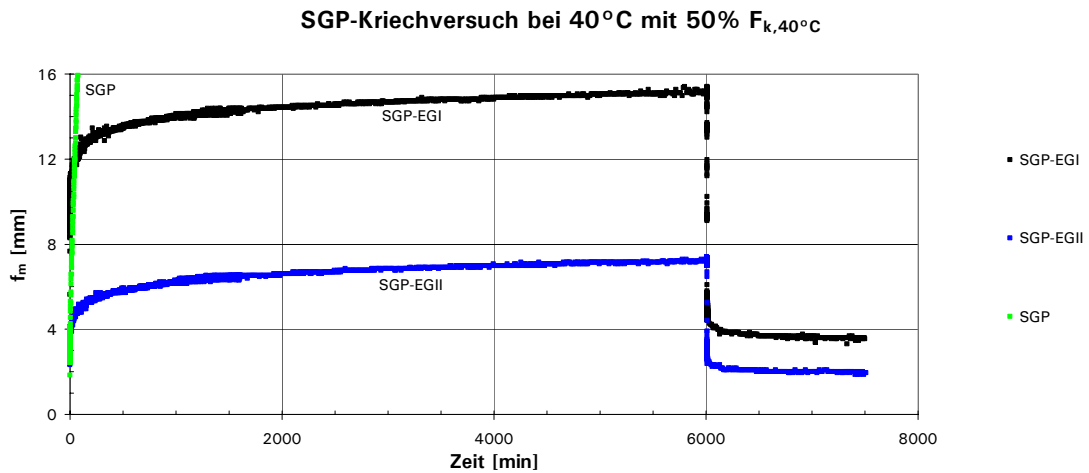


Abb. 5.32: SGP: Vier-Punkt-Biegekriechversuch bei 40°C

Im Weiteren sind die Verläufe der beiden tragfähigen VSG-Systeme mit Edelstahlgewebe durch logarithmische Regressionsfunktionen und Bestimmtheitsmaß R approximiert (Abb. 5.33, Abb. 5.34). Die Kriechverformung $f_m(t)$ lässt sich mit der Anfangsverformung f_{m0} und der Konstanten x wie folgt vereinfacht darstellen:

$$f_m(t) = f_{m0} + x \ln(t) \quad (5.1)$$

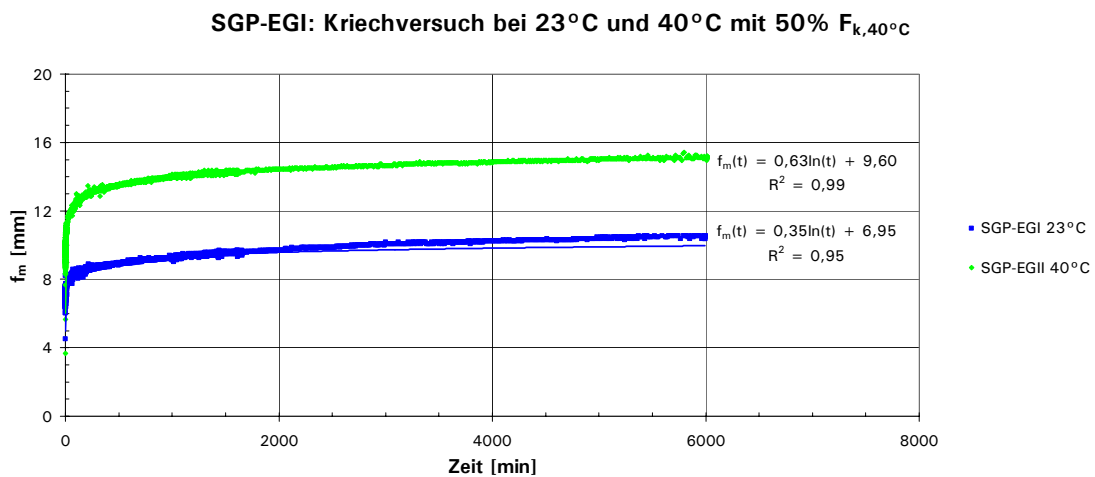


Abb. 5.33: Einfluss von Temperatur und Lastniveau bei Versuchskörpertyp SGP-EG I – Kriechverformung logarithmisch approximiert

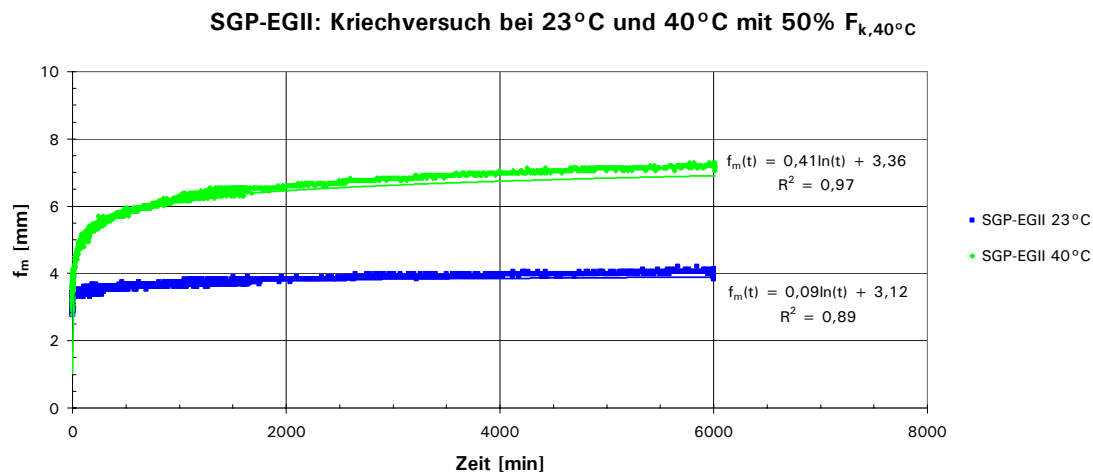


Abb. 5.34: Einfluss von Temperatur und Lastniveau bei Versuchskörpertyp SGP-EGII – Kriechverformung logarithmisch approximiert

5.5.2 VSG-Versuchskörper mit PVB als Zwischenschicht

Bei den Versuchen mit PVB als Zwischenschicht werden deutlich höhere Verformungen als bei VSG-Systemen mit SGP erzielt (Abb. 5.35, Abb. 5.36). Die Verformungszunahmen bei den mit EGI und EGII bewehrten Versuchskörpern sind nahezu identisch. Demgegenüber besitzt ein mit ELI bewehrtes VSG-System eine stärkere Verformungszunahme bereits bei 23°C. Unbewehrte Probekörper mit PVB als Zwischenschicht versagten erwartungsgemäß auf Grund ihrer geringen Biegesteifigkeit sowohl bei 23°C als auch bei 40°C nur infolge ihres Eigengewichts durch Abrutschen vom Auflager.

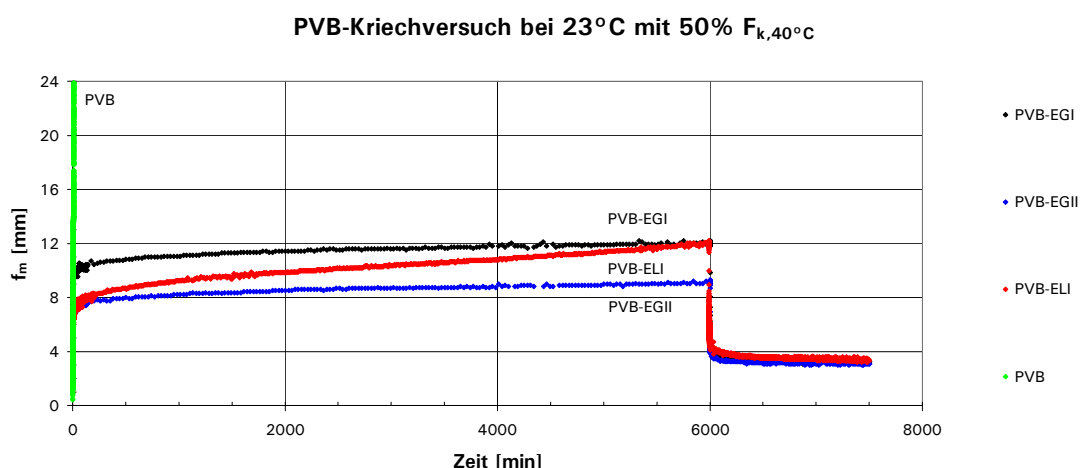


Abb. 5.35: PVB: Vier-Punkt-Biegekriechversuch bei 23°C

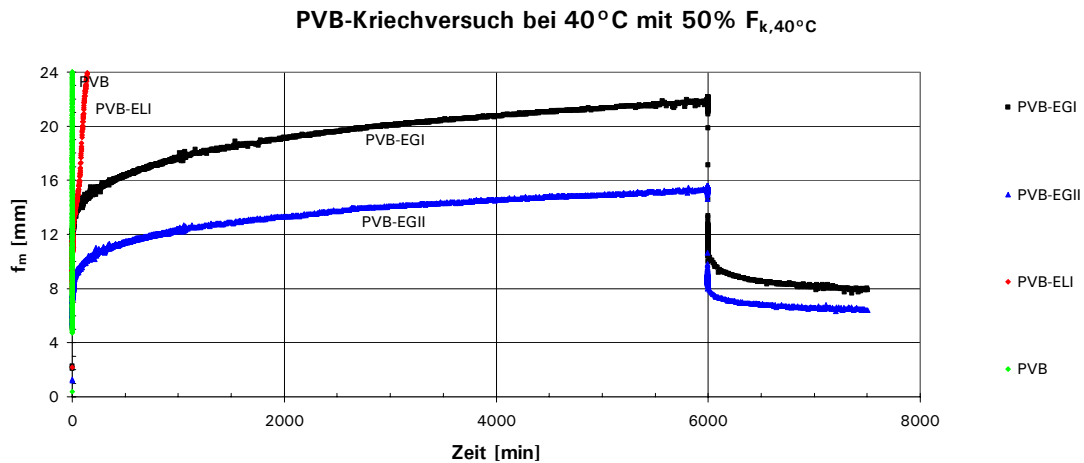


Abb. 5.36: PVB: Vier-Punkt-Biegekriechversuch bei 40°C

Die Verformungszunahme ist bei VSG-Systemen mit ELI bei einer Versuchstemperatur von 40°C so groß, dass das System bereits nach kurzer Zeit wegen der Delamination der Glasfragmente in der Druckzone von der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix versagte und vom Rollenaufleger abrutschte (Abb. 5.37). Ein zweiter Versuch bestätigt den Versagensverlauf (Anhang 3). Diese Delamination fand stets im Bereich der höchsten Längsschubkraft zwischen Auflager und Lasteinleitung statt. Die berechnete Längsschubspannung bei schubstarrem Verbund liegt bei 0,17 N/mm². In [64] wurde in Kurzzeitschubversuchen bei 41°C unter diesem Schubspannungsniveau ebenfalls ein Versagen durch Delamination festgestellt (Abb. 5.38). Dieses interlaminare Versagen trat nur bei den Schubversuchen mit langsamen Versuchsgeschwindigkeiten auf.

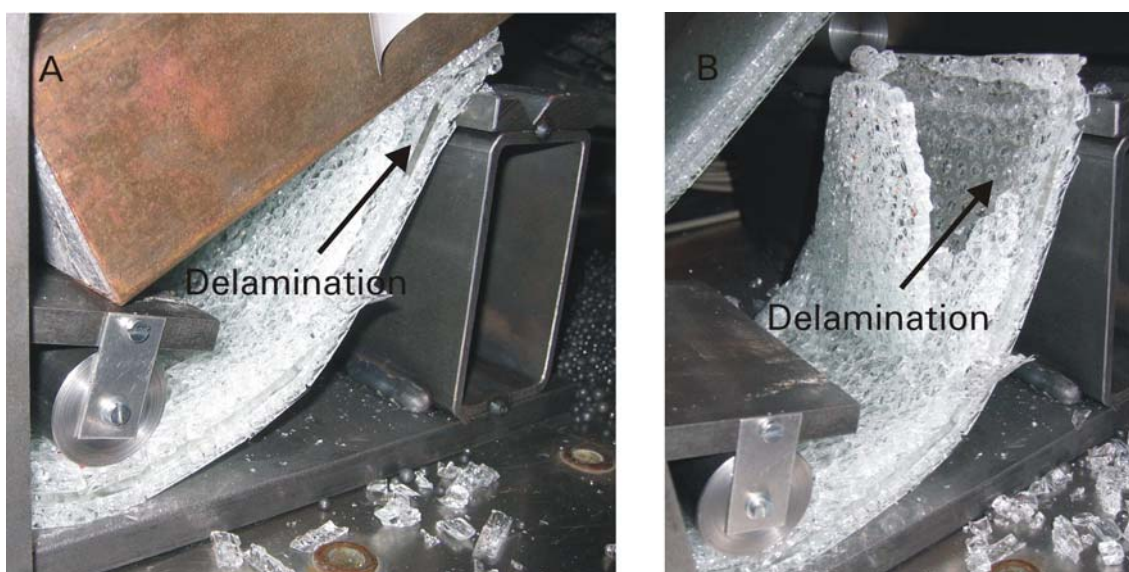


Abb. 5.37: Delamination und Systemkollaps beim Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit PVB-ELI bei 40°C: A vor B nach Wegnahme des Gewichts

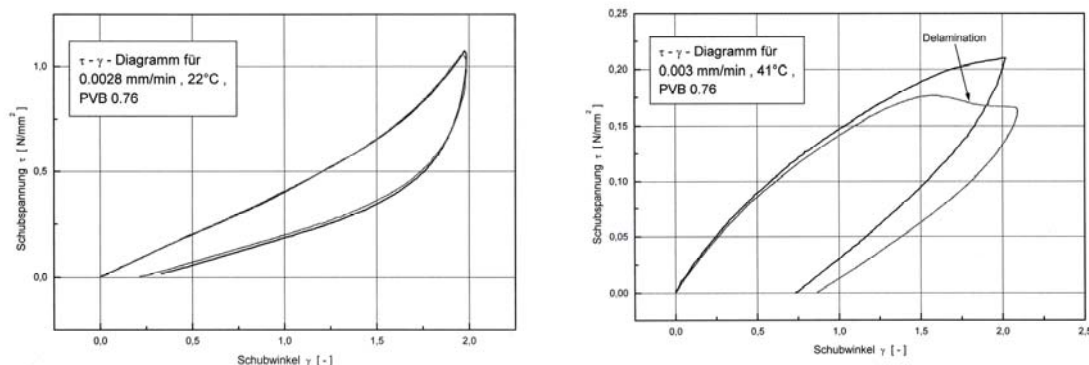


Abb. 5.38: Schubspannung von PVB bei 22°C und 41°C [64]

Die berechneten Schubspannungen der Proben mit einlaminierem Gewebe liegen auf einem ähnlichen Niveau (Tab. 5.8). Die Zwischenschicht delaminiert jedoch nicht während der Belastungsdauer von 6000 min. Dies wird auf die geringere Zwischenschichtdicke bei den Versuchskörpern mit Gewebe (Tab. 5.2) und die damit einhergehende leicht erhöhte Schubsteifigkeit laut [64] zurückgeführt. Bei Versuchskörpern mit ELI werden die Lochbleche in zwei PVB-Folien mit der Gesamtdicke von $2 \times 1,52$ mm eingebettet, wohingegen das Gewebe in einer Matrix mit der Dicke von $2 \times 0,76$ mm liegt (Abb. 5.39). Demzufolge ist die Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix bei Versuchskörpern mit ELI dicker als mit EGI bzw. EGII. Dies gilt somit auch für den Teil der Zwischenschicht ohne Bewehrungsanteil $e_{EL} > e_{EG}$.



Abb. 5.39: Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix mit: $e_{EL} > e_{EG}$

Die Ergebnisse der Versuche mit Lochblechen zeigen klare Grenzen für die Anwendbarkeit von bewehrten VSG-Systemen mit PVB als Zwischenschicht. Relativ dicke Bewehrungselemente benötigen dicke Zwischenschichten. Im Zustand III neigt dieser Laminataufbau bei erhöhter Bauteiltemperatur zu interlaminarem Versagen. Es kommt zur Delamination unter Dauerlast.

Im Folgenden werden die beiden VSG-Systeme mit PVB und Edelstahl-gewebe näher betrachtet. Da sie relativ starke Verformungen im Vergleich zu den VSG-Systemen mit SGP und Edelstahl-gewebe zeigen, sind weitere Belastungsniveaus berücksichtigt. Die Anfangsverformung f_{m0} nimmt bei gleichem Versuchskörpertyp mit der Temperatur und dem Lastniveau zu. Bei

einem Anstieg des Lastniveaus ist die weitere Verformungszunahme bei gleicher Versuchstemperatur relativ gering. Dagegen wirkt sich die Steigerung der Versuchstemperatur bei gleichem Lastniveau stärker auf die Verformungszunahme aus (Abb. 5.40, Abb. 5.41).

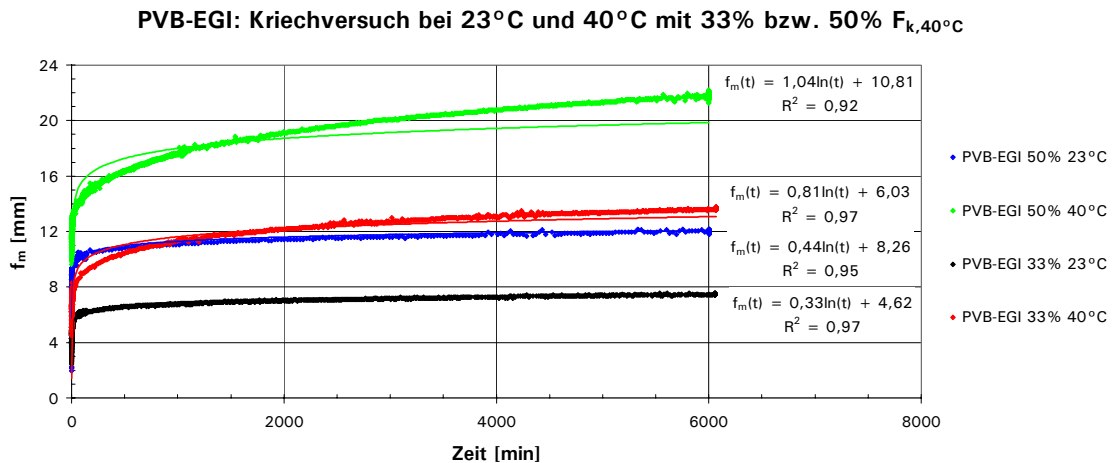


Abb. 5.40: Einfluss von Temperatur und Lastniveau bei Versuchskörpertyp PVB-EGI – Kriechverformung logarithmisch approximiert

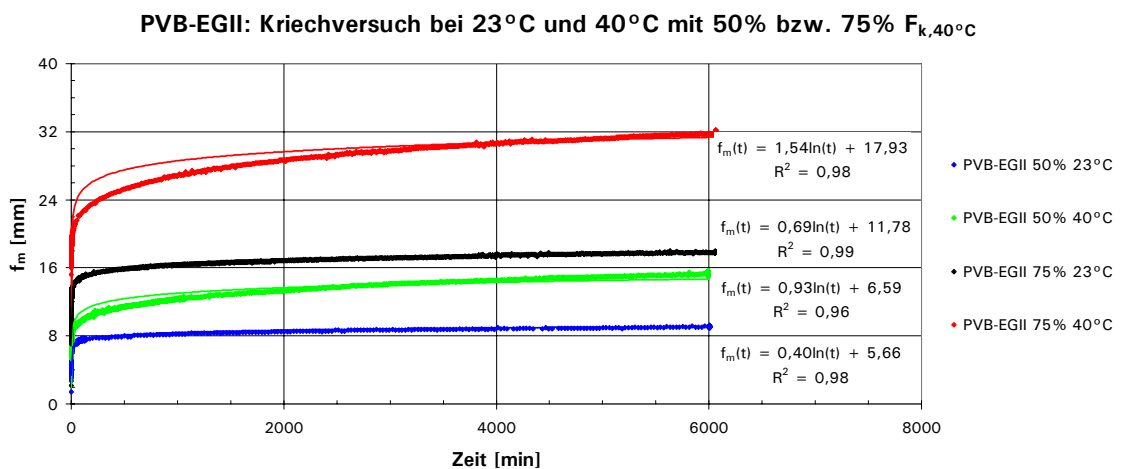


Abb. 5.41: Einfluss von Temperatur und Lastniveau bei Versuchskörpertyp PVB-EGII – Kriechverformung logarithmisch approximiert

Der Einfluss der Bewehrungsart auf die Anfangsverformungen zeigt sich bei gleichem Lastniveau deutlich (Abb. 5.42, Abb. 5.43). Analog zu den Versuchen unter kurzzeitiger Lasteinwirkung ist das mit EGI bewehrte VSG-System steifer als Versuchskörpertyp PVB-EGII. Die höhere Steifigkeit von Versuchskörpern mit EGI führt zu geringeren Verformungen unter Dauerlast. Jedoch ist die Verformungszunahme sowohl bei geringem Lastniveau (33% $F_{k,40^\circ\text{C,EGI}} = 50\% F_{k,40^\circ\text{C,EGII}} = 145 \text{ N}$) als auch hohem Lastniveau (50% $F_{k,40^\circ\text{C,EGI}} = 75\% F_{k,40^\circ\text{C,EGII}} = 218 \text{ N}$) weniger von der Bewehrungsart als vielmehr von der Temperatur abhängig.

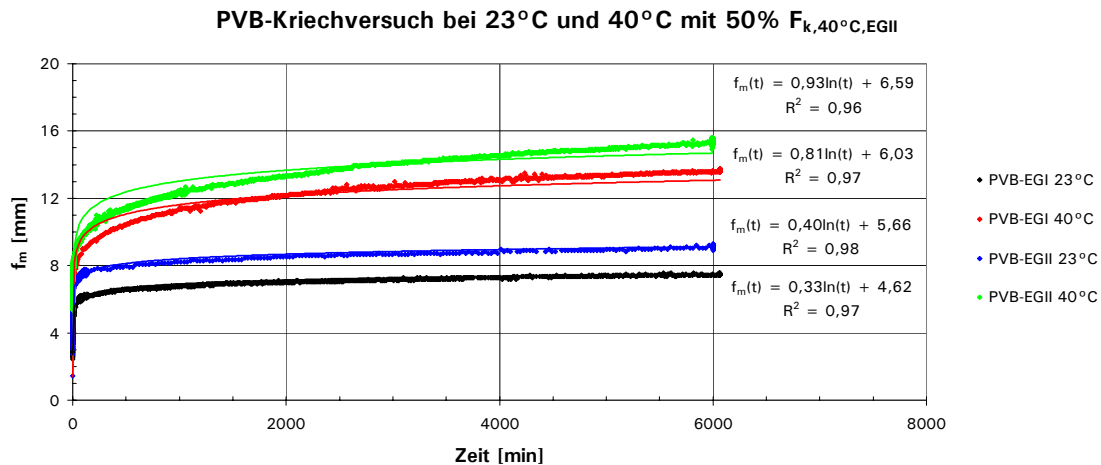


Abb. 5.42: Einfluss von Temperatur und Bewehrung beim Lastniveau 50% $F_{k,40^\circ\text{C},\text{EGII}}$

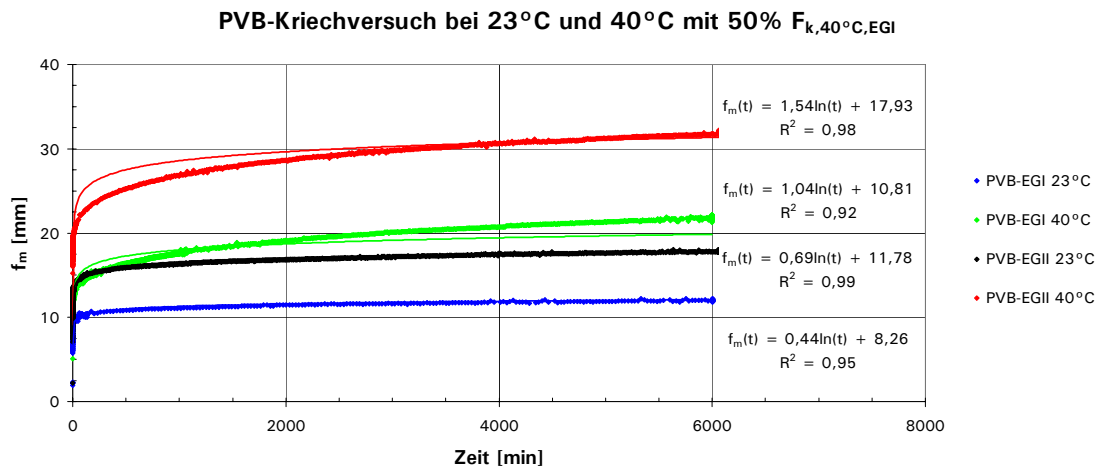


Abb. 5.43: Einfluss von Temperatur und Bewehrung beim Lastniveau 50% $F_{k,40^\circ\text{C},\text{EGI}}$

5.5.3 Kriechfaktoren

Die Versuchsergebnisse der getesteten VSG-Systeme mit Edelstahlgewebe stimmen gut mit den Regressionsgleichungen überein. Für die logarithmische Approximation der Durchbiegung in Feldmitte f_m gilt Gleichung (5.1).

Die Verformungszunahme lässt sich durch den Kriechfaktor φ_T beschreiben:

$$\varphi_T = \frac{x}{f_{m0}} \quad (5.2)$$

$$f_m(t) = f_{m0}(1 + \varphi_T \ln(t)) \quad (5.3)$$

Die VSG-Systeme weisen bei gleichem Temperaturniveau einen ähnlichen Kriechfaktor φ_T auf, lediglich die Anfangsverformung f_{m0} zum Zeitpunkt

$t = 0$ variiert stark (Tab. 5.9). Bei einer Versuchstemperatur von 23°C ist der aus den Versuchen ermittelte Kriechfaktor $\varphi_T < 0,1$ – wohingegen bei 40°C gilt: $\varphi_T < 0,15$.

Tab. 5.9: Verformungen f_{m0} und Kriechfaktoren φ_T

Typ	Temperatur T [°C]	Belastung F [N]	Verformungen im Kurzzeitversuch (Kapitel 5.4) f_{m0} [mm]	Regressionsgleichung aus Vier-Punkt-Biegekriech- versuchen $f_m(t) = f_{m0} + x \ln(t)$ [mm]	Kriechfaktor φ_T
SGP-EGI	23	474	5,81	$f_m(t) = 6,95 + 0,35 \ln(t)$	0,05
SGP-EGII	23	257	2,01	$f_m(t) = 3,12 + 0,09 \ln(t)$	0,03
PVB-EGI	23	145	4,34	$f_m(t) = 4,62 + 0,33 \ln(t)$	0,07
PVB-EGI	23	218	9,07	$f_m(t) = 8,26 + 0,44 \ln(t)$	0,05
PVB-EGII	23	145	4,71	$f_m(t) = 5,66 + 0,40 \ln(t)$	0,07
PVB-EGII	23	218	11,13	$f_m(t) = 11,78 + 0,69 \ln(t)$	0,06
SGP-EGI	40	474	11,39	$f_m(t) = 9,60 + 0,63 \ln(t)$	0,07
SGP-EGII	40	257	4,13	$f_m(t) = 3,36 + 0,41 \ln(t)$	0,12
PVB-EGI	40	145	6,49	$f_m(t) = 6,03 + 0,81 \ln(t)$	0,13
PVB-EGI	40	218	12,05	$f_m(t) = 10,81 + 1,04 \ln(t)$	0,10
PVB-EGII	40	145	7,66	$f_m(t) = 6,59 + 0,93 \ln(t)$	0,14
PVB-EGII	40	218	16,01	$f_m(t) = 17,93 + 1,54 \ln(t)$	0,09

5.6 Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen

Die untersuchten unbewehrten VSG-Systeme aus ESG mit PVB weisen sowohl unter Dauerlast als auch unter kurzzeitiger Belastung keine Resttragfähigkeit im betrachteten Temperaturspektrum auf. Im Gegensatz hierzu besitzen unbewehrte VSG-Systeme mit SGP eine Resttragfähigkeit unter kurzzeitiger Belastung bei Versuchstemperaturen von 23°C bis 40°C. Bei einer Temperatur von 70°C haben auch diese Systeme keine Resttragfähigkeit unter kurzzeitiger Lasteinwirkung.

Die unbewehrten VSG-Systeme mit SGP weisen im Vier-Punkt-Biegekriechversuch lediglich bei 23°C eine Resttragfähigkeit auf. Bei einer Versuchstemperatur von 40°C sind diese vorgeschädigten VSG-Systeme nicht standsicher.

Ein in die Zwischenschicht eingebettetes Gewebe oder Lochblech steigert die Resttragfähigkeit eines VSG-Systems mit SGP oder mit PVB beträchtlich. Dies gilt sowohl bei kurzzeitiger Belastung als auch unter Dauerlast. Die Resttragfähigkeit eines bewehrten VSG-Systems nimmt jedoch mit zunehmender Bauteiltemperatur ab.

Der Vergleich der maximalen Momententragfähigkeit $m_{k,max}$ der Versuchskörper bezogen auf deren Gesamtbreite zeigt die Temperaturabhängigkeit deutlich auf (Abb. 5.44).

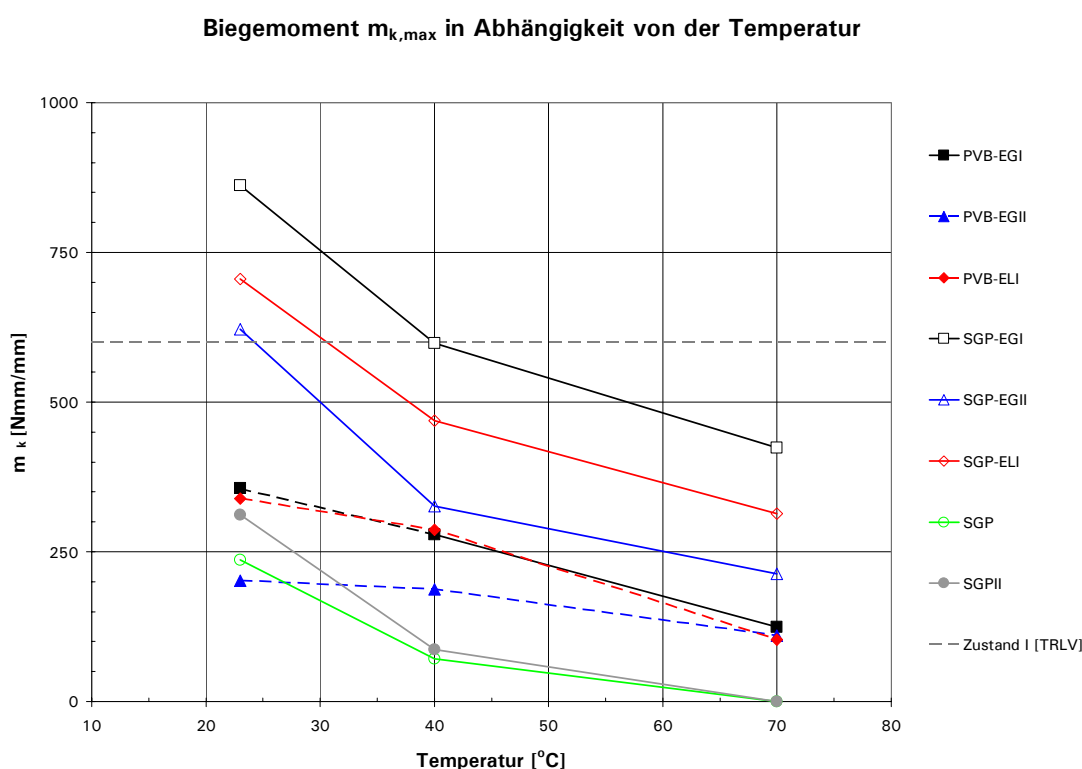


Abb. 5.44: Bruchmoment $m_{k,max}$ in Abhängigkeit zu der Versuchstemperatur T

Die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen mit SGP ist bei gleicher Versuchstemperatur stets höher als mit PVB. Bei der Verwendung der gleichen Bewehrungsart erzielt ein System mit SGP unter 70°C etwa dieselbe Resttraglast wie ein System mit PVB unter 23°C.

Bei Versuchstemperaturen von 70°C ist bei Systemen mit PVB das Resttragverhalten unter kurzzeitiger Lasteinwirkung unabhängig von der hier verwendeten Bewehrungsart. Das Tragverhalten wird dann ausschließlich vom Verbundverhalten der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix bestimmt.

Mit dem Edeltstahlgewebe EGI können auf Grund der hohen Zugsteifigkeit und Bruchspannung die höchsten Resttraglasten erzielt werden. Jedoch birgt die geringe Bruchdehnung dieses Gewebes das Risiko eines unangekündigten, plötzlichen Gewebeversagens. Demgegenüber bewirkt die

hohe Bruchdehnung von EGII ein sehr duktileres Resttragverhalten dieser VSG-Systeme. Die daraus resultierenden Verformungen können zum Abrutschen von den Auflagern und somit zum Systemkollaps führen. Die Verwendung von Lochblech ELI führt zu einer erhöhten Anfangssteifigkeit des VSG-Systems infolge der Biegesteifigkeit des Blechs. Durch die dickere PVB-Folie kommt es bei der Verwendung von ELI im Biegekriechversuch unter einer Versuchstemperatur von 40°C zu Delaminationen und schließlich zum Systemkollaps. Auch hier bestimmt das Verbundverhalten die Resttragfähigkeit.

Unterliegt ein gelenkig gelagertes VSG-System im Zustand III einer Momentenbeanspruchung, so stellt sich ein Kräftepaar – bestehend aus einer Druckkraft in den Glasfragmenten und einer Zugkraft in der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix – ein. Die Zugkraft und somit auch die Dehnung der Bewehrung bleiben dabei annähernd konstant. Die Zwischenschicht neigt jedoch zu Kriechdehnungen. Da die Zwischenschicht im Haftverbund mit dem Glas steht, nehmen die Randdehnungen im Glas $\varepsilon_{G,b}$ und in der Zwischenschicht $\varepsilon_{L,t}$ zu (Abb. 3.11). Es findet also eine Relativverschiebung zwischen der eingebetteten Bewehrung und dem Glasrand statt. Dieser nachgiebige Bewehrungsverbund bewirkt eine Verformungszunahme des VSG-Systems unter Dauerlast. Zusätzliche Verankerungen der Bewehrung am Glasaufleger können daher die Resttragfähigkeit erhöhen (Abb. 5.45).

Eine beidseitig umschließende Pressung des VSG-Systems stellt eine Möglichkeit zur Verankerung dar (Abb. 5.45 C). Jedoch ist eine Steigerung der Verbundwirkung zwischen Glas und Zwischenschicht infolge Querpressung laut [64] nur bedingt erfolgsversprechend. Die umschließende Pressung bewirkt aber eine zusätzliche Einspannung am Auflager und kann die Resttragfähigkeit steigern.

Führt man die Bewehrung aus dem VSG-System heraus, so kann sie extern verankert werden. Die Zugkraft in der Bewehrung wird durch die externe Verankerung nicht als Druckkomponente in das Glas rückverankert. Somit lässt sich die Biegetragfähigkeit des VSG-Systems im Zustand III nicht steigern. Jedoch besitzt ein solches VSG-System eine zusätzliche Membrantragwirkung. Das Herausführen und das Verankern der Bewehrung wurde für lokale Verstärkungen bei der Lasteinleitung bei Punkthaltern und bei Randlagerungen analog zu Abb. 5.45 D in [49], [50] und [51] untersucht. Die hierbei erzielten Ergebnisse sind vielversprechend, bedürfen aber weiteren Forschungsbemühungen.

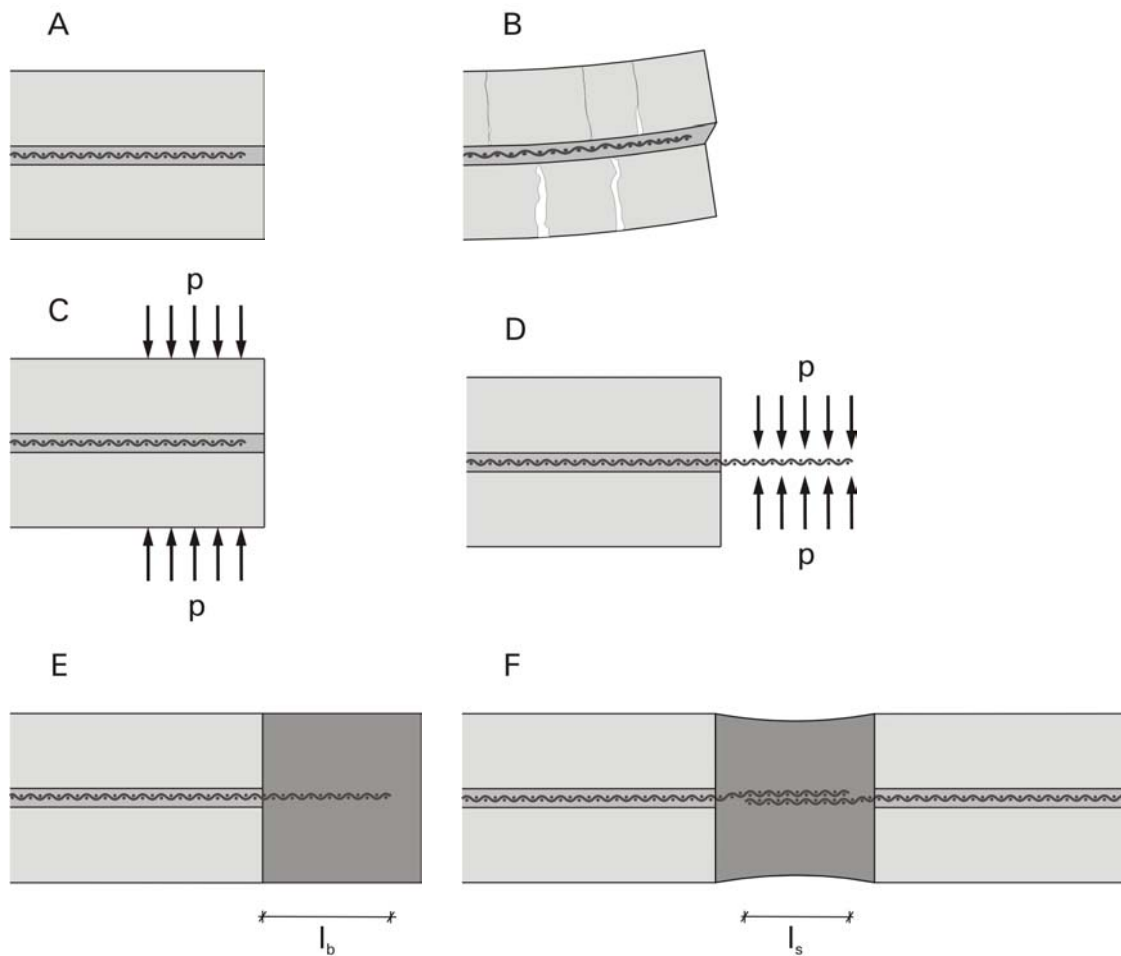


Abb. 5.45: VSG-Kante: A Zustand I, B Zustand III, C, D, F, E Verankerung

Durch den stofflichen Verbund der Bewehrung mit einer steifen Randverklebung kann eine Lasteinleitung in das Glas erfolgen. Die Zugkraft in der Bewehrung kann in das VSG-System rückverankert werden. Dabei ist die Bewehrung über die Verankerungslänge l_b eingebettet (Abb. 5.45 E und F). Denkbar ist auch die Lasteinleitung an benachbarte VSG-Systeme durch eine Übergreifungslänge l_s der Bewehrungen im stofflichen Verbund.

Die möglichen Ausbildungen der VSG-Lagerung werden in dieser Arbeit nicht weitergehend untersucht, bieten aber ein großes Potential, um die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen weiter zu steigern. Solch eine Randausbildung eines VSG-Systems kann im Zustand I auch als Lasteinleitung fungieren.

6 Berechnungsmodelle zur Ermittlung der Resttragfähigkeit

6.1 Momenten-Krümmungs-Beziehung

Die plastische Momententragfähigkeit eines VSG-Systems im Zustand III lässt sich mit Hilfe der in Kapitel 3.8 hergeleiteten Momenten-Krümmungs-Beziehung bestimmen. Diese vorhandene plastische Momententragfähigkeit eines VSG-Systems muss größer sein als die erforderliche Momententragfähigkeit, um eine Resttragfähigkeit gewährleisten zu können. Die erforderliche Momententragfähigkeit ergibt sich aus den Einwirkungen auf ein VSG-System. Sie kann mittels Fließlinientheorie für die praxisrelevanten Lagerungsbedingungen eines VSG-Systems bestimmt werden.

Zunächst wird die bilineare Momenten-Krümmungs-Beziehung eines VSG-Systems im Zustand III aufgestellt. Die Momenten-Krümmungs-Beziehung ist durch den Beginn des Fließens der Bewehrung und durch den Bruch der Bewehrung definiert. Mit der ermittelten Momententragfähigkeit des VSG-Systems kann ein Bauteilnachweis für den Grenzzustand der Resttragfähigkeit geführt werden. Die Momenten-Krümmungs-Beziehung ermöglicht zusätzlich die Berechnung diskreter Biegeverformungen mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte.

6.1.1 Schubstarrer VSG-Querschnitt

Aus der angenommenen Spannungs- und Dehnungsverteilung im VSG-Querschnitt (Abb. 3.9) lässt sich eine theoretische Momenten-Krümmungs-Beziehung ermitteln. Wird dabei der Spannungs-Dehnungsverlauf der Zwischenschicht und der Bewehrung bilinear approximiert (Abb. 3.10), so folgt für das Fließmoment $M_{v,R}$ die folgende Bedingung:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{v,R} \quad \text{wobei} \quad \varepsilon_{v,R} \leq \varepsilon_{v,L} \quad (6.1)$$

$$F_G = F_m = \varepsilon_{v,R} (E_L A_L + E_{R,1} A_R) = \varepsilon_{v,R} S \quad (6.2)$$

Die Randstauchung $\varepsilon_{G,t}$ ist:

$$\varepsilon_{G,t} = \frac{2S\varepsilon_{v,R}}{xbE_G} \quad (6.3)$$

Die Dehnungsverteilung im gegebenen Querschnitt liefert für $\varepsilon_{G,t}$:

$$\varepsilon_{G,t} = \frac{x\varepsilon_{y,R}}{d-x} \quad (6.4)$$

Somit lässt sich die Druckzonenhöhe x bestimmen:

$$x = -\frac{S}{bE_G} + \sqrt{\frac{S^2}{b^2E_G^2} + \frac{2Sd}{bE_G}} \quad (6.5)$$

Damit ermittelt sich das Fließmoment $M_{y,R}$:

$$M_{y,R} = F_m z = \varepsilon_{y,R} S \left(d - \frac{x}{3} \right) \quad (6.6)$$

$$m_{y,R} = \frac{M_{y,R}}{b} = m \quad (6.7)$$

Die zugehörige Krümmung $\kappa_{y,R}$ ergibt sich aus dem Dehnungsverlauf:

$$\kappa_{y,R,o} = \frac{\varepsilon_{y,R} + \varepsilon_{G,t}}{d} \quad (6.8)$$

Ist die Bruchdehnung $\varepsilon_{u,R}$ und somit die Bruchkraft $F_{u,R}$ der Bewehrung erreicht, so kann das Bruchmoment $M_{u,R}$ wie folgt ermittelt werden:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{u,R} \text{ wobei } \varepsilon_{u,R} \leq \varepsilon_{y,L} \quad (6.9)$$

$$F_G = F_m = \varepsilon_{u,R} E_L A_L + (\varepsilon_{u,R} - \varepsilon_{y,R}) E_{R,2} A_R + \varepsilon_{y,R} E_{R,1} A_R = \varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R} \quad (6.10)$$

Folgende Bedingungen gelten für die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,t}$:

$$\varepsilon_{G,t} = \frac{2(\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R})}{xbE_G} \quad (6.11)$$

$$\varepsilon_{G,t} = \frac{x\varepsilon_{u,R}}{d-x} \quad (6.12)$$

Somit lässt sich die Druckzonenhöhe x bestimmen:

$$x = -\frac{\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R}}{bE_G \varepsilon_{u,R}} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R}}{bE_G \varepsilon_{u,R}} \right)^2 + \frac{2d(\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R})}{bE_G \varepsilon_{u,R}}} \quad (6.13)$$

Daraus folgt das Bruchmoment $M_{u,R}$:

$$M_{u,R} = F_m z = (\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R}) \left(d - \frac{x}{3} \right) \quad (6.14)$$

Die zugehörige Krümmung $\kappa_{u,R,o}$ ergibt sich aus dem Dehnungsverlauf:

$$\kappa_{u,R,o} = \frac{\varepsilon_{u,R} + \varepsilon_{G,t}}{d} \quad (6.15)$$

Sollte die Fließdehnung in der Zwischenschicht vor dem Bruch der Bewehrung erreicht sein $\varepsilon_{u,R} \geq \varepsilon_{y,L}$, so ist in den Formeln (6.10), (6.11), (6.13) und (6.14) die Kraft in der Zwischenschicht $F_L = \varepsilon_{u,R} E_L A_L$ durch $F_L = \varepsilon_{y,L} E_L A_L$ zu ersetzen.

Die jeweils zugehörige Glasdruckspannung am Rand muss überprüft werden und sollte dabei nicht über der in [19] festgelegten Grenze liegen (Tab. 2.1).

$$\sigma_{G,t,o} = \varepsilon_{G,t} E_G \quad (6.16)$$

Die in Kapitel 5 untersuchten VSG-Systeme liefern folgende theoretische Fließmomente $M_{y,R}$ mit der zugehörigen Krümmung $\kappa_{y,R,o}$ und Glasdruckspannung $\sigma_{G,t,o}$ (Tab. 6.1):

Tab. 6.1: Momententragfähigkeit mit zugehöriger Krümmung und Glasdruckspannung

	Temperatur [°C]	$M_{y,R}$ [Nmm]	$m_{y,R}$ [Nmm/mm]	$\kappa_{y,R,o}$ [10^{-3}]	$\sigma_{G,t,o}$ [N/mm ²]
SGP-EGI	23	44.299	443	1,35	108
	40	39.122	391	1,33	101
	70	37.902	379	1,33	99
SGP-EGII	23	24.604	246	0,90	66
	40	21.073	211	0,89	60
	70	20.253	203	0,88	59
PVB-EGI	23; 40; 70	33.987	340	1,50	105
PVB-EGII	23; 40; 70	18.154	182	1,00	63
PVB-ELI	23; 40; 70	24.335	243	1,00	73

Tab. 6.2: Angenommene Elastizitätsmoduli zur Ermittlung der M - κ -Beziehung

Temperatur [°C]	$E_{L,SGP}$ [N/mm ²]	$E_{L,PVB}$ [N/mm ²]	$E_{R,1,EGI}$ [N/mm ²]	$E_{R,1,EGII}$ [N/mm ²]	$E_{R,1,ELI}$ [N/mm ²]	E_G [N/mm ²]
23	350	0	118.098	79.577	57.851	70.000
40	66,6	0	118.098	79.577	57.851	70.000
70	0	0	118.098	79.577	57.851	70.000

Der Ermittlung der theoretischen Momenten-Krümmungs-Beziehung liegen die Elastizitätsmoduli nach Tab. 6.2 zu Grunde. Die dabei angenommenen Elastizitätsmoduli der eingebetteten Bewehrung sind im einaxialen Zugversuch bestimmt. Eine Wiederverfestigung wird nicht angesetzt ($E_{R,2} = 0$). Für die PVB-Zwischenschicht wird auf Grund der geringen

Dehnsteifigkeit im betrachteten Temperaturspektrum der Elastizitätsmodul auf der sicheren Seite zu $E_{L,PVB} = 0$ angenommen. Der Elastizitätsmodul von SGP orientiert sich an den Werten nach [3].

Bei VSG-Systemen mit SGP unterschätzt die Theorie den im Versuch ermittelten Momenten-Krümmungs-Verlauf. Jedoch liefert die Theorie bis zum Erreichen der Fließspannung der Bewehrung eine auf der sicheren Seite liegende Näherung im untersuchten Temperaturspektrum (Abb. 6.1, Anhang A3).

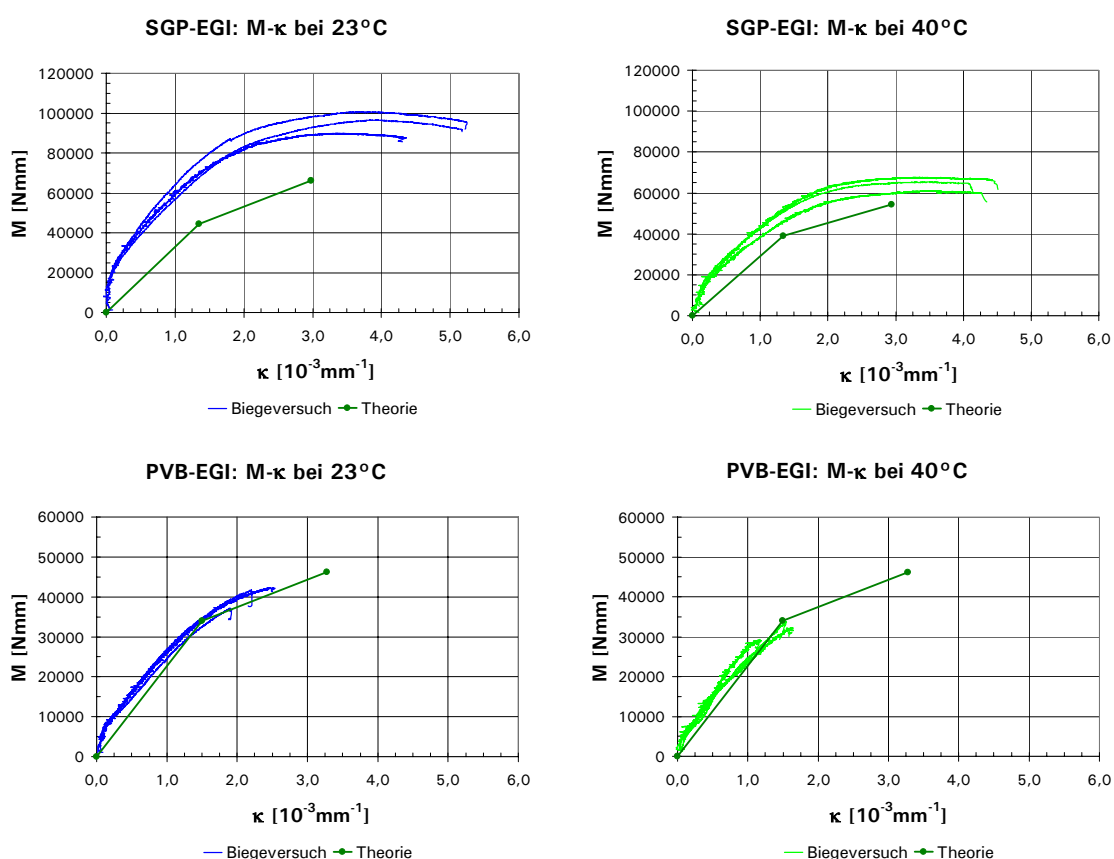


Abb. 6.1: Momenten-Krümmungs-Beziehung: Biegeversuch – Theorie

6.1.2 Nachgiebiger Bewehrungsverbund

Der Laminatquerschnitt bleibt bei lang andauernder Belastung nicht eben. Die Zwischenschicht neigt zu temperaturabhängigen Kriechverformungen [64], was insbesondere bei der Verwendung von PVB eine erhebliche Verformungszunahme zur Folge hat. Die Zwischenschichtdehnung $\varepsilon_{L,t}$ und somit die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,b}$ nehmen bei konstanter Belastung zu. Dagegen bleibt die Dehnung der Bewehrung ε_R nahezu konstant bei gleichbleibender Belastung.

Die Krümmung der fraktionierten Glasscheibe wird durch den in Kapitel 3.6.2 eingeführten Verbundfaktor α beschrieben (Abb. 6.2).

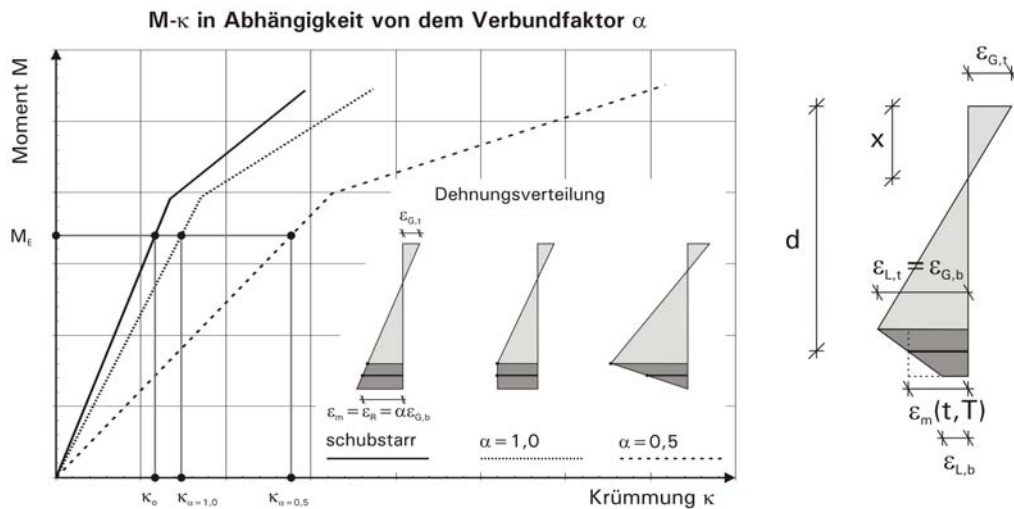


Abb. 6.2: Einfluss des Verbundfaktors α auf die Momenten-Krümmungs-Beziehung der fraktionierten Glasscheibe

Kommt es nun zum Fließen der Bewehrung, gilt für das Fließmoment $M_{y,R}$ eines gegebenen Querschnitts die folgende Bedingung:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{y,R} = \alpha \varepsilon_{G,b} \quad \text{wobei} \quad \varepsilon_{y,R} \leq \varepsilon_{y,L} \quad (6.17)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_L = \frac{\varepsilon_{L,t} + \varepsilon_{L,b}}{2} \quad (6.18)$$

Die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,b}$ wird mittels Verbundfaktor α und Fließdehnung der Bewehrung $\varepsilon_{y,R}$ linear approximiert.

Neben der Gleichung (6.3) gilt folgende Bedingungen für die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,t}$:

$$\varepsilon_{G,t} = \frac{x \varepsilon_{G,b}}{\left(d - \frac{d_m}{2} - x\right)} = \frac{x \varepsilon_{y,R}}{\alpha \left(d - \frac{d_m}{2} - x\right)} \quad (6.19)$$

Somit lässt sich die Druckzonenhöhe x bestimmen:

$$x = -\frac{S\alpha}{bE_G} + \sqrt{\frac{S^2\alpha^2}{b^2E_G^2} + \frac{2S\alpha\left(d - \frac{d_m}{2}\right)}{bE_G}} \quad (6.20)$$

Für das Fließmoment $M_{y,R}$ gilt Gleichung (6.6).

Die zugehörige Krümmung $\kappa_{y,R}$ der fraktionierten Scheibe ergibt sich aus dem Dehnungsverlauf:

$$\kappa_{y,R} = \frac{\varepsilon_{G,t} + \varepsilon_{G,b}}{d - \frac{d_m}{2}} = \kappa_{y,R}(\alpha) \quad (6.21)$$

Ist die Bruchdehnung $\varepsilon_{u,R}$ der Bewehrung erreicht, so gilt:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{u,R} = \alpha \varepsilon_{G,b} \quad \text{wobei} \quad \varepsilon_{u,R} \leq \varepsilon_{y,L} \quad (6.22)$$

Für die Glasranddehnung $\varepsilon_{G,t}$ gilt neben der Gleichung (6.11) folgende Bedingung:

$$\varepsilon_{G,t} = \frac{x \varepsilon_{G,b}}{\left(d - \frac{d_m}{2} - x\right)} = \frac{x \varepsilon_{u,R}}{\alpha \left(d - \frac{d_m}{2} - x\right)} \quad (6.23)$$

Somit lässt sich die Druckzonenhöhe x bestimmen.

$$x = - \frac{(\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R}) \alpha}{b E_G \varepsilon_{u,R}} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R}}{b E_G \varepsilon_{u,R}}\right)^2 \alpha^2 + \left(d - \frac{d_m}{2}\right) \frac{2\alpha(\varepsilon_{u,R} E_L A_L + F_{u,R})}{b E_G \varepsilon_{u,R}}} \quad (6.24)$$

Das Bruchmoment $M_{u,R}$ ermittelt sich gemäß Gleichung (6.14).

Die zugehörige Krümmung $\kappa_{u,R}$ ergibt sich aus dem Dehnungsverlauf:

$$\kappa_{u,R} = \frac{\varepsilon_{G,t} + \varepsilon_{G,b}}{d - \frac{d_m}{2}} = \kappa_{u,R}(\alpha) \quad (6.25)$$

Sollte die Fließdehnung in der Zwischenschicht vor dem Bruch der Bewehrung erreicht sein $\varepsilon_{u,R} \geq \varepsilon_{y,L}$, so ist in den Gleichungen (6.10), (6.11), (6.14) und (6.24) die Kraft in der Zwischenschicht $F_L = \varepsilon_{u,R} E_L A_L$ durch $F_L = \varepsilon_{y,L} E_L A_L$ zu ersetzen.

In Abhängigkeit vom Laminataufbau ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Krümmung κ und dem Verbundfaktor α . In Abb. 6.3 sind die Verläufe der normierten Krümmung $\bar{\kappa} = \kappa(\alpha) / \kappa_0$ in Abhängigkeit vom Verbundfaktor α bei konstanter Momentenbelastung $M_E \leq M_{y,R}$ für VSG-Systeme mit eingebettetem Edelstahlgewebe gegeben. Die Krümmung κ_0 stellt den Grenzfall des schubstarrten Bewehrungsverbunds dar. Die Graphen unterscheiden sich infolge der Laminatgeometrie, wohingegen der Gewebetyp und die Art der Zwischenschicht einen geringen Einfluss haben.

Die zeit- und temperaturabhängige Kriechverformungen der Zwischenschicht und deren Auswirkungen auf den Krümmungsverlauf lassen sich mit dem Verbundfaktor α abbilden. Der Krümmungsverlauf der fraktionierten Glasscheibe definiert die Biegeverformung des VSG-Systems im Zustand III zum Zeitpunkt t in Abhängigkeit von der Bauteiltemperatur T .

$$\kappa(t, T) = \kappa(\alpha) \quad (6.26)$$

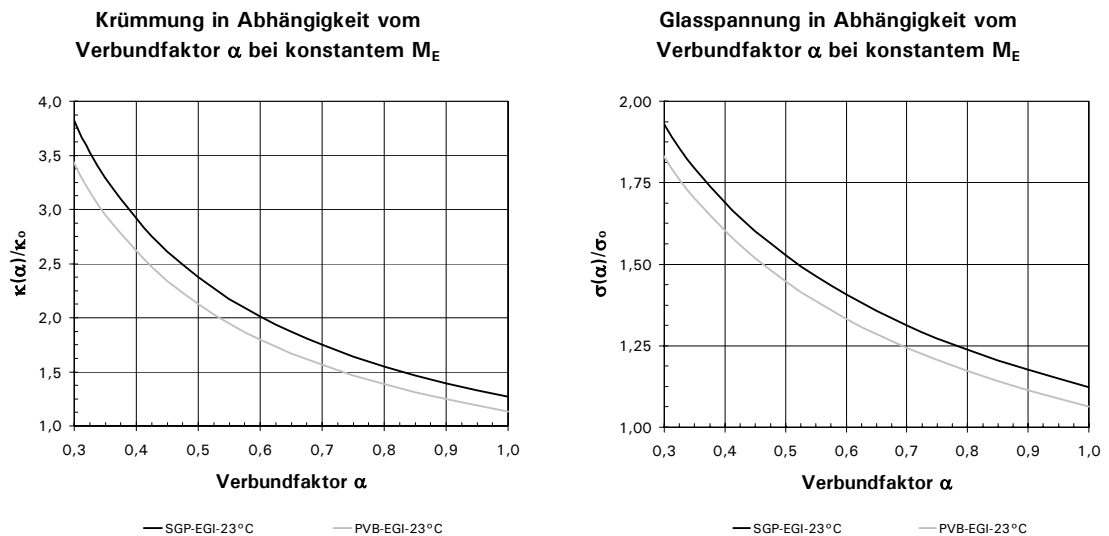


Abb. 6.3: Einfluss des Verbundfaktors α auf Krümmung und Glasrandspannung

Mit Hilfe des Verbundfaktors lässt sich die normierte Druckspannung $\bar{\sigma} = \sigma(\alpha) / \sigma_0$ am Glasrand ermitteln. Auch hier stellt σ_0 den Grenzfall der Glasrandspannung bei starrem Schubverbund dar. Ein Krümmungsanstieg bei konstanter Belastung führt demnach nicht nur zu einer Verformungszunahme, sondern auch zu einer erhöhten Glasdruckspannung.

6.1.3 Zeit- und temperaturabhängige Verformung

Die aufgestellten bilinearen Momenten-Krümmungs-Beziehungen geben den Grenzfall des schubstarken Verbunds mit der Krümmung κ_0 sowie den Fall des nachgiebigen Bewehrungsverbunds mit der Krümmung $\kappa(\alpha)$ vor. Nun gilt es, den Zusammenhang zwischen dem Verbundfaktor α und der Krümmungszunahme infolge von zeit- und temperaturabhängigen Kriechvorgängen zu definieren. Die Anfangsverformung f_{m0} lässt sich mit dem Prinzip der virtuellen Kräfte aus der Momenten-Krümmungs-Beziehung des schubstarken VSG-Querschnitts bestimmen.

$$f_{m0} = \int \frac{\bar{M} M}{EI} dx = \int \bar{M} \kappa_0 dx = \sum S_i \kappa_{0,i} \quad (6.27)$$

Die Faktoren S_i aus der Integration der Krümmungsanteile $\kappa_{0,i}$ aus der Belastung F und dem Eigengewicht g mit dem virtuellen Moment \bar{M} stellen sich für einen Vier-Punkt-Biegeversuch wie folgt dar:

$$S_{1,F} = 2 \left(\frac{l_2^2}{6} + \frac{l_1 \left(\frac{l_2}{2} + \frac{l}{4} \right)}{4} \right) \quad S_{2,g} = \frac{l^2}{9,6} \quad S_{3,g} = -\frac{l^2}{8} \quad (6.28)$$

Dabei muss für die Summe der Krümmungsanteile in Abb. 6.4 gelten:

$$\kappa_{y,R} \geq \sum \kappa_{o,i} \quad (6.29)$$

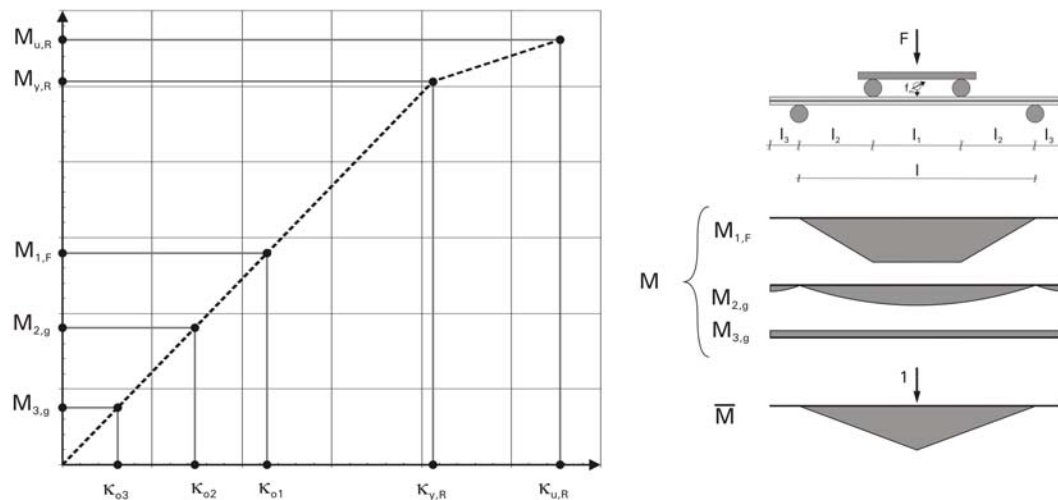


Abb. 6.4: Vier-Punkt-Biegeversuch: Momentenanteile und Krümmungen

Die Biegekriechversuche in Kapitel 5.5 liefern mit Hilfe des Kriechfaktors φ_T und der Gleichung (5.3) folgenden Zusammenhang für die Verformung f_m zum Zeitpunkt t_1 bei der Bauteiltemperatur T :

$$f_m(t_1, T) = f_{m0} (1 + \varphi_T \ln(t_1)) \quad (6.30)$$

Bei den untersuchten Lastniveaus im Biegekriechversuch gelten folgende Kriechfaktoren φ_T als obere Grenzwerte bei EGI und EGII:

Tab. 6.3: Kriechfaktoren φ_T

	23 [°C]		40 [°C]	
	EGI	EGII	EGI	EGII
SGP	0,05	0,03	0,07	0,12
PVB	0,07	0,07	0,13	0,14

Im Folgenden sind die Verformungsverläufe der Biegekriechversuche bewehrter VSG-Systeme in Abb. 6.5, Abb. 6.6, Abb. 6.7 und Abb. 6.8 gegeben. Dabei sind die gemessenen Verformungen f_m den theoretisch

ermittelten gegenübergestellt. Die errechneten Anfangsverformungen f_{m0} basieren auf der Krümmungen κ_0 . Mit Hilfe des Kriechfaktors φ_T lässt sich die Verformung f_m zum Zeitpunkt t beschreiben. Die Krümmungen sind einerseits den Kurzzeitversuchen entnommen ($\kappa_{0,V}$) und andererseits theoretisch anhand der Querschnittswerte eines schubstarreren VSG-Systems bestimmt ($\kappa_{0,Q}$). Die Graphen, die auf den theoretischen Krümmungen $\kappa_{0,Q}$ basieren, liegen erwartungsgemäß über den tatsächlichen Verläufen der Durchbiegung $f_m(t)$. Sie stellen jedoch eine Abschätzung auf der sicheren Seite dar. Das liegt an der nicht berücksichtigten höheren (Anfangs-) Biegesteifigkeit der VSG-Systeme im Zustand III (Abb. 6.1). Die Graphen, die auf den im Vier-Punkt-Biegeversuch unter kurzzeitiger Belastung ermittelten Krümmungen $\kappa_{0,V}$ beruhen, ergeben eine sehr gute Approximation der Biegekriechversuche.

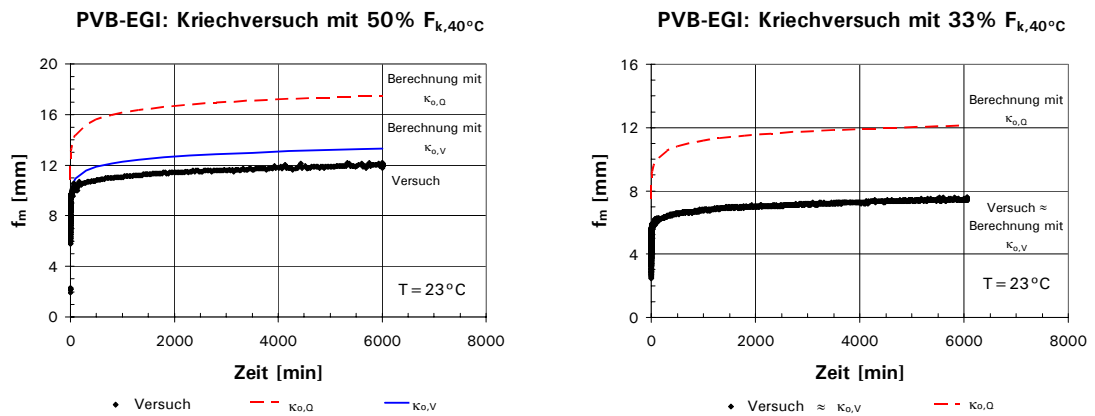


Abb. 6.5: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit PVB-EG I: Vergleich von Berechnung und Versuch

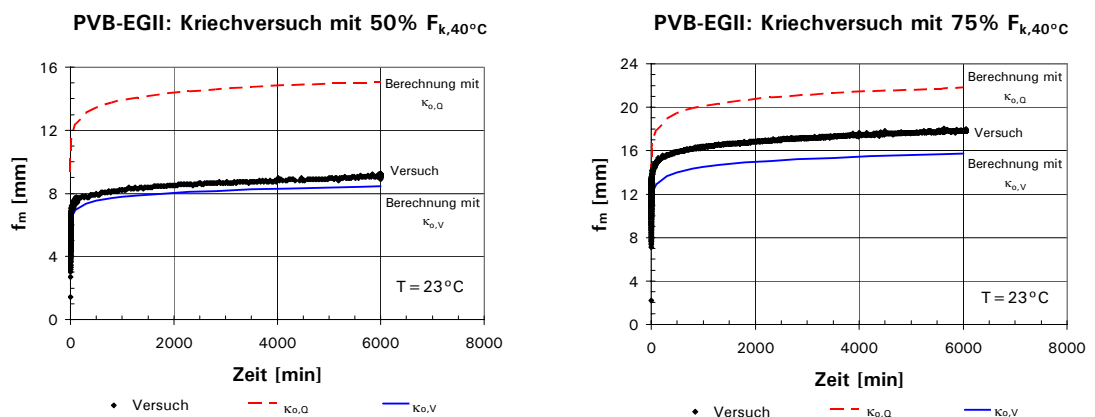


Abb. 6.6: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit PVB-EG II: Vergleich von Berechnung und Versuch

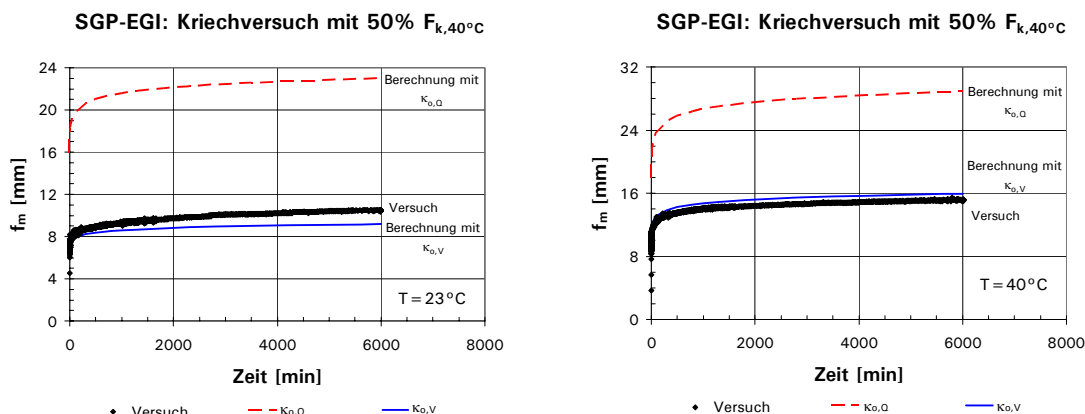


Abb. 6.7: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit SPG-EG I: Vergleich von Berechnung und Versuch

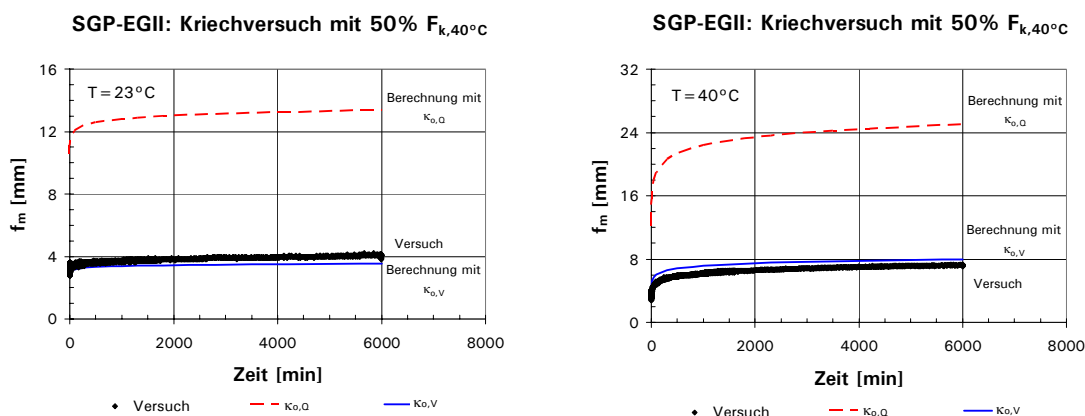


Abb. 6.8: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit SPG-EG II: Vergleich von Berechnung und Versuch

Um nun eine Aussage über die Dehnungs- und Spannungsverteilung zum Zeitpunkt t_1 machen zu können, wird die Momenten-Krümmungs-Beziehung beim nachgiebigen Bewehrungsverbund herangezogen.

Die innere Energie – auch Verzerrungsenergie – eines schubstarrten Bernoulli-Balkens setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int M \kappa dx \tag{6.31}$$

Dahingegen setzt sich die innere Energie eines schubweichen Balkens – hier nach der Theorie von Timoschenko – zusätzlich noch aus einem Schubanteil mit Querkraft V und Schubwinkel γ zusammen:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int (M \kappa + V \gamma) dx \tag{6.32}$$

Geht man nun davon aus, dass sich die Verformung f_m zum Zeitpunkt t_1 nur aus der zeit- und temperaturabhängigen Krümmung $\kappa(t_1, T) = \kappa(\alpha_1)$ des

VSG-Systems im Zustand III resultiert, so liegen die daraus ermittelte Dehnungsverteilung nach Gleichung (3.27) und (3.29) und die damit bestimmten Normalspannungen auf der sicheren Seite.

Mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte ergibt sich für die Biegekriechversuche unter der Dauerlast F eine theoretische Durchbiegung f_m zum Zeitpunkt t_1 in Feldmitte:

$$f_m(t_1, T) = \int \bar{M}\kappa(t_1, T)dx = \sum S_i \kappa_i(t_1, T) \quad (6.33)$$

Es gilt dabei Gleichung (6.27) und somit auch:

$$\kappa_i(t_1, T) = \kappa_{o,i}(1 + \varphi_T \ln(t_1)) \quad (6.34)$$

$$f_m(t_1, T) = \sum S_i \kappa_{o,i}(1 + \varphi_T \ln(t_1)) \quad (6.35)$$

Die bei der Temperatur T zum Zeitpunkt t_1 ermittelte Krümmung $\kappa(t_1, T)$ liefert nun Aufschluss über den Verbundfaktor α_1 . Mit diesem lässt sich der Spannungs- und Dehnungszustand im VSG-Querschnitt ermitteln.

$$\kappa(t_1, T) = \kappa(\alpha_1) \quad (6.36)$$

$$\frac{\bar{\kappa}}{\kappa_o} = \frac{\kappa(\alpha_1)}{\kappa_o} = \frac{\kappa(t_1, T)}{\kappa_o} = 1 + \varphi_T \ln(t_1) \quad (6.37)$$

Beispiel

Betrachten wir nun den Biegekriechversuche mit Versuchskörpertyp PVB-EGI bei einer äußeren Belastung von $F = 218$ N, dann gilt:

$$f_m(t_1) = \int \bar{M}\kappa(t_1)dx = \sum S_i \kappa_{o,i}(1 + \varphi_T \ln(t_1))$$

$$S_1 = 2 \left(\frac{125^2}{6} + \frac{150 \left(\frac{125}{2} + \frac{400}{4} \right)}{4} \right) = 17.395 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{400^2}{9,6} = 16.667 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = -\frac{400^2}{8} = -20.000 \text{ mm}^2$$

Die Krümmungen $\kappa_{o,i}$ für die einzelnen Momentenanteile M_i ergeben sich aus den bilinearen Momenten-Krümmungs-Beziehungen (Abb. 6.1) zu:

$$\kappa_{o,1}(M = 13.625\text{Nmm}) = 6 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$$

$$\kappa_{o,2}(M = 600\text{Nmm}) = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$$

$$\kappa_{o,3}(M = 38\text{Nmm}) = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{mm}^{-1}$$

Aus den Krümmungen ergibt sich die rechnerische Anfangsverformung f_{m0} in Feldmitte:

$$f_{m0} = 10,9\text{mm}$$

Diese unterscheidet sich nur geringfügig von der gemessenen Verformung im Kurzzeitversuch unter der Last $F = 218 \text{ N}$ (Tab. 5.9):

$$f_{m0,\text{Versuch}} = 9,1\text{mm}$$

Mit dem Kriechfaktors $\varphi_T = 0,07$ ergibt sich die Verformung zum Zeitpunkt $t_1 = 6.000 \text{ min}$:

$$f_m(t_1 = 6.000 \text{ min}) = 10,9\text{mm}(1 + 0,07 \ln(6.000 \text{ min})) = 17,5\text{mm}$$

Die Krümmungsänderung ist analog zur Verformungsänderung:

$$\bar{\kappa} = 1 + 0,07 \ln(6.000 \text{ min}) = 1,61$$

Die Abb. 6.3 liefert für den Versuchskörpertyp PVB-EGII zu dieser normierten Krümmung den Verbundfaktor $\alpha_1 = 0,675$.

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o} = \frac{\sigma(\alpha_1 = 0,675)}{\sigma_o} = 1,25$$

Mit der Krümmungsänderung zum Zeitpunkt $t_1 = 6.000 \text{ min}$ geht folglich eine Steigerung der Glasdruckspannung um 25% einher.

6.2 Fließlinientheorie

Die Fließlinientheorie wird zur Bestimmung der maximalen Resttragfähigkeit eines VSG-Systems herangezogen. Sie basiert auf einer Versagenshypothese, die durch die Geometrie, Lagerung und Belastungsart einer Platte gekennzeichnet ist. Diese Theorie wird insbesondere bei der Ermittlung der Tragfähigkeit von Stahlbetonplatten angewendet (Abb. 6.9). VSG-Systeme weisen analog zu Stahlbetonplatten im gebrochenen Zustand eine plastische Momententragfähigkeit gepaart mit einer Rotationskapazität auf. Die bei geeigneten Lagerungsbedingungen vorhandene Membrantragungswirkung eines VSG-Systems wird durch die Fließlinientheorie nicht erfasst.

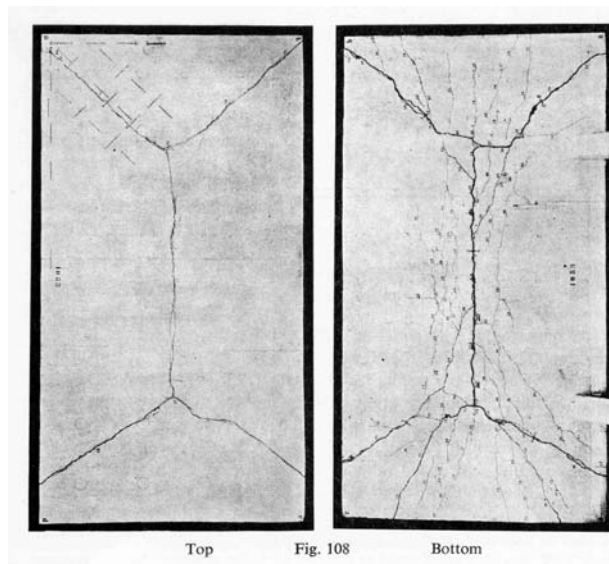


Abb. 6.9: Fließlinienbild an einer Stahlbetonplatte [29]

Aufbauend auf den Vorarbeiten von Bach, Senson, Ingerslev entwickelte Johansen die Fließlinientheorie. Seine Dissertation „Brudlinieteorier“ von 1943 wurde als „yield line theory“ ins Englische übersetzt [29]. Die Fließlinientheorie wird in der Literatur auch als Bruchlinientheorie [24] bezeichnet. Im Folgenden wird jedoch zwischen der Fließlinie und der Bruchlinie unterschieden. Die Fließlinie ist die Linie, entlang derer sich der Querschnitt plastisch verhält – die Bewehrung fließt. Die Bruchlinie hingegen ist gegeben aus der Schädigung des VSG-Systems. Sie stellt lediglich den Ort des Glasbruchs der Scheibe dar. Beim Erreichen der plastischen Resttragfähigkeit kann sich eine solche Bruchlinie zu einer Fließlinie entwickeln, dies ist jedoch nicht zwingend der Fall. Insbesondere bei einem VSG-System mit ESG sind die meisten Bruchlinien im Grenzzustand der Resttragfähigkeit keine Fließlinie.

Basierend auf der Geometrie, den Auflagerbedingungen und der äußeren Belastung wird eine Platte nach einem hypothetischen Fließlinienbild

segmentiert. Die Fließlinien stellen die Trennung der einzelnen Plattenteile voneinander dar. Entlang dieser Linien kommt es infolge von äußerer Belastung zum Fließen der Bewehrung im Querschnitt. Dieses plastische Moment m wird bei konstanter Plattendicke als konstant entlang der Fließlinie angesehen. Eine Wiederverfestigung der Bewehrung wird ausgeschlossen.

Die einzelnen Plattenteile werden als eben angenommen. Die Formänderungen der einzelnen Plattenteile – insbesondere Krümmungen derjenigen Bereiche, die sich elastisch verformen – werden somit auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt. Die Fließlinie zwischen zwei Plattenteilen verläuft durch den Schnittpunkt ihrer Drehachsen.

Beruhend auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen wird ein beliebiger Punkt der Platte senkrecht zur Plattenebene verschoben. Die Plattenteile führen nun eine Starrkörperverdrehung um die Achsen gemäß dem angenommenen Fließlinienbild durch. Daraus ergibt sich eine Gleichgewichtsbedingung für die virtuelle Arbeit der inneren und äußeren Kräfte aller Plattenteile. Dabei gilt:

$$\partial A_a = \partial W \quad (6.38)$$

Die Ermittlung der maximalen Tragfähigkeit einer Platte beruht auf der Gleichgewichtsbedingung an jedem einzelnen Plattenteil oder an der Gesamtplatte. Erstreckt sich die Betrachtung auf die Gesamtplatte, so sind die Querkräfte nicht zu berücksichtigen, da sie keinen Beitrag an der Gesamtarbeit verrichten.

Die Drehungen Θ der Plattenteile entlang der Fließlinien infolge einer virtuellen Verschiebung liefern folgende virtuelle Arbeit der inneren Kräfte ∂W :

$$\partial W = \sum m_i \Theta_i = \sum m_{ix} \Theta_{ix} + \sum m_{iy} \Theta_{iy} \quad (6.39)$$

Wenn nun z die virtuelle Verschiebungsrichtung darstellt, so setzt sich die virtuelle Arbeit der äußeren Kräfte ∂A_a wie folgt zusammen:

$$\partial A_a = \sum \int \int p_A z_i dx dy + \sum \int p_L z_i dl + \sum P z_i \quad (6.40)$$

Da das plastische Moment eines VSG-Querschnitts von dessen Aufbau und der eingebetteten Bewehrung abhängig ist, variiert dieses Fließmoment bei einem asymmetrischen Laminataufbau je nach Beanspruchung. Das plastische Feldmoment m wird im Folgenden in Abhängigkeit des plastischen Moments im Stützbereich m' ausgedrückt:

$$m = \frac{m'}{i} \quad (6.41)$$

Bei bewehrten VSG-Systemen handelt es sich meist um anisotrope Platten. Liegen die Fasern oder Drähte rechtwinklig zueinander, so spricht man von einer orthotrop bzw. orthogonal anisotrop bewehrten Platte. Die Bewehrung in beiden Richtungen verläuft zueinander im Verhältnis $1/\phi$. Verläuft die Fließlinie nun geneigt zur Bewehrungsrichtung, so ergibt sich aus dem Gleichgewicht folgende Bedingung:

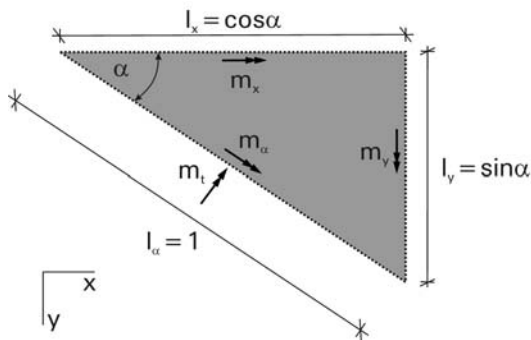


Abb. 6.10: Aufteilung des plastischen Moments m

$$m_{\alpha} = m_x \cos^2 \alpha + m_y \sin^2 \alpha \quad (6.42)$$

$$m_t = (m_x - m_y) \sin \alpha \cos \alpha \quad (6.43)$$

wobei

$$m_y = \phi m_x \quad (6.44)$$

Liegt in beiden Richtungen das gleiche plastische Moment m vor ($\phi = 1$)

$$m = m_x = m_y \quad (6.45)$$

so gilt:

$$m_{\alpha} = m(\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) = m \quad (6.46)$$

$$m_t = 0 \quad (6.47)$$

Somit lässt sich die innere Arbeit entlang einer Fließlinie der Länge l_{α} wie folgt beschreiben:

$$\partial W = m \Theta l_{\alpha} = m_x \Theta_x l_y + m_y \Theta_y l_x \quad (6.48)$$

Laut [30] und [22] lässt sich die Fragestellung bei einer orthotrop bewehrten Rechteckplatte ($m = m_x = \phi m_y$) auf ein Plattenproblem mit dem Verhältnis $m = m_x = m_y$ transformieren. Wobei für die transformierte Geometrie und die äußere Belastung gilt:

$$l'_x = l_x \frac{1}{\sqrt{\phi}} \quad (6.49)$$

$$l'_y = l_y \quad (6.50)$$

$$p'_A = p_A \quad (6.51)$$

$$p'_L = p_L \frac{1}{\sqrt{\phi \sin^2 \psi + \cos^2 \psi}} \quad (6.52)$$

Dabei ist ψ der eingeschlossene Winkel ($\leq 90^\circ$) zwischen der x-Achse und der Richtung der Linienlast.

$$P' = P \frac{1}{\sqrt{\phi}} \quad (6.53)$$

Für das plastische Moment der transformierten Platte gilt:

$$m = m_x = m_y \quad (6.54)$$

Bei der Anwendung der Fließlinientheorie wird zunächst ein Fließlinienbild hypothetisch angenommen. Die damit berechnete Trag- bzw. Resttragfähigkeit eines Systems stellt meistens einen oberen Grenzwert nach der Plastizitätstheorie dar. In weiteren Schritten wird das maßgebende Fließlinienbild ermittelt. Das unbekannte, jedoch maßgebende Fließlinienbild führt zum maximalen plastischen Moment – es gilt dabei das so genannte Maximalprinzip [24].

Die häufigste Anwendung von VSG-Systemen sind linien- oder punktförmig gelagerte Rechteckplatten. Somit lässt sich die Anzahl der möglichen Fließlinienbilder reduzieren. Definiert man das Fließlinienbild in Abhängigkeit von den geometrischen Veränderlichen x_i , so ist das erforderliche Moment eines VSG-Systems für die Resttragfähigkeit unter äußerer Belastung:

$$m = f(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (6.55)$$

Durch Differenzierung erzielt man die Extremwerte x_i und daraus das maßgebende Fließlinienbild mit dem erforderlichen plastischen Moment m_{req} zur Sicherstellung der Resttragfähigkeit. Die hierbei ermittelten Extremwerte sind auf ihre Geometriekonformität zu prüfen.

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 \rightarrow m_{\text{req}} \quad (6.56)$$

Die erforderliche Bewehrung im VSG-System lässt sich aus der Geometrie, der Lagerung und der äußeren Belastung bestimmen, um die geforderte Resttragfähigkeit zu gewährleisten.

Da das plastische Moment eines VSG-Systems jedoch zeit- und temperaturabhängig ist, muss definiert werden, unter welchen Temperatureinflüssen das VSG-System die geforderte Resttragdauer sicherstellen muss.

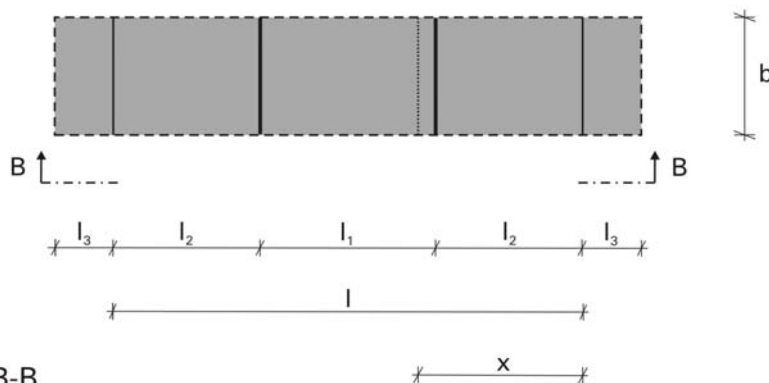
$$m_{y,R}(t, T) \geq m_{\text{req}} \quad (6.57)$$

Das vorhandene plastische Moment $m_{y,R}$ eines VSG-Systems lässt sich aus dem Laminataufbau theoretisch bestimmen (z.B. Abb. 6.1). Es stellt den Beginn der plastischen Verformung der Bewehrung und der Rotation im Fließgelenk dar. Das plastische Moment ist nicht zu verwechseln mit dem Bruchmoment $m_{u,R}$ beim Erreichen der maximalen Resttragfähigkeit des Systems. Auch in [32] wird die Fließlinientheorie bei unbewehrten VSG-Systemen aus Floatglas und TVG im Zustand III herangezogen. Die Fließlinientheorie dient dabei lediglich zur Beschreibung der erzielten Versuchsergebnisse. Dagegen wird sie in der hier vorliegenden Arbeit zur Ermittlung der erforderlichen plastischen Momententragfähigkeit bei unbekanntem Versagenszenario herangezogen.

6.2.1 Vier-Punkt-Biegeversuch gemäß Fließlinientheorie

Betrachten wir nun den Vier-Punkt-Biegeversuch mit den zwei Linienlasten p_L und der Flächenlast p_A (Abb. 6.11).

A-A



B-B

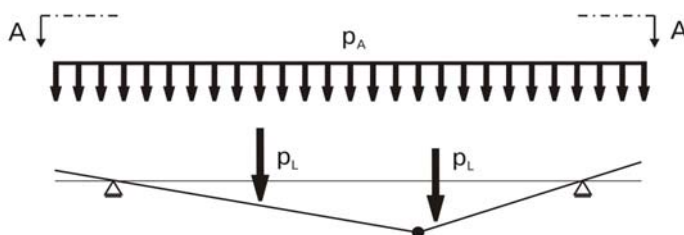


Abb. 6.11: Fließlinienbild des Vier-Punkt-Biegeversuchs: A-A Draufsicht, B-B Ansicht

Aus der virtuellen Arbeit der inneren und äußeren Kräfte berechnet sich das erforderliche plastische Moment m_{req} des VSG-Querschnitts.

$$\partial W = mb \left(\frac{l}{x(l-x)} \right) \quad (6.58)$$

$$\partial A_a = p_L b l_2 \left(\frac{l}{x(l-x)} \right) - p_A b l_3^2 \left(\frac{l}{2x(l-x)} \right) + p_A b \frac{l}{2} \quad (6.59)$$

Mit der Bedingung $\partial A_a = \partial W$ folgt:

$$m_{\text{req}} = p_L l_2 - p_A \frac{l_3^2}{2} + p_A \frac{x(l-x)}{2} \quad (6.60)$$

Aus der Extremwertbetrachtung $\frac{\partial m}{\partial x} = 0$ ergibt sich für die Lage der maßgebenden Fließlinie die folgende Geometriebedingung:

$$x = \frac{l}{2} \quad (6.61)$$

Das erforderliche plastische Moment m_{req} beträgt hierfür:

$$m_{\text{req}} \left(x = \frac{l}{2} \right) = p_L l_2 + p_A \left(\frac{l^2}{8} - \frac{l_3^2}{2} \right) \quad (6.62)$$

Übertragen wir dieses Ergebnis auf die Vier-Punkt-Biegeversuche, so wäre das ungünstigste Versagensszenario eine Fließlinie in der Feldmitte. Dieses Szenario liefert mit den Einwirkungen $F = 2p_L b$ und $g = p_A$ das erforderliche Bemessungsmoment m_{req} . Liegt keine Flächenlast p_A vor, so liegt die mögliche Fließlinie an einem beliebigen Ort zwischen den beiden Linienlasten. Bei den Versuchen in Kapitel 5 liegen die Rotationspunkte und die Orte eines evtl. Versagens der Bewehrung-Zwischenschicht-Matrix stets unter oder zwischen den beiden Lastschneiden.

6.2.2 Resttragfähigkeit bei Rechteckplatten unter Flächenlast

Eine Flächenlast p_A stellt bei einer Verglasung – insbesondere wenn diese Überkopf angeordnet ist – die häufigste Einwirkung dar. Daher sollte diese mit der erforderlichen plastischen Momententragfähigkeit m_{req} bemessen sein, um eine Resttragfähigkeit zu gewährleisten. Im Folgenden wird diese mittels Fließlinientheorie ermittelt. Es werden dabei die gebräuchlichsten Lagerungsarten für Rechteckplatten im konstruktiven Glasbau diskutiert und die erforderliche plastische Momententragfähigkeit m_{req} in Abhängigkeit des Seitenverhältnisses a/b ermittelt.

Vierseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte:

Bei dem gegebenen Fließlinienbild (Abb. 6.12 A) einer allseits gelenkig gelagerten Rechteckplatte mit dem Seitenverhältnis a/b gilt für die innere virtuelle Arbeit:

$$\partial W = 2m \left(\frac{a}{x} + \frac{2b}{a} \right) \quad (6.63)$$

Die virtuelle Arbeit der äußeren Kräfte ∂A_a setzt sich wie folgt zusammen:

$$\partial A_a = p_A a \left(\frac{b}{2} - \frac{x}{3} \right) \quad (6.64)$$

Daraus ergibt sich das erforderliche plastische Moment m_{req} :

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A a^2 (3xb - 2x^2)}{12(a^2 + 2bx)} \quad (6.65)$$

Das Maximalprinzip liefert für das maßgebende Fließlinienbild die Geometriebedingung:

$$x = -\frac{a^2}{2b} + \frac{a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + 3} \quad \text{wobei } b \geq a \quad (6.66)$$

Für $a = 1$ und $b \rightarrow \infty$ nähert sich das erforderliche plastische Moment dem einer zweiseitig gelenkig gelagerten Platte an (Abb. 6.12 B):

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A a^2}{8} \quad (6.67)$$

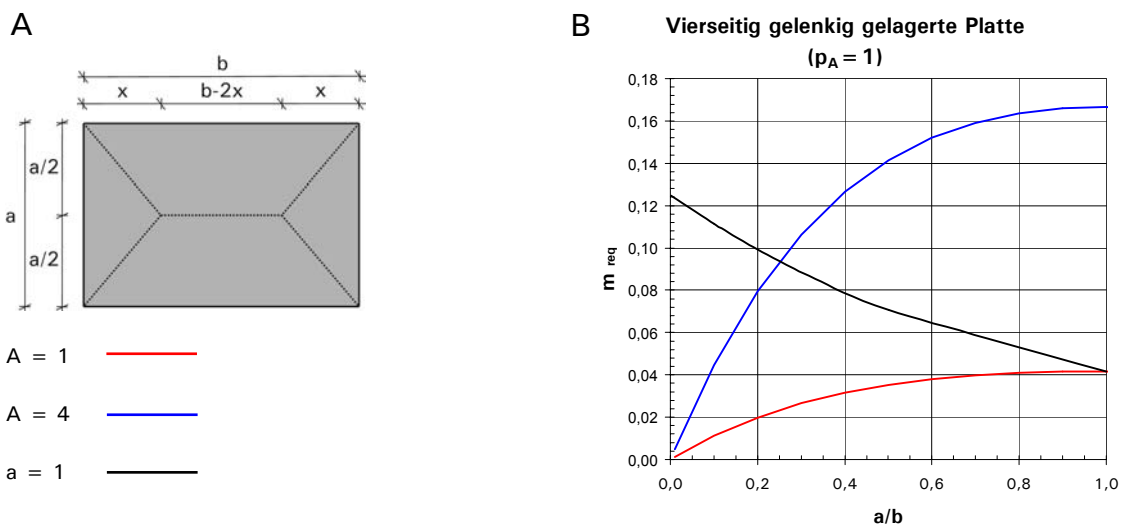


Abb. 6.12: A Fließlinienbild bei Flächenlast p_A , B zugehöriges m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit Flächenlast p_A

Bei gelenkig gelagerten Plattenecken können unterschiedliche Fließlinienbilder auftreten. So kann es zu einer Bruchlinienverzweigung im Eckbereich kommen. Ist eine Ecke nicht gegen Abheben gesichert, so kann ein um die Achse 1-1 drehbarer Plattenteil III – die so genannte Wippe – auftreten (Abb. 6.13 B). Bei einer Behinderung dieser Wippe z.B. durch eine Pressleiste bei einem VSG-System ergibt sich eine weitere Fließlinie entlang der Achse 1-1 gemäß Abb. 6.13 C. Besitzt die Platte jedoch eine ausreichende plastische Momententragfähigkeit m' , so mindert diese Bruchlinienverzweigung im Eckbereich die Gesamttragfähigkeit der Platte

nicht ab. In [29] und [24] wird der Einfluss dieser Auffächerung der Fließlinie im Eckbereich auf die Gesamttragfähigkeit untersucht. Demnach wirkt sich eine Bruchlinienverzweigung im Eckbereich bei bewehrten VSG-Systemen mit symmetrischem Laminataufbau ($m = m'$) nicht ungünstig auf die Gesamttragfähigkeit aus. Daher lässt sich das erforderliche plastische Moment m_{req} gemäß den Gleichungen (6.65) und (6.66) bestimmen.

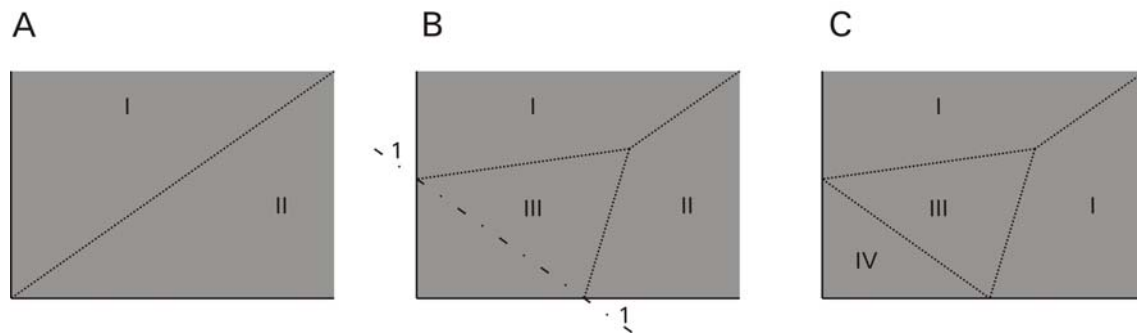


Abb. 6.13: Plattenecke: A ohne Auffächerung, B Auffächerung mit Wippe um Drehachse 1-1, C Auffächerung mit zusätzlicher Fließlinie

Dreiseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte mit freiem Rand:

Je nach Seitenverhältnis a/b sind unterschiedliche Fließlinienbilder für das maximal erforderliche Bemessungsmoment (Abb. 6.14) maßgebend. Das erforderliche plastische Moment m_{req} für das Fließlinienbild im Fall 1 ergibt sich wie folgt:

$$\partial W = m \left(\frac{4b}{a} + \frac{a}{x} \right) \quad (6.68)$$

$$\partial A_a = p_A b a \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{6b} \right) \quad (6.69)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A a^2 x (3b - x)}{6(4bx + a^2)} \quad (6.70)$$

Das Maximalprinzip liefert die Geometriebedingung x für das erforderliche m_{req} :

$$x = -\frac{a^2}{4b} + \frac{a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} + 3} \quad (6.71)$$

Bei anwachsenden Seitenverhältnissen von a/b wird Fließlinienbild 2 maßgebend:

$$\partial W = m \left(\frac{4b}{a-x} + \frac{a-x}{b} \right) \quad (6.72)$$

$$\partial A_a = p_A b \left(\frac{a}{3} + \frac{x}{6} \right) \quad (6.73)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A b^2 (2a + x)(a - x)}{6(4b^2 + (a - x)^2)} \quad (6.74)$$

Dies gilt infolge des Maximalprinzips für die Geometriebedingung:

$$x = \frac{4b^2}{3a} + a - \frac{2b}{3} \sqrt{\frac{4b^2}{a^2} + 9} \quad (6.75)$$

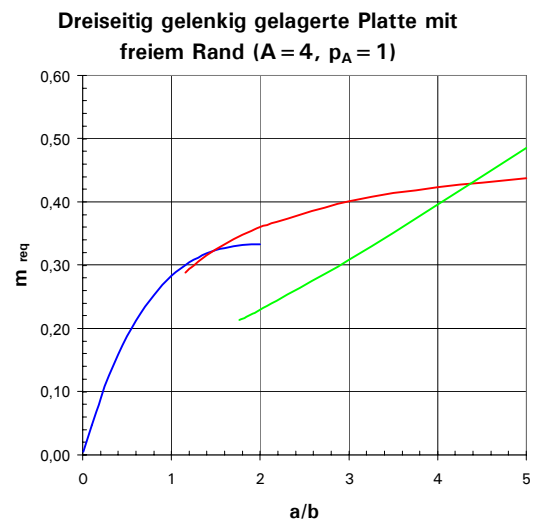
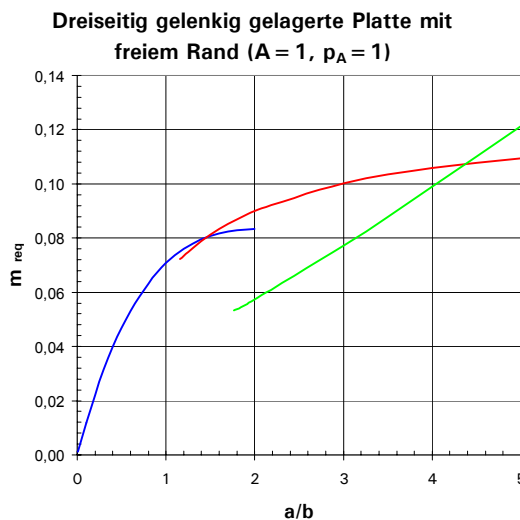
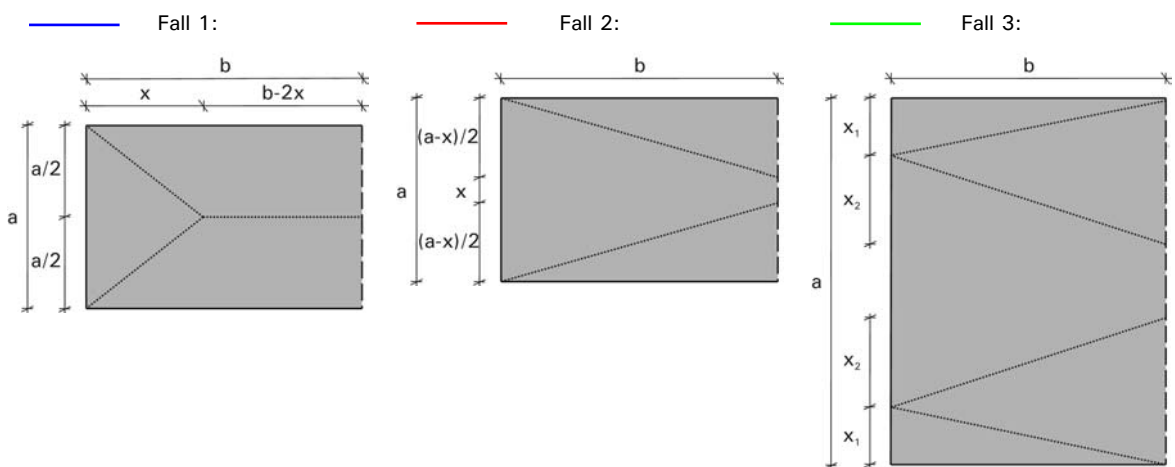


Abb. 6.14: Fließlinienbilder mit erforderlichen plastischen Momenten m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit zugehöriger Flächenlast p_A ($i = 1$)

Besitzt die Rechteckplatte einen verhältnismäßig langen freien Rand a (Abb. 6.14 Fall 3), so liefert das in [30] gegebene Fließlinienbild das maßgebende Bemessungsmoment:

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A}{64} \left(\frac{4b^2}{3} + \frac{3a^2}{1+i} \right) \quad (6.76)$$

Rechteckplatte mit zweiseitig gelenkiger Lagerung und zwei freien Rändern:

Das Maximalprinzip liefert den ungünstigsten Fall mit der Fließlinie in Feldmitte. Die Drehachsen der beiden Plattenteile verlaufen dabei entlang der Randauflager.

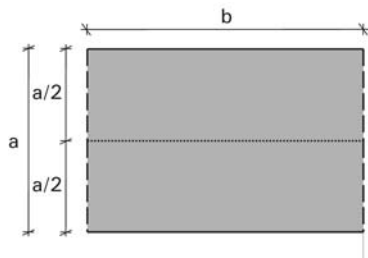


Abb. 6.15: Fließlinienbild bei Flächenlast p_A ($x = a/2$)

$$\partial W = mb \left(\frac{1}{a-x} + \frac{1}{x} \right) \quad (6.77)$$

$$\partial A_a = \frac{p_A ba}{2} \quad (6.78)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A x(a-x)}{2} \quad (6.79)$$

Das Maximalprinzip liefert die Geometriebedingung:

$$x = \frac{a}{2} \quad (6.80)$$

Das erforderliche plastische Moment m_{req} beträgt hierfür:

$$m_{\text{req}} \left(x = \frac{a}{2} \right) = \frac{p_A a^2}{8} \quad (6.81)$$

Einseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte mit zwei Punktlagern in den Ecken

Das maßgebende Fließlinienbild (Abb. 6.16) ergibt sich aus dem Seitenverhältnis a/b . Für den Fall 1 gilt:

$$\partial W = mb \left(\frac{1}{a-x} + \frac{1}{x} \right) \quad (6.82)$$

$$\partial A_a = \frac{p_A ba}{2} \quad (6.83)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A x(a-x)}{2} \quad (6.84)$$

Das Maximalprinzip liefert die Geometriebedingung:

$$x = \frac{a}{2} \quad (6.85)$$

Das erforderliche plastische Moment m_{req} beträgt hierfür:

$$m_{\text{req}} \left(x = \frac{a}{2} \right) = \frac{p_A a^2}{8} \quad (6.86)$$

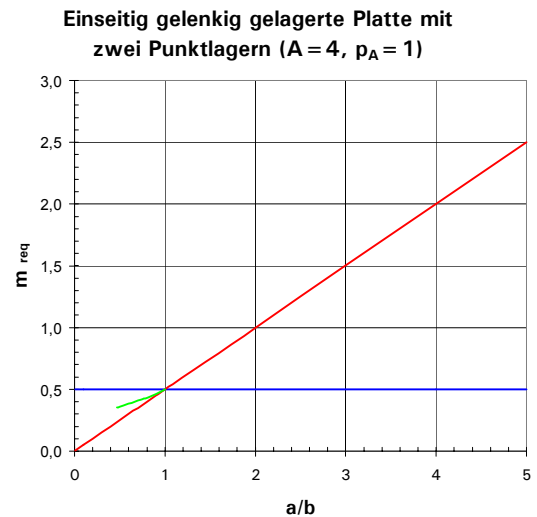
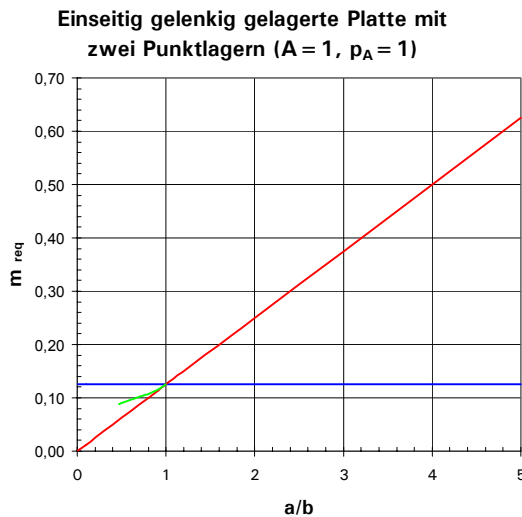
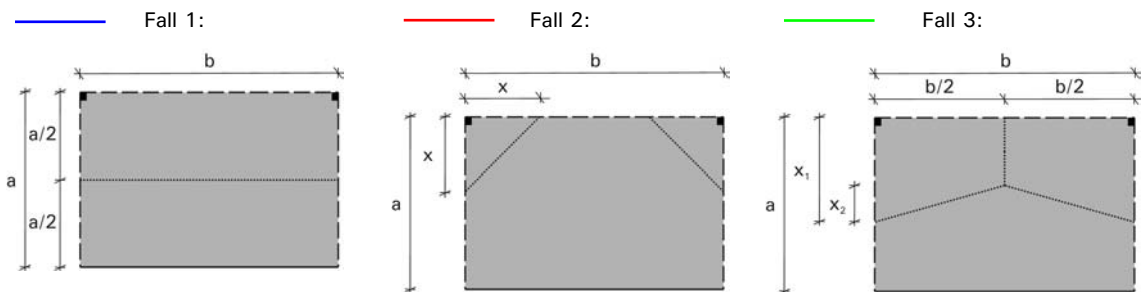


Abb. 6.16: Fließlinienbilder mit erforderlichen plastischen Momenten m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit zugehöriger Flächenlast p_A

Ab einem Seitenverhältnis von $a/b > 1$ wird der Fall 2 maßgebend. Das Fließlinienbild kann sich um die Punktlagerungen, die letztendlich Punktlasten darstellen, ausbilden. Die dortige Auflagerlast S ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung zu:

$$S = \frac{p_A b a}{4} \quad (6.87)$$

Das erforderliche Bemessungsmoment m_{req} ergibt sich hierfür analog zu den in Kapitel 6.2.3 diskutierten Platten unter Punktlasten:

$$m_{\text{req}} = \frac{S}{2} = \frac{p_A b a}{8} \quad (6.88)$$

Ein weiteres mögliches Versagensszenario stellt der Fall 3 dar. Dieses Fließlinienbild liefert jedoch ein geringeres erforderliches plastisches Moment m_{req} als die vorangegangenen Fälle. Das aufgestellte Gleichgewicht der einzelnen Plattenteile führt zu dem in [30] gegebenen m_{req} :

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A b^2}{24x_1} (3x_1 - 2x_2) \quad (6.89)$$

Die kubischen Gleichung für die Geometrievariable x_1 lässt sich mit Hilfe der Cardanischen Formel lösen:

$$0 = x_1^3 - \frac{b^2}{a} x_1^2 - \frac{b^4}{12a^2} x_1 + \frac{b^4}{6a} \quad (6.90)$$

Die Variable x_2 ergibt sich in Abhängigkeit der Seitenlängen a und b sowie x_1 :

$$x_2 = \frac{3}{2} x_1 - 3 \frac{a}{b^2} x_1^2 \quad (6.91)$$

Rechteckplatte mit vier Punktlagerungen

Analog zur zweiseitig gelenkig gelagerten Platte mit zwei freien Rändern kann eine mittige Fließlinie zum Versagen führen. Die Drehachsen der beiden Plattenteile verlaufen durch die Auflagerpunkte und schneiden sich hierbei nicht (Abb. 6.17 Fall 1). Dieses Versagensszenario liefert dasselbe erforderliche plastische Moment wie Fall 2. Bei diesem Fließlinienbild schneiden sich die Drehachsen, die jeweils durch die Auflagerpunkte verlaufen, außerhalb der Platte.

Fall 1 liefert:

$$\partial W = mb \left(\frac{1}{a-x} + \frac{1}{x} \right) \quad (6.92)$$

$$\partial A_a = \frac{p_A b a}{2} \quad (6.93)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A x(a-x)}{2} \quad (6.94)$$

Das Maximalprinzip liefert die Geometriebedingung:

$$x = \frac{a}{2} \quad \text{wobei } a \geq b \quad (6.95)$$

Das erforderliche plastische Moment m_{req} beträgt hierfür:

$$m_{\text{req}}\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{p_A a^2}{8} \quad (6.96)$$

Das erforderliche plastische Moment im Fall 2 ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht an den einzelnen Plattenteilen, wobei a die längere der beiden Seiten der Rechteckplatte darstellt.

$$m\left(\frac{b}{2}\right) = \frac{p_A b a}{4} \left(\frac{a}{2}\right) - \frac{p_A b a}{4} \left(\frac{a}{4}\right) \quad (6.97)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A a^2}{8} \quad \text{wobei } a \geq b \quad (6.98)$$

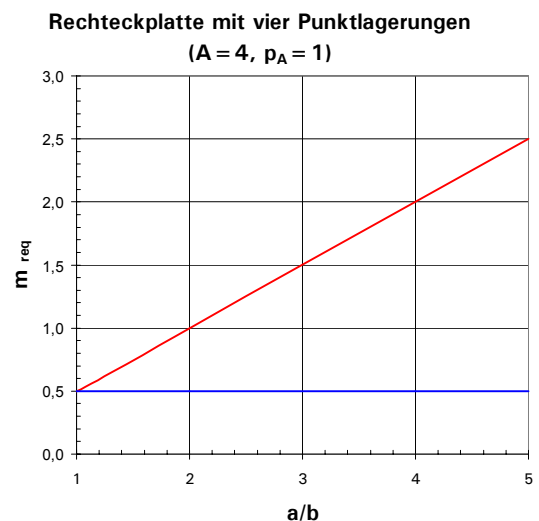
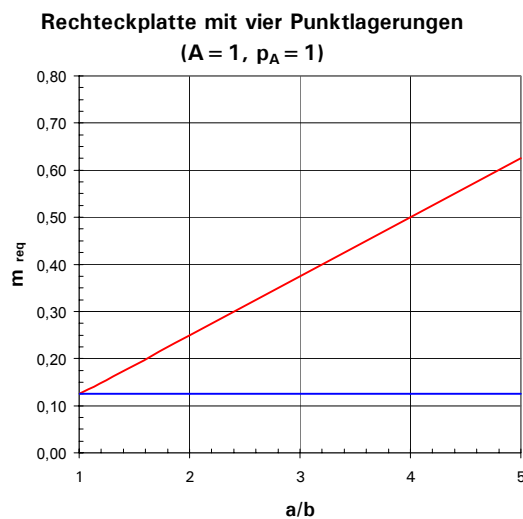
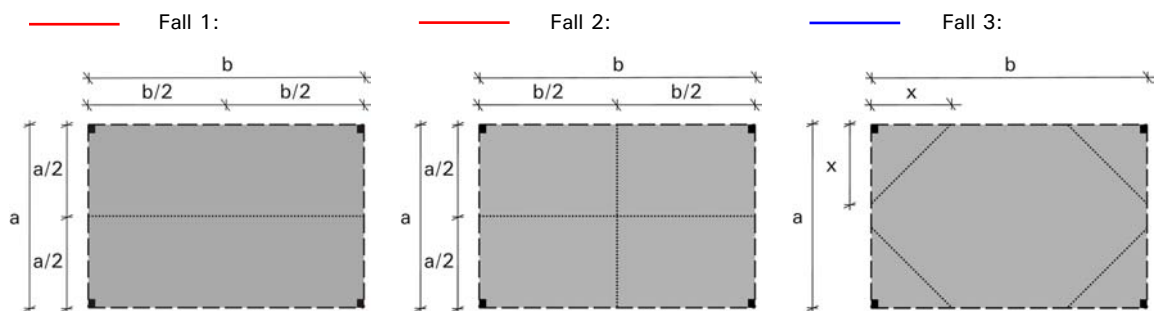


Abb. 6.17: Fließlinienbilder mit erforderlichen plastischen Momenten m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit zugehöriger Flächenlast p_A

Anhand der vier Auflagerkräften S an den Plattenecken lässt sich das erforderliche plastische Moment unabhängig von der Geometriebedingung x herleiten. Dabei gibt es eine Analogie zur Fließlinie bei einer Punktlast am Plattenrand (Kapitel 6.2.3)

$$S = \frac{p_A b a}{4} \quad (6.99)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{S}{2} = \frac{p_A b a}{8} \quad (6.100)$$

Dieser Sonderfall ist lediglich für eine Quadratplatte $a = b$ maßgebend und führt dabei zum gleichen erforderlichen Fließmoment m_{req} wie Fall 1 und 2.

Vierseitig eingespannte Rechteckplatte

Die Randeinspannung liefert im Vergleich zur gelenkigen Randlagerung ein redundanteres System. Das Fließlinienbild einer vierseitig eingespannten Rechteckplatte liefert erwartungsgemäß eine geringere erforderliche plastische Momententragfähigkeit.

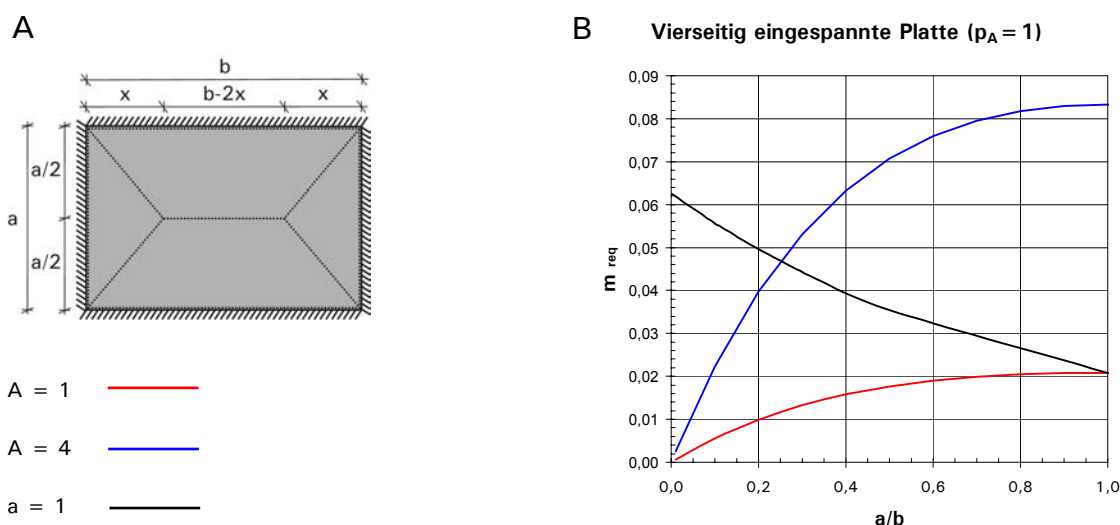


Abb. 6.18: A Fließlinienbild bei Flächenlast p_A , B zugehöriges m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit Flächenlast p_A ($i = 1$)

$$\partial W = 2m \left(\frac{a(1+i)}{x} + \frac{2b(1+i)}{a} \right) \quad (6.101)$$

$$\partial A_a = p_A a \left(\frac{b}{2} - \frac{x}{3} \right) \quad (6.102)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A a^2 (3xb - 2x^2)}{12(a^2 + a^2 i + 2bx + 2bix)} \quad (6.103)$$

Auf Grund des Maximalprinzips ergibt sich das erforderliche plastische Moment für folgende Geometriebedingung x :

$$x = -\frac{a^2}{2b} + \frac{a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{b^2} + 3} \quad \text{wobei } b \geq a \quad (6.104)$$

Dreiseitig eingespannte Rechteckplatte mit freiem Rand

Je nach Seitenverhältnissen sind unterschiedliche Fließlinienbilder für die Bemessung der Resttragfähigkeit ausschlaggebend (Abb. 6.19).

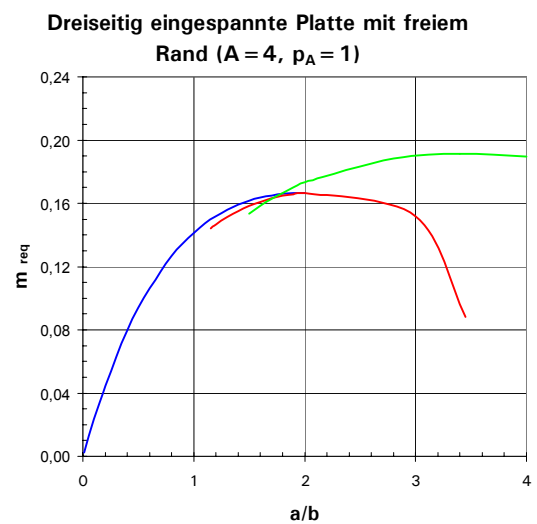
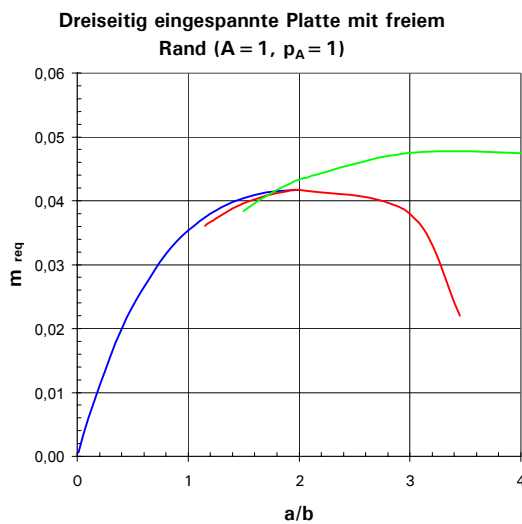
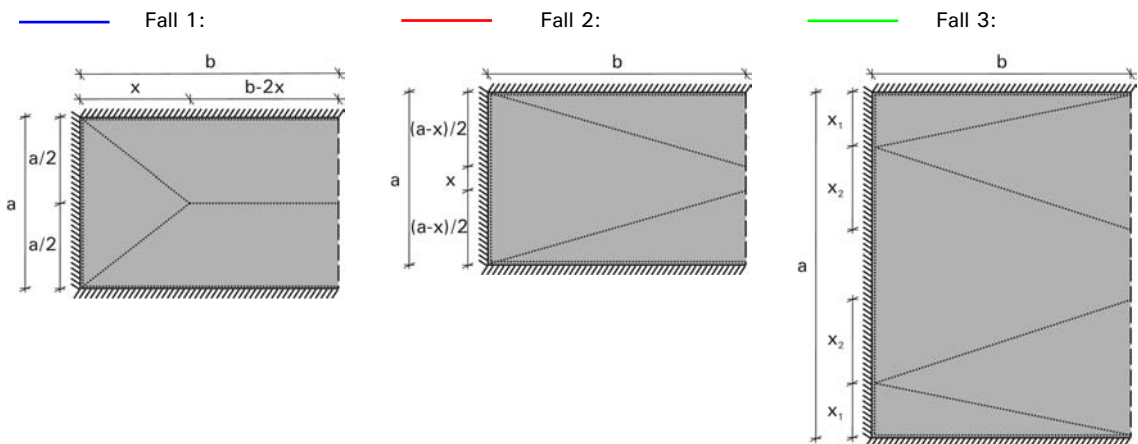


Abb. 6.19: Fließlinienbilder mit erforderlichen plastischen Momenten m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit zugehöriger Flächenlast p_A ($i = 1$)

Für den Fall 1 gilt:

$$\partial W = m \left(\frac{4b(1+i)}{a} + \frac{a(1+i)}{x} \right) \quad (6.105)$$

$$\partial A_a = p a \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{6b} \right) \quad (6.106)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A b a^2 x (3b - x)}{6b(4bx + a^2)(1+i)} \quad (6.107)$$

Dies gilt infolge des Maximalprinzips für die Geometriebedingung:

$$x = -\frac{a^2}{4b} + \frac{a}{2} \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} + 3} \quad (6.108)$$

Der Fall 2 ist nicht maßgebend, ist jedoch zur Vollständigkeit hier aufgeführt:

$$\partial W = m \left(\frac{4b(1+i)}{a-x} + \frac{a-x}{b} + \frac{ia}{b} \right) \quad (6.109)$$

$$\partial A_a = pb \left(\frac{a}{3} + \frac{x}{6} \right) \quad (6.110)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A b^2 (2a+x)(a-x)}{6(4b^2 + (a-x)^2 + 4b^2 i + ai(a-x))} \quad (6.111)$$

Dies gilt infolge des Maximalprinzips für die Geometriebedingung:

$$x = -\frac{v}{2} \pm \sqrt{\frac{v^2}{4} - w} \quad (6.112)$$

wobei

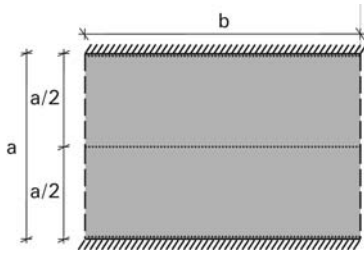
$$v = -\frac{6a^2 + 8b^2 + 4a^2 i + 8b^2 i}{3ai + 3a} \quad (6.113)$$

und

$$w = \frac{3a^3 + a^3 i - 4ab^2 - 4ab^2 i}{3ai + 3a} \quad (6.114)$$

Die Fließlinienfigur im Fall 3 liefert das folgende maßgebende Bemessungsmoment. Dieses lässt sich gemäß [30] beschreiben:

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A ab}{\left(3 + 12 \frac{b\sqrt{1+i}}{a} + 2i + \frac{ai}{b\sqrt{1+i}} \right) \sqrt{1+i}} \quad (6.115)$$

Zweiseitig eingespannte RechteckplatteAbb. 6.20: Fließlinienbild bei Flächenlast p_A ($x = a/2$)

Das Maximalprinzip liefert eine Fließlinie in Feldmitte mit dem folgenden erforderlichen plastischen Moment ($i = 1$):

$$\partial W = 2mb \left(\frac{1}{a-x} + \frac{1}{x} \right) \quad (6.116)$$

$$\partial A_a = p_A b \frac{a}{2} \quad (6.117)$$

$$m_{\text{req}} = p_A \frac{x(a-x)}{4} \quad (6.118)$$

Das Maximalprinzip liefert die Geometriebedingung:

$$x = \frac{a}{2} \quad (6.119)$$

Das erforderliche plastische Moment m_{req} beträgt hierfür:

$$m_{\text{req}} \left(x = \frac{a}{2} \right) = \frac{p_A a^2}{16} \quad (6.120)$$

Einseitig eingespannte Rechteckplatte mit zwei Punktlagern in den Ecken

Es ergeben sich unterschiedliche Versagensszenarien, die sich in Abhängigkeit der Seitenverhältnisse durch folgende Fließlinienbilder beschreiben lassen (Abb. 6.21).

Für den Fall 1 gilt:

$$\partial W = mb \left(\frac{1+i}{a-x} + \frac{1}{x} \right) \quad (6.121)$$

$$\partial A_a = \frac{p_A ba}{2} \quad (6.122)$$

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A ax(a-x)}{2(ix+a)} \quad (6.123)$$

Dies gilt infolge des Maximalprinzips für die Geometriebedingung:

$$x = -\frac{a}{i} + a\sqrt{\left(\frac{1}{i^2} + \frac{1}{i}\right)} \quad (6.124)$$

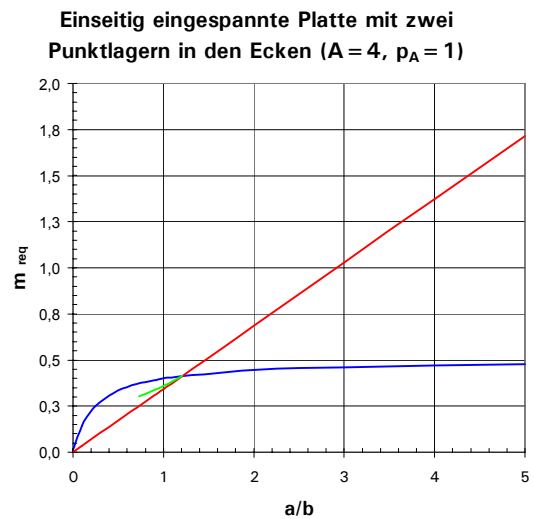
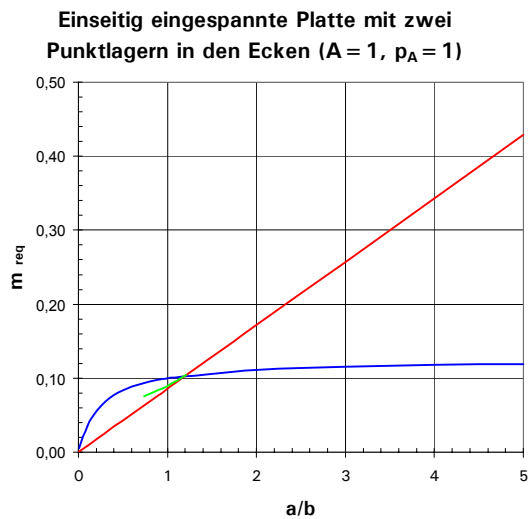
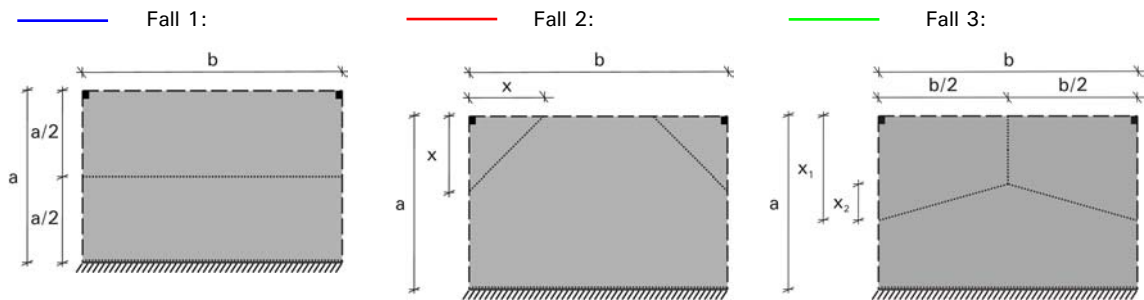


Abb. 6.21: Fließlinienbilder mit erforderlichen plastischen Momenten m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche A mit zugehöriger Flächenlast p_A ($i = 1$)

Das Fließlinienbild kann sich auch um die Punktauflager, die letztendlich eine Punktlast darstellen, ausbilden. Im Fall 2 ergibt sich die Auflagerlast S am Punktlager aus der vertikalen Gleichgewichtsbedingung:

$$S = \frac{p_A b a}{4} - \frac{b m}{2a} \quad (6.125)$$

Wird die Flächenlast vernachlässigt und nur auf der sicheren Seite die Ecke mit der Punktlast S betrachtet, so ist für $m' = m$ das erforderliche Bemessungsmoment:

$$m_{req} = \frac{S}{2} = \frac{p_A b a^2}{8a + 2b} \quad (6.126)$$

Es kann sich jedoch auch das Fließlinienbild im Fall 3 einstellen. Dabei führt das Gleichgewicht der einzelnen Plattenteile zu der in [30] gegebenen kubischen Gleichung:

$$0 = \left(i^2 - \frac{3}{4} \left(4 \frac{a^2}{b^2} - i \right)^2 \right) \left(\frac{x_1}{a} \right)^3 + \left(i + 12 \frac{a^2}{b^2} \right) \left(\frac{x_1}{a} \right)^2 + (1+i) \frac{x_1}{a} - 2 \quad (6.127)$$

Diese lässt sich mit Hilfe der Cardanischen Formel lösen und so ergibt sich die geometrische Variable x_2 :

$$x_2 = \frac{3x_1 \left(2 - \frac{x_1}{a} \left(4 \frac{a^2}{b^2} - i \right) \right)}{2 \left(2 + \frac{ix_1}{a} \right)} \quad (6.128)$$

Daraus ergibt sich wiederum das zugehörige Bemessungsmoment:

$$m_{\text{req}} = \frac{p_A b^2}{24x_1} (3x_1 - 2x_2) \quad (6.129)$$

Jedoch stellt der Fall 3 nicht das maßgebende Versagenszenario dar (Abb. 6.21 B).

Einseitig eingespannte Rechteckplatte

Das Maximalprinzip liefert erwartungsgemäß die maßgebende Fließlinie an der Einspannstelle.

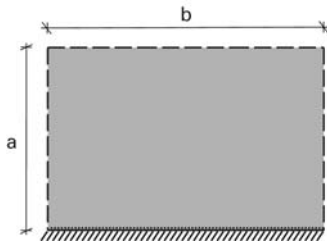


Abb. 6.22: Fließlinienbild bei Flächenlast p_A ($x=0$)

$$\partial W = mb \frac{1}{a-x} \quad (6.130)$$

$$\partial A_a = p_A \frac{b(a-x)}{2} \quad (6.131)$$

$$m_{\text{req}} = p_A \frac{(a-x)^2}{2} \quad (6.132)$$

Das Maximalprinzip liefert die Geometriebedingung:

$$x = 0 \quad \text{für} \quad 0 \leq x \leq a \quad (6.133)$$

Das erforderliche plastische Moment m_{req} beträgt hierfür:

$$m_{\text{req}}(x = 0) = \frac{p_A a^2}{2} \quad (6.134)$$

Beispiel

Eine dreiseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte mit dem Seitenverhältnis $a/b = 2$ (Flächeninhalt $A = 4 \text{ m}^2$) wird mit einer Flächenlast $p = 1 \text{ kN/m}^2$ belastet. Das Bemessungsdiagramm (Abb. 6.23) liefert hierfür Fließlinienfigur 2 als maßgebenden Fall für die Bemessung des VSG-Systems. Das erforderliche plastische Moment ergibt sich zu: $m_{\text{req}} = 0,36 \text{ kNm/m} = 360 \text{ Nmm/mm}$. Die Fließlinienfiguren 1 und 3 ergeben jeweils geringere Werte und sind daher hier nicht ausschlaggebend.

Handelt es sich um eine quadratische Platte $a/b = 1$ bei gleichen Lagerungsbedingungen, Flächeninhalt und Belastung, so ist nun die Fließlinienfigur 1 mit einem erforderlichen Bemessungsmoment von $m_{\text{req}} = 0,283 \text{ kNm/m} = 283 \text{ Nmm/mm}$ maßgebend.

Basierend auf dem erforderlichen Bemessungsmoment und der zu definierenden Bauteiltemperatur und Lasteinwirkungsdauer kann nun ein entsprechend bewehrtes VSG-System ermittelt werden (Kapitel 6.1). Der Laminataufbau ist dabei so zu wählen, dass Gleichung (6.57) erfüllt ist.

Dreiseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte mit freiem Rand
($A = 4$, $p_A = 1$)

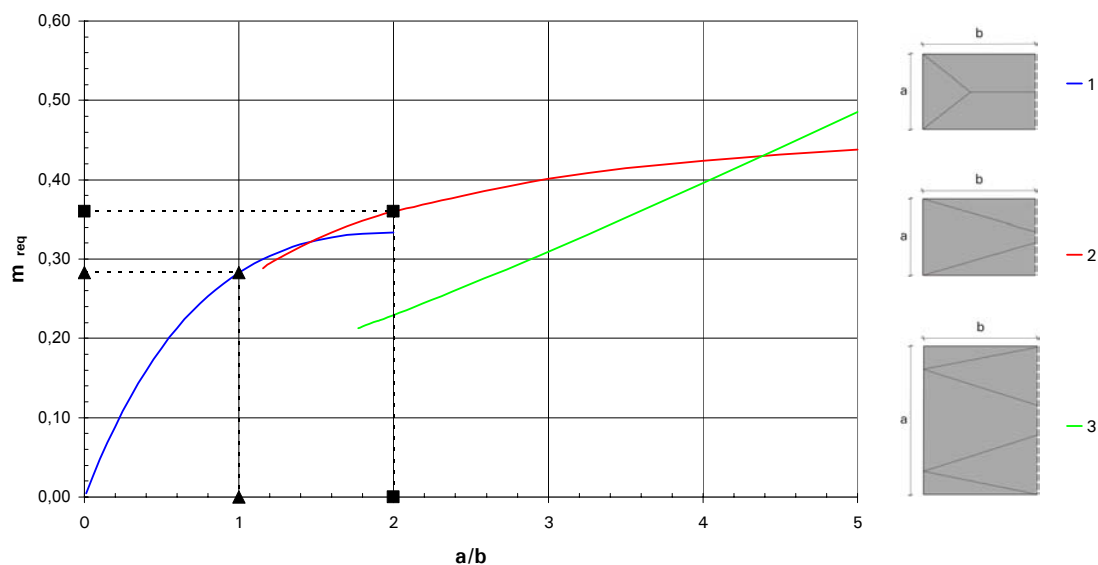


Abb. 6.23: m_{req} in Abhängigkeit von a/b bei einer Fläche $A = 4$ mit Flächenlast $p_A = 1$

6.2.3 Resttragfähigkeit bei Rechteckplatten unter Punktlast

Neben einer Flächenlast als Einwirkung ist bei betretbaren Verglasungen auch stets die Resttragfähigkeit unter Einzellast nachzuweisen. Daher ist der Querschnitt des VSG-Systems für das erforderliche m_{req} infolge der Punktlast P zu bestimmen. Bei einer Schädigung durch einen Stoßkörper tritt meist ein spinnennetzartiges Bruchbild auf. Dabei bilden sich vom Aufschlagpunkt ausgehend konzentrische Kreisbrüche, die von radialen Bruchlinien unterbrochen werden.

Die maßgebende Fließlinienfigur für eine unendlich große, isotrope, gewichtslose Platte mit der Punktlast P ist ein Kreis mit Mittelpunkt im Lastangriffspunkt, dem Radius R und dazu radial angeordneten Fließlinien (Abb. 6.24 A). Die erforderliche plastischen Momententragfähigkeit m_{req} ergibt sich gemäß [29] und [24] unabhängig vom Radius R der Fließlinien zu:

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{2\pi(1+i)} \quad (6.135)$$

Für den Sonderfall $m = m'$ gilt:

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{4\pi} \quad (6.136)$$

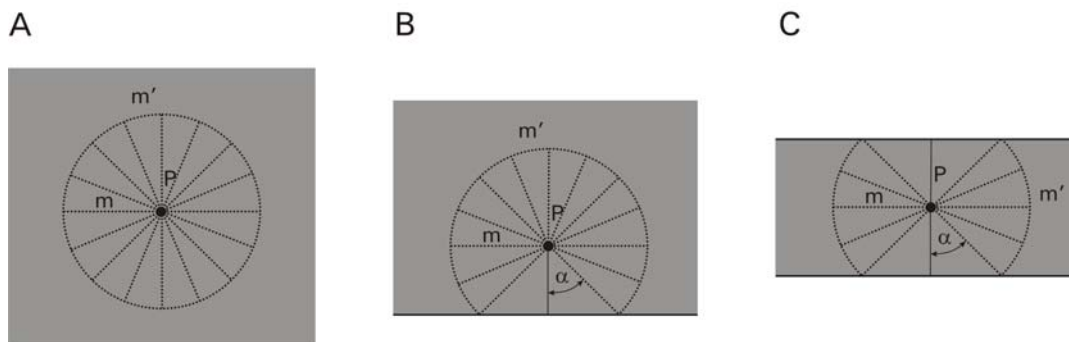


Abb. 6.24: Fließlinienbild bei Punktlast P : A im Feld, B an einem gelenkig gelagerten Rand, C in Feldmitte einer zweiseitig gelenkig gelagerten Platte

Wirkt die Punktlast auf einer kleinen Kreisfläche mit dem Radius r , so gilt:

$$m_{\text{req}} = P \frac{\left(1 - \frac{2r}{3R}\right)}{2\pi(1+i)} \quad (6.137)$$

Ist der Radius r der Belastungsfläche infinitesimal, so geht diese Bedingung in Gleichung (6.135) über, ansonsten erreicht m_{req} seinen Maximalwert bei dem maximalen Radius R . Dieser ist bei einer realen Platte durch die Geometrie der Seitenränder begrenzt. Trifft die Fließlinie einen gelenkig

gelagerten Rand (Abb. 6.24 B), so gibt es einen Maximalwert für folgende Fließliniengeometrie [29], [30]:

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{m'}{m}} = \sqrt{i} \quad (6.138)$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung an der Gesamtplatte folgt:

$$P = 2m(\sqrt{i} + (1+i)(\pi - \arctan \sqrt{i})) \quad (6.139)$$

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{2[\sqrt{i} + (1+i)(\pi - \arctan \sqrt{i})]} \quad (6.140)$$

Für $i = 1$ – einem symmetrischen VSG-Aufbau – liefert diese Bedingung folgendes erforderliche plastische Moment:

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{2 + 3\pi} \quad (6.141)$$

Für den Sonderfall einer nur zweiseitig gelenkig gelagerten Platte ergibt sich bei einer Punktlast in Feldmitte (Abb. 6.24 C) das erforderliche plastische Bemessungsmoment:

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{4[\sqrt{i} + (1+i) \arccot \sqrt{i}]} \quad (6.142)$$

Und für den Sonderfall $m = m'$ ergibt sich:

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{4 + 2\pi} \quad (6.143)$$

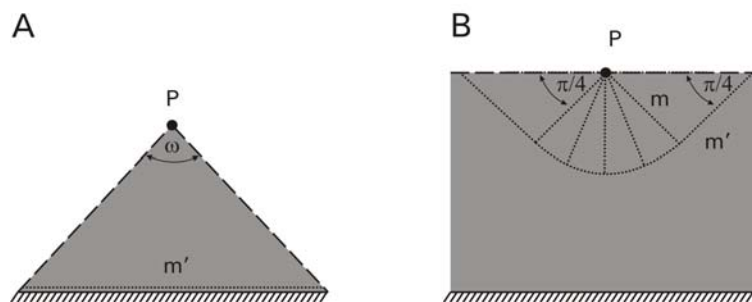


Abb. 6.25: Fließlinienbild bei Punktlast P: A am freien Eck, B am freien Rand

Bei einer Punktlast auf eine Plattenecke mit zwei benachbarten freien Rändern (Abb. 6.25), die sich unter dem eingeschlossenen Winkel ω schneiden, gilt laut [29]:

$$m_{\text{req}} = \frac{P}{2} \cot\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad \text{für } \omega \leq \pi/2 \text{ und } m = m' \quad (6.144)$$

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{2\omega - \pi + 2} \quad \text{für } \omega \geq \pi/2 \text{ und } m = m' \quad (6.145)$$

Für den Sonderfall einer Punktlast auf einer freien Kante mit $\omega = \pi/2$ gilt (Abb. 6.25 A):

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{2} \quad \text{für } \omega = \pi/2 \text{ und } m = m' \quad (6.146)$$

Für den Sonderfall einer Punktlast auf einer freien Kante mit $\omega = \pi$ gilt (Abb. 6.25 B):

$$m_{\text{req}} = P \frac{1}{\pi + 2} \quad \text{für } m = m' \quad (6.147)$$

6.3 Schlussfolgerung

Um die Momententragwirkung eines bewehrten VSG-Systems im Zustand III beschreiben zu können, wird die bilineare Momenten-Krümmungs-Beziehung eingeführt. Dabei wird der VSG-Querschnitt sowohl als schubstarr als auch mit nachgiebigem Bewehrungsverbund betrachtet.

Basierend auf dem Ansatz eines schubstarreren Querschnittverbunds lässt sich das Verhalten im Vier-Punkt-Biegeversuch unter kurzzeitiger Belastung bei 23°C auf der sicheren Seite liegend beschreiben. Jedoch lassen sich hiermit die zeit- und temperaturabhängigen Materialeigenschaften der Zwischenschicht nicht abbilden. Daher wird der Verbundfaktor α eingeführt, um auch den nachgiebigen Bewehrungsverbund zu erfassen.

Mit Hilfe der Momenten-Krümmungs-Beziehung eines schubstarreren Querschnitts und dem aus den Biegekriechversuchen ermittelten Kriechfaktor φ_T lassen sich Verformungen unter lang andauernder Belastung bestimmen. Auf Grund von Dauerlast und Temperatureinfluss nimmt die Krümmung eines VSG-Systems im Zustand III zu. Die daraus resultierenden Verformungen erlauben Rückschlüsse auf den Verbundfaktor α . Mittels Verbundfaktor können wiederum Aussagen über den Spannungs- und Dehnungsverlauf im Querschnitt getroffen werden.

Um eine Resttragfähigkeit zu erzielen, muss die aus dem Laminataufbau ermittelte vorhandene plastische Momententragfähigkeit $m_{v,R}$ im Zustand III größer sein als die erforderliche Momententragfähigkeit m_{req} . Mit Hilfe der Fließlinientheorie wird die erforderliche Momententragfähigkeit m_{req} ermittelt. Dabei wird eine Platte basierend auf der Geometrie, den Auflagerbedingungen und der äußeren Belastung nach einem hypothetischen Fließlinienbild segmentiert. Beruhend auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen wird die Gleichgewichtsbedingung für die virtuelle Arbeit der inneren und äußeren Kräfte an diesem Versagensszenario

formuliert. Eine anschließende Extremwertbetrachtung liefert in Abhängigkeit der Randbedingungen das erforderliche plastische Moment m_{req} . Indem ein entsprechender Laminataufbau mit Bewehrung gewählt wird, kann bereits bei der Glasbemessung den Anforderungen an den Zustand III entsprochen werden. Hierfür muss die Bauteiltemperatur, die Art der Belastung und die Lastdauer im Zustand III vorab definiert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Bewehrungseinlage in der Zwischenschicht steigert die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Werkstoffgrundlagen der Verbundpartner – Glas, Zwischenschicht und Bewehrung – erläutert. Basierend auf den Lastabtragungsmodellen und den Anforderungen an die Verglasung im gebrochenen Zustand III werden bewehrte und unbewehrte VSG-Systeme in Versuchen eingehend untersucht. Dabei werden die Einflüsse der verwendeten Zwischenschichten, der Bauteiltemperatur, der Bruchstückgröße und der Lasteinwirkungsdauer diskutiert.

Die verwendeten Zwischenschichten Polyvinylbutyral (PVB) und SentryGlas[®] Plus (SGP) sind Thermoplaste mit zeit- und temperaturabhängigen Materialeigenschaften. Ihre Festigkeit und ihre Steifigkeit nehmen mit zunehmender Versuchstemperatur ab. Diese Thermoplaste wurden im Temperaturspektrum von 23°C bis 70°C untersucht, um das Verhalten oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur zu erfassen.

Die Größe der Glasfragmente eines geschädigten VSG-Systems ist von der Art der Schädigung und von der potentiellen Energie des Glases abhängig. Das Einprägen eines Eigenspannungszustands durch thermisches Vorspannen sowie die Verformung infolge äußerer Einwirkung erhöhen die gespeicherte Energie im System und mindern die Bruchstückgröße ab. Daher wurden Versuche an intakten und vorgeschädigten VSG-Systemen aus ESG zur Ermittlung der Resttragfähigkeit durchgeführt. Das Verhalten im gebrochenen Zustand III unter lang andauernder Belastung wurde im Biegekriechversuch ermittelt.

Die Einbettung einer Bewehrung in die Zwischenschicht-Matrix hat sich als wirkungsvolle Methode erwiesen, um die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen zu verbessern (Abb. 7.1). Bei Versuchstemperaturen von bis zu 70°C weisen Lamine aus ESG mit Bewehrung in der PVB-Zwischenschicht eine Resttragfähigkeit auf. Unbewehrte VSG-Systeme mit PVB besitzen hingegen keine Restbiegesteifigkeit und versagen stets ohne äußere Belastung im untersuchten Temperaturspektrum.

Die Trag- und Resttraglast können durch die Verwendung von SGP als Zwischenschicht erheblich gesteigert werden. VSG-Systeme mit SGP weisen im intakten Zustand I ein nahezu monolithisches Tragverhalten bei einer Bauteiltemperatur von 23°C auf. Um auch im Zustand III eine

Resttragfähigkeit bei Versuchstemperaturen von bis zu 70°C zu gewährleisten, muss eine Bewehrung einlaminiert werden.

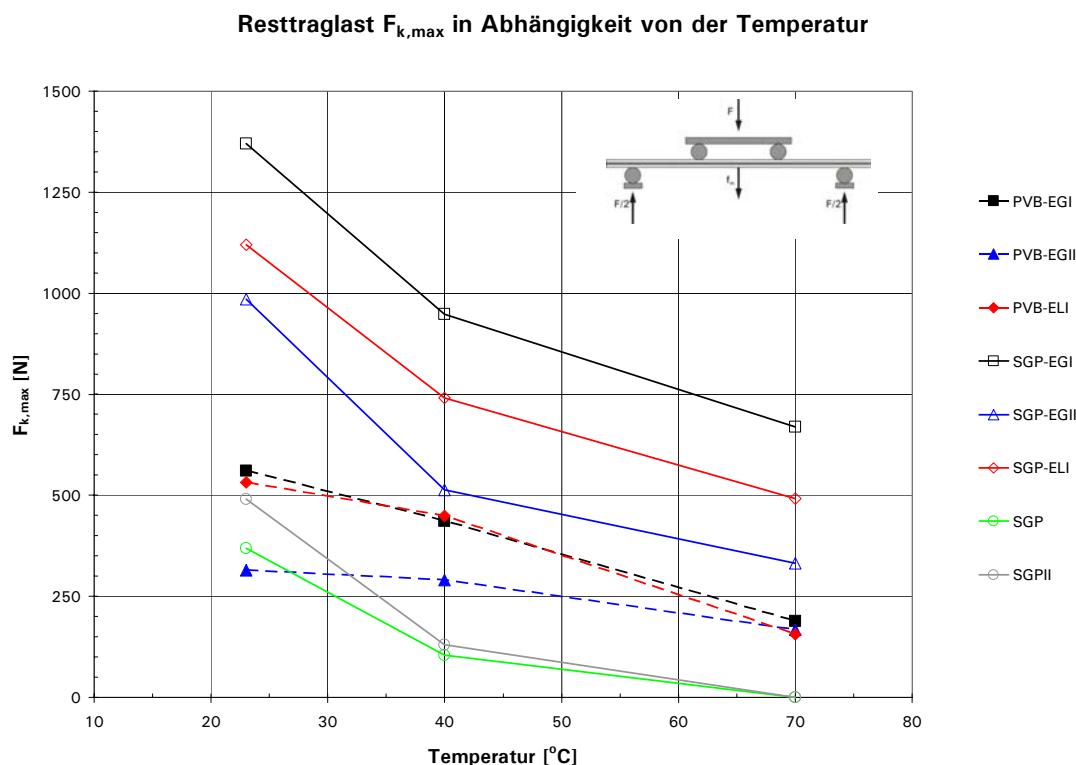


Abb. 7.1: Vergleich der Resttraglast von vorgeschädigten VSG-Systemen aus ESG im Vier-Punkt-Biegeversuch bei unterschiedlichen Versuchstemperaturen

In der vorliegenden Arbeit stehen VSG-Systeme aus ESG im Vordergrund. ESG besitzt im ungebrochenen Zustand eine sehr hohe Biegezugfestigkeit. Dies wirkt sich bei der Glasbemessung positiv auf die erforderliche Glasdicke aus. Jedoch weist ESG im gebrochenen Zustand ein feinkrümeliges Bruchbild auf. Dieses Bruchbild hat eine geringe Resttragfähigkeit von VSG-Systemen aus ESG zur Folge (Abb. 7.2). Um das Potential von ESG im Zustand I zu nutzen und gleichzeitig Standsicherheit im Zustand III zu gewährleisten, wurden bewehrte VSG-Systeme entwickelt und untersucht. Die Versuchsergebnisse zeigen: Die Bewehrungseinlage in der Zwischenschicht steigert die Resttragfähigkeit von VSG-Systemen erheblich und ermöglicht so den vermehrten Einsatz von VSG-Systemen aus ESG im konstruktiven Glasbau. Dies führt zu geringeren Glasdicken und somit zu gewichtsminierten Konstruktionen.

Die in Versuchen gewonnenen Erkenntnisse münden in einen Bemessungsvorschlag für gebrochene VSG-Systeme. So kann die Resttragfähigkeit für ein Glasbauteil ohne Bauteilversuch vorab abgeschätzt werden.

Das Bruchbild eines VSG-Systems ist gekennzeichnet durch seine Bruchlinien. Im Grenzzustand der Resttragfähigkeit kann sich eine solche Bruchlinie zu einer Fließlinie entwickeln. Die Fließlinie ist die Linie, entlang der sich der Querschnitt plastisch verhält – die Bewehrung fließt. Die Fließlinientheorie erlaubt die Bemessung einer VSG-Verglasung im gebrochenen Zustand III. Bei der Anwendung der Fließlinientheorie wird eine Platte basierend auf der Geometrie, den Auflagerbedingungen und der äußeren Belastung nach einem hypothetischen Fließlinienbild segmentiert. Beruhend auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebungen wird die Gleichgewichtsbedingung für die virtuelle Arbeit der inneren und äußeren Kräfte an diesem Versagenszenario formuliert. Eine anschließende Extremwertbetrachtung liefert in Abhängigkeit der Seitenverhältnisse das erforderliche plastische Moment m_{req} für dieses Fließlinienbild.



Abb. 7.2: Vorgeschädigtes und bewehrtes VSG-System unter der Dauerlast von 20 kg im Vergleich zu einem unbelasteten und unbewehrten VSG-System

Basierend auf dem Laminataufbau wird eine bilineare Momenten-Krümmungs-Beziehung für VSG-Systeme aus ESG im Zustand III definiert. Mit dieser Beziehung lässt sich eine Aussage über die vorhandene plastische Momententragfähigkeit $m_{v,R}$ und die Biegeverformung treffen. Gemäß der Fließlinientheorie wird die erforderliche plastische Momententragfähigkeit in Abhängigkeit von der Belastung und der Lagerungsbedingungen bestimmt. Durch eine geeignete Wahl des Laminataufbaus mit der entsprechenden

Bewehrung kann somit eine Resttragfähigkeit $m_{y,R} > m_{req}$ sichergestellt werden. Hierbei sind stets die äußeren Einflüsse – die Bauteiltemperatur und die Lasteinwirkungsdauer – im Vorfeld zu definieren.

In den Normen und Regelwerken variieren die Vorgaben für die Bauteiltemperatur beim Nachweis der Resttragfähigkeit stark. Die Versuchsergebnisse haben jedoch gezeigt, dass die Versuchstemperatur ein sehr sensitiver Einflussfaktor auf das Verhalten im Zustand III darstellt. Da die Glasübergangstemperatur von PVB je nach Hersteller und Folientyp Schwankungen unterliegt, ist eine Vereinheitlichung des zu betrachtenden Temperaturspektrums in den Normen und Regelwerken wünschenswert. In Zukunft werden vermehrt neue Zwischenschichten (z.B. SGP) mit unterschiedlichen Glasübergangstemperaturen eingesetzt. Verglasungen müssen daher unter den tatsächlichen Temperaturbedingungen des jeweiligen Anwendungsfalls geprüft werden. Dies bedeutet, dass für VSG-Systeme im Außenbereich ein Temperaturspektrum von -25°C bis 75°C zu betrachten ist. Die zu berücksichtigende Maximaltemperatur kann bei hinterlüfteten oder verschatteten VSG-Systemen abgemindert werden. Dies gilt auch für Systeme mit geringerer Wärmeabsorption (z.B. Systeme ohne Bewehrung oder Emaillierung). Die Einwirkung kann bei erhöhten Temperaturen nur dann reduziert werden, wenn sie mit der Bauteiltemperatur korreliert. Dies ist bei Windlastszenarien gegeben und entsprechend zu berücksichtigen. Da bei einem absturzsichernden oder betretbaren VSG-System keine Korrelation vorherrscht, kann eine Abminderung der Anprall- bzw. der Verkehrslast bei erhöhter Temperatur nicht erfolgen.

Ist eine hohe Resttraglast unter hohen Temperaturen gefordert, so sind bewehrte VSG-Systeme mit SGP zu favorisieren. Sind die maximalen Temperaturen einer Verglasung – z.B. im konditionierten Innenbereich eines Gebäudes – begrenzt, so können bewehrte VSG-Systeme mit PVB-Zwischenschicht eingesetzt werden.

Der Einfluss von tiefen Temperaturen, Feuchte und UV-Strahlung auf die Haftungseigenschaften der Zwischenschichten (z.B. SGP, PVB) mit Glas und Bewehrung ist bislang nicht untersucht. Auch der zweiaxiale Lastabtrag von bewehrten VSG-Systemen im Zustand III muss noch durch Versuche näher beleuchtet werden. Die Zwischenschicht und die Bewehrung werden hierbei biaxial beansprucht. Es stellt sich neben der Biegebeanspruchung auch eine Membrantragwirkung ein.

Punktuelle oder linienförmige Verankerungen der Bewehrungselemente im Auflagerbereich stellen eine Möglichkeit dar, um weitere Tragreserven eines VSG-Systems im Zustand III zu aktivieren. Diese Verankerungen können gegebenenfalls auch zur Lasteinleitung im Zustand I genutzt werden.

Die Bewehrung in einem VSG-System kann sowohl die Resttragfähigkeit steigern als auch als gestalterisches Element eingesetzt werden. Sie kann eine Gebäudehülle je nach Art der Lichtverhältnisse strukturieren, transparent erscheinen lassen oder durch Reflexionen verändern. Auch bauphysikalische Belange hinsichtlich Sonnenschutz und Energieeintrag in ein Gebäude können hierdurch Berücksichtigung finden. Ein bewehrtes VSG-System kann folglich als multifunktionales Glasbauteil wirken.

8 Literatur

- [1] Arnold, M. (2007): *Technik: Sonnenschutzelemente aus Glas und Streckgitter – KfW Hauptgebäude in neuem Gewand*. In: *Glas* 2/2007, S. 47-50.
- [2] Atiq, S.; Rawlings, R. D.; Boccaccini, A. R. (2004): *Behaviour of a commercial wired glass under low energy ballistic impact*. In: *Glass Science Technology*, 77 No.1, S. 31-34.
- [3] Bennison, J.; Gao, W.; Amos, T.; Davies, P. (2005): *Strength and deformation behaviour of laminated glass*. In: *Glass Processing Days China 2005*, Shanghai.
- [4] Bennison, J.; Sloan, J. G.; Kristunas, D. F.; Buehler, P. J., Amos, T.; Smith C. A. (2005): *Laminated Glass for blast mitigation: role of interlayer properties*. In: *Conference Proceedings – Glass Processing Days 2005*, Tampere, S. 494-496.
- [5] Bergmeister, K. (2003): *Kohlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau*. Ernst & Sohn.
- [6] Blank, K. (1979): *Thermisch vorgespanntes Glas*. In: *Glastechnische Berichte*, 52 Nr.1, S. 1-13, 52 Nr.2, S. 52-54.
- [7] Bohmann, D. (1999): *Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben*. Dissertation Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen; Shaker Verlag.
- [8] Bos, F. P.; Veer, F.A.; Hobbelmann, G. J.; Louter, P.C. (2004): *Stainless steel reinforced and post-tensioned glass beams*. In: *ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics*, Politecnico di Bari.
- [9] Bucak, Ö.; Meißner, M. (2005): *Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundglas mit der Zwischenlage SentryGlas[®] Plus*. Abschlussbericht des AiF-Forschungsvorhaben, Fachhochschule München.
- [10] Bucak, Ö.; Schuler, C.; Meißner, M. (2006): *Verbund im Glasbau – Neues und Bewährtes*. In: *Stahlbau* 75, Heft 6, S. 529-543.
- [11] Bucak, Ö.; Schuler, C.; Meyer, A.; Beyle, H.-P.; Fried, A. (2000): *Zur Berücksichtigung der Verbundwirkung bei VSG mit PVB-Zwischenschichten*. In: *Bauen mit Glas*, VDI Bericht Nr. 1527, S. 707-728.

- [12] Curbach, M. (1998): *Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau*. DafStb, Heft 488, Beuth Verlag.
- [13] DuPont (2005): *Shanghai Oriental Art Center: zauberhaft hell und transparent*. In: Laminated Glass News 29/2005, S. 1.
- [14] DuPont (2006): *SentryGlas® Plus Brochure*. In: Internet <http://www.dupont.com>.
- [15] Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S. (2007): *Beständigkeit von Kunststoffen*. Hanser Verlag.
- [16] El-Magd, E.; Kranz, A.; Risch, R. (2001): *Geometrisch bedingtes Anisotropieverhalten von Lochblechen*. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Volume 32, Issue 11, S. 821-826.
- [17] Ensslen, F. (2005): *Zum Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas unter Berücksichtigung der Alterung der Polyvinylbutyral-Folie*. Dissertation Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum.
- [18] Falkai, B. W.; (1981): *Synthesefasern – Grundlagen, Technologie, Verarbeitung und Anwendung*. Verlag Chemie.
- [19] Fink, A.; (2000): *Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen*. Dissertation D7, Institut für Statik, Technische Universität Darmstadt.
- [20] Friz, F. (2000): *Verbund von Bewehrungselementen in PVB – Auszugsversuche und Finite-Element-Berechnungen zur Untersuchung des Verbundverhaltens*. Diplomarbeit 7/00 Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart.
- [21] Georgi, C.; (2006): *Mechanische Eigenschaften Biegebruchfestigkeiten von Keramiken/Weibull-Statistik*. Praktikum Werkstoffe II, Institut für Werkstofftechnik, Technische Universität Illmenau.
- [22] Ghali, A; Neville A.M. (1997): *Structural Analysis – A Unified Classical and Matrix Approach*. 4th Edition, E & FN Spon.
- [23] Glass, S. J.; Abrams, M.; Matalucci R. J. (2000): *New glass technologies for enhanced architectural surety®: engineered stress profiles (ESP) in soda-lime-silica glass*. SAND2000-3001, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
- [24] Haase, K.W. (1962): *Bruchlinientheorie von Platten – Grundlagen und Anwendungen*. Werner-Verlag.
- [25] Habenicht, G. (2002): *Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendung*. 4. Auflage; Springer Verlag.

- [26] Haldimann, M. (2005): *Fracture mechanics modelling and time-dependent reliability of structural glass elements*. In: Proceedings of Conference on Glass in Buildings, Centre for Windows & Cladding Technology, Bath
- [27] Haver & Boecker (2003): *Drahtgewebe Tabellenbuch*. 4. Auflage.
- [28] HT TROPLAST AG (2004): *TROSIFOL Manual*. In: Internet <http://www.trosifol.com>.
- [29] Johansen, K. W. (1962): *Yield-line theory*. Cement and Concrete Association.
- [30] Johansen, K. W. (1972): *Yield-line formulae for slabs*. Cement and Concrete Association.
- [31] Kerkhof, F. (1975): *Bruchmechanische Analyse von Schadensfällen an Gläsern*. In: Glastechnische Berichte, 48 Nr.6, S. 112-124.
- [32] Kott, A. (2006): *Zum Trag- und Resttragverhalten von Verbund-sicherheitsglas*. Dissertation Nr. 16579, ETH Zürich.
- [33] Kott, A.; Vogel, T. (2004): *Controlling the post-breakage behavior of laminated safety glass*. International Symposium on the Application of Architectural Glass ISAAG, TU München und Universität der Bundeswehr München.
- [34] Kott, A.; Vogel, T. (2004): *Safety of laminated glass structures after initial failure*. In: Structural Engineering Journal International 2/2004, S. 134-138.
- [35] Kott, A.; Vogel, T. (2005): *Remaining structural capacity of broken laminated safety glass*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2005, Tampere, S. 403-407.
- [36] Kott, A.; Vogel, T. (2006): *Versuche zum Trag- und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas*. Institut für Baustatik und Konstruktion, Bericht Nr. 296, ETH Zürich.
- [37] Kutterer, M. (2002): *Verbundglasplatten – Näherungslösungen zur Berücksichtigung von Schubverbund und Membrantragwirkung*. Dissertation Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart; Shaker Verlag.
- [38] Kutterer, M. (2005): *Verbundglasplatten – Schubverbund und Membrantragwirkung – Teil 1*. In: Stahlbau 1/2005, S. 39-46.
- [39] Kutterer, M. (2005): *Verbundglasplatten – Schubverbund und Membrantragwirkung – Teil 2*. In: Stahlbau 2/2005, S. 142-150.

- [40] Laufs, W. (2000): *Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser*. Dissertation Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen; Shaker Verlag.
- [41] Lellig, K. (1996): *Untersuchung der Benetzung und Haftung bei Verbundwerkstoffen aus Gläsern und Polymeren*. Dissertation Werkstofftechnik, RWTH Aachen; Shaker Verlag.
- [42] Loughran, P. (2003): *Falling glass – Glasschäden und Lösungen in der neuen Architektur*. Birkhäuser.
- [43] Louter, C. (2005): *Reinforced glass cantilever beams*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2005, Tampere, S. 429-433.
- [44] Maniatis, I.; Albrecht, G. (2003): *The use of laminated glass with photovoltaic elements*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2003, Tampere, S. 433-436.
- [45] MEVACO GmbH (2004): *Der blaue MEVACO-Katalog 2004/2005*. Produktkatalog, Schlierbach.
- [46] Michaeli, W.; Greif, H.; Kaufmann, H.; Vossenbürger, F.-H. (1992): *Technologie der Kunststoffe*; Hanser Verlag.
- [47] Müller, W. (2001): *Bruchmechanik I und II*. Manuskript, Institut für Mechanik, Technische Universität Berlin.
- [48] Münsch, R.; Reinhardt K.-H. (1995): *Zur Berechnung von Membrantragwerken aus beschichteten Geweben mit Hilfe genäherter elastischer Materialparameter*. In: Bauingenieur 70, S. 271-275.
- [49] Neugebauer, J. (2004): *Methods to increase the residual bearing capacity of glass*. In: 5th International PhD Symposium in Civil Engineering Conference, Volume 1. S. 575-580.
- [50] Neugebauer, J. (2005): *A special fixation with which the broken laminated safety glass is prevented from falling down*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2005, Tampere, S. 105-109.
- [51] Neugebauer, J. (2005): *Gebäudehüllen aus Glas aus der Sicht eines Tragwerkplaners*. Dissertation, Technische Universität Graz.
- [52] O’Callaghan, J. (2003): *Apple computer inc retail store – all glass staircase and bridge – a technical review of innovative design and fabrication techniques utilised*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2003, Tampere, S. 191-194.

-
- [53] O'Callaghan, J.; Coult, G. (2007): *An all glass cube in New York City*. In: Conference Proceedings – Glass Performance Days 2007, Tampere, S. 98-101.
- [54] Peters, S. (2006): *Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen*. Dissertation am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart.
- [55] Peters, S.; Fuchs, A.; Knippers, J.; Behling, S. (2007): *Nganzglastreppe mit transparenten SGP-Klebeverbindungen – Konstruktion und statische Berechnung*. In: Stahlbau 76/2007, S. 151-156.
- [56] Royer-Carfagni, G.; Silvestri, M. (2007): *New prospects in frameless glazing technology: the GECKO system*. In: Conference Proceedings – Glass Performance Days 2007, Tampere, S. 145-150.
- [57] Sackmann, V.; Schuler, C.; Gräf H. (2004) *Testing of laminated safety glass*. In: International Symposium on the Application of Architectural Glass – ISAAG, TU München and Universität der Bundeswehr München.
- [58] Schittich, C.; Staib, G.; Balkow, D.; Schuler, M.; Sobek, W. (2006): *Glasbau Atlas*. 2. Auflage, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, München.
- [59] Schuler, C. (2003): *Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung*. Dissertation Lehrstuhl für Stahlbau, Technische Universität München.
- [60] Schuler, C.; Bucak, Ö.; Sackmann, V.; Gräf, H.; Albrecht, G. (2004): *Time and temperature dependent mechanical behaviour and durability of laminated safety glass*. In: Structural Engineering Journal International 2/2004, S. 80-83.
- [61] Schwarzl, F. R. (1990): *Polymermechanik – Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren*. Springer Verlag.
- [62] Sedlacek, G.; Wellershoff, F. (2003): *Anwendungsvorschlag zur Bemessung von Verbundsicherheitsglas*. Gutachterliche Beurteilung, Bericht G 2003/10-05, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen.

- [63] Sedlacek, G.; Wellershoff, F.; Düster, H. (2003): *Bemessungsschubmodul für PVB-Folien in Verbundsicherheitsglas unter Klimalasten in Deutschland*. Bericht G 2003/10-06, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen.
- [64] Sobek, W.; Kutterer M.; Messmer R. (1998): *Rheologisches Verhalten von PVB im Schubverbund*. Forschungsbericht 4|98 Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.
- [65] Sobek, W.; Maier, F.; Kutterer M. (1998): *Versuch an Verbundsicherheitsgläsern zur Beurteilung der Resttragfähigkeit und des Verbundverhaltens*. Forschungsbericht 1|98 Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.
- [66] Sobek, W.; Maier, F.; Kutterer M. (1999): *Tragverhalten von bewehrtem Verbundsicherheitsglas*. Forschungsbericht 2|99 Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.
- [67] Sobek, W.; Maier, F.; Kutterer, M. (1999): *Bewehrtes Verbundsicherheitsglas*. Forschungsbericht 1|99 Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.
- [68] Sobek, W.; Speth, M. (1995): *Textile Werkstoffe*. In: Bauingenieur 70, S. 243-250.
- [69] Stamm, K.; Witte, H. (1974): *Sandwichkonstruktionen Berechnung, Fertigung, Ausführung*. Springer Verlag.
- [70] Stiell, W.; Feldmeier, F. (1995): *Orientierende Versuche zum Tragverhalten von vorgeschädigten VSG-Scheiben mit Folien- und Gießharzverbund – Resttragfähigkeit von VSG*. Forschungsbericht T 2723, ift Rosenheim.
- [71] Veer, F. A. (2005): *10 Years of ZAPPI research*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2005, Tampere, S. 424-428.
- [72] Wagner, E. (2005): *Glasschäden – Oberflächenbeschädigungen Glasbrüche in Theorie und Praxis*. 2. Auflage, Verlag Karl Hofmann.
- [73] Weller, B.; Wunsch, J.; Härth K. (2005) *Experimental study on different interlayer materials for laminated glass*. In: Conference Proceedings – Glass Processing Days 2005, Tampere, S. 124-127.
- [74] Wellershoff, F. (2006): *Bemessungsschubmodulwerte für Verbundglasscheiben*. In: Stahlbau 3/2007, S. 177-188.

- [75] Wellershoff, F. (2006): *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen*. Dissertation Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen; Shaker Verlag.
- [76] Wölfel, E. (1987): *Nachgiebiger Verbund – Eine Näherungslösung und deren Anwendungsmöglichkeiten*. In: Stahlbau 6/1987, S. 173-180.
- [77] Wörner, J.-D.; Deußner, S., Schneider J. (1998): *Textilverstärktes Glas – Möglichkeiten und Perspektiven*. In: Bauen mit Textilien 3/1998, S. 8-10.
- [78] Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus (2001): *Temperaturversuche an Verbundsicherheitsglasscheiben unter Sonneneinstrahlung*. Versuchsbericht, Universität Stuttgart.

9 Normen und Technische Regeln

- [ANSI Z97] ANSI Z97.1-1984 (R1994): *American National Standard for Safety Glazing Materials Used in Buildings – Safety Performance Specifications and Methods of Test.*
- [ASTM D5026] ASTM D5026-06: *Standard Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties in Tension.*
- [ASTM D638] ASTM D638-03: *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Note: This test method and ISO 527-1 are technically equivalent).*
- [ASTM D696] ASTM D696-03: *Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer.*
- [ASTM D792] ASTM D792-00: *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.*
- [ASTM E1300] ASTM E1300-04: *Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings.*
- [DIBt BRL08] DIBt: *Bauregelliste A Teil 1.* (Ausgabedatum: 2008-01)
- [DIBt BRL07] DIBt: *Bauregelliste A Teil 1.* (Ausgabedatum: 2007-01)
- [DIBt 2/2001] DIBt Mitteilung: *Anforderungen an begehbare Verglasungen - Empfehlungen für das Zustimmungsverfahren.* (Ausgabedatum: 2001-02)
- [DIN 1055] DIN 1055-100: *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln.* (Ausgabedatum: 2001-03-00)
- [DIN 1249] DIN 1249-10: *Flachglas im Bauwesen - Teil 1: Chemische und physikalische Eigenschaften.* (Ausgabedatum: 1990-08-00)

- DIN 1249-12: *Flachglas im Bauwesen - Teil 2: Einscheiben-Sicherheitsglas: Begriff, Maße, Bearbeitung, Anforderungen.* (Ausgabedatum: 1990-09-00, Zurückziehungsdatum: 2000-11-00, Nachfolgedokument DIN EN 12150-1)
- [DIN 18516] DIN 18516-4: *Außenwandbekleidungen hinterlüftet - Teil 4: Einscheiben-Sicherheitsglas: Anforderungen, Bemessung, Prüfung.* (Ausgabedatum: 1990-02)
- [DIN 52306] DIN 52306: *Kugelfallversuch an Sicherheitsscheiben für Fahrzeugverglasungen.* (Ausgabedatum: 1990-03)
- [DIN 52307] DIN 52307: *Pfeilfallversuch an Sicherheitsscheiben für Fahrzeugverglasungen.* (Ausgabedatum: 1990-03)
- [DIN 52338] DIN 52338: *Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen; Kugelfallversuch für Verbundglas.* (Ausgabedatum: 1985-09)
- [DIN 53479] DIN 53479: *Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren - Bestimmung der Dichte.* (Ausgabedatum 1991-10, Zurückziehungsdatum: 1995-10)
- [DIN EN 101] DIN EN 101: *Keramische Fliesen und Platten: Bestimmung der Ritzhärte der Oberfläche nach Mohs.* (Ausgabedatum 1992-01)
- [DIN EN 356] DIN EN 356: *Sicherheitssonderverglasung - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff.* (Ausgabedatum: 2000-02)
- [DIN EN 572] DIN EN 572-1: *Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften.* (Ausgabedatum: 2004-09)
- DIN EN 572-2: *Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas - Teil 2: Floatglas.* (Ausgabedatum: 2004-09)

- [DIN EN 993] DIN EN 993-5 *Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse - Teil 5: Bestimmung der Kaltdruckfestigkeit* (Ausgabedatum: 1998-12, Vorgängerdokumente: DIN 51067-1 und DIN EN 993-5)
- [DIN EN 1288] DIN EN 1288-3: *Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas - Teil 3: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung (Vierschneiden-Verfahren)*. (Ausgabedatum: 2000-09, Vorgängerdokument: DIN 52303-1)
- [DIN EN 1863] DIN EN 1863-1: *Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung* (Ausgabedatum: 2000-03)
- DIN EN 1863-2: *Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 2: Konformitätsbewertung/Produktnorm*. (Ausgabedatum: 2005-01)
- [DIN EN 12150] DIN EN 12150-1: *Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung*. (Ausgabedatum: 2000-11)
- [DIN EN 12600] DIN EN 12600: *Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch - Verfahren und Durchführungsanforderungen der Stoßprüfung an Flachglas*. (Ausgabedatum: 2003-04)
- [DIN EN 14179] DIN EN 14179-1: *Glas im Bauwesen - Heißgelagertes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas Teil 1: Definition und Beschreibung*. (Ausgabedatum: 2005-09)
- DIN EN 14179-2: *Glas im Bauwesen - Heißgelagertes thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas - Teil 2: Konformitätsbewertung/Produktnorm*. (Ausgabedatum: 2005-08)
- [DIN EN ISO 527] DIN EN ISO 527-1: *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. (Ausgabedatum: 1996-04)

- DIN EN ISO 527-2: *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.* (Ausgabedatum: 1996-07)
- DIN EN ISO 527-3: *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln.* (Ausgabedatum: 2003-07)
- [DIN EN ISO 899] DIN EN ISO 899-2: *Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 2: Zeitstand- Biegeversuch bei Dreipunkt-Belastung.* (Ausgabedatum: 2003-10)
- [DIN EN ISO 12543] DIN EN ISO 12543-1: *Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund- Sicherheitsglas - Teil 1: Definitionen und Beschreibung von Bestandteilen.* (Ausgabedatum: 1998-08)
- DIN EN ISO 12543-2: *Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas* (Ausgabedatum: 2006-03)
- DIN EN ISO 12543-3: *Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund- Sicherheitsglas - Teil 3: Verbundglas.* (Ausgabedatum: 1998-08)
- [DIN ISO 7991] DIN ISO 7991: *Glas - Bestimmung des mittleren thermischen Längenausdehnungskoeffizienten.* (Ausgabedatum: 1998-02, Vorgängerdokument: DIN 52328)
- [DIN ISO 9044] DIN ISO 9044: *Industriedrahtgewebe - Technische Anforderungen und Prüfung.* (Ausgabedatum: 2001-09)
- [E DIN 18008] E DIN 18008-1: *Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen.* (Entwurfssfassung: 2006-03)
- E DIN 18008-2: *Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen.* (Entwurfssfassung: 2006-03)

- [ETAG 002] ETAG 002: *Guideline for European Technical Approval of Structural Sealant Glazing Systems (SSGS)*. (2002-03)
- [G1] Merkblatt G1 der Landesstelle für Bautechnik: *Zusammenfassung der wesentlichen Anforderungen an zustimmungspflichtige Überkopfverglasungen*. (2004-05-10)
- [G4] Merkblatt G4 der Landesstelle für Bautechnik: *Zusammenfassung der wesentlichen Anforderungen an begehbare Verglasungen im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall*. (2004-05-10)
- [GS-BAU-18] GS-BAU-18: *Grundsätze für die Prüfung und Zertifizierung der bedingten Betretbarkeit oder Durchsturzsicherheit von Bauteilen bei Bau- oder Instandhaltungsarbeiten*. (2001-02)
- [FKG] Merkblätter des Fachverbands Konstruktiver Glasbau: *Begehbare Verglasungen; Betretbare Verglasungen*. (2002-05-13)
- [TRAV] TRAV: *Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen*. (2003-01)
- [TRLV] TRLV: *Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen*. (Schlussfassung: 2006-08)
- [TRPV] TRPV: *Technische Regeln für die Bemessung und die Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen*. (Schlussfassung: 2006-08)

Anhang

A1 Versuchskörper

Die verwendeten Versuchskörper besitzen den folgenden Aufbau:

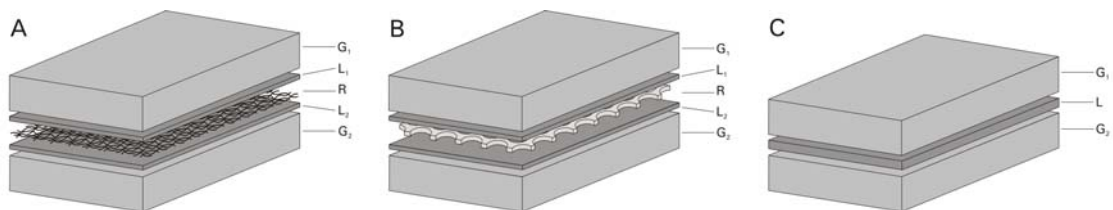


Abb. A1.1: Aufbau der Versuchskörper: Glas (G), Zwischenschicht (L) und ggf. Bewehrung (R)

Glas (G):

ESG - Einscheibensicherheitsglas (BGT - Bischoff Glastechnik)

Zwischenschicht (L):

PVB - Trosifol[®] MB (Kuraray Europe)

SGP - SentryGlas[®] Plus - Ionoplast Interlayer SGP2000 (DuPont)

Bewehrung (R):

EG I - Edelstahlgewebe I (Haver & Boecker): Drahtdurchmesser: $d = 0,25$ mm; Maschenweite: $w = 0,63$ mm; Edelstahl 1.4310

EG II - Edelstahlgewebe II (Haver & Boecker): Drahtdurchmesser: $d = 0,20$ mm; Maschenweite: $w = 0,32$ mm; Edelstahl 1.4310

EL I - Edelstahllochblech (MEVACO): Lochung: Rv 5-7; $d = 0,50$ mm; Edelstahl 1.4301

Bezeichnung und Nummerierung:

Die Versuchskörper sind gemäß ihrem Laminataufbau bezeichnet. Nach dem Kenner UB (unbewehrt) bzw. B (bewehrt) steht der Typ, gekennzeichnet durch die verwendete Zwischenschicht mit evtl. eingebetteter Bewehrungsart. Jeder einzelne Prüfkörper erhält zusätzlich eine fortlaufende Nummer. Der Versuchskörper 04-B-SGP-EGII ist somit der 4. Prüfkörper des bewehrten Typs SGP-EGII. Bei diesem ist ein Edelstahlgewebe II in die SGP Zwischenschicht (2 x 1,52 mm) eingebettet. Die einzelnen Versuchskörper

wurden bereits bei der Herstellung nummeriert. Die Auswahl für den jeweiligen Versuch erfolgte dann per Zufallsprinzip, um eine Korrelation durch die Herstellungsabfolge auszuschließen.

Tab. A1.1: Aufbau und Anzahl der Versuchskörper

Typ	Aufbau					Anzahl
	G ₁	L ₁	R	L ₂	G ₂	$\Sigma = 103$
SGP	6 mm ESG	1,52 mm SGP	-	-	6 mm ESG	16
SGPII	6 mm ESG	2,28 mm SGPII	-	-	6 mm ESG	5
SGP-EGI	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGI	1,52 mm SGP	6 mm ESG	12
SGP-EGII	6 mm ESG	1,52 mm SGP	EGII	1,52 mm SGP	6 mm ESG	13
SGP-ELI	6 mm ESG	1,52 mm SGP	ELI	1,52 mm SGP	6 mm ESG	3
PVB-EGI	6 mm ESG	1,52 mm PVB	-	-	6 mm ESG	4
PVB-EGI	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGI	0,76 mm PVB	6 mm ESG	17
PVB-EGII	6 mm ESG	0,76 mm PVB	EGII	0,76 mm PVB	6 mm ESG	19
PVB-ELI	6 mm ESG	1,52 mm PVB	ELI	1,52 mm PVB	6 mm ESG	14

A2 Vier-Punkt-Biegeversuche ohne Vorschädigung

Die Versuche wurden an einer Prüfmaschine vom Typ Zwick 1474 mit einer konstanten Versuchsgeschwindigkeit von $v = 0,2 \text{ mm/s}$ gefahren. Die Verformungsmessung erfolgte mit zwei Ohmschen Wegaufnehmern in Feldmitte. Dort befand sich ein auf dem VSG-System aufgeklebtes Aluminiumblech zur seitlichen Wegmessung. Die Graphen geben mit der Verformung f_m den daraus gemittelten Wert an.

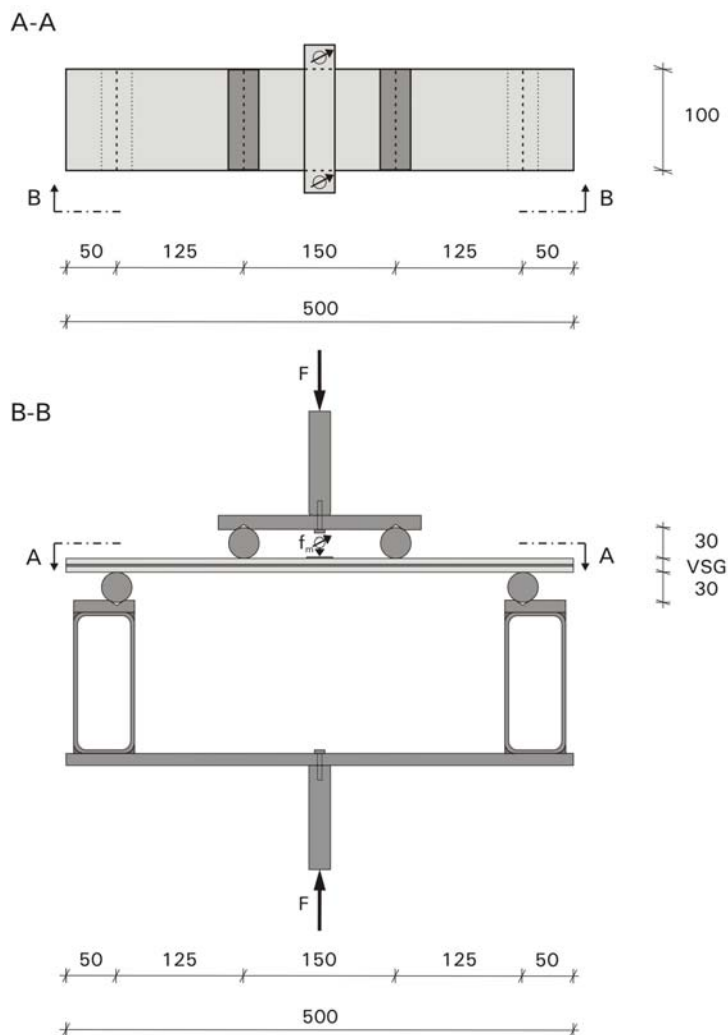


Abb. A2.1: Versuchsaufbau: Ansicht und Schnitt [mm]

Eine gedämmte Holzkiste mit Sichtfenster ermöglichte die sichere Versuchsbeobachtung und die Einhaltung der vorgesehenen Versuchstemperaturen.

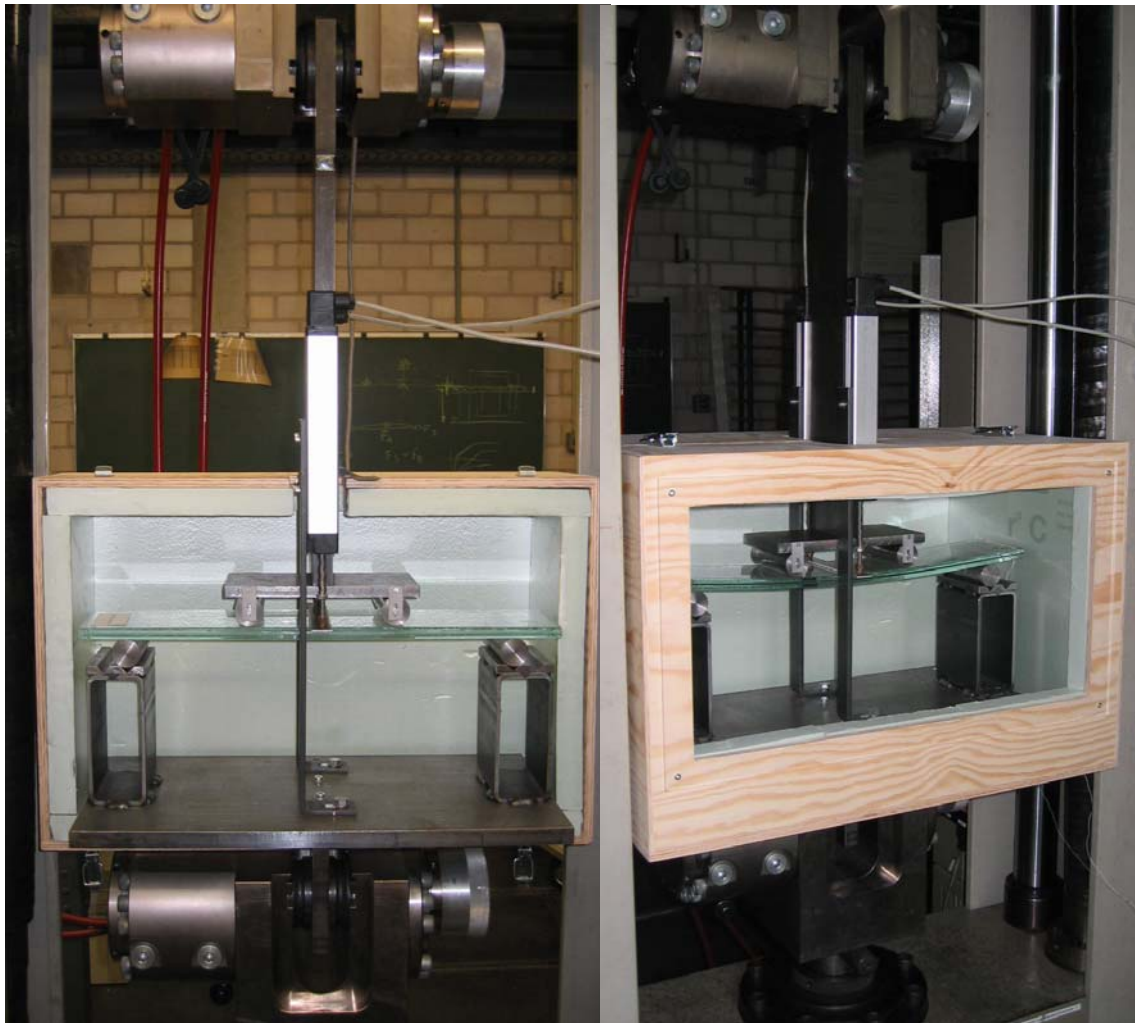


Abb. A2.2: Versuchsaufbau in der Prüfmaschine Zwick 1474

In den Vier-Punkt-Biegeversuchen befand sich zwischen den Biegerollen und den Versuchskörpern keine Zwischenschicht aus Gummi gemäß [DIN EN 1288]. Dadurch sollte ein Einschneiden der Glasbruchstücke in diese Zwischenschicht im Zustand III vermieden werden, um so die Reibung am Auflager nicht zu erhöhen. Die dadurch eventuell abgeminderte maximal erzielbare Traglast im Zustand I spielt eine untergeordnete Rolle, da hier die Systemsteifigkeit des Laminats im Blickfeld des Interesses liegt.

Versuchskörpertyp: SGP und SGPII

SGP: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

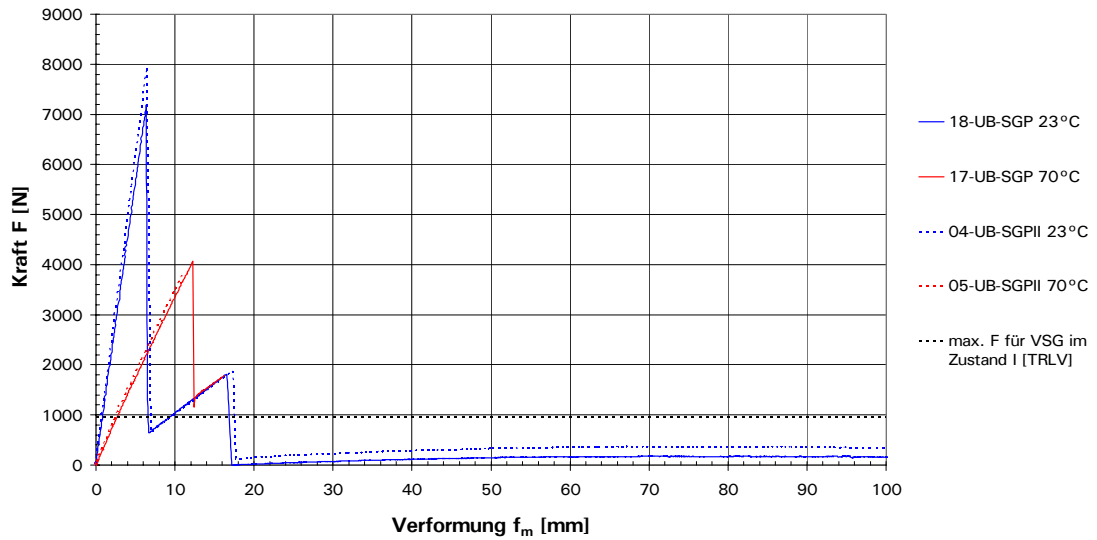


Abb. A2.3: Vier-Punkt-Biegeversuch mit Versuchskörpern SGP und SGPII

SGP: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

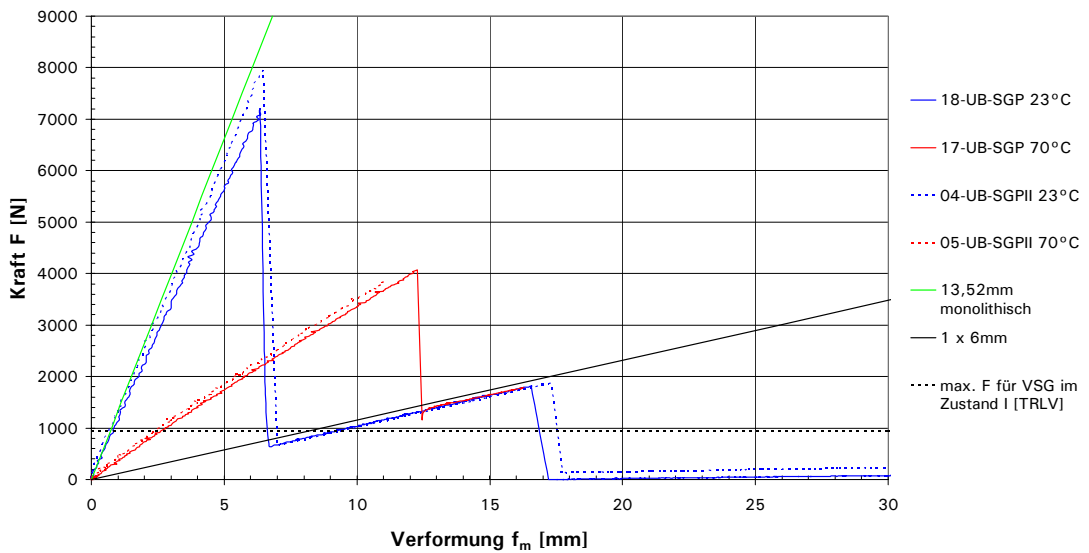


Abb. A2.4: Vergleich der Biegesteifigkeit von Versuchskörpern SGP und SGPII

Versuchskörpertyp: SGP-EGII

SGP-EGII: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

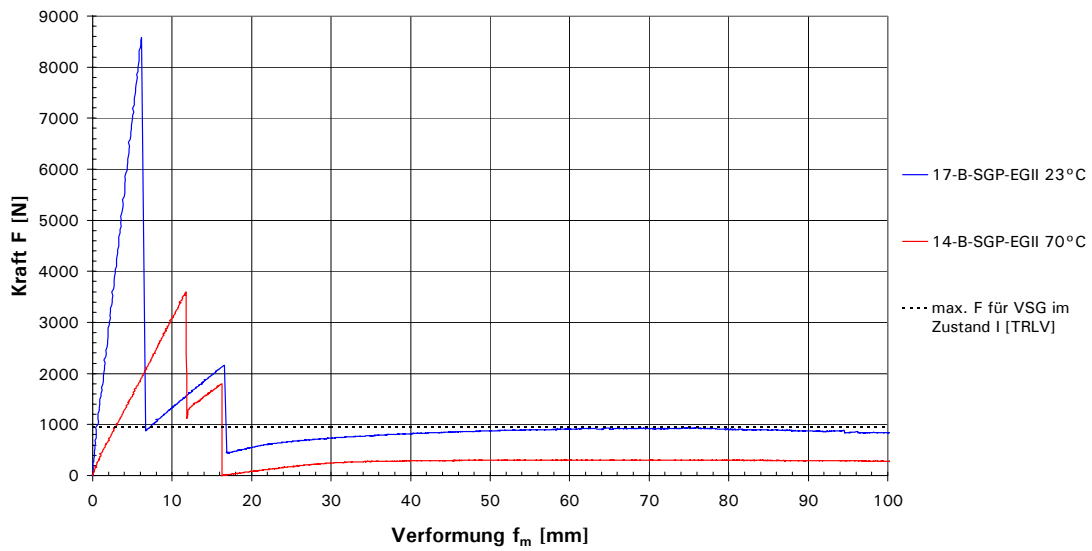


Abb. A2.5: Vier-Punkt-Biegeversuch mit Versuchskörpern SGP-EGII

Versuchskörpertyp: PVB

PVP: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

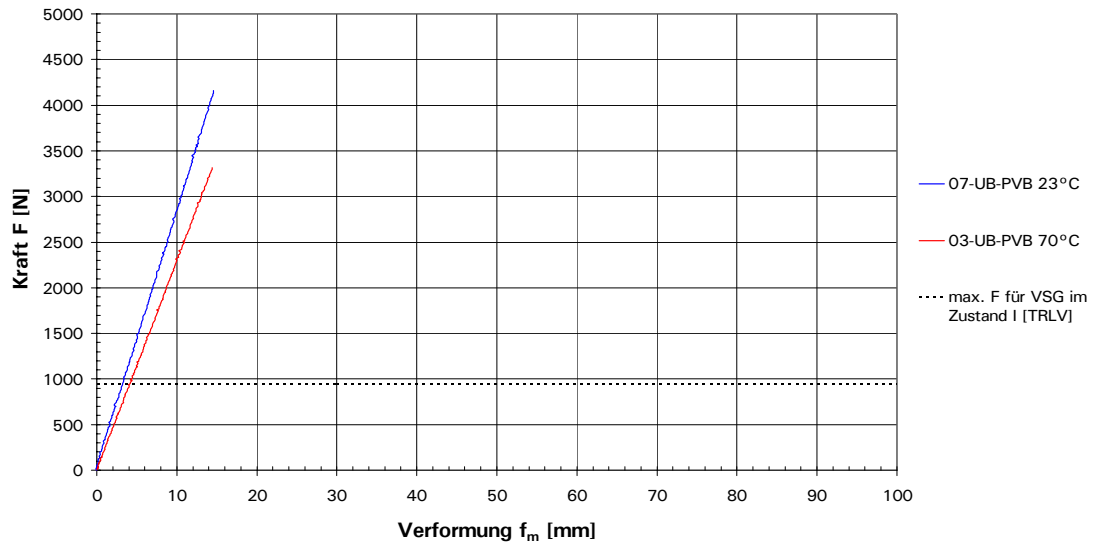


Abb. A2.6: Vier-Punkt-Biegeversuch mit Versuchskörpern PVB

PVP: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

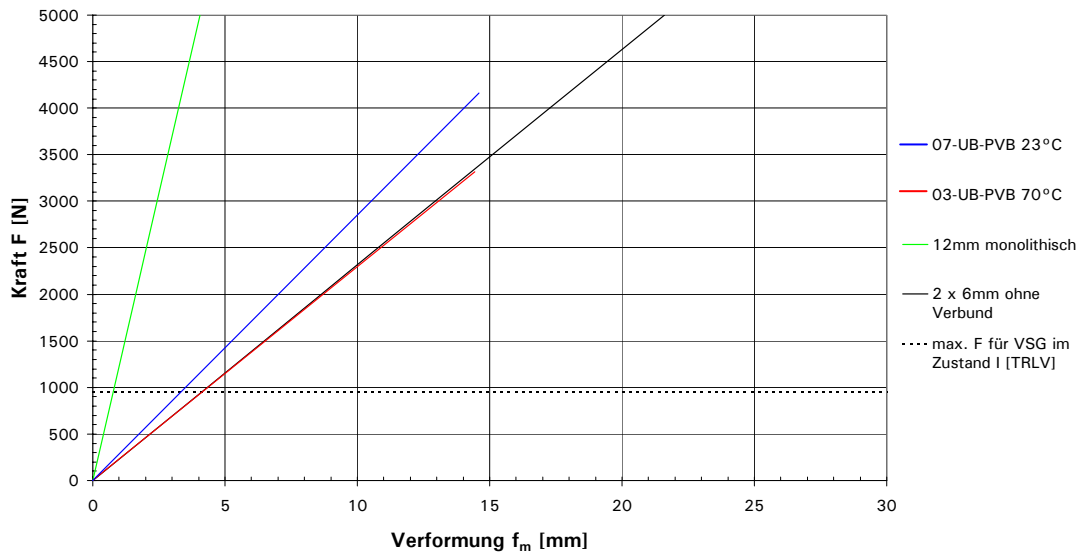


Abb. A2.7: Vergleich der Biegesteifigkeit von Versuchskörpern PVB

Versuchskörpertyp: PVB-EGI

PVP-EGI: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

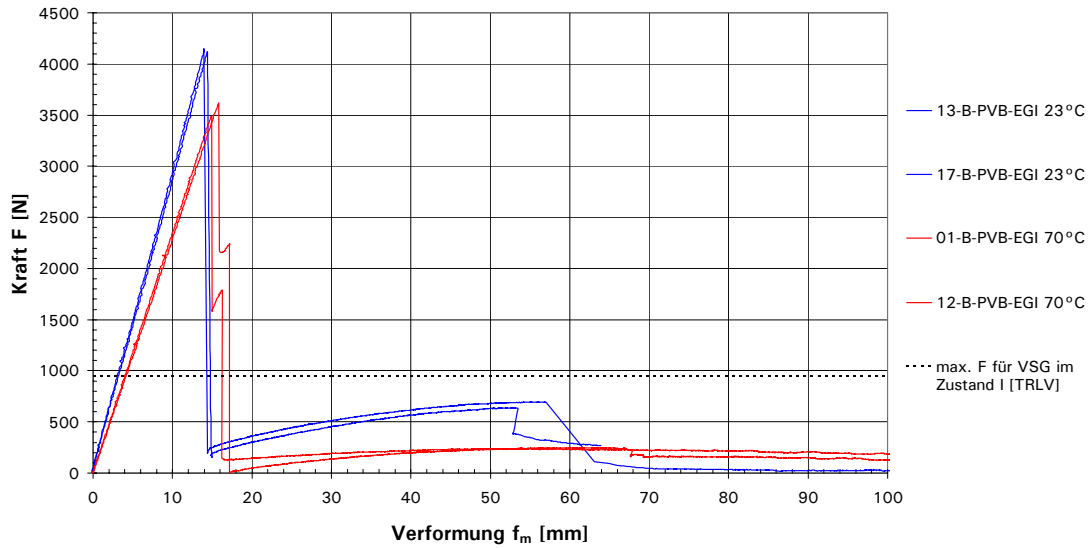


Abb. A2.7: Vier-Punkt-Biegeversuch mit Versuchskörpern PVB-EGI

Versuchskörpertyp: PVB-EGII

PVB-EGII: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

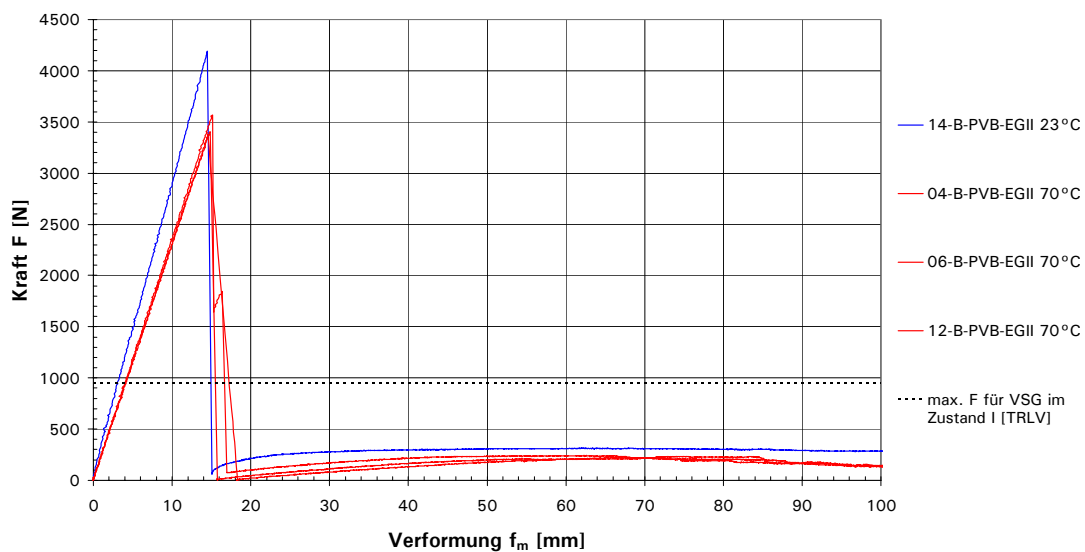


Abb. A2.8: Vier-Punkt-Biegeversuch mit Versuchskörpern PVB-EGII

Versuchskörpertyp: PVB-ELI

PVP-ELI: Vier-Punkt-Biegeversuch bei 23°C und 70°C

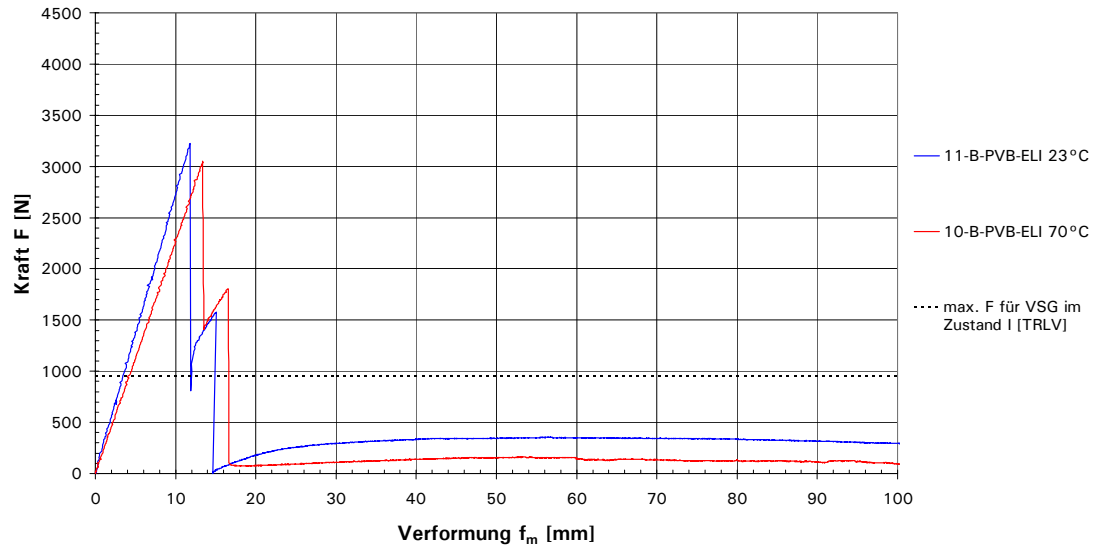


Abb. A2.9: Vier-Punkt-Biegeversuch mit Versuchskörpern PVB-ELI

A3 Vier-Punkt-Biegeversuche mit Vorschädigung

Für die Bestimmung der Resttragfähigkeit wurden je Variationskriterium $n = 3$ Stichproben untersucht.

Für die statistische Auswertung der charakteristischen Resttraglast F_k liegt die t-Verteilung von Gosset mit $f = (n-1) = 2$ Freiheitsgraden und einer Quantile von $t_{0,95} = 2,920$ bei einer einseitigen Abgrenzung zu Grunde.

$$F_{k;\alpha} = F_M - t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (A3.1)$$

$$F_M = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \quad (A3.2)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_M)^2}{n-1} \quad (A3.3)$$

Für die im Versuch ermittelte Momenten-Krümmungs-Beziehung gilt Folgendes: Der Krümmungsverlauf (κ_v) zwischen den Lastschneiden wird als Kreisbogensehne angenommen, deren Stroh sich aus der Differenz von gemittelter Mittendurchbiegung f_m und Traversenweg f_T ergibt.

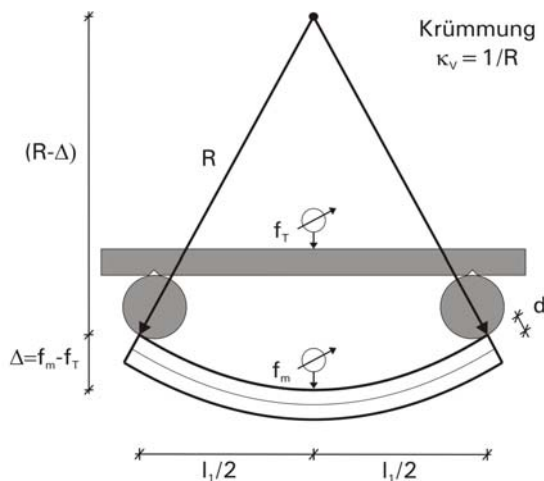


Abb. A3.1: Krümmungsermittlung aus Messwerten f_m und f_T

Der Versuchsaufbau ist analog zu dem im Vier-Punkt-Biegeversuch ohne Vorschädigung verwendeten.

Versuchskörpertyp: SGP und SGPII

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2):

SGP 1,56 mm

SGPII 2,28 mm

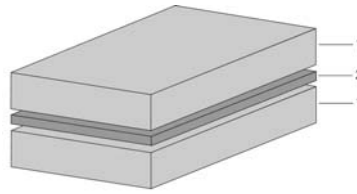


Abb. A3.2: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:

23°C und 40°C

Versuchsgeschwindigkeit:

0,2 mm/s

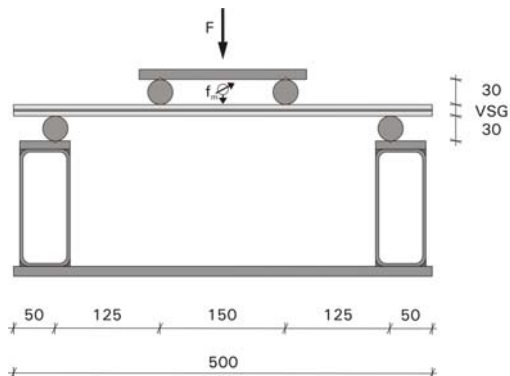


Abb. A3.3: Versuchsaufbau [mm]

SGP: Resttragfähigkeit bei 23°C und 40°C

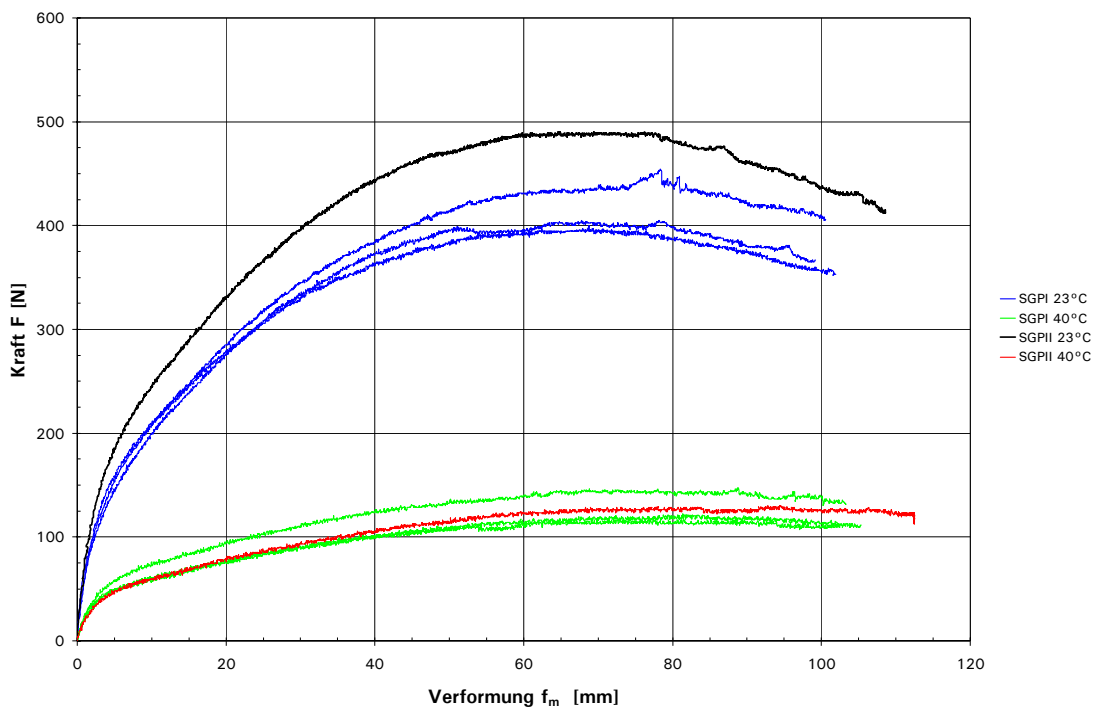
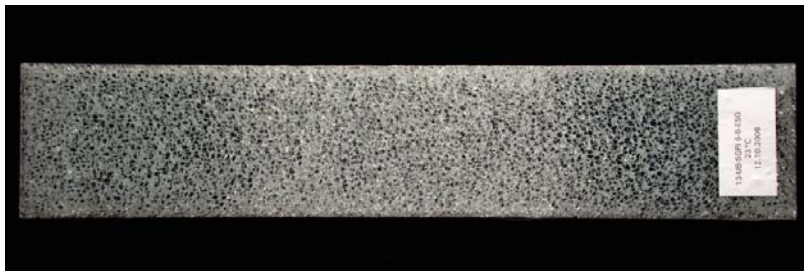


Abb. A3.4: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern SGP und SGPII

Resttragfähigkeit von SGP und SGPII Proben bei 23°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.5: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{12-UB-SGP}$	= 454 N	$F_{01-UB-SGPII}$	= 490 N
$F_{13-UB-SGP}$	= 405 N	s	= 30 N
$F_{01-UB-SGP}$	= 400 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP23°C}$	= 420 N	$F_{k;0,95-SGP}$	= 369 N

SGP: Resttragfähigkeit bei 23°C

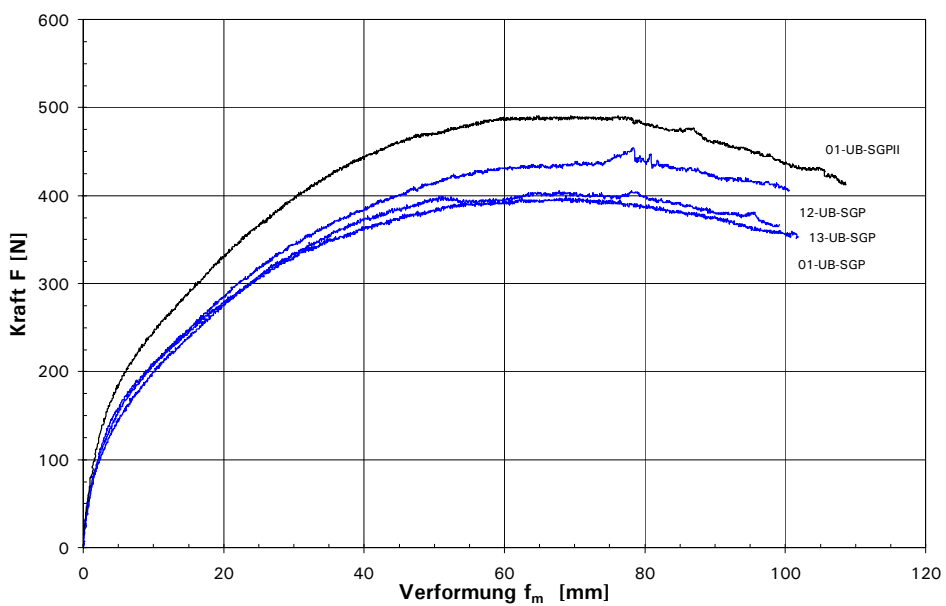


Abb. A3.6: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP und SGPII bei 23°C

Resttragfähigkeit von SGP und SGP II Proben bei 40°C

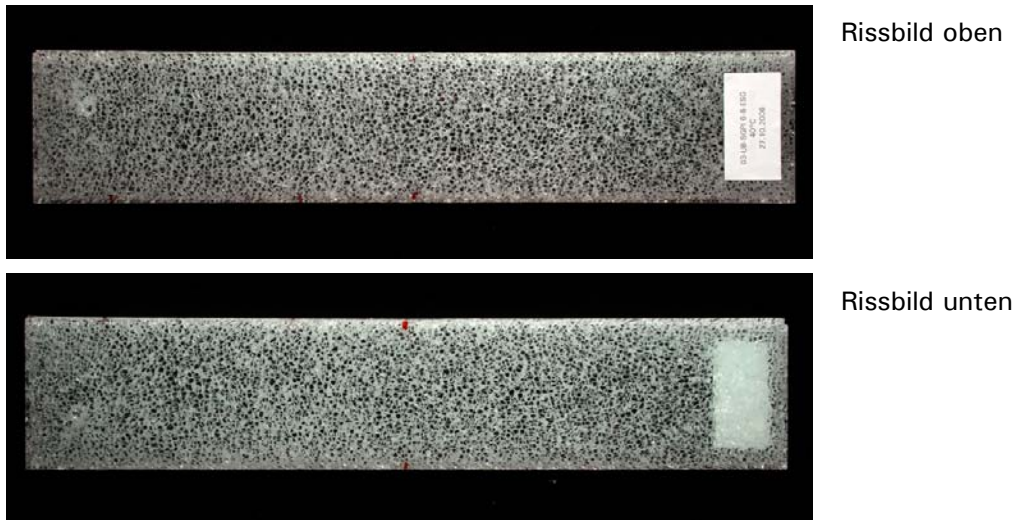


Abb. A3.7: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{14-UB-SGP}$	= 128 N	$F_{02-UB-SGPII}$	= 130 N
$F_{03-UB-SGP}$	= 116 N	s	= 16 N
$F_{02-UB-SGP}$	= 147 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP}$	= 131 N	$F_{k;0,95-SGP}$	= 104 N

SGP: Resttragfähigkeit bei 40°C

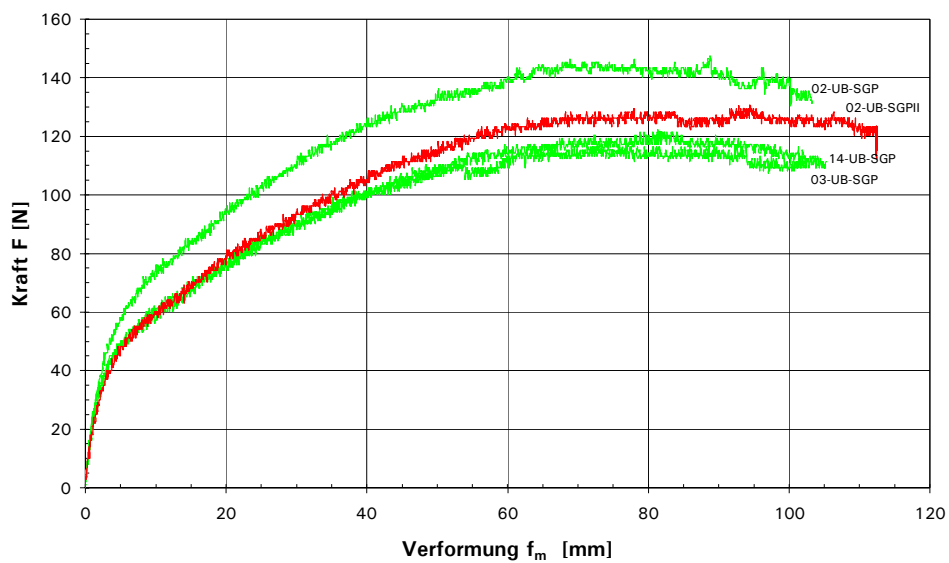
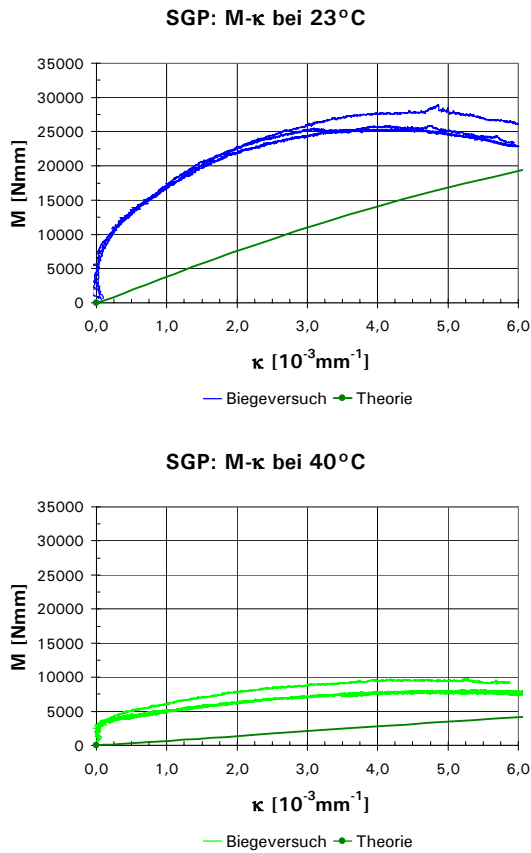


Abb. A3.8: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP und SGPII bei 40°C

Momenten-Krümmungs-Verlauf



Keine Resttragfähigkeit bei 70°C!

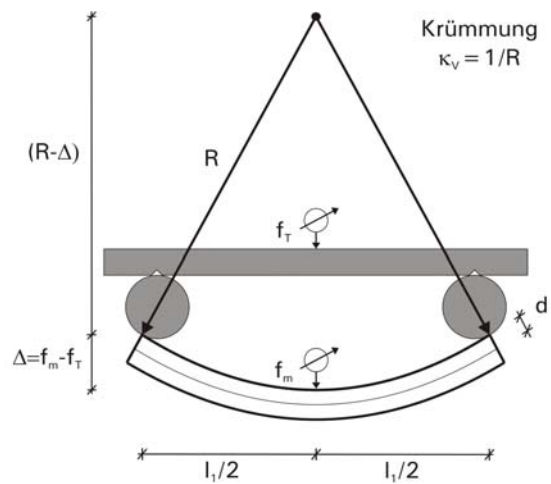


Abb. A3.9: Momenten-Krümmungs-Verlauf bei 23°C und 40°C

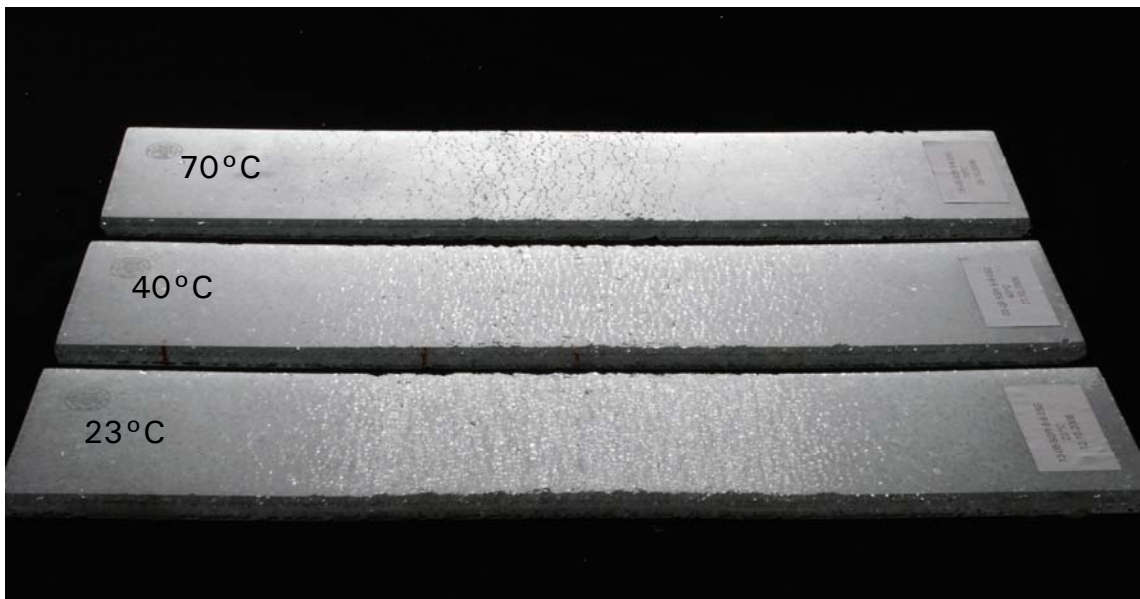


Abb. A3.10: Rissbild an der Oberseite der Versuchskörper nach den Versuchen bei 23°C, 40°C und 70°C

Versuchskörpertyp: SGP-EGI

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2): SGP 1,56 mm

Bewehrung (3): Gewebe EGI

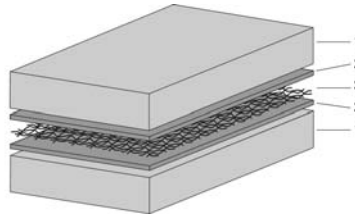


Abb. A3.11: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:

23°C, 40°C und 70°C

Versuchsgeschwindigkeit:

0,2 mm/s

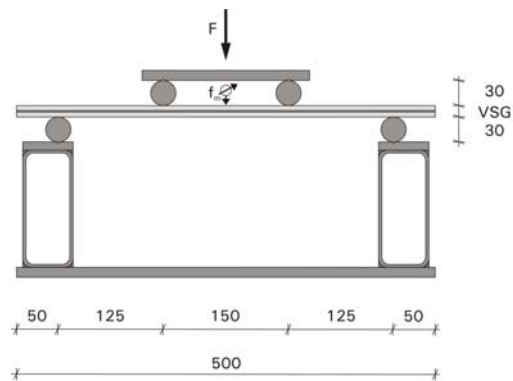


Abb. A3.12: Versuchsaufbau [mm]

SGP-EGI: Resttragfähigkeit bei 23°C, 40°C und 70°C

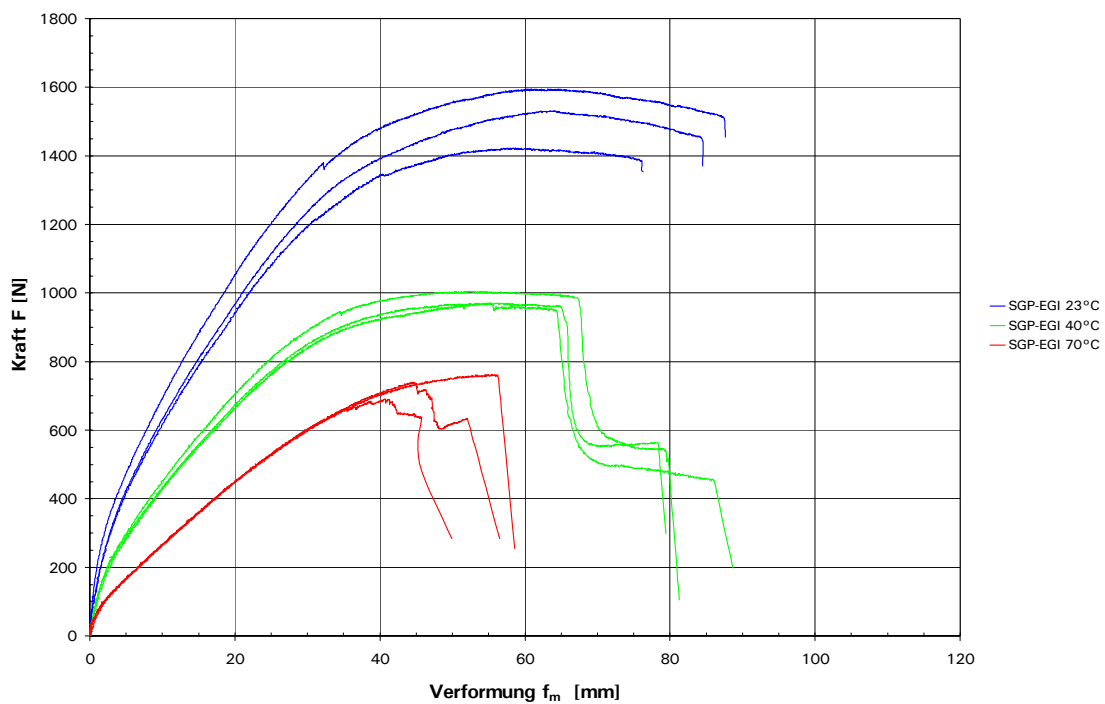
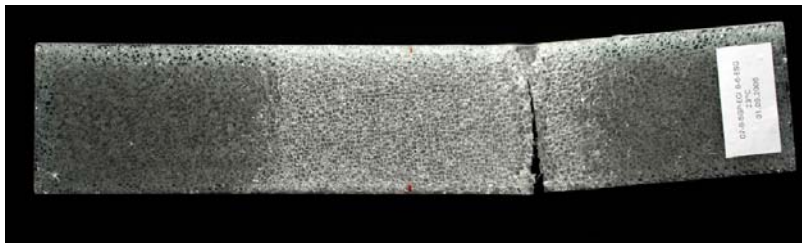
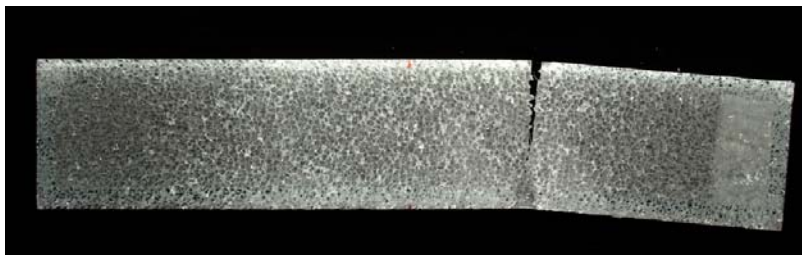


Abb. A3.13: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern SGP-EGI

Resttragfähigkeit von SGP-EGI Proben bei 23°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.14: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{07-B-SGP-EGI}$	= 1.531 N	Standardabweichung:	
$F_{02-B-SGP-EGI}$	= 1.595 N	s	= 87 N
$F_{06-B-SGP-EGI}$	= 1.422 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP-EGI}$	= 1.516 N	$F_{k;0,95}$	= 1.369 N

SGP-EGI: Resttragfähigkeit bei 23°C

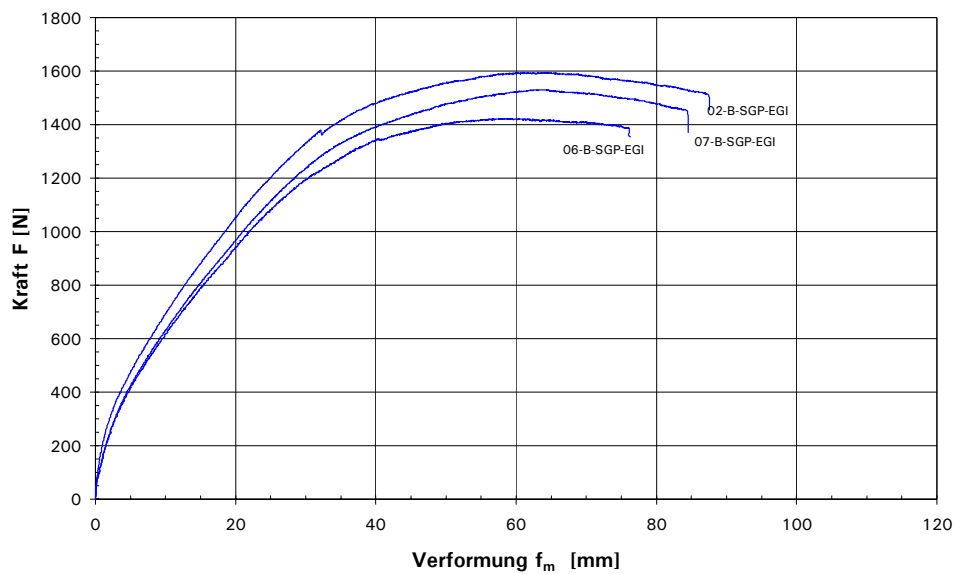


Abb. A3.15: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP-EGI bei 23°C

Resttragfähigkeit von SGP-EGI Proben bei 40°C

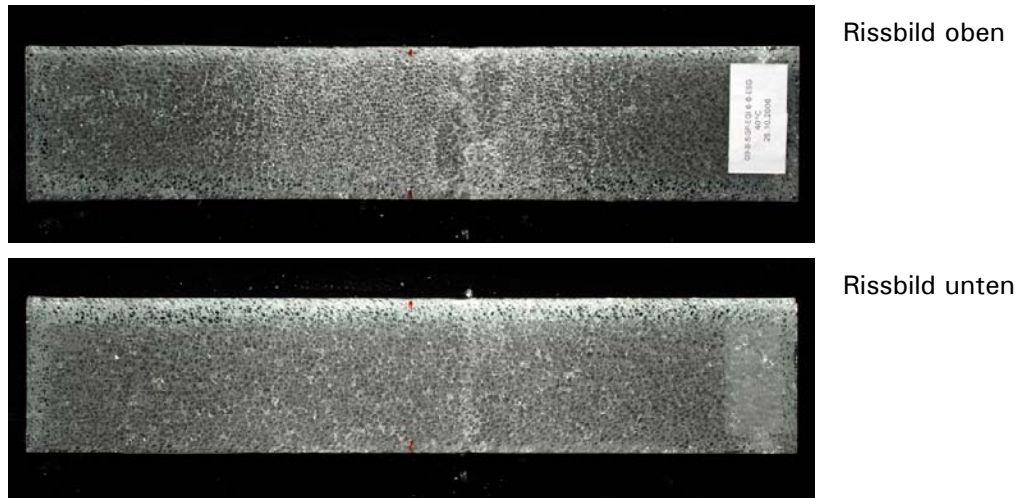


Abb. A3.16: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{09-B-SGP-EGI}$	= 969 N	Standardabweichung:	
$F_{10-B-SGP-EGI}$	= 1.005 N	s	= 20 N
$F_{05-B-SGP-EGI}$	= 971 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP-EGI}$	= 982 N	$F_{k;0,95}$	= 948 N

SGP-EGI: Resttragfähigkeit bei 40°C

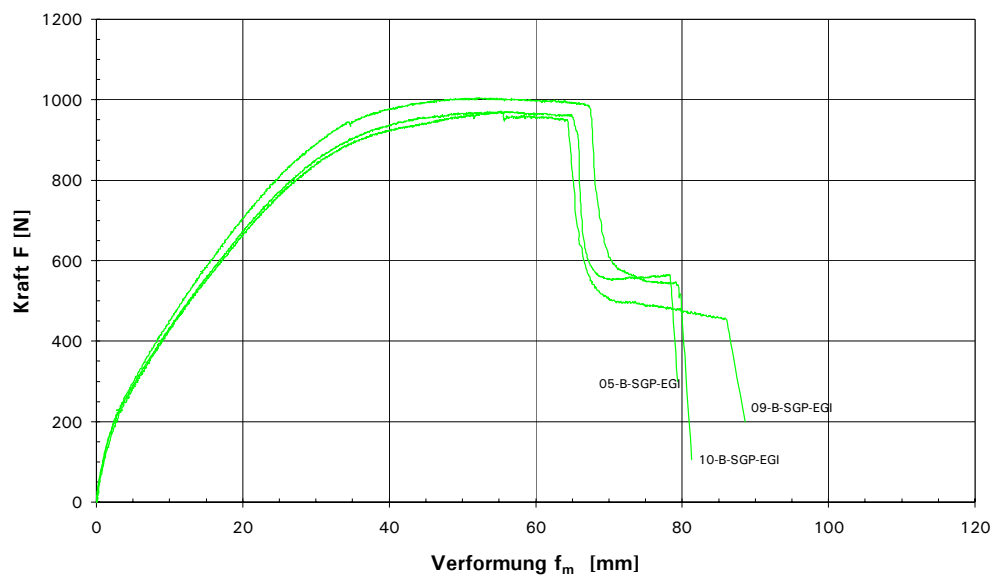
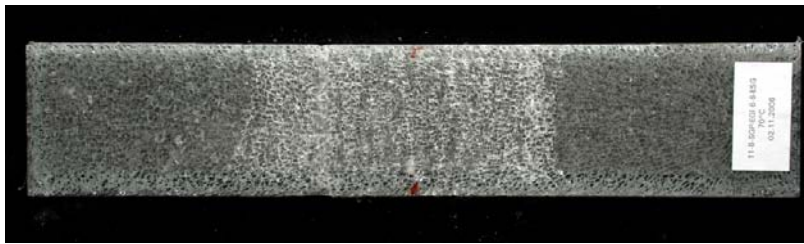
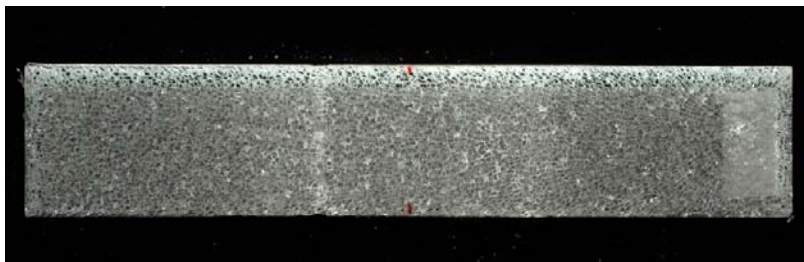


Abb. A3.17: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP-EGI bei 40°C

Resttragfähigkeit von SGP-EGI Proben bei 70°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.18: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{03-B-SGP-EGI}$	= 691 N	Standardabweichung:	
$F_{04-B-SGP-EGI}$	= 739 N	s	= 36 N
$F_{11-B-SGP-EGI}$	= 762 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP-EGI}$	= 731 N	$F_{k;0,95}$	= 669 N

SGP-EGI: Resttragfähigkeit bei 70°C

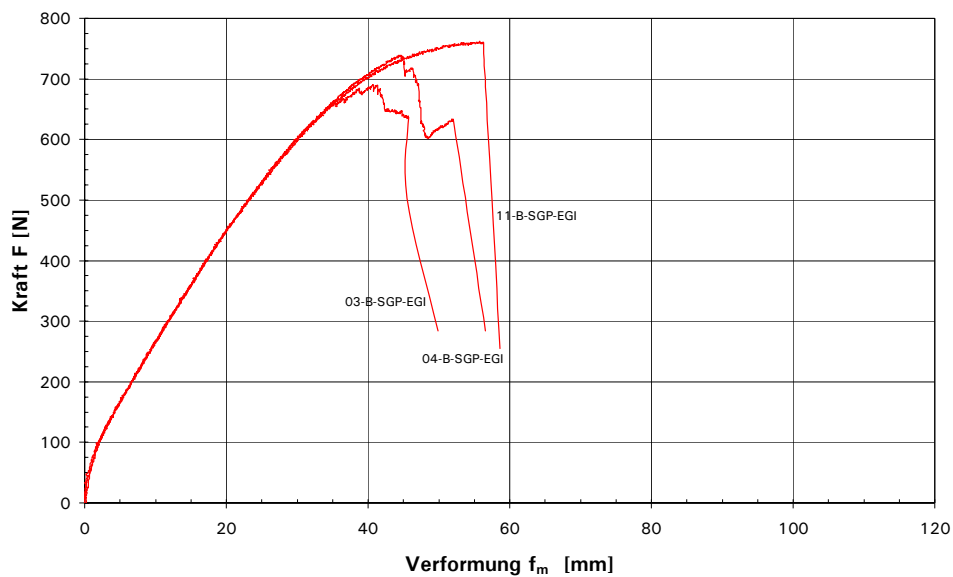


Abb. A3.19: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP-EGI bei 70°C

Momenten-Krümmungs-Verlauf

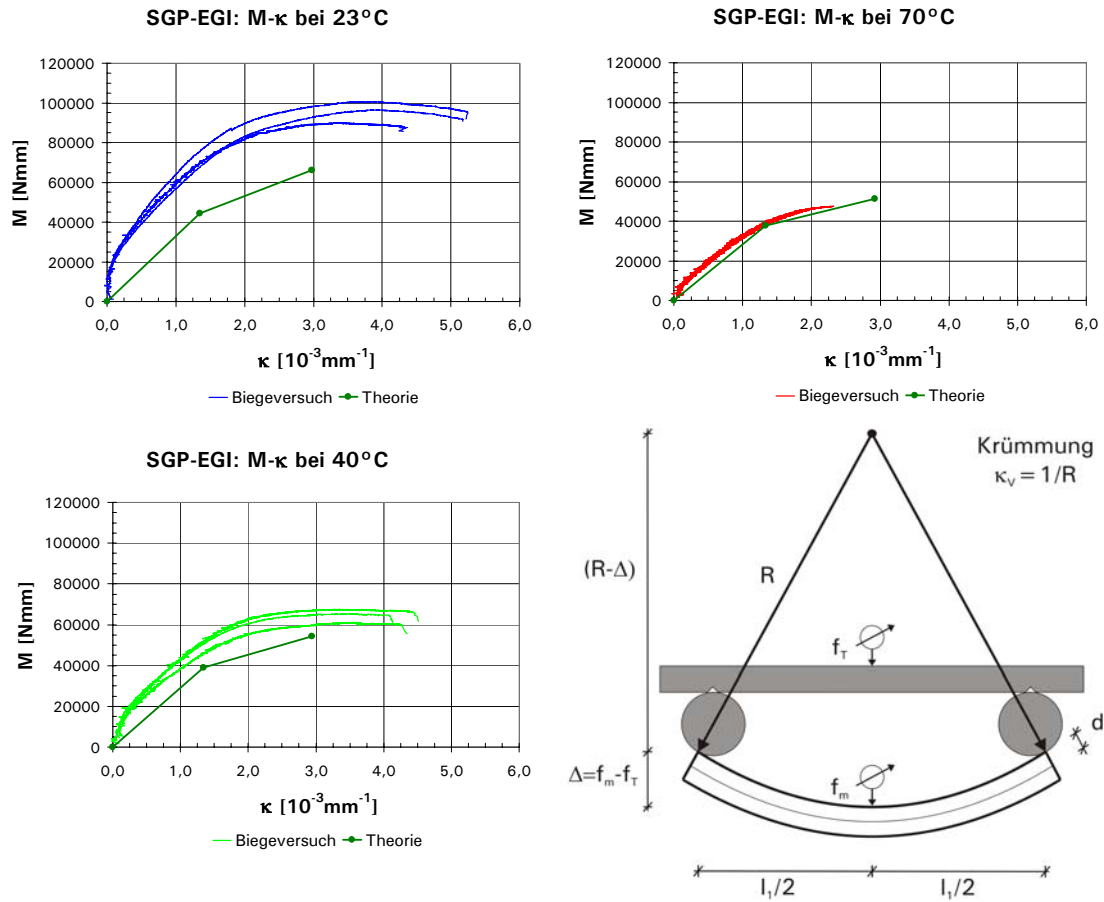


Abb. A3.20: Momenten-Krümmungs-Verlauf bei 23°C, 40°C und 70°C

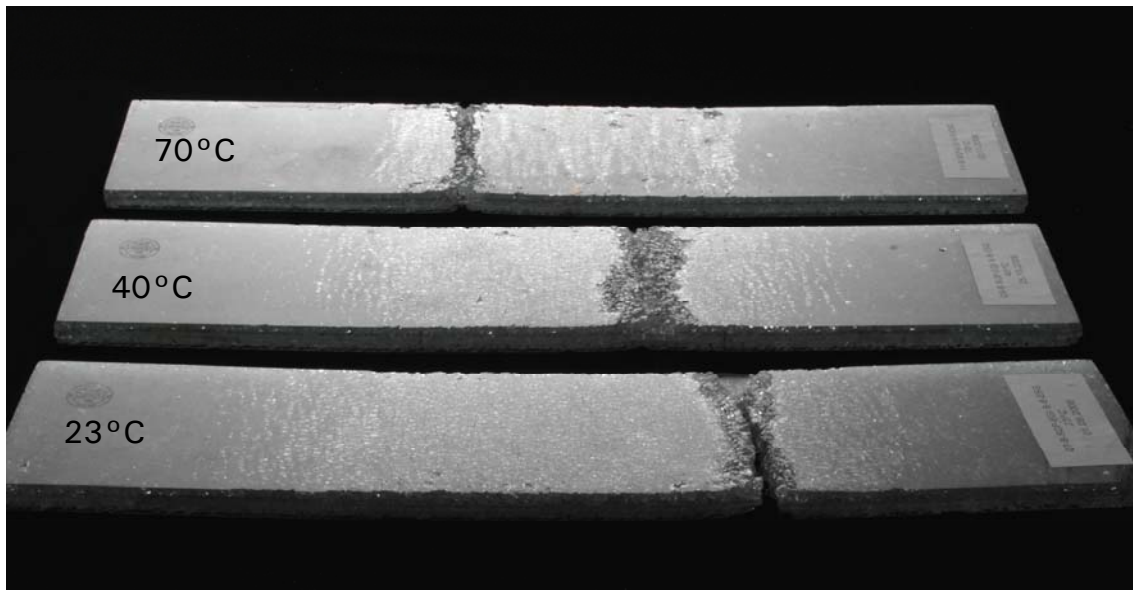


Abb. A3.21: Rissbild an der Oberseite der Versuchskörper nach den Versuchen bei 23°C, 40°C und 70°C

Versuchskörpertyp: SGP-EGII

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2): SGP 1,56 mm

Bewehrung (3): Gewebe EGII

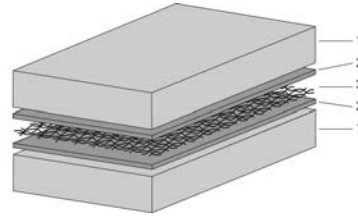


Abb. A3.22: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:
23°C, 40°C und 70°C

Versuchsgeschwindigkeit:
0,2 mm/s

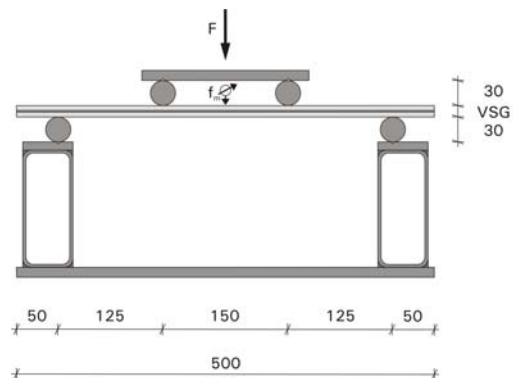


Abb. A3.23: Versuchsaufbau [mm]

SGP-EGII: Resttragfähigkeit bei 23°C, 40°C und 70°C

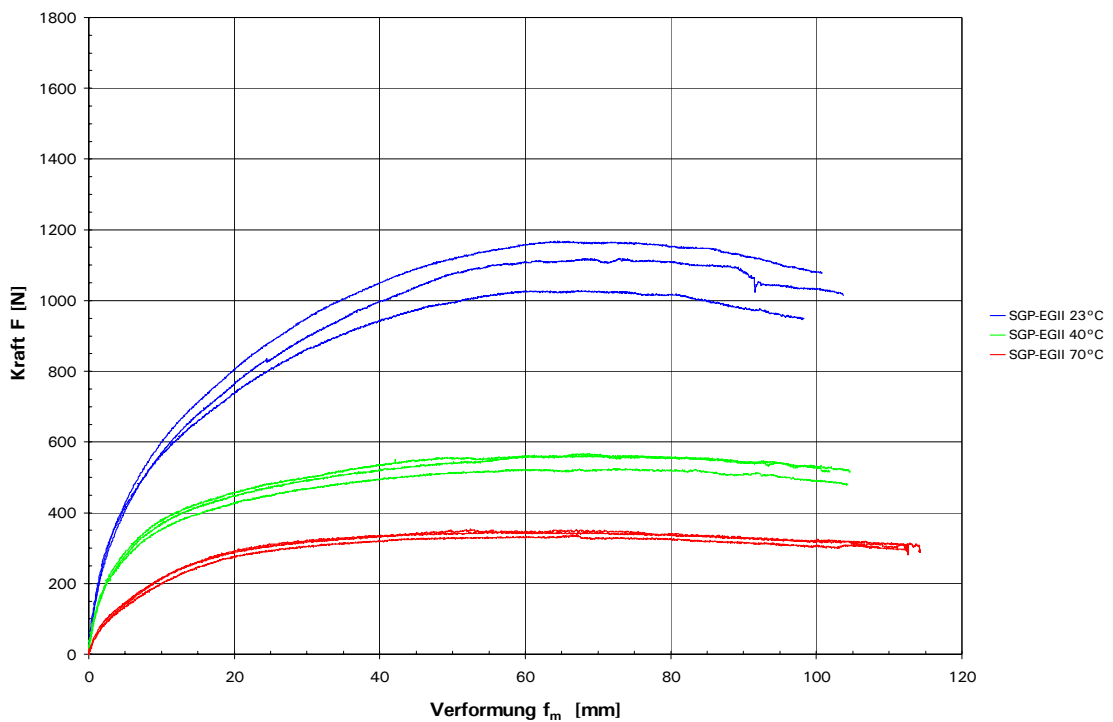
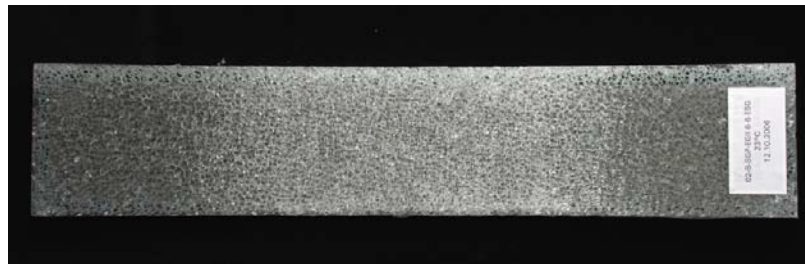
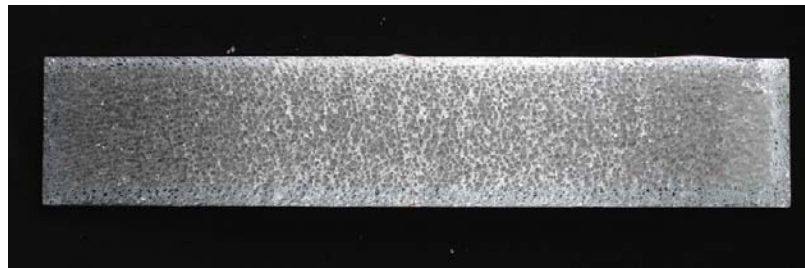


Abb. A3.24: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern SGP-EGII

Resttragfähigkeit von SGP-EGII Proben bei 23°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.25: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{01-B-SGP-EGII}$	= 1.167 N	Standardabweichung:	
$F_{02-B-SGP-EGII}$	= 1.119 N	s	= 71 N
$F_{13-B-SGP-EGII}$	= 1.028 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP-EGII}$	= 1.105 N	$F_{k;0,95}$	= 986 N

SGP-EGII: Resttragfähigkeit bei 23°C

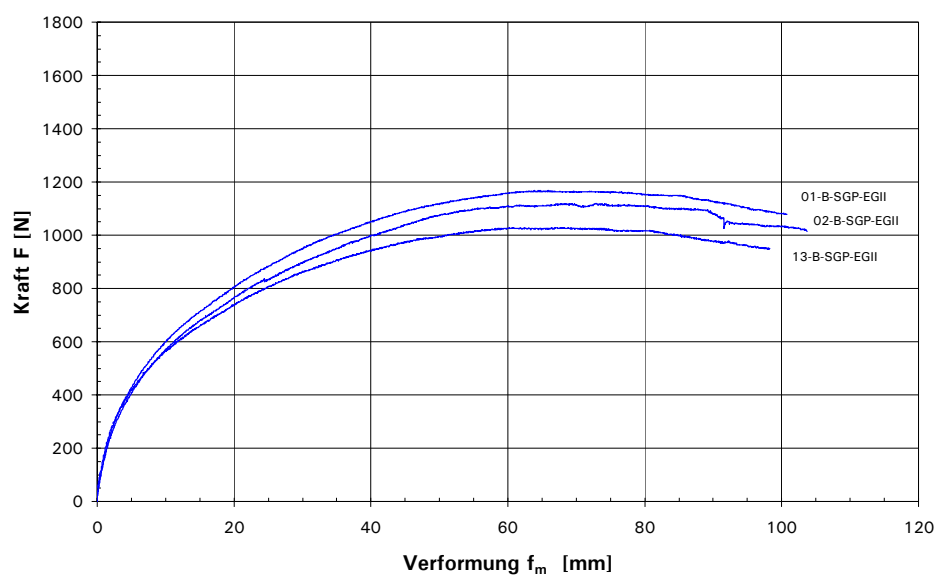
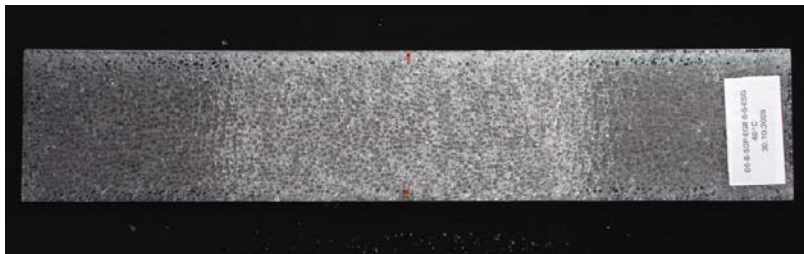
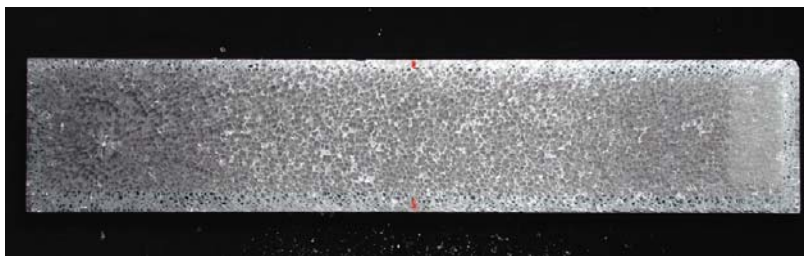


Abb. A3.26: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP-EGII bei 23°C

Resttragfähigkeit von SGP-EGII Proben bei 40°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.27: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{11-B-SGP-EGII}$	= 561 N	Standardabweichung:	
$F_{05-B-SGP-EGII}$	= 525 N	s	= 23 N
$F_{06-B-SGP-EGII}$	= 568 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP-EGII}$	= 551 N	$F_{k;0,95}$	= 513 N

SGP-EGII: Resttragfähigkeit 40°C

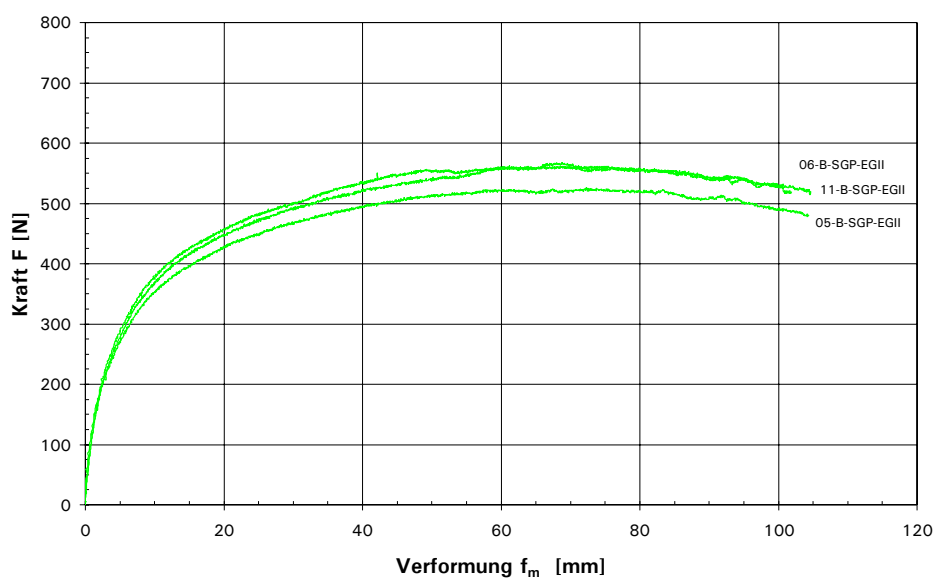


Abb. A3.28: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP-EGII bei 40°C

Resttragfähigkeit von SGP-EGII Proben bei 70°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.29: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{03-B-SGP-EGII}$	= 346 N	Standardabweichung:	
$F_{04-B-SGP-EGII}$	= 337 N	s	= 8 N
$F_{12-B-SGP-EGII}$	= 353 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,SGP-EGII}$	= 345 N	$F_{k;0,95}$	= 332 N

SGP-EGII: Resttragfähigkeit bei 70°C

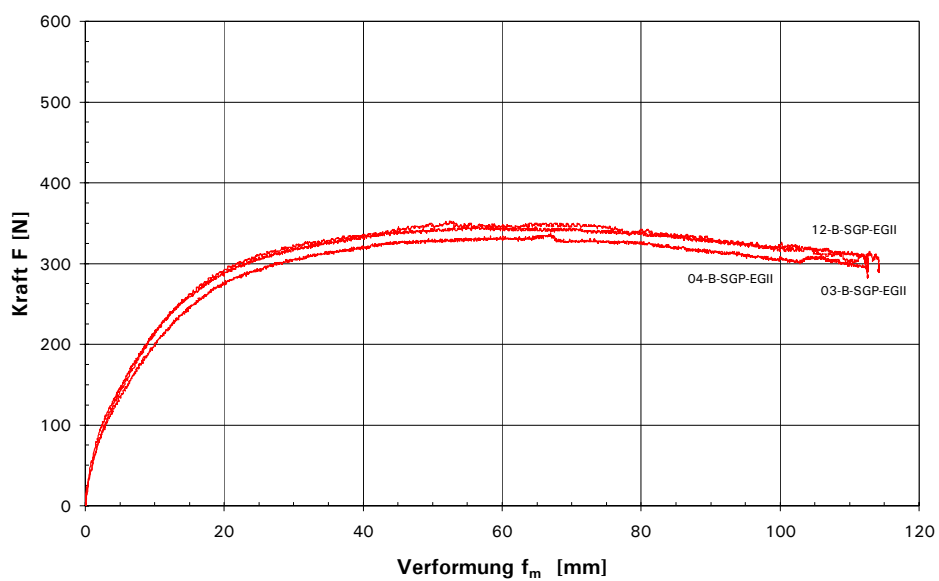


Abb. A3.30: Vier-Punkt-Biegeversuche mit SGP-EGII bei 70°C

Momenten-Krümmungs-Verlauf

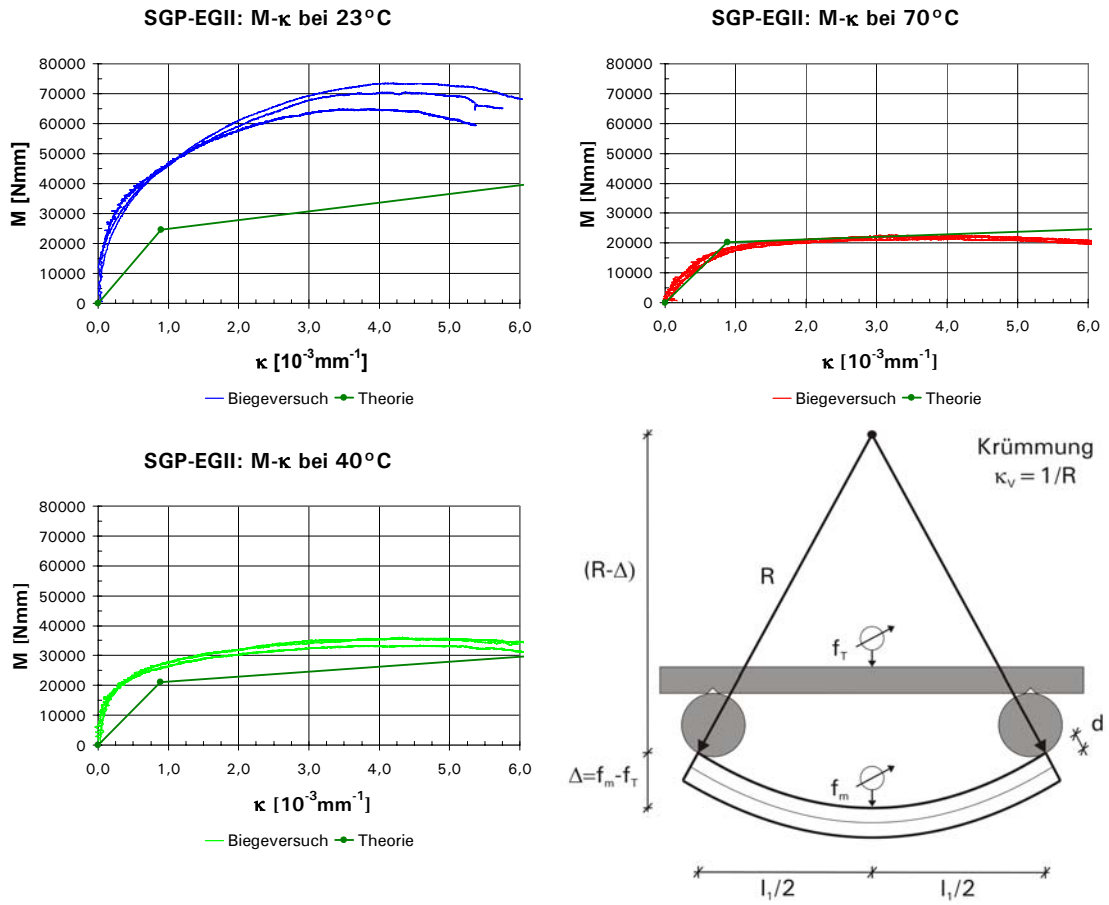


Abb. A3.31: Momenten-Krümmungs-Verlauf bei 23°C, 40°C und 70°C

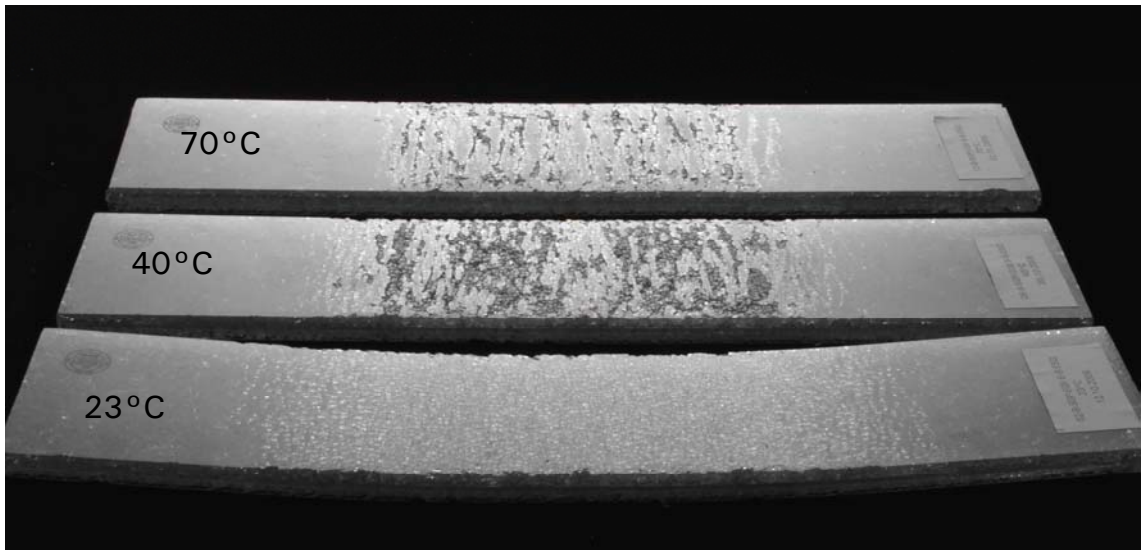


Abb. A3.32: Rissbild an der Oberseite der Versuchskörper nach den Versuchen bei 23°C, 40°C und 70°C

Versuchskörpertyp: SGP-ELI

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2): SGP 1,52 mm

Bewehrung (3): Lochblech ELI

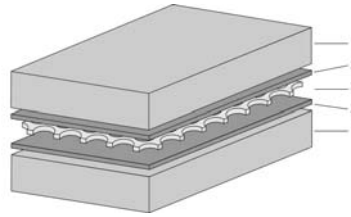


Abb. A3.33: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:

23°C, 40°C und 70°C

Versuchsgeschwindigkeit:

0,2 mm/s

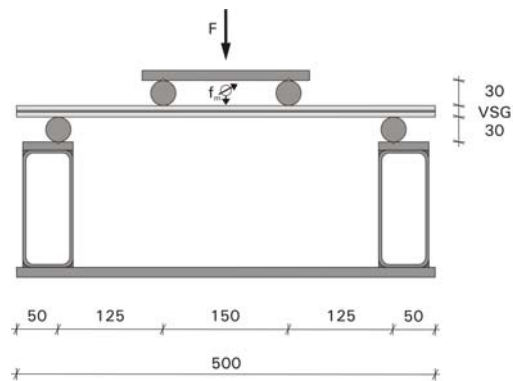


Abb. A3.34: Versuchsaufbau [mm]

$$F_{\text{SGP-ELI,23}^\circ\text{C}} = 1019 \text{ N}$$

$$F_{\text{SGP-ELI,40}^\circ\text{C}} = 741 \text{ N}$$

$$F_{\text{SGP-ELI,70}^\circ\text{C}} = 492 \text{ N}$$

SGP-ELI: Resttragfähigkeit bei 23°C, 40°C und 70°C

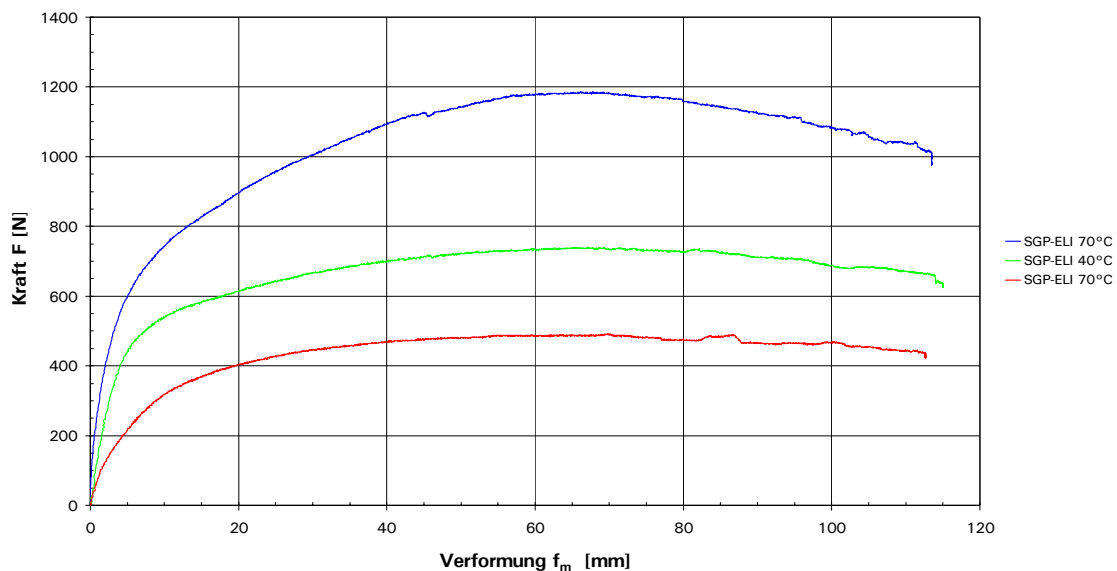


Abb. A3.35: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern SGP-ELI

Versuchskörpertyp: PVB-EGI

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2): PVB 0,76 mm

Bewehrung (3): Gewebe EGI

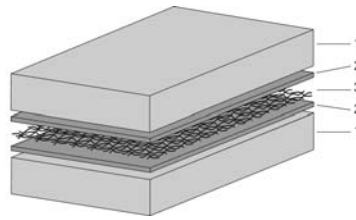


Abb. A3.36: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:

23°C, 40°C und 70°C

Versuchsgeschwindigkeit:

0,2 mm/s

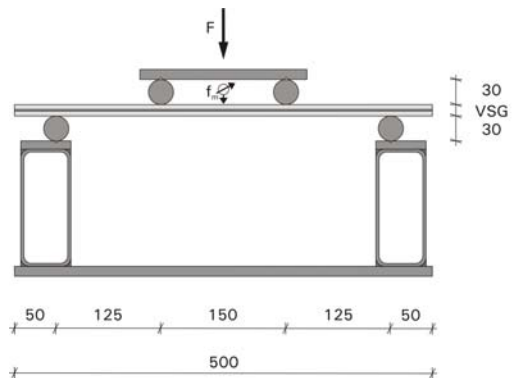


Abb. A3.37: Versuchsaufbau [mm]

PVB-EGI: Resttragfähigkeit bei 23°C, 40°C und 70°C

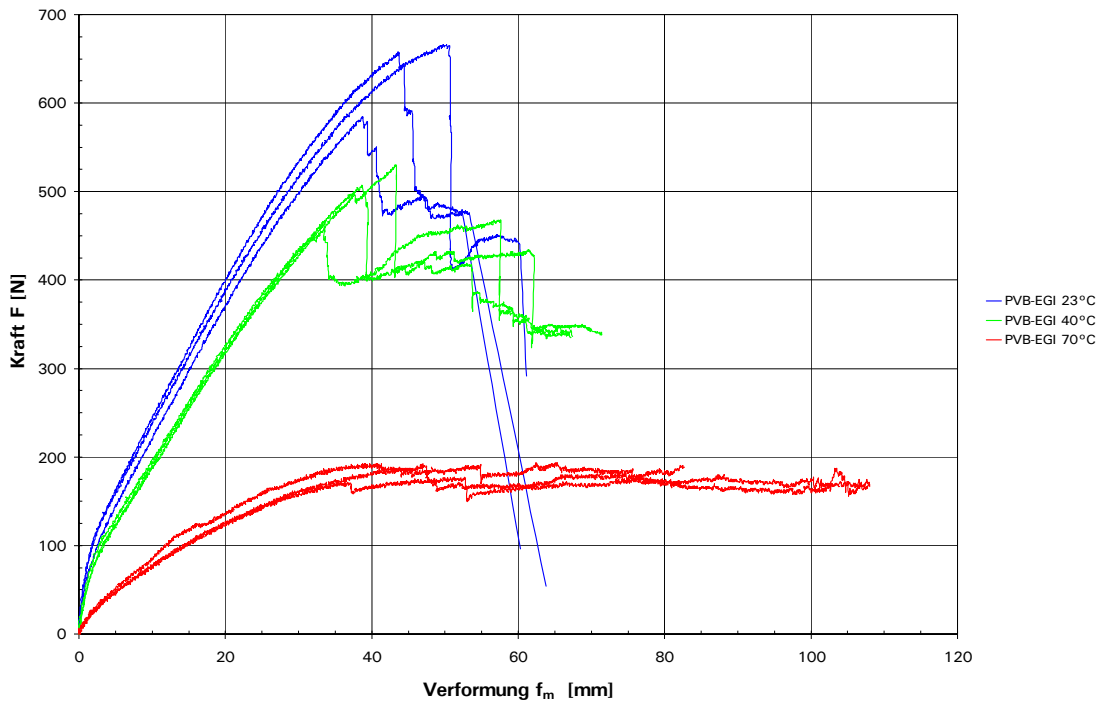
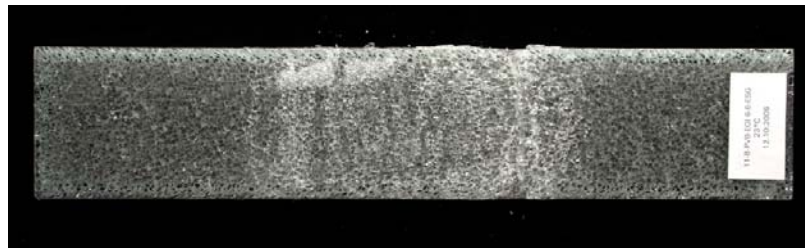
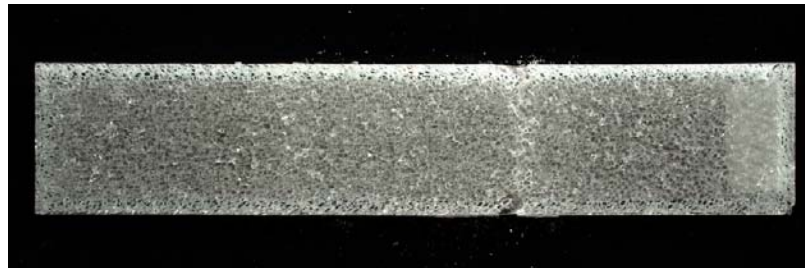


Abb. A3.38: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern PVB-EGI

Resttragfähigkeit von PVB-EGI Proben bei 23°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.39: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{02-B-PVB-EGI}$	= 585 N	Standardabweichung:	
$F_{11-B-PVB-EGI}$	= 658 N	s	= 45 N
$F_{15-B-PVB-EGI}$	= 666 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-EGI}$	= 636 N	$F_{k;0,95}$	= 561 N

PVB-EGI: Resttragfähigkeit bei 23°C

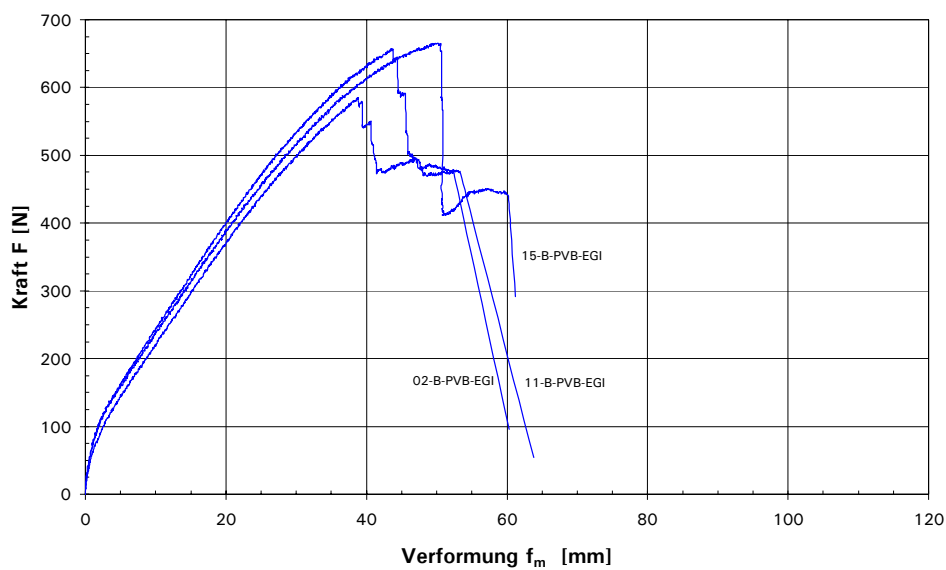
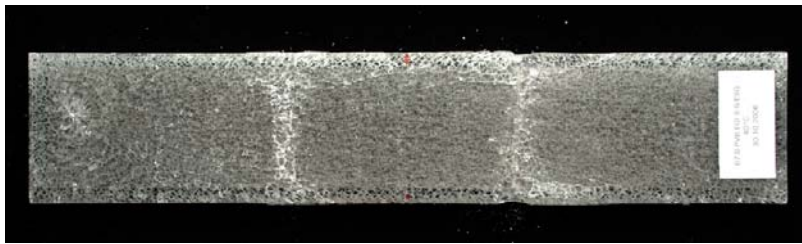
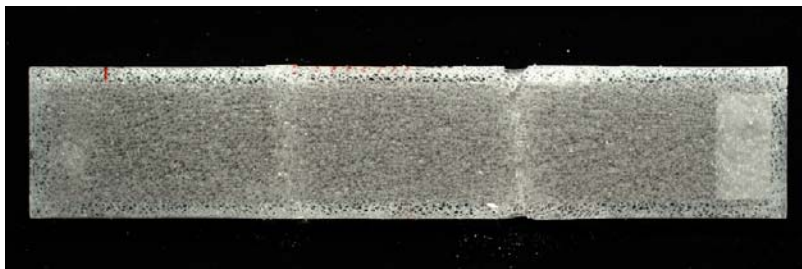


Abb. A3.40: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-EGI bei 23°C

Resttragfähigkeit von PVB-EGI Proben bei 40°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.41: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{03-B-PVB-EGI}$	= 507 N	Standardabweichung:	
$F_{16-B-PVB-EGI}$	= 458 N	s	= 37 N
$F_{07-B-PVB-EGI}$	= 530 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-EGI}$	= 499 N	$F_{k;0,95}$	= 437 N

PVB-EGI: Resttragfähigkeit bei 40°C

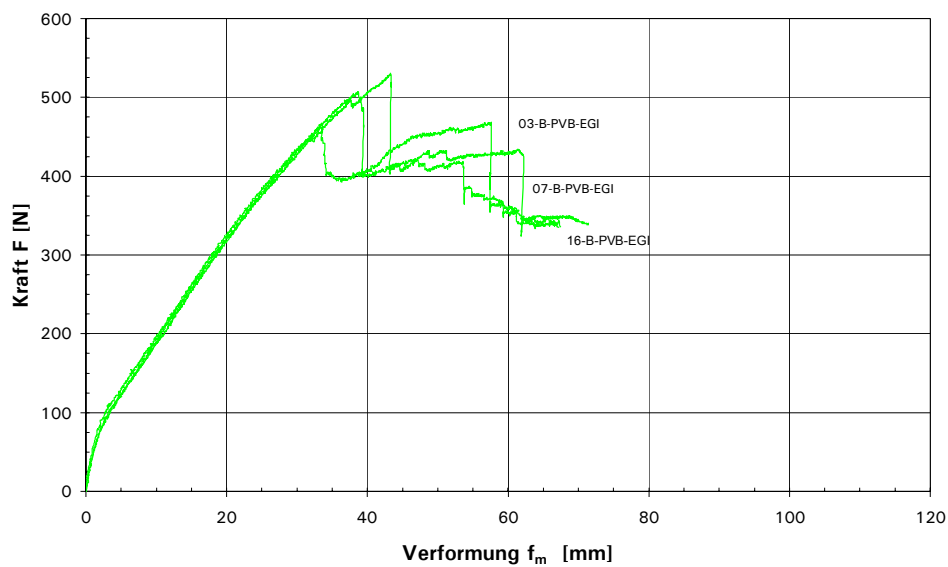
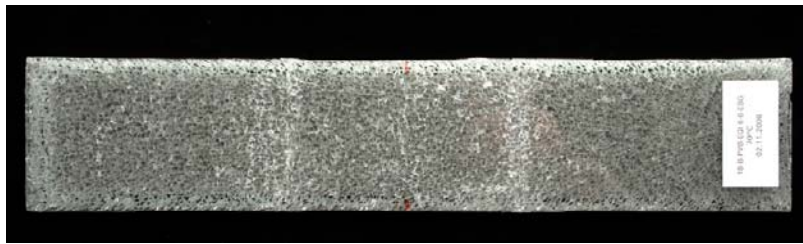
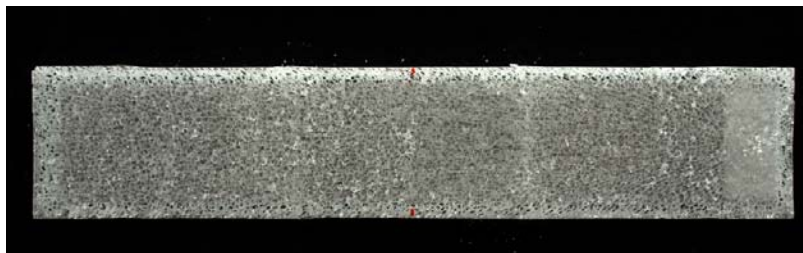


Abb. A3.42: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-EGI bei 40°C

Resttragfähigkeit von PVB-EGI Proben bei 70°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.43: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{04-B-PVB-EGI}$	= 199 N	Standardabweichung:	
$F_{05-B-PVB-EGI}$	= 192 N	s	= 4 N
$F_{18-B-PVB-EGI}$	= 199 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-EGI}$	= 196 N	$F_{k;0,95}$	= 189 N

PVB-EGI: Resttragfähigkeit bei 70°C

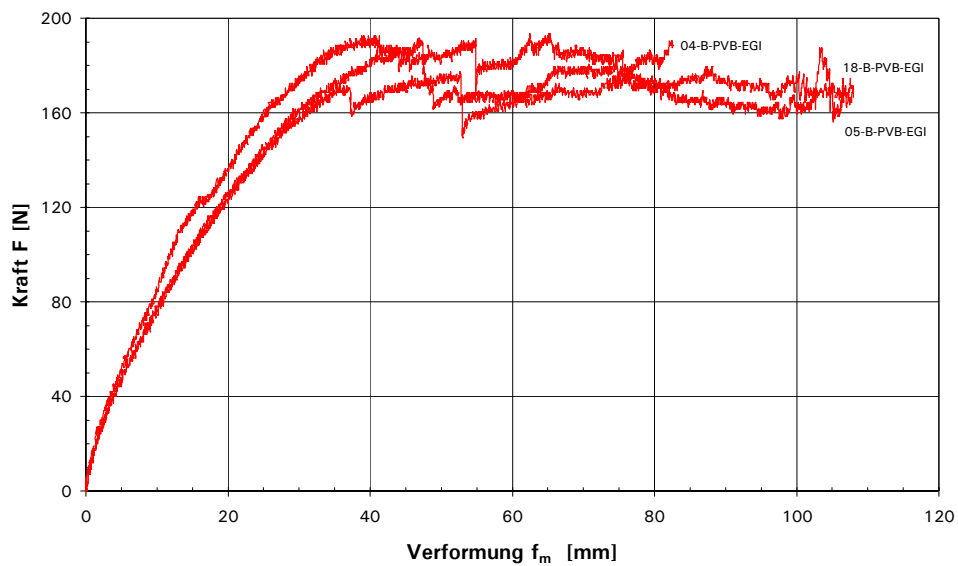


Abb. A3.44: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-EGI bei 70°C

Momenten-Krümmungs-Verlauf

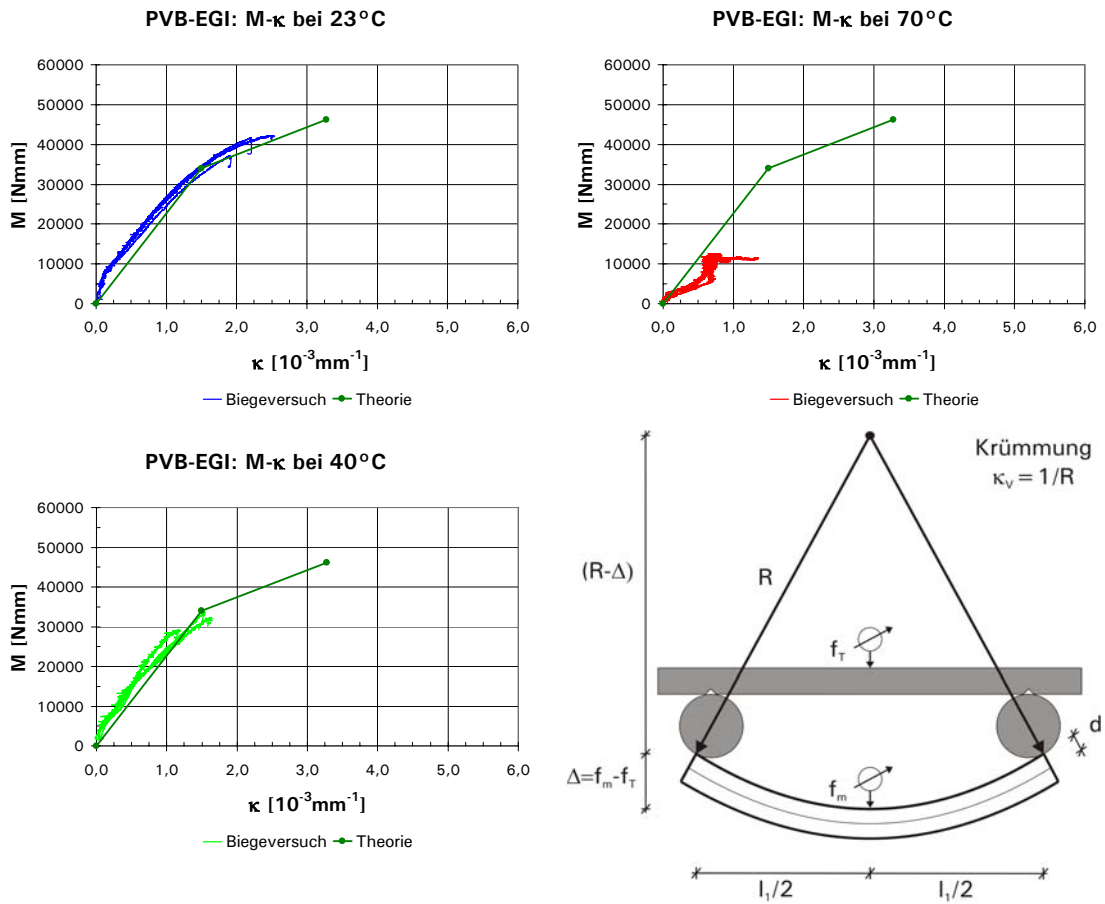


Abb. A3.45: Momenten-Krümmungs-Verlauf bei 23°C, 40°C und 70°C

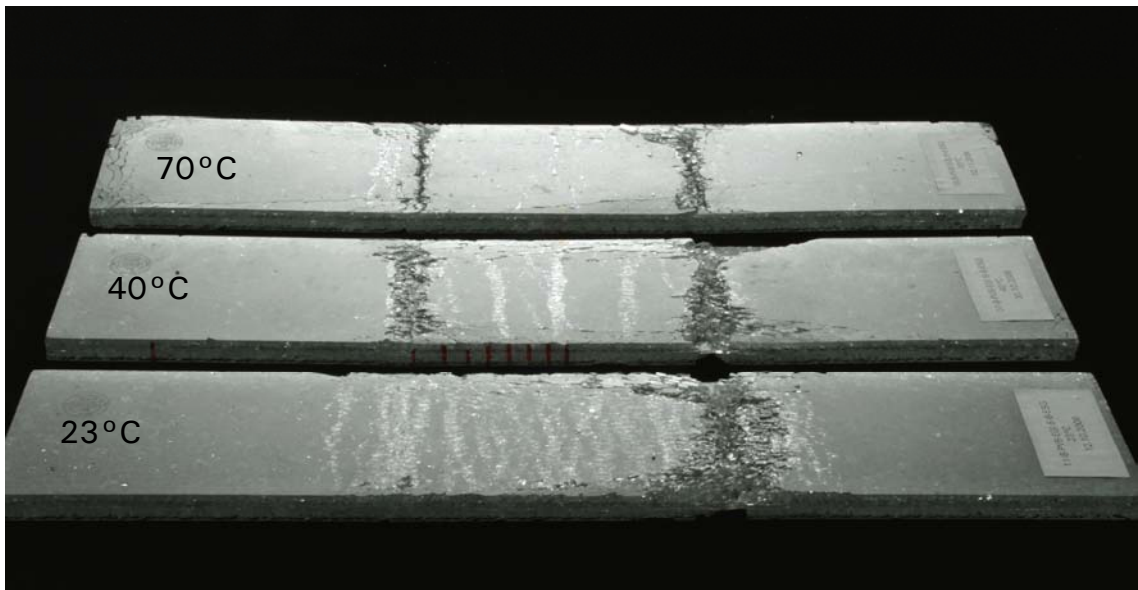


Abb. A3.46: Rissbild an der Oberseite der Versuchskörper nach den Versuchen bei 23°C, 40°C und 70°C

Versuchskörpertyp: PVB-EGII

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2): PVB 0,76 mm

Bewehrung (3): Gewebe EGII

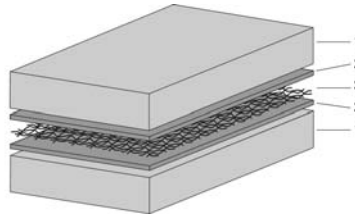


Abb. A3.47: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:

23°C, 40°C und 70°C

Versuchsgeschwindigkeit:

0,2 mm/s

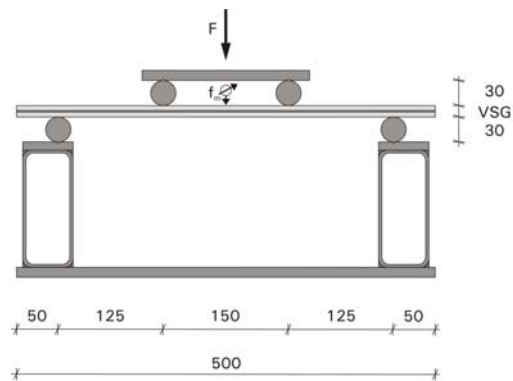


Abb. A3.48: Versuchsaufbau [mm]

PVB-EGII: Resttragfähigkeit bei 23°C, 40°C und 70°C

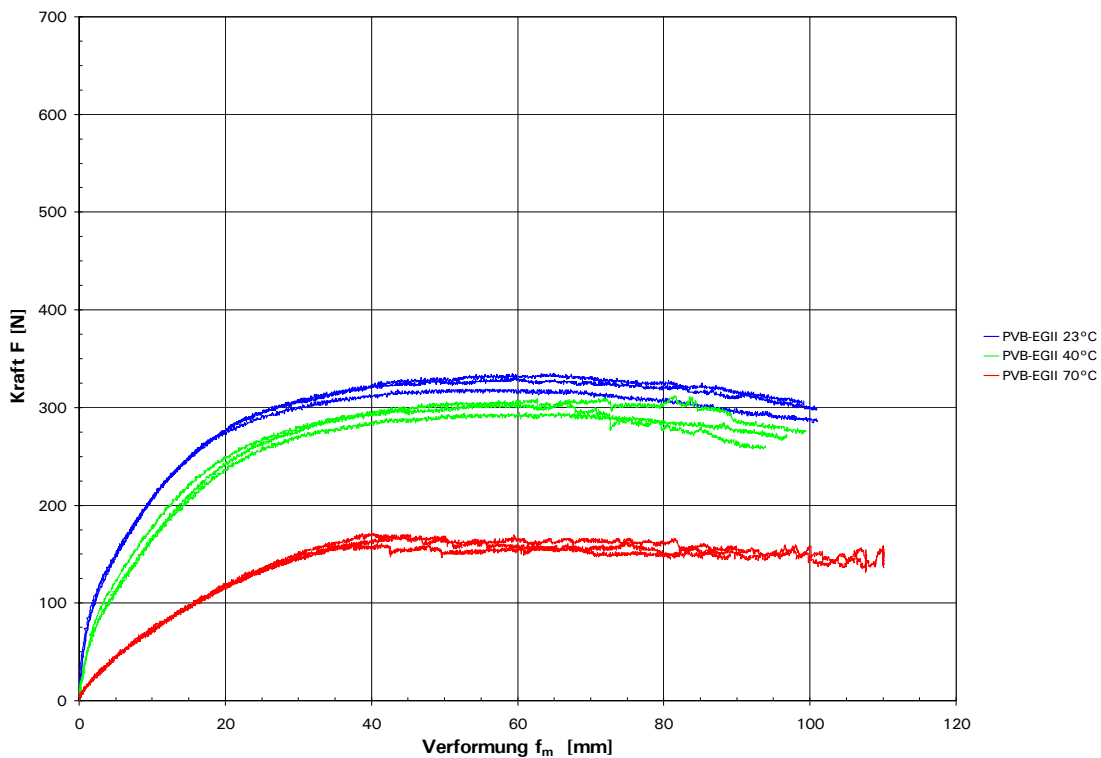
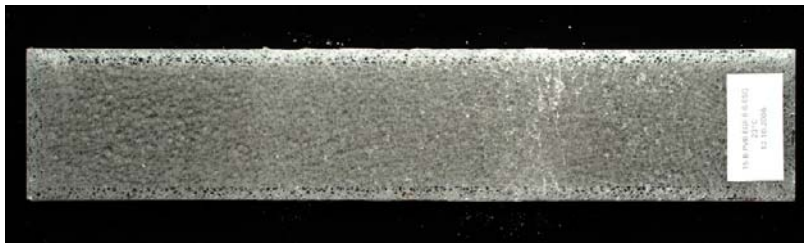
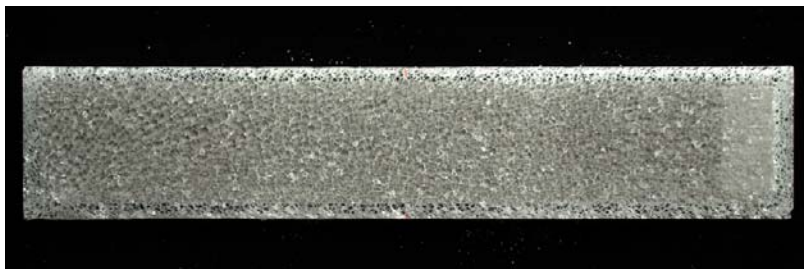


Abb. A3.49: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern PVB-EGII

Resttragfähigkeit von PVB-EGII Proben bei 23°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.50: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{01-B-PVB-EGII}$	= 331 N	Standardabweichung:	
$F_{15-B-PVB-EGII}$	= 335 N	s	= 8 N
$F_{22-B-PVB-EGII}$	= 319 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-EGII}$	= 328 N	$F_{k;0,95}$	= 314 N

PVB-EGII: Resttragfähigkeit bei 23°C

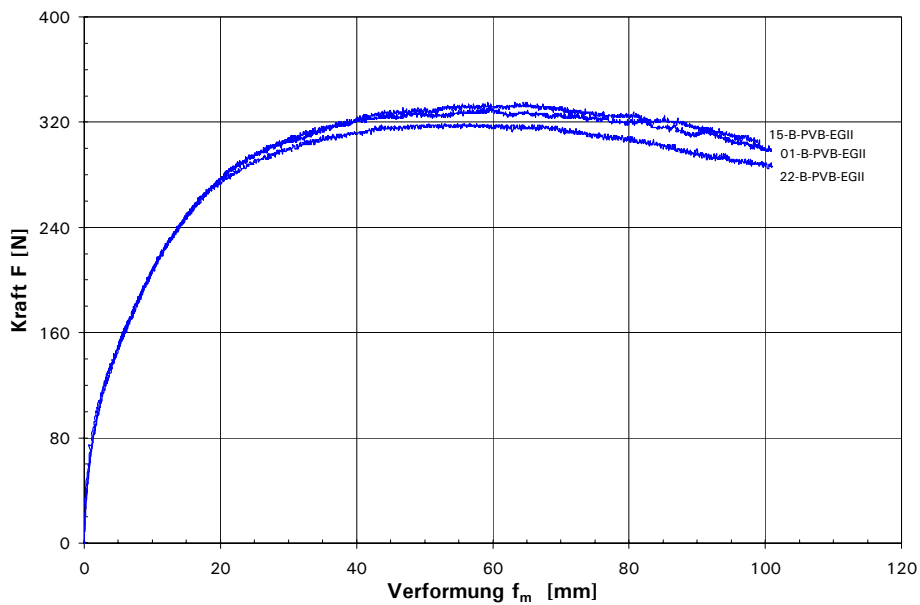
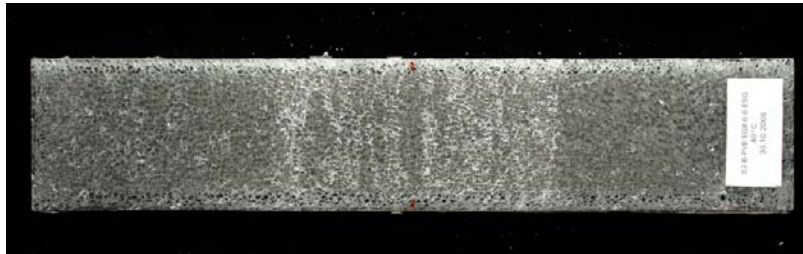
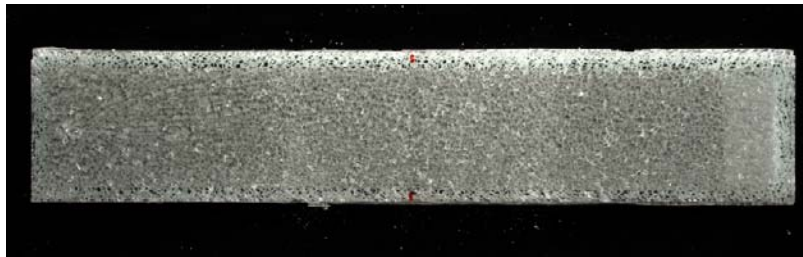


Abb. A3.51: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-EGII bei 23°C

Resttragfähigkeit von PVB-EGII Proben bei 40°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.52: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{07-B-PVB-EGII}$	= 312 N	Standardabweichung:	
$F_{18-B-PVB-EGII}$	= 295 N	s	= 9 N
$F_{02-B-PVB-EGII}$	= 309 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-EGII}$	= 305 N	$F_{k;0,95}$	= 290 N

PVB-EGII: Resttragfähigkeit bei 40°C

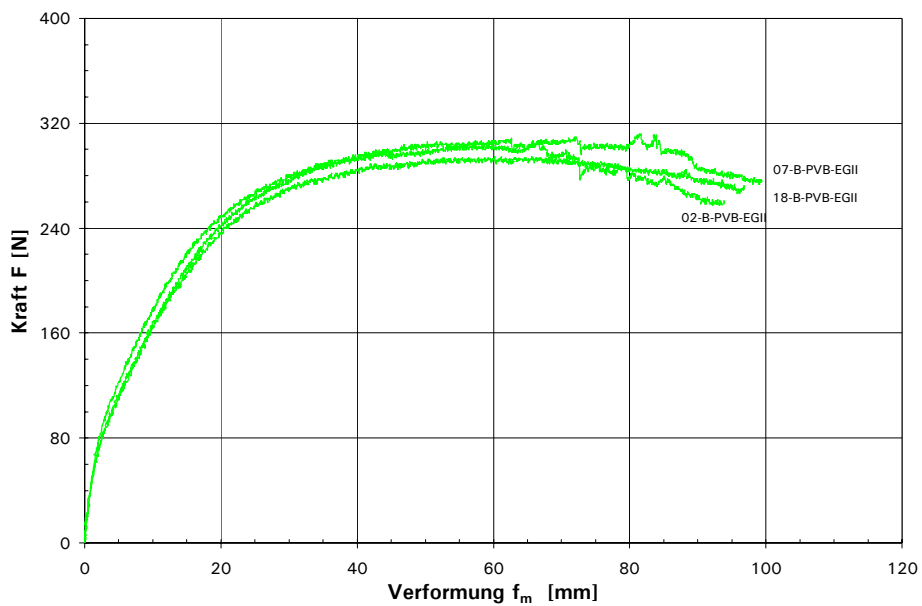
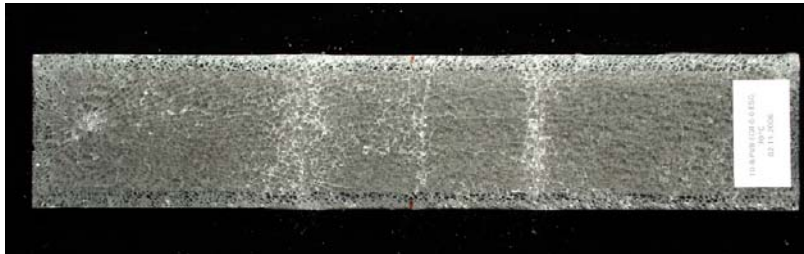


Abb. A3.53: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-EGII bei 40°C

Resttragfähigkeit von PVB-EGII Proben bei 70°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.54: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{17-B-PVB-EGII}$	= 173 N	Standardabweichung:	
$F_{19-B-PVB-EGII}$	= 168 N	s	= 3 N
$F_{10-B-PVB-EGII}$	= 171 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-EGII}$	= 171 N	$F_{k;0,95}$	= 167 N

PVB-EGII: Resttragfähigkeit bei 70°C

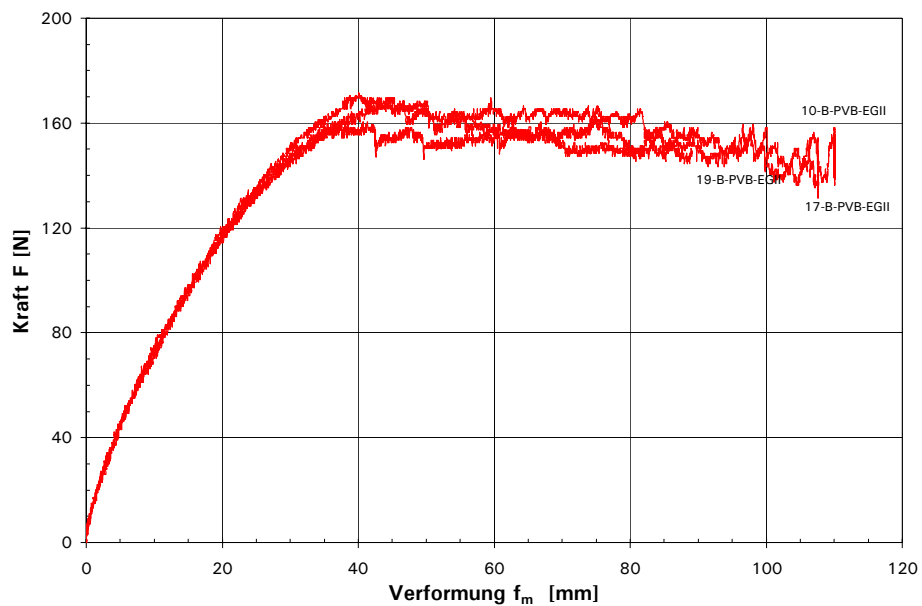


Abb. A3.55: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-EGII bei 70°C

Momenten-Krümmungs-Verlauf

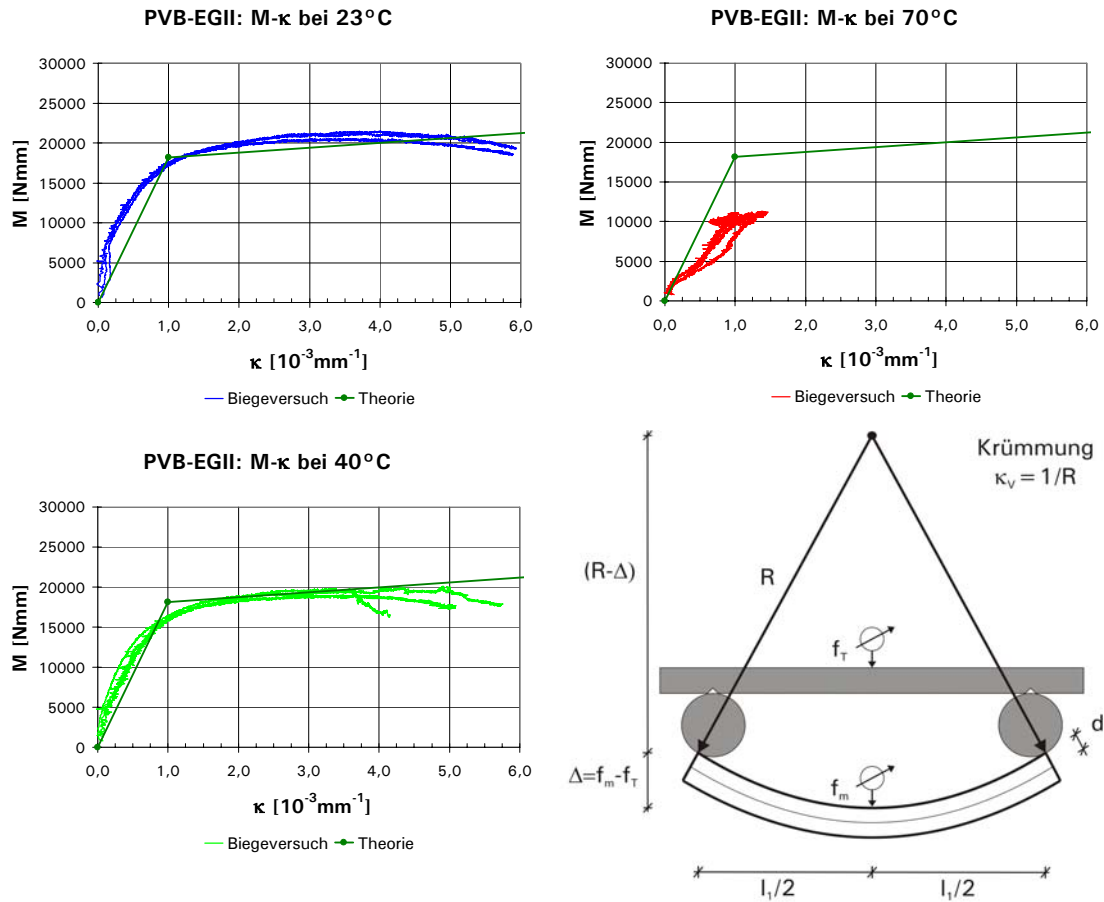


Abb. A3.56: Momenten-Krümmungs-Verlauf bei 23°C, 40°C und 70°C

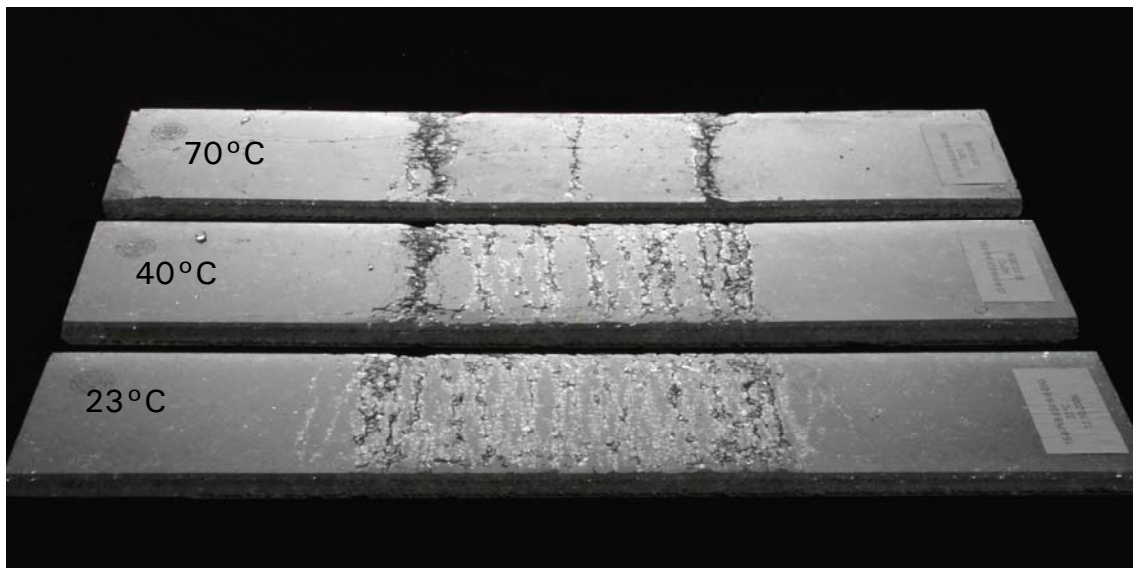


Abb. A3.57: Rissbild an der Oberseite der Versuchskörper nach den Versuchen bei 23°C, 40°C und 70°C

Versuchskörpertyp: PVB-ELI

Laminataufbau:

Glas (1): ESG 6 mm

Zwischenschicht (2): PVB 1,52 mm

Bewehrung (3): Lochblech ELI

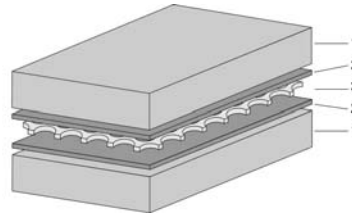


Abb. A3.58: Laminataufbau

Vorschädigung:

Anschlag mit Körner am Glasrand, erst an der Unter- und dann an der Oberseite

Versuchstemperaturen:

23°C, 40°C und 70°C

Versuchsgeschwindigkeit:

0,2 mm/s

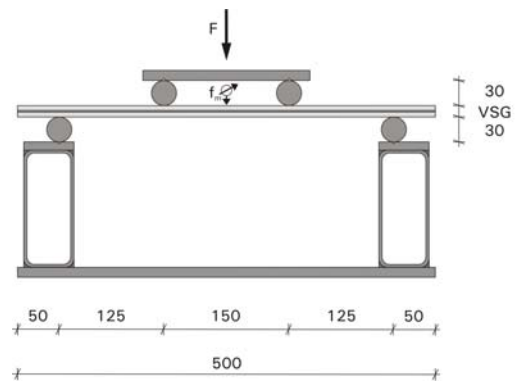


Abb. A3.59: Versuchsaufbau [mm]

PVB-ELI: Resttragfähigkeit bei 23°C, 40°C und 70°C

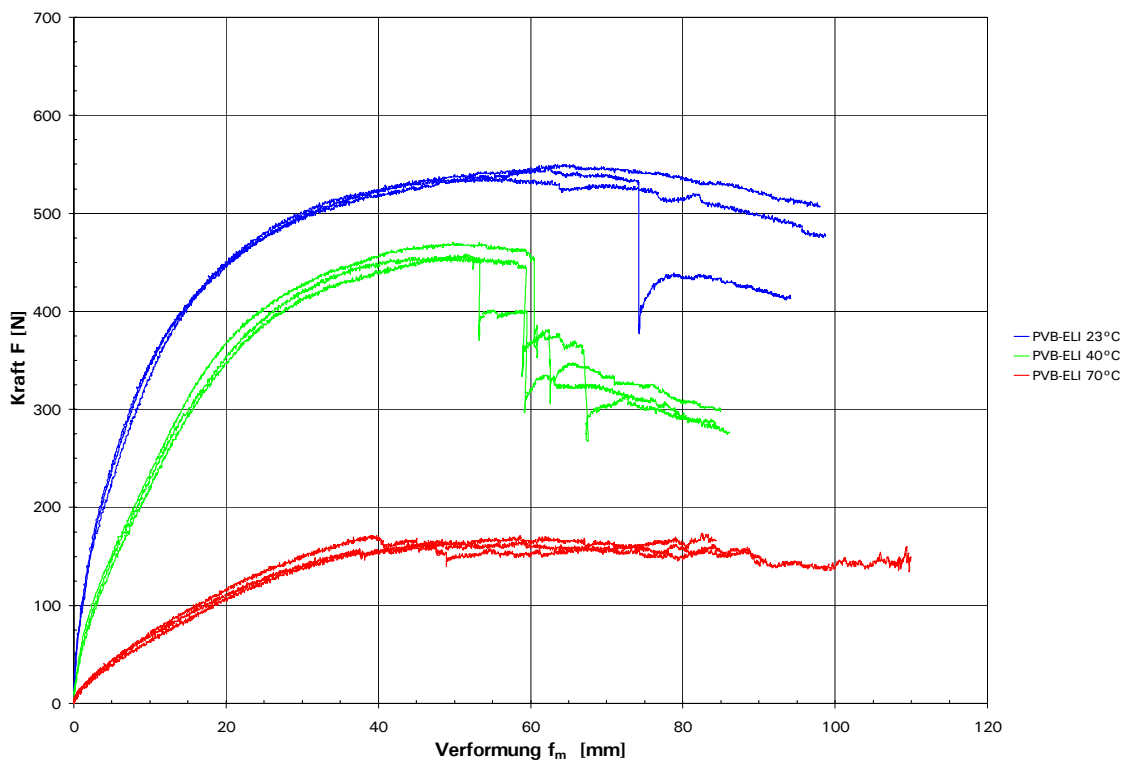
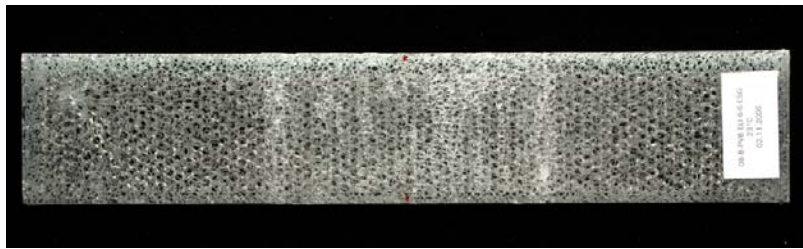
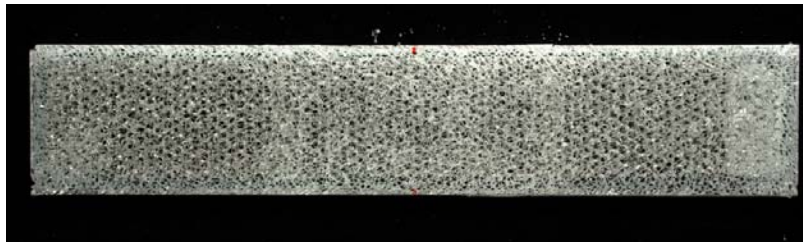


Abb. A3.60: Vier-Punkt-Biegeversuche mit vorgeschädigten Versuchskörpern PVB-ELI

Resttragfähigkeit von PVB-ELI Proben bei 23°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.61: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{15-B-PVB-ELI}$	= 546 N	Standardabweichung:	
$F_{18-B-PVB-ELI}$	= 549 N	s	= 7 N
$F_{08-B-PVB-ELI}$	= 536 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-ELI}$	= 544 N	$F_{k;0,95}$	= 533 N

PVB-ELI: Resttragfähigkeit bei 23°C

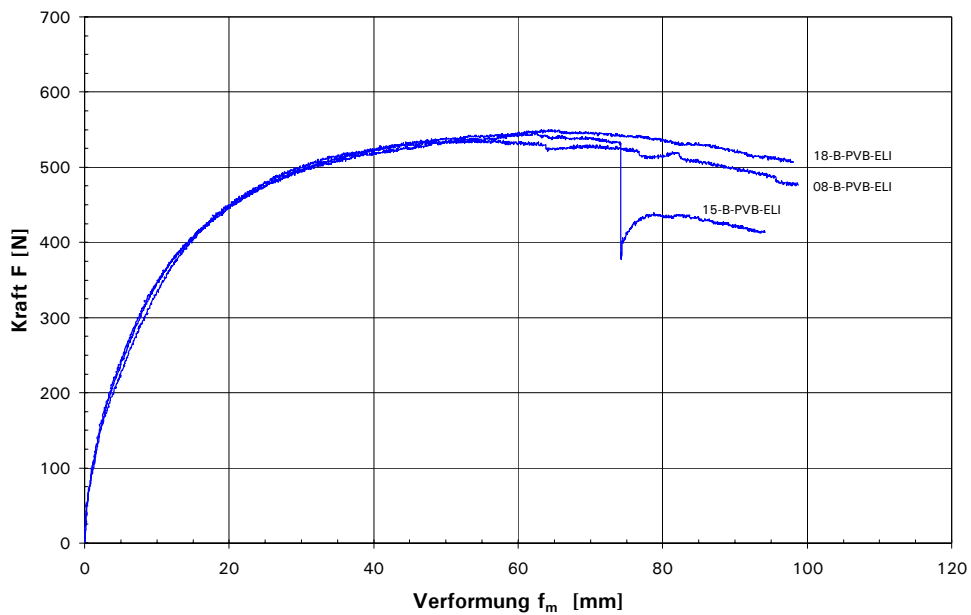
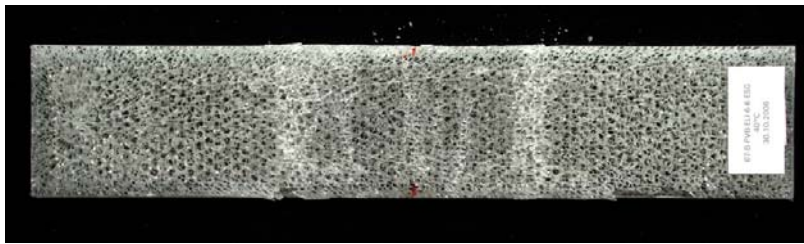
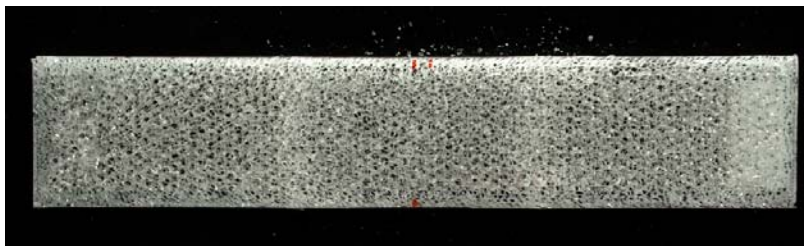


Abb. A3.62: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-ELI bei 23°C

Resttragfähigkeit von PVB-ELI Proben bei 40°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.63: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{03-B-PVB-ELI}$	= 458 N	Standardabweichung:	
$F_{04-B-PVB-ELI}$	= 456 N	s	= 8 N
$F_{07-B-PVB-ELI}$	= 470 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-ELI}$	= 462 N	$F_{k;0,95}$	= 449 N

PVB-ELI: Resttragfähigkeit bei 40°C

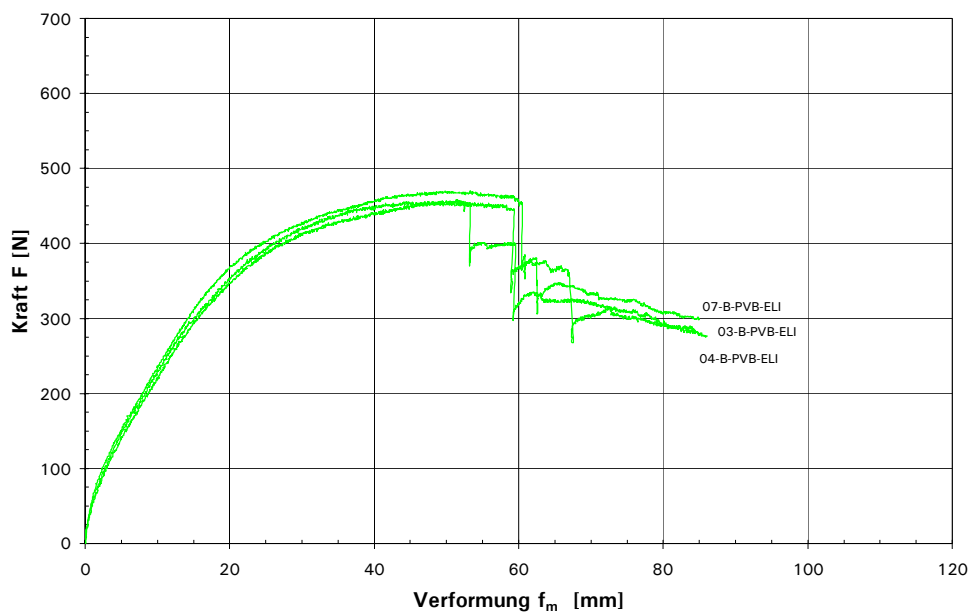
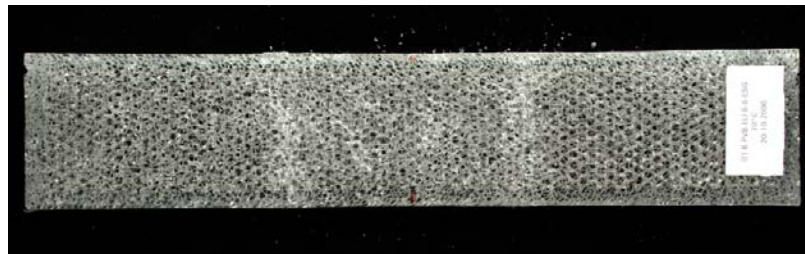
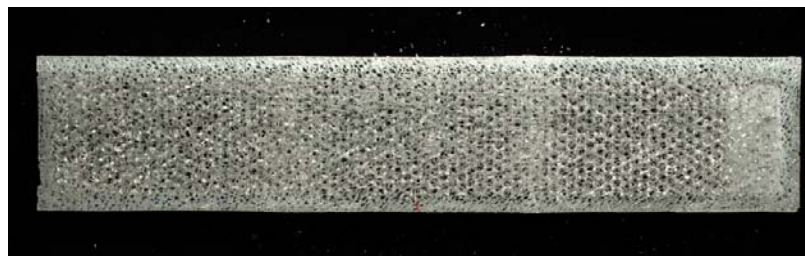


Abb. A3.64: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-ELI bei 40°C

Resttragfähigkeit von PVB-ELI Proben bei 70°C



Rissbild oben



Rissbild unten

Abb. A3.65: Rissbilder nach den Vier-Punkt-Biegeversuchen

$F_{01-B-PVB-ELI}$	= 175 N	Standardabweichung:	
$F_{20-B-PVB-ELI}$	= 177 N	s	= 9 N
$F_{05-B-PVB-ELI}$	= 160 N	charakteristische Resttraglast:	
$F_{M,PVB-ELI}$	= 171 N	$F_{k;0,95}$	= 155 N

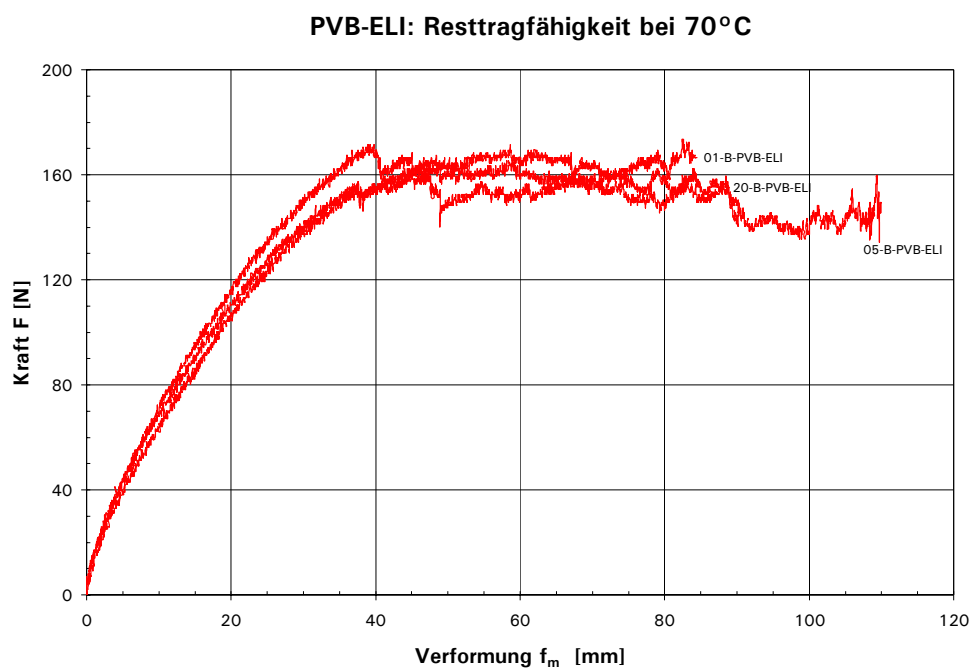


Abb. A3.66: Vier-Punkt-Biegeversuche mit PVB-ELI bei 70°C

Momenten-Krümmungs-Verlauf

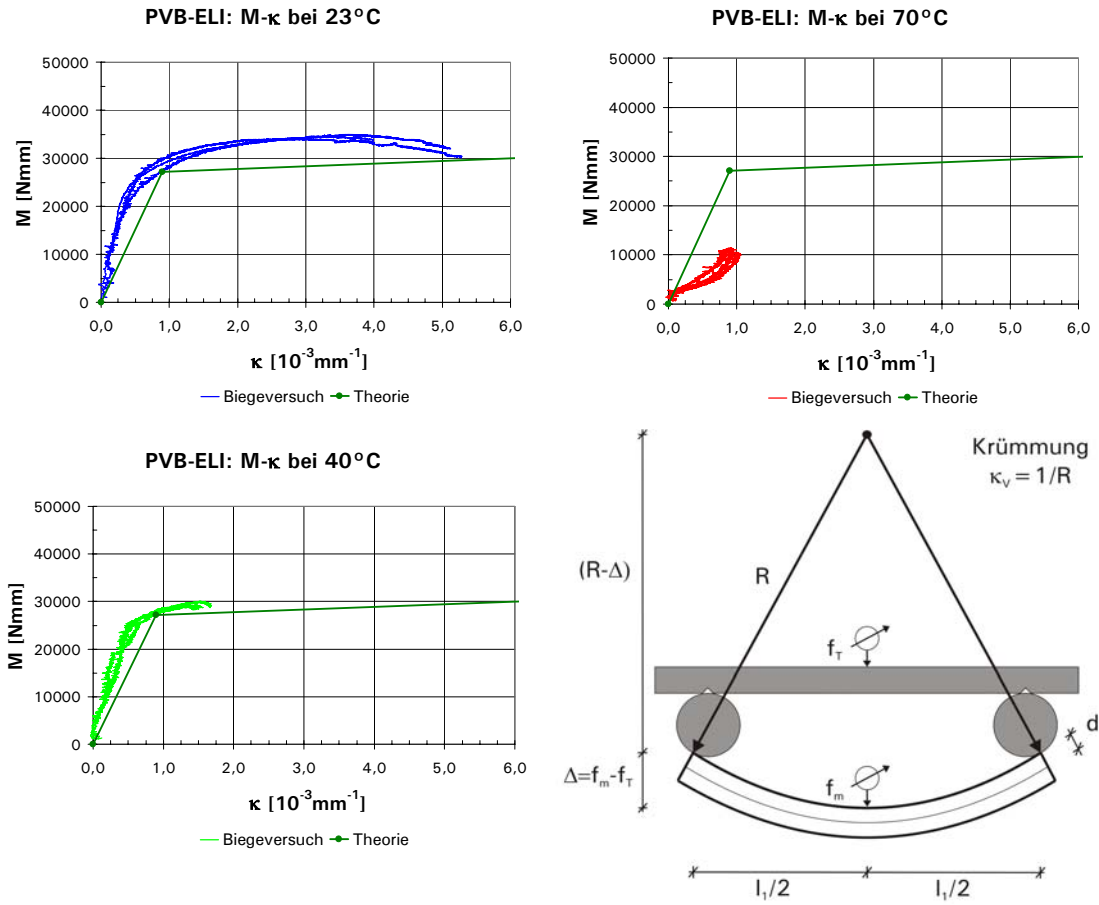


Abb. A3.67: Momenten-Krümmungs-Verlauf bei 23°C, 40°C und 70°C



Abb. A3.68: Rissbild an der Oberseite der Versuchskörper nach den Versuchen bei 23°C, 40°C und 70°C

A4 Vier-Punkt-Biegekriechversuch

Die Dauerlasten für die Vier-Punkt-Biegekriechversuche orientieren sich an den maximal erzielten Resttraglast $F_{k;0,95}$ unter kurzzeitiger Belastung bei 40°C Versuchstemperatur. Die Versuchskörper wurden mit 50% ihrer jeweiligen charakteristischen Resttraglast $F_{k;0,95;40^{\circ}\text{C}}$ belastet.

Die Vier-Punkt-Biegekriechversuche wurden bei einer Versuchstemperatur von 23°C und 40°C im Klimaschrank gefahren. Die Luftfeuchtigkeit betrug hierbei $35\pm 5\%$. Nach einer Belastungsdauer von vier Tagen erfolgte die Entlastung, wobei der Lastwagen auf dem Versuchskörper einen weiteren Tag verblieb.

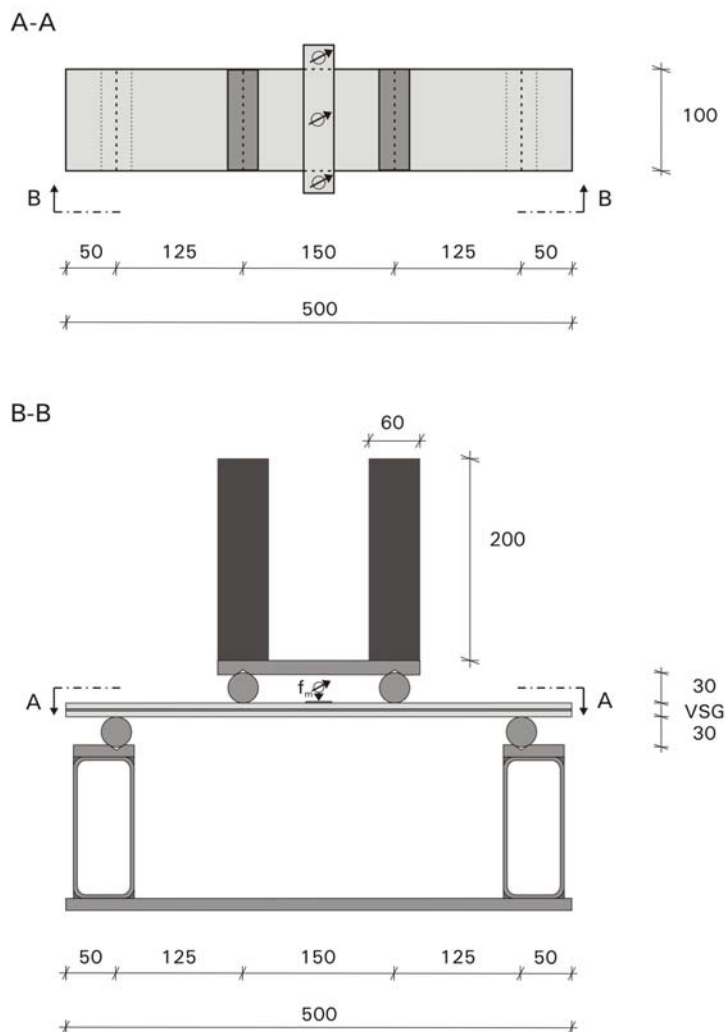


Abb. A4.1: Versuchsaufbau: Ansicht und Schnitt [mm]



Abb. A4.2: Zwei Versuchsstände im Klimaschrank mit Belastung

Die Messintervalle wurden in den ersten Minuten nach der Lastaufbringung sehr kurz gewählt. Dadurch ergeben sich viele Messwerte zu Versuchsbeginn. Im weiteren Versuchsverlauf wurden die Messintervalle vergrößert. Dies ist in den Abbildungen mit der logarithmischen Skalierung der Zeit erkennbar.

Versuchskörpertyp: SGP

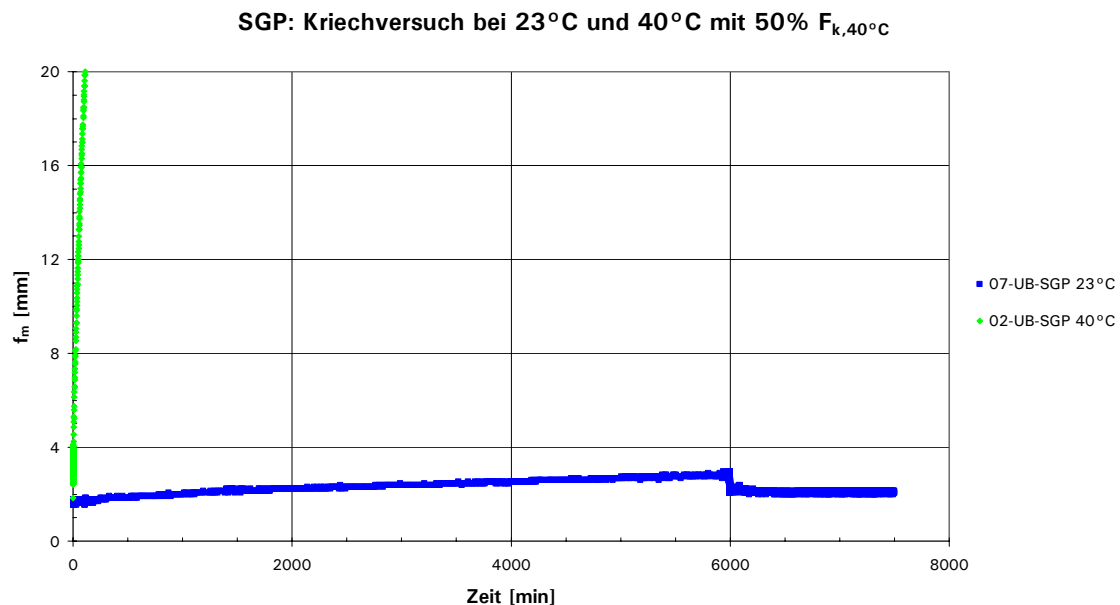


Abb. A4.3: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper SGP

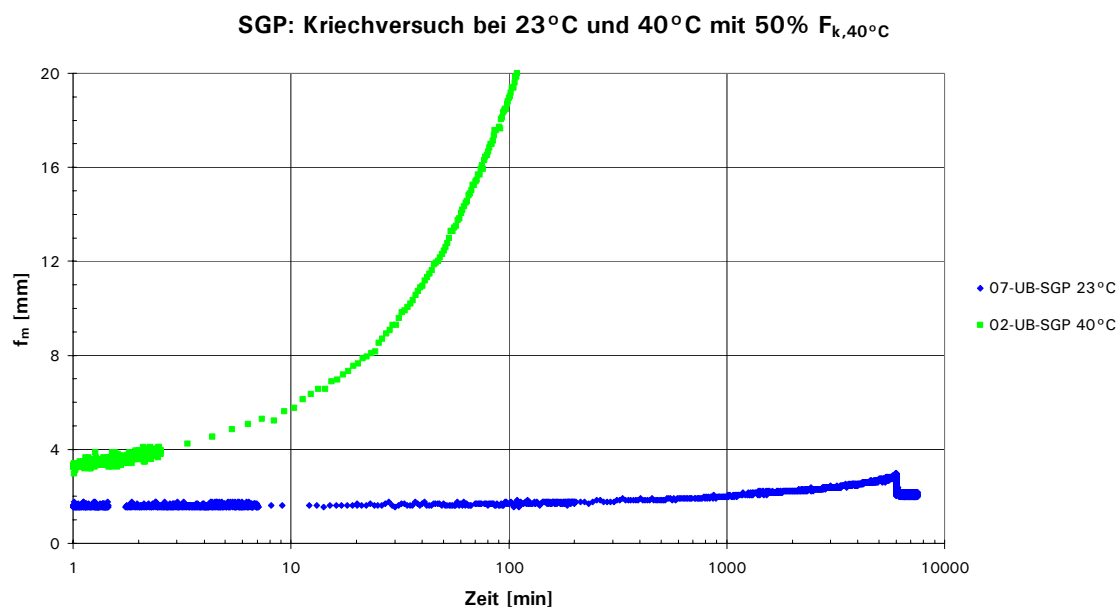


Abb. A4.4: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper SGP (logarithmische Skalierung der Zeit)

Versuchskörpertyp: SGP-EGI

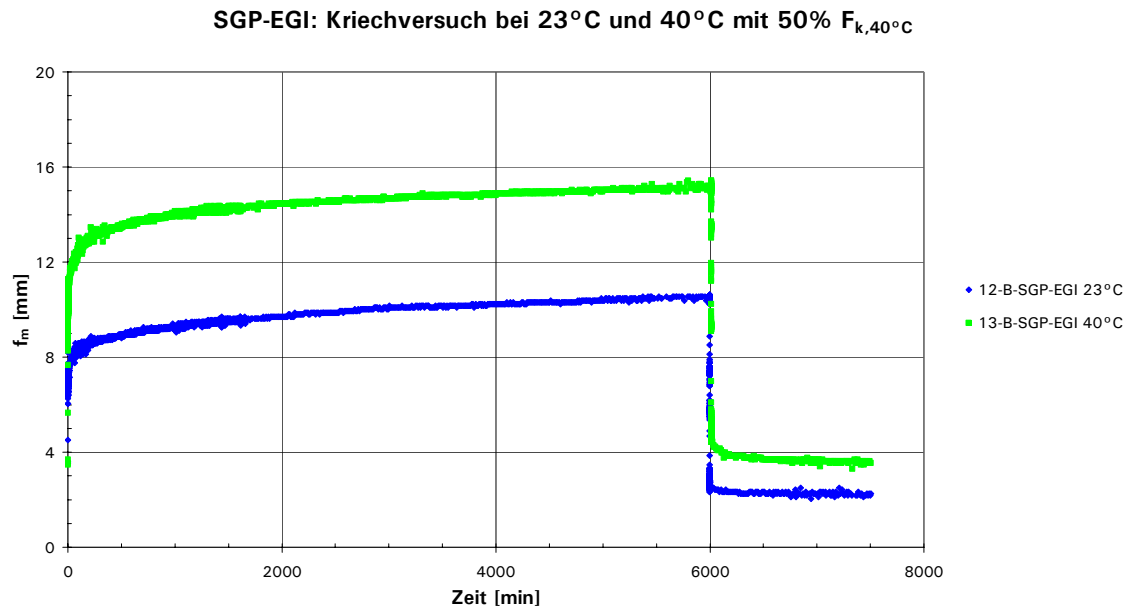


Abb. A4.5: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper SGP-EGI

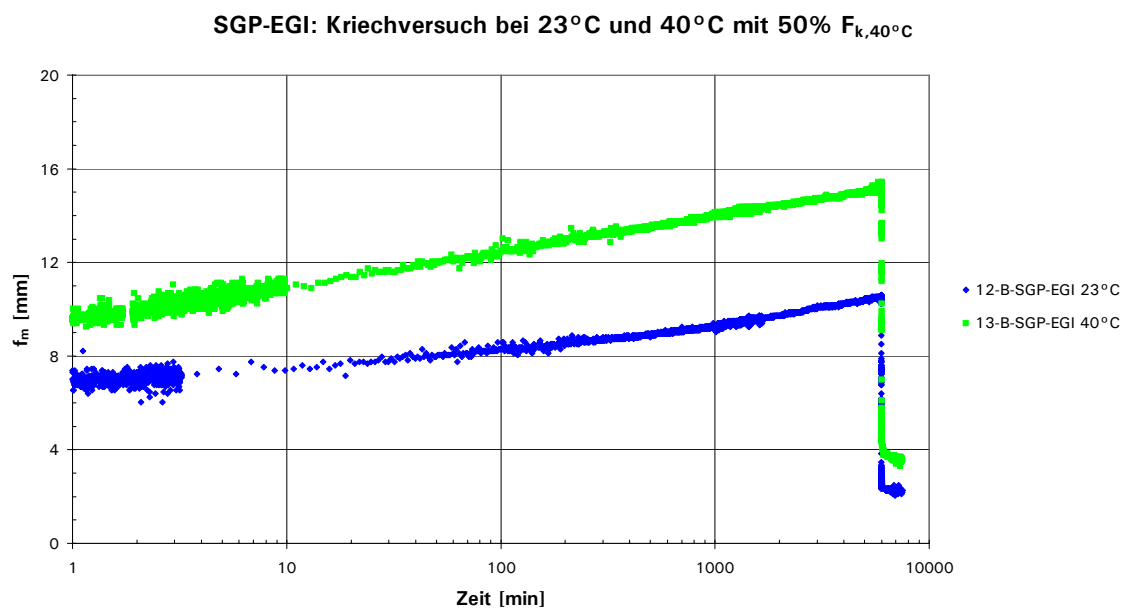


Abb. A4.6: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper SGP-EGI (logarithmische Skalierung der Zeit)

Versuchskörpertyp: SGP-EGII

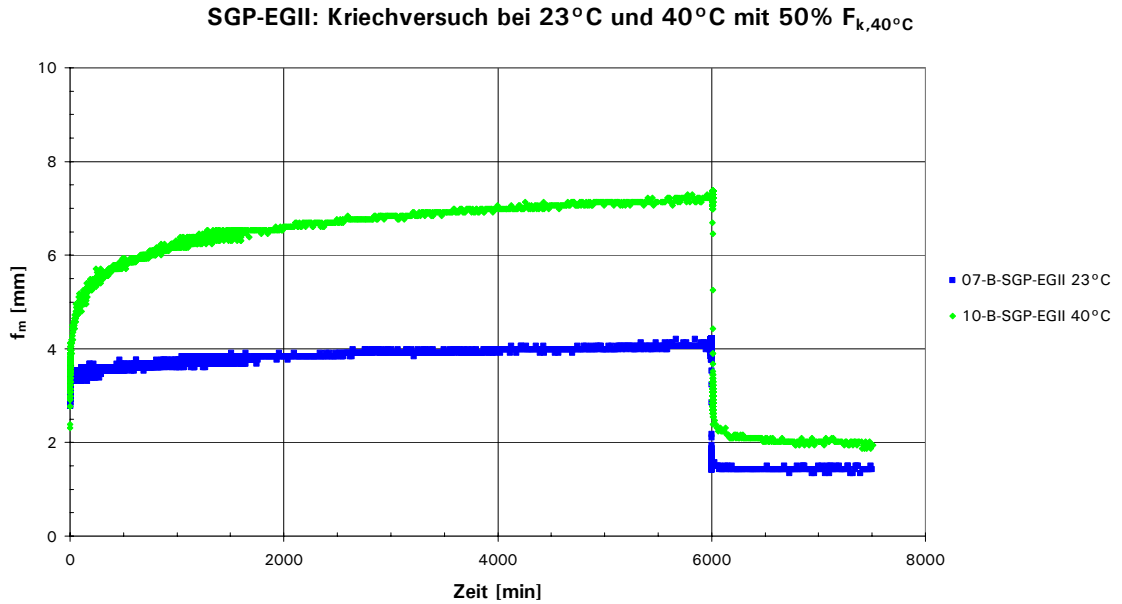


Abb. A4.7: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper SGP-EGII

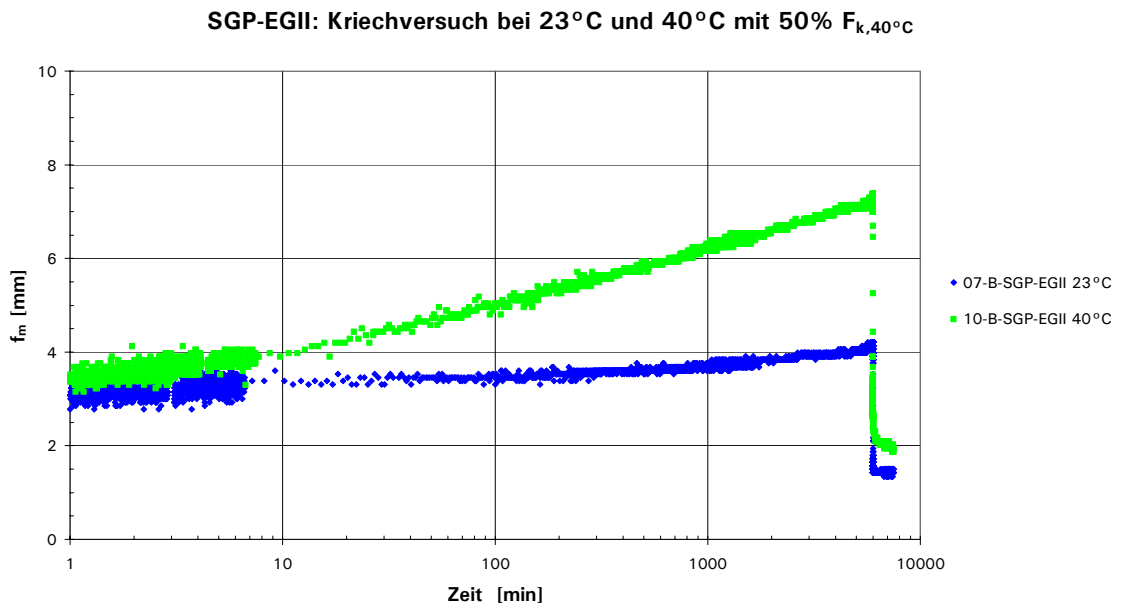


Abb. A4.8: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper SGP-EGII (logarithmische Skalierung der Zeit)

Versuchskörpertyp: PVB

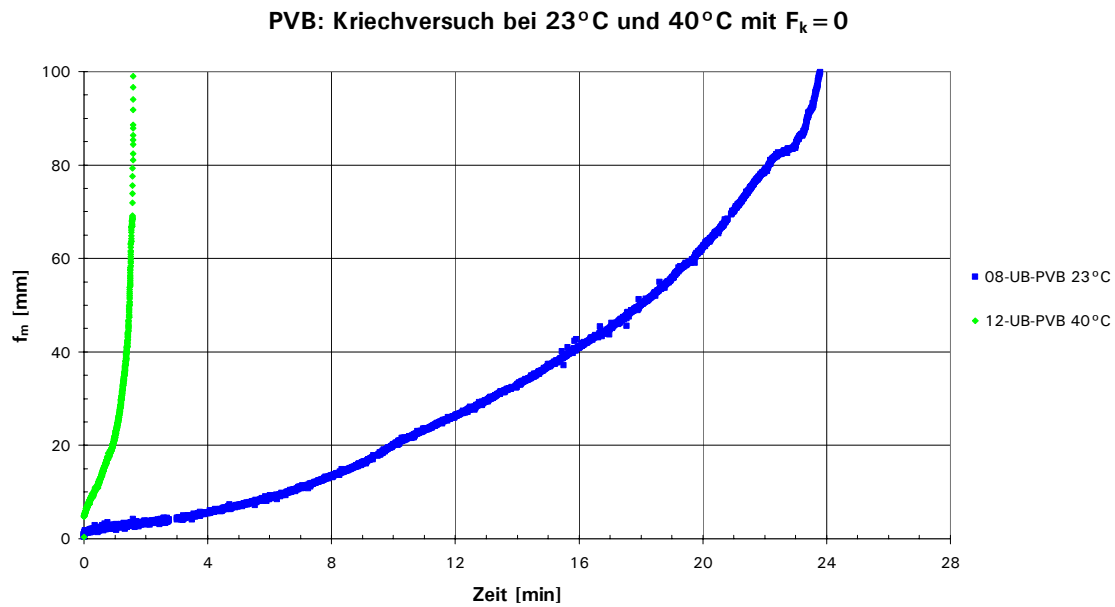


Abb. A4.9: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper PVB

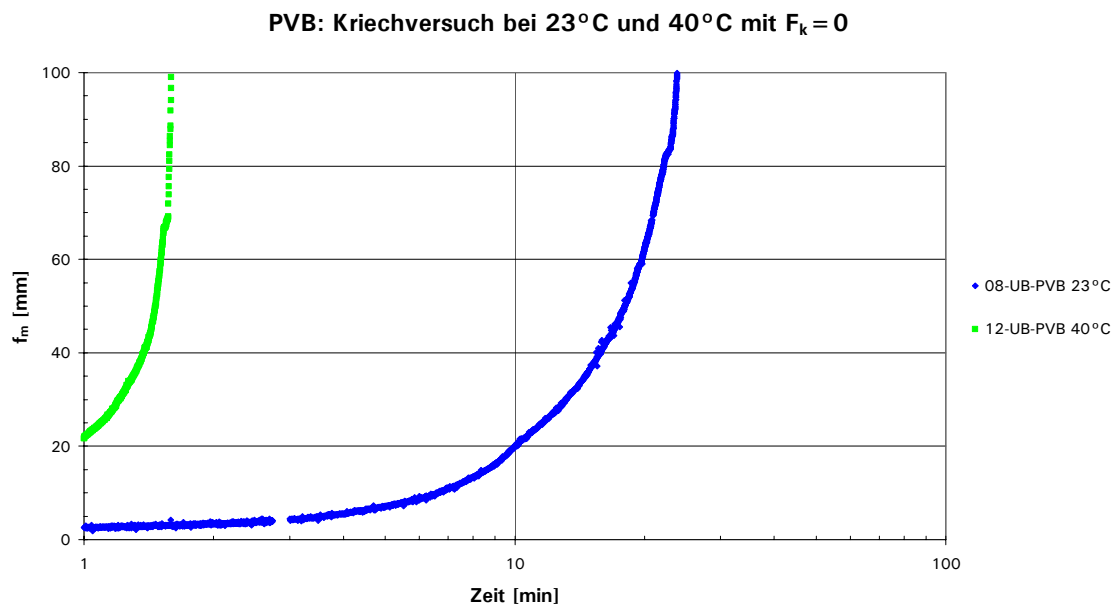


Abb. A4.10: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper PVB (logarithmische Skalierung der Zeit)

Versuchskörpertyp: PVB-EGI

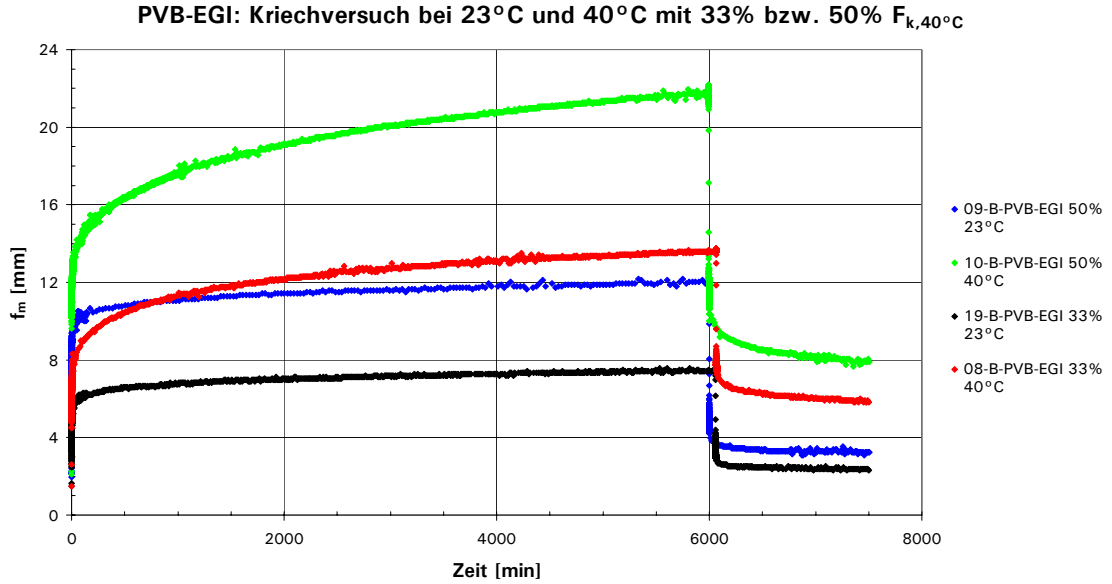


Abb. A4.11: Vier-Punkt-Biegekrechversuch mit Versuchskörper PVB-EGI

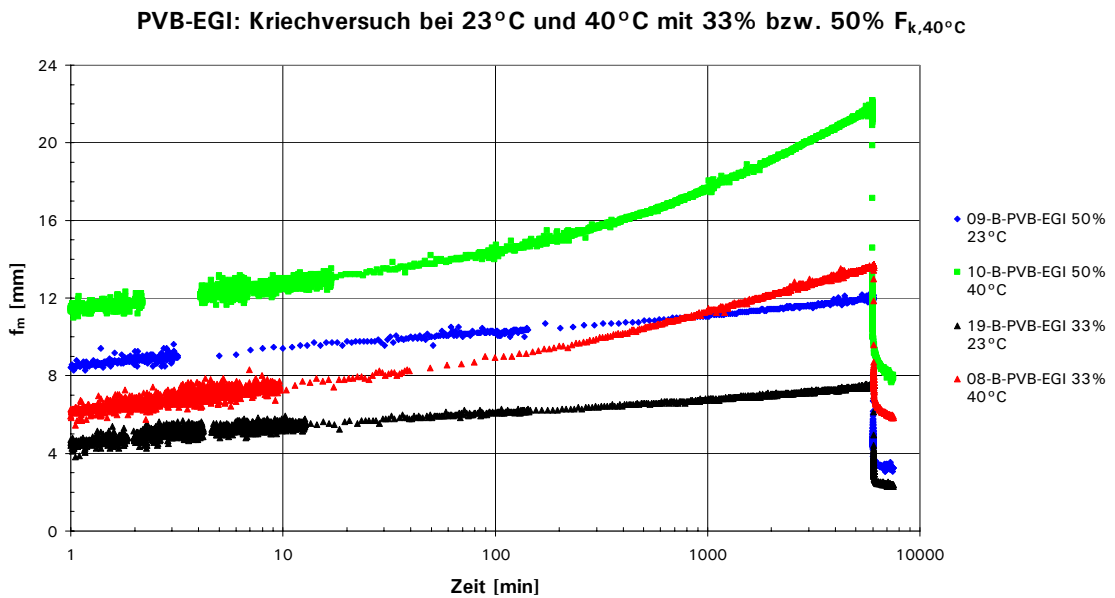


Abb. A4.12: Vier-Punkt-Biegekrechversuch mit Versuchskörper PVB-EGI (logarithmische Skalierung der Zeit)

Versuchskörpertyp: PVB-EGII

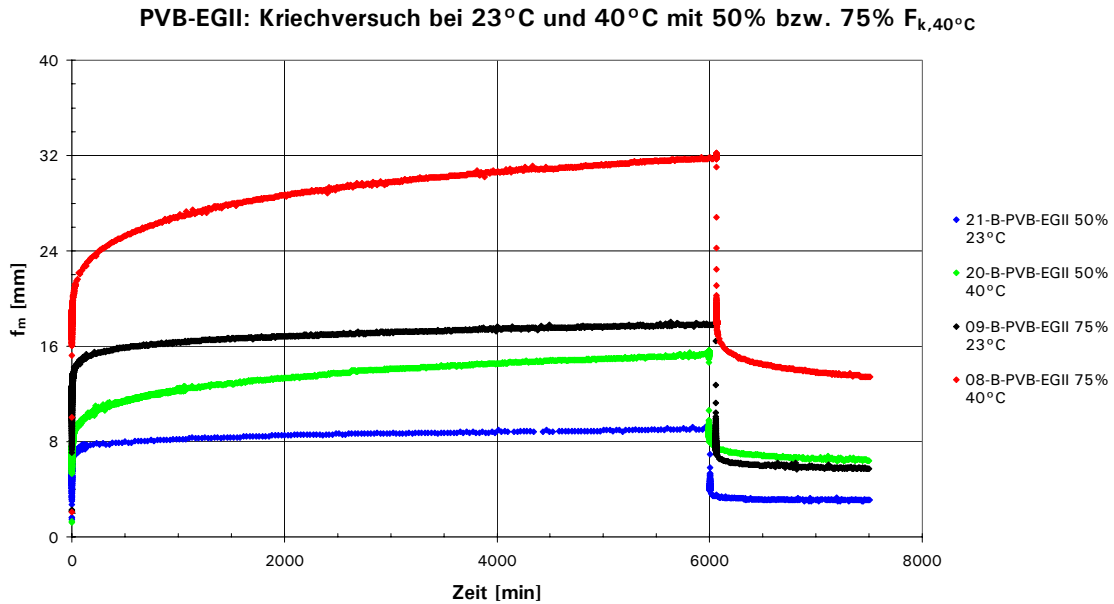


Abb. A4.13: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper PVB-EGII

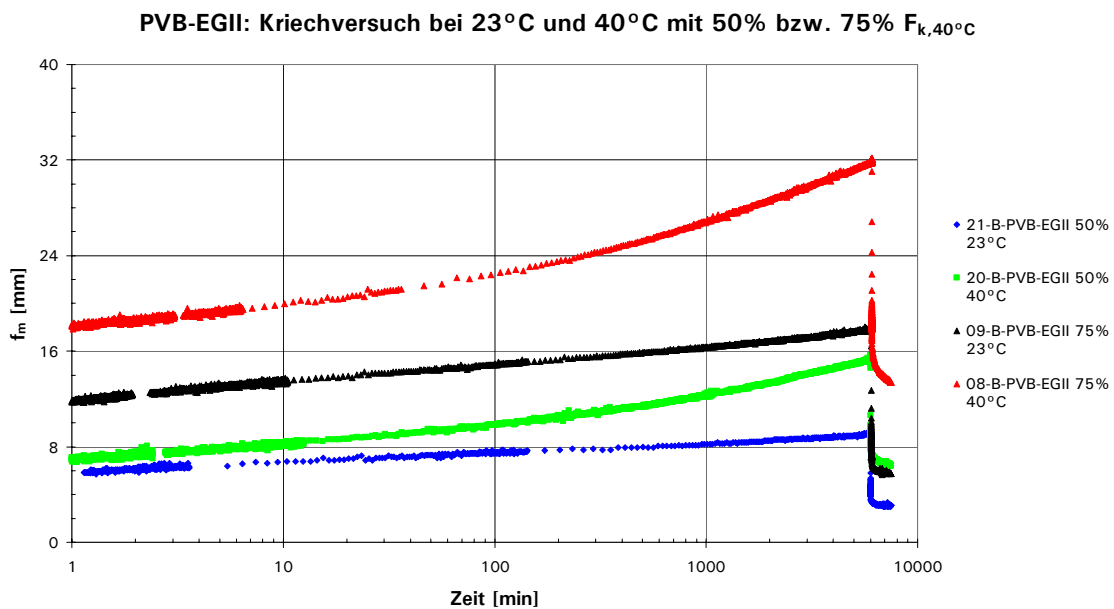


Abb. A4.14: Vier-Punkt-Biegekriechversuch mit Versuchskörper PVB-EGII (logarithmische Skalierung der Zeit)

Versuchskörpertyp: PVB-ELI

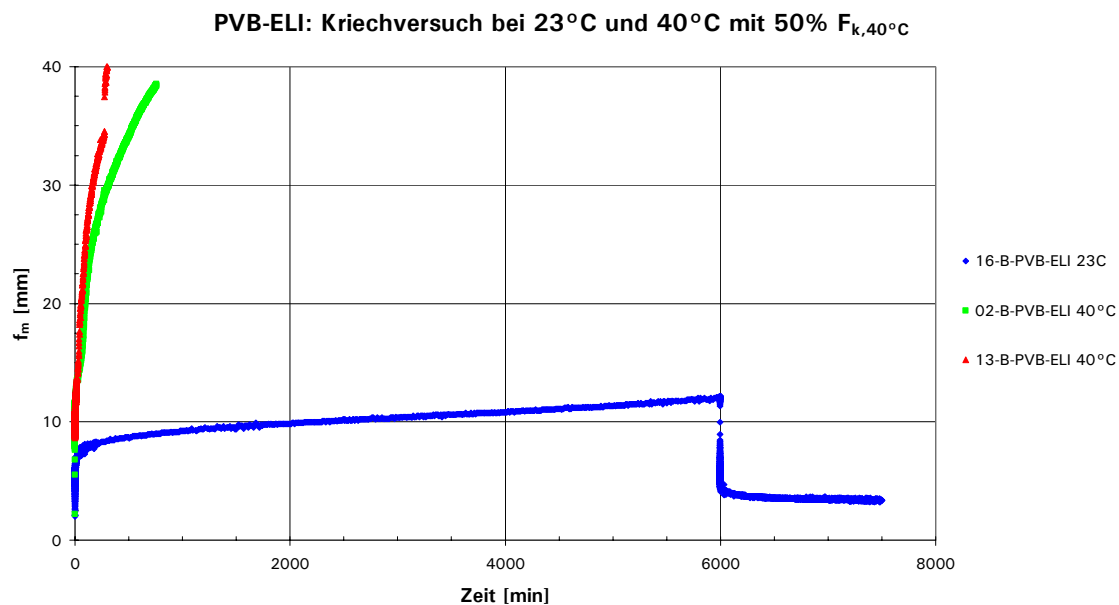


Abb. A4.15: Vier-Punkt-BiegeKriechversuch mit Versuchskörper PVB-ELI

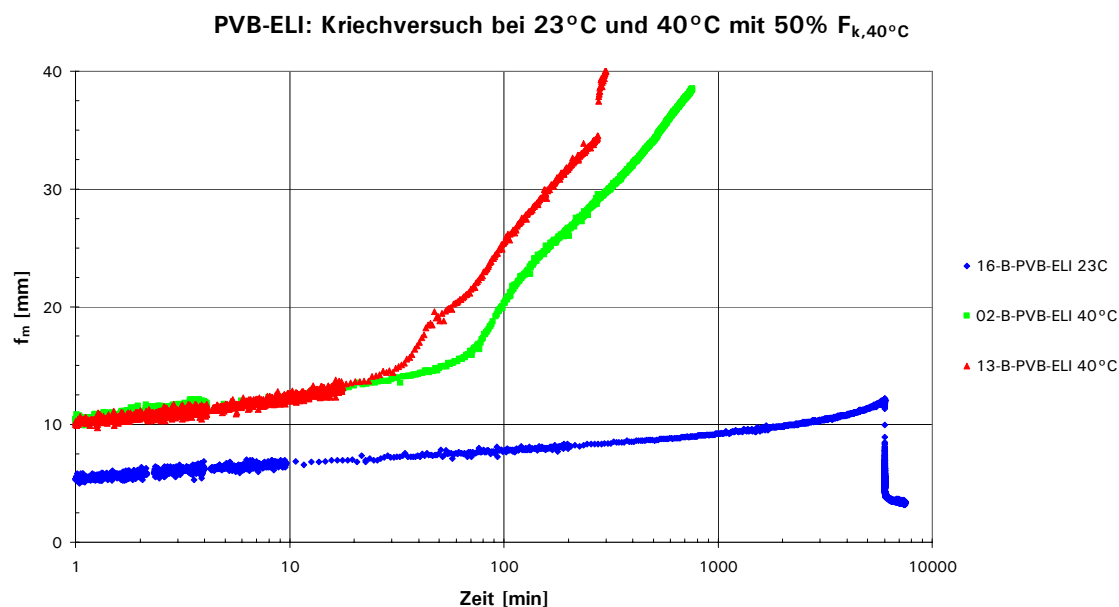


Abb. A4.16: Vier-Punkt-BiegeKriechversuch mit Versuchskörper PVB-ELI (logarithmische Skalierung der Zeit)

A5 Einaxialer Zugversuch der Bewehrungselemente

Typ		EGI	EGII	ELI
Edelstahl		1.4310	1.4310	1.4301
Offene Siebfläche	[%]	51	37	46,3
Blehdicke d	[mm]	-	-	0,5
Drahtdurchmesser d	[mm]	0,25	0,2	-
Querschnitt A	[cm ² /m]	0,65	0,76	1,43
Elastizitätsmodul E	[N/mm ²]	118098	79577	57851
Fließspannung $f_{yk} = R_{p0,2}$	[N/mm ²]	1017	464	332
Bruchspannung $f_{uk} = R_m$	[N/mm ²]	1367	842	587
Bruchdehnung ϵ_{uk}	[%]	2,0	17,7	31,7
Breite der Versuchskörper	[mm]	-	-	80
Anzahl der Längsdrähte	[-]	12	20	-
Prüfgeschwindigkeit	[mm/s]	0,05	0,05	0,05

Zugversuch: Gewebe-Typ EGI

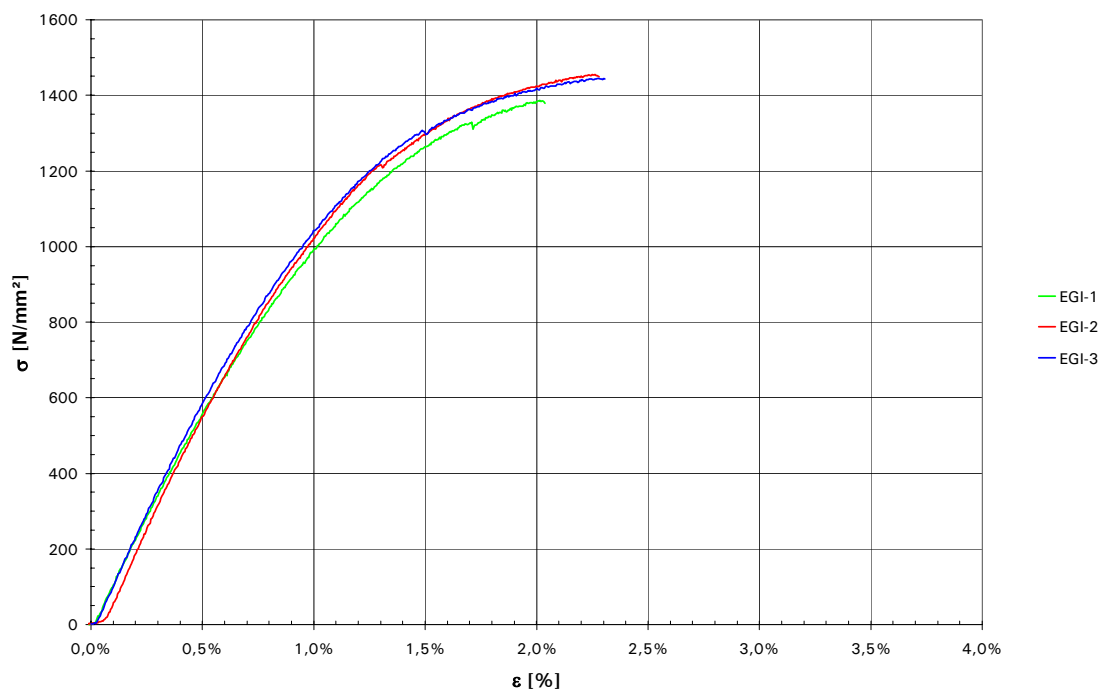


Abb. A5.1: Einaxialer Zugversuch mit Bewehrung EGI

Zugversuch: Gewebe-Typ EGII

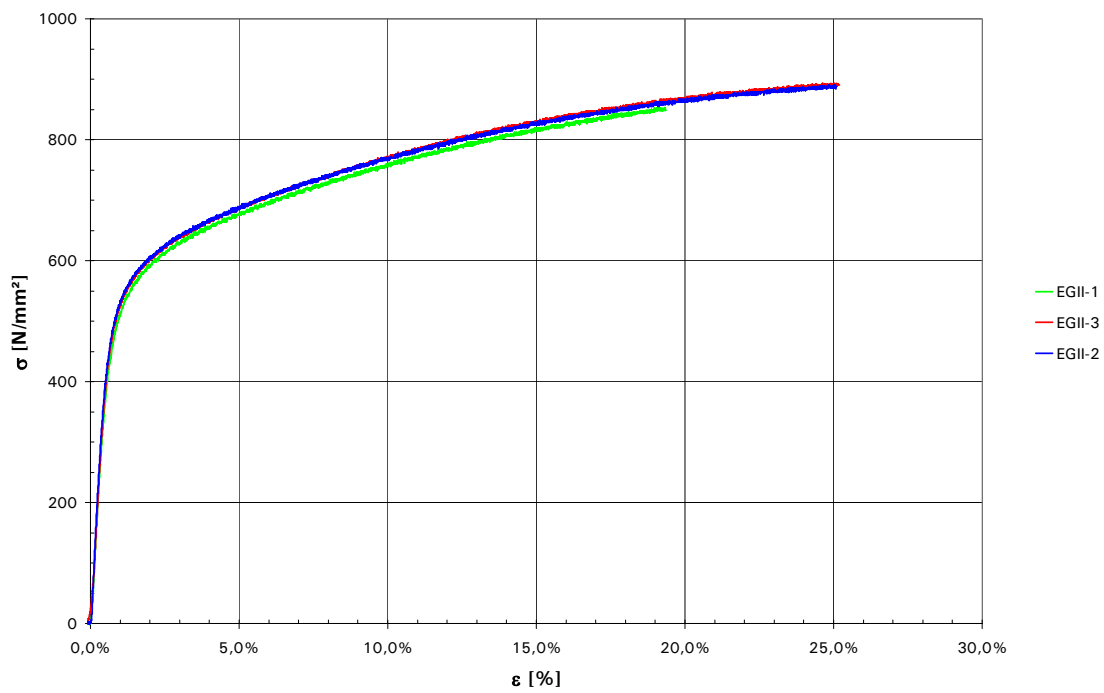


Abb. A5.2: Einaxialer Zugversuch mit Bewehrung EGII

Zugversuch: Lochblech-Typ ELI

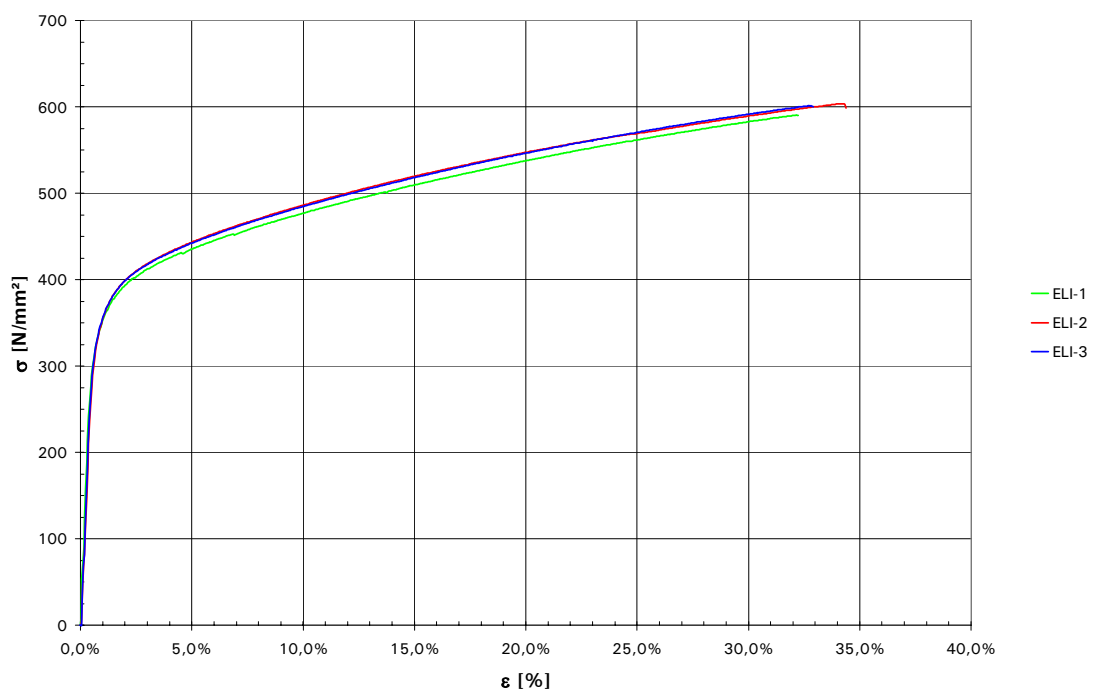


Abb. A5.3: Einaxialer Zugversuch mit Bewehrung ELI

