

# **Versuche zum Trag- und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas**

Alexander Kott, dipl. Bauing. RWTH  
Prof. Thomas Vogel, dipl. Bauing. ETH

Institut für Baustatik und Konstruktion  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich  
April 2006



## **Vorwort**

Glas ist ein faszinierender Baustoff; vereinigt er doch Transparenz mit Festigkeit und ermöglicht so unter anderem einen Witterungsschutz ohne auf natürliche Belichtung verzichten zu müssen.

Die Verwendung von immer grösseren Scheiben im Fassadenbau, immer höher über potenziell Gefährdeten und der Einsatz von Glas als Bauelement, das nicht nur sich selbst sondern auch eine Nutzlast trägt, macht Glasbauteile zu Tragwerken, der Domäne von Bauingenieuren.

Glas ist spröde, was bei Bauingenieuren schon beinahe als Ausschlusskriterium für einen zuverlässigen Baustoff gilt. Wird es jedoch als Verbundsicherheitsglas, d.h. kombiniert mit Kunststofffolien eingesetzt, kann ein beachtliches Verformungsvermögen erreicht werden.

Unsere Forschergruppe beschäftigt sich mehrheitlich mit Beton, der ebenfalls spröde ist. Im Stahlbetonbau haben sich jedoch Konstruktions- und Bemessungsmethoden etabliert, welche die Sprödigkeit des Betons relativieren, indem er mit dem duktilen Stahl kombiniert wird. Diese Methodik lässt sich nun auch auf Verbundsicherheitsglas übertragen.

Der vorliegende Bericht beschreibt Versuche, die ausgeführt wurden um einige Grundlagen zu klären, die zum erfolgreichen Einsatz von Glas für tragende Zwecke führten. Es ist somit nicht verwunderlich, dass viele Parallelen zum Verhalten von Stahlbetonplatten gefunden wurden.

Der Versuchsbericht bildet das experimentelle Fundament für eine anschliessende Promotionsarbeit.

Zürich, April 2006

Prof. Thomas Vogel



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Eigenschaften von Verbundsicherheitsglas	2
1.3.1	Aufbau einer Verbundsicherheitsglasscheibe	2
1.3.2	Mögliche Konstruktionsabmessungen	3
1.3.3	Kantenbearbeitung und Vorschädigung	3
1.3.4	Eigenspannungszustand der Glasschichten	3
1.4	Tragwerksorientierte Zustandsbeschreibung	5
1.4.1	Zustand I: Ungerissener Querschnitt	5
1.4.2	Zustand II: Teilweise gerissener Querschnitt	6
1.4.3	Zustand III: Vollständig gerissener Querschnitt	6
1.5	Resttragfähigkeit und Reststandzeit	6
1.6	Vorgehen	7
<b>2</b>	<b>Zug-Verformungsverhalten von Polyvinylbutyralfolie</b>	<b>9</b>
2.1	Prinzip	9
2.2	Versuchsprogramm	9
2.3	Versuchskörper	10
2.3.1	Herstellung der Versuchskörper	11
2.3.2	Abmessungen der Versuchskörper	12
2.3.3	Messmarken	13
2.4	Prüfgerät	13
2.4.1	Prüfmaschine	13
2.4.2	Kraftmesseinrichtung	15
2.4.3	Längenmesseinrichtungen	15
2.5	Versuchsdurchführung	16
2.5.1	Versuchsvorbereitung	16
2.5.2	Versuchsablauf	16
2.6	Versuchsergebnisse	18
2.6.1	Zug-Verformungsverhalten	18
2.6.2	Spannungs- und Dehnungsberechnung	19
2.6.3	Modulberechnung	19
2.6.4	Ermittelte Werkstoffkennwerte aus den Zugversuchen	20
2.7	Spannungs- und Zeit-Dehnungskurven	21
2.7.1	Spannungs-Dehnungskurven einer Versuchsserie	21
2.7.2	Spannungs-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanter Prüfgeschwindigkeit	22
2.7.3	Spannungs-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanter Temperatur	24

2.7.4	Zeit-Dehnungskurven	26
2.8	Schlussfolgerungen aus den Zugversuchen	27
<b>3</b>	<b>Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben</b>	<b>29</b>
3.1	Prinzip	29
3.2	Versuchsprogramm	29
3.3	Versuchskörper	31
3.3.1	Herstellung und Verarbeitung der Verbundsicherheitsglasscheiben	31
3.3.2	Abmessungen der Versuchskörper	33
3.3.3	Markierung der Versuchskörper	35
3.3.4	Versuchsanordnung	36
3.3.5	Kontinuierliche Messwerverfassung	36
3.4	Versuchsdurchführung	40
3.4.1	Versuchsvorbereitung	40
3.4.2	Versuchsablauf	41
3.5	Versuchsbeobachtung und Folgerungen	41
3.5.1	Phase 1	41
3.5.2	Phase 2	42
3.5.3	Phase 3	44
3.5.4	Beobachtung der ausgebauten VSG-Scheibe	44
3.6	Auswertung und Dokumentation	45
3.6.1	Bestimmung des Scherwinkels	45
3.6.2	Durchbiegungsberechnung	46
3.6.3	Schubmodul-Zeitkurven im Zustand I	46
3.6.4	Last-Durchbiegungskurven im Zustand I	48
3.6.5	Last-Durchbiegungskurven im Zustand II	49
3.6.6	Last-Durchbiegungskurven im Zustand III	51
3.6.7	Kriechkurven	52
3.6.8	Trag- und Resttraglasten sowie Gesamtdurchbiegungen	52
3.6.9	Lokalisierung der Initialbrüche	56
3.6.10	Längen- und Breitenabmessungen der Versuchskörper	63
3.6.11	Bruchbilder	67
3.6.12	Markierungen der Bruchbilder	79
3.6.13	Zusammenstellung der Versuchskörper nach dem Versuch	83
3.7	Schlussfolgerungen aus den Vierpunktbiegeversuchen	84
3.7.1	Last-Verformungsverhalten	84
3.7.2	Bruchbilder	84
3.7.3	Fliessgelenke	85
<b>4</b>	<b>Plattenversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben</b>	<b>87</b>
4.1	Prinzip	87
4.2	Versuchsprogramm	87
4.3	Versuchskörper	88
4.3.1	Herstellung und Verarbeitung der Platten aus Verbundsicherheitsglas	88

4.3.2	Abmessungen der Versuchskörper	88
4.3.3	Markierung der Versuchskörper	89
4.3.4	Versuchsanordnung	90
4.3.5	Kontinuierliche Messwerterfassung	93
4.4	Versuchsdurchführung	93
4.4.1	Versuchsvorbereitung	93
4.4.2	Versuchsablauf	94
4.5	Versuchsbeobachtung und erste Folgerungen	94
4.5.1	Phase 1	94
4.5.2	Phase 2	95
4.5.3	Phase 3	97
4.6	Auswertung und Dokumentation	99
4.6.1	Durchbiegungsberechnung	99
4.6.2	Trag- und Resttraglasten sowie Mittendurchbiegungen	99
4.6.3	Lokalisierung der Initialbrüche aus den Zuständen I und II	100
4.6.4	Last-Durchbiegungskurven im Zustand I	114
4.6.5	Last-Durchbiegungskurven im Zustand II	114
4.6.6	Last-Durchbiegungskurven im Zustand III	115
4.6.7	Zeit-Durchbiegungskurven im Zustand III	116
4.6.8	Bruchbilder im Zustand II	117
4.6.9	Bruchbilder, Fließgelenkmechanismen im Zustand III	119
4.7	Schlussfolgerungen aus den Plattenversuchen	121
4.7.1	Last-Verformungsverhalten	121
4.7.2	Bruchbilder	121
4.7.3	Fließgelenklinien	122
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung - Summary</b>	<b>123</b>
5.1	Zusammenfassung	123
5.2	Summary	129
<b>6</b>	<b>Verdankungen</b>	<b>133</b>
<b>7</b>	<b>Begriffe</b>	<b>135</b>
<b>8</b>	<b>Bezeichnungen und Abkürzungen</b>	<b>137</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>139</b>





# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Glas ist ein spröder Baustoff ohne plastisches Verformungsvermögen, deshalb kündigt sich das Versagen in Form eines Bruchs nicht an. Im gebrochenen Zustand hat Glas keine Tragfähigkeit.

Die theoretische Zugfestigkeit von Glas ( $5000 \text{ N/mm}^2$  bis  $8000 \text{ N/mm}^2$  [F 1]) ist wesentlich höher als die praktische Zugfestigkeit ( $30 \text{ N/mm}^2$  bis  $50 \text{ N/mm}^2$ ). Der Grund für diesen Unterschied ist, dass Glas in Wirklichkeit kein fehlerfreier Baustoff ist, sondern über zahlreiche Diskontinuitäten verfügt, die sich als Oberflächenfehler in Form von Mikro- und Makrorissen zeigen. An deren Spitze treten hohe Spannungen auf. Die Zugfestigkeit von Glas ist deshalb kein fester Wert, sondern sie hängt von den Umweltbedingungen, der Belastungsdauer und der Grösse der gezogenen Glasfläche ab [F 2]. Auch bei einer sachgemässen Bemessung ist mit einem möglichen Bruch zu rechnen. Deswegen wird im konstruktiven Glasbau, insbesondere für Überkopfverglasungen sowie begehbare Verglasungen, Verbundsicherheitsglas (VSG) eingesetzt [N 1]. Verbundsicherheitsglas besteht aus zwei oder mehreren Einzelscheiben, die über eine zähe Kunststoffschicht miteinander verbunden sind [N 2]. Im Falle eines Bruchs soll eine Resttragfähigkeit vorhanden sein. Die Glasstücke bleiben an der Folie haften und die Glasscheibe darf nicht von der Unterkonstruktion herunterfallen.

Derzeit wird in der Bemessungspraxis die Tragsicherheit von Glasscheiben nach dem Konzept der zulässigen Spannungen nachgewiesen, wobei äussere Einwirkungen zu einer maximalen Spannung an der Oberfläche des Glases führen, die der jeweils zulässigen Spannung gegenübergestellt wird [N 3]. Neben diesem Tragsicherheitsnachweis und einem Durchbiegungsnachweis ist ein Resttragfähigkeitsnachweis zu führen. Rechnerische Modelle für das Tragverhalten von Glasscheiben aus VSG in gebrochenem Zustand existieren nicht, so dass bis heute die Resttragfähigkeit experimentell (im Massstab 1:1) nachgewiesen wird [F 3]. Dieses Verfahren ist kostspielig und zeitaufwendig. Im Rahmen des Forschungsprojektes "Resttragfähigkeit von gebrochenem Verbundsicherheitsglas" wird ein Beitrag zu einem umfassenden Sicherheitskonzept für den konstruktiven Glasbau geleistet.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der in diesem Bericht beschriebenen Versuche war, das Resttragverhalten der gebrochenen Verbundsicherheitsglasscheiben zu untersuchen. Jedoch müssten zunächst die Materialeigenschaften der in Frage kommenden Baustoffe bekannt sein, um Versuchsprognosen aufstellen zu können. Das Spannungs-Dehnungsverhalten von Glas ist weitgehend bekannt und kann ausreichend als linear elastisch mit einem spröden Bruch beschrieben werden. Allerdings wird das Trag- und Verformungsverhalten gebrochener Verbundsicherheitsgläser massgeblich durch die Zugeigenschaften der zwischen zwei Glasschichten eingelegten Folie beeinflusst. Das Spannungs-Dehnungsverhalten der Polyvinylbutyralfolie ist von der Belastungsdauer sowie von der Temperatur des Thermoplasts abhängig. Aus diesem Grund war es notwendig, mit Hilfe der Zugversuche dieses Verhalten zu bestimmen. Das Tragverhalten von zwei- und vierseitig gelagerten gebrochenen Platten kann mittels der Fliessgelenkmethode nach dem oberen Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie beschrieben werden. Das scheinbare Paradoxon: "Glas ist spröde, gebrochenes Verbundsicherheitsglas ist duktil" wird in diesem Versuchsbericht mittels ausgeführter Versuche erklärt. Die Erkenntnisse dieser Untersuchung werden ein wesentlicher Bestandteil einer Dissertation sein.

## 1.3 Eigenschaften von Verbundsicherheitsglas

### 1.3.1 Aufbau einer Verbundsicherheitsglasscheibe

Eine VSG-Scheibe besteht aus mindestens zwei übereinander liegenden Glasschichten, die durch eine oder mehrere Kunststofffolien schubsteif miteinander verbunden sind. Ein solches Mehrschichtensystem wird im konstruktiven Ingenieurbau als *Sandwichplatte mit dicken Deckschichten* bezeichnet. Die Scheiben können aus unterschiedlichen Glasarten und Glasabmessungen bestehen. Fast alle im konstruktiven Glasbau verwendeten Gläser werden mit dem anerkannten Floatglasverfahren hergestellt (1952 von A. Pilkington erfunden). Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden ausschliesslich Kalk-Natron-Gläser untersucht, deren Hauptbestandteile in [N 4] geregelt sind.

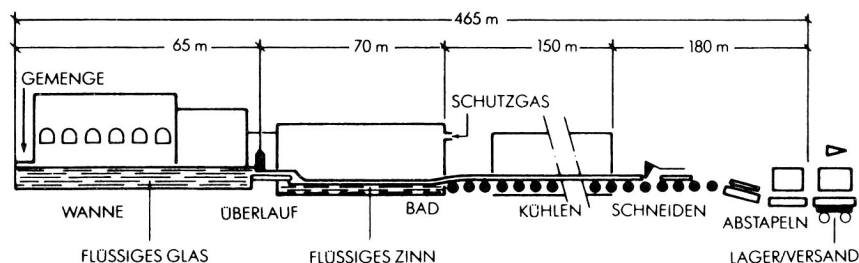


Bild 1.1 Flachglasherstellung im Floatglasverfahren (Längsschnitt) [F 4].

### 1.3.2 Mögliche Konstruktionsabmessungen

Die Floatglasscheiben können Dicken von 2 mm bis in Ausnahmefällen 25 mm aufweisen [F 5]. Dabei können die vom Hersteller angegebenen Nennwerte der Glasdicken oft geringfügig von den tatsächlichen Dicken abweichen [N 4], [F 5]. Die Längen und Breiten solcher Scheiben sind durch die Bandbreite des Ofens bestimmt (bzw., falls ein Eigenspannungszustand erwünscht wird, ist die Grösse der Autoklavkammer zu berücksichtigen; siehe Abschnitt 1.3.4 und Bild 3.1) und können ein Bandmass bis zu 3.21 m x 6.00 m erreichen. Ferner bestehen Einschränkungen bei vorgespannten Gläsern in den Verhältnissen Länge/Breite [D 1]. Die Glasschichten werden nach der Herstellung mit einer Kunststoffolie schubfest verbunden. Dabei wird die Folie zunächst schichtweise über eine Glasscheibe verlegt, deshalb beträgt die minimale Dicke 0.38 mm und kann als die Standarddicke für eine Folienlage bezeichnet werden. Andere Zwischenschichtdicken sind ein Vielfaches der Standarddicke und können bis zu 3.04 mm betragen. Die am häufigsten verwendete Kunststoffolie im konstruktiven Glasbau besteht aus dem Polymer Polyvinylbutyral (PVB).

### 1.3.3 Kantenbearbeitung und Vorschädigung

Die Kantenbearbeitung hat einen günstigen Einfluss auf das Tragverhalten. Glas besitzt an der unbearbeiteten "gebrochenen Kante" aufgrund von Makrorissen eine geringe Biegefestigkeit. Die Kante kann zunächst gesäumt werden, das heisst auf der Stirnseite erfolgt keine Bearbeitung, jedoch werden die Kantenecken unter einem Winkel von 45° abgeschliffen. Die massgeschliffene Kante ist zusätzlich an der Stirnseite leicht geschliffen und wenn sowohl an den Kantenecken als auch an der Stirnseite der Kante keine blanken Stellen sichtbar sind, wird die Kante als rodiert bezeichnet. Schliesslich werden die Kanten poliert, wodurch sie annähernd transparent erscheinen. Die Biegefestigkeit des Glases an der Kante wird durch diese Bearbeitung entscheidend erhöht [N 5], [F 2].

### 1.3.4 Eigenspannungszustand der Glasschichten

Um die Biegefestigkeit des Glases weiter zu erhöhen, wird das Glas durch homogenes Erhitzen auf 650°C und rasches Abkühlen (Anblasen mit kühler Luft) in einen Eigenspannungszustand versetzt. Fälschlicherweise wird in diesem Fall von vorgespanntem Glas oder sogar von gehärtetem Glas gesprochen. Um jedoch die anerkannten Glasbezeichnungen beibehalten zu können, wird im folgenden Bericht ebenfalls von vorgespanntem Glas gesprochen. Im Eigenspannungszustand kann bei Einscheibensicherheitsglas (ESG) von einer charakteristischen Biegezugfestigkeit an der Oberfläche von 120 N/mm<sup>2</sup> ausgegangen werden, die jedoch in den Rand- und Lochbereichen der Scheibe nicht erreicht wird. Die durch Mikro- und Makrorisse geschädigte Scheibe wird somit an der Oberfläche unter Druck gehalten, wodurch die Biegefestigkeit und die Schlagfestigkeit markant erhöht werden. Im Innern des vorgespannten Glases ist das Material nahezu fehlerfrei, so dass dort hohe Zugspannungen möglich sind [N 6], [N 7].

Überschreitet ein Riss die Druckzonenhöhe, zerbricht das Glas über die ganze Länge und Breite in zahlreiche kleine Bruchstücke (siehe Bild 3.27). Eine nachträgliche Kantenbearbeitung oder Vorschädigung ist deshalb nicht möglich oder erlaubt. Teilvorgespanntes Glas (TVG) wird weniger hoch erhitzt und langsamer abgekühlt als ESG, deshalb ist die Druckspannung auf der Oberfläche eines TVG geringer; sie beträgt  $70 \text{ N/mm}^2$ . Die Bruchstücke sind dafür wesentlich grösser und scharfkantiger. Mithilfe von spannungsoptischen Messverfahren (differential stress refractometer, Kompensation nach Saramont- und Streulichtmessverfahren) können Spannungen im Glas bestimmt werden [F 6]. Diese anerkannten Messverfahren stützen sich auf das Prinzip der Doppelbrechung gemäss dem spannungsoptischen Grundgesetz von Maxwell-Wertheim.

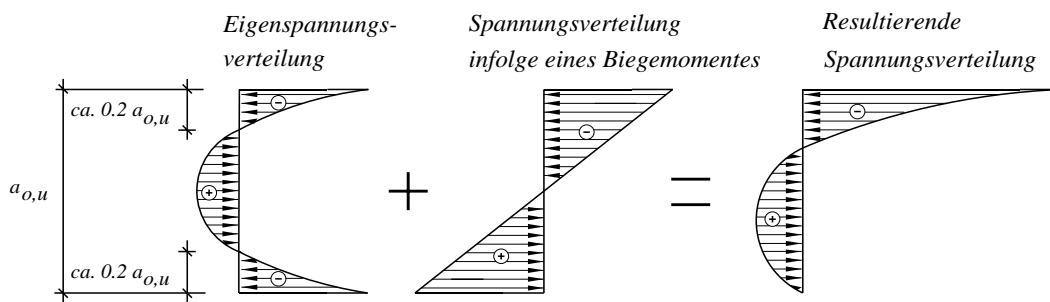


Bild 1.2 Spannungsverteilungen in einer ESG-Scheibe unter Biegebeanspruchung und infolge thermischer Vorspannung.

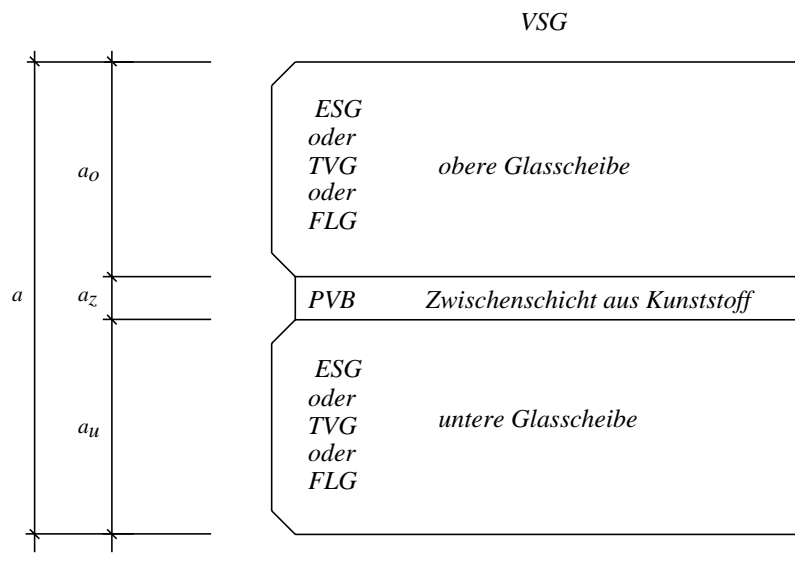


Bild 1.3 Querschnitt einer geschliffenen und polierten Kante einer Glasscheibe aus VSG mit zwei Glasschichten und einer Zwischenschicht aus PVB.

## 1.4 Tragwerksorientierte Zustandsbeschreibung

Eine VSG-Scheibe kann Risse, z.B. Oberflächenrisse als Mikro- oder Makrorisse aufweisen. Erst mit einem fortschreitenden Risswachstum infolge einer Beanspruchung kann eine Glasschicht in mehrere Teile brechen. Trotz des offensichtlichen Bruchs ist zwar ein lokales Versagen einer Glasscheibe eingetreten, jedoch muss dies nicht zu einem globalen Versagen der gesamten VSG-Scheibe führen. Ein globales Versagen der VSG-Scheibe äussert sich dadurch, dass sie ihre restliche Biegesteifigkeit verliert und sich von den Auflagern löst.

Um das Tragverhalten einer VSG-Scheibe beschreiben zu können, werden drei Bruchzustände unterschieden. In Bild 1.4 ist eine VSG-Scheibe mit zwei Glasschichten in verschiedene Zonen eingeteilt. Jede Zone befindet sich in einem bestimmten Bruchzustand.

### 1.4.1 Zustand I: Ungerissener Querschnitt

Bevor die erste Glasschicht einer VSG-Scheibe bricht, spricht man vom Zustand I (Zone 3 in Bild 1.4). Solange das Biegemoment kleiner als das Bruchmoment ist, übertragen alle Glasschichten Zug- und Druckspannungen. In jeder Glasschicht stellt sich eine lineare Spannungsverteilung ein. Die Spannungsverteilung über den Gesamtquerschnitt lässt sich mit Hilfe der Sandwichtheorie mit dicken Deckschichten erklären [F 7]. Die Grösse des Spannungssprungs in der Zwischenschicht und des Spannungsgradienten über die Höhe ist von der Dicke der Schichten und vom Schubmodul der PVB-Folie abhängig. Die Folie besteht aus einem visko-elastischen Thermoplast; deshalb variiert ihre Schubsteifigkeit mit der Temperatur und der Belastungsdauer. Abhängig vom vorhandenen Verbund tritt das Versagen an jener Oberfläche einer Glasschicht ein, wo die Bruchspannung zuerst erreicht wird. Bei reiner Biegung und gleich dicken Glasschichten ist die Spannungsverteilung über den Querschnitt unabhängig von der Güte des Verbunds punktsymmetrisch bezüglich der Lage der PVB-Folie. Somit bricht bei Biegebelastung die untere Glasschicht zuerst, da an ihrem unteren Rand die grösste Zugspannung herrscht.

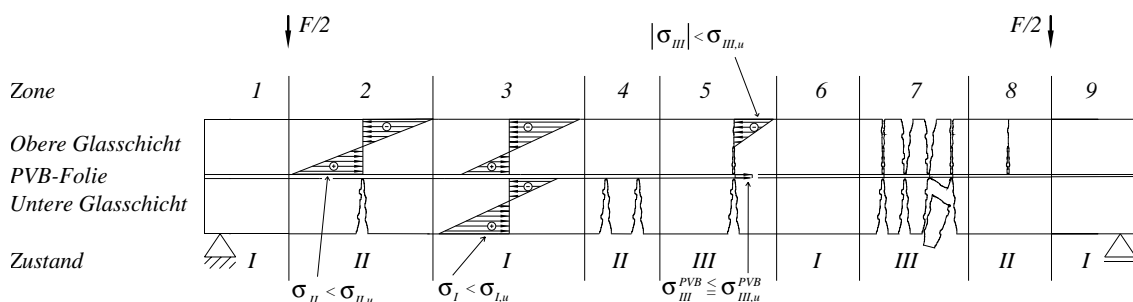


Bild 1.4 VSG-Scheibe aus FLG, eingeteilt in verschiedene Zonen und Bruchzustände [A 5].

### **1.4.2 Zustand II: Teilweise gerissener Querschnitt**

In der Zone 2 in Bild 1.4 ist die untere Schicht gebrochen und die VSG-Scheibe befindet sich im Zustand II. Nur die obere Schicht leistet einen Beitrag um die inneren Kräfte zu übertragen. Die Folie ist nicht gerissen und übernimmt die folgenden zwei Aufgaben: Einerseits bindet sie die Glassplitter der unteren Schicht, andererseits müssen, obwohl die Folie ihre eigentliche Sandwichtragfunktion verloren hat, trotzdem links und rechts vom Riss über die Folie Verbundspannungen eingeleitet werden, damit in Zone 1 und 3 der Zustand I herrschen kann. In der Zone 4 liegen die Brüche in der unteren Scheibe so nahe beieinander, dass der Bereich für eine Spannungseinleitung nicht ausreichend gross ist. Deshalb ist zwischen den Rissen kein Zustand I zu finden. Weist eine VSG-Scheibe Zonen mit Zustand II auf, kann bereits von einer Resttragfähigkeit der Glasscheibe gesprochen werden. In der Zone 8 ist ebenfalls Zustand II vorhanden, wobei die obere Glasschicht gebrochen ist. Die Resttragfähigkeit ist etwas höher, denn die oberen Glasstücke können durch Kontakt Druckkräfte übertragen. Wird die gebrochene VSG-Scheibe belastet, tritt mit der Resttraglast im Zustand II (beim Erreichen der Zugfestigkeit an der Oberfläche der Glasscheibe) ein unkontrolliertes Risswachstum ein. Die Folge ist ein Bruch der intakten Glasschicht.

### **1.4.3 Zustand III: Vollständig gerissener Querschnitt**

Mit dem Bruch der letzten intakten Glasscheibe verliert das Glas die Eigenschaft, die inneren Kräfte über Zugspannungen abzutragen. Die Glasstücke können nur über Kontakt Druckkräfte übernehmen (Zone 5 in Bild 1.4). Die aus Gleichgewichtsgründen entstehenden Zugkräfte werden ausnahmslos über die Kunststoffolie übertragen. In der Folie ist die Fließdehnung erreicht, jedoch wird die Bruchdehnung praktisch nie erreicht. Das Materialverhalten der PVB-Folie ist sehr komplex und variiert mit den Umweltbedingungen (im folgenden Kapitel wird das Verhalten genauer untersucht). In Zone 5 werden die Druckspannungsverteilung an den Glaskanten und die Zugspannungsverteilung an der Folie gezeigt. Die direkt angrenzenden Zonen 4 und 6 sind von entscheidender Bedeutung, um eine ausreichende Übertragungslänge der Verbundspannungen zu garantieren. Stehen diese Übertragungslängen nicht zu Verfügung (Zone 7), haften die Bruchstücke nicht mehr an der Folie. Es besteht dort keine weitere Restbiegesteifigkeit und es können keine Druckspannungen über Kontakt übertragen werden, so dass die Glasscheibe an dieser Stelle versagt. Eine Resttraglast im Zustand III kann nicht bestimmt werden.

## **1.5 Resttragfähigkeit und Reststandzeit**

Zahlreiche Richtlinien und Autoren [N 1], [N 3], [F 2], [D 3] formulieren in den aufgestellten Anforderungen die Resttragfähigkeit kombiniert mit der Reststandzeit der gebrochenen Glasstruktur. In diesem Versuchsbericht werden die beiden Begriffe ab-

hängig von dem jeweils herrschenden Bruchzustand der Verbundsicherheitsglasscheibe getrennt.

Die Resttragfähigkeit bezieht sich auf den Bruchzustand, bei dem ein Bauteil durch den Ausfall einer oder mehrerer Glasschichten beschädigt ist. Die Resttragfähigkeit ist ein Mass für die maximal aufzunehmende Last bis zum völligen Versagen der VSG-Scheibe [A 1].

Eine eindeutige Definition der Reststandzeit kann nur dann formuliert werden, wenn diese sich auf den Bruchzustand, bei dem ein Bauteil durch den Ausfall einer oder mehrerer Glasschichten beschädigt ist, bezieht. Die Reststandzeit ist ein Mass für die Zeitdauer bis zum völligen Versagen der VSG-Scheibe bei einer konstanten Belastung [A 5]. Diese entspricht meistens dem Eigengewicht. Bei einer betretbaren Verglasung, das heisst einer nur für Wartungs- und Reinigungszecke benutzbaren, wird zusätzlich eine Einzellast von 1 kN angesetzt [D 3]. Begehbare Verglasungen können mit höheren Einzel- und Flächenlasten beansprucht werden.

## 1.6 Vorgehen

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen Versuche lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen.

Zunächst wurde das Materialverhalten der Zwischenschicht untersucht. Da die Zwischenschicht von VSG-Scheiben ein thermoplastisches Polymer ist, war von einem zeit- und temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungsverhalten auszugehen. Die Spannungs-Dehnungskurven der Versuchskörper wurden in einer Klimakammer mit unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten und unter verschiedenen Temperaturen, die unter- und oberhalb der Glasübergangstemperatur lagen, aufgezeichnet.

In Vierpunktbiegeversuchen an VSG-Scheiben konnte der Einfluss ausgewählter Parameter (Foliengehalt, Dicke der Glasschichten, Glastypeen, Bruchbilder) auf die drei unterschiedlichen Zustände ermittelt werden. Es wurden nicht alle Proben im Zustand I direkt in die Versuchsapparatur eingesetzt und getestet. Ein Teil der Serie wurde mittels einer Stahlkugel vorgeschädigt oder mithilfe eines Glasschneiders mit einem Riss versehen. Die Kugel wurde auf die Glasscheiben fallengelassen, so dass zunächst nur die obere, von der Kugel getroffene Glasschicht brach. VSG-Scheiben mit einer eingeritz-

## Einleitung

ten Kerbe wurden manuell soweit gebogen bis die vorgeschädigte Glasschicht versagte. Erst nach der Vorschädigung (entweder Kugelaufprall oder Riss durch Glasschneider) wurden die Versuchskörper in die Versuchseinrichtung eingelegt und getestet.

Schliesslich wurden vierseitig gelagerte Plattenversuche mit VSG-Scheiben durchgeführt. Auch hier wurde ein Teil der Serie direkt in der Versuchsanlage getestet und der Rest zunächst mit einer Stahlkugel vorgeschädigt, um dann in der Versuchseinrichtung eingebaut und geprüft zu werden.



## 2 Zug-Verformungsverhalten von Polyvinylbutyralfolie

### 2.1 Prinzip

Ausgewählte Versuchskörper der PVB-Folie wurden bei konstanter Prüfgeschwindigkeit und Temperatur gedehnt bis ein Versagen in Form von Reissen der Folie auftrat. Während dieses Vorgangs wurden die am Versuchskörper angebrachte Belastung und die Längenänderung gemessen.

Neben den Zugversuchen wurden auch Kriechversuche durchgeführt. Dazu wurden an den Versuchskörpern unterschiedliche konstante Belastungen angehängt. Die Zeit bis zum Bruch und das zeitabhängige Verformungsverhalten wurden bestimmt.

### 2.2 Versuchsprogramm

Für die Durchführung der Versuche wurde vom Institut für Baustoffe (IfB) an der ETH Zürich auf dem Hönggerberg eine Universalprüfmaschine mit einer Klimakammer zur Verfügung gestellt, welche die Prüfung von Zuelementen bis maximal 10 kN Belastung erlaubt. Die Klimakammer war demontier- und anpassbar, so dass unterschiedliche Umgebungstemperaturen für die Versuchskörper eingestellt werden konnten. Das generelle Versuchskonzept beschränkte sich auf eine Form des Versuchskörpers und auf die beiden Versuchsparameter Prüfgeschwindigkeit und Temperatur (vgl. dazu Tabelle 2.1).

<i>Prüfgeschwindigkeit [mm/s]</i>	0.087	0.33	0.87	1.66	3.33	5.00
<i>Temperatur [°C]</i>	-15	-5	+5	+15	+22	-

Tabelle 2.1 Versuchsparameter der Zugversuche; Prüfgeschwindigkeit und Temperatur.

Vier Versuche mit gleicher Prüfgeschwindigkeit und -temperatur wurden jeweils zu einer Versuchsserie zusammengefasst. Folgendes Bezeichnungsschema wurde gewählt:

**Zug\_PVB\_+15\_0.087\_12\_5**

Der Ausdruck "Zug\_PVB" bezeichnet die Art des Versuchs (hier: Zugversuch) und das getestete Material des Versuchskörpers (hier: PVB-Folie), die folgende Zahl (hier: +15) gibt die Umgebungstemperatur (in °C) bei der Durchführung des Versuchs an. Die

nächste Zahl (hier: 0.087) bezeichnet die Prüfgeschwindigkeit (in mm/s) mit welcher der Versuchskörper belastet wurden. Die folgende Zahl (hier: 12) bezeichnet die Nummer der Versuchsserie und die letzte Ziffer gibt schliesslich die Nummer des Versuchs wieder. Entfällt die letzte Ziffer, so bezieht man sich auf die ganze entsprechende Versuchsserie. Alle Serien können aus der Tabelle 2.3 entnommen werden.

Ebenfalls wurden Zug-Kriechversuche an den Versuchskörpern durchgeführt. Diese benötigten keine besondere Prüfapparatur und wurden deshalb in der Versuchshalle des HIF der ETH Zürich unter der dort herrschenden Umgebungstemperatur durchgeführt. Auch hier wurde die gleiche Form der Versuchskörper gewählt. Der einzige Versuchsparameter war das konstante Gewicht, welches an der Folie angehängt war (siehe Tabelle 2.2)

Masse [kg]	1.48	1.98	2.48
------------	------	------	------

Tabelle 2.2 Versuchparameter der Zug-Kriechversuche; die angehängte Masse.

Kriechversuche mit gleicher Beanspruchung wurden ebenfalls zu einer Versuchsserie zusammengefasst. Für solche Versuche wurde folgende Bezeichnung gewählt:

**Kriech\_PVB\_+21\_1.48\_12\_3**

Der Ausdruck "Kriech\_PVB" bezeichnet wieder den Versuchstyp und das geprüfte Material. Die erste Zahl (hier: +21) gibt die Umgebungstemperatur (in °C) bei der Durchführung des Versuchs wieder. Die nächste Zahl (hier: 1.48) bezeichnet die angehängte Masse (in kg). Die folgende Zahl (hier: 12) bezeichnet die Nummer der Versuchsserie. Die letzte Ziffer gibt die Nummer des Versuchs an. Entfällt die letzte Ziffer, bezieht man sich auf die ganze entsprechende Versuchsserie.

## 2.3 Versuchskörper

In der Norm EN ISO 527-3 werden drei verschiedene Formen der Versuchskörper für die Bestimmung der Zugeigenschaften vorgeschlagen [N 9]. Zunächst wurden einfache Streifen konstanter Breite auf Zug belastet. Diese erwiesen sich jedoch als ungeeignet, da sich entweder die Folie aus der Halterung löste oder ein Reißen innerhalb oder an der Halterung zu beobachten war. Deshalb wurden Versuchskörper des Typs 3 entsprechend der oben aufgeführten Norm ausgewählt (siehe Bild 2.1). Dieser Typ besitzt gegenüber den anderen Formen in der Mitte der Gesamtlänge  $L_G$  einen schmalen Bereich und benötigt für die Befestigung der Klemmbacken im Bereich der Klemmlängen  $L_G$  keine Zentrierlöcher. Der Versuchskörper bricht innerhalb des schmalen Bereichs, wo über die schmale Breite  $B_I$  konstante Zugspannungen zu finden sind. Damit konnte ein vorzeitiger Bruch in der Nähe der Einspannstelle, wo lokale Störungen die Spannungsverhältnisse stark beeinflussen, vermieden werden.

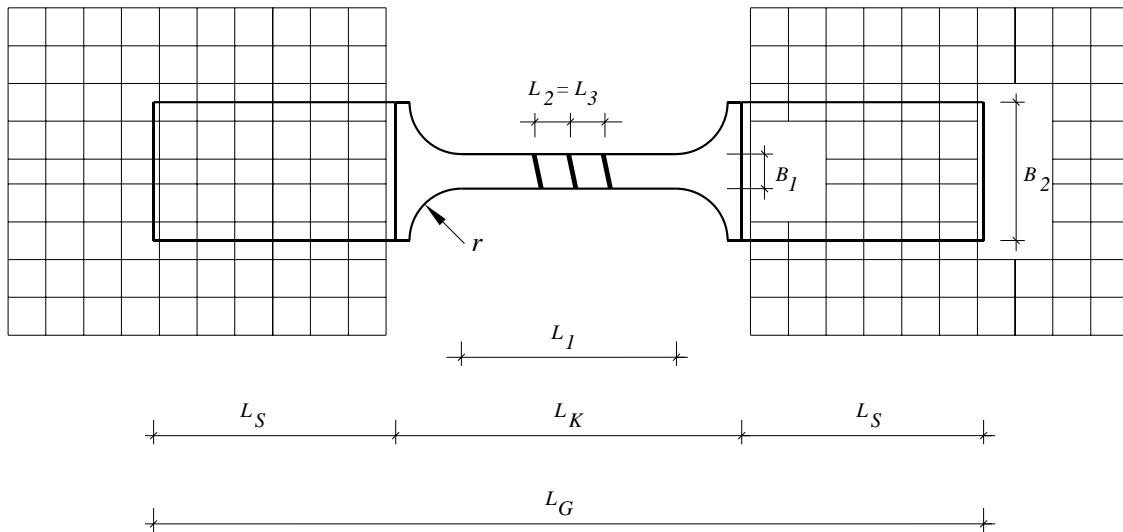


Bild 2.1 Form des Versuchskörpers des Typs 3 und Bezeichnungen seiner Abmessungen.

### 2.3.1 Herstellung der Versuchskörper

Für die Herstellung der PVB-Folie werden das gleichnamige PVB-Harz, Weichmacher sowie weitere Additive benötigt. Das PVB-Harz als weisses Pulver ist in Folienform steif, weshalb Weichmacher (Polyethylenglykol, Adipinsäuren) beigemischt werden. Damit wird gleichzeitig eine Haftfähigkeit erzeugt und eine genügende Elastizität erreicht. Im Mischer werden die einzelnen Komponenten homogenisiert, um dann im Extruder unter hohem Druck und hoher Temperatur geschmolzen zu werden (siehe Bild 2.2). Der Extruder drückt mit einer Schnecke die hochviskose Schmelze in die Extrusionsdüse (Breitschlitzdüse). Durch diese wird die Folie mit einer Breite von 3210 mm gebildet. Anschliessend relaxiert die Folie indem sie die entstandenen Spannungen durch Schrumpfen abbaut. Der Feuchtegehalt wird auf 0.45% gebracht und die Folie wird auf 8°C abgekühlt. Der Feuchtegehalt wird auf 0.45% gebracht und die Folie wird auf 8°C abgekühlt.

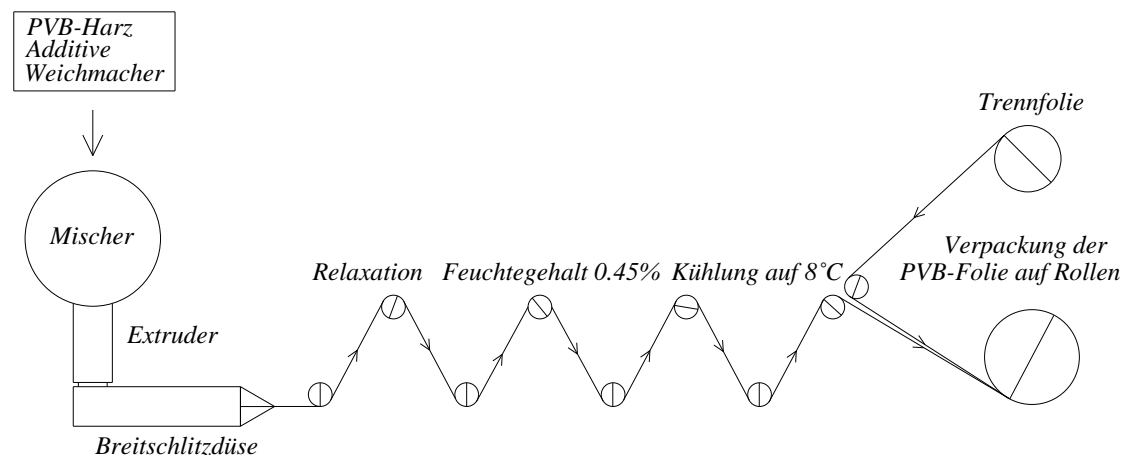


Bild 2.2 Herstellungsverfahren der PVB-Folie.

Mit dem Einlegen der Trennfolie und Aufwickeln auf eine Rolle wird der Herstellungsprozess abgeschlossen. Im Verarbeitungszustand besitzt die Folie wegen der aufgerauten Oberfläche ein milchig weiss-gelbes Aussehen und verklebt aufgrund der Trennfolie nicht. Die Firma Pilkington stellte für die Versuche eine PVB-Folienrolle der Marke Trosifol zur Verfügung. Die Folie wurde mit der Standarddicke von 0.38 mm geliefert. Die ausgerollte Folie wurde zunächst mit einer Papierschnittmaschine in mehrere Streifen der Breite  $B_2$  geschnitten. Auf jedem Folienstreifen wurden die Formen der Versuchskörper mit einer Schablone gezeichnet und anschliessend wurden die inneren Kanten so geschnitten, dass sie glatte, kerbenfreie Oberflächen aufwiesen. Versuchskörper, die sichtbare Fehler an den Schnittkanten aufwiesen, wurden nicht weiterverwendet. Die Enden der Versuchskörper wurden mit Krafteinleitungselementen verstärkt. Vorzugsweise wurde ein Sandpapier mit kreuzweise geschichtetem Gewebe benutzt, um das Verrutschen der Folie an den Einspannstellen zu vermeiden.

### 2.3.2 Abmessungen der Versuchskörper

Bei der Folie ist mit grossen Dehnungen, bzw. Verformungen zu rechnen. Somit bilden die Längsabmessungen der Klimakammer und der Klemmvorrichtung einen oberen Grenzwert für die maximalen Abmessungen des Versuchskörpers (mit Berücksichtigung der Bruchverformungen von über 250%). Ferner sind für das Befestigen des Versuchskörpers an den Klemmbacken der Prüfmaschine und in den schmalen Dehnungsbereich für die Markierungen Mindestabmessungen zu beachten. Aus Bild 2.3 können alle gewählten Abmessungen entnommen werden.

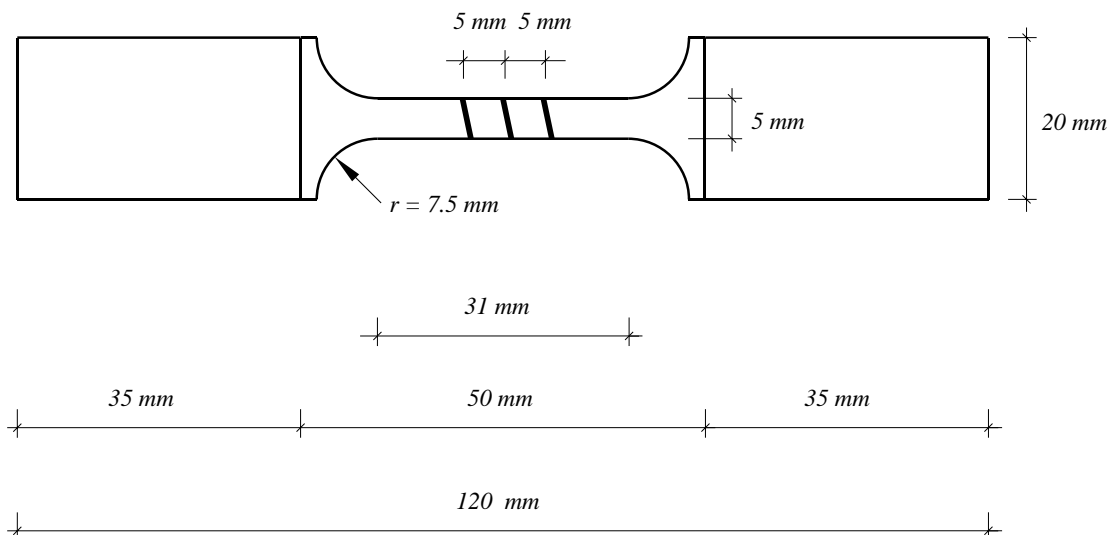


Bild 2.3 Ausgewählte Abmessungen für den Versuchskörper.

### 2.3.3 Messmarken

Für die Messung der Verformungen wurden drei Messmarken innerhalb des schmalen Bereichs  $L_1$  mit einem schwarzen Filzstift in einem Abstand von 5 mm gesetzt (siehe dazu Bild 2.3). Alle Messmarken sollten die gleiche Strichstärke von 1 mm aufweisen und leicht geneigt zu der Längsachse des Versuchskörpers liegen. Damit die Messmarken sich gut vom Hintergrund unterschieden und von der Messeinrichtung gut erfasst werden konnten, wurde hinter den Versuchskörper eine weiße Hintergrundfläche gelegt. Die Klimakammer wurde mit einer Beleuchtung ausgestattet (siehe Bild 2.4).

a)



b)

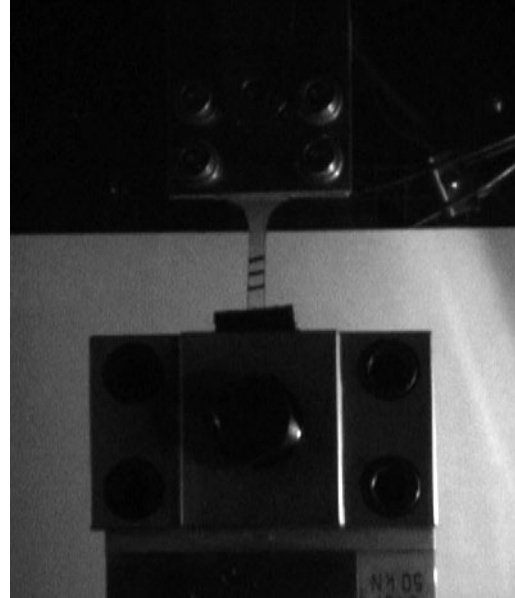


Bild 2.4 Versuchseinrichtung für die Zugversuche; (a) Prüfmaschine mit Klimakammer und Videoextensometer; (b) durch die Klemmvorrichtung eingespannter Versuchskörper.

## 2.4 Prüfgerät

### 2.4.1 Prüfmaschine

Die Versuchskörper wurden in der Prüfmaschine Zwick 1400 getestet (siehe Bild 2.5). Die Maschine lässt sich grob in die Beanspruchungseinheit und in die Klimakammer unterteilen. Die Beanspruchungseinheit führte den eigentlichen Prüfprozess aus und bestand aus drei Traversen, zwei Säulen und der Klemmvorrichtung. Die obere Traverse war fest an den zwei Säulen montiert. Die verstellbare untere Traverse wurde an den Säulen gehalten. Sie konnte zur Regulierung des Hubes der fahrbaren mittleren Traverse in die gewünschte Stellung gebracht werden. Die mittlere Traverse wurde während der Belastung mit einer fest gewählten Verformungsgeschwindigkeit gefahren. Der Versuchskörper wurde zwischen zwei Blechen, die mit vier Schrauben verbunden waren, befestigt. Die obere Klemmvorrichtung wurde an der oberen festen Traverse ange-

bracht. Die bewegliche untere Klemmvorrichtung bestand aus zwei verstellbaren Klemmbacken. Die gesamte Klemmeinrichtung wurde durch das zweite Bauteil, die Klimakammer, umschlossen (siehe Bild 2.4). Ein Thermometer innerhalb der Klimakammer zeigte die genauen Umgebungstemperaturen an.

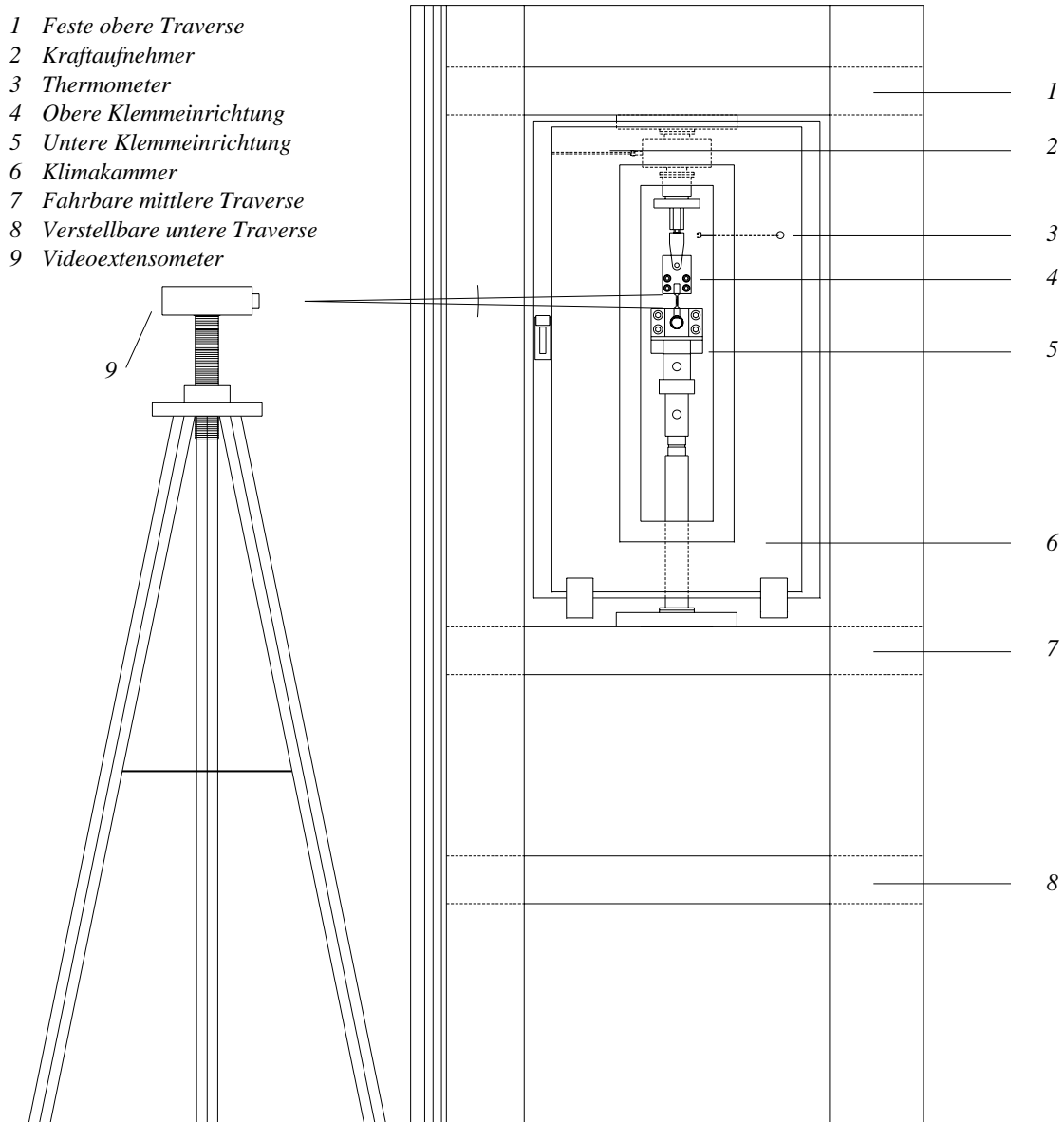


Bild 2.5 Schematischer Versuchsaufbau für die Zugversuche.

Für die Kriechversuche war keine besondere Prüfapparatur erforderlich; lediglich eine Aufhängung der Probe mit Klemmeinrichtung sowie ein freier Zugang waren notwendig um optische Verformungen messen zu können (siehe Bild 2.6).



Bild 2.6 Versuchseinrichtung für die Zug-Kriechversuche.

#### 2.4.2 Kraftmesseinrichtung

Für die Zugversuche wurde ein rotationssymmetrischer Kraftaufnehmer, welcher mit einer Innensechskantschraube an der Beanspruchungseinheit befestigt war, gewählt. Der Kraftaufnehmer wurde über den Aufnahmestecker an die Mess- und Steuereinheit elektrisch angeschlossen.

#### 2.4.3 Längenmesseinrichtungen

Die Verformungsänderungen wurden durch die Glasscheibe von einem Videoextensometer ME46 ausserhalb der Klimakammer optisch gemessen. Das Gerät enthält eine CCD-Vollbild-Kamera (CCD = Charge Coupled Device), deren Bilder in einem PC-gestützten Videoprozessor in Echtzeit digitalisiert und ausgewertet werden. Um die Dehnungen ermitteln zu können, wurde zunächst der genaue Abstand der zwei äusseren Messmarken mit der Kamera bestimmt. Anschliessend wurden über ein Histogramm fortlaufend die Längenänderungen bestimmt und diese Werte mit der ursprünglichen Länge verglichen.

Während der Messung wurden die Messmarken selbstständig erkannt und mitverfolgt. Die Wahl der Gegenstandsweite und der Brennweite des Objektivs bestimmt den möglichen Messbereich und die Genauigkeit der Messung.

Der Videoextensometer war für die Verformungsmessung aus zwei Gründen vorteilhaft:

- Grosse Dehnungen von 250 bis 350% konnten problemlos mit hoher Genauigkeit bestimmt werden.
- Da die Messung ausserhalb der Apparatur stattfand, traten keine Messstörungen infolge Temperaturveränderung auf.

Für eine grobe Kontrolle der Werte wurde ebenfalls der Kolbenweg bestimmt und zur Ursprungslänge ins Verhältnis gesetzt. Zwar gibt der sich daraus ergebende Wert nicht die genaue Dehnung des Versuchskörpers wieder; er ist jedoch ein geeigneter Anhaltswert um zu entscheiden, ob der Videoextensometer richtig funktioniert.

## **2.5 Versuchsdurchführung**

### **2.5.1 Versuchsvorbereitung**

#### 2.5.1.1 Prüfklima

Um Sichtbehinderung durch Kondensation zu vermeiden, war darauf zu achten, dass die Glasscheibe der Klimakammer vor dem Versuch stets abgetrocknet war. Die gewünschte Temperatur konnte mit einer äusseren Steuereinheit bestimmt werden und dann während des Zugversuchs automatisch konstant gehalten werden. Eine genaue Temperaturmessung wurde mit einem in der Klimakammer eingebauten Thermometer durchgeführt. Bei den Kriechversuchen wurde die Umgebungstemperatur in der Versuchshalle mit einem Temperaturmessgerät gemessen.

#### 2.5.1.2 Einspannen

Die Versuchskörper für die Zugversuche wurden so in der Spanneinrichtung installiert, dass die Längsachse jedes Versuchskörpers mit der Zugachse der Prüfmaschine übereinstimmte. Der Versuchskörper sollte frei von Spannung sein und beim Anziehen der unteren Klemmeinrichtung war jegliches Verrutschen des Versuchskörpers zu verhindern. Deshalb wurde der Versuchskörper zunächst zwischen zwei Blechen eingelegt und mit vier Inbusschrauben zusammengepresst. Anschliessend wurden die Bleche über die obere Spanneinrichtung an der oberen Traverse aufgehängt. Mit der mittleren Traverse wurden die unteren Klemmbanken so weit herangefahren, dass der Versuchskörper auch unten frei von Spannung fest montiert werden konnte.

### **2.5.2 Versuchsablauf**

Der eigentliche Versuchsablauf der Zugversuche beinhaltete drei Vorgänge:

- Steuerung der Versuchsapparatur bis zum Bruch.



- Beobachtung des Belastungsvorgangs sowie der Verformungs- und Verfärbungsänderungen des Versuchskörpers.
- Aufzeichnung und Sicherung aller notwendigen Daten.

#### 2.5.2.1 Belastungsvorgang der Zugversuche

Nach dem Einspannen wurde die Probe unter vorgegebener Temperatur und mit einer vorgegebenen konstanten Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet.

#### 2.5.2.2 Versuchsbeobachtung der Zugversuche

Die Versuchsbeobachtung sollte zunächst zeigen, in wie weit sich die Verformungen einstellen und welchen Einfluss die unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten unter gleichen Temperaturbedingungen auf das Last-Verformungsverhalten haben. Ein Reißen der Folie in der Nähe der Einspannstelle war nicht zulässig. Deshalb wurde noch während des Versuchs kontrolliert, ob sich eine Einschnürung im Klemmbereich ausbildete (siehe Bild 2.7). In einem solchen Fall wurde der Versuch abgebrochen und mit einer neuen Probe wiederholt.

a)



b)

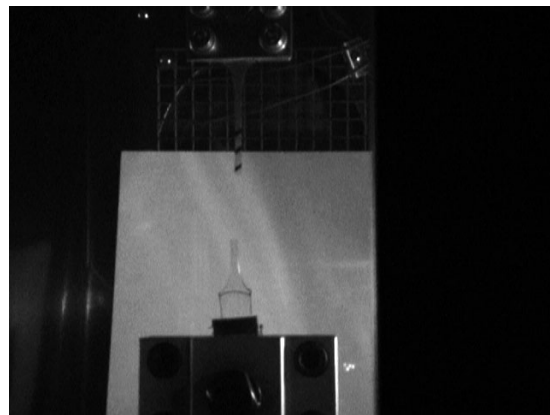


Bild 2.7 Zugversuche; (a) irreversible Verformungen in Form von weisser Trübung des Materials, (b) Bruch des Versuchskörpers im schmalen Bereich.

#### 2.5.2.3 Aufzeichnung der Daten

Zunächst wurden die Daten der Prüfsteuereinheit und des Videoextensometers an einen Rechner geleitet. Die folgenden vier Werte wurden gespeichert: Kraft, Zunahme des Klemmabstands, Dehnungen und Temperatur.

#### 2.5.2.4 Zug-Kriechversuche

In den Kriechversuchen wurde lediglich beobachtet, ob die Probe nicht an den Einspannstellen versagte. Die Verformungen der PVB-Folie wurden gemessen und gespeichert.

## 2.6 Versuchsresultate

### 2.6.1 Zug-Verformungsverhalten

Basierend auf dem rheologischen Verhalten von Thermoplasten lassen sich die Ergebnisse der Zugversuche in zwei Gruppen unterteilen (siehe Bild 2.8).

#### 2.6.1.1 Verhalten unterhalb der Glasübergangstemperatur

Bei (niedrigen) Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur der PVB-Folie (ca. 14°C) verhält sich diese zunächst linear elastisch. Dehnungen sind reversibel; deshalb kann das Hook'sche Gesetz angewendet werden. Es lässt sich, abhängig von Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit, ein Elastizitätsmodul  $E_e$  bestimmen. Nach dem Erreichen der Fließspannung  $\sigma_y$  bei einer Fließdehnung  $\varepsilon_y$  ist ein Entfestigungsbereich zu beobachten. Die hohe Verformungsfähigkeit ist mit einer Spannungsabnahme verbunden. Die entstehenden Verformungen sind reversibel, aber von Belastungsdauer und Temperatur abhängig. Der Entfestigungsbereich ist beim Erreichen der Spannung  $\sigma_s$  bei einer Dehnung  $\varepsilon_s$  abgeschlossen. Anschliessend folgt der Verfestigungsbereich, bei welchem deutliche Werkstoffschädigungen in Form von Verfärbungen der Folie zu beobachten waren. Die angesprochenen Werkstoffschädigungen verursachen irreversible plastische Verformung, bis schliesslich die Folie bei einer Zugfestigkeit  $\sigma_t$  bzw. Bruchdehnung  $\varepsilon_t$  reisst.

#### 2.6.1.2 Verhalten oberhalb der Glasübergangstemperatur

Bei (hohen) Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur der PVB-Folie verhält sich ein belasteter Versuchskörper zunehmend wie eine zähe Flüssigkeit. Der linear elastische Bereich sowie der Entfestigungsbereich sind nicht mehr vorhanden und nur ein Verfestigungsbereich ist zu beobachten.

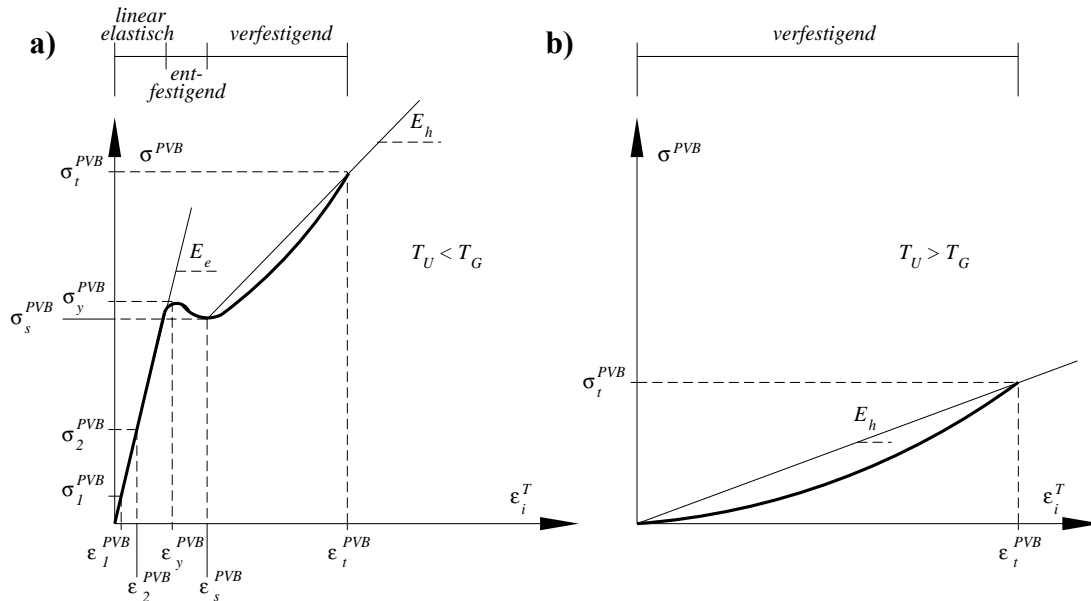


Bild 2.8 Prinzipiell mögliche Spannungs-Dehnungsdiagramme; (a) Umgebungstemperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur, (b) Umgebungstemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur.

### 2.6.2 Spannungs- und Dehnungsberechnung

Alle Zugspannungswerte wurden auf der Grundlage der Anfangsquerschnittsfläche des Versuchskörpers im schmalen Bereich der Breite  $B_1$  (in  $\text{N}/\text{mm}^2$ ) berechnet.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{0.38\text{mm} \cdot B_1} \quad (2.1)$$

Die Dehnungen des Versuchskörpers wurden mithilfe des ursprünglichen Abstands der Messmarken und der Vergrößerung der Messmarkenabstände (in %) bestimmt.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

### 2.6.3 Modulberechnung

Der Elastizitätsmodul  $E_e$  für den linear elastischen Bereich kann wie folgt berechnet werden:

$$E_e = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (2.3)$$

Die Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  werden bei den Dehnungswerten  $\varepsilon_1 = 0.05\%$  und  $\varepsilon_2 = 0.25\%$  gemessen.

Der Modul  $E_h$  des Verfestigungsbereichs ist ein Anhaltswert, wie steif sich die PVB-Folie im Verfestigungsbereich verhält. Falls die Umgebungstemperatur  $T_U$  unterhalb der Glasübergangstemperatur  $T_G$  liegt, kann für die Bestimmung des Sekantenmoduls  $E_h$  die folgende Gleichung benutzt werden:

$$E_{h(T_U < T_G)} = \frac{(\sigma_t - \sigma_s)}{(\varepsilon_t - \varepsilon_s)} \quad (2.4)$$

Ist die Umgebungstemperatur  $T_U$  höher als die Glasübergangstemperatur  $T_G$ , so existieren keine Spannung  $\sigma_s$  und die dazugehörige Dehnung  $\varepsilon_s$ . Deshalb wird die folgende Gleichung für die Bestimmung des Moduls  $E_h$  verwendet:

$$E_{h(T_U > T_G)} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad (2.5)$$

#### 2.6.4 Ermittelte Werkstoffkennwerte aus den Zugversuchen

Folgende mechanische Kennwerte wurden aus den Zugversuchen gewonnen und aufgelistet (vgl. Tabelle 2.3):

- Fließspannung  $\sigma_y$  und Fließdehnung  $\varepsilon_y$
- Spannung  $\sigma_s$  und Dehnung  $\varepsilon_s$  des Entfestigungsbereichs
- Zugfestigkeit  $\sigma_t$  und Bruchdehnung  $\varepsilon_t$
- Elastizitätsmodul  $E_e$  des linear elastischen Bereichs nach Gleichung (2.3)
- Sekantenmodul  $E_h$  des Verfestigungsbereichs nach Gleichung (2.4) oder nach Gleichung (2.5)

Versuchsserie Zug_PVB_	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_y$ [%]	$\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_s$ [%]	$\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_t$ [%]	$E_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_h$ [N/mm <sup>2</sup> ]
-15_0.087_51	15.50	5.3	13.34	18.20	43.47	184.60	935	18.11
-15_0.330_52	20.11	4.9	16.17	22.70	49.21	187.30	1080	20.07
-15_0.870_53	20.40	5.2	16.76	18.20	44.85	172.70	1100	18.18
-15_1.660_54	22.28	4.39	17.85	28.18	42.31	175.48	1340	16.60
-15_3.330_55	24.67	3.89	19.96	36.19	43.21	171.69	1425	17.16
-15_5.000_56	25.26	3.04	20.10	31.94	46.95	175.44	1550	18.71
-5_0.087_41	9.01	8.40	8.48	18.8	41.27	212.7	190	16.91
-5_0.330_42	12.72	5.04	10.93	23.93	46.40	210.4	275	19.05
-5_0.870_43	14.20	5.38	11.80	22.98	41.68	197.18	995	17.15
-5_1.660_44	15.11	4.50	12.47	29.50	40.64	193.10	1225	17.21
-5_3.330_45	17.21	5.40	14.57	35.50	44.36	204.80	1351	17.60
-5_5.000_46	19.29	4.46	16.33	38.06	41.86	186.26	1365	17.22
+5_0.087_31	4.63	3.90	2.63	4.90	32.59	201.89	175	15.20
+5_0.330_32	6.96	5.20	6.77	5.70	33.40	193.90	200	14.15
+5_0.870_33	7.93	5.15	7.56	14.20	39.87	211.50	340	16.38
+5_1.660_34	9.68	3.32	8.77	20.81	34.86	182.51	1050	16.13
+5_3.330_35	11.88	3.50	10.43	22.50	38.88	202.00	1085	15.85
+5_5.000_36	13.69	3.09	13.09	5.09	35.58	178.19	1350	13.25
+15_0.087_21	-	-	-	-	24.97	283.9	-	8.80
+15_0.330_22	-	-	-	-	28.24	237.53	-	11.89
+15_0.870_23	-	-	-	-	30.71	219.80	-	13.97
+15_1.660_24	-	-	-	-	33.79	221.2	-	15.28
+15_3.330_25	-	-	-	-	32.04	208.5	-	15.37
+15_5.000_26	-	-	-	-	32.44	202.27	-	16.04
+22_0.087_11	-	-	-	-	13.73	289.70	-	4.7
+22_0.330_12	-	-	-	-	15.54	254.30	-	6.1
+22_0.870_13	-	-	-	-	20.63	271.10	-	7.6
+22_1.660_14	-	-	-	-	21.05	242.40	-	8.7
+22_3.330_15	-	-	-	-	26.32	269.41	-	9.7
+22_5.000_16	-	-	-	-	21.00	216.87	-	9.7

Tabelle 2.3 Mechanische Kennwerte der PVB-Folie aller Versuchsserien der Zugversuche.

## 2.7 Spannungs- und Zeit-Dehnungskurven

### 2.7.1 Spannungs-Dehnungskurven einer Versuchsserie

Exemplarisch werden hier die Ergebnisse der vier Versuche der Versuchsserie Zug\_PVB\_+15\_5.000\_26 in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm gezeigt (siehe Bild 2.9). Aus den Ergebnissen der Versuche kann bei jedem Dehnungswert ein arithmetischer

Mittelwert der Spannungen errechnet werden, um daraus eine resultierende Spannungs-Dehnungskurve der Versuchsserie zu erzeugen.

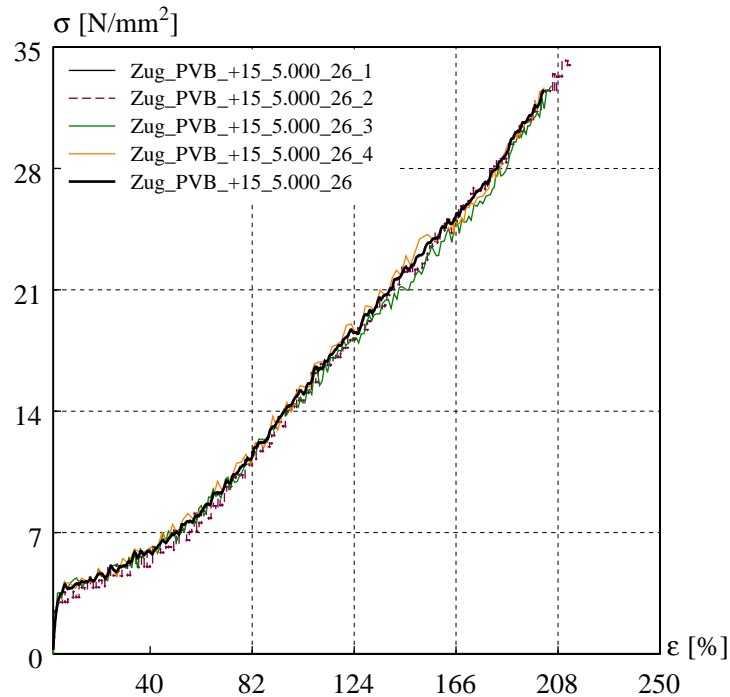


Bild 2.9 Spannungs-Dehnungsdiagramm der vier Zugversuche aus der Versuchsserie Zug\_PVB\_+15\_5.000\_26.

### 2.7.2 Spannungs-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanter Prüfgeschwindigkeit

Nachfolgend werden alle resultierenden Spannungs-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanten Prüfgeschwindigkeiten gezeigt (siehe Bild 2.10). Alle Diagramme zeigen, dass bei einer Umgebungstemperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur (14°C), ein kurzes linear elastisches Zug-Verformungsverhalten zu beobachten ist. Das Hook'sche Gesetz darf für die Berechnung der Spannungen oder Dehnungen für diesen Bereich angewendet werden. Je tiefer die Temperatur ist, desto steifer verhält sich die PVB-Folie und der Elastizitätsmodul  $E_e$  nimmt zu. Werden z.B. nur Versuchsserien mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1.66 mm/s betrachtet, so nimmt bei fallender Temperatur der Elastizitätsmodul um 28% zu (siehe Bild 2.10d und vgl. dazu Tabelle 2.3). Nach dem linear elastischen Bereich folgt der Entfestigungsbereich. Hier ist festzustellen: Je tiefer die Umgebungstemperatur ist, desto stärker fällt die Spannung nach dem Erreichen der Fließspannung ab. Die Zugfestigkeiten am Ende des Verfestigungsbereichs steigen mit tieferen Umgebungstemperatur an und die Bruchdehnungen reduzieren sich. Steigt die Umgebungstemperatur über die Glasübergangstemperatur an, ist kein linear elastischer Bereich und auch kein Entfestigungsbereich zu beobachten. Die Folie tendiert dazu sich mit grossen Verformungsänderungen bei kleinen Spannungszunahmen wie eine zähe Flüssigkeit zu verhalten. Je höher die Temperaturen desto kleiner ist die Zugfestigkeit und desto höher ist die Bruchdehnung.

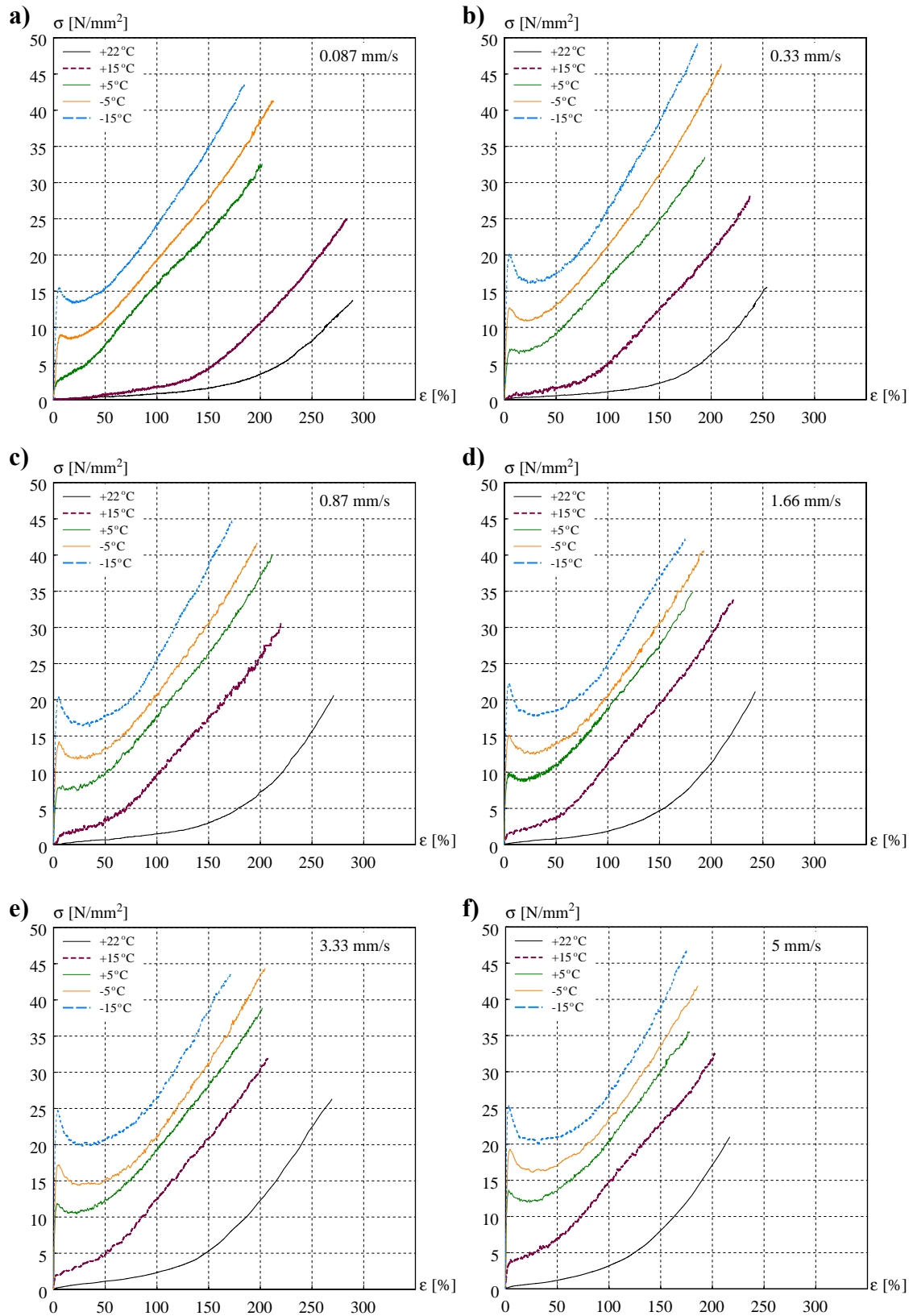


Bild 2.10 Spannungs-Dehnungsdiagramme; (a) bis (f) Versuchsserien mit gleichen Prüfgeschwindigkeiten und unterschiedlichen konstanten Umgebungstemperaturen.

### 2.7.3 Spannungs-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanter Temperatur

Alle resultierenden Spannungs-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanter Temperatur werden in Bild 2.11 jeweils in einem Diagramm zusammengefasst.

Liegt die Umgebungstemperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur werden die Versuchskörper mit steigender Verformungsgeschwindigkeit steifer. Als Beispiel werden die Versuchsserien mit konstanter Temperatur von  $-15^{\circ}\text{C}$  untersucht (siehe Bild 2.11e und vgl. dazu Tabelle 2.3). Der Elastizitätsmodul nimmt mit steigender Verformungsgeschwindigkeit bis zu 65% zu. Die Fließspannung erhöht sich dabei um 63% und die Fließdehnung reduziert sich um 57%. Der Spannungsabfall nach dem Erreichen der Fließspannung im Entfestigungsbereich ist bei höherer Geschwindigkeit stärker ausgeprägt. Eine markante Veränderung des Verfestigungsbereichs ist nicht zu erkennen. Die Zugfestigkeiten steigen mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit um 8% und die Bruchdehnungen reduzieren sich nur um 5%.

Liegt die Umgebungstemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur, ist nur noch ein Verfestigungsbereich zu erkennen. Als Beispiel werden hier die Versuchsserien mit konstanter Temperatur von  $+22^{\circ}\text{C}$  betrachtet (siehe Bild 2.11a und vgl. dazu Tabelle 2.3). Die Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind weitaus stärker beeinflussbar als bei Versuchskörpern mit der Umgebungstemperatur unterhalb der Glasübergangstemperatur. Bei sinkender Prüfgeschwindigkeit nimmt die Bruchdehnung bis zu 34% zu. Die Zugfestigkeit dagegen reduziert sich um 53%. Somit wird der Modul  $E_h$  des Verfestigungsbereichs entscheidend verändert. Er kann sich bei hohen Prüfgeschwindigkeiten mehr als verdoppeln (hier eine Zunahme von 107%).

Werden aus den gesamten Versuchsserien die Extremwerte der Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen verglichen, so können folgende abschliessende Aussagen getroffen werden:

Die höchste Zugfestigkeit von  $49.21 \text{ N/mm}^2$  wurde bei einer Umgebungstemperatur von  $-15^{\circ}\text{C}$  und einer Prüfgeschwindigkeit von  $0.330 \text{ mm/s}$  gemessen. Die niedrigste Zugfestigkeit von  $13.73 \text{ N/mm}^2$  wurde bei einer Umgebungstemperatur von  $+22^{\circ}\text{C}$  und einer Prüfgeschwindigkeit von  $0.087 \text{ mm/s}$  festgestellt. Damit kann die Zugfestigkeit bis zu 258% variieren.

Die höchste Bruchdehnung von 289.7% wurde bei einer Umgebungstemperatur von  $+22^{\circ}\text{C}$  und einer Prüfgeschwindigkeit von  $0.087 \text{ mm/s}$  gemessen. Die niedrigste Bruchdehnung von 171.69% wurde bei einer Umgebungstemperatur von  $-15^{\circ}\text{C}$  und einer Prüfgeschwindigkeit von  $3.330 \text{ mm/s}$  festgestellt. Dies zeigt, dass ein möglicher Unterschied der Dehnungswerte von 69% bestehen kann.



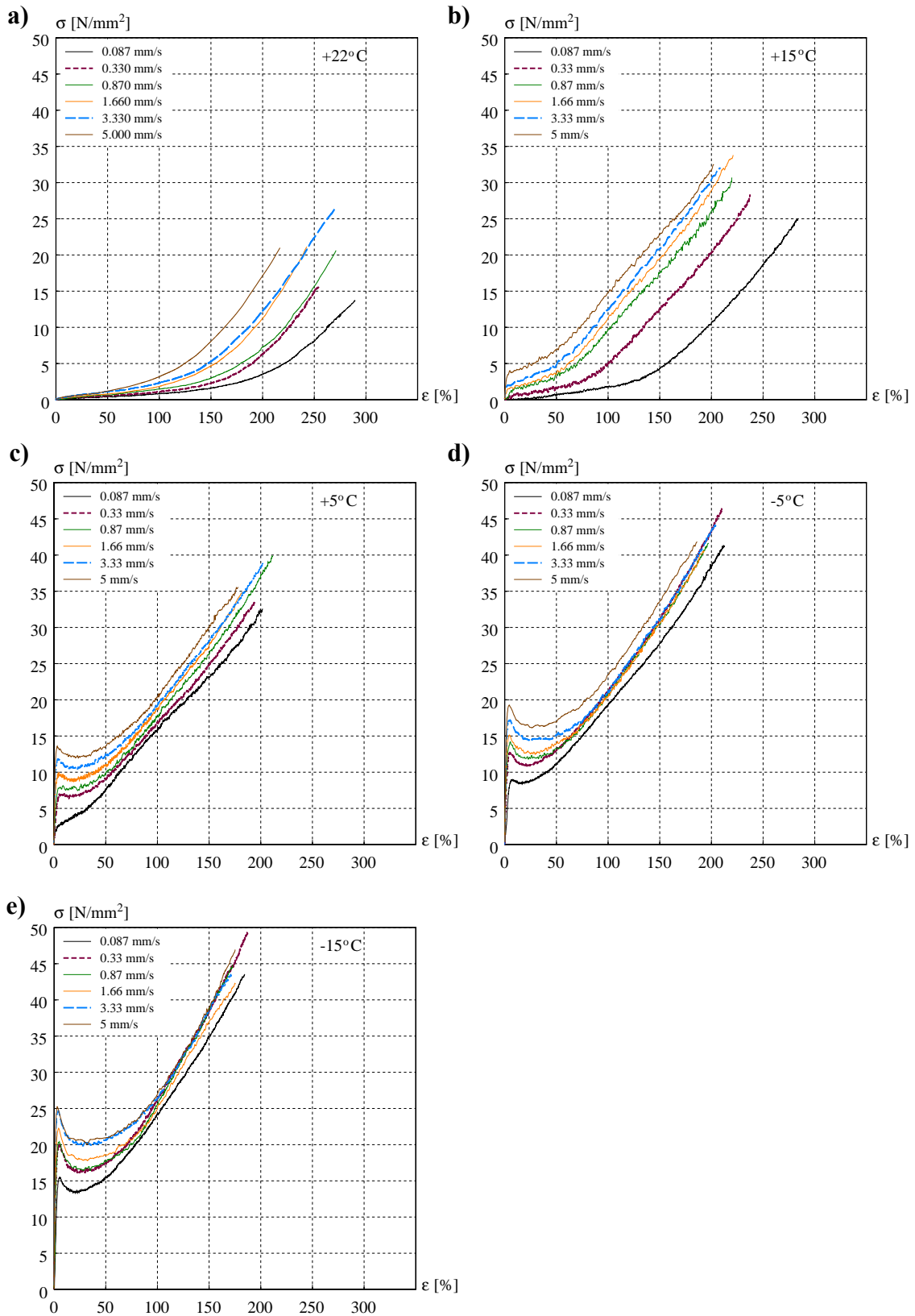


Bild 2.11 Spannungs-Dehnungsdiagramme; (a) bis (e) Versuchserien mit gleichen Temperaturen und unterschiedlichen konstanten Prüfgeschwindigkeiten.

### 2.7.4 Zeit-Dehnungskurven

Nachfolgend werden Zeit-Dehnungskurven der Versuchsserien mit konstanter Belastung aber unterschiedlichen Zeitmassstab dargestellt (siehe Bilder 2.12a-c). Versuchskörper mit hohen Belastungen versagten früher als die Versuchskörper mit niedrigen Belastungen. Die Bruchdehnungen der Versuchskörper nahmen mit zunehmender Beanspruchung ab. Die Versuche wurden mit der Umgebungstemperatur der Versuchshalle gefahren, deshalb war die Temperatur nicht in allen Versuchen konstant. Die vorhandene Versuchskammer eignete sich nicht für langfristige Kriechversuche mit konstanten Temperaturen.

Werden die drei Kurven aus Bild 2.12a gemittelt, so ergibt sich die obere Kurve im Bild 2.12d. Entsprechend können die Kurven der Bilder 2.12b und c gemittelt und in Bild 2.12d dargestellt werden. Die wichtigsten Ergebnisse können auch aus der Tabelle 2.4 entnommen werden.

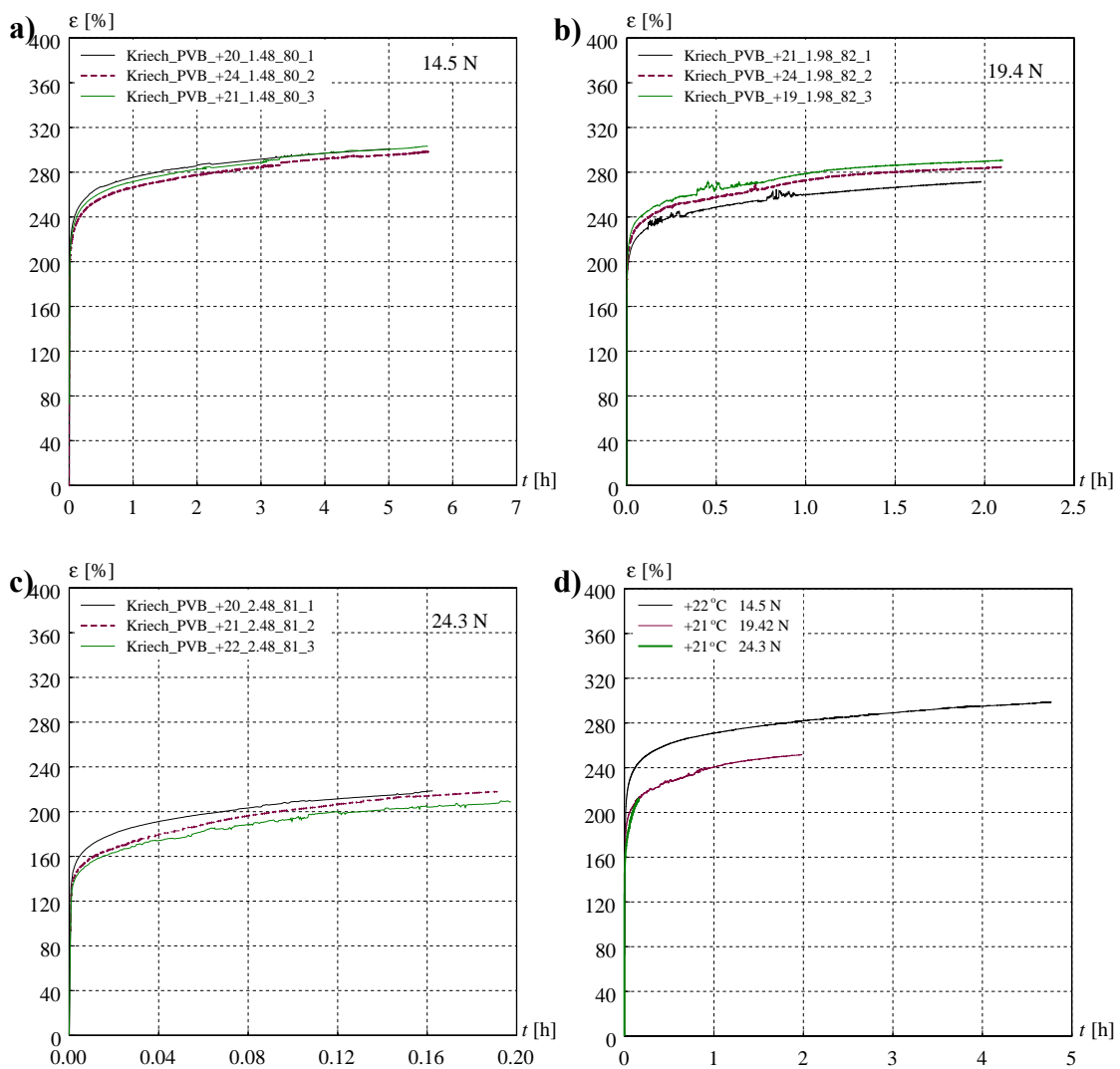


Bild 2.12 Zeit-Dehnungskurven; (a) bis (c) Versuchsserien mit drei unterschiedlichen Belastungen und (d) rechnerisch gemittelten Verläufe aus den Versuchen.

Versuchsserie	$\varepsilon_k$ [%]	$t_k$ [h]
<i>Kriech_PVB_+22_1.48_80</i>	298.55	4.78
<i>Kriech_PVB_+22_1.98_82</i>	251.61	1.98
<i>Kriech_PVB_+22_2.48_81</i>	212.42	0.16

Tabelle 2.4 Bruchdehnungen und die dazugehörigen Standzeiten aus den gemittelten Verläufen.

## 2.8 Schlussfolgerungen aus den Zugversuchen

Die Zugversuche haben gezeigt, dass die PVB-Folie unter Zugbeanspruchung ein nicht-linear visko-elastisches Polymer ist. Damit ist das Verformungsverhalten von der Beanspruchungsdauer, der Umgebungstemperatur und der Beanspruchungshöhe abhängig. Die PVB-Folie erfährt während der Nutzungsdauer häufige Temperaturschwankungen im Bereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$ . Die Glasübergangstemperatur von  $14^{\circ}\text{C}$  liegt in diesem Bereich; deshalb ist mit einem unterschiedlichen Spannungs-Dehnungsverhalten der PVB-Folie für die Bestimmung der Trag- und Resttragfähigkeit von VSG-Scheiben zu rechnen.

Unterhalb der Glasübergangstemperatur kann das Verformungsverhalten in drei Bereiche eingeteilt werden; linear elastisch, entfestigend und verfestigend.

Oberhalb der Glasübergangstemperatur entfallen die ersten zwei Bereiche. Die Folie ist nicht mehr so steif und es sind hohe Verformungen bei niedrigen Spannungen zu beobachten. Die Zugfestigkeit nimmt ab, dafür nimmt die Bruchdehnung zu.



## 3 Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

### 3.1 Prinzip

Für die Untersuchung zum Trag- und Resttragverhalten von zweiseitig frei drehbar gelagerten Bauteilen aus Verbundsicherheitsglas bei Biege- und Schlagbeanspruchung wurden Vierpunktbiege- und Stossversuche ausgeführt. Die unterschiedlichen Bruchbilder in den drei Bruchzuständen wurden aufgenommen. Ferner wurden die Verformungen sowie die Belastungen bis zum endgültigen Versagen der gesamten Versuchskörper gemessen.

### 3.2 Versuchsprogramm

In der Versuchshalle des HIF Gebäudes der ETH Zürich auf dem Hönggerberg wurden VSG-Scheiben in Vierpunktbiegeversuchen geprüft. Wegen der in den VSG-Scheiben eingebauten thermoplastischen PVB-Folie sollten während der Versuchsdurchführung möglichst gleiche Klimabedingungen herrschen. Da zudem mit vermehrtem Splitterabfall zu rechnen war, wurde die Versuchsanlage im separaten Klimaraum aufgestellt. Die äusseren Abmessungen aller Versuchskörper waren gleich. Die Schichtdicken  $a_o$ ,  $a_z$  und  $a_u$  der Versuchskörper wurden so variiert, dass die Gesamtschichtdicke  $a$  der VSG-Scheibe nahezu konstant blieb. Daraus ergaben sich für die Versuche drei verschiedene Querschnittstypen (genauere Angaben siehe Kapitel Bild 3.3.2). Drei unterschiedliche Glastypen wurden eingesetzt; das herkömmliche Floatglas FLG, das teilvorgespannte Glas TVG und das Einscheibensicherheitsglas ESG. Die VSG-Scheiben wurden direkt in der Versuchsanlage belastet oder zunächst mit einer Stahlkugel gebrochen und dann in die Versuchsanlage eingebaut. Dadurch konnte der Einfluss verschiedener Bruchbilder auf das Resttragverhalten untersucht werden. Falls Zustand III erreicht werden konnte, wurden die Versuchskörper bis zum endgültigen Versagen verformungsgesteuert weiter belastet. Bei bestimmten Versuchskörpern mit einer konstanten Belastung wurden die Reststandzeit und das dabei auftretende Kriechen beobachtet.

Folgendes Bezeichnungsschema wurde für die jeweiligen Versuchskörper gewählt:

**4S\_FLG\_20\_2**

Der Ausdruck “4S\_FLG“ bezeichnet die Art des Versuchs (hier: Vierpunktbiegeversuch) sowie den eingesetzten Glastype (hier: Floatglas FLG). Die folgende Nummer bezeichnet die Seriennummer (hier: 20) und die letzte Ziffer gibt die Nummer des Versuchs an. Die jeweilige Belastungsart abhängig vom herrschenden Bruchzustand (entweder Stoss oder verformungsgesteuerte Belastung aus Vierpunktbiegeversuch) und die verwendeten Glas- und Querschnittstypen der einzelnen Versuchen (siehe Bild 3.4) können aus der Tabelle 3.1 entnommen werden.

<i>Versuchskörper</i>	<i>Querschnittstyp</i>	<i>Glastype</i>	<i>Belastung im Zustand I</i>	<i>Belastung im Zustand II</i>	<i>Belastung im Zustand III</i>
4S_ESG_10_1	Typ I	ESG	Verformungsgesteuert	-	-
4S_ESG_10_2 - 6	Typ I	ESG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	-
4S_ESG_10_7 - 8	Typ I mit GFK-Einlage	ESG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	-
4S_FLG_11_1 - 8	Typ I	FLG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	-
4S_FLG_20_1 - 3	Typ III	FLG	Stoss	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_FLG_20_4 - 5	Typ III	FLG	Eingeritzte Kerbe	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_FLG_20_6 - 8	Typ III	FLG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_FLG_21_1 - 2	Typ I	FLG	Stoss	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_FLG_21_3 - 4	Typ I	FLG	Stoss	Verformungsgesteuert	Kriechen
4S_FLG_21_5 - 6	Typ I	FLG	Eingeritzte Kerbe	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_FLG_21_7 - 8	Typ I	FLG	Eingeritzte Kerbe	Verformungsgesteuert	Kriechen
4S_FLG_22_1 - 4	Typ II	FLG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	-
4S_FLG_22_5 - 8	Typ II	FLG	Stoss	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_TVG_23_1 - 4	Typ I	TVG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	-
4S_TVG_23_5 - 8	Typ I	TVG	Stoss	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert
4S_TVG_24_1 - 4	Typ III	TVG	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert	-
4S_TVG_24_5 - 8	Typ III	TVG	Stoss	Verformungsgesteuert	Verformungsgesteuert

Tabelle 3.1 Versuchsprogramm.

### 3.3 Versuchskörper

Die Norm DIN 1288 schlägt zur Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas zwei Prüfverfahren vor: den Doppelring- und den Vierpunktbiegeversuch [N 9]. Die Grundlagen des zuletzt genannten Prüfverfahrens wurden teilweise für die Versuchsabmessungen und für die Versuchsausführung der Vierpunktbiegeversuche übernommen.

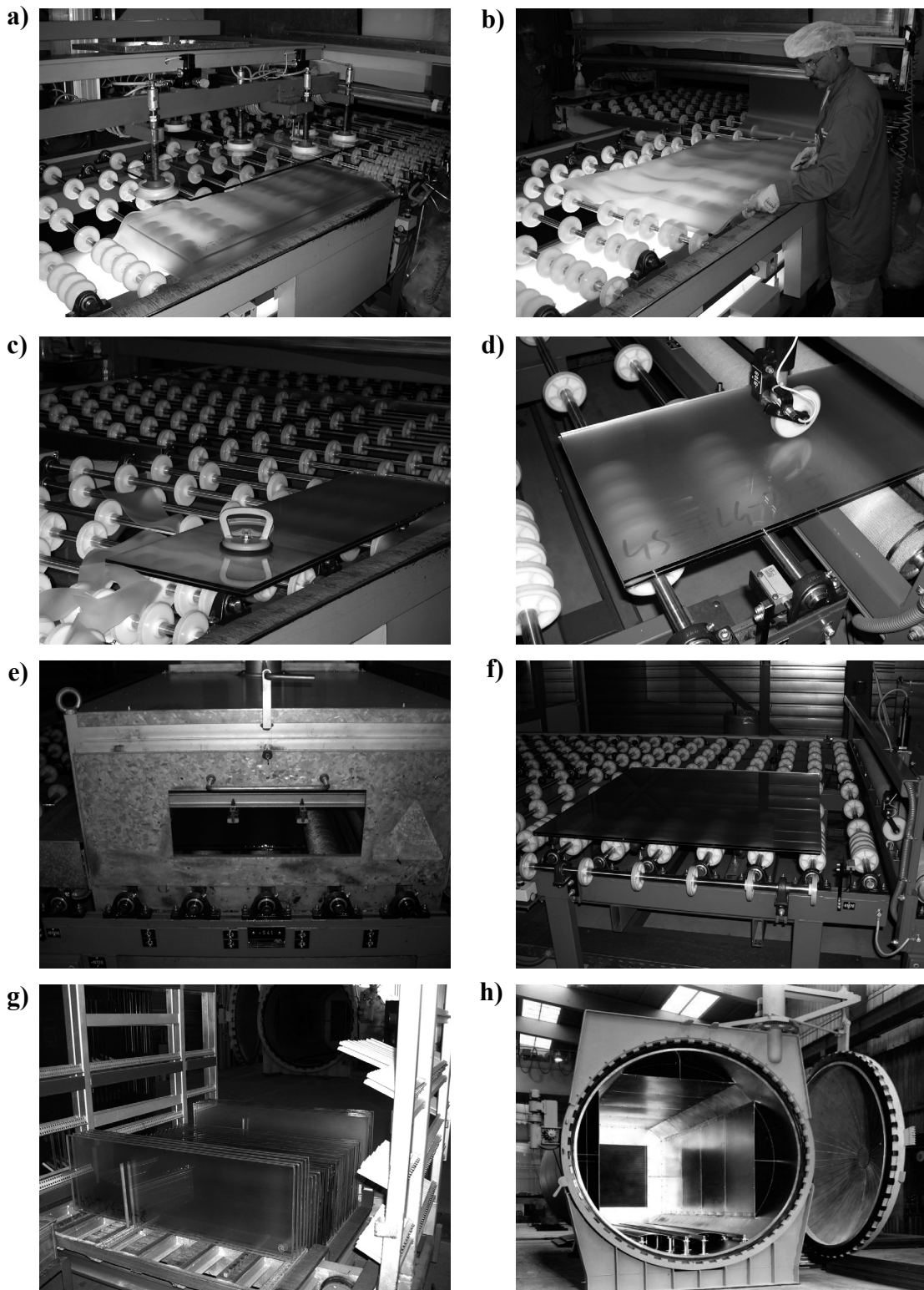
#### 3.3.1 Herstellung und Verarbeitung der Verbundsicherheitsglasscheiben

Alle Versuchskörper wurden in der Produktionsanlage der Firma Pilkington produziert. Die einzelnen Gläser wurden im herkömmlichen Floatglasverfahren hergestellt. Anschliessend wurden die Gläser auf die gewünschten Abmessungen geschnitten, die Kanten abgeschliffen und poliert. Um den gewünschten Eigenspannungszustand zu erzeugen, wurde der Teil der Gläser, welcher vorgespannt werden sollte, getrennt und den notwendigen Temperaturveränderungen ausgesetzt.

Nachdem die Gläser frei von Schmutz und Fettstellen waren, folgte die eigentliche VSG-Herstellung. Zunächst wurden in den sogenannten Vorverbundverfahren (Walzverfahren) die einzelnen Glasscheiben und die PVB-Folie lose zu einer *Sandwichplatte* aufgeschichtet (siehe Bild 3.1a). Dabei wurden die Folienlagen an den Rändern der Glasscheiben abgeschnitten, ohne die Glaskanten zu verletzen (siehe Bilder 3.1b und c). Je nach gewünschter Dicke der Zwischenschicht wurden mehrere Folienlagen eingelegt. Danach wurden die zusammengelegten Schichten in einem Heizzunnel mit mittelwelligen Infrarot-Strahlern auf 35°C erwärmt (siehe Bilder 3.1d und e). Anschliessend durchlief die erwärmte *Sandwichplatte* ein Gummiwalzenpaar, in dem die eingeschlossene Luft zu einem grossen Teil herausgedrückt wurde. In einem zweiten längeren Infrarottunnel wurde diese Prozedur wiederholt und die Versuchskörper wurden auf 60°C bis 70°C erwärmt, wodurch die verbleibende Luft weitestgehend herausgepresst wurde. Damit wurde ein erstes flächiges Verbinden und Verkleben der PVB-Folie mit der Glasoberfläche zur Vermeidung einer vorzeitigen Trennung der Schichten im Autoklavenprozess erreicht. Nachdem die VSG-Scheiben den Wärmetunnel verlassen hatten, wiesen sie eine leicht streifige graue Struktur auf (siehe Bild 3.1f). Schliesslich wurden die VSG-Scheiben gestapelt, um den letzten Schritt des Laminierungsprozesses, den Autoklavprozess, durchlaufen zu können (siehe Bild 3.1g). In der Autoklavkammer (siehe Bild 3.1h) waren die Glasscheiben so eingebaut, dass nirgends ein Kontakt zwischen Glas und Metall bestand. Anschliessend wurden in der Autoklavkammer abhängig von Glasmenge, Glastyp und Grösse ein bestimmter Druck und eine bestimmte Temperatur eingestellt. Um spannungsfreie VSG-Scheiben zu erzeugen, verlief das Aufheizen und Abkühlen der Scheiben langsam bei einem Druck von 12 bar.

In zwei VSG-Scheiben 4S\_ESG\_10\_7 und 4S\_ESG\_10\_8 wurden in Längsrichtung zwischen die PVB-Folie drei Glasfaserstreifen der Breite 25 mm und der Dicke 0.1 mm eingelegt (siehe Bild 3.2). Diese konstruktive Massnahme sollte eine Ausnahme blei-

ben. Es sollte untersucht werden, inwieweit die Biegesteifigkeit einer gebrochenen VSG-Scheibe aus ESG beeinflusst werden kann.



*Bild 3.1 VSG-Herstellung im Vorverbund; (a) Zusammenstellung der Gläser und der PVB-Folie, (b) und (c) Zuschneiden der PVB Folie an den Rändern, (d) Eintreten der Sandwichplatte in den Wärmetunnel, (e) Walzvorgang im Wärmetunnel, (f) Austreten der Sandwichplatte aus dem Wärmetunnel, (g) Stapelung der Sandwichgläser auf das fahrbare Gestell, (h) Autoklavkammer für den letzten Schritt des Laminierungsprozesses.*



Es zeigte sich, dass die Streifen nach dem Laminierungsprozess mit Entweichen der eingeschlossenen Luft eine leichte Transparenz erhielten. Zwar waren die GFK-Einlagen eindeutig sichtbar, aber sie erschienen lediglich milchig, so dass Schattierungen und Bewegungen dahinter gut erkennbar waren.



Bild 3.2 Herstellung der VSG-Scheibe mit GFK-Einlagen (Glas-Faser-Kunststoff).

### 3.3.2 Abmessungen der Versuchskörper

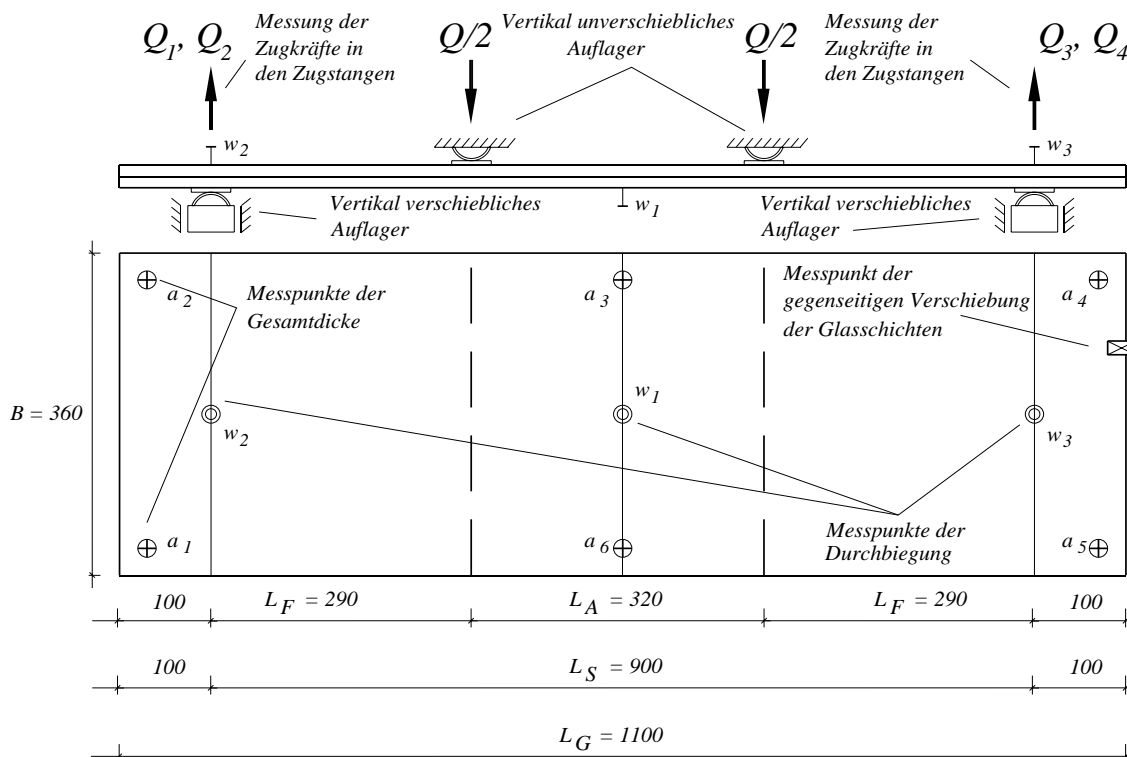


Bild 3.3 Wichtigsten Längen- und Breitenabmessungen des Versuchskörpers [mm], sowie eingezeichnete Markierungen und Messstellen.

Die Versuchskörper hatten eine Nennlänge  $L_G$  von 1100 mm und eine Nennbreite  $B$  von 360 mm (siehe Bild 3.3). Die tatsächlichen Längen und Breiten der VSG-Scheiben wurden vor dem Versuch im Zustand I und nach dem Versuch gemessen. In den Tabellen 3.14 bis 3.20 werden die Abmessungen der unbelasteten VSG-Scheiben (gemessen im

Zustand I) und die Abmessungen nach dem völligen Versagen in der Versuchsanlage dargestellt.

Die Abweichung der gemessenen Längen und Breiten im Zustand I von den Nennlängen und -breiten sind bei allen Versuchskörpern sehr gering.

Die Abweichungen der gemessenen Abmessungen im Zustand I zu denen, welche nach dem Versuch gemessen wurden, sind vorwiegend vom verwendeten Glastype abhängig. Die grössten Abweichungen wurden bei VSG-Scheiben aus ESG festgestellt. Diese verlängern sich auf Grund der quadratischen Bruchstücke in beide Richtungen gleich. VSG-Scheiben aus TVG weisen geringere Abweichungen auf. Die prozentualen Abweichungen der Längsseite sind grösser als bei der kürzeren Seiten. Diese Beobachtung ist noch stärker ausgeprägt bei VSG-Scheiben aus TVG, welche zuerst durch die Stahlkugel beschädigt wurden. Bei VSG-Scheiben aus FLG, welche nur in der Versuchsanlage belastet wurden, sind die Abweichungen gering und nur in Längsrichtung festzustellen. Bei VSG-Scheiben, welche durch die Kugel beschädigt wurden, zeigt sich auch in der Längsrichtung so gut wie keine Verlängerung.

Die Gesamtdicke  $a$  sollte möglichst konstant gehalten werden, die verschiedenen Dicken der einzelnen Schichten  $a_o$ ,  $a_u$  und  $a_z$  konnten jedoch variieren. Aus diesem Grund wurden drei unterschiedliche Querschnittstypen festgelegt (siehe Bild 3.4).

Im Querschnittstyp I wurde ein symmetrischer Aufbau der Glasschichten mit zwei 8 mm dicken Glasschichten und einer 1.52 mm dicken PVB-Folie gewählt.

Im Querschnittstyp II wurde die Zwischenschichtdicke  $a_z$  auf 3.04 mm verdoppelt, so dass sich die Gesamtdicke  $a$  des Versuchskörpers leicht um 1.52 mm erhöhte.

Im Querschnittstyp III wurde für die obere Glasschicht eine Dicke  $a_o$  von 12 mm gewählt. Um die Gesamtdicke  $a$  nicht zu verändern, ergab sich für die untere Glasschicht eine Dicke  $a_u$  von 4 mm. Die Zwischenschicht wurde mit einer Dicke  $a_z$  von 1.52 mm beibehalten.

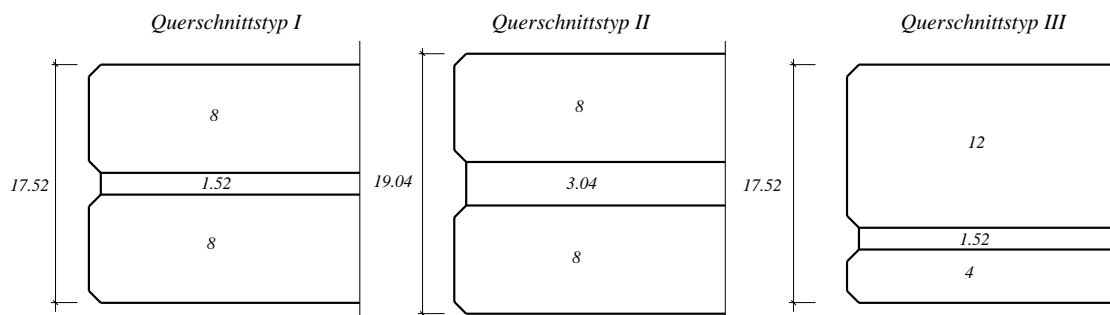


Bild 3.4 Drei verwendete Querschnittstypen; Typ I und II: symmetrisch, die Zwischenschichtdicken sind unterschiedlich, Typ III: asymmetrisch, Glasschichten haben unterschiedliche Dicken.

Die Querschnittsdicken  $a_o$  und  $a_u$  der einzelnen Glasschichten sind Nennwerte und können unterschiedliche Toleranzen aufweisen [N 10]. Die Hersteller sind jedoch in der Lage weitaus geringere Toleranzen einzuhalten, so dass die einzelnen Glasscheiben, durchaus um Material zu sparen, die unteren Grenzwerte der Nenndicken besitzen. Aus diesem Grund wurden am Versuchskörper an den gekennzeichneten Stellen die Gesamtdicken  $a_i$  gemessen (siehe auch Bild 3.3). Aus allen Messungen wurden der Mittelwert der Gesamtdicke  $a_M$  und die Standardabweichung bestimmt. Aus dem Vergleich der Toleranzwerte mit den gemessenen Werten lässt sich erkennen, dass die tatsächliche Gesamtdicke kleiner als die Nenndicke ist (vgl. Tabelle 3.2). Dies stimmt gut mit den in [F 5] bereits publizierten Ergebnissen überein. Die maximale Schwankung der Gesamtquerschnittsdicke innerhalb einer Probe betrug bis zu 0.18 mm (Querschnittstyp II). Alle gemessenen Werte befanden sich in der unteren Hälfte des vorgeschriebenen Toleranzbereichs. Da die Toleranzwerte für Glasnenndicken in absoluten Zahlen vorgegeben werden, können die Abweichungen bei Verwendung unterschiedlicher Nenndicken reduziert werden (vgl. Querschnittstyp I und III). Bei Verwendung unterschiedlicher Foliendicken ist mit einer grösseren Streuung der Werte zu rechnen. Dies ist auf das Herstellungsverfahren zurückzuführen, da zunächst mehrere Folienlagen lose übereinander gelegt werden müssen und diese im Vorverbund nicht überall dem gleichen Anpressdruck ausgesetzt sind.

Querschnittstyp	Anzahl	Nennwert $a_N$ [mm]	Zulässiger Toleranzbereich [mm]	Gemittelte Gesamtdicke $a_M$ [mm]	Maximale und minimale Gesamtdicke [mm]	Abweichung vom Nennwert [%]
I	40	17.52	$8\pm 0.3+1.52+8\pm 0.3$ =16.92 bis 18.12	17.23 (0.043)	17.40 17.12	1.66
II	16	19.04	$8\pm 0.3+3.04+8\pm 0.3$ =18.44 bis 19.64	18.71 (0.111)	18.96 18.47	1.73
III	16	17.52	$12\pm 0.3+1.52+4\pm 0.2$ =17.02 bis 18.02	17.33 (0.044)	17.41 17.21	1.08

Tabelle 3.2 Erwartete Dicken und Toleranzbereiche der Querschnittstypen I bis III sowie Mittelwerte (Standardabweichung) der tatsächlich gemessenen Gesamtdicken.

### 3.3.3 Markierung der Versuchskörper

Alle Versuchskörper wurden bei der Herstellung mit der jeweiligen Bezeichnung auf der Innenseite einer Glasschicht beschriftet (siehe Bild 3.1d). In der Versuchshalle wurden weitere Linienmarkierungen an der unteren Glasscheibe in schwarz und an der oberen Glasscheibe in rot vorgenommen. Für die exakte Positionierung des Versuchskörpers in der Versuchsanlage wurden senkrecht zu der Längsseite des Versuchskörpers vier Auflagerlinien und eine Mittellinie eingezeichnet (siehe Bild 3.3).

### 3.3.4 Versuchsanordnung

Die Anordnung der Versuchsanlage der Vierpunktbiegeversuche kann aus Bild 3.5 und Bild 3.6 entnommen werden. Die Hauptkonstruktion bestand aus drei Stahlträgern. Jeder Stahlträger bestand aus einem Profil HEB 300 mit Kopfplatten.

Zunächst wurde ein vertikaler Stahlträger der Länge 200 mm auf einer Bodenplatte montiert. Diese wurde über einen zentrisch angeordneten Vorspanngewindestahl mit einem Anker befestigt. Zur Befestigung des hydraulischen Zylinders mit einer Maximalkraft von 150 kN wurde auf der oberen Kopfplatte des vertikalen Stahlträgers ein horizontal auskragender Stahlträger der Länge 900 mm angeordnet. Der Versuchskörper lag auf zwei äusseren vertikal beweglichen Auflagern. Die Stützweite  $L_S$  zwischen diesen Auflagern betrug 900 mm (siehe Bild 3.3). Dabei war darauf zu achten, dass sich zwischen den Auflagern und dem Glas Hartgummizwischenlagen von 3 mm Dicke (Shore-Härte A 40±5) befanden [N 9]. Die Zugkräfte beider Auflagern wurden über zwei Joche weiter auf vier vertikale Zugstangen übertragen. Diese Zugstangen ( $\varnothing$  6 mm) waren oben über zwei Joche an einen biegesteifen Stahlträger HEA 200, der gelenkig an den hydraulischen Zylinder montiert war, angeschlossen. Der Kolben des Zylinders wurde zunächst ausgefahren. Zum Aufbringen der Belastung wurde er wieder eingefahren, so dass die vertikalen Stangen unter Zug gerieten. Die Zugkraft im hydraulischen Zylinder und damit die Belastung des Trägers konnte über den Öldruck handgesteuert geregelt werden. Zwei feste Auflagern, welche in einem Abstand  $L_A$  von 320 mm voneinander entfernt waren (siehe Bild 3.3), verhinderten, dass der Versuchskörper frei nach oben gezogen wurde. Die festen Auflagern bestanden aus einem in Längsrichtung halbierten Stahlrohr ( $\varnothing$  50 mm), welches an den Kanten zweier vertikaler Stahlplatten angeordnet war. Ein kurzer auskragender Stahlträger, welcher am vertikalen Stahlträger angeschraubt war, bildete die Halterung für die seitlich angebrachten Platten. Mit diesem Verfahren konnte aus den einzelnen Durchbiegungen  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  eine Gesamtdurchbiegung  $w_G$  berechnet werden (vgl. Formel (3.3)). Die Gesamtdurchbiegung entsprach einer Mittendurchbiegung des Versuchskörpers bei einem herkömmlichen Vierpunktbiegeversuch. Im Zustand III waren grosse Durchbiegungen zu erwarten. Mit der geschilderten Versuchsanordnung wurde ein Weg gefunden mehrere kleine Durchbiegungen anstatt eine grosse Gesamtdurchbiegung zu messen. Die gewählte Versuchsanordnung hatte einen weiteren Vorteil: Es war erwünscht nach dem Zustand I das Lastverformungsverhalten im Zustand II zu beobachten ohne sofort den Zustand III zu erzwingen, bzw. einen Kollaps zu verursachen. Die so aufgestellte Versuchsanordnung erlaubte, alleine durch das Eigengewicht der Versuchskörper, eine sofortige Entlastung einzuleiten.

### 3.3.5 Kontinuierliche Messwerterfassung

Die vertikalen Verformungen  $w_2$  und  $w_3$  des Versuchskörpers wurden an den seitlichen, vertikal beweglichen Auflagern mithilfe induktiver Wegaufnehmer bestimmt. Auf gleiche Weise wurde die mittlere Durchbiegung  $w_1$  des Versuchskörpers aufgenommen.

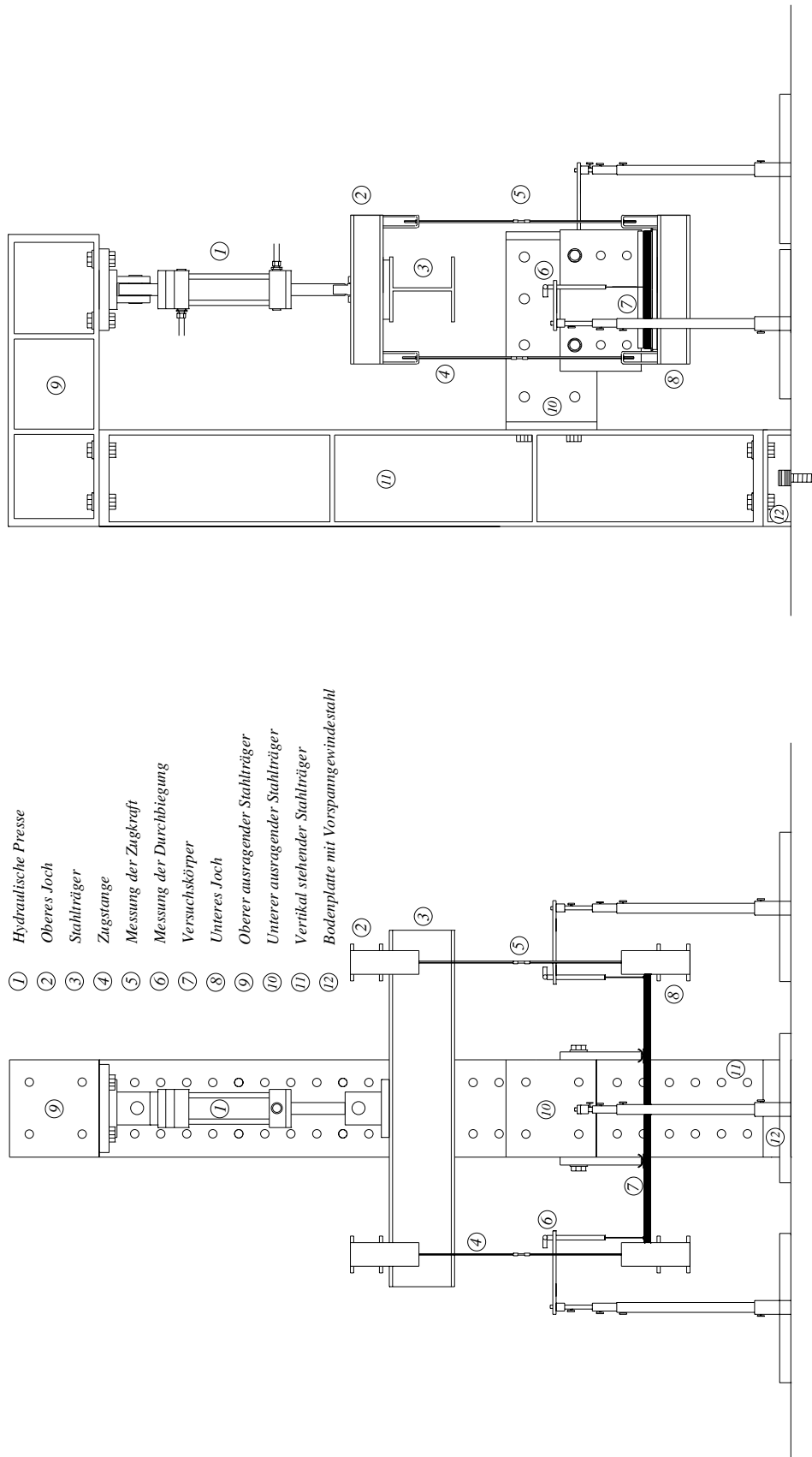


Bild 3.5 Versuchsaufbau für die Vierpunktversuche; Vorder- und Seitenansicht.

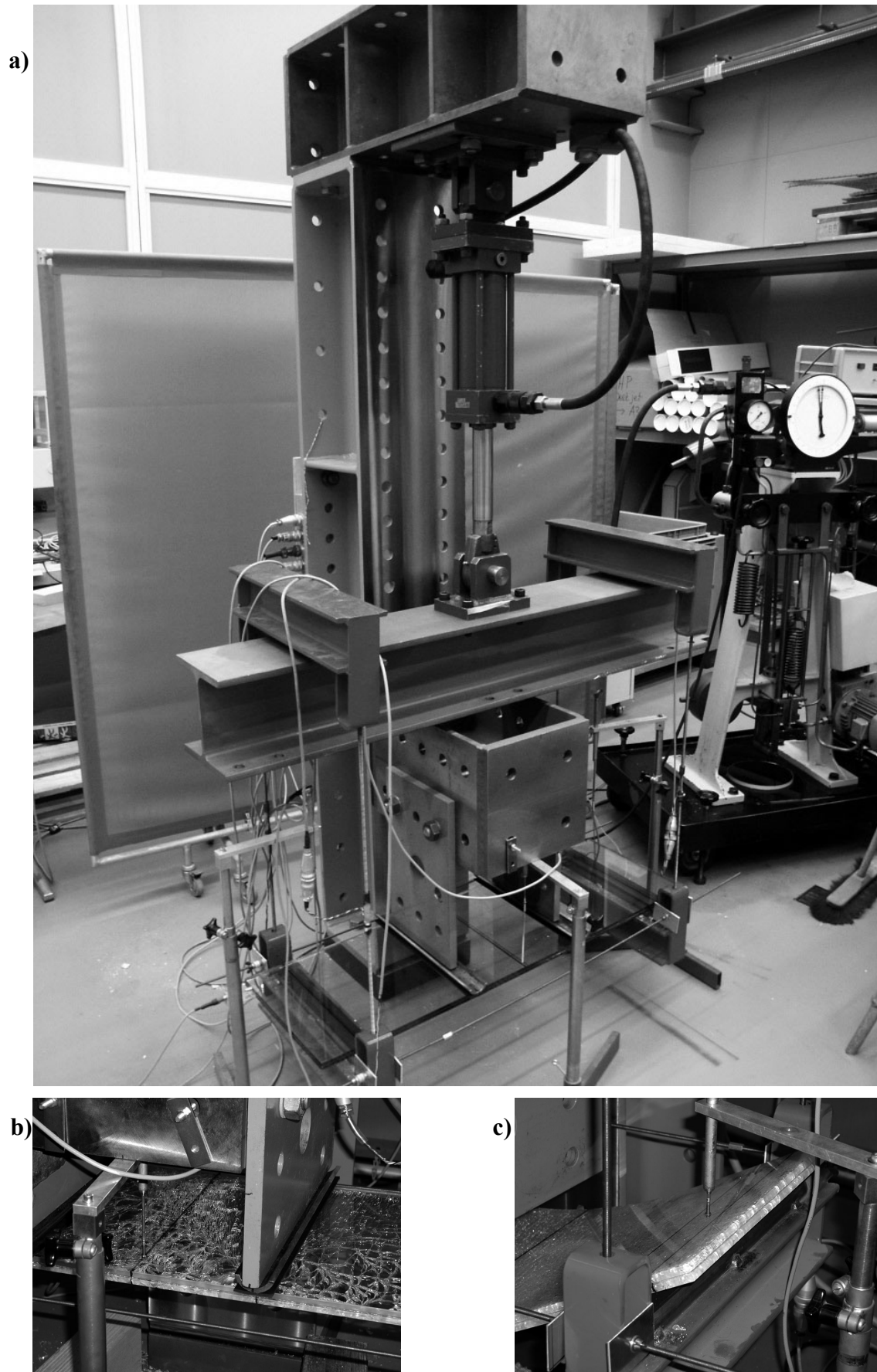


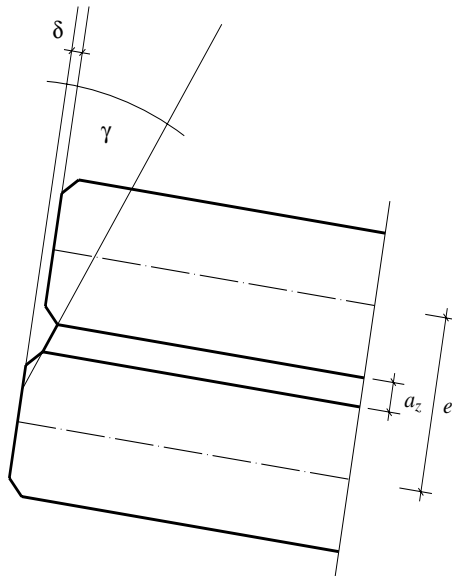
Bild 3.6 (a) Ansicht der Versuchseinrichtung für die Vierpunktbiegeversuche, (b) Detail festes Auflager, (c) Detail vertikal verschiebliches Auflager.

Ferner wurde bei bestimmten Versuchskörpern im Zustand I mit einem weiteren induktiven Wegaufnehmer der Versatz  $\delta$  der Glasschichten (gegenseitige horizontale Verschiebung der Glasschichten) bis zum Bruch einer Glasschicht bestimmt (siehe Bild 3.7).

In jeder Zugstange wurde mittels einer Kraftmessdose die Zugkraft bestimmt. Ebenfalls konnte mit einer Kraftmessdose die Kraft im hydraulischen Kolben aufgezeichnet werden. Die vier Zugkräfte aus den Zugstangen konnten so mit der Kraft im hydraulischen Kolben verglichen werden.

Mithilfe eines Bimetall-Temperaturfühlers wurde die Umgebungstemperatur bestimmt.

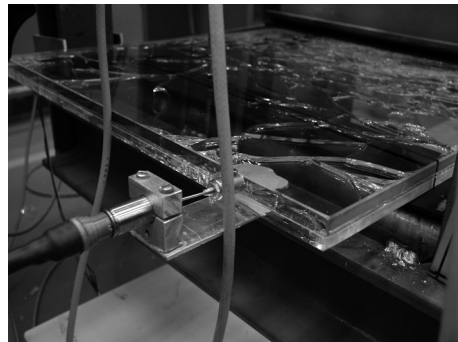
a)



b)



c)



*Bild 3.7 Messung des Versatzes  $\delta$  der beiden Glasschichten zur Bestimmung des Schubmoduls; (a) Scherwinkel  $\gamma$  am kurzen Rand der VSG-Scheibe und der dazugehörige Versatz  $\delta$ , (b) Positionierung des induktiven Wegaufnehmers, (c) Messapparatur nach dem erfolgten Bruch der unteren Glasscheibe.*

## 3.4 Versuchsdurchführung

### 3.4.1 Versuchsvorbereitung

Versuchskörper, die im Zustand I getestet werden sollten, wurden in die Versuchsanlage eingebaut. VSG-Scheiben des Querschnittstyps III wurden mit der dünneren Glasschicht nach unten positioniert. Alle Kraftmessdosen wurden auf den Anfangswert Null gesetzt. Anschliessend wurde der Versuchskörper über die äusseren Lager soweit hochgefahren, dass die inneren festen Lager schlüssig die obere Glasscheibe berührten. Erst danach wurden die induktiven Wegaufnehmer auf Null gesetzt. Damit waren alle Messinstrumente für eine kontinuierliche Messung vorbereitet.

Nicht alle Versuchskörper wurden direkt in die Versuchsanordnung eingebaut. Unterschiedliche Bruchbilder und ihre Auswirkung auf das Nachbruchverhalten wurden untersucht, indem bestimmte Versuchskörper mit einer Stahlkugel beschädigt wurden. Die Lagerung der VSG-Scheibe wurde entsprechend des Vierpunktbiegeversuchs angeordnet. Der Bruch erfolgte so, dass nur eine Glasschicht versagt. Daher wurde die Fallhöhe beginnend mit einer Höhe  $h$  von 1.20 m schrittweise um 5 cm erhöht, bis ein erster Bruch zu erkennen war. Es wurde eine Stahlkugel mit einer Masse  $m$  von 5.116 kg und einem Durchmesser  $\varnothing$  von 110 mm gewählt. In der Tabelle 3.3 sind die Fallhöhen, welche zum Bruch einer Glasschicht geführt haben, aufgelistet. Nach dem erfolgten Bruch wurde der Versuchskörper mit dem Bruchbild aufgenommen. Schliesslich wurde der Versuchskörper in die Versuchsanlage eingebaut, um im Zustand II und Zustand III getestet zu werden.

<i>Versuchskörper</i>	<i>Fallhöhe [cm]</i>
<i>4S_FLG_20_1 - 3</i>	130
<i>4S_FLG_21_1 - 4</i>	135
<i>4S_FLG_22_5 - 8</i>	130
<i>4S_FLG_23_5 - 8</i>	145
<i>4S_FLG_24_5 - 8</i>	150

Tabelle 3.3 Stossversuche mit Fallhöhen, welche zum Bruch einer Glasschicht führten.

An Versuchskörpern 4S\_FLG\_20\_4 bis 5 und 4S\_GLG\_21\_5 bis 8 wurde mit einem Glasschneider ein vertikaler Riss induziert. Durch ein leichtes Hin- und Herbiegen des Versuchskörpers erfolgte der anschliessende Bruch der vorgeschädigten Schicht. Der Bruch trat genau über dem Riss auf, welcher senkrecht zur Längsseite initiiert worden war. Auch hierbei wurde der beschädigte Versuchskörper in die Versuchsanlage eingebaut und im Zustand II und III getestet.



### **3.4.2 Versuchsaufbau**

Alle Belastungen wurden verformungsgesteuert mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0.02 mm/s gefahren.

#### **Phase 1:**

Zunächst wurde der Versuchskörper belastet. Sobald sich der erste Bruch mit einem lauten Geräusch angekündigt hatte, wurde sofort entlastet. Durch das Eigengewicht des Versuchskörpers senkten sich die äusseren Auflager und die verbleibende intakte Glasschicht verblieb spannungsfrei (bis auf die Beanspruchung aus Eigengewicht).

#### **Phase 2:**

Die beschädigten Versuchskörper (entweder durch Stossbeanspruchung oder Bruch aus Phase 1) wurden ein weiteres Mal belastet bis die letzte intakte Glasschicht versagte. Anschliessend wurde sofort der Öldruck in der hydraulischen Presse abgestellt. Eine Entlastung war nicht nötig. Entweder konnte ein Kollaps der Probe festgestellt werden oder kurz nach dem Bruch wurden relativ grosse Verformungen sichtbar, so dass der beschädigte Versuchskörper belastungsfrei (abgesehen von Eigengewicht) auf den äusseren Lagern auflag.

#### **Phase 3:**

Hatte der Versuchskörper nach dem Bruch der letzten intakten Schicht noch eine Restbiegesteifigkeit, wurde wie folgt fortgefahren:

a) Ein letztes Mal wurde die VSG-Scheibe mit derselben Verformungsgeschwindigkeit bis zum Kollaps belastet. Die maximal mögliche Last wurde aufgenommen und die Durchbiegungen wurden gemessen.

b) Um die Durchbiegungen während der Reststandzeit im Zustand III zu bestimmen, erfuhr der Versuchskörper keine weitere Beanspruchung neben seinem Eigengewicht.

Alle Versuchskörper wurden nach dem Kollaps auf das darunter liegende Brett gelegt und ausgebaut. Anschliessend konnte mit Auftragen einer weissen Farbe das Bruchbild auf der oberen und unteren Seite festgehalten und der Initialriss festgestellt werden.

## **3.5 Versuchsbeobachtung und Folgerungen**

### **3.5.1 Phase 1**

Während der ersten Belastung in der Versuchsanlage konnte ein fast linear elastisches Verformungsverhalten beobachtet werden (siehe Bild 3.10). So lange noch vor dem

Bruch entlastet wurde, konnten sich die Versuchskörper in ihre ursprüngliche Ausgangslage verformen. Da der Schubmodul über die Dauer der Belastung abnimmt, ist die Last-Verformungskurve nicht exakt linear (siehe Kapitel 3.6.3 und Bild 3.9). Trotzdem ist die Auswirkung so klein, dass man von einem annähernd linear elastischen Verhalten sprechen kann. Der Sprödbbruch erfolgte ohne Vorankündigung mit einem lauten Knall.

Bei allen Versuchskörpern mit gleichen Glasschichtdicken (Querschnittstypen I und II) versagte zuerst die untere Glasscheibe (siehe Bilder 3.19a und b). Bei Versuchskörpern vom Querschnittstyp III versagte zuerst die dickere, obere Glasschicht (siehe Bilder 3.19c und d).

Versuchskörper des Querschnittstyps III wiesen eine höhere Tragfähigkeit auf als Versuchskörper des Querschnittstyps I gleichen Glastyps. Ein Vergleich der Mittelwerte der Traglasten zeigt, dass die Tragfähigkeit um 29% erhöht werden konnte (siehe Bilder 3.10b und c, vgl. Tabellen 3.8 und 3.9).

Die Initialbruchstelle befand sich stets zwischen den beiden festen inneren Auflagern (siehe Bilder 3.15 bis 3.17). In den geprüften VSG-Scheiben aus FLG ging der Initialbruch häufig von den Seitenrändern der Probe aus. Bei gebrochenen VSG-Scheiben aus ESG und TVG konnten aber auch Initialbrüche ausserhalb des Randbereichs festgestellt werden.

Die höchste gemittelte Traglast von 12.44 kN im Zustand I für Versuchskörper des Querschnittstyps I konnte, wie erwartet, bei Versuchskörpern aus ESG gemessen werden (vgl. Tabelle 3.4 und siehe Bild 3.10a). Etwas kleiner war die Traglast von 9.40 kN in Versuchen von Versuchskörpern aus TVG (vgl. Tabelle 3.9 siehe Bild 3.10b). Die kleinste gemittelte Traglast von 3.09 kN im Zustand I wurde bei Versuchskörpern des Querschnittstyps I aus FLG gemessen (vgl. Tabelle 3.5 und siehe Bild 3.10). Die Traglasten aus den Versuchen mit Versuchskörpern des Querschnittstyps II aus FLG waren etwas kleiner als die entsprechenden Versuchsergebnisse mit Versuchskörpern des Querschnittstyps I. Mit dem Einsatz des Querschnittstyps III konnten sowohl bei Versuchskörpern aus FLG als auch aus TVG die Traglasten gesteigert werden (siehe Bilder 3.10c und f). So ist die höchste Traglast aller Versuche beim Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_3 (Querschnittstyp III, TVG) mit 16.27 kN gemessen worden (vgl. Tabelle 3.10).

### **3.5.2 Phase 2**

Nach der Entlastung konnte eine bleibende Verformung der beschädigten Versuchskörper beobachtet werden. Durch den Bruch einer Glasschicht und das anschliessende Verkeilen der Bruchstücke, welche an der Folie kleben blieben, dehnte sich die gebrochene Glasschicht aus. Die intakte Glasschicht blieb jedoch in ihrer Ursprungslänge erhalten, so dass die VSG-Scheibe eine bleibende Krümmung aufwies. Auch Versuchskörper aus

dem Stossversuch, die in der Versuchseinrichtung eingebaut worden waren, wiesen diese bleibenden Verformungen auf. Die Höhe der verursachten Durchbiegung war vorwiegend von der Ausdehnung der Bruchfläche und damit vom Glastype abhängig (siehe Bild 3.27).

Während der zweiten Belastung in der Versuchsanlage, noch vor dem Erreichen der Resttraglast, entstanden in der schon gebrochenen Glasschicht bei Versuchskörpern aus FLG weitere Brüche. Risse, welche den Rand noch nicht erreicht hatten, zeigten ein erneutes Risswachstum. Dies konnte auch durch die lauten Knackgeräusche bestätigt werden. Bei VSG-Scheiben aus TVG war dieser Vorgang nicht so intensiv und nur vereinzelte neue Risse in der beschädigten Glasschicht kamen hinzu. Bei VSG-Scheiben aus ESG war die beschädigte Glasschicht in ihrer ganzen Länge in kleine Bruchstücke gebrochen, weshalb keine weiteren Risse hinzukamen und keine Knackgeräusche zu hören waren. Aus den Kraft-Verformungsdiagrammen lässt sich erkennen, dass VSG-Scheiben aus ESG in Phase 2 ein annähernd linear elastisches Verformungsverhalten aufweisen (siehe Bild 3.11a). In der ganzen Glasscheibe sind Zonen mit Zustand II vorhanden und nur die intakte Glasschicht trägt zur Lastabtragung bei (siehe Bilder 3.19a und b). Das Kraft-Dehnungsdiagramm der VSG-Scheiben aus FLG zeigt auch einen teilweise linearen Verlauf, jedoch ist an der Stelle, wo Risse zu beobachten und zu hören waren, ein Kraftabfall mit leichter Durchbiegungszunahme zu erkennen (siehe Bild 3.11f und Bilder 3.12). Die Glasscheibe weist grosse Zonen im Zustand I auf, so dass dort durch Spannungsumlagerungen beide Glasschichten zu der Lastabtragung beisteuern (siehe Bilder 3.18g und h). Sobald ein Bruch in dieser Zone auftritt, entsteht im Kraft-Verformungsverlauf ein lokaler Sprung. VSG-Scheiben aus TVG sind nicht so hoch vorgespannt. Deshalb ist ihr Verhalten in diesem Zustand nicht so ausgeprägt wie bei Versuchskörpern ohne Vorspannung (siehe Bilder 3.11b bis e).

Die Initialbruchstelle befand sich meistens gegenüberliegend dem Bruchbild der schon beschädigten Glasschicht zwischen den festen Auflagern in Feldmitte.

Die höchste gemittelte Resttraglast im Zustand II von 4.43 kN konnte bei Versuchskörper 4S\_ESG\_10\_4 mit Querschnittstyp I bestimmt werden (vgl. Tabelle 3.4). Die kleinste Resttraglast von 1.29 kN zeigte Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_6 mit Querschnittstyp III (vgl. Tabelle 3.6). Die obere dickere Glasschicht war schon am Ende der Phase 1 gebrochen, so dass hauptsächlich die dünne Glasschicht für die Lastabtragung zuständig war.

Die Resttraglasten im Zustand II haben einen direkten Einfluss auf die Resttragfähigkeit im Zustand II. Deshalb haben VSG-Scheiben aus ESG in diesem Zustand die höchste Resttragfähigkeit. Die Querschnittswahl beeinflusst die Resttragfähigkeit ebenfalls, da hauptsächlich die intakte Glasschicht die Lasten abträgt.

### 3.5.3 Phase 3

Nach dem Bruch der letzten intakten Glasschicht, gefolgt von einem lauten Knall, waren die zwei folgende Varianten möglich.

#### **Sofortiger Kollaps:**

VSG-Scheiben aus ESG versagten und fielen von der Auflagerung herunter (siehe Bilder 3.25a und b). Der Kollaps hatte sich nicht angekündigt. Der Verlust der restlichen Biegesteifigkeit entstand unmittelbar nach dem spröden Bruch der letzten intakten Glasschicht. VSG-Scheiben der Seriennummer 4S\_FLG\_11 und 4S\_TVG\_23\_1 bis 4 und 4S\_TVG\_24\_1 bis 4 versagten ebenfalls sofort (siehe Bild 3.25c). Bei Scheiben dieser Seriennummern konnten sich die Bruchstücke an den Bruchlinien nicht gegeneinander abstützen, da sie nicht mehr genügend von der Folie festgehalten wurden. VSG-Scheiben mit einem solchen Verhalten haben keine Resttragfähigkeit im Zustand III.

Eine Ausnahme bildeten die zwei VSG-Scheiben 4S\_ESG\_10\_7 und 8. Die gebrochenen VSG-Scheiben aus ESG fielen nicht von den Auflagern herunter, obwohl sehr grosse Verformungen beobachtet wurden (siehe Bilder 3.26a bis h). Eine weitere Belastung und Messung der Verformungen war mit der gewählten Messapparatur nicht möglich.

#### **Wiederbelastung:**

VSG-Scheiben, welche durch einen Stoss gebrochen worden waren oder VSG-Scheiben des Querschnittstyps II und III, konnten ein letztes Mal belastet werden. Die Voraussetzung für ein weiteres Tragverhalten war, dass sich die Glasbruchstücke der oberen Glasschicht gegeneinander abstützen konnten, ohne sich dabei zu verschieben. So konnten an der Stelle der Bruches Druckkräfte über das Glas und Zugkräfte über die Folie geleitet werden (siehe Bilder 3.22). Aus den bestehenden Rissen bildeten sich Fliessgelenklinien, um die sich die angrenzenden Bruchstücke verdrehen konnten. Befanden sich die Fliessgelenklinien annähernd senkrecht zu der Haupttragrichtung, d.h. senkrecht zur Längsseite, wurden tiefere Resttraglasten gemessen als bei Fliessgelenklinien, welche diagonal auf der Scheibe lagen. Die tiefsten Resttraglasten wurden bei Fliessgelenklinien beobachtet, welche an der Stelle eines vorgefabrizierten senkrechten Risses entstanden. Eine Steigerung der Resttraglast konnte mit VSG-Scheiben mit Querschnittstyp II mit einer dickeren Zwischenschicht erzielt werden. VSG-Scheiben mit Querschnittstyp III zeigten ebenfalls eine erhöhte Resttraglast (vgl. Tabellen 3.6 bis 3.10).

### 3.5.4 Beobachtung der ausgebauten VSG-Scheibe

Die VSG-Scheiben wurden nach dem Kollaps auf ein darunter liegendes Brett gelegt um die Längsabmessungen der Schichten messen zu können. Diese konnten mit den Ausgangsabmessungen im Zustand I verglichen werden (vgl. Tabellen 3.14 bis 3.20).

Aus der entstandenen Verlängerung der VSG-Scheiben können Rückschlüsse auf die verbleibende Verformung am Anfang der Phase 2 und auf die Resttragfähigkeit in Phase 3 geschlossen werden. Das Schadensausmass und damit das Bruchbild beeinflussen die bleibende Verlängerung. Damit haben die Wahl des Glastyps und die Bruchursache einen wichtigen Einfluss auf die Resttragfähigkeit im Zustand III. Die Versuchskörper mit der eingeritzten Kerbe wiesen keine markante Verlängerung auf. Bei stossbeanspruchten Versuchskörpern wurden ebenfalls keine nennenswerten Verlängerungen festgestellt.

Anschliessend wurden beide Oberflächen der Glasschichten mit Farbe versehen und drei oder vier Stellen markiert, um eine Beurteilung des Bruchbildes durchzuführen. Davon lagen drei Markierungen immer an den gleichen Stellen (siehe Bild 3.8); die Markierung (Nr. 1) lag über dem äusseren rechten beweglichen Auflager, die Markierung (Nr. 2) war zwischen den inneren festen Auflagern am Scheibenrand und die Markierung (Nr. 3) befand sich ebenfalls zwischen den festen Auflagern, jedoch in der Feldmitte. Falls der Bruch im Feld stattfand, wurde über der Ausgangstelle des Initialbruchs ebenfalls eine vierte Markierung (Nr. 4) eingezeichnet. Bei der Beurteilung der Markierungen waren folgende Punkte interessant; die Form der Bruchstücke, die Anzahl der Bruchstücke innerhalb der festgelegten Form von 5 cm Länge und Breite (siehe Bilder 3.27) und die Stelle des Initialbruchs (siehe Bilder 3.15 bis 3.17).

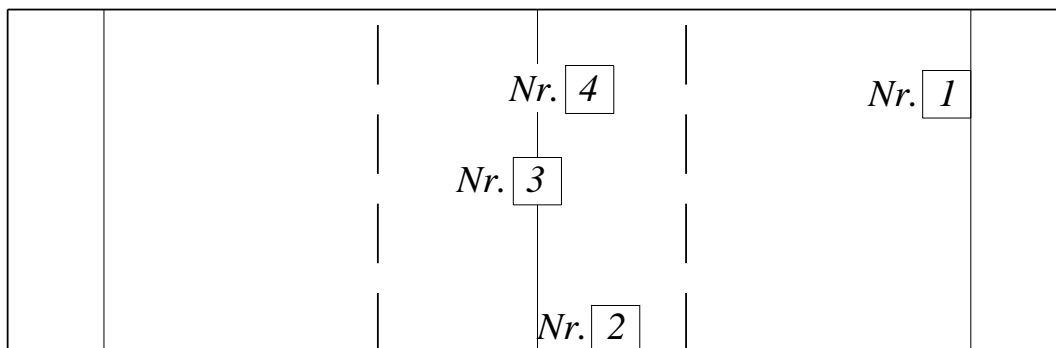


Bild 3.8 Markierung der Versuchskörper für die Bestimmung der Anzahl der Bruchstücke.

## 3.6 Auswertung und Dokumentation

### 3.6.1 Bestimmung des Scherwinkels

Ein Verbundglas-Querschnitt kann mit der linearen Sandwichtheorie [F 7] behandelt werden; die erforderlichen Querschnittsgrössen sind aus Bild 3.7 ersichtlich. Die Sandwichschubsteifigkeit  $S$  ist massgeblich vom Schubmodul  $G$  der Zwischenschicht abhän-

gig (Formel (3.1)). Wie schon in Kapitel 2.8 erläutert ist das Materialverhalten der PVB-Folie von der Temperatur und der Belastungsdauer abhängig. Deshalb nimmt der Schubmodul der PVB-Folie im Vierpunktbiegeversuch während der Belastungsdauer ab.

$$S = G \cdot \frac{e^2}{a_z} \quad (3.1)$$

Aus den gemessenen Versatz  $\delta$  der Glasschichten an den kurzen Seiten der VSG-Scheibe kann der Scherwinkel  $\gamma$  mithilfe der Formel (3.2) bestimmt werden.

$$\tan \gamma = \frac{\delta}{a_z} \quad (3.2)$$

Mit Hilfe der linearen Sandwichtheorie lässt sich aus dem Scherwinkel der Schubmodul der Zwischenschicht bestimmen.

### 3.6.2 Durchbiegungsberechnung

Die Gesamtdurchbiegung des Versuchskörpers lässt sich mit Gleichung (3.3) aus den gemessenen Durchbiegungen  $w_1$  bis  $w_3$  berechnen (siehe Bild 3.3):

$$w = w_1 + \frac{w_2 + w_3}{2} \quad (3.3)$$

### 3.6.3 Schubmodul-Zeitkurven im Zustand I

Je länger die PVB-Folie beansprucht wurde, desto stärker nahm der Scherwinkel  $\gamma$  zu und der Schubmodul  $G$  ab (siehe Bild 3.9). Der Schubmodul ist in Vierpunktbiegeversuchen mit Versuchskörpern der drei Glastypeen ermittelt worden. Der Glastyp hat zwar keinen direkten Einfluss auf den Schubmodul der PVB-Folie, jedoch ist die Biegezugfestigkeit vorgespannter VSG-Scheiben höher. Daher ist bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit von 0.2 mm/s die Belastungsdauer länger bis zum Erreichen der Traglast.

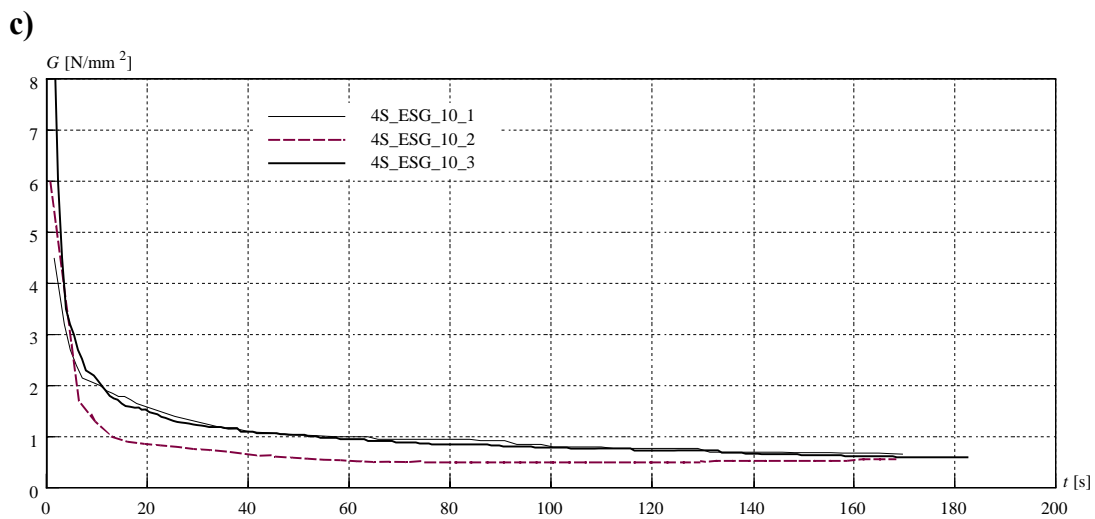
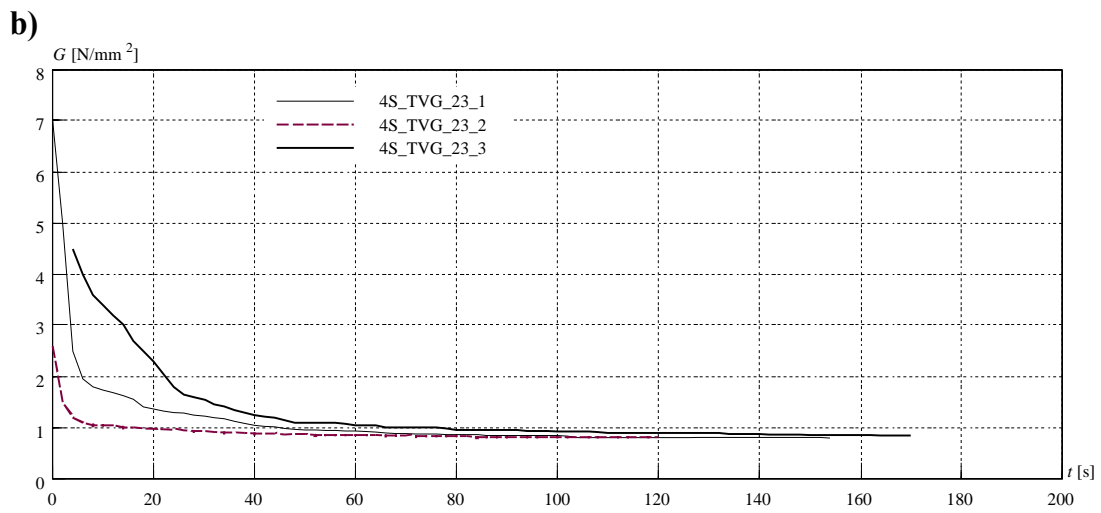
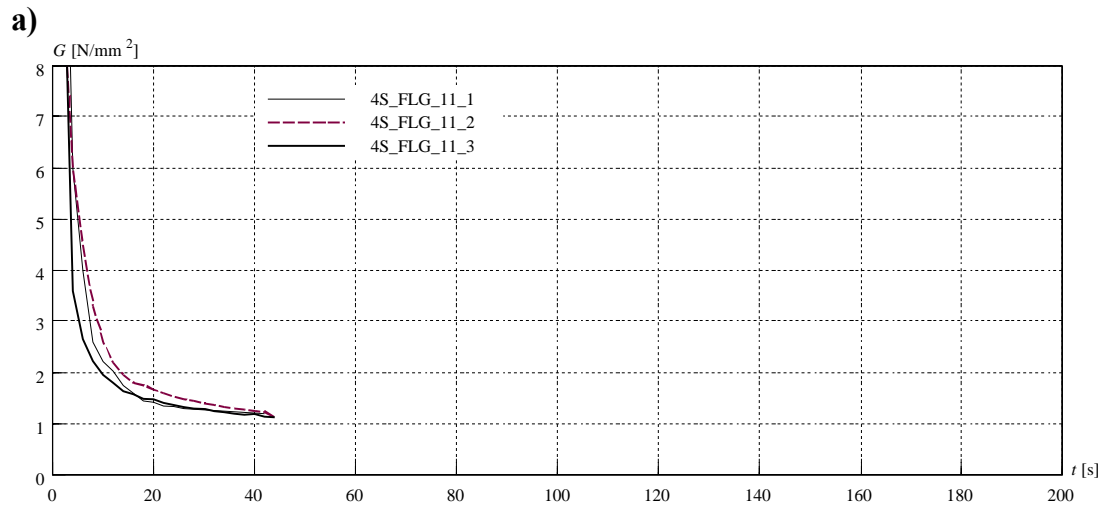


Bild 3.9 Schubmodul-Zeitdiagramme bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit von 0.2 mm/s für VSG-Scheiben mit Querschnittstyp I; (a) aus FLG, (b) aus TVG, (c) aus ESG.

### 3.6.4 Last-Durchbiegungskurven im Zustand I

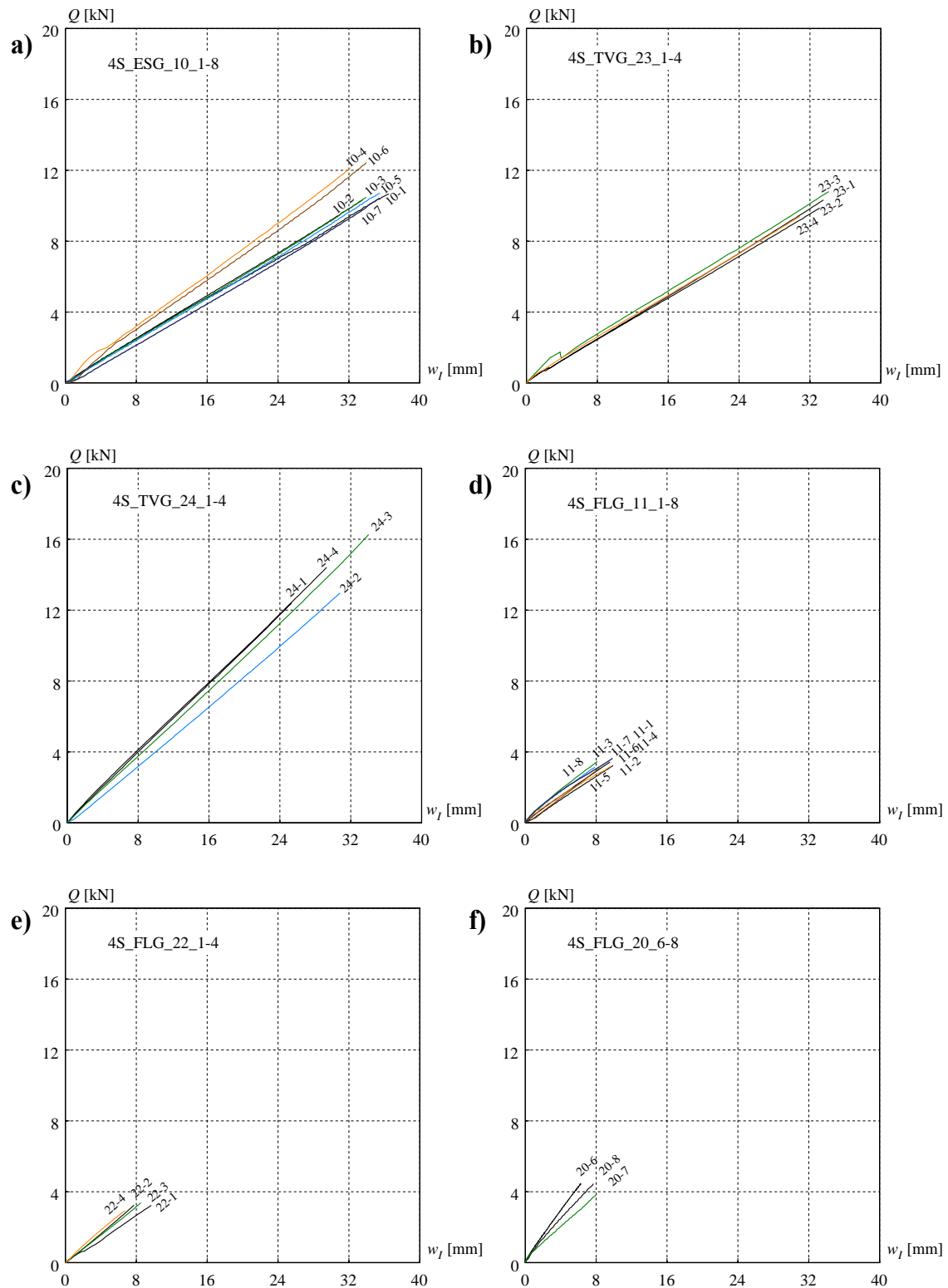


Bild 3.10 Last-Verformungskurven für zweiseitig einfach gelagerte VSG-Scheiben im Zustand I; (a) ESG mit Querschnittstyp I, (b) TVG mit Querschnittstyp I, (c) TVG mit Querschnittstyp III, (d) FLG mit Querschnittstyp I, (e) FLG mit Querschnittstyp II, (f) FLG mit Querschnittstyp III.



### 3.6.5 Last-Durchbiegungskurven im Zustand II

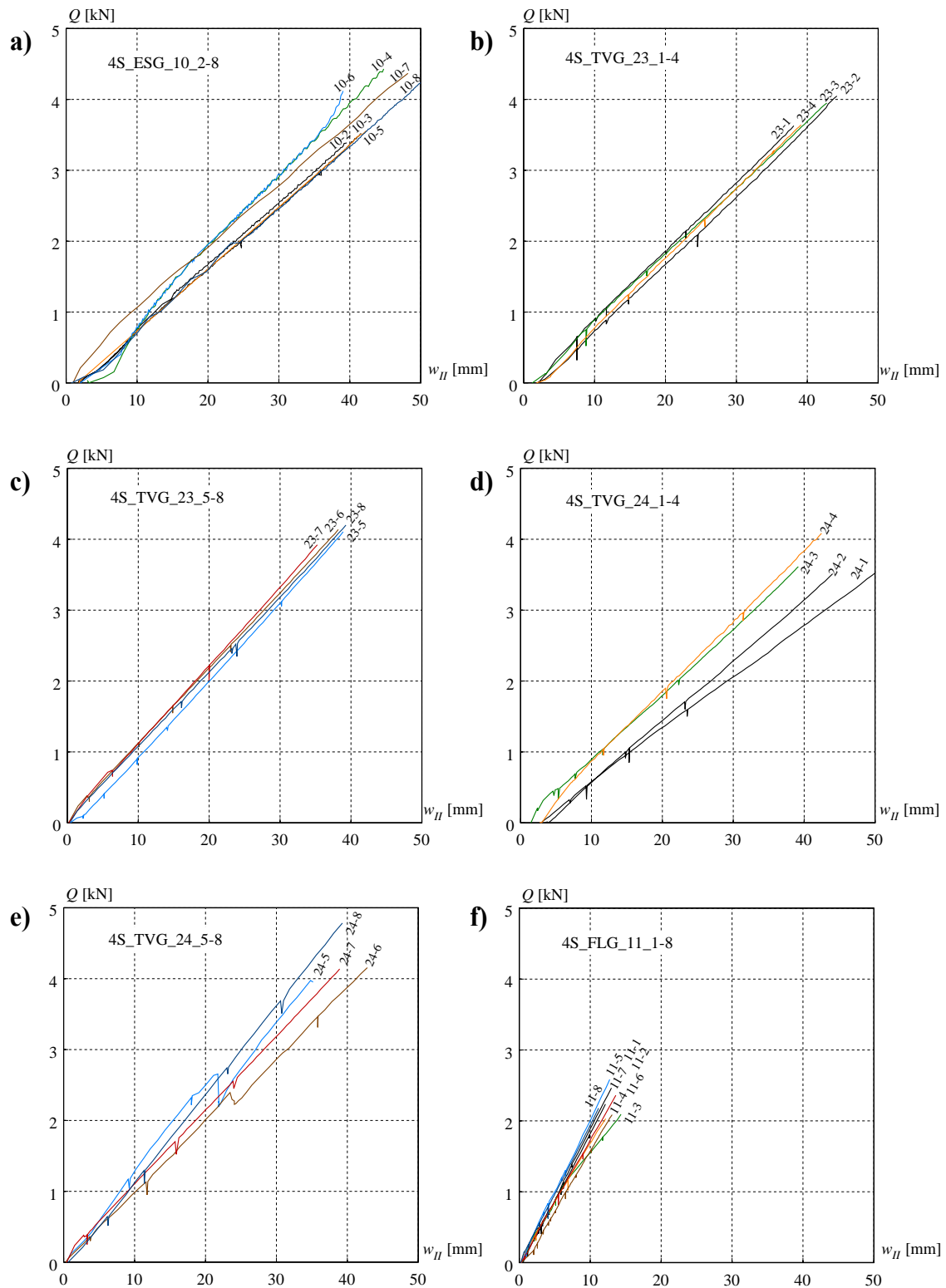


Bild 3.11 Last-Verformungskurven für zweiseitig einfach gelagerte VSG-Scheiben im Zustand II; (a) ESG mit Querschnittstyp I und unterer Glasschicht gebrochen (b) TVG mit Querschnittstyp I und unterer Glasschicht gebrochen, (c) TVG mit Querschnittstyp I und oberer Glasschicht gebrochen, (d) TVG mit Querschnittstyp III und oberer Glasschicht durch eine verformungs-gesteuerte Belastung gebrochen, (e) TVG mit Querschnittstyp III und oberer Glasschicht durch einen Stoß gebrochen, (f) FLG mit Querschnittstyp I und unterer Glasschicht gebrochen.

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

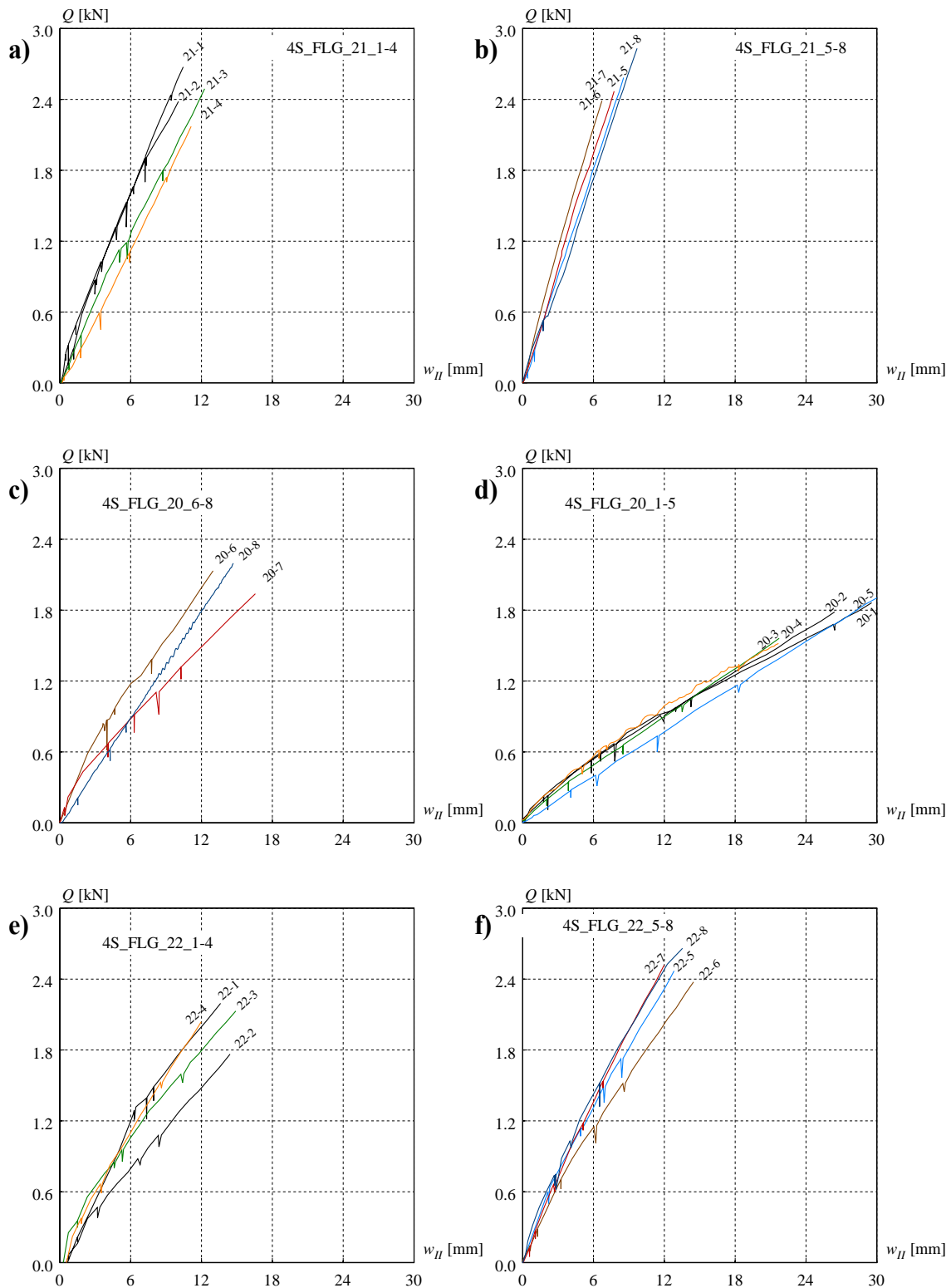


Bild 3.12 Last-Verformungskurven für zweiseitig einfach gelagerte VSG-Scheiben aus FLG im Zustand II; (a) Querschnittstyp I und obere Glasschicht gebrochen, (b) Querschnittstyp I und obere Glasschicht infolge der eingeritzten Kerbe gebrochen, (c) Querschnittstyp II und untere Glasschicht gebrochen, (d) Querschnittstyp III und obere Glasschicht gebrochen, (e) Querschnittstyp II und obere Glasschicht durch eine verformungsgesteuerte Belastung gebrochen, (f) Querschnittstyp II und obere Glasschicht durch einen Stoß gebrochen.

### 3.6.6 Last-Durchbiegungskurven im Zustand III

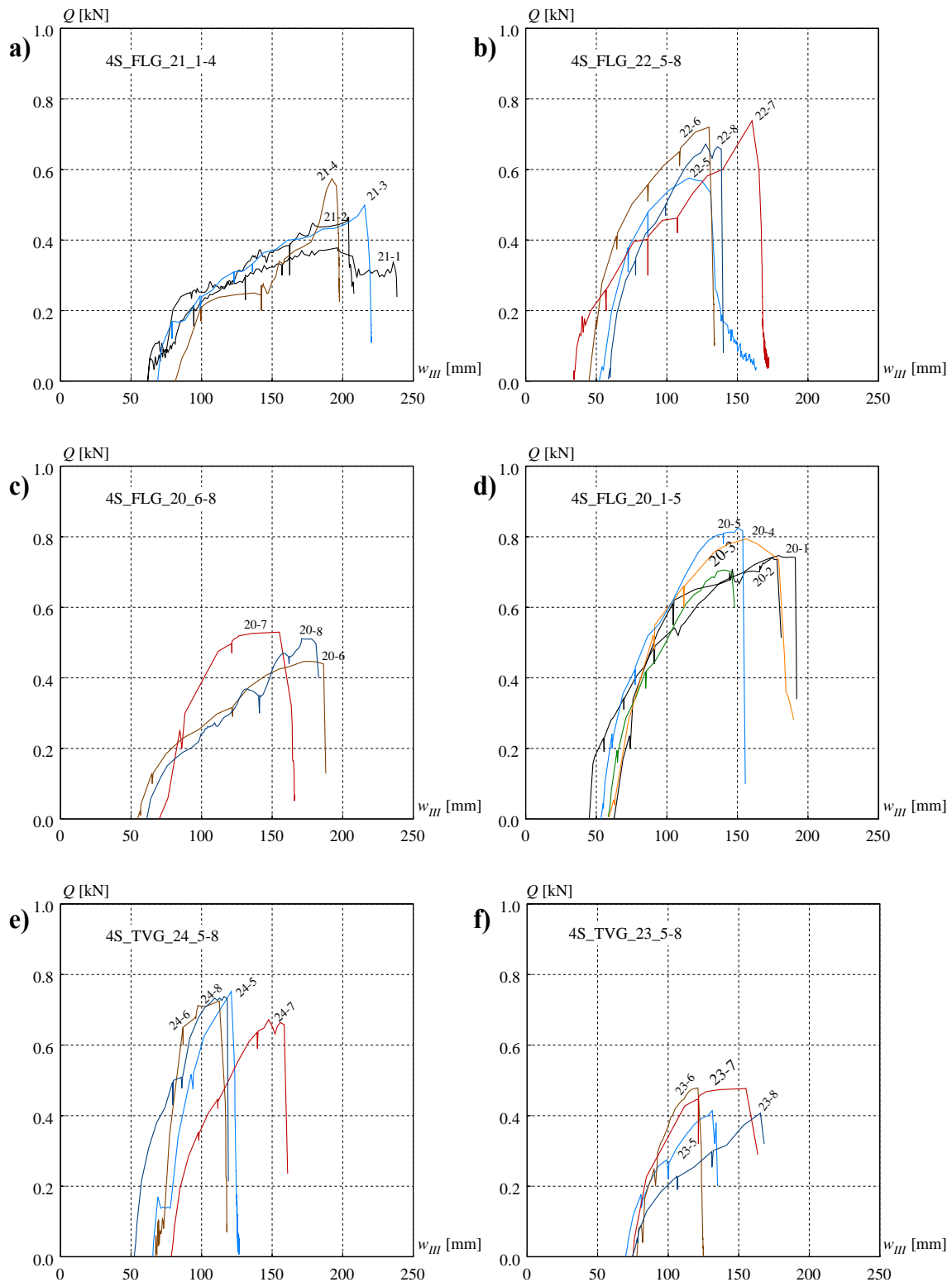


Bild 3.13 Last-Verformungskurven für zweiseitig einfach gelagerte VSG-Scheiben im Zustand III; (a) FLG mit Querschnittstyp I, (b) FLG mit Querschnittstyp II, (c) FLG mit Querschnittstyp III und oberer Glasschicht durch eine verformungsgesteuerte Belastung gebrochen, (d) FLG mit Querschnittstyp III und oberer Glasschicht durch einen Stoß oder mithilfe der eingeritzten Kerbe gebrochen, (e) TVG mit Querschnittstyp III, (f) TVG mit Querschnittstyp I.

### 3.6.7 Kriechkurven

Bei den Versuchskörpern 4S\_FLG\_21\_3-4 und 4S\_FLG\_21\_7-8 wurden die Durchbiegungen infolge des Kriechverhaltens der Zwischenschicht bis zum Kollaps im Zustand III beobachtet (siehe Bilder 3.14a und b).

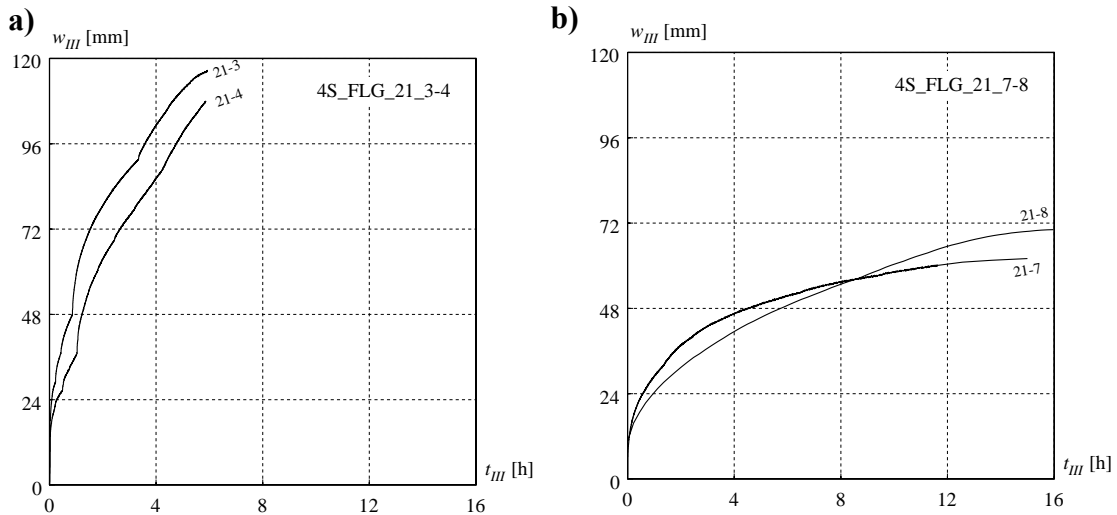


Bild 3.14 Verformungs-Zeitdiagramme im Zustand III für VSG-Scheiben aus FLG mit Querschnittstyp I; (a) Versuchskörper gebrochen im Zustand I durch einen Stoss, (b) Versuchskörper gebrochen im Zustand I mithilfe einer eingeritzten Kerbe.

### 3.6.8 Trag- und Resttraglasten sowie Gesamtdurchbiegungen

Die Tabellen 3.4 bis 3.9 zeigen die ermittelten Trag- und Resttraglasten in den drei Phasen und die entsprechenden Durchbiegungen. Die Durchbiegung beim Bruch, d.h. am Ende der betrachteten Phase wird mit  $w_u$  bezeichnet. Die verbleibende Durchbiegung nach der Entlastung, d.h. allein unter Eigenlast wird mit  $w_r$  bezeichnet. Zum Schluss werden aus den angegebenen Daten der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt.

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_ESG_10_1	10.66	36.52	-	-	-	-	-	-
4S_ESG_10_2	10.34	33.60	0.75	3.39	39.56	-	-	-
4S_ESG_10_3	10.48	33.95	0.85	3.52	41.63	-	-	-
4S_ESG_10_4	12.13	32.16	3.02	4.43	44.79	-	-	-
4S_ESG_10_5	10.70	35.50	0.82	3.55	42.38	-	-	-
4S_ESG_10_6	12.44	33.96	1.98	4.12	39.05	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>11.13</b> (0.83)	<b>34.28</b> (1.40)	<b>1.48</b> (0.89)	<b>3.80</b> (0.40)	<b>41.48</b> (2.07)	-	-	-
4S_ESG_10_7	10.43	35.46	0.96	4.37	48.02	-	-	-
4S_ESG_10_8	12.01	37.96	0.76	4.41	51.99	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>11.22</b> (0.79)	<b>36.71</b> (1.25)	<b>0.86</b> (0.10)	<b>4.39</b> (0.02)	<b>50.80</b> (1.99)	-	-	-

Tabelle 3.4 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_ESG\_10 (Querschnittstyp I).

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_FLG_11_1	3.64	9.85	0.55	2.46	12.99	-	-	-
4S_FLG_11_2	3.23	9.93	0.47	2.24	12.14	-	-	-
4S_FLG_11_3	3.46	8.15	0.32	2.09	14.34	-	-	-
4S_FLG_11_4	3.20	9.69	0.30	2.03	12.17	-	-	-
4S_FLG_11_5	3.09	8.36	0.31	2.59	12.45	-	-	-
4S_FLG_11_6	3.42	9.54	0.25	2.09	13.09	-	-	-
4S_FLG_11_7	3.14	7.85	0.25	2.36	13.60	-	-	-
4S_FLG_11_8	3.32	7.84	0.19	2.17	11.17	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>3.31</b> (0.17)	<b>8.90</b> (0.87)	<b>0.33</b> (0.11)	<b>2.25</b> (0.19)	<b>12.74</b> (0.92)	-	-	-

Tabelle 3.5 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_FLG\_11 (Querschnittstyp I).

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_FLG_20_1	-	-	0.01	1.86	29.55	44.09	0.75	179.10
4S_FLG_20_2	-	-	0.04	1.86	27.66	62.37	0.74	174.72
4S_FLG_20_3	-	-	0.02	1.56	21.72	58.46	0.71	140.00
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.02</b> (0.01)	<b>1.76</b> (0.14)	<b>26.31</b> (3.33)	<b>54.97</b> (7.86)	<b>0.76</b> (0.04)	<b>164.61</b> (17.49)
4S_FLG_20_4	-	-	0.00	1.51	21.66	59.07	0.79	156.34
4S_FLG_20_5	-	-	0.01	1.93	30.51	53.32	0.82	150.29
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.01</b> (0.01)	<b>1.72</b> (0.21)	<b>26.1</b> (4.44)	<b>56.20</b> (2.90)	<b>0.81</b> (0.02)	<b>153.32</b> (3.03)
4S_FLG_20_6	4.45	7.70	0.01	1.29	16.56	54.54	0.45	172.30
4S_FLG_20_7	4.48	6.30	0.00	1.42	12.99	70.00	0.53	155.09
4S_FLG_20_8	3.88	8.66	0.00	1.46	14.70	61.17	0.51	171.10
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>4.27</b> (0.27)	<b>7.35</b> (0.77)	<b>0.00</b> (0.00)	<b>1.39</b> (0.07)	<b>14.73</b> (1.47)	<b>61.90</b> (6.33)	<b>0.50</b> (0.03)	<b>166.16</b> (7.84)

Tabelle 3.6 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_FLG\_20 (Querschnittstyp III).

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_FLG_21_1	-	-	0.11	2.68	10.45	61.68	0.38	196.27
4S_FLG_21_2	-	-	0.07	2.38	13.35	61.87	0.46	204.19
4S_FLG_21_3	-	-	0.05	2.49	12.26	-	-	-
4S_FLG_21_4	-	-	0.15	2.17	12.96	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.10</b> (0.04)	<b>2.43</b> (0.18)	<b>11.81</b> (1.10)	<b>61.78</b> (0.10)	<b>0.42</b> (0.04)	<b>200.23</b> (3.96)
4S_FLG_21_5	-	-	0.02	2.58	8.55	68.80	0.50	215.58
4S_FLG_21_6	-	-	0.00	2.38	6.72	81.24	0.57	192.32
4S_FLG_21_7	-	-	0.03	2.47	7.74	-	-	-
4S_FLG_21_8	-	-	0.01	2.83	9.69	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.02</b> (0.01)	<b>2.56</b> (0.17)	<b>8.18</b> (1.09)	<b>75.02</b> (6.22)	<b>0.54</b> (0.04)	<b>203.95</b> (11.63)

Tabelle 3.7 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_FLG\_21 (Querschnittstyp I).

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_FLG_22_1	3.23	9.69	0.21	2.19	8.86	-	-	-
4S_FLG_22_2	3.24	7.74	0.27	1.77	14.42	-	-	-
4S_FLG_22_3	3.37	8.50	0.15	2.13	14.88	-	-	-
4S_FLG_22_4	2.94	6.72	0.28	2.04	11.98	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>3.20</b> (0.16)	<b>8.16</b> (1.09)	<b>0.23</b> (0.05)	<b>2.03</b> (0.16)	<b>12.54</b> (2.40)	-	-	-
4S_FLG_22_5	-	-	0.01	2.47	12.82	51.97	0.58	115.91
4S_FLG_22_6	-	-	0.01	2.38	14.46	44.77	0.72	129.86
4S_FLG_22_7	-	-	0.02	2.52	11.98	33.98	0.74	160.35
4S_FLG_22_8	-	-	0.01	2.66	13.54	58.46	0.67	127.49
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.01</b> (0.00)	<b>2.51</b> (0.10)	<b>13.20</b> (0.92)	<b>47.30</b> (9.08)	<b>0.68</b> (0.06)	<b>133.40</b> (16.43)

Tabelle 3.8 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_FLG\_22 (Querschnittstyp II).

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_TVG_23_1	10.33	33.52	2.04	3.63	38.10	-	-	-
4S_TVG_23_2	9.87	33.10	1.84	4.05	44.17	-	-	-
4S_TVG_23_3	10.80	34.11	1.21	3.94	42.74	-	-	-
4S_TVG_23_4	9.40	30.87	1.82	3.64	39.11	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>10.10</b> (0.52)	<b>32.90</b> (1.23)	<b>1.73</b> (0.31)	<b>3.82</b> (0.18)	<b>41.03</b> (2.50)	-	-	-
4S_TVG_23_5	-	-	0.40	4.11	38.91	69.80	0.41	131.20
4S_TVG_23_6	-	-	0.17	4.13	38.21	77.87	0.48	121.10
4S_TVG_23_7	-	-	0.19	3.92	35.26	75	0.48	155.69
4S_TVG_23_8	-	-	0.36	4.20	39.29	74.53	0.41	165.38
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.28</b> (0.10)	<b>4.09</b> (0.10)	<b>37.92</b> (1.58)	<b>74.30</b> (2.90)	<b>0.45</b> (0.04)	<b>143.34</b> (17.89)

Tabelle 3.9 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_TVG\_23 (Querschnittstyp I).

Versuchskörper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]
4S_TVG_24_1	12.39	25.32	1.51	3.98	55.86	-	-	-
4S_TVG_24_2	14.42	29.28	1.70	3.51	44.02	-	-	-
4S_TVG_24_3	16.27	34.03	0.73	3.61	39.16	-	-	-
4S_TVG_24_4	12.11	24.87	1.41	4.08	42.46	-	-	-
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	<b>13.80</b> (1.68)	<b>28.38</b> (3.69)	<b>1.34</b> (0.37)	<b>3.80</b> (0.24)	<b>45.38</b> (6.30)	-	-	-
4S_TVG_24_5	-	-	0.16	3.95	35.18	65.39	0.75	121.1
4S_TVG_24_6	-	-	0.12	4.16	42.83	67.08	0.73	112.54
4S_TVG_24_7	-	-	0.17	4.13	38.90	78.46	0.67	147.49
4S_TVG_24_8	-	-	0.25	4.78	39.30	52.27	0.74	115.95
Mittelwerte, (Standard- abweichung)	-	-	<b>0.18</b> (0.05)	<b>4.26</b> (0.31)	<b>39.05</b> (2.65)	<b>65.8</b> (9.29)	<b>0.72</b> (0.03)	<b>124.27</b> (13.75)

Tabelle 3.10 Trag- und Resttraglasten sowie die wichtigsten Gesamtdurchbiegungen von VSG-Scheiben der Serie 4S\_TVG\_24 (Querschnittstyp III).

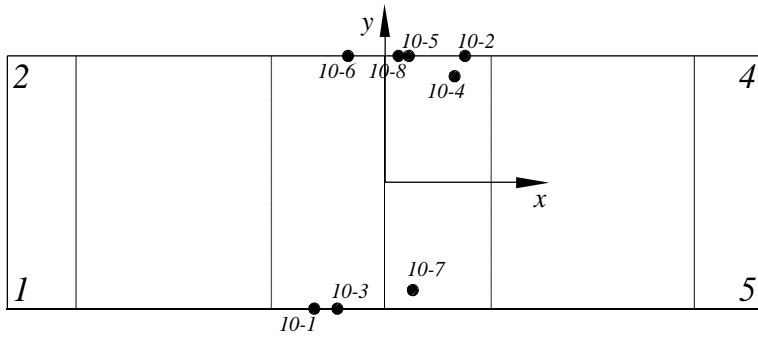
### 3.6.9 Lokalisierung der Initialbrüche

Als Initialbruchstelle wird diejenige Stelle bezeichnet, wo aufgrund des Überschreitens der lokal vorhandenen Biegezugfestigkeit durch die auftretenden Zugspannungen der erste Riss der jeweiligen Glasschicht beginnt. Deshalb wurden bei den geprüften VSG-Scheiben jeweils zwei Initialbrüche beobachtet. In den Bildern 3.15 bis 3.17 werden alle Initialbruchstellen getrennt für die untere und obere Glasschicht dargestellt. Zur einfacheren Darstellung sind alle Initialbruchstellen einer oder mehrerer Versuchsserien auf einer Draufsicht des Versuchskörpers eingetragen.

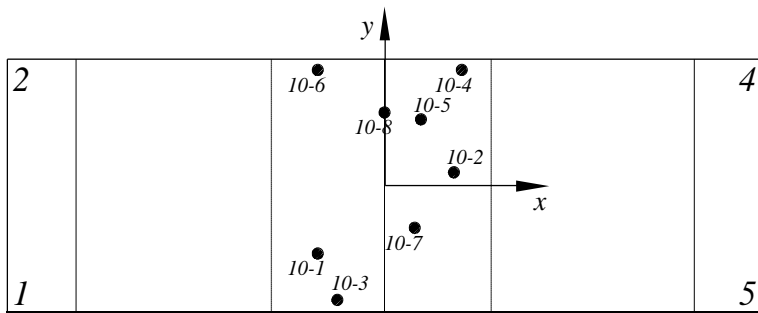
Alle beobachteten Initialbruchstellen befanden sich zwischen den zwei inneren festen Auflagern. Bei VSG-Scheiben, welche zuerst durch eine Stahlkugel beschädigt worden waren, lag der erste Initialbruch in der oberen Glasschicht. Der Bruch war im Zentrum an der Stelle, wo die Stahlkugel die Glasschicht berührte.

Anschliessend sind in den Tabellen 3.11 bis 3.13 die Koordinatenwerte der Initialbruchstellen zusammengefasst. Die Tabellen zeigen ebenfalls, in welcher Glasschicht der Bruch beobachtet wurde und in welchem Zustand der Bruch erfolgte.

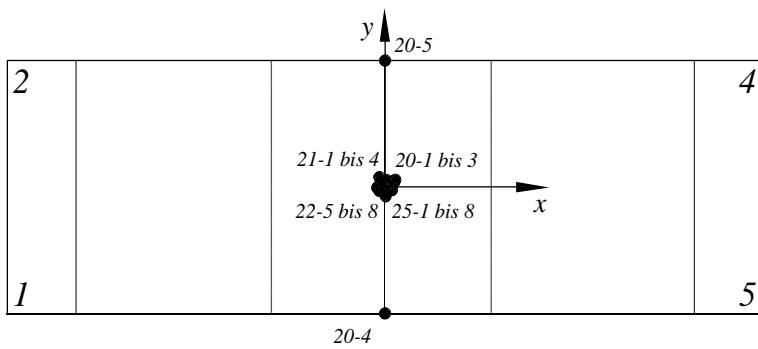




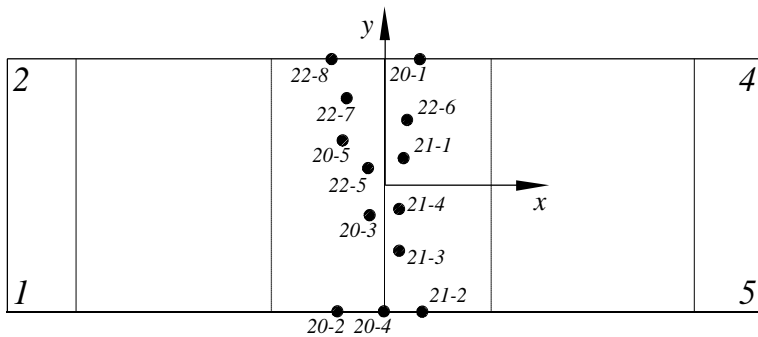
4S\_ESG\_10\_1 bis 8  
Untere Scheibe



4S\_ESG\_10\_1 bis 8  
Obere Scheibe



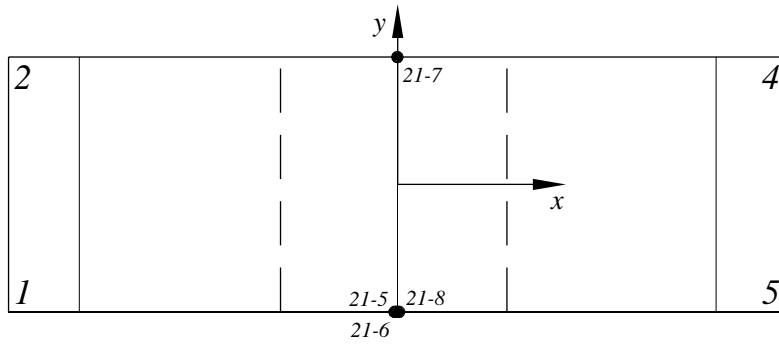
4S\_FLG\_20\_1 bis 5  
4S\_FLG\_21\_1 bis 4  
4S\_FLG\_22\_5 bis 8  
Obere Scheibe



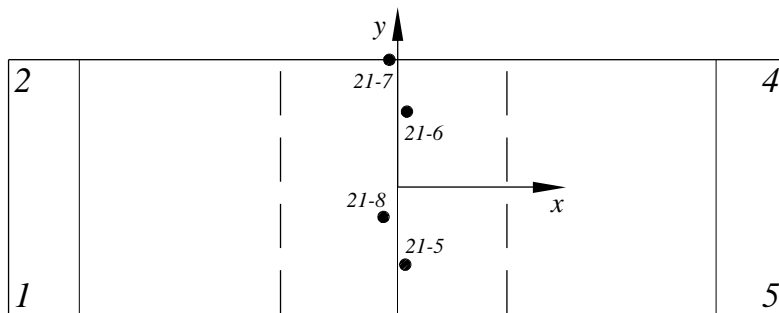
4S\_FLG\_20\_1 bis 5  
4S\_FLG\_21\_1 bis 4  
4S\_FLG\_22\_5 bis 8  
Untere Scheibe

Bild 3.15 Initialbruchstellen für die VSG-Scheiben aus ESG und FLG.

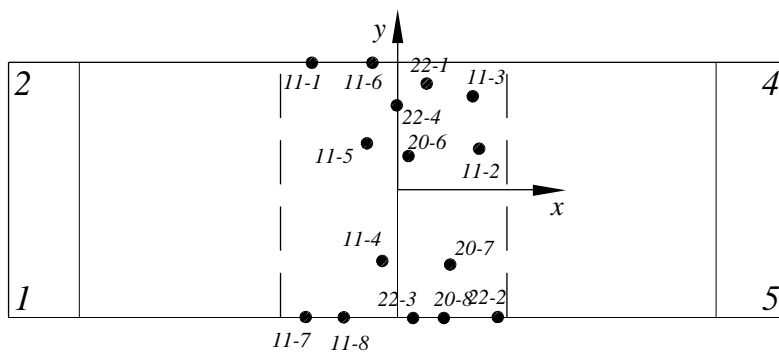
Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben



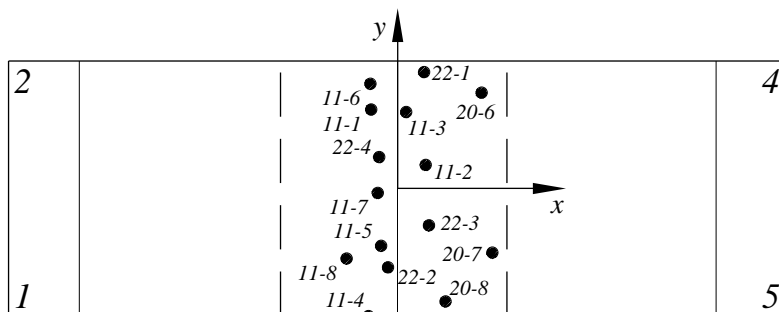
4S\_FLG\_21\_5 bis 8  
Untere Scheibe



4S\_FLG\_21\_5 bis 8  
Obere Scheibe

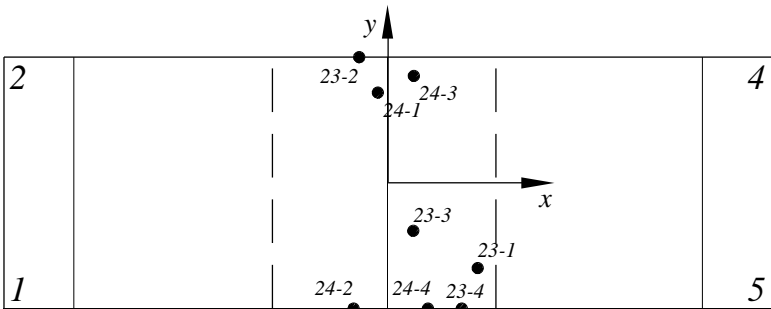


4S\_FLG\_11\_1 bis 5  
4S\_FLG\_20\_6 bis 8  
4S\_FLG\_22\_1 bis 4  
Untere Scheibe

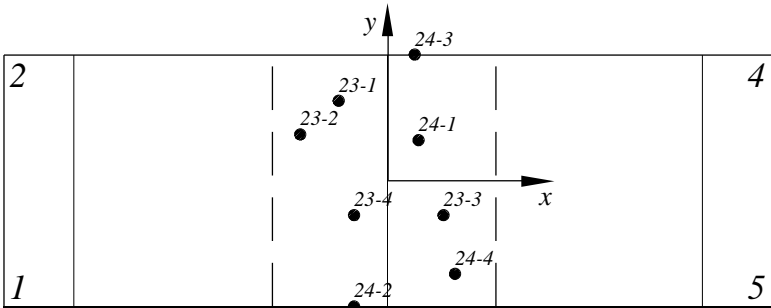


4S\_FLG\_11\_1 bis 5  
4S\_FLG\_20\_6 bis 8  
4S\_FLG\_22\_1 bis 4  
Obere Scheibe

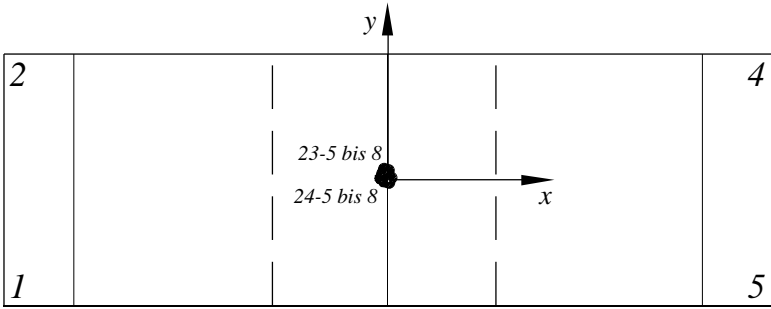
Bild 3.16 Initialbruchstellen für die VSG-Scheiben aus FLG.



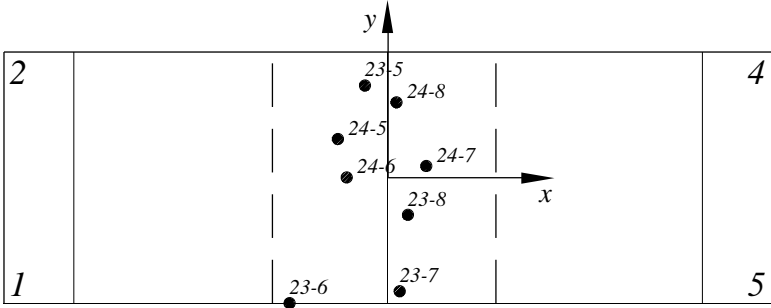
4S\_TV\_G\_24\_1 bis 4  
4S\_TV\_G\_23\_1 bis 4  
Untere Scheibe



4S\_TV\_G\_24\_1 bis 4  
4S\_TV\_G\_23\_1 bis 4  
Obere Scheibe



4S\_TV\_G\_23\_5 bis 8  
4S\_TV\_G\_24\_5 bis 8  
Obere Scheibe



4S\_TV\_G\_23\_5 bis 8  
4S\_TV\_G\_24\_5 bis 8  
Untere Scheibe

Bild 3.17 Initialbruchstellen für die VSG-Scheiben aus TVG.

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

<i>Versuchskörper</i>	<i>Bruchstelle x [cm]</i>	<i>Bruchstelle y [cm]</i>	<i>Ausgangs- lage</i>	<i>Bruch der Glas- schicht</i>
4S_ESG_10_1	-10.30	-18.00	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_2	11.60	18.00	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_3	7.00	18.00	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_4	-10.10	-15.10	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_5	-3.50	-18.00	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_6	-5.40	18.00	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_7	-4.00	15.30	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_8	2.00	18.00	Zustand I	Untere
4S_ESG_10_1	-9.80	-9.70	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_2	10.00	1.90	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_3	-7.00	-16.00	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_4	11.20	16.50	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_5	5.20	9.40	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_6	-9.80	16.50	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_7	4.30	-6.00	Zustand II	Obere
4S_ESG_10_8	-0.1	10.40	Zustand II	Obere
4S_FLG_20_1	-0.20	0.10	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_2	-0.10	0.00	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_3	0.40	0.20	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_4	0.20	-18.00	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_5	0.10	18.00	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_1	5.10	18.00	Zustand II	Untere
4S_FLG_20_2	-7.00	-18.00	Zustand II	Untere
4S_FLG_20_3	-2.30	-4.30	Zustand II	Untere
4S_FLG_20_4	-0.20	-18.00	Zustand II	Untere
4S_FLG_20_5	-6.20	6.40	Zustand II	Untere
4S_FLG_21_1	-0.10	0.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_2	-0.20	-0.30	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_3	-0.30	-0.10	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_4	0.10	0.20	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_1	2.70	3.90	Zustand II	Obere
4S_FLG_21_2	5.40	-18.00	Zustand II	Obere
4S_FLG_21_3	2.10	-9.30	Zustand II	Obere
4S_FLG_21_4	2.00	-3.40	Zustand II	Obere

Tabelle 3.11 Charakteristiken der Initialbruchstellen der VSG-Scheiben aus ESG und FLG

<i>Versuchskörper</i>	<i>Bruchstelle x [cm]</i>	<i>Bruchstelle y [cm]</i>	<i>Ausgangs- lage</i>	<i>Bruch der Glas- schicht</i>
4S_FLG_21_5	0.30	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_6	-0.20	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_7	0.50	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_8	0.00	18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_21_5	-1.20	18.00	Zustand II	Obere
4S_FLG_21_6	1.30	10.70	Zustand II	Obere
4S_FLG_21_7	1.10	-11.00	Zustand II	Obere
4S_FLG_21_8	-2.00	-4.20	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_1	-12.11	18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_2	11.50	5.80	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_3	10.60	13.20	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_4	-2.20	-10.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_5	-3.56	18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_6	-13.02	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_7	-7.62	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_8	-4.30	6.60	Zustand I	Untere
4S_FLG_11_1	-3.30	14.80	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_2	4.00	3.30	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_3	1.20	10.80	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_4	-4.10	-18.00	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_5	-2.30	-8.10	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_6	3.88	14.81	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_7	-2.83	-0.62	Zustand II	Obere
4S_FLG_11_8	-7.33	-9.79	Zustand II	Obere
4S_FLG_20_6	1.50	4.80	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_7	7.40	-10.60	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_8	6.50	-18.00	Zustand I	Obere
4S_FLG_20_6	11.90	13.50	Zustand II	Untere
4S_FLG_20_7	13.40	-9.10	Zustand II	Untere
4S_FLG_20_8	6.80	-16.00	Zustand II	Untere
4S_FLG_22_1	4.10	15.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_2	14.18	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_3	2.20	-18.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_4	-0.10	12.00	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_1	3.70	16.40	Zustand II	Obere
4S_FLG_22_2	-1.40	-11.10	Zustand II	Obere
4S_FLG_22_3	4.40	-5.20	Zustand II	Obere
4S_FLG_22_4	-2.60	4.40	Zustand II	Obere

Tabelle 3.12 Charakteristiken der Initialbruchstellen der VSG-Scheiben aus FLG.

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

<i>Versuchskörper</i>	<i>Bruchstelle x [cm]</i>	<i>Bruchstelle y [cm]</i>	<i>Ausgangs- lage</i>	<i>Bruch der Glas- schicht</i>
4S_FLG_22_5	0.00	-0.10	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_6	0.30	0.10	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_7	0.10	0.30	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_8	0.20	0.20	Zustand I	Untere
4S_FLG_22_5	-2.50	2.40	Zustand II	Obere
4S_FLG_22_6	3.20	9.30	Zustand II	Obere
4S_FLG_22_7	-5.60	12.40	Zustand II	Obere
4S_FLG_22_8	-7.80	18.00	Zustand II	Obere
4S_TVG_24_1	-1.50	13.00	Zustand I	Obere
4S_TVG_24_2	-5.00	-18.00	Zustand I	Obere
4S_TVG_24_3	3.70	15.30	Zustand I	Obere
4S_TVG_24_4	5.70	-18.00	Zustand I	Obere
4S_TVG_24_1	4.40	5.80	Zustand II	Untere
4S_TVG_24_2	4.90	-18.00	Zustand II	Untere
4S_TVG_24_3	3.80	18.00	Zustand II	Untere
4S_TVG_24_4	9.60	-13.30	Zustand II	Untere
4S_TVG_24_5	-0.40	0.50	Zustand I	Untere
4S_TVG_24_6	-0.30	0.20	Zustand I	Untere
4S_TVG_24_7	0.00	0.30	Zustand I	Untere
4S_TVG_24_8	0.10	0.10	Zustand I	Untere
4S_TVG_24_5	-7.20	5.60	Zustand II	Obere
4S_TVG_24_6	-5.90	0.00	Zustand II	Obere
4S_TVG_24_7	5.50	1.70	Zustand II	Obere
4S_TVG_24_8	1.20	10.80	Zustand II	Obere
4S_TVG_23_1	12.83	-12.21	Zustand I	Untere
4S_TVG_23_2	-4.30	18.00	Zustand I	Untere
4S_TVG_23_3	3.60	-6.90	Zustand I	Untere
4S_TVG_23_4	10.50	-18.00	Zustand I	Untere
4S_TVG_23_1	-7.10	11.50	Zustand II	Obere
4S_TVG_23_2	-12.60	6.70	Zustand II	Obere
4S_TVG_23_3	8.00	-5.00	Zustand II	Obere
4S_TVG_23_4	-4.90	-4.90	Zustand II	Obere
4S_TVG_23_5	-0.30	0.20	Zustand I	Obere
4S_TVG_23_6	0.10	-0.20	Zustand I	Obere
4S_TVG_23_7	-0.40	0.10	Zustand I	Obere
4S_TVG_23_8	0.20	-0.30	Zustand I	Obere
4S_TVG_23_5	-3.30	13.20	Zustand II	Untere
4S_TVG_23_6	-14.10	-18.00	Zustand II	Untere
4S_TVG_23_7	1.70	-16.20	Zustand II	Untere
4S_TVG_23_8	2.80	-5.30	Zustand II	Untere

Tabelle 3.13 Charakteristiken der Initialbruchstellen der VSG-Scheiben aus FLG und TVG.

### 3.6.10 Längen- und Breitenabmessungen der Versuchskörper

Die Längen- und Breitenabmessungen der Versuchskörper wurden vor und nach den Versuchen bestimmt. Die Abmessungen der Versuchskörper vor dem Versuch wurden mit den Nennabmessungen des Herstellers verglichen und die Abmessungen der Versuchskörper nach dem Versuch wurden mit den Abmessungen vor dem Versuch ebenfalls in Vergleich gesetzt (vgl. Tabellen 3.14 bis 3.20).

Die gemessenen Abmessungen vor dem Versuch unterschieden sich kaum von den Nennabmessungen.

Bei gebrochenen VSG-Scheiben aus ESG war die Längenänderung mit 2.3% am grössten. Die maximal gemessene Länge nach einem ausgeführten Vierpunktbiegeversuch betrug 113 cm (vgl. Tabelle 3.14). Die Abweichungen der Breitenabmessung waren mit 1.81% etwas kleiner.

Die Längenänderung der VSG-Scheiben aus TVG war von der Bruchursache abhängig. Bei den Versuchskörpern, die durch eine Stahlkugel im Zustand II versetzt wurden, betrug die Längenänderung nach dem Versuch 1.2%. VSG-Scheiben, welche nur in der Versuchseinrichtung belastet und gebrochen wurden, waren nach dem Versuch 1.6% länger. Die maximal gemessene Länge nach einem Vierpunktbiegeversuch betrug 112.1 cm (vgl. Tabelle 3.20). Die Breiten vor und nach den Versuchen wiesen keine markanten Unterschiede auf.

Die Längenänderung der VSG-Scheiben aus FLG waren ebenfalls von der Bruchursache abhängig. Bei solchen Versuchskörpern mit einer eingeritzten Kerbe betrug die Längenänderung nach dem Versuch 0.2%. VSG-Scheiben, die durch eine Stahlkugel gebrochen wurden, wiesen eine doppelt so grosse Längenänderung auf (d.h. 0.4%). Versuchskörper, die nur in der Versuchseinrichtung belastet und gebrochen wurden, wiesen Längenänderungen zwischen 0.6% und 0.7% auf. Die maximal gemessene Länge nach einem Vierpunktbiegeversuch betrug 111.2 cm (vgl. Tabelle 3.16). Wie bei VSG-Scheiben aus TVG haben sich die Breiten vor und nach den Versuchen nicht verändert.

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

Versuchskörper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unterschied zur Nennlänge [%]	Unterschied zur Nennbreite [%]	Längenänderung [%]	Breitenänderung [%]
4S_ESG_10_1	110.1	112.4	36.0	36.6	0.09	0.00	2.09	1.67
4S_ESG_10_2	110.2	112.7	36.1	36.8	0.18	0.27	2.27	1.94
4S_ESG_10_3	110.0	112.9	36.0	36.7	0.00	0.00	2.63	1.94
4S_ESG_10_4	110.0	112.6	36.1	36.9	0.00	0.27	2.36	2.22
4S_ESG_10_5	110.1	113.0	36.0	36.6	0.27	0.00	2.45	1.67
4S_ESG_10_6	110.3	112.8	36.0	36.5	0.27	0.00	2.27	1.39
Mittelwerte	<b>110.1</b>	<b>112.7</b>	<b>36.0</b>	<b>36.7</b>	<b>0.14</b>	<b>0.09</b>	<b>2.35</b>	<b>1.81</b>
4S_ESG_10_7	110.2	112.4	36.0	36.4	0.18	0.00	2.00	1.11
4S_ESG_10_8	110.1	112.3	36.1	36.8	0.09	0.27	2.00	1.94
Mittelwerte	<b>110.2</b>	<b>112.4</b>	<b>36.1</b>	<b>36.6</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>2.00</b>	<b>1.53</b>

Tabelle 3.14 Effektive Abmessungen der ESG-Scheiben (Versuchsserie 10).

Versuchskörper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unterschied zur Nennlänge [%]	Unterschied zur Nennbreite [%]	Längenänderung [%]	Breitenänderung [%]
4S_FLG_11_1	110.2	110.9	36.0	36.1	0.18	0	0.64	0.28
4S_FLG_11_2	110.1	110.8	36.0	36.0	0.09	0	0.64	0.00
4S_FLG_11_3	110.3	110.9	36.1	36.1	0.27	0.27	0.54	0.00
4S_FLG_11_4	110.0	110.7	36.0	36.0	0.00	0	0.64	0.00
4S_FLG_11_5	110.1	110.9	36.1	36.1	0.09	0.27	0.73	0.00
4S_FLG_11_6	110.2	110.8	36.0	36.1	0.18	0	0.54	0.28
4S_FLG_11_7	110.1	110.9	36.0	36.0	0.09	0	0.73	0
4S_FLG_11_8	110.2	110.7	36.1	36.1	0.18	0.27	0.45	0
Mittelwerte	<b>110.2</b>	<b>110.8</b>	<b>36.0</b>	<b>36.1</b>	<b>0.14</b>	<b>0.10</b>	<b>0.61</b>	<b>0.07</b>

Tabelle 3.15 Effektive Abmessungen der FLG-Scheiben (Versuchsserie 11).



Versuchs- körper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unter- schied zur Nennlänge [%]	Unter- schied zur Nennbreite [%]	Längen- änderung [%]	Breiten- änderung [%]
4S_FLG_20_1	110.2	110.6	36.0	36.1	0.18	0.00	0.36	0.28
4S_FLG_20_2	110.0	110.5	36.0	36.2	0.00	0.00	0.45	0.56
4S_FLG_20_3	110.3	110.8	36.1	36.1	0.09	0.28	0.45	0.00
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.17</b>	<b>110.63</b>	<b>36.03</b>	<b>36.13</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.42</b>	<b>0.28</b>
4S_FLG_20_4	110.1	110.4	36.0	36.0	0.14	0.00	0.27	0.00
4S_FLG_20_5	110.0	110.2	36.0	36.0	0.00	0.00	0.18	0.00
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.05</b>	<b>110.30</b>	<b>36.02</b>	<b>36.10</b>	<b>0.14</b>	<b>0.07</b>	<b>0.25</b>	<b>0.21</b>
4S_FLG_20_6	110.1	110.9	36.0	36.0	0.09	0.00	0.73	0.00
4S_FLG_20_7	110.4	111.2	36.0	36.1	0.36	0.00	0.72	0.28
4S_FLG_20_8	110.2	111.0	36.1	36.1	0.18	0.28	0.73	0.00
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.15</b>	<b>110.37</b>	<b>36.05</b>	<b>36.07</b>	<b>0.21</b>	<b>0.09</b>	<b>0.73</b>	<b>0.09</b>

Tabelle 3.16 Effektive Abmessungen der FLG-Scheiben (Versuchsserie 20).

Versuchs- körper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unter- schied zur Nennlänge [%]	Unter- schied zur Nennbreite [%]	Längen- änderung [%]	Breiten- änderung [%]
4S_FLG_21_1	110.2	110.6	36.1	36.2	0.18	0.28	0.36	0.28
4S_FLG_21_2	110.2	110.5	36.0	36.1	0.18	0.00	0.27	0.28
4S_FLG_21_3	110.1	110.5	36.1	36.1	0.09	0.28	0.36	0.00
4S_FLG_21_4	110.0	110.4	36.0	36.1	0.00	0.00	0.36	0.28
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.12</b>	<b>110.5</b>	<b>36.05</b>	<b>36.12</b>	<b>0.11</b>	<b>0.14</b>	<b>0.34</b>	<b>0.21</b>
4S_FLG_21_5	110.1	110.3	36.0	36.0	0.09	0	0.18	0.00
4S_FLG_21_6	110.0	110.2	36.1	36.1	0.00	0.28	0.18	0.00
4S_FLG_21_7	110.1	110.4	36.0	36.0	0.09	0.00	0.27	0.00
4S_FLG_21_8	110.1	110.3	36.1	36.1	0.09	0.28	0.18	0.00
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.08</b>	<b>110.3</b>	<b>36.05</b>	<b>36.05</b>	<b>0.07</b>	<b>0.14</b>	<b>0.2</b>	<b>0.00</b>

Tabelle 3.17 Effektive Abmessungen der FLG-Scheiben (Versuchsserie 21).

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

Versuchskörper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unterschied zur Nennlänge [%]	Unterschied zur Nennbreite [%]	Längenänderung [%]	Breitenänderung [%]
4S_FLG_22_1	110.1	110.7	36.0	36.1	0.09	0.00	0.54	0.28
4S_FLG_22_2	110.2	110.9	36.1	36.1	0.18	0.28	0.64	0.00
4S_FLG_22_3	110.3	111.0	36.0	36.0	0.27	0.00	0.63	0.00
4S_FLG_22_4	110.1	110.8	36.1	36.1	0.09	0.28	0.64	0.00
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.18</b>	<b>110.85</b>	<b>36.05</b>	<b>36.08</b>	<b>0.16</b>	<b>0.14</b>	<b>0.61</b>	<b>0.07</b>
4S_FLG_22_5	110.1	110.5	36.0	36.0	0.09	0	0.36	0.00
4S_FLG_22_6	110.2	110.6	36.1	36.2	0.18	0.28	0.36	0.28
4S_FLG_22_7	110.1	110.4	36.0	36.1	0.09	0.00	0.27	0.28
4S_FLG_22_8	110.2	110.5	36.0	36.0	0.18	0.00	0.27	0.00
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.15</b>	<b>110.50</b>	<b>36.03</b>	<b>36.08</b>	<b>0.14</b>	<b>0.07</b>	<b>0.32</b>	<b>0.14</b>

Tabelle 3.18 Effektive Abmessungen der FLG-Scheiben (Versuchsserie 22).

Versuchskörper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unterschied zur Nennlänge [%]	Unterschied zur Nennbreite [%]	Längenänderung [%]	Breitenänderung [%]
4S_TVG_23_1	110.2	111.9	36.1	36.1	0.18	0.28	1.54	0.00
4S_TVG_23_2	110.1	112.0	36.0	36.1	0.09	0.00	1.73	0.28
4S_TVG_23_3	110.0	111.7	36.0	36.1	0.00	0.00	1.55	0.28
4S_TVG_23_4	110.1	111.8	36.1	36.2	0.09	0.28	1.54	0.28
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.1</b>	<b>111.85</b>	<b>36.05</b>	<b>36.13</b>	<b>0.09</b>	<b>0.14</b>	<b>1.59</b>	<b>0.21</b>
4S_TVG_23_5	110.0	111.4	36.0	36.0	0.00	0.00	1.27	0.00
4S_TVG_23_6	110.2	111.3	36.0	36.1	0.18	0.00	1.00	0.28
4S_TVG_23_7	110.3	111.5	36.1	36.1	0.27	0.28	1.09	0.00
4S_TVG_23_8	110.2	111.6	36.0	36.1	0.18	0.00	1.27	0.28
<i>Mittelwerte</i>	<b>110.18</b>	<b>111.45</b>	<b>36.03</b>	<b>36.08</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	<b>1.16</b>	<b>0.14</b>

Tabelle 3.19 Effektive Abmessungen der TVG-Scheiben (Versuchsserie 23).

Versuchskörper	Länge vor Versuch [cm]	Länge nach Versuch [cm]	Breite vor Versuch [cm]	Breite nach Versuch [cm]	Unterschied zur Nennlänge [%]	Unterschied zur Nennbreite [%]	Längenänderung [%]	Breitenänderung [%]
4S_TVG_24_1	110.1	111.9	36.0	36.0	0.09	0.00	1.63	0.00
4S_TVG_24_2	110.2	112.1	36.1	36.2	0.18	0.28	1.72	0.28
4S_TVG_24_3	110.0	111.7	36.0	36.1	0.00	0.00	1.55	0.00
4S_TVG_24_4	110.2	111.8	36.2	36.2	0.18	0.56	1.45	0.00
Mittelwerte	<b>110.13</b>	<b>111.88</b>	<b>36.08</b>	<b>36.03</b>	<b>0.11</b>	<b>0.21</b>	<b>1.59</b>	<b>0.14</b>
4S_TVG_24_5	110.1	111.2	36.0	36.1	0.09	0.00	1.00	0.28
4S_TVG_24_6	110.1	111.1	36.1	36.1	0.09	0.28	0.91	0.00
4S_TVG_24_7	110.0	111.3	36.0	36.0	0.00	0.00	1.18	0.00
4S_TVG_24_8	110.2	111.4	36.0	36.1	0.18	0.00	1.09	0.28
Mittelwerte	<b>110.10</b>	<b>111.25</b>	<b>36.03</b>	<b>36.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>	<b>1.04</b>	<b>0.14</b>

Tabelle 3.20 Effektive Abmessungen der TVG-Scheiben (Versuchsserie 24).

### 3.6.11 Bruchbilder

#### 3.6.11.1 Bruchbilder im Zustand II

Bei VSG-Scheiben mit asymmetrischem Querschnitt, die sofort in der Versuchseinrichtung belastet wurden, versagte zuerst die obere Glasschicht. Im Gegensatz dazu versagte bei VSG-Scheiben mit symmetrischem Querschnitt die untere Glasschicht zuerst. Der Initialbruch erfolgte zwischen den zwei vertikal unverschieblichen Lagern entweder am Scheibenrand (siehe Bilder 3.18d und f) oder in der Feldmitte (siehe Bild 3.18h).

Bei VSG-Scheiben aus FLG ging der Initialbruch am Scheibenrand mit drei oder vier langen Rissen von einem Punkt aus (siehe Bild 3.18e). Weitere Risse zweigten ab und endeten senkrecht am gegenüberliegenden Scheibenrand. VSG-Scheiben mit eingeritzter Kerbe verhielten sich jedoch anders: Der Bruch der oberen Glasschicht erfolgte auch am Scheibenrand mit nur einem Riss (siehe Bilder 3.18a bis c). In der gesamten Phase 2 stellten sich keine weiteren Risse mehr ein. Der Initialbruch in der Feldmitte ist durch einzelne Risse, die bis zum Scheibenrand reichen, gekennzeichnet (siehe Bild 3.18g).

Bei VSG-Scheiben aus ESG oder TVG bildeten sich keine vereinzelt Risse mehr. Auf der gesamten Glasscheibe sind kleine Bruchstücke erkennbar; deshalb sind Zonen im Zustand I nicht mehr zu finden. Die Kanten der Bruchstücke bilden jedoch gemeinsame Linien, die von der Initialbruchstelle ausgehen (siehe Bilder 3.19f und h).

In den Bildern 3.20a bis h sind VSG-Scheiben aus FLG im Zustand II zu sehen. Die obere Glasschicht ist gebrochen. Der Initialbruch erfolgte am Aufprallort der Stahlku-

gel auf der oberen Glasschicht. Bei allen so gebrochenen VSG-Scheiben aus FLG zeigen sich vereinzelte Risse ausgehend vom Aufprallort. Die Risse tendieren senkrecht zum Rand zu enden.

Bei VSG-Scheiben aus TVG wurden ebenfalls einzelne Risse am Aufprallort festgestellt. Bevor sie jedoch den Rand erreichen, zweigen neue Risse ab. Deshalb ist ein grosser Teil der gebrochenen Glasschicht mit Rissen überzogen (siehe Bilder 3.21c bis f). Besonders im Randbereich sind solche Verzweigungen festzustellen (siehe Bilder 3.21g und h). Dabei färbte sich der Rand der Glasschicht weiss (siehe Bilder 3.21b und h) und die Risse enden nicht mehr senkrecht zu diesem.

### 3.6.11.2 Bruchbilder im Zustand III

Bei VSG-Scheiben mit eingeritzten Kerbe erfolgte das Versagen der noch intakten Glasschicht genau unter dem schon vorhandenen Riss in der oberen Glasschicht. Die Risse stehen parallel zueinander und senkrecht zum Längsrand (siehe Bilder 3.22a und b). Dabei wurden Druckkräfte in der oberen Glasschicht und die Zugkräfte durch die Folie übertragen (siehe Bilder 3.23b und f). Die Dehnungen der Folie an dieser Stelle waren so gross, dass die Folie sich nicht mehr elastisch verhielt. Das so entstandene Fliessgelenk steht senkrecht zu den langen Seitenrändern und parallel zu den Lagern (siehe Bilder 3.23a, e und f).

Bei Versuchskörper mit asymmetrischem Querschnitt im Zustand III unterscheiden sich die Rissbilder der unteren und der oberen Glasschicht. In der unteren Glasschicht verlaufen, ausgehend von der Initialbruchstelle, eine grosse Anzahl von kleinen Rissen, welche senkrecht zum Rand enden (siehe Bild 3.23d und Bild 3.25e).

Versuchskörper, welche schon im Zustand I und II diagonale Risse aufwiesen, konnten über die vorhandenen Risse diagonale Fliessgelenke ausbilden (siehe Bilder 3.24a und b).

In Versuchskörpern mit asymmetrischem Querschnitt konnten bei den Fliessgelenklinien in der unteren Glasschicht feine Risse beobachtet werden. Die Risse verliefen zuerst parallel zur Fliessgelenklinie, bogen dann ab und endeten in einem Abstand von ca. 3 cm (siehe Bild 3.24c und Bild 3.23a).

### 3.6.11.3 Bruchbilder des Kollapses

Das Versagen aller Fliessgelenke mit anschliessendem Kollaps war durchgehend mit deutlichen Abplatzungen am Rand der Fliessgelenklinie verbunden. Entweder wurden muschelförmige (siehe Bild 3.22h) oder grosse, flache Absplitterungen an der Oberfläche der oberen Glasschicht (siehe Bild 3.25f) festgestellt. Anschliessend zerriss die Folie aufgrund der grossen Durchbiegungen und schliesslich rutschte der Versuchskörper von den Auflagern (siehe Bilder 3.25g und h).

Versuchskörper aus ESG im Zustand III versagten sofort; eine Resttragfähigkeit im Zustand III konnte nicht festgestellt werden (siehe Bild 3.25a). Wegen der vielen Bruchstücken war in den ausgebauten Versuchskörpern keine Restbiegesteifigkeit mehr vorhanden (siehe Bild 3.25b).

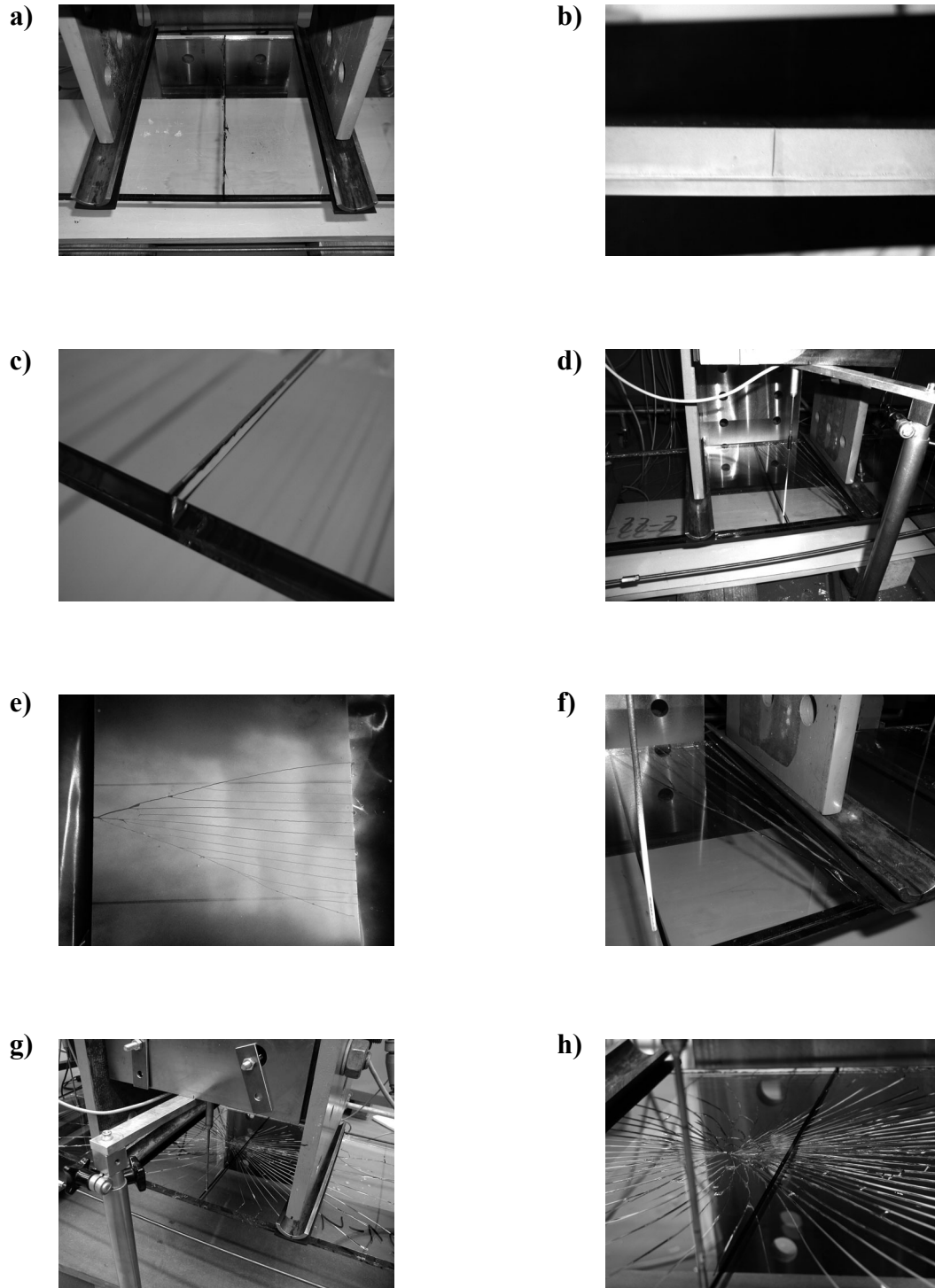
Ein sofortiger Kollaps der VSG-Scheiben aus FLG und TVG im Zustand III trat ebenfalls ein, wenn die Rissbildung einen festen Kontakt der Bruchstücke untereinander verhinderte. Die Risse in der oberen Glasschicht verliefen zu nahe beieinander (siehe Bilder 3.25i und j).

#### 3.6.11.4 Bruchbilder der Versuchskörper mit Glas-Faser-Kunststoff-Einlagen

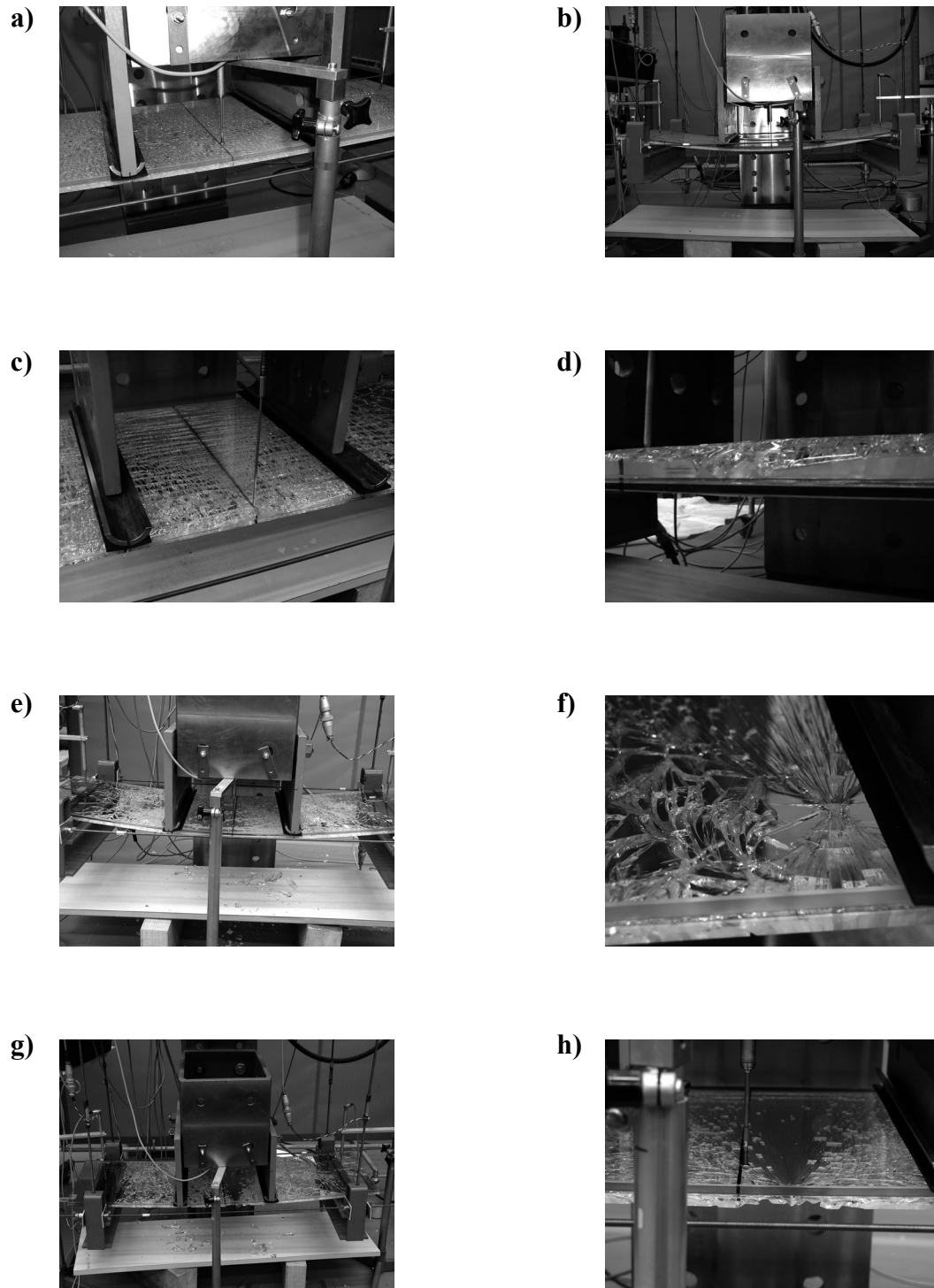
Beim Versuchskörper mit GFK-Einlage versagte im Vierpunktbiegeversuch zuerst die untere Glasschicht. Nach der Wiederbelastung versagte die obere Glasschicht. Da die VSG-Scheibe aus ESG bestand, bestanden die gebrochenen Bereiche aus kleinen Bruchstücken (siehe Bild 3.26f).

Die sehr grossen Durchbiegungen im Zustand III konnten mit der vorhandenen Messapparatur nicht bestimmt werden (siehe Bilder 3.26c und d). In den horizontalen Gewindestangen wurden Zugkräfte aufgenommen und der Versuchskörper stützte sich auf die äusseren Lager ab.

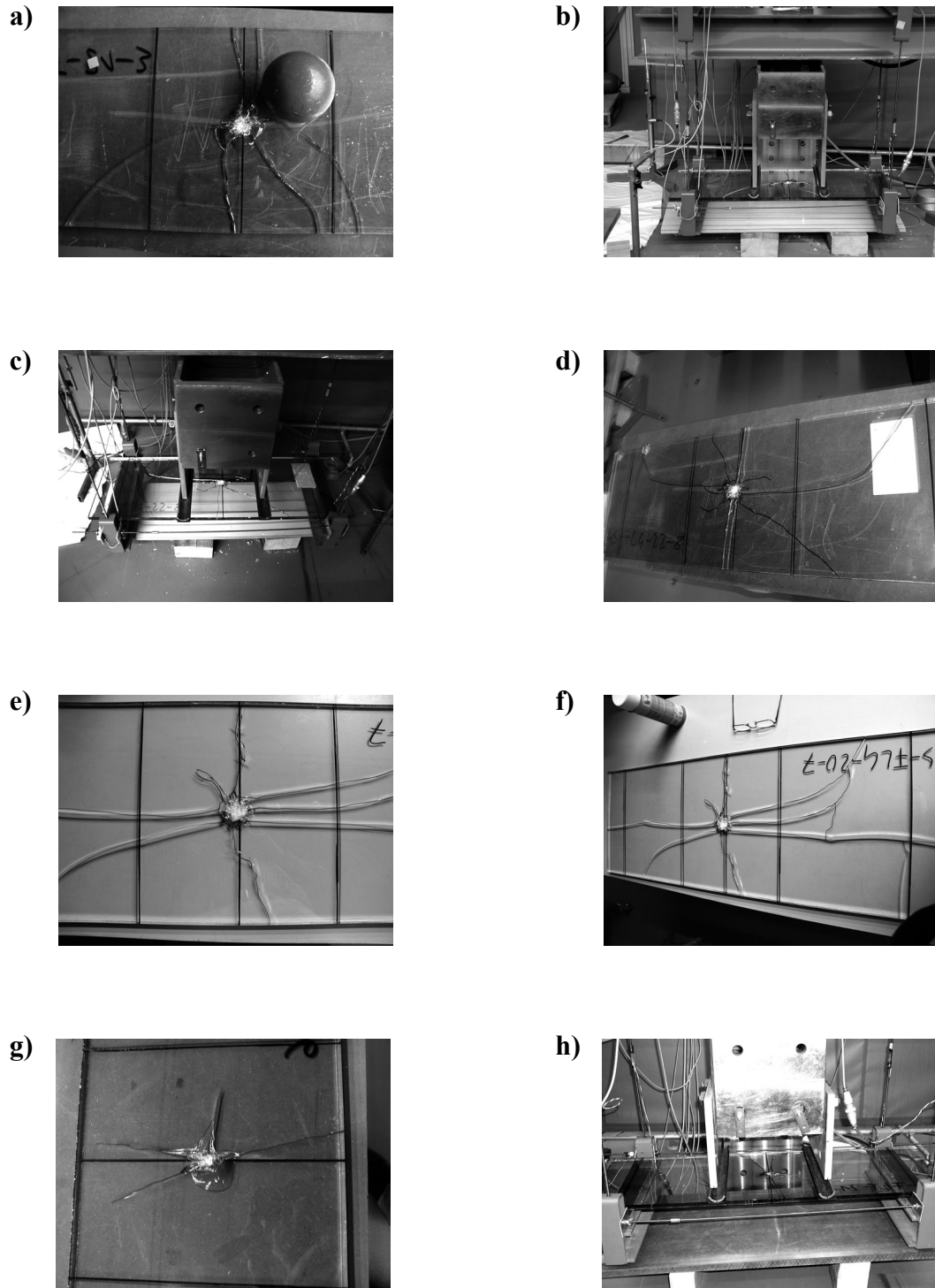
Der Versuchskörper fiel nach einer Reststandzeit von 48 Stunden nicht herunter und auch die Folie zerriss nicht.



*Bild 3.18 VSG-Scheiben im Zustand II, belastet in der Versuchseinrichtung;  
(a) bis (c) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_5, Kerbe eingeritzt, mit anschliessendem Bruch der oberen Glasschicht,  
(d) bis (f) Versuchskörper 4S\_FLG\_22\_2, Bruch der unteren Glasschicht mit Initialbruchstelle am unteren Scheibenrand in der Nähe des rechten Auflagers,  
(g) und (h) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_6, Bruch der oberen Glasschicht mit Initialbruchstelle in der Nähe der Mittellinie.*

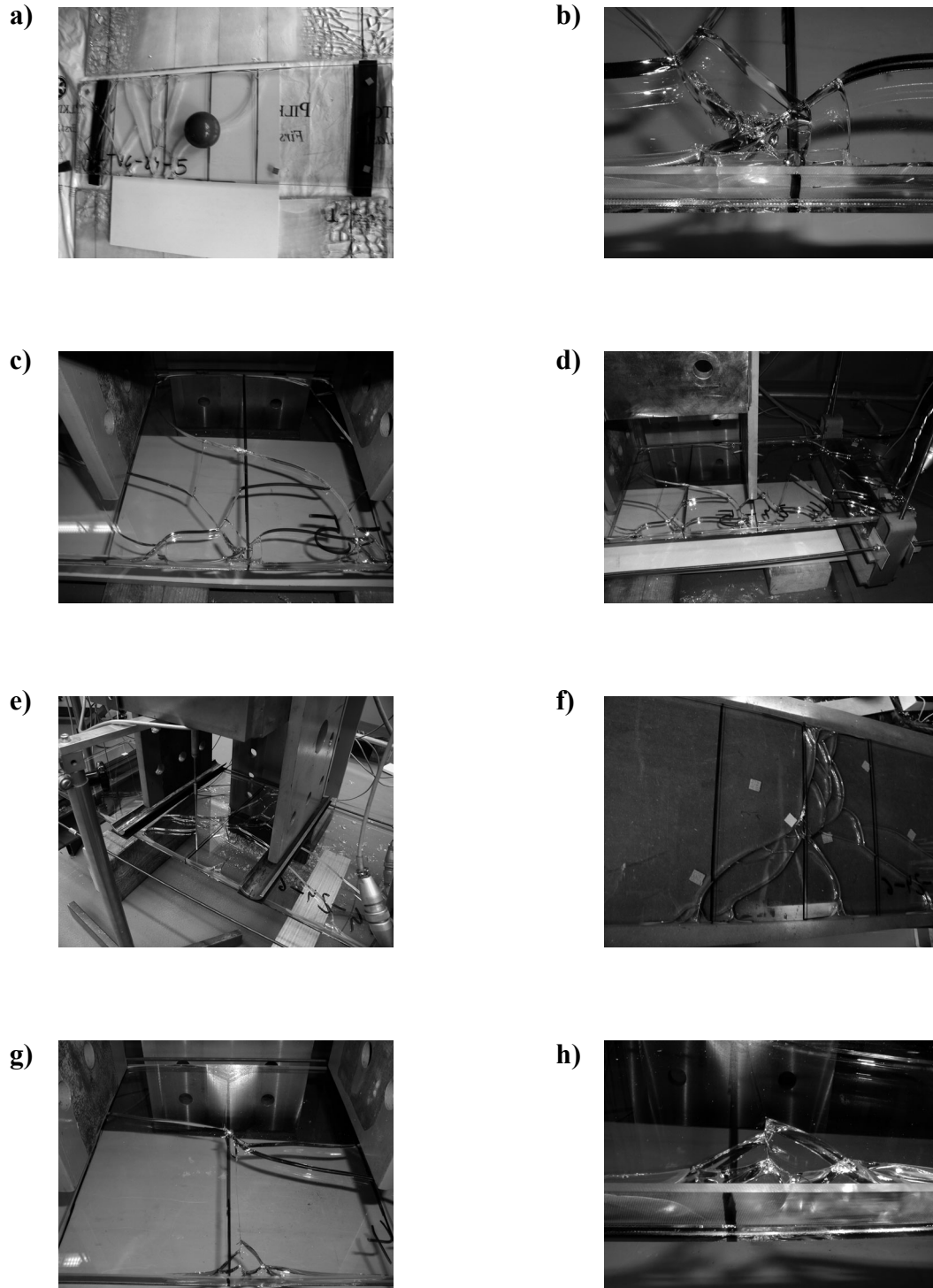


*Bild 3.19 VSG-Scheiben im Zustand II, belastet in der Versuchseinrichtung;  
 (a) und (b) Versuchskörper 4S\_ESG\_10\_2, Bruch der unteren Glasschicht mit Rissen über die gesamte Länge der Glasscheibe,  
 (c) und (d) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_1, Bruch der oberen Glasschicht mit Initialbruchstelle in der Nähe der Mittellinie,  
 (e) und (f) Versuchskörper 4S\_TVG\_23\_1, Bruch der unteren Glasschicht mit Initialbruchstelle in der Nähe des rechten Auflagers,  
 (g) und (h) Versuchskörper 4S\_TVG\_23\_2, Bruch der unteren Glasschicht mit Initialbruchstelle am unteren Scheibenrand.*

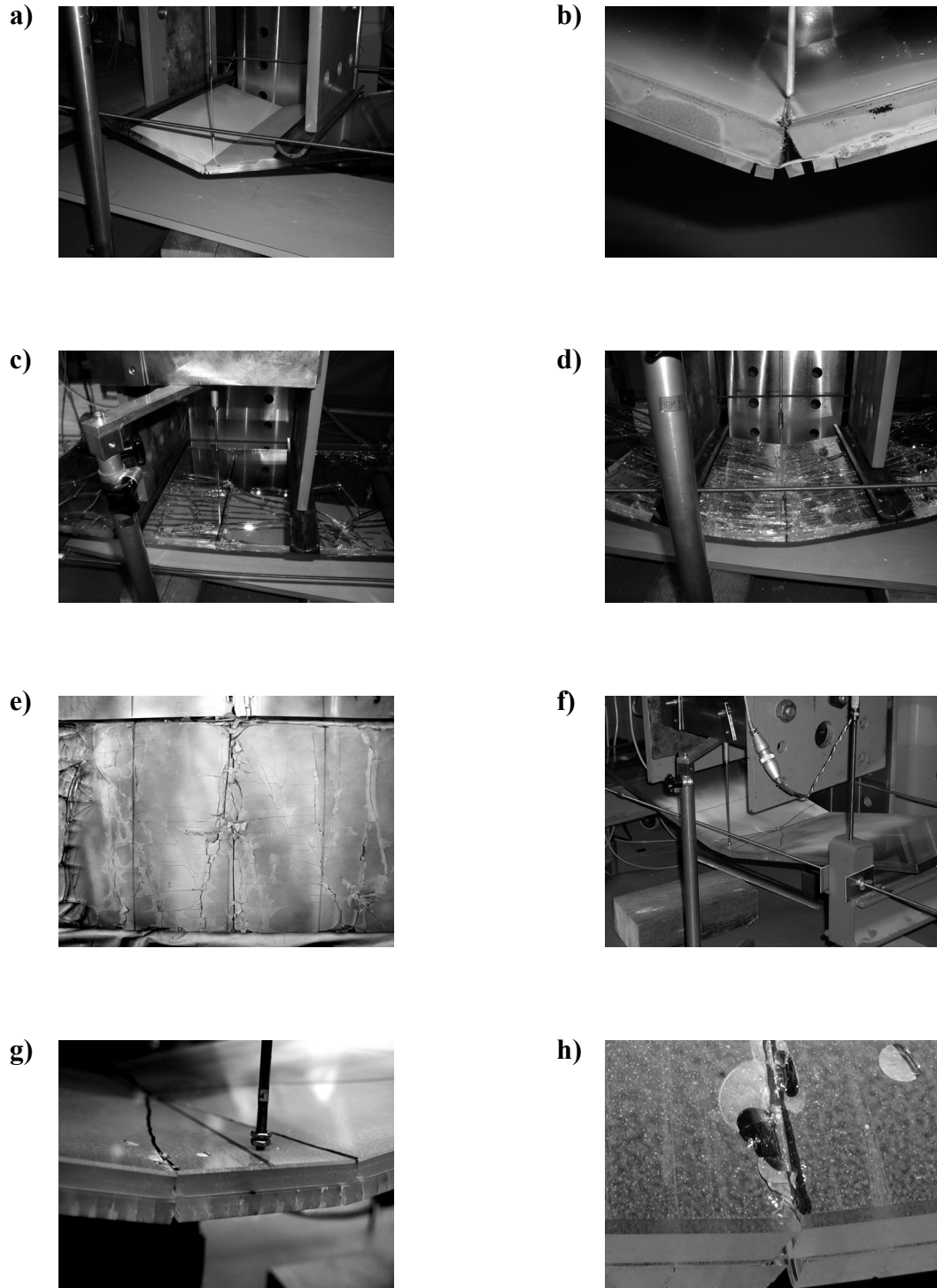


*Bild 3.20 VSG-Scheiben im Zustand II, obere Glasschicht durch Stahlkugel gebrochen;  
(a) und (b) Versuchskörper 4S\_FLG\_21\_3, senkrecht zum Rand endende Risse,  
(c) und (d) Versuchskörper 4S\_FLG\_22\_8, Risse ausgehend von der Initialbruchstelle,  
(e) und (f) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_3, Risse ausgehend von der Initialbruchstelle,  
(g) und (h) Versuchskörper 4S\_FLG\_21\_4, Absplitterungen an der Initialbruchstelle.*

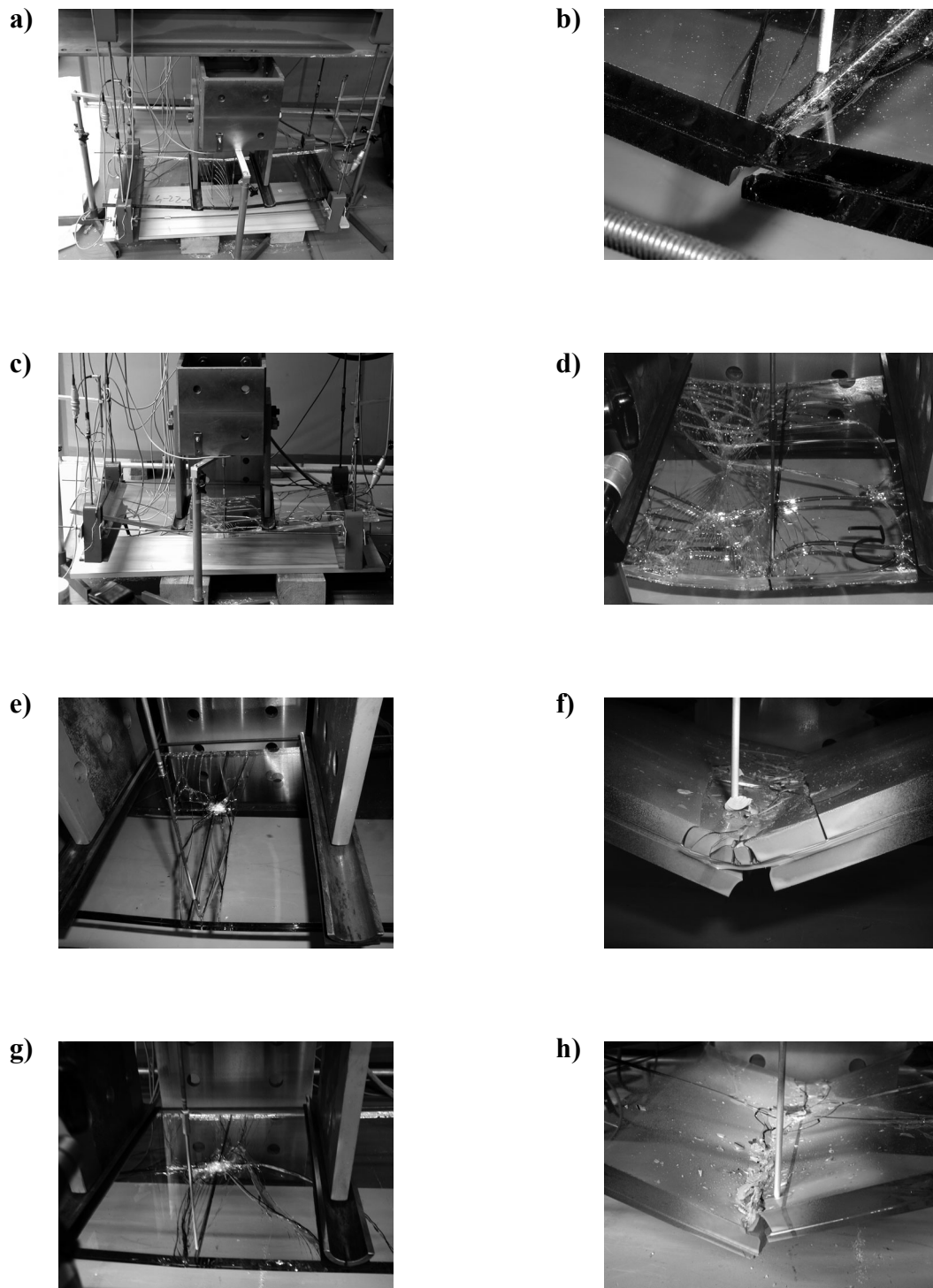




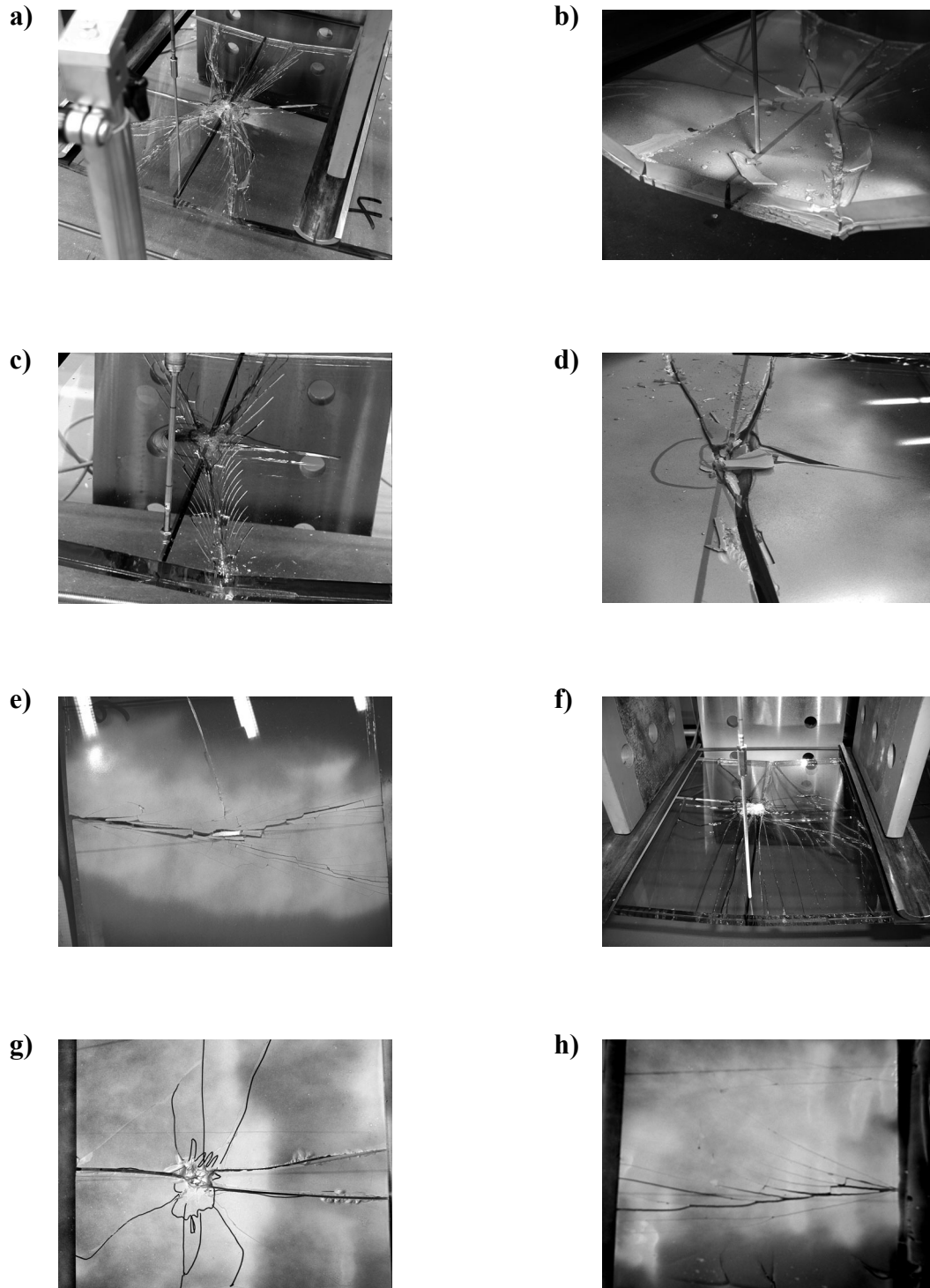
*Bild 3.21 VSG-Scheiben im Zustand II, obere Glasschicht durch Stahlkugel gebrochen;  
 (a) und (b) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_5, Risse verzweigen sich am Rand,  
 (c) und (d) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_6, vereinzelte Risse in der gesamten VSG-Scheibe,  
 (e) und (f) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_7, vereinzelte Risse in der gesamten VSG-Scheibe,  
 (g) und (h) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_8, Risse verzweigen sich am Rand.*



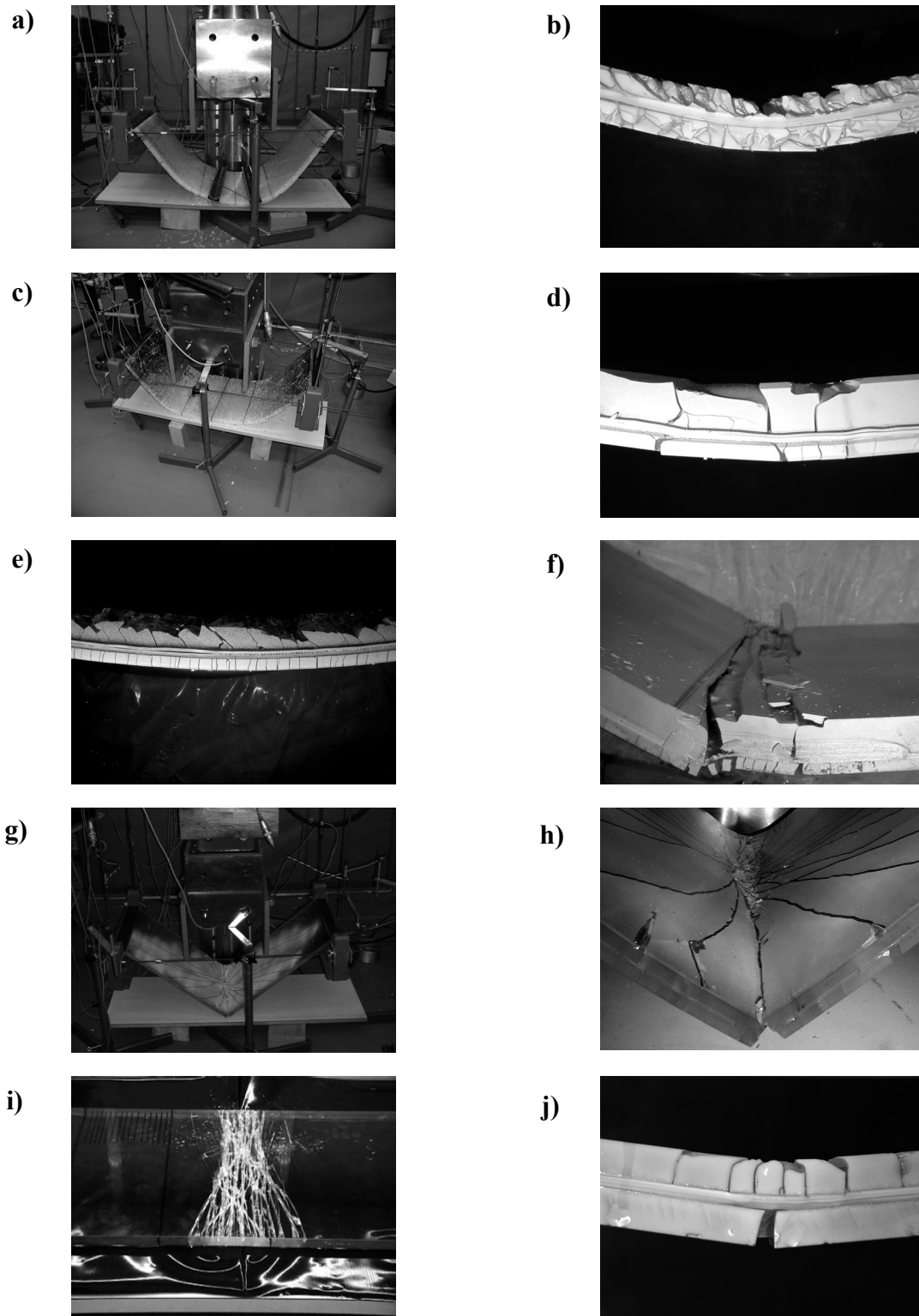
*Bild 3.22 VSG-Scheiben im Zustand III;  
(a) und (b) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_6, senkrechte Fliessgelenklinie,  
(c) bis (e) Versuchskörper 4S\_TV\_G\_24\_8, diagonale, vom oberen Rand ausgehende Fliessgelenklinie,  
(f) Versuchskörper 4S\_FLG\_21\_3, grosse Durchbiegungen infolge von Kriechen,  
(g) Versuchskörper 4S\_FLG\_21\_3, teils senkrecht zu den Längsseiten verlaufende und teils in zwei diagonale Linien gesplittene Fliessgelenklinie,  
(h) Versuchskörper 4S\_FLG\_21\_3, muschelförmige Absplitterungen an der Aussenseite der oberen Glasschicht.*



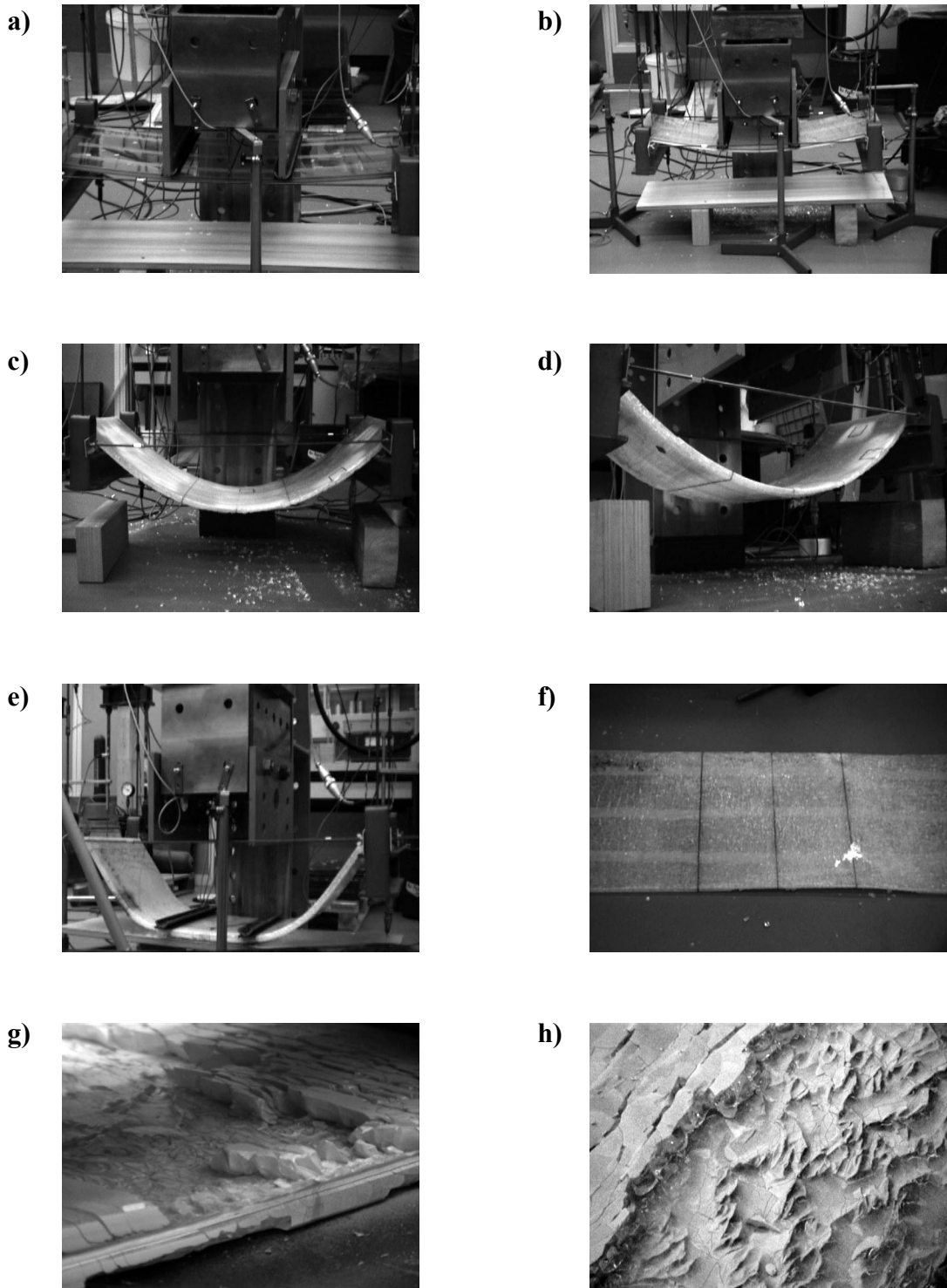
**Bild 3.23** VSG-Scheiben im Zustand III;  
 (a) und (b) Versuchskörper 4S\_FLG\_22\_6, Fließgelenkbildung über der eingeritzten Kerbe,  
 (c) und (d) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_7, diagonale Fließgelenklinien,  
 (e) und (f) Versuchskörper 4S\_FLG\_21\_1, senkrecht zu den Längsseiten verlaufende Fließgelenklinie,  
 (g) und (h) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_1, Absplitterung der Glasschicht und anschliessendes Reißen der Folie.



*Bild 3.24 VSG-Scheiben im Zustand III;  
(a) und (b) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_2, diagonale Fließgelenklinien mit flachen und länglichen Abplatzungen an der Aussenseite der oberen Glasschicht,  
(c) bis (e) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_3, senkrecht und teilweise diagonal verlaufende Fließgelenklinien, grosse Bruchstücke an der Initialbruchstelle,  
(f) bis (h) Versuchskörper 4S\_FLG\_22\_8, senkrecht zu den Längsseiten verlaufende Fließgelenklinien, Abplatzungen an der Initialbruchstelle.*



**Bild 3.25** VSG-Scheiben im Zustand III;  
 (a) und (b) Versuchskörper 4S\_ESG\_10\_1, Resttragfähigkeit nicht vorhanden,  
 (c) Versuchskörper 4S\_TVG\_23\_1, Resttragfähigkeit nicht vorhanden,  
 (d) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_1, Querschnitt nach dem Kollaps,  
 (e) Versuchskörper 4S\_TVG\_24\_5, Querschnitt nach dem Kollaps,  
 (f) Versuchskörper 4S\_FLG\_20\_6, Absplitterungen entlang der Fliessgelenklinie,  
 (g) und (h) Versuchskörper 4S\_FLG\_11\_3, Zerreißen der Folie,  
 (i) und (j) Versuchskörper 4S\_FLG\_11\_1, Resttragfähigkeit nicht vorhanden.



*Bild 3.26 Versuchskörper 4S\_ESG\_10\_7 und 8 mit GFK-Einlage;  
(a) Belastung im Zustand I,  
(b) Belastung im Zustand II,  
(c) und (d) grosse Durchbiegungen im Zustand III,  
(e) Versuchskörper aus ESG ohne GFK-Einlage mit sofortigem Kollaps nach Erreichen der Traglast,  
(f) bis (h) ausgebauter Versuchskörper nach dem Vierpunktbiegeversuch, Bruchstücke sind abgebrochen und heruntergefallen.*

### 3.6.12 Markierungen der Bruchbilder

Die Bruchbilder der Versuchsserien 4S\_FLG\_11, 4S\_ESG\_10, 4S\_FLG\_20\_6 bis 8, 4S\_FLG\_22\_1 bis 4, 4S\_TVG\_23\_1 bis 4 und 4S\_TVG\_24\_1 bis 4 wurden hinsichtlich der Anzahl und Form der Bruchstücke untersucht (siehe Bild 3.27a bis l und vgl. Tabellen 3.21 und 3.22). Dabei wurden beide Glasschichten jeder VSG-Scheibe an der Aussenseite markiert. Die Bruchstücksanzahl und -form sind vom Glastyp abhängig.

#### 3.6.12.1 Versuchskörper aus FLG (siehe Bild 3.27a bis d)

Die Anzahl der Bruchstücke in der vorgezeichneten quadratischen Markierung (Nr. 2 in Bild 3.8) variierte zwischen 4 und 16. Von der Initialbruchstelle entsprangen wenige radiale Risse, die sich senkrecht zu den angrenzenden Rändern fortsetzten. Deshalb entstanden Bruchstücke senkrecht zu den beiden Längsseiten des Versuchskörpers. Die längsten abgefallenen Bruchstücke hatten eine Länge von 14 cm und eine Breite von 3 cm. An der Initialbruchstelle waren kleine muschelförmige Absplitterungen zu erkennen. Die Bruchstücke waren länglich und ihre Kanten scharf.

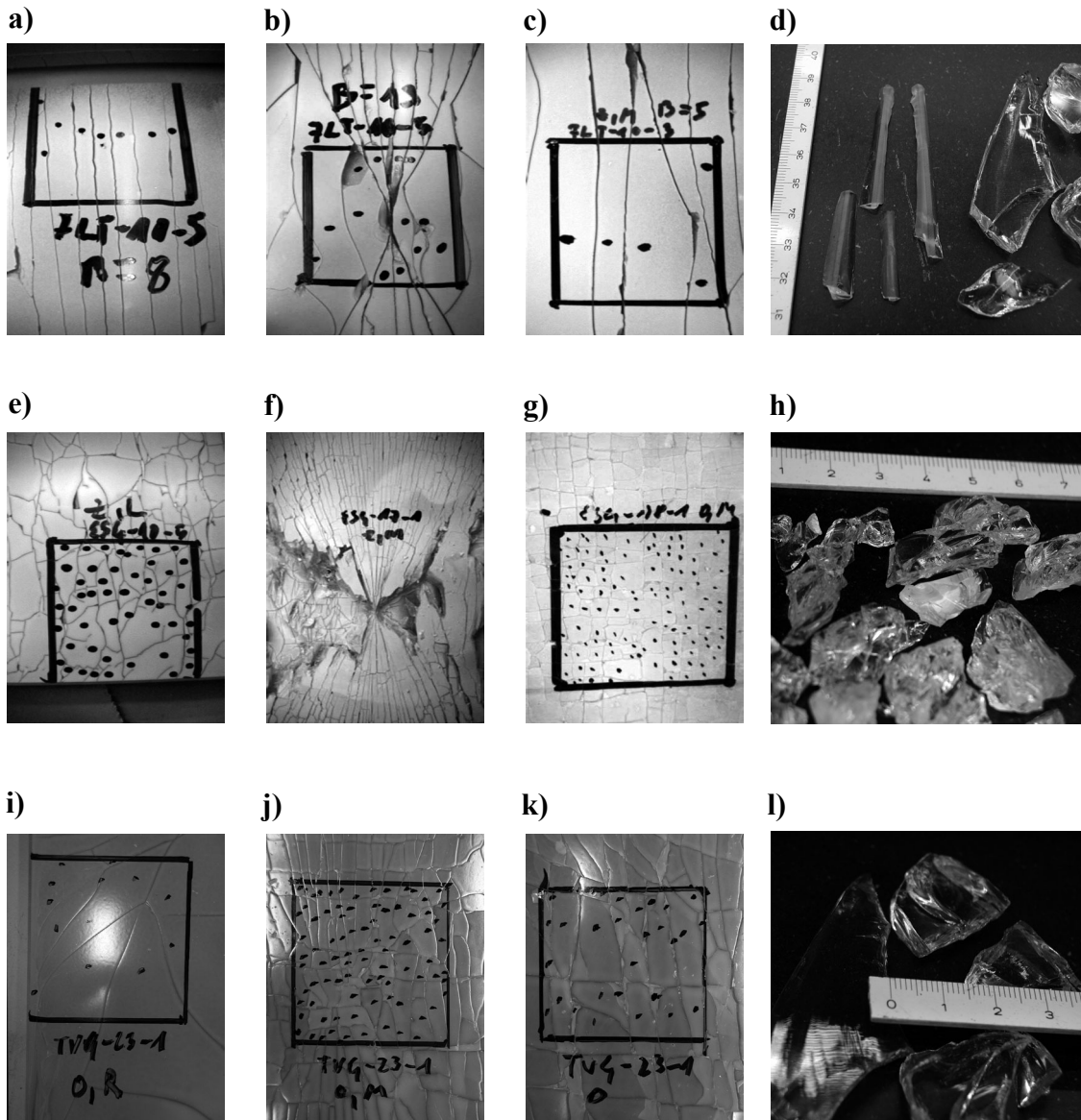
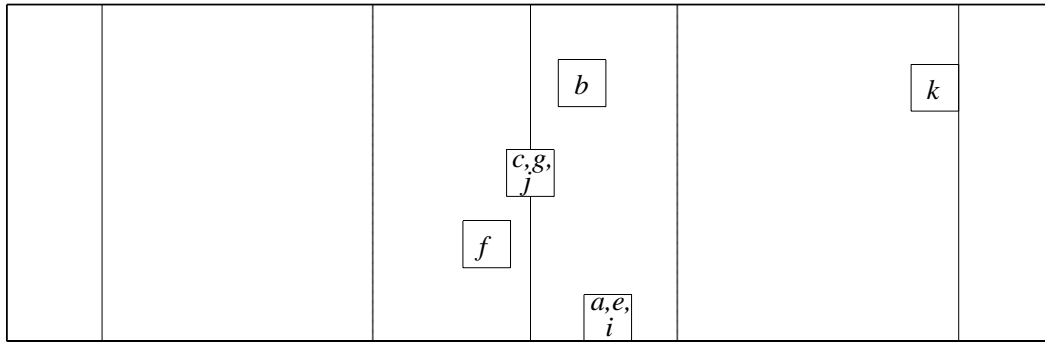
#### 3.6.12.2 Versuchskörper aus ESG (siehe Bild 3.27e bis h)

Die Anzahl der Bruchstücke in der Markierung (Nr. 2 in Bild 3.8) variierte zwischen 30 und 89. In Feldmitte zwischen den beiden festen Auflagern konnten bis zu 120 Bruchstücke gezählt werden. Von der Initialbruchstelle entsprangen radiale, längliche Risse. Diese wurden von zahlreichen tangentialen Rissen um die Initialbruchstelle gekreuzt. Die Bruchstücke waren wegen der geringen Grösse nicht zählbar. Die abgefallenen Bruchstücke hatten eine maximale Länge und Breite von 2 cm. An der Initialbruchstelle entstanden grosse freie Flächen, wo die Bruchstücke abgesplittert waren und sich von der PVB-Folie getrennt hatten. Die Kanten der Bruchstücke waren nicht scharf. Die Bruchstücke konnten mit den Fingern in weitere kleine Bruchstücke zerdrückt werden.

#### 3.6.12.3 Versuchskörper aus TVG (siehe Bild 3.27i bis l)

TVG ist weniger vorgespannt als ESG, deshalb ist die Anzahl der Bruchstücke in der Markierung (Nr. 2 in Bild 3.8) mit 7 bis 17 Stück nicht so hoch wie bei VSG-Scheiben aus ESG. In der Feldmitte zwischen den beiden festen Auflagern konnten in der quadratischen Markierung bis zu 70 Bruchstücke gezählt werden. Von der Initialbruchstelle entsprangen radiale Risse, die sich zu weiteren Rissen über die gesamte VSG-Scheibe ausbreiteten. An der Initialbruchstelle wurden wieder kleine muschelförmige Absplitterungen beobachtet. Die Bruchstücke hatten eine maximale Länge und Breite von 5 cm. Die Kanten der Bruchstücke waren nur vereinzelt scharf und die Bruchstücke konnten nicht mit den Händen zerdrückt werden.

Da die restlichen Versuchskörper mithilfe eines Stosses oder an der eingeritzten Kerbe geschädigt wurden, waren nur die unteren Glasscheiben markiert worden.



**Bild 3.27** Markierung der Bruchbilder;  
 (a) bis (d) Versuchskörper 4S\_FLG\_11\_5, untere Glasschicht am Rand, obere Glasschicht an der Initialbruchstelle, obere Glasschicht im Feld, abgelöste Bruchstücke,  
 (e) bis (h) Versuchskörper 4S\_ESG\_10\_5, untere Glasschicht am Rand, obere Glasschicht an der Initialbruchstelle, obere Glasschicht im Feld, abgelöste Bruchstücke,  
 (i) bis (l) Versuchskörper 4S\_TVG\_23\_1, untere Glasschicht am Rand, obere Glasschicht im Feld, obere Glasschicht neben dem rechten äusseren Auflager, abgelöste Bruchstücke.



Versuchskörper	Untere Glasschicht			Obere Glasschicht		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
4S_ESG_10_1	51	61	97	42	39	85
4S_ESG_10_2	34	77	86	30	30	151
4S_ESG_10_3	29	68	70	37	37	154
4S_ESG_10_4	36	89	118	35	51	112
4S_ESG_10_5	28	52	133	42	66	132
4S_ESG_10_6	44	71	99	41	55	121
4S_ESG_10_7	32	82	126	49	78	134
4S_ESG_10_8	49	62	132	61	44	144
<i>Mittelwerte</i>	<b>37.9</b>	<b>70.3</b>	<b>107.6</b>	<b>42.1</b>	<b>50</b>	<b>129.1</b>
4S_FLG_11_1	0	6	13	0	11	23
4S_FLG_11_2	0	7	14	0	5	16
4S_FLG_11_3	0	6	10	0	5	12
4S_FLG_11_4	0	5	11	0	14	14
4S_FLG_11_5	0	7	12	0	8	10
4S_FLG_11_6	0	9	9	0	10	16
4S_FLG_11_7	0	5	8	0	7	18
4S_FLG_11_8	0	10	10	0	8	12
<i>Mittelwerte</i>	<b>0</b>	<b>6.9</b>	<b>10.9</b>	<b>0</b>	<b>8.5</b>	<b>15.1</b>
4S_FLG_20_1	0	5	8	-	-	-
4S_FLG_20_2	0	7	9	-	-	-
4S_FLG_20_3	0	6	10	-	-	-
4S_FLG_20_4	0	4	7	-	-	-
4S_FLG_20_5	0	7	6	-	-	-
4S_FLG_20_6	0	9	9	0	7	9
4S_FLG_20_7	0	8	8	0	6	7
4S_FLG_20_8	0	6	7	0	8	5
<i>Mittelwerte</i>	<b>0</b>	<b>6.5</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>7</b>

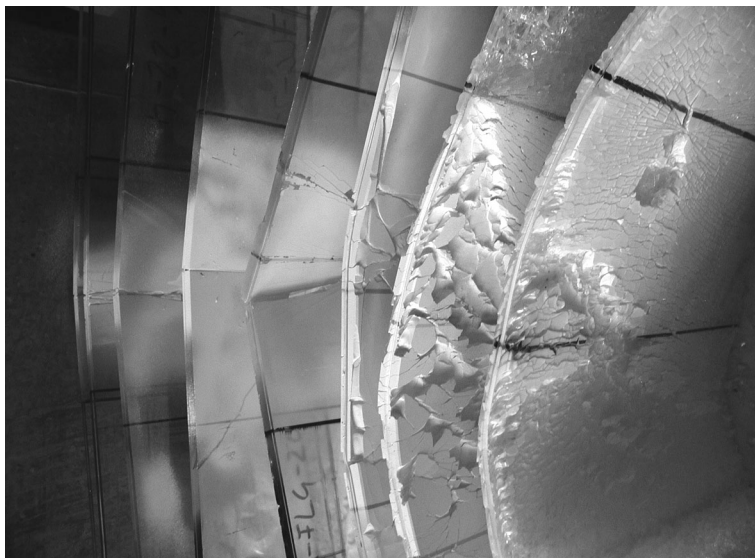
Tabelle 3.21 Anzahl der Bruchstücke in den Markierungen gemäss Bild 3.8 und Mittelwerte.

Vierpunktbiegeversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

Versuchskörper	Untere Glasschicht			Obere Glasschicht		
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
4S_FLG_21_1	0	7	10	-	-	-
4S_FLG_21_2	0	10	13	-	-	-
4S_FLG_21_3	0	14	16	-	-	-
4S_FLG_21_4	0	16	11	-	-	-
4S_FLG_21_5	0	12	9	-	-	-
4S_FLG_21_6	0	9	12	-	-	-
4S_FLG_21_7	0	11	14	-	-	-
4S_FLG_21_8	0	13	12	-	-	-
<b>Mittelwerte</b>	<b>0</b>	<b>12.1</b>	<b>12.4</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
4S_FLG_22_1	0	6	11	0	7	12
4S_FLG_22_2	0	7	10	0	8	10
4S_FLG_22_3	0	9	8	0	10	7
4S_FLG_22_4	0	10	7	0	6	8
4S_FLG_22_5	0	12	6	-	-	-
4S_FLG_22_6	0	8	9	-	-	-
4S_FLG_22_7	0	7	12	-	-	-
4S_FLG_22_8	0	9	10	-	-	-
<b>Mittelwerte</b>	<b>0</b>	<b>8.5</b>	<b>9.1</b>	<b>0</b>	<b>7.8</b>	<b>9.3</b>
4S_TVG_23_1	28	7	86	30	12	71
4S_TVG_23_2	32	10	78	32	9	82
4S_TVG_23_3	17	9	80	19	11	59
4S_TVG_23_4	25	11	95	25	15	88
4S_TVG_23_5	33	15	62	-	-	-
4S_TVG_23_6	21	12	54	-	-	-
4S_TVG_23_7	27	13	71	-	-	-
4S_TVG_23_8	20	17	77	-	-	-
<b>Mittelwerte</b>	<b>25.4</b>	<b>11.8</b>	<b>75.4</b>	<b>26.5</b>	<b>11.8</b>	<b>75</b>
4S_TVG_24_1	33	8	92	29	7	95
4S_TVG_24_2	30	16	85	36	9	81
4S_TVG_24_3	25	14	71	27	11	61
4S_TVG_24_4	41	10	88	24	13	75
4S_TVG_24_5	26	9	72	-	-	-
4S_TVG_24_6	29	11	76	-	-	-
4S_TVG_24_7	33	7	91	-	-	-
4S_TVG_24_8	19	15	73	-	-	-
<b>Mittelwerte</b>	<b>29.5</b>	<b>11.3</b>	<b>81</b>	<b>29</b>	<b>10</b>	<b>78</b>

Tabelle 3.22 Anzahl der Bruchstücke in den Markierungen gemäss Bild 3.8 und Mittelwerte.

### 3.6.13 Zusammenstellung der Versuchskörper nach dem Versuch



*Bild 3.28 Vergleich der Krümmungen gebrochener VSG-Scheiben, in beiden Bildern von links nach rechts;  
zwei VSG-Scheiben aus FLG mit Querschnittstyp I,  
eine VSG-Scheibe aus FLG mit Querschnittstyp II,  
zwei VSG-Scheiben aus FLG mit Querschnittstyp III,  
zwei VSG-Scheiben aus TVG mit Querschnittstyp III und I,  
eine VSG-Scheibe aus ESG mit Querschnittstyp I.*

## **3.7 Schlussfolgerungen aus den Vierpunktbiegeversuchen**

### **3.7.1 Last-Verformungsverhalten**

Im Zustand I verhält sich eine zweiseitig frei drehbar gelagerte VSG-Scheibe annähernd linear elastisch, bis die Traglast erreicht ist.

Der Glastyp (Vorspanngrad) beeinflusst die Höhe der Trag- und Resttraglasten in allen drei Zuständen massgeblich.

Im Zustand I haben VSG-Scheiben mit unterschiedlichen Glasschichtdicken aber gleichen Gesamtdicken eine höhere Tragfähigkeit als VSG-Scheiben mit einem symmetrischen Querschnitt.

Im Zustand II ist das Last-Verformungsverhalten nicht mehr linear elastisch. Mit der Entstehung und Ausbreitung weiterer Risse in der schon gebrochenen Glasschicht ist das Verhalten nur noch teilweise linear.

Der Kollaps einer VSG-Scheibe im Zustand III ist primär darauf zurückzuführen, dass die Glasbruchstücke der oberen Sandwichschicht keine Druckkräfte mehr übertragen können. Folglich kann auch die Zwischenschicht keine Zugkräfte aufnehmen. Die VSG-Scheibe fällt von den Auflagern herunter und die Folie zerreißt an den Kanten der losgelösten Glasstücke.

VSG-Scheiben aus ESG im Zustand III versagen sofort. Eine Wiederbelastung der VSG-Scheibe im Vierpunktbiegeversuch ist daher nicht möglich.

Bei VSG-Scheiben aus ESG mit einer GFK-Einlage zeigte sich jedoch, dass mit veränderter Zwischenschicht ein sofortiges Versagen vermieden werden kann.

Die Resttragfähigkeit im Zustand III der VSG-Scheiben aus TVG oder FLG kann mit einer dickeren Zwischenschicht und mit asymmetrischen Querschnittsabmessungen erheblich gesteigert werden.

### **3.7.2 Bruchbilder**

Das Bruchbild einer zweiseitig gelagerten VSG-Scheibe wird durch den Vorspanngrad und die Art der Belastung beeinflusst.

Die Bruchbilder aus Zustand I und II beeinflussen massgeblich die Resttragfähigkeit im Zustand III.

VSG-Scheiben aus ESG brechen, unabhängig vom Art und Ort der Belastung, auf ihrer ganzen Länge und Breite. Die Bruchstücke tendieren zu quadratischen Formen. Ihre

Grösse variiert über die Länge der Scheibe. Die Bruchstücksgrösse wird mit zunehmender Entfernung von der Initialbruchstelle grösser.

Bei TVG-Scheiben ist die Anzahl der Bruchstücke nicht so hoch wie bei ESG-Scheiben. Die Bruchstücksgrösse und -form sind abhängig von der Belastung und der Entfernung zur Initialbruchstelle.

Das Bruchbild einer FLG-Scheibe ist auf wenige Risse limitiert und örtlich beschränkt.

Infolge einer stossartigen Belastung versagt die Glasschicht, welche sich direkt am Aufprallort befindet.

VSG-Scheiben, die in einem Vierpunktbiegeversuch im Zustand I belastet wurden, versagten an der *schwächsten* Stelle. Diese Stelle war nicht der Ort mit der rechnerisch höchsten Spannung (für die Berechnung wurde von einem konstanten ideellen Querschnitt ausgegangen), sondern der Ort, an welchem infolge Mikrorissbildung die lokale Spannung am höchsten war.

Im Zustand II erzeugt die gebrochene Glasschicht durch ihre Verlängerung eine Vorkrümmung und damit eine Durchbiegung der unbelasteten VSG-Scheibe. VSG-Scheiben aus ESG zeigten wegen dem hohen Eigenspannungszustand die grösste Verlängerung. Deshalb wurden bei diesen Versuchskörpern die grössten Durchbiegungen gemessen.

### **3.7.3 Fliessgelenke**

Bei VSG-Scheiben war nur dann eine Resttragfähigkeit im Zustand III vorhanden, wenn sich Fliessgelenklinien ausbilden konnten.

Alle Versuchskörper aus TVG und FLG, die im Zustand I durch einen Stoss beschädigt worden waren und dann in Vierpunktbiegeversuchen gebrochen wurden, bildeten Fliessgelenklinien aus.

Versuchskörper mit Querschnittstyp I, welche in einem Vierpunktbiegeversuch, sowohl im Zustand I als auch im Zustand II, gebrochen wurden, wiesen keine Fliessgelenklinien auf.

Versuchskörper, welche Fliessgelenke nahezu senkrecht zur Längsseite ausbildeten, hatten die kleinste Resttragfähigkeit im Zustand III.



## 4 Plattenversuche mit Verbundsicherheitsglasscheiben

### 4.1 Prinzip

Für die Untersuchung des Trag- und Resttragverhaltens von vierseitig frei drehbar gelagerten Scheiben aus Verbundsicherheitsglas bei Biege- und Schlagbeanspruchung wurden Biege- und Stossversuche durchgeführt. Die unterschiedlichen Bruchbilder in den drei Bruchzuständen wurden aufgenommen. Die entstandenen Fließgelenkmechanismen und die dazugehörigen Resttraglasten wurden untersucht.

### 4.2 Versuchsprogramm

Die aus den Vierpunktbiegeversuchen gesammelten Erfahrungen (vgl. Kapitel 3) erlaubten, für die Plattenversuche mehrere Vereinfachungen einzuführen. Die Untersuchung beschränkte sich auf VSG-Scheiben aus FLG mit Querschnittstyp I. Die Anzahl der Versuchskörper reduzierte sich so auf 16 Stück. Durch zwei unterschiedliche Belastungsarten im Zustand I sollte der Einfluss verschiedener Bruchbilder auf die Trag- und Resttraglasten bestimmt werden. Die Versuchsanlage für die Plattenversuche konnte aus der schon aufgebauten Vierpunktbiegeversuchsanordnung übernommen und verändert werden. Folgendes Bezeichnungsschema wurde für die jeweiligen Versuchskörper gewählt:

#### 1P\_FLG\_25\_2

Der Ausdruck "1P\_FLG" bezeichnet die Art des Versuchs (hier: Plattenbiegeversuch) und den eingesetzten Glastyp (hier: Floatglas FLG). Die nächste Zahl bezeichnet die Seriennummer (hier: 25) und die letzte Ziffer gibt die Nummer des Versuchs an. Aus der Tabelle 4.1 kann entnommen werden, wie die Versuchskörper abhängig vom Bruchzustand belastet wurden. Die Bezeichnung "Stoss" bedeutet, dass der Versuchskörper zuerst durch eine aufprallende Stahlkugel beschädigt und dann in gebrochenem Zustand II in die Versuchsanlage eingebaut wurde. Anschliessend wurden die Versuchskörper bis zum Bruch der noch intakt verbliebenen Glasschicht verformungsgesteuert belastet.

Im Zustand III waren zwei Gruppen von Versuchskörpern hinsichtlich ihrer weiteren Belastung zu unterscheiden: Die Versuchskörpern 1P\_FLG\_25\_1 bis 4 und

1P\_FLG\_26\_1 bis 4 der ersten Gruppe wurden sofort im Zustand III belastet. Bei den Versuchskörpern 1P\_FLG\_25\_5 bis 8 und 1P\_FLG\_26\_5 bis 8 der zweiten Gruppe wurden zunächst die Reststandzeit und die dabei auftretenden vertikalen Mittendurchbiegungen infolge des Kriechens der PVB-Folie gemessen. Anschliessend wurden die gleichen Versuchskörper nochmals in der Versuchsanlage bis zum Erreichen der Resttraglast belastet.

<i>Versuchskörper</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Belastung im Zustand I</i>	<i>Fallhöhe [cm]</i>	<i>Belastung im Zustand II</i>	<i>Belastung im Zustand III</i>
<i>1P_FLG_25_1-4</i>	4	Verformungs-gesteuert	-	Verformungs-gesteuert	Verformungs-gesteuert
<i>1P_FLG_26_1</i>	4	Stoss	140	Verformungs-gesteuert	Verformungs-gesteuert
<i>1P_FLG_26_2</i>		Stoss	160	Verformungs-gesteuert	Verformungs-gesteuert
<i>1P_FLG_26_3</i>		Stoss	150	Verformungs-gesteuert	Verformungs-gesteuert
<i>1P_FLG_26_4</i>		Stoss	145	Verformungs-gesteuert	Verformungs-gesteuert
<i>1P_FLG_25_5-8</i>	4	Verformungs-gesteuert	-	Verformungs-gesteuert	Kriechen und verformungsgesteuert
<i>1P_FLG_26_5</i>	4	Stoss	170	Verformungs-gesteuert	Kriechen und verformungsgesteuert
<i>1P_FLG_26_6</i>		Stoss	145	Verformungs-gesteuert	Kriechen und verformungsgesteuert
<i>1P_FLG_26_7</i>		Stoss	165	Verformungs-gesteuert	Kriechen und verformungsgesteuert
<i>1P_FLG_26_8</i>		Stoss	140	Verformungs-gesteuert	Kriechen und verformungsgesteuert

Tabelle 4.1 *Versuchsprogramm.*

## 4.3 Versuchskörper

### 4.3.1 Herstellung und Verarbeitung der Platten aus Verbundsicherheitsglas

Das Herstellverfahren der Gläser sowie der anschliessende Laminierungsprozess entsprechen der Beschreibung in Kapitel 3.3.1. Lediglich Abmessungen und Anzahl der Versuchskörper waren verschieden (siehe Bild 3.1f).

### 4.3.2 Abmessungen der Versuchskörper

Die quadratischen Versuchskörper hatten eine Länge und eine Breite von je 1100 mm (siehe Bild 4.1). Es wurde der Querschnittstyp I mit einem symmetrischen Aufbau der Glasschichten verwendet.



Wie in Kapitel 3.3.2 erläutert, können die tatsächlichen Glasdicken von den Herstellerangaben abweichen. Bei Versuchskörpern der Vierpunktbiegeversuche wurden die Dicken gemessen und der Mittelwert der Gesamtdicke  $a_M$  bestimmt. Wie erwartet war die tatsächliche Gesamtquerschnittsdicke kleiner als die geplante Gesamtdicke (vgl. dazu Tabelle 4.2). Die Abweichungen stimmen gut mit solchen der Versuchskörper aus Vierpunktbiegeversuchen überein. Der maximale Unterschied der Gesamtdicken innerhalb eines Versuchskörpers betrug bis zu 0.16 mm.

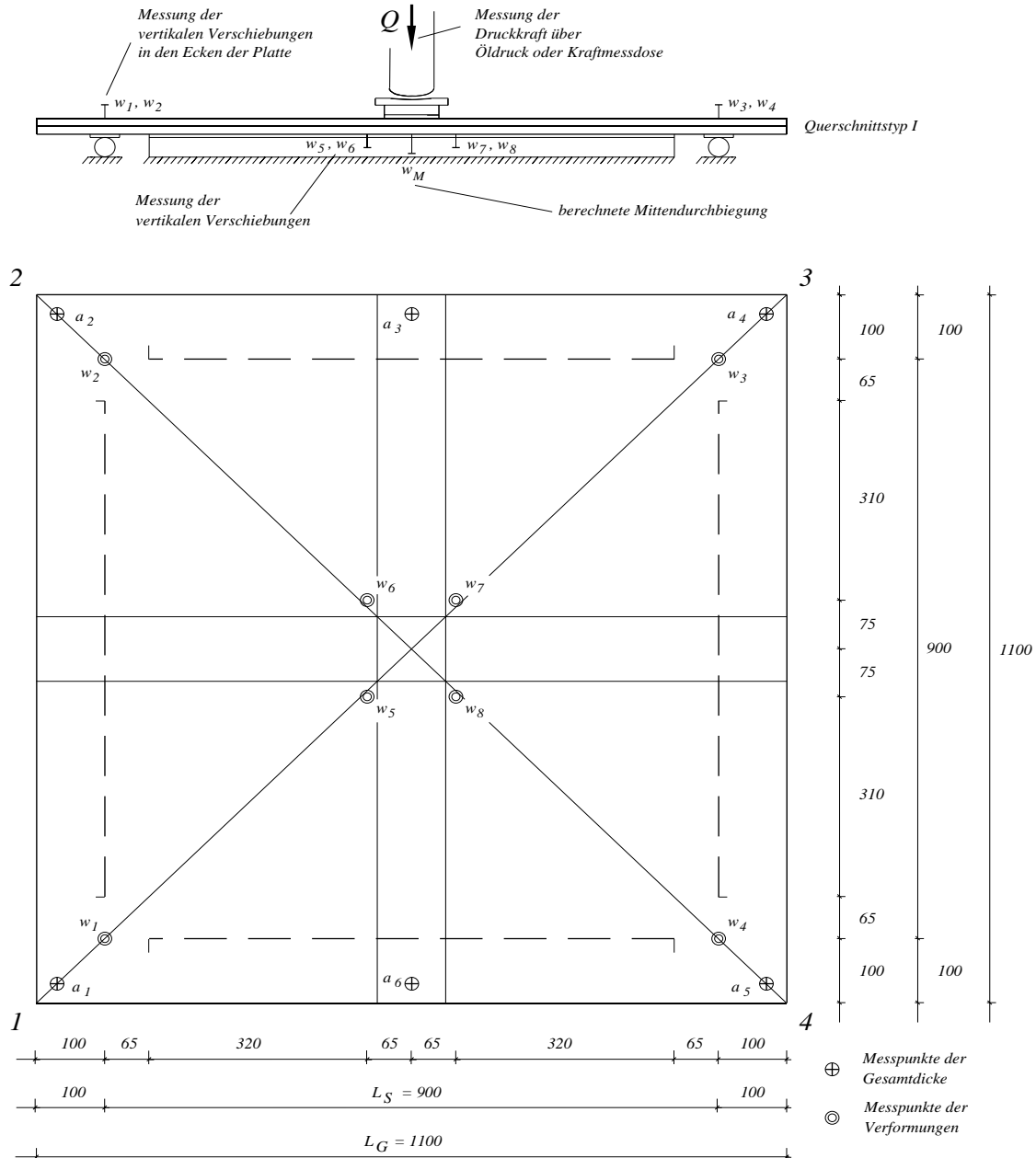


Bild 4.1 Längen- und Breitenabmessungen des Versuchskörpers [mm], inkl. der eingezeichnete Markierungen und Messstellen am Versuchskörper.

### 4.3.3 Markierung der Versuchskörper

Die Beschriftungen der Versuchskörper und die Farbwahl der Linienmarkierungen wurden wie bei den Versuchskörpern der Vierpunktbiegeversuche ausgeführt (vgl.

Querschnittstyp	Anzahl	Nennwert $a_N$ [mm]	Zulässiger Toleranzbereich [mm]	Gemittelte Gesamtdicke $a_M$ [mm]	Maximale und minimale Gesamtdicke [mm]	Abweichung vom Nennwert [%]
I	16	17.52	$8 \pm 0.3 + 1.52 + 8 \pm 0.3$ = 16.92 - 18.12	17.21 (0.071)	17.45 17.06	1.77

Tabelle 4.2 Erwartete Dicken und Toleranzbereiche des Querschnittstyps I, Mittelwerte (Standardabweichung) der tatsächlich gemessenen Gesamtdicken.

Kapitel 3.3.3). Für die exakte Positionierung des Versuchskörpers in der Versuchsanlage und für eine nachträgliche Lokalisierung der Risse wurden parallel zu den Probenkanten die vier Auflagerlinien eingezeichnet. Damit sich die Hartgummiauflage für die Lasteinleitung genau in der Plattenmitte befand, wurden zwei Diagonalen eingezeichnet. Zwei weitere Streifen, welche durch die Mitte und senkrecht zu den Kanten eingezeichnet waren, sollten die richtige Anordnung der induktiven Wegaufnehmer in der Mitte der Probe garantieren (siehe Bild 4.1).

Die Risskanten bestimmter Versuchskörper wurden während der Versuche im Zustand II mit blaue Linien markiert. Auf diese Weise konnten Risse, Rissfortschritt sowie Absplitterungen der Glasoberfläche am Rissrand bei weiterer Belastung besser beobachtet werden.

#### 4.3.4 Versuchsanordnung

Die Anordnung der Versuchsanlage und die wichtigsten Abmessungen können aus den Bildern 4.2 und 4.3 entnommen werden. Die schon früher aufgebaute Versuchsanlage für die Vierpunktbiegeversuche wurde für die Plattenversuche umgebaut. Der untere kurz auskragende Stahlträger wurde entfernt und der obere auskragende Stahlträger tiefer gesetzt. An diesem Träger war der hydraulische Zylinder gelenkig angeschraubt. Der Zylinder wurde zunächst eingefahren, um beim Ausfahren die Belastung (Druckkraft) aufzubringen. Zwischen dem Presskolben und dem Versuchskörper befand sich eine quadratische Aluminiumplatte (Breite und Länge 80 mm) mit einer aufgeklebten Hartgummischicht der Shore-Härte A  $40 \pm 5$  [N 11]. Für die Zentrierung des Presskolbens wurde eine weitere quadratische Stahlplatte mit einer zentrischen Vertiefung eingepasst. Der Versuchskörper wurde so auf die vier Linienlager gelegt, dass zwischen den gegenüberliegenden Auflagern eine Stützweite  $L_S$  von 900 mm vorhanden war. Die Auflager aus Rundstahl bestanden aus Biegerollen  $\varnothing 30$  mm und hatten eine Länge von 770 mm. Da die Ecken der Platte während des Versuchs vertikal abhoben, war die Auflagerlänge kürzer als die Stützweite. Die Biegerollen lagen frei auf einem Stahlprofilrahmen, der aus vier Breitflanschträgern HEA 140 zusammengesetzt war. Der Rahmen wurde schliesslich auf zwei Trägern IPE 360 montiert.

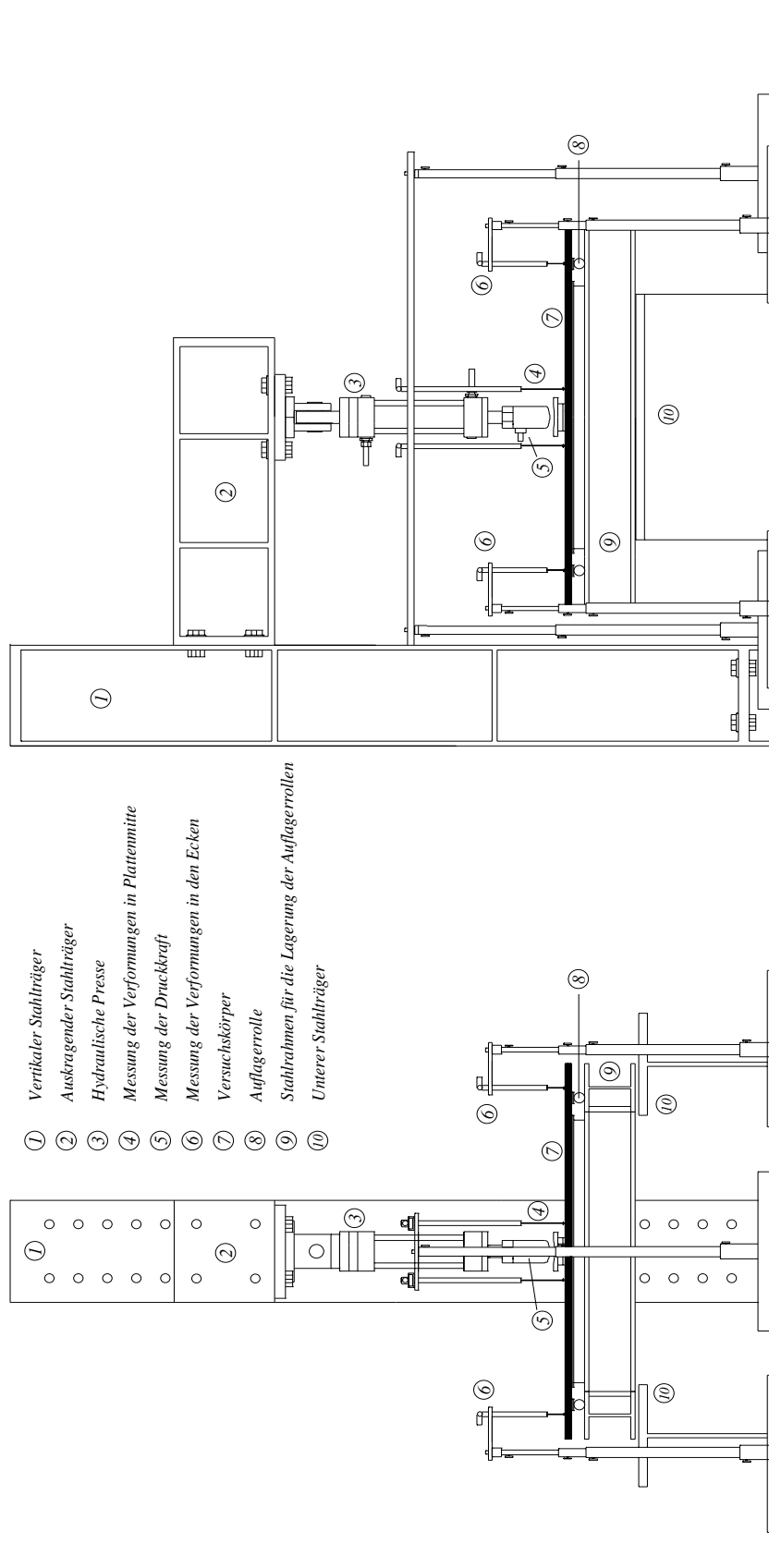
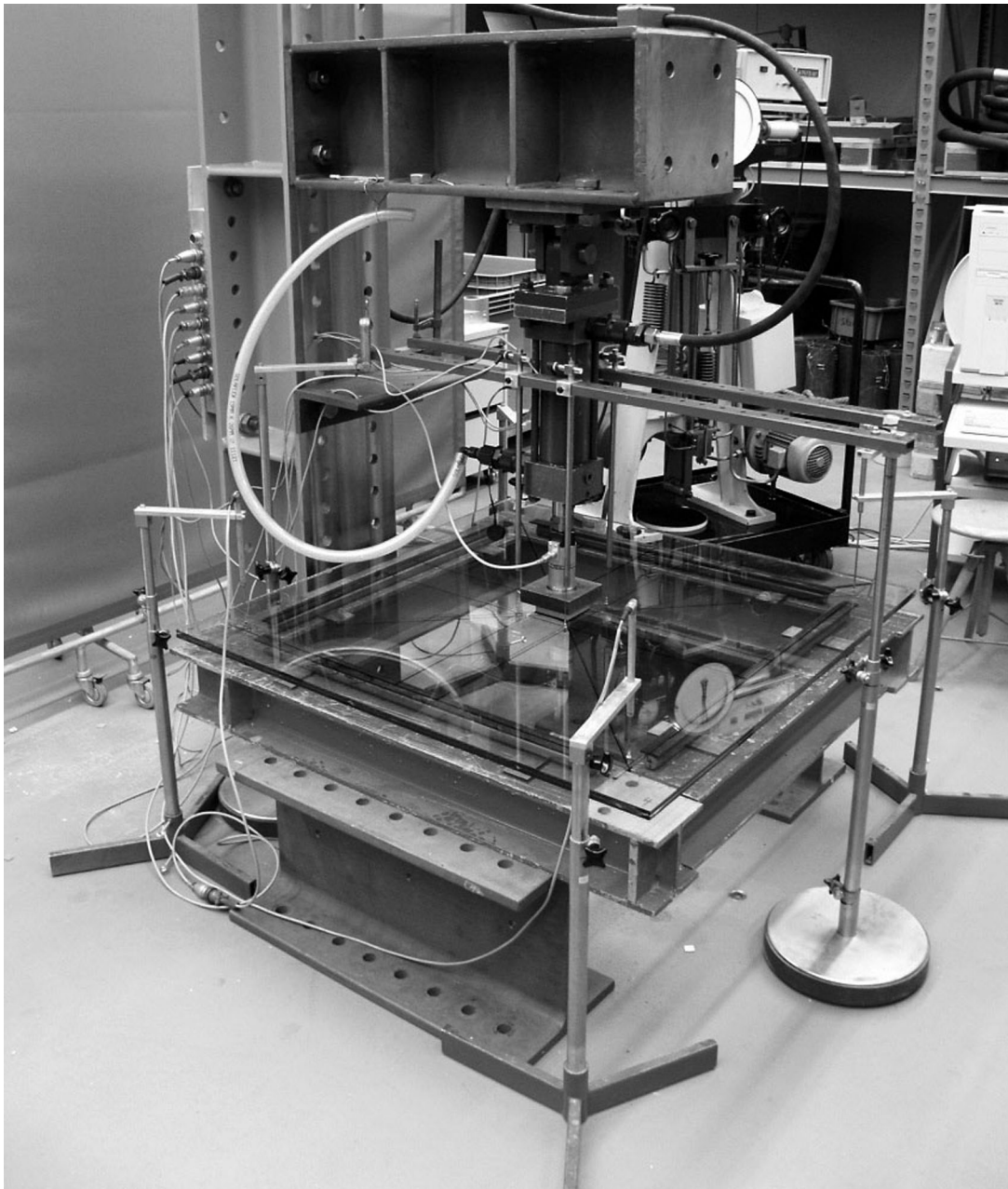
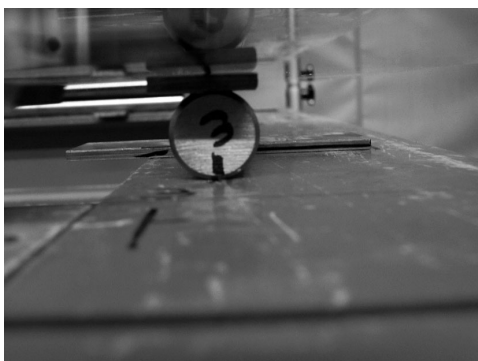


Bild 4.2 Versuchsaufbau für die Plattenversuche; Vorder- und Seitenansicht.

a)



b)



c)

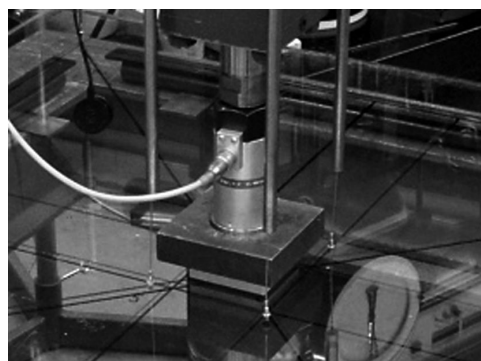


Bild 4.3 (a) Versuchseinrichtung für die Plattenversuche, (b) Auflagerkonstruktion bestehend aus einem Rundstahl und einer Hartgummi Auflage, (c) Lasteinleitung mit einer Hartgummi Auflage und zwei Metallplatten.

### 4.3.5 Kontinuierliche Messwerterfassung

Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Kräfte und der ausgewählten Verformungen wurden neun fest verdrahtete Messstellen eingesetzt (siehe Bilder 4.1, 4.2 und 4.3). Die Messungen wurden von einem Computer mit Abtastraten von 1-2 Hz je nach Belastungsgeschwindigkeit an einem Messverstärker ausgelöst. Die Messwerte wurden zur Versuchssteuerung und zu Kontrollzwecken direkt auf einem Bildschirm dargestellt und gleichzeitig in eine binäre Datenbasis exportiert.

Die Kraft  $Q$  wurde einerseits mit einem Flüssigkeitsdruckgeber am Pendelmanometer und andererseits mittels einer Kraftmessdose auf der Kolbenstange gemessen (siehe Bild 4.3c).

Die vier Durchbiegungen in der Plattenmitte sowie die vier vertikalen Verschiebungen an den Plattenecken bei den äusseren Auflagern wurden mit induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Die Messungen der Durchbiegungen dienten auch der Versuchssteuerung und -überwachung.

Wie in den Vierpunktbiegeversuchen wurde die Umgebungstemperatur mithilfe eines Bimetall-Temperaturfühlers bestimmt.

## 4.4 Versuchsdurchführung

### 4.4.1 Versuchsvorbereitung

Acht Versuchskörper wurden im Zustand I in der Versuchsanlage geprüft. Sie wurden so eingebaut, dass die rote Beschriftung auf der oberen Seite zu sehen war. Anschliessend wurden alle acht induktiven Wegaufnehmer oberhalb des Versuchskörpers positioniert. Es folgte der Nullabgleich aller Wegaufnehmer und der Kraftmessdose. Der Presskolben des hydraulischen Zylinders wurde heruntergefahren und auf die Lasteinleitungsplatte zentriert. Damit waren alle Messinstrumente für eine kontinuierliche Messung vorbereitet.

Da besonders bei den quadratischen Platten die unterschiedlichen Bruchbilder von Interesse waren, wurden die restlichen acht Versuchskörper mit einer Stahlkugel beschädigt. Auch hier wurde darauf geachtet, dass nur eine Glasschicht brach. Die Vorgehensweise entsprach dem in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Verfahren. Anschliessend wurden die Bruchbilder der Versuchskörper aufgenommen und die Platten im Zustand II in die Versuchsanordnung eingebaut.

#### **4.4.2 Versuchsaufbau**

Der Versuchsaufbau kann, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, in drei Phasen eingeteilt werden. Bei allen verformungsgesteuerten Belastungen in der Versuchseinrichtung betrug die Verformungsgeschwindigkeit 0.02 mm/s.

##### **Phase 1:**

Während der ersten Belastung wurde der Presskolben soweit ausgefahren bis der erste Bruch sich mit einem lauten Knall ankündigte. In diesem Moment wurde der Kolben sofort entlastet. Die verbleibende intakte Glasschicht presste den Kolben daher nach oben zurück. So konnte sichergestellt werden, dass nicht gleichzeitig beide Glasschichten versagten. In einem weiteren Schritt wurde der Kolben soweit hochgefahren, dass die Bruchbilder im Zustand II fotografiert und markiert werden konnten.

##### **Phase 2:**

Diese Phase begann mit der Wiederbelastung der VSG-Platte. Der Presskolben wurde soweit heruntergefahren bis die letzte intakte Glasschicht versagte. Anschliessend wurde der Presskolben entlastet und die Bruchbilder im Zustand III wurden untersucht. Die Versuchskörper der Serie 1P\_FLG\_26 wurden (ohne Phase 1 durchlaufen zu haben) in die Versuchsanlage eingebaut und wie oben beschrieben belastet (vgl. Tabelle 4.1).

##### **Phase 3:**

In dieser Phase wurde die VSG-Platte ein letztes Mal bis zum Kollaps beansprucht. Bei den Versuchskörpern 1P\_FLG\_25\_5 bis 8 und 1P\_FLG\_26\_5 bis 8 wurde jedoch vor der letzten Belastung noch das Kriechverhalten unter Eigengewicht beobachtet. Die Durchbiegungen wurden über eine Reststandzeit von 48 Stunden bestimmt (siehe Bild 4.13). Da auch nach dieser Reststandzeit keiner der Versuchskörper versagte, wurden die Versuchskörper mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit bis zum Erreichen der Resttraglast belastet. Die verschiedenen Bruchmechanismen wurden soweit wie möglich fotografiert. Nach dem Kollaps der Versuchskörper und dem Hochfahren des Presskolbens wurden die Versuchskörper aus der Versuchsanlage entfernt und die Bruchbilder nochmals ausgewertet.

### **4.5 Versuchsbeobachtung und erste Folgerungen**

#### **4.5.1 Phase 1**

Gegenüber den Vierpunktbiegeversuchen war aufgrund der Membranwirkung bei dünnen Platten nicht mit einem linear elastischen Verformungsverhalten zu rechnen. Neben den Biegemomenten in der Sandwichplatte tragen Normalkräfte bzw. Membrankräfte in der Systemebene ebenfalls zur Lastabtragung bei. Deshalb nahm mit steigenden Durch-

biegungen die Belastung überproportional zu (siehe Bild 4.8). Alle vier Plattenecken hoben sich zunächst gleich an. Der Sprödbbruch erfolgte ohne Ankündigung mit einem lauten Knall. Die gemittelte Traglast von 13.86 kN war mehr als viermal so hoch wie die Traglast der VSG-Scheiben aus FLG in Vierpunktbiegeversuchen (vgl. dazu Tabelle 3.5 und Tabelle 4.3).

Bei allen Versuchen, die in der Versuchsanlage eingebaut und in Phase 1 belastet wurden, versagte zuerst die untere Glasschicht. Wegen der Streuung der tatsächlichen Glasdicken und Glasfestigkeiten waren die Initialbrüche nicht exakt in der Plattenmitte, sondern traten in einem Umkreis von 117 mm auf (vgl. dazu Tabelle 4.4). Die entstandenen Bruchbilder der gesamten unteren Glasschicht wurden aufgenommen und vermessen. Die Traglasten der Versuchskörper der Serie 25, die ermittelte mittlere Traglast sowie die Standardabweichung können aus der Tabelle 4.3 entnommen werden.

Bei den Versuchskörpern der Versuchsserie 1P\_FLG\_26 wurden keine Traglasten im Zustand I ermittelt. Jedoch wurden die Bruchbilder der beschädigten Versuchskörper (durch Stahlkugel verursacht), aufgenommen (siehe Bild 4.15).

## 4.5.2 Phase 2

### 4.5.2.1 Bruchbilder der Versuchsserien 1P\_FLG\_25

Die Risse in den Versuchskörpern im Zustand II wurden zunächst nachgezeichnet. In den Zeichnungen sind die Risse vereinfacht als Geraden dargestellt (siehe Bilder 4.14a bis c). Alle Risse entsprangen radial vom Initialbruch und hörten entweder an der Kante der Platte auf oder endeten schon vorher im Plattenfeld. Für eine bessere Orientierung wurden die Ecken mit grossen Nummern beschriftet (siehe Bild 4.1) und die Anzahl der Risse auf jeder Hälfte des Seitenrandes der Platte angeschrieben.

Eine Platte kann bezüglich Rissverteilung in zwei Bereiche eingeteilt werden:

Zuerst wurden alle Risse in den Eckbereichen eingezeichnet. Die zwei äussersten durchgehenden Risse in jedem Eckbereich bildeten die Abgrenzung zum übrigen Teil der Platte. Risse, welche sich auf den Diagonalen der Platte befanden, endeten noch vor dem Erreichen der Kanten. Sie hatten annähernd die Form von Geraden. Seitlich der Diagonalen im Eckbereich tendierten die Risse dazu, von der Ecke abzuweichen und in die Mitte des Seitenrandes zu verlaufen. Dadurch wiesen diese Risse eine Krümmung auf.

Ausserhalb der Eckbereiche wurden ebenfalls die Risse bestimmt. Diese endeten alle vor dem Seitenrand, so dass die Koordinaten der Endpunkte gemessen wurden, damit später ein möglichst genaues Bruchbild nachgezeichnet werden konnte (siehe Bild 4.14).

#### 4.5.2.2 Bruchbilder der Versuchsserie 1P\_FLG\_26

Nach dem Stoss konnten zwei Arten von Bruchbildern beobachtet werden. Bis zu einer Fallhöhe von 145 cm verliefen zentrische Risse vom Bruchzentrum bis zum Rand. Dabei blieben nicht alle Risse gerade, sondern verliefen vor dem Erreichen der Kante in Richtung der anliegenden Ecke (siehe Bilder 4.15a und c).

Ab einer Fallhöhe von 165 cm reduzierte sich die Anzahl der zentrischen Risse von der Bruchstelle und ein Ring aus einzelnen Rissen konnte beobachtet werden (siehe Bild 4.15b). Der bestimmte durchschnittliche Radius dieser Ringe betrug 27 cm. Die radialen Risse waren annähernd Geraden, bis auf solche die sich seitlich an den Ecken befanden. Diese hatten eine umgekehrte Krümmung verglichen zu den Bruchbildern mit einer Fallhöhe bis zu 145 cm.

Bruchbilder, welche durch einen Stoss entstanden, bei dem die Fallhöhe zwischen 150 und 160 cm betrug, waren eine Kombination aus den zwei vorher angesprochenen Arten.

#### 4.5.2.3 Bleibende Durchbiegung

Zunächst konnten vor dem Belasten in Phase 2 bei der Versuchsserie 1P\_FLG\_25 bleibende Verformungen in der Plattenmitte festgestellt werden. Die Durchbiegungen der Versuchsserie 1P\_FLG\_26 waren jedoch gering (vgl. Tabelle 4.3).

#### 4.5.2.4 Belastung

Die Versuchskörper der Versuchsserie 1P\_FLG\_26 wurden nach dem Stossversuch im Zustand II in die Versuchsanlage eingebaut. Somit wurden alle vorhandenen VSG-Platten der Serie 1P\_FLG\_25 und 1P\_FLG\_26 in Phase 2 untersucht. Während der Wiederbelastung konnte das Risswachstum der bestehenden Risse sehr gut beobachtet werden, bevor die weitere Glasschicht versagte. Risse zwischen den Ecken, welche noch nicht zum Rand vorgedrungen waren, zeigten ein langsames Wachstum in Richtung des Rands. Dieses Wachstum konnte mit bloßem Auge beobachtet und mit einer Videokamera festgehalten werden. Zusätzlich wurden neu hinzukommende Risse in der gebrochenen Glasschicht sowohl während als auch nach dem Versuch festgestellt. Diese Beobachtungen lassen sich in den Last-Verformungskurven wiedererkennen. Auch hier war die Last-Verformungskurve nichtlinear und die Last nahm überproportional zur Durchbiegung zu. Anders als in Phase 1 waren die Kurven jedoch nicht glatt, die kleinen Sprünge wurden durch das schon erwähnte Risswachstum und durch die Rissbildung verursacht (siehe Bilder 4.9 und 4.10). Nach der abgeschlossenen Rissbildung versagte mit dem Erreichen der Resttraglast die letzte intakte Glasschicht. Der Bruch selber wurde wie in Phase 1 von einem lauten Knall begleitet. Die gemessenen Resttraglastwerte im Zustand II waren kleiner als diejenigen im Zustand I. Die entsprechenden Durchbiegungen beim Versagen im Zustand II waren jedoch höher als die korrespondierenden Durchbiegungen im Zustand I (vgl. Tabelle 4.3).



### 4.5.3 Phase 3

#### 4.5.3.1 Bleibende Durchbiegung

Zu Beginn der Phase 3 konnten bleibende Durchbiegungen bestimmt werden (siehe Bilder 4.11 und 4.12). Da alle Glasschichten gebrochen waren und die Zugspannungen in den Rissen nur über die PVB-Folie abgetragen werden konnten, wurden viel höhere bleibende Durchbiegungen gemessen als im Zustand II (vgl. Tabelle 4.3).

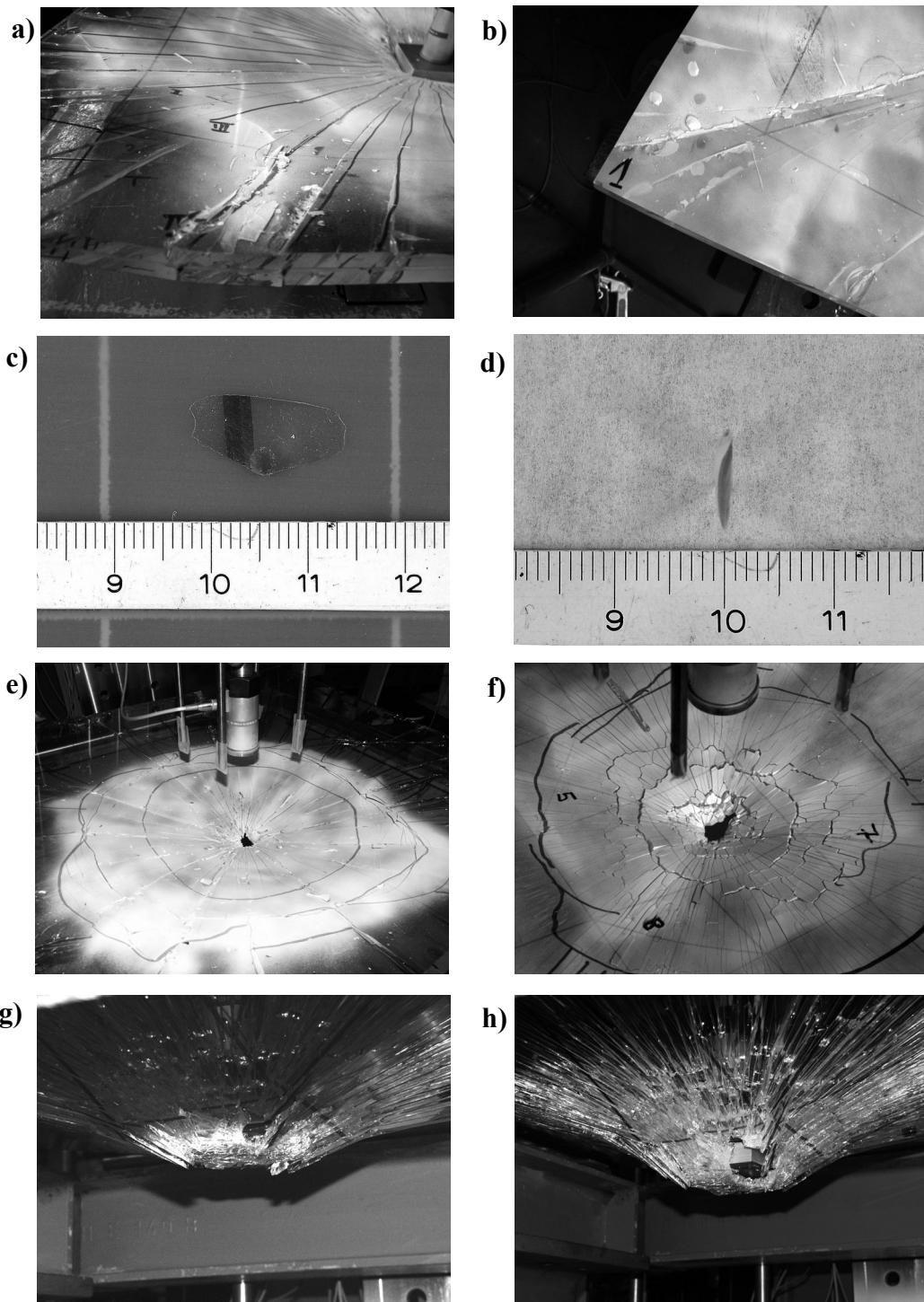
#### 4.5.3.2 Kriechen

Wie im Versuchsprogramm geschildert wurden zunächst bestimmte Versuchskörper nicht mehr mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit belastet, sondern es wurden nur die Durchbiegungen abhängig von der Zeit unter Eigengewicht bestimmt (siehe Bild 4.13). Da das Verformungsverhalten der PVB-Folie von der Belastungsdauer abhängig ist, nahmen die Durchbiegungen in der Plattenmitte mit der Zeit zu. Während des Kriechens der Folie wurden kleine Absplitterungen an der oberen Glasschicht festgestellt. Alle Versuchskörper hatten eine Reststandzeit von mindestens 48 Stunden gehabt und zeigten keine Anzeichen für einen bevorstehenden Kollaps. Deshalb wurden die Kriechversuche abgeschlossen, um die Versuchskörper ein letztes Mal zu belasten.

#### 4.5.3.3 Belastung

Zunächst war bei zunehmenden Verformungen kein Anstieg der Last zu beobachten, es bildeten sich jedoch aus den vorhandenen Rissen Fliessgelenklinien, bzw. es entstanden neue Risse (siehe Bilder 4.16 und 4.17). Die erwähnten Fliessgelenklinien waren gekennzeichnet durch eine hohe Rotationsfähigkeit und durch eine Oberflächenabsplitterung der oberen Glasschicht. Risse, welche sich nicht zu Fliessgelenklinien entwickelten, wiesen diese Absplitterung nicht auf und bei den angrenzenden Segmenten waren keine Verdrehungen zueinander festzustellen. Beim Erreichen der Resttraglast erfolgte an den Fliessgelenklinien das Versagen der oberen Glasschicht infolge hoher Druckkräfte (siehe Bilder 4.4b und e). Die Glasbruchstücke solcher Absplitterung waren sehr flach, entweder muschelartig oder von einer länglichen Form (siehe Bilder 4.4a bis d). Anschliessend konnte die Last nicht mehr gesteigert werden (siehe Bilder 4.11 und 4.12). Das System versagte trotz der fehlenden Biegesteifigkeit nicht, da eine weitere Lastabtragung über die Zugbeanspruchung der PVB-Folie stattfand. Jedoch war bei einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit keine markante Laststeigerung mehr möglich und mit sehr grossen Verformungen erfolgte der endgültige Kollaps in Form eines Auseinanderreissens der Folie. Schliesslich durchbrach der Presskolben allmählich die Glasplatte (siehe 4.4f und h). Anders als bei zweiseitig gelagerten VSG-Scheiben fielen die Versuchskörper nicht von den Lagern herunter. Die Höchstlast im Zustand III, die Resttraglast, stellt sich schon beim Versagen der Druckzone des Glases ein. Die Höhe der Resttraglast war eindeutig vom entstandenen Fliessgelenkbild abhängig. Die höchste Resttraglast konnte bei Fächermechanismus bestimmt werden. Eine etwas tiefere Resttraglast wurde bei Fliessgelenklinien gemessen werden, welche diagonal durch die Plattenmitte verliefen. Die kleinste Resttraglast, welche im Rahmen

der Fliessgelenktheorie von besonderer Bedeutung ist, wurde bei jenen Glasscheiben festgestellt, bei denen die Fliessgelenklinien diagonal in der Platte verliefen und sich in den Eckbereichen zu Fächern ausbreiteten.



*Bild 4.4 Beobachtungen des Kollaps des Versuchskörpers; (a) und (b) Absplitterungen an den Fliessgelenklinien, (c) und (d) Glasbruchstücke infolge der Absplitterungen, (e) und (f) Bruchbild nach dem ausgeführten Plattenversuch mit Zerreißen der PVB-Folie, (g) und (h) Platte hat im Zentrum keine Biegesteifigkeit, die Kräfte werden über die Zugkräfte in der Folie an die intakten Plattenbereiche weitergeleitet bis die Bruchdehnung der Folie erreicht ist.*

## 4.6 Auswertung und Dokumentation

### 4.6.1 Durchbiegungsberechnung

Aus den acht gemessenen Vertikalverschiebungen der Platte kann die Mitteldurchbiegung der VSG-Platte auf eine der zwei folgenden Arten berechnet werden:

Es wird das arithmetische Mittel  $w^*$  aus den vier Durchbiegungen  $w_5, w_6, w_7, w_8$  gebildet (siehe Bild 4.5a). Da alle vier Durchbiegungen ausserhalb des Zentrums der Platte liegen, wird die tatsächliche Durchbiegung der Platte unterschätzt. Jedoch sind die Abstände der Messpunkte von der Mitte nicht weit entfernt, deswegen ist der Fehler vernachlässigbar.

Genauere Werte können mit einem aufwändigeren Verfahren bestimmt werden. Die vier Verschiebungen  $w_1, w_5, w_7, w_3$  der Platte liegen annähernd auf einer Diagonalen (siehe Bild 4.5b). Die Verformung der Platte wird als ein Polynom zweiten Grades angenommen. Mithilfe der vier Werte kann der maximale Wert  $w_{1M}$ , welcher genau in der Mitte der Platte liegt, berechnet werden. Die gleiche Verfahrensweise kann für die andere Diagonale mit den Verschiebungen  $w_2, w_6, w_8, w_4$  angewendet werden. Die Mittendurchbiegung der Platte  $w^{**}$  ist das arithmetische Mittel aus den zwei gewonnenen Maximalwerten  $w_{1M}$  und  $w_{2M}$ .

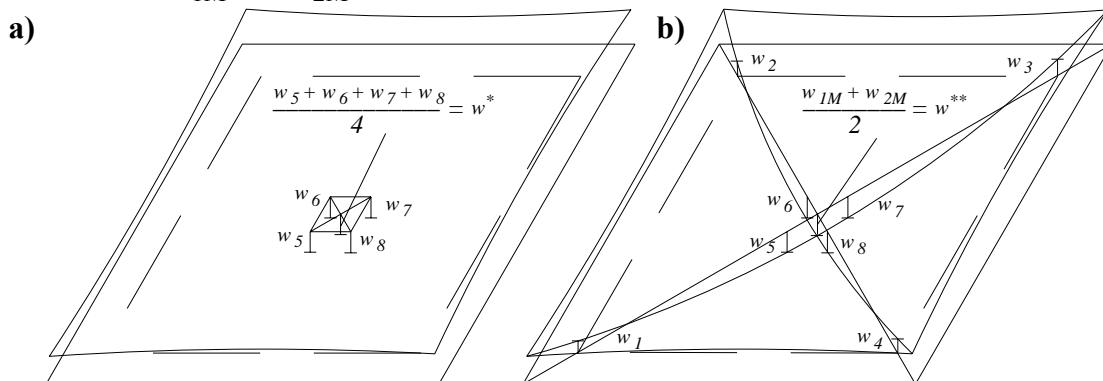


Bild 4.5 Bestimmung der Mitteldurchbiegung; (a) arithmetisches Mittel aus den vier gemessenen Durchbiegungen, (b) arithmetischer Mittelwert der beiden Maximalwerte des Polynoms zweiten Grades.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Verfahren zeigte, dass die Unterschiede sehr gering waren. Deshalb werden im Weiteren nur noch die Werte des zweiten Verfahrens benutzt und es wird nur noch über die Mitteldurchbiegung  $w$  gesprochen.

### 4.6.2 Trag- und Resttraglasten sowie Mitteldurchbiegungen

Die Tabelle 4.3 zeigt die ermittelten Trag- und Resttraglasten sowie die Mitteldurchbiegungen in den Phase 1, 2 und 3. Ebenfalls sind die ermittelten Kriechdurchbiegungen  $w_{k,III}$  der Versuchskörper, welche 48 Stunden im Zustand III nur unter Eigenlast liegen gelassen worden sind, dargestellt. Zum Schluss werden aus den angegebenen Daten die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt.

Versuchs- körper	$Q_{u,I}$ [kN]	$w_{u,I}$ [mm]	$w_{r,II}$ [mm]	$Q_{u,II}$ [kN]	$w_{u,II}$ [mm]	$w_{r,III}$ [mm]	$Q_{u,III}$ [kN]	$w_{u,III}$ [mm]	$w_{k,III}$ [mm]
IP_FLG_25_1	12.22	10.15	1.03	10.58	10.64	27.70	1.48	120.01	-
IP_FLG_25_2	12.11	14.32	0.46	9.45	8.54	30.56	1.23	127.44	-
IP_FLG_25_3	14.20	10.17	0.57	10.56	9.70	22.92	1.47	91.01	-
IP_FLG_25_4	14.13	11.27	0.98	10.57	13.20	25.22	1.70	107.45	-
IP_FLG_25_5	<b>15.50</b>	12.21	0.77	<b>9.09</b>	11.72	30.02	<b>1.08</b>	106.11	25.06
IP_FLG_25_6	15.09	10.64	0.58	9.56	10.054	27.81	1.51	99.35	24.55
IP_FLG_25_7	12.46	10.43	0.50	9.39	12.22	31.34	1.33	95.21	25.34
IP_FLG_25_8	13.36	12.66	0.95	10.18	11.92	20.00	1.18	88.65	25.055
Mittelwerte (Standardabw.)	13.63 (1.22)	11.48 (1.38)	0.73 (0.22)	9.92 (0.58)	11.00 (1.43)	26.95 (3.72)	1.37 (0.19)	104.40 (12.86)	25.00 (0.28)
IP_FLG_26_1	-	-	0.19	12.22	12.90	15.08	2.89	95.19	-
IP_FLG_26_2	-	-	0.24	11.67	12.99	15.55	3.72	113.71	-
IP_FLG_26_3	-	-	0.11	<b>12.25</b>	13.40	13.72	2.66	115.73	-
IP_FLG_26_4	-	-	0.13	12.23	12.20	18.22	<b>4.01</b>	99.04	-
IP_FLG_26_5	-	-	0.07	10.83	11.14	12.03	2.96	104.43	23.84
IP_FLG_26_6	-	-	0.12	12.08	13.11	13.72	3.52	117.80	21.44
IP_FLG_26_7	-	-	0.10	11.44	12.39	17.12	4.00	103.81	22.54
IP_FLG_26_8	-	-	0.02	11.18	12.383	13.22	3.07	82.65	22.02
Mittelwerte (Standardabw.)	-	-	0.12 (0.06)	11.74 (0.51)	12.56 (0.66)	14.83 (1.94)	3.35 (0.49)	104.05 (11.07)	22.46 (0.89)

Tabelle 4.3 Trag- und Resttraglasten sowie Mittendurchbiegungen der Platte in Abhängigkeit vom vorhandenen Bruchzustand. Maximal- und Minimallasten sind fett markiert.

#### 4.6.3 Lokalisierung der Initialbrüche aus den Zuständen I und II

In der Tabelle 4.4 sind die Koordinaten der Initialbrüche aus den Plattenversuchen zusammengefasst. Die Tabelle zeigt ebenfalls, in welcher Glasschicht der Bruch beobachtet wurde und aus welchem Zustand der Bruch erfolgte. In den Bildern 4.6 und 4.7 werden alle Initialbruchstellen getrennt für die untere und obere Glasschicht dargestellt. Der äussere Kreis ergibt sich aus der Initialbruchstelle mit dem maximalen Abstand zum Plattenzentrum. Der innerer Kreis zeigt den mittleren Abstand der Initialbruchstellen zum Zentrum der Platte.

Nachdem die Glasplatten der Versuchsserie 1P\_FLG\_25 im Zustand I eingebaut und in der Versuchsanlage gebrochen wurden, traten alle Initialbrüche in der unteren Glasschicht auf. Wegen der Streuung der Oberflächenschädigung und der Zugfestigkeit bei Floatglas trat der Initialbruch nicht genau im Zentrum auf. Der grösste radiale Abstand  $r_U$  vom Zentrum der Platte bis zur Initialbruchstelle betrug 117 mm. Der gerechnete Mittelwert  $r_M$  aller gemessenen Radien lag bei 51 mm.

Nach erneuter Belastung versagte im Zustand II die obere Glasschicht. Die Entfernungen von den Initialbrüchen bis zum Zentrum reduzierten sich. Der grösste gemessene Abstand  $r_U$  vom Zentrum der Platte bis zur Initialbruchstelle lag bei 32 mm und der berechnete Mittelwert  $r_M$  betrug 22 mm.

Da die Versuchsserie IP\_FLG\_26 zuerst mit einer Stahlkugel gebrochen wurde, sind alle ersten Initialbrüche in der oberen Glasschicht beobachtet worden. Die Stahlkugel wurde so fallengelassen, dass sie möglichst genau das Zentrum treffen sollte. Die Initialbrüche erfolgten genau an der Kontaktstelle zwischen der Kugel und der oberen Glasschicht.

<i>Nummer</i>	<i>Bruchstelle x [mm]</i>	<i>Bruchstelle y [mm]</i>	<i>Abstand zum Zentrum r [mm]</i>	<i>Aus- gangslage</i>	<i>Bruch der Glasschicht</i>
IP_FLG_25_1	500	520	86	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_2	465	435	21	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_3	360	525	117	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_4	460	465	18	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_5	460	440	14	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_6	410	390	72	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_7	420	480	42	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_8	430	420	36	Zustand I	Untere
IP_FLG_25_1	425	455	25	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_2	470	440	22	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_3	440	460	14	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_4	425	470	32	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_5	440	450	10	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_6	450	475	28	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_7	460	425	28	Zustand II	Obere
IP_FLG_25_8	450	430	20	Zustand II	Obere
IP_FLG_26_1	440	420	31	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_2	435	430	21	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_3	450	425	32	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_4	460	420	25	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_5	480	415	49	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_6	470	450	20	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_7	430	455	21	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_8	455	455	7	Zustand I	Obere
IP_FLG_26_1	440	420	32	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_2	450	430	39	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_3	480	425	20	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_4	425	425	35	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_5	480	475	39	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_6	465	455	16	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_7	450	455	5	Zustand II	Untere
IP_FLG_26_8	430	455	21	Zustand II	Untere

Tabelle 4.4 Bestimmung der Initialbruchstellen aus den Plattenversuchen im Zustand I und II.

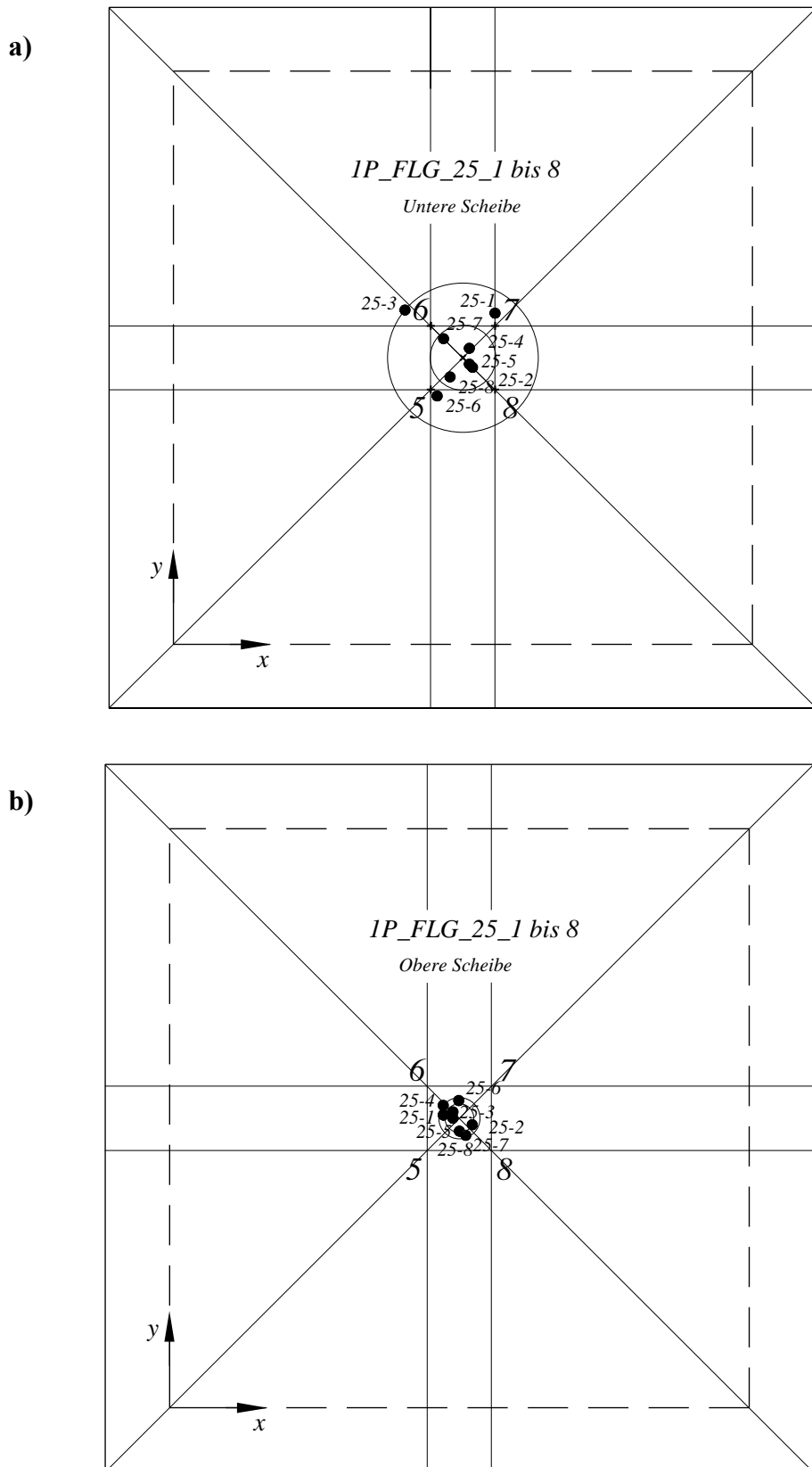


Bild 4.6 Zusammenfassung aller Initialbrüche der Versuchsserie IP\_FLG\_25; (a) nach Phase 1, Bruchstellen in der unteren Glasschicht, (b) nach Phase 2, Bruchstellen in der oberen Glasschicht.

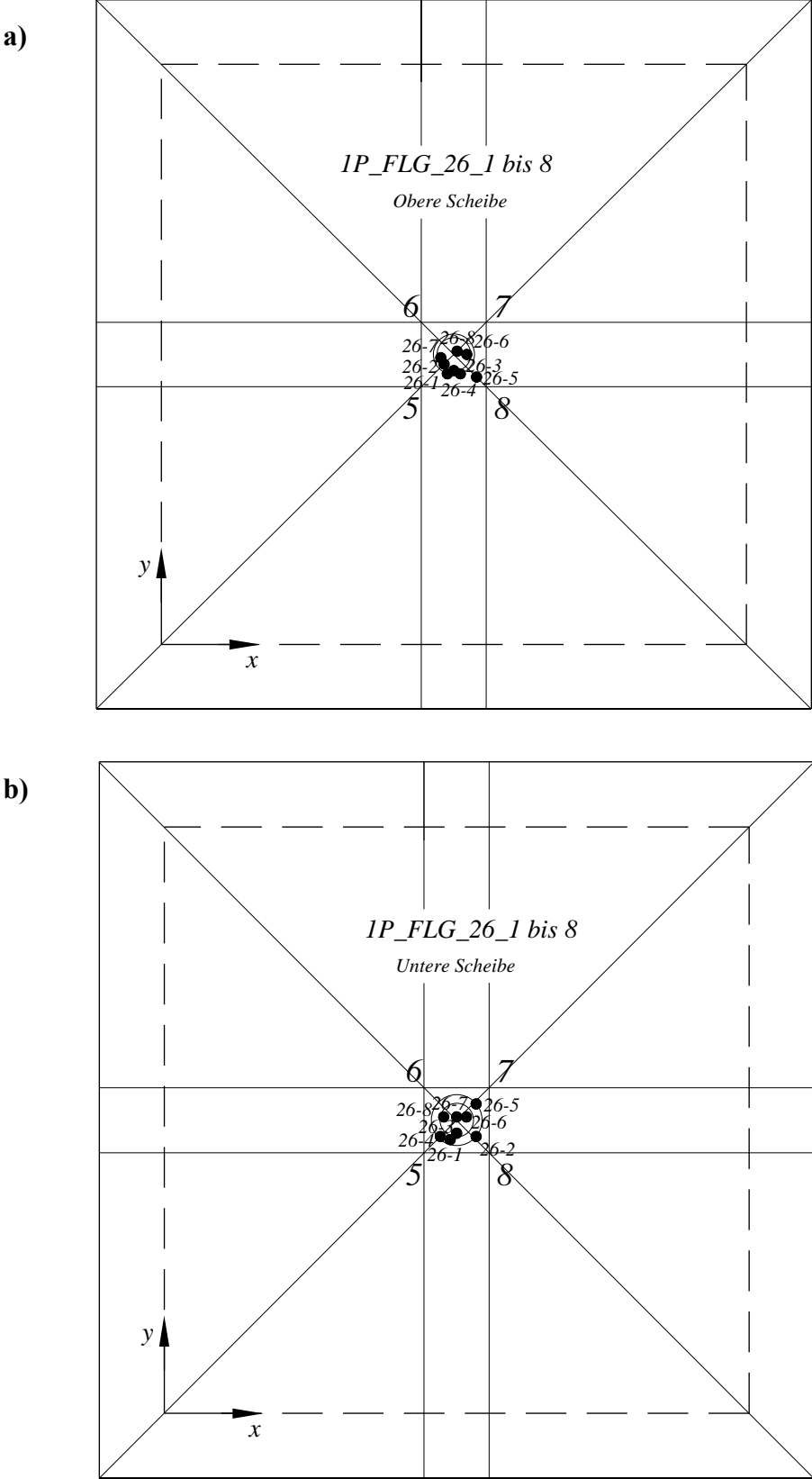


Bild 4.7 Zusammenfassung aller Initialbrüche der Versuchsserie *1P\_FLG\_26*; (a) nach dem Stoß: Bruchstellen in der oberen Glasschicht, (b) nach Phase 2, Bruchstellen in der unteren Glasschicht.

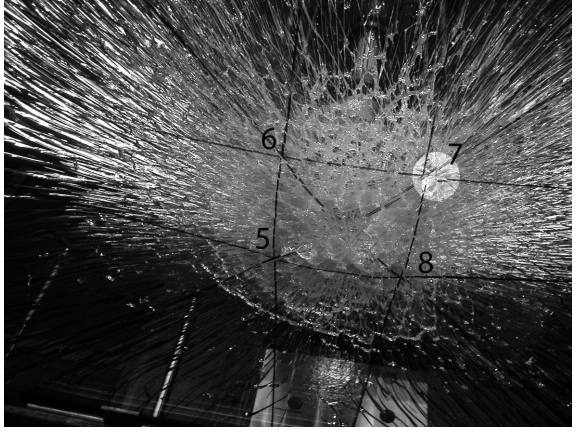
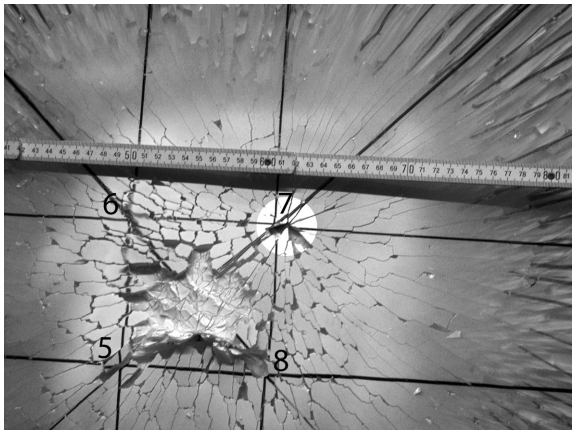
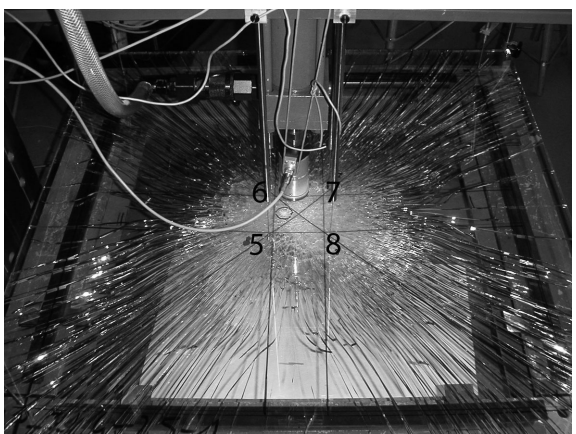
Ort des Initialbruchs	Ansicht	Beobachtung	Bildaufnahme
	Zeitpunkt der Bildaufnahme		
Untere Glasschicht, oberhalb des Messpunktes 7	Von unten	Grosse Verformungen mit ersten Abplatzungen der unteren Glasschicht im Zentrum, jedoch nicht an der Initialbruchstelle	
	Beginn der Phase 3		
Untere Glasschicht, oberhalb des Messpunktes 7	Von unten	Abplatzungen der unteren Glasschicht von der Folie	
	Nach der Phase 3		
Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 6	Von oben	Weisse Trübung der gebrochenen VSG-Scheibe an der Lasteinleitungsstelle	
	Vor dem Beginn der Phase 3		

Tabelle 4.5 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_25\_1.



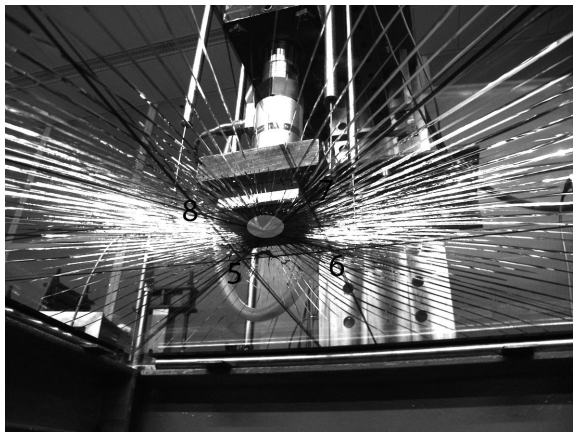
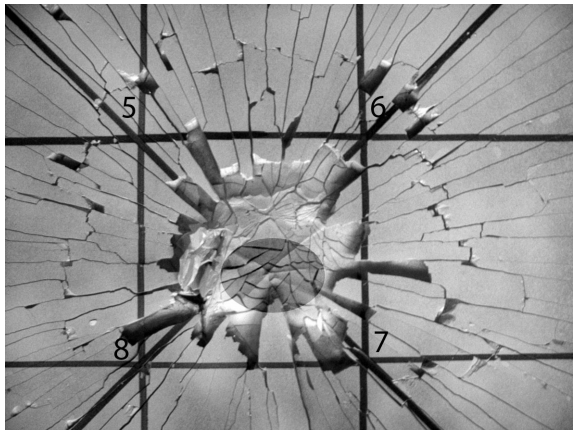
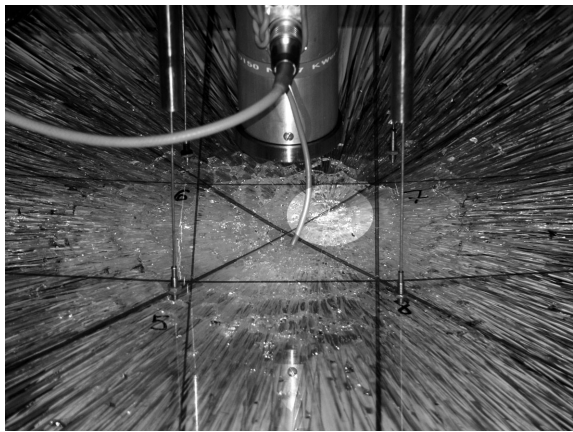
Ort des Initialbruchs	Ansicht	Beobachtung	Bildaufnahme
	Zeitpunkt der Bildaufnahme		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 7 und 8	Von unten	Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle	
	Beginn der Phase 3		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 7 und 8	Von unten	Abplatzungen der unteren Glasschicht von der Folie	
	Nach der Phase 3		
Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 7 und 8	Von oben	Weisse Trübung der gebrochenen VSG-Scheibe an der Lasteinleitungsstelle	
	Vor dem Beginn der Phase 3		

Tabelle 4.6 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_25\_2.


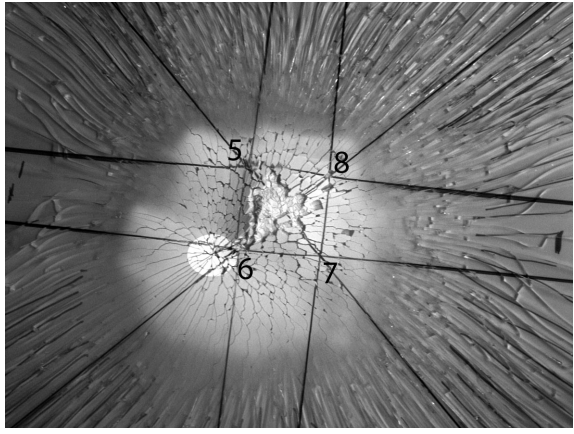

Ort des Initialbruchs	Ansicht	Beobachtung	Bildaufnahme
	Zeitpunkt der Bildaufnahme		
Untere Glasschicht, oberhalb des Messpunktes 6	Von unten	Grosse Verformungen der gebrochenen VSG-Scheibe, Zerreißen der Folie an der Lasteinleitungsstelle	
	Ende der Phase 3		
Untere Glasschicht, oberhalb des Messpunktes 6	Von unten	Abplatzungen der unteren Glasschicht von der Folie	
	Nach der Phase 3		
Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 6	Von oben	Weisse Trübung der gebrochenen VSG-Scheibe an der Lasteinleitungsstelle	
	Vor dem Beginn der Phase 3		

Tabelle 4.7 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_25\_3.


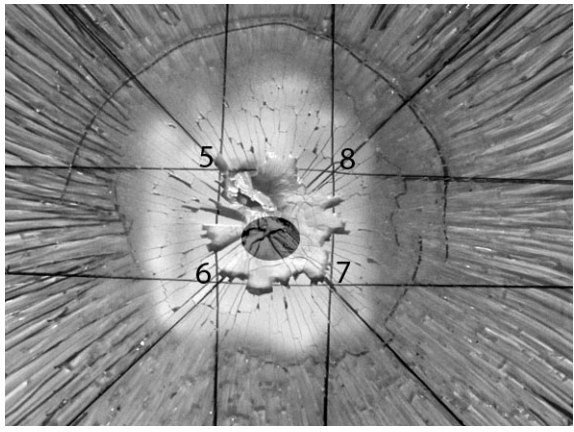
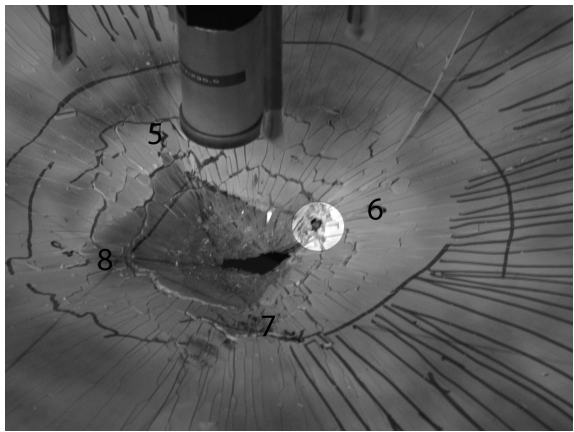
Ort des Initialbruchs	Ansicht	Beobachtung	Bildaufnahme
	Zeitpunkt der Bildaufnahme		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 6 und 7	Von unten	Ausbildung eines Rings um die Lasteinleitungsstelle	
	Während der Phase 3 beim Wiederbelasten		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 6 und 7	Von unten	Abplatzungen der unteren Glasschicht von der Folie, Ausbildung eines Rings um die Lasteinleitungsstelle	
	Nach der Phase 3		
Obere Glasschicht, beim Messpunkt 6	Von oben	Ausbildung eines Rings um die Lasteinleitungsstelle, Zerreißen der Folie	
	Ende der Phase 3		

Tabelle 4.8 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_25\_4.


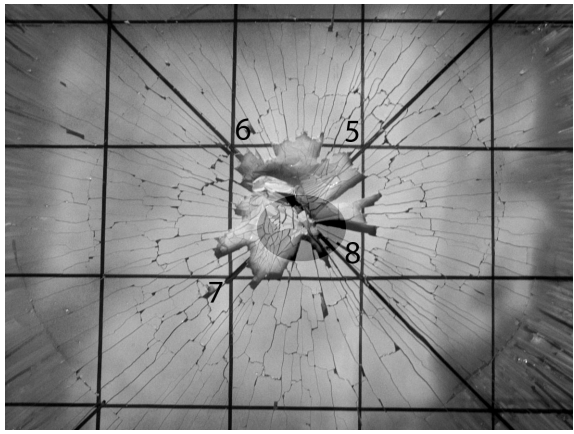
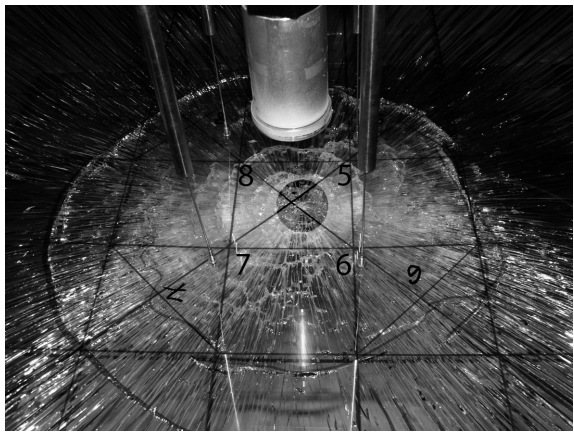
Ort des Initialbruchs	Ansicht	Beobachtung	Bildaufnahme
	Zeitpunkt der Bildaufnahme		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 7 und 8	Von unten	Ausbildung eines Rings um die Lasteinleitungsstelle	
	Beginn der Phase 3, kurz vor der Wiederbelastung		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 7 und 8	Von unten	Abplatzungen der unteren Glasschicht von der Folie	
	Nach der Phase 3		
Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 6	Von oben	Ausbildung eines Rings um die Lasteinleitungsstelle	
	Beginn der Phase 3		

Tabelle 4.9 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_25\_5.

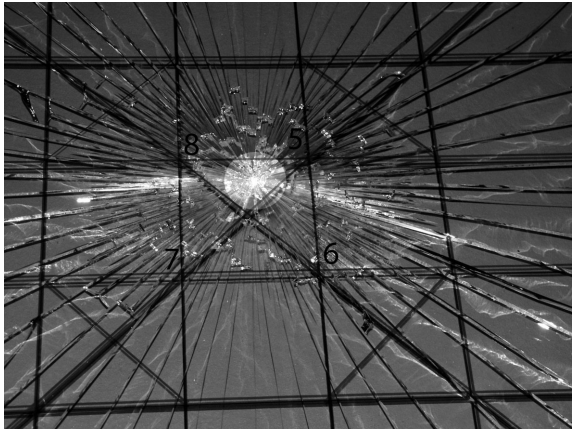

<i>Ort des Initialbruchs</i>	<i>Ansicht</i>	<i>Beobachtung</i>	<i>Bildaufnahme</i>
	<i>Zeitpunkt der Bildaufnahme</i>		
<i>Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8</i>	<i>Von oben</i>	<i>Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle</i>	
	<i>Nach dem Stoss, vor dem Einbau in die Versuchseinrichtung</i>		
<i>Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8</i>	<i>Von unten</i>	<i>Bruchstelle der oberen Glasschicht stimmt mit der unteren überein</i>	
	<i>Beginn der Phase 3</i>		

Tabelle 4.10 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_26\_1.

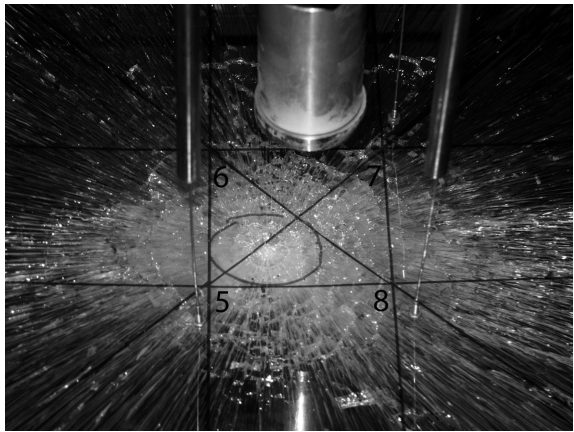
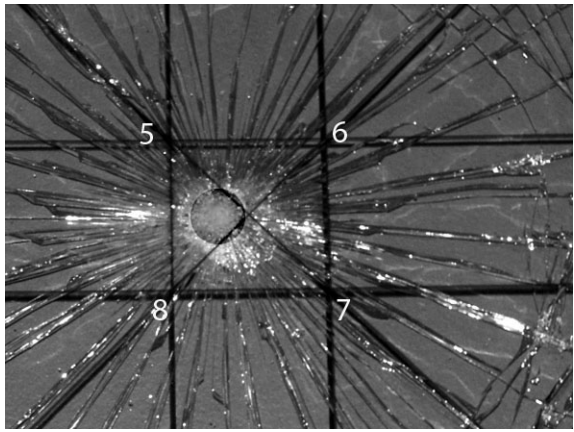
<i>Ort des Initialbruchs</i>	<i>Ansicht</i>	<i>Beobachtung</i>	<i>Bildaufnahme</i>
	<i>Zeitpunkt der Bildaufnahme</i>		
<i>Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8</i>	<i>Von oben</i>	<i>Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle</i>	
	<i>Beginn der Phase 3</i>		
<i>Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8</i>	<i>Von unten</i>	<i>Bruchstelle der oberen Glasschicht stimmt mit der unteren überein</i>	
	<i>Beginn der Phase 3</i>		

Tabelle 4.11 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_26\_2.

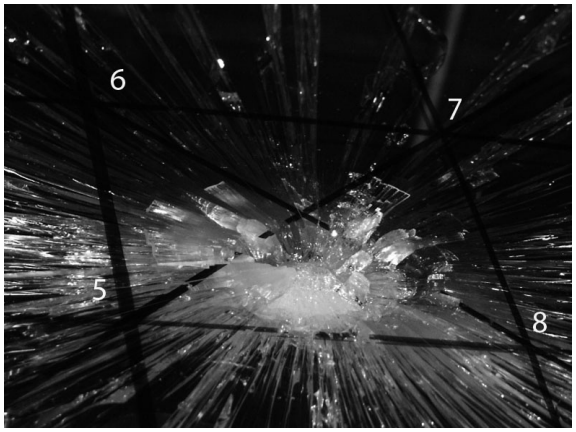

<i>Ort des Initialbruchs</i>	<i>Ansicht</i>	<i>Beobachtung</i>	<i>Bildaufnahme</i>
	<i>Zeitpunkt der Bildaufnahme</i>		
<i>Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8</i>	<i>Von oben</i>	<i>Absplitterungen an der Initialbruchstelle</i>	
	<i>Beginn der Phase 3</i>		
<i>Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8</i>	<i>Von unten</i>	<i>Ein Zerreißen der Folie an der Lasteinleitungsstelle</i>	
	<i>Ende der Phase 3, Resttraglast ist erreicht</i>		

Tabelle 4.12 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_26\_3.

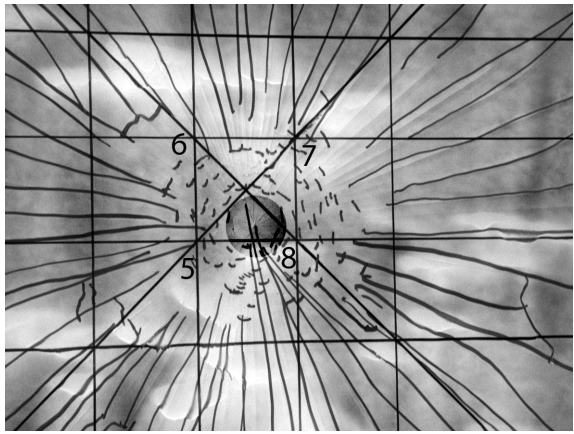
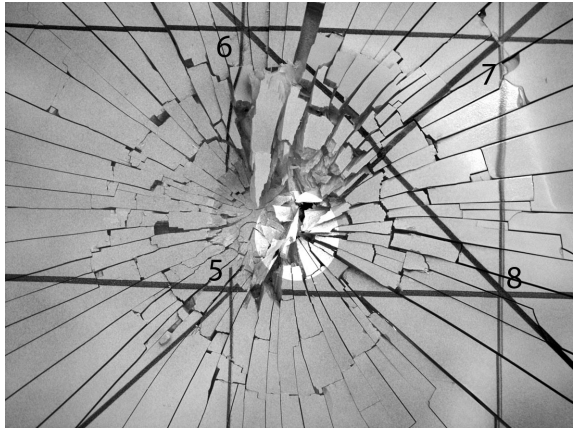
Ort des Initialbruchs	Ansicht	Beobachtung	Bildaufnahme
	Zeitpunkt der Bildaufnahme		
Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 8	Von oben	Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle, mit Ansätzen eines Rings um die Initialbruchstelle	
	Nach dem Stoss, vor dem Einbau in die Versuchseinrichtung		
Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 5 und 6	Von unten	Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle, mit Ansätzen eines Rings um die Initialbruchstelle	
	Nach Phase 3		

Tabelle 4.13 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_26\_4.



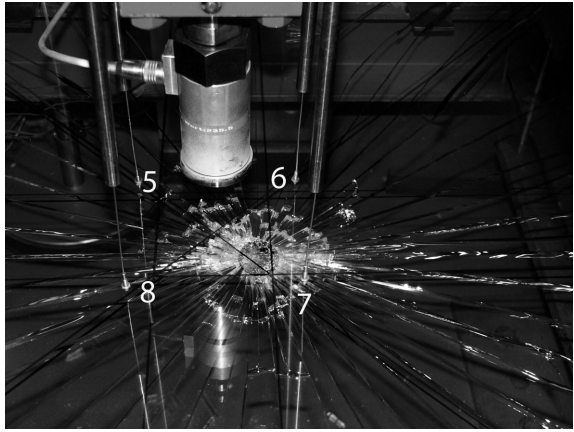

<i>Ort des Initialbruchs</i>	<i>Ansicht</i>	<i>Beobachtung</i>	<i>Bildaufnahme</i>
	<i>Zeitpunkt der Bildaufnahme</i>		
<i>Obere Glasschicht, zwischen Messpunkt 6 und 7</i>	<i>Von oben</i>	<i>Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle</i>	
	<i>Beginn der Phase 3</i>		
<i>Untere Glasschicht, zwischen Messpunkt 7 und 8</i>	<i>Von unten</i>	<i>Einzelne Risse ausgehend von der Initialbruchstelle</i>	
	<i>Beginn der Phase 3</i>		

Tabelle 4.14 Lokalisierung der Initialbruchstellen, Versuchskörpernummer: 1P\_FLG\_26\_5.

#### 4.6.4 Last-Durchbiegungskurven im Zustand I

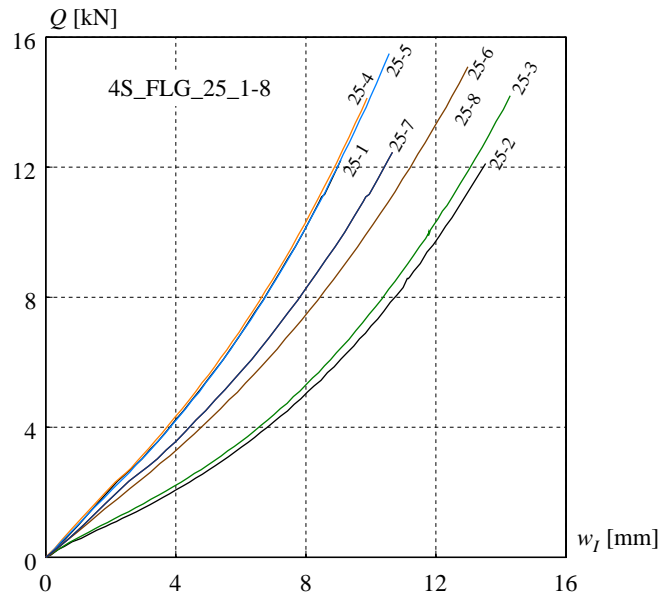


Bild 4.8 Last-Durchbiegungskurven der Plattenversuche der Serie 1P\_FLG\_25 im Zustand I.

#### 4.6.5 Last-Durchbiegungskurven im Zustand II

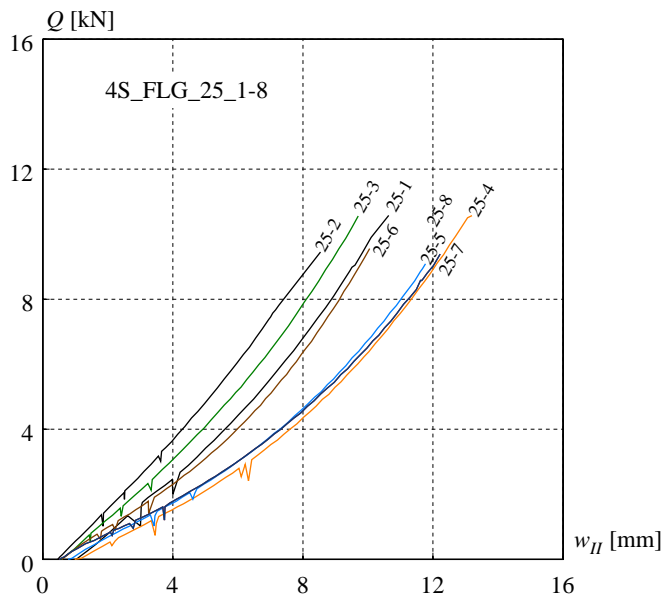


Bild 4.9 Last-Durchbiegungskurven der Plattenversuche der Serie 1P\_FLG\_25 im Zustand II.

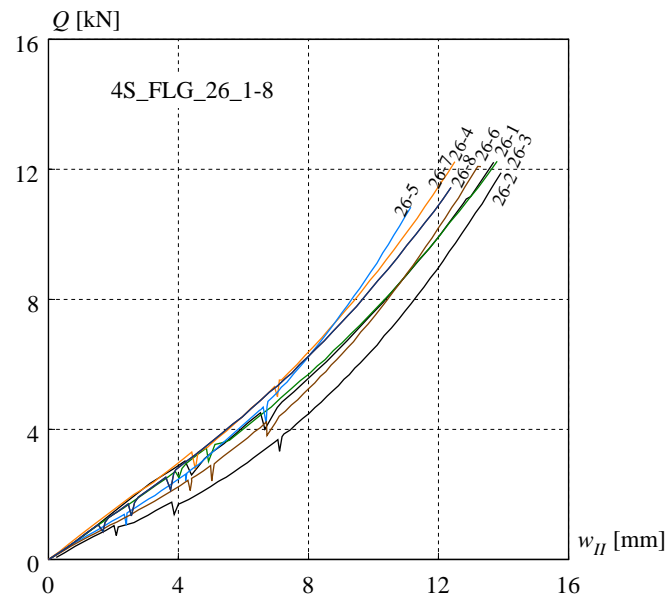


Bild 4.10 Last-Durchbiegungskurven der Plattenversuche der Serie  $IP\_FLG\_26$  im Zustand II.

#### 4.6.6 Last-Durchbiegungskurven im Zustand III

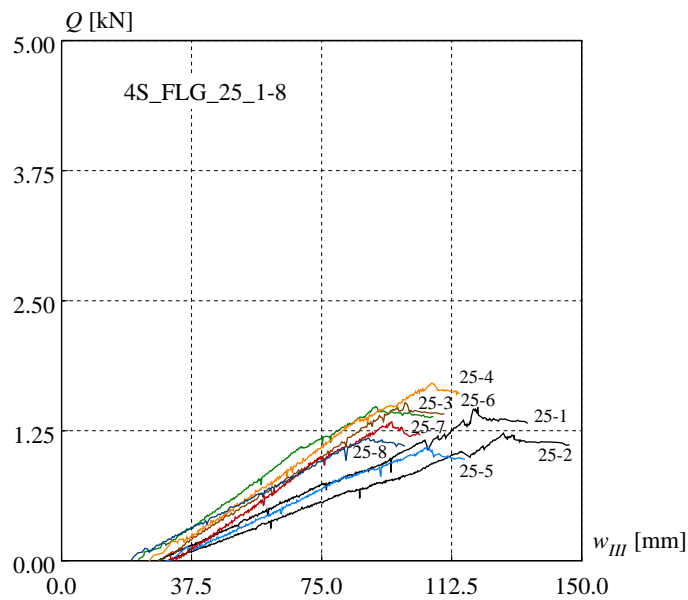


Bild 4.11 Last-Durchbiegungskurven der Plattenversuche der Serie  $IP\_FLG\_25$  im Zustand III.

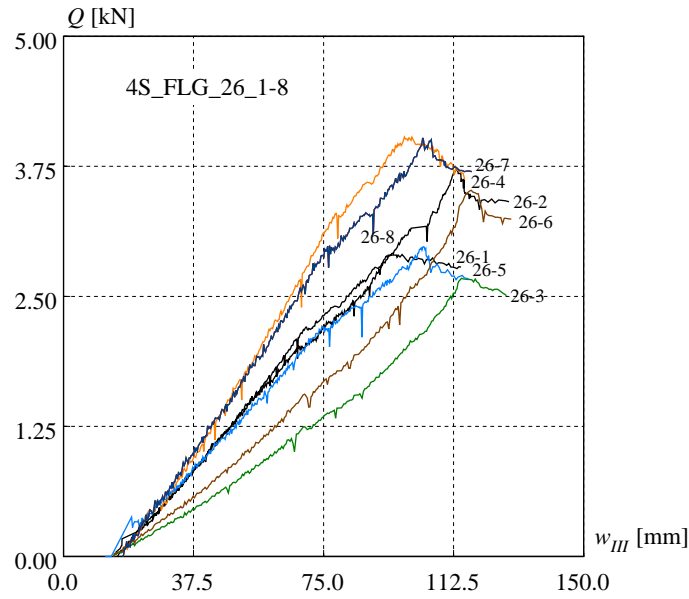


Bild 4.12 Last-Durchbiegungskurven der Plattenversuche der Serie  $IP\_FLG\_26$  im Zustand III.

#### 4.6.7 Zeit-Durchbiegungskurven im Zustand III

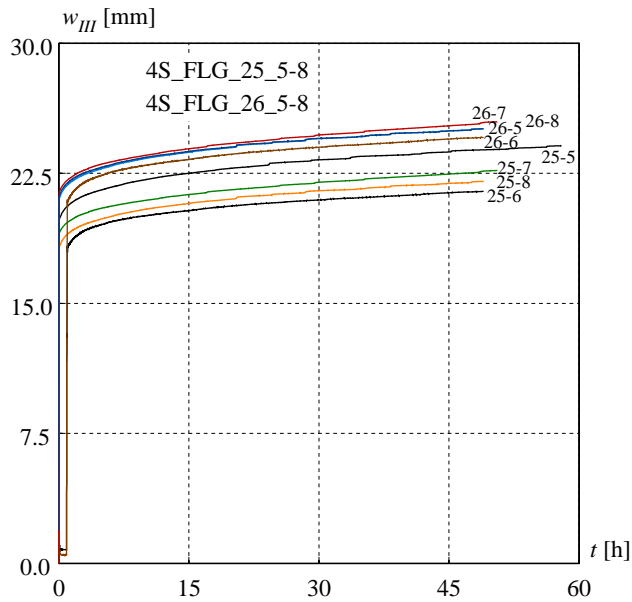


Bild 4.13 Zeit-Durchbiegungskurven der Versuchskörper  $IP\_FLG\_25\_5-8$  und  $IP\_FLG\_26\_5-8$  im Zustand III.

4.6.8 Bruchbilder im Zustand II

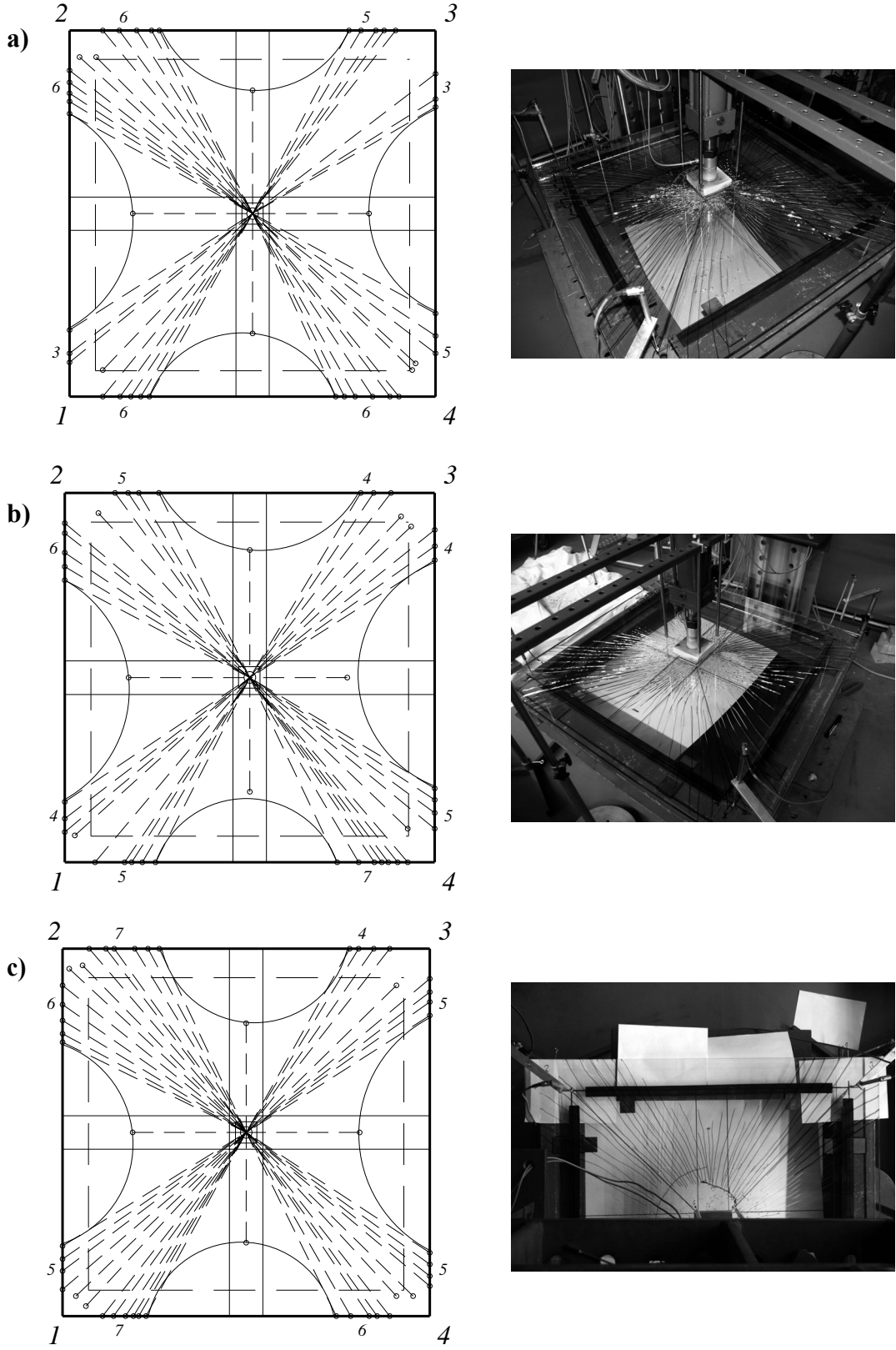


Bild 4.14 Eingezeichnete und fotografierte Bruchbilder im Zustand II vor der ersten Wiederbelastung; (a) 1P\_FLG\_25\_1, (b) 1P\_FLG\_25\_3, (c) 1P\_FLG\_25\_4.

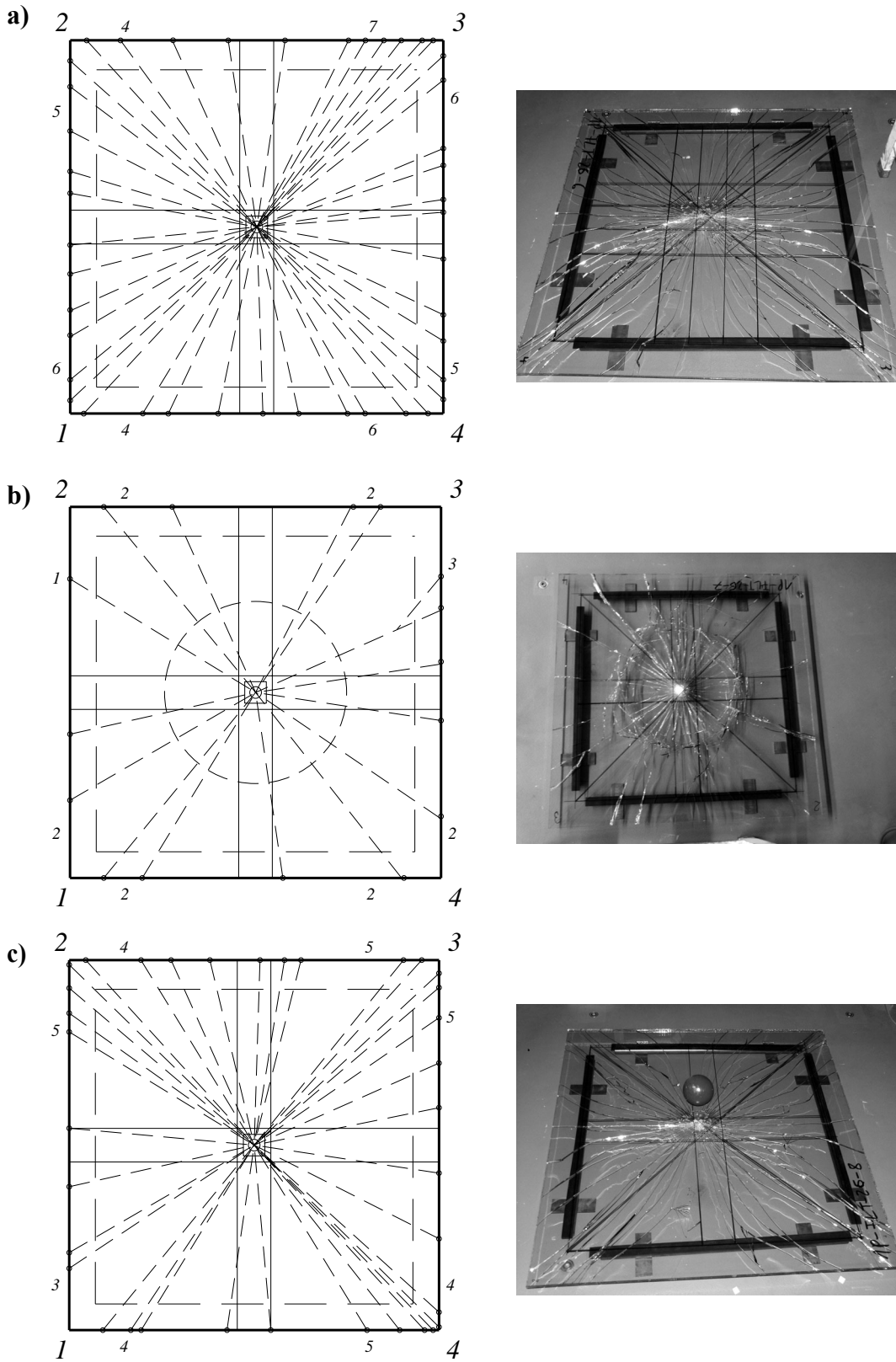


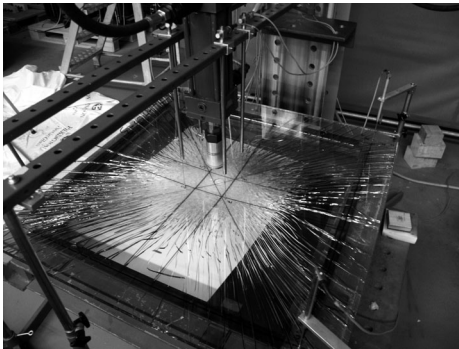
Bild 4.15 Eingezeichnete und fotografierte Bruchbilder im Zustand II nach dem Stoss; (a) IP\_FLG\_26\_6, (b) IP\_FLG\_26\_7, (c) IP\_FLG\_26\_8.

#### 4.6.9 Bruchbilder, Fließgelenkmechanismen im Zustand III

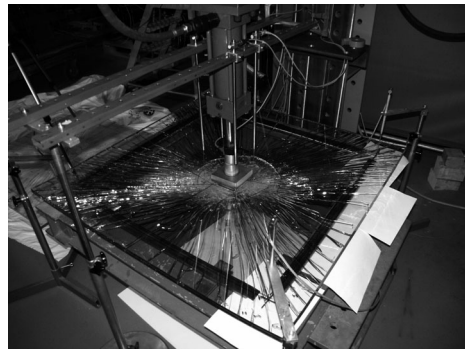
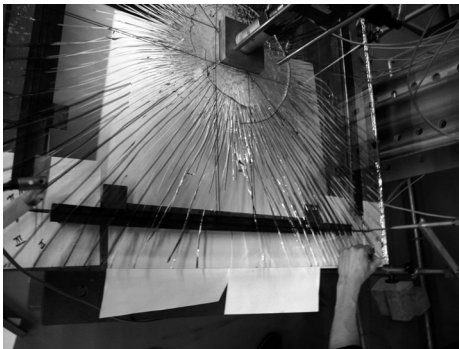
a)



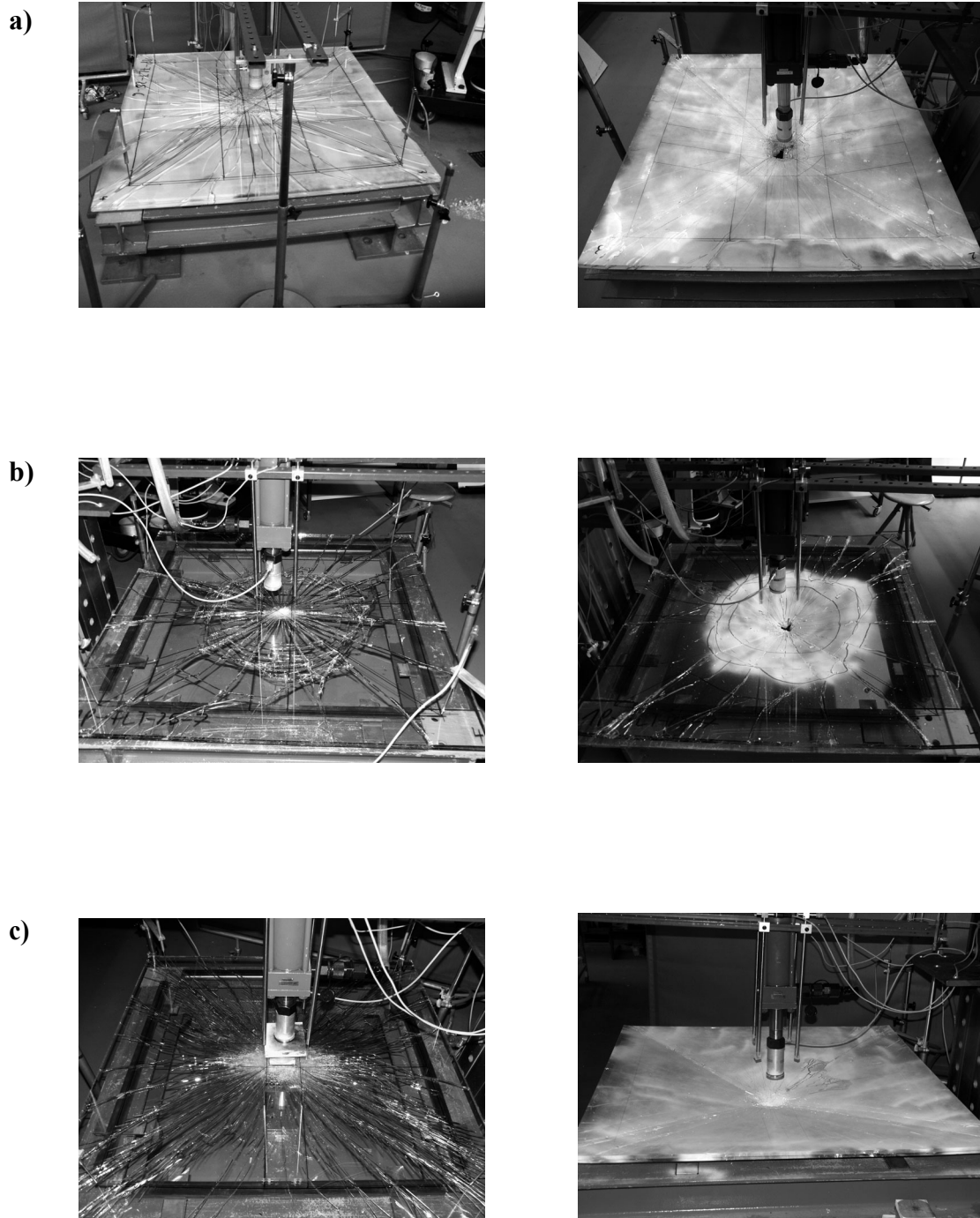
b)



c)



*Bild 4.16 Links, die fotografierten Bruchbilder im Zustand III vor der zweiten Wiederbelastung und rechts die dazugehörigen Bruchbilder mit den Fließgelenklinien; (a) IP\_FLG\_25\_1, (b) IP\_FLG\_25\_3, (c) IP\_FLG\_25\_4.*



*Bild 4.17 Links, die fotografierten Bruchbilder im Zustand III vor der zweiten Wiederbelastung und rechts die dazugehörigen Bruchbilder mit den Fliessgelenklinien; (a) IP\_FLG\_26\_6, (b) IP\_FLG\_26\_7, (c) IP\_FLG\_26\_8.*



## 4.7 Schlussfolgerungen aus den Plattenversuchen

### 4.7.1 Last-Verformungsverhalten

Im Zustand I beeinflussen die Membrankräfte das Last-Verformungsverhalten der Versuchskörper. Die Last steigt überproportional zur Durchbiegung an.

Durch die vierseitige Lagerung und Abtragung der Kräfte können gegenüber zweiseitig gelagerten VSG-Scheiben in allen drei Zuständen viel höhere Lasten aufgenommen werden.

Im Zustand II nach der ersten verformungsgesteuerten Belastung und dem ersten Bruch wiesen die Versuchskörper, wie auch schon in Vierpunktbiegeversuchen, eine Vorkrümmung auf. VSG-Scheiben aus FLG, die durch einen Stoss gebrochen wurden, wiesen im Zustand II wegen der kleineren Anzahl von Bruchlinien geringere Vorkrümmungen auf.

Das Last-Verformungsverhalten im Zustand II ist wegen den grossen Durchbiegungen nichtlinear und weist mehrere Unstetigkeiten in Form von Sprüngen auf. Die Unstetigkeiten sind auf weitere Risse und Rissfortschritte in der gebrochenen Glasschicht zurückzuführen.

Anschliessend ist bei allen Versuchskörpern eine Laststeigerung bis zum Erreichen der Resttraglast möglich.

Die Höhe der Resttraglast im Zustand III ist von dem sich ausgebildeten Fliessgelenktyp abhängig.

### 4.7.2 Bruchbilder

Bei VSG-Scheiben mit Querschnittstyp I in Versuchsphase 1 unter verformungsgesteuerten Belastung bricht zuerst die untere Glasschicht.

Sowohl die ersten Initialbrüche als auch die zweiten zum Ende der ersten Wiederbelastung in Phase 2 lagen im Zentrum der Platte.

Initialbrüche infolge eines Stosses liegen grundsätzlich genau an der Aufprallstelle, deshalb bricht bei den ausgeführten Stossversuchen zuerst die obere Glasschicht.

Bruchbilder infolge eines Stosses sind von der Fallhöhe der Kugel abhängig. Bei kleinen Fallhöhen gehen von der Initialbruchstelle einzelne gerade Risse aus, welche später zu den Ecken hin abweichen. Mit grösserer Fallhöhe steigt das Ausmass des Schadens und es bildet sich ein Bruchring um die Initialbruchstelle mit ausgehenden radialen Rissen, welche später von den Ecken abweichen.

Der Bruch der zweiten Glasschicht bewirkt, dass sich die Platte soweit durchbiegt, bis sich ein fester Kontakt zwischen den Bruchstücken ausgebildet hat.

Versuchskörper, die in Phase 1 in der Versuchseinrichtung geprüft wurden, zeigten zum Anfang der Phase 3 eine höhere Anzahl von Rissen und höhere bleibenden Verformungen als Versuchskörper, die infolge der Stossbelastung beschädigt wurden.

#### **4.7.3 Fliessgelenklinien**

Grundsätzlich können drei Typen von Fliessgelenkbildern unterschieden werden:

Der erste Typ besteht aus diagonale Fliessgelenken. Der zweite Typ weist in der Plattenmitte Fliessgelenke in Form von Fächern auf. Der dritte Typ ist eine Kombination der beiden vorhergehenden.

Der sich ergebende Fliessgelenktyp ist abhängig vom schon vorher entstandenen Bruchbild. Damit hat die Bruchursache einen Einfluss auf die Form der Fliessgelenke.

Die diagonalen Fliessgelenke können sich in den Ecken zu Fächern ausbreiten (Fliessgelenktyp 3). Versuchskörper mit diesen Fliessgelenkbildern weisen die kleinsten Resttraglasten auf.

Das Versagen der VSG-Scheiben zeigt sich zunächst an den Rändern der Fliessgelenklinien anhand starker Absplitterungen. Obwohl die Resttraglast erreicht wird, kann die Platte bis zum Reißen der PVB-Folie noch kleinere Lasten aufnehmen. Der Presskolben durchbricht die Platte mit gleichzeitigem Zerreißen der Folie an der Lasteinleitung. Die Platte rutscht nicht von der Auflagerung herunter.

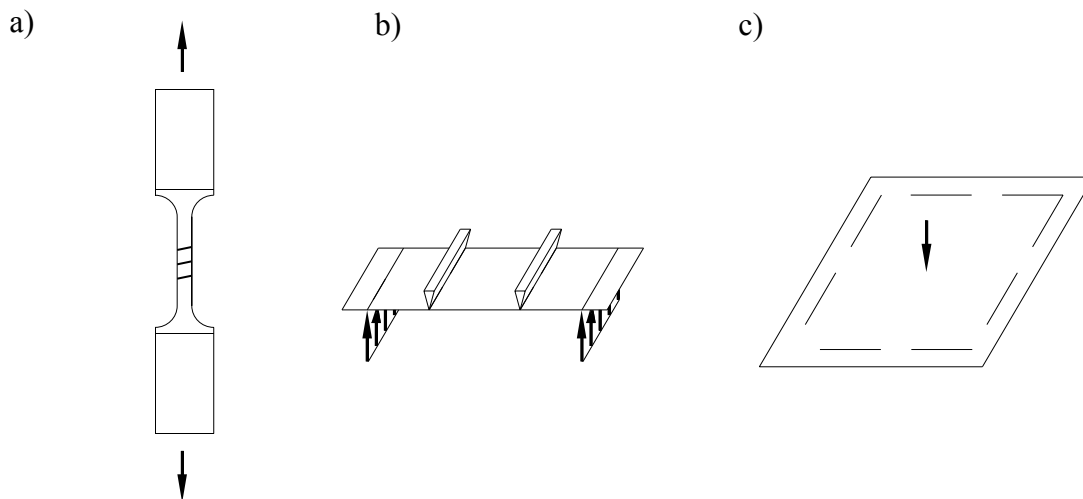
## 5 Zusammenfassung - Summary

### 5.1 Zusammenfassung

Für Überkopfverglasungen und begehbare Glaskonstruktionen wird in diversen Richtlinien, neben der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit, eine Resttragfähigkeit von gebrochenen Glasbauteilen gefordert [N 1], [N 3]. Einfachgläser besitzen im gebrochenen Zustand kein Resttragvermögen, deshalb wird in solchen Konstruktionen Verbundsicherheitsglas verwendet. Der Begriff Resttragfähigkeit ist bis heute nicht eindeutig definiert, so dass die erwähnten Richtlinien und Autoren [F 2], [D 3] unterschiedliche Anforderungen an solche Glaskonstruktionen stellen. Trotz der unterschiedlich formulierten Ansätze sind zwei Aspekte immer wieder von Interesse: Die Höhe der Resttraglast und die Dauer bis zum endgültigen Versagen (Reststandzeit im Zustand III). Ein rechnerisches Verfahren zur Beurteilung der Resttragfähigkeit und -standzeit ist nicht bekannt, deswegen wird das Resttragvermögen in Bruchversuchen im Massstab 1:1 geprüft.

Das Forschungsprojekt "Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas" ist ein Bestandteil des Forschungsprogramms "COST-Action C13 - Glass and Interactive Building Envelopes". Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich Bruchversuche an Verbundsicherheitsglas und Zugversuche an Polyvinylbutyralfolie durchgeführt (siehe Bilder 5.1a bis c).

Die Bruchversuche haben gezeigt, dass Verbundsicherheitsgläser (VSG) bezüglich ihrer Beschädigung für die Beurteilung der Resttragfähigkeit in drei Zustände zu unterteilen sind. Somit darf der Begriff Resttragfähigkeit nur abhängig von dem in der Glasscheibe herrschenden Bruchzustand formuliert werden. Die Bruchversuche an unterschiedlich gelagerten Verbundglasscheiben bilden die Grundlage für die rechnerische Beurteilung der Resttragfähigkeit. Mithilfe der ermittelten Bruchbilder und mit den Messungen der Lasten sowie der Verformungen können Berechnungsmodelle, welche in die anschließende Dissertation einfließen, ausgearbeitet werden. Darüber hinaus war das Ziel mit konstruktiven Massnahmen die Resttragfähigkeit zu erhöhen bzw. diese zu kontrollieren. Aus den Messwerten der ausgeführten Zugversuche konnte das Materialverhalten der Zwischenfolie bei unterschiedlichen Umweltbedingungen erklärt werden.



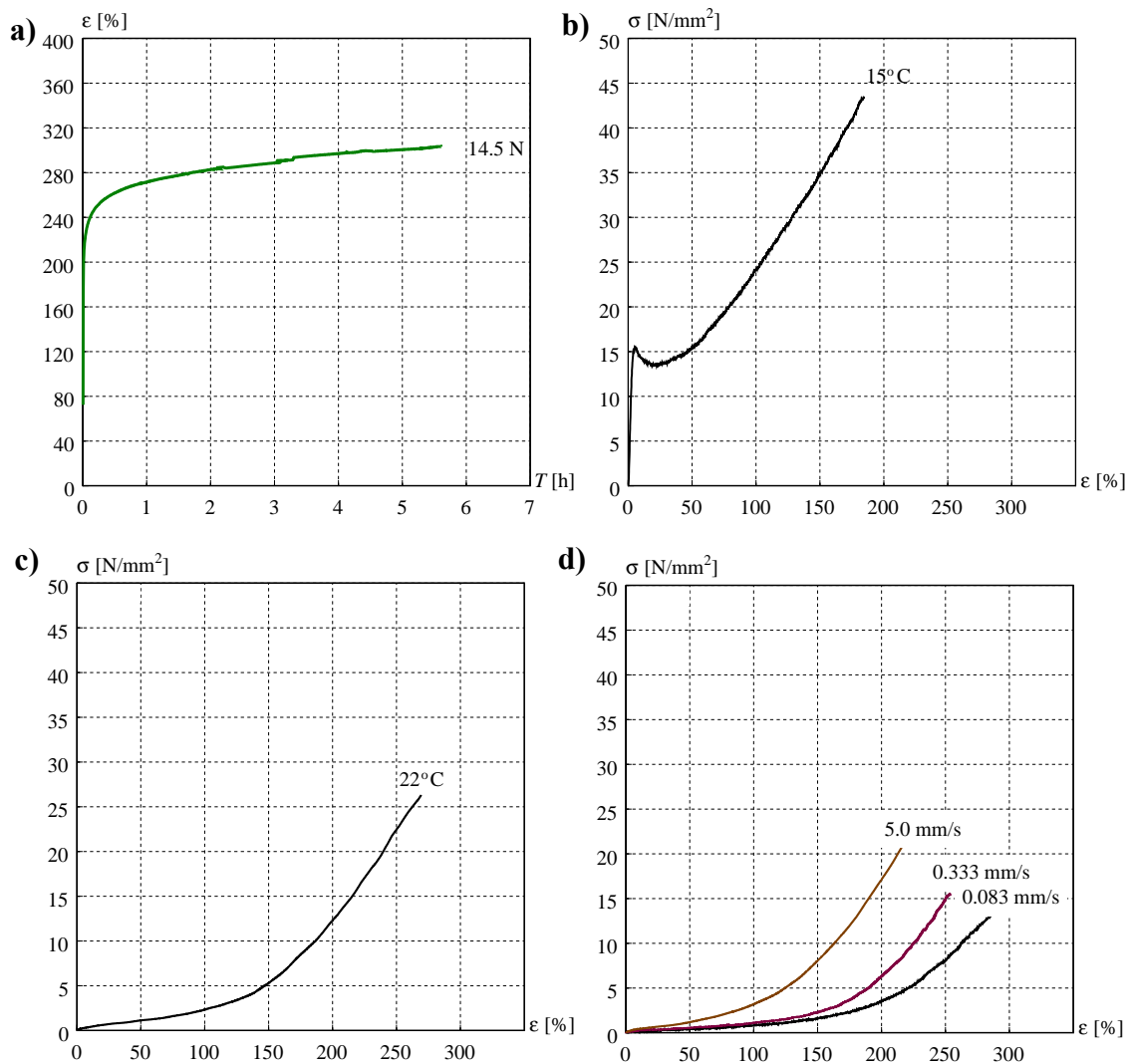
*Bild 5.1 Versuche zur Untersuchung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas; (a) Zugversuche an zugeschnittenen PVB-Folien, (b) Vierpunktbiegeversuche mit VSG-Scheiben, (c) Plattenversuche mit VSG-Scheiben.*

*Fig 5.1 Different tests for the investigation of the remaining structural capacity; (a) tensile tests with taylored PVB-foil, (b) four point bending tests with laminated safety glass, (c) plate tests with laminated safety glass.*

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

#### **Versuche zur Ermittlung des Zug-Verformungsverhaltens der Folie**

- Unter konstanter Belastung konnte das Kriechverhalten des Polymers beobachtet werden (siehe Bild 5.2a).
- Das Zug-Verformungsverhalten wurde mithilfe der Zugversuche abhängig von der Temperatur und der Verformungsgeschwindigkeit beschrieben.
- Die Zwischenfolie ist ein Thermoplast, deshalb beeinflusst die Umgebungstemperatur das Verformungsverhalten dieses Materials unter Zugbeanspruchung. Dabei muss unterschieden werden, ob die derzeit herrschende Umgebungstemperatur oberhalb oder unterhalb der Glasübergangstemperatur liegt (siehe Bilder 5.2b und c).
- Grundsätzlich sind bei einer Folie drei Verformungsbereiche festzustellen; linear elastischer Bereich, Entfestigungs- und Verfestigungsbereich. Während bei einer Umgebungstemperatur unter der Glasübergangstemperatur alle drei Bereiche anzutreffen sind, tendieren Folien bei einer Temperatur über der Glasübergangstemperatur dazu, sich wie eine zähe Flüssigkeit zu verhalten. Die beiden erst genannten Verformungsbereiche sind nicht erkennbar.
- Neben der Umgebungstemperatur beeinflusst die Verformungsgeschwindigkeit das Materialverhalten der PVB-Folie unter Zugbeanspruchung. Bei höheren Geschwindigkeiten verhält sich die PVB-Folie zunehmend steifer (siehe Bild 5.2d).



**Bild 5.2** Zug-Verformungsverhalten der PVB-Folie; (a) Kriechen der Folie bei konstanter Beanspruchung, (b) typisches Spannung-Dehnungsverhalten der PVB-Folie unter konstanter Verformungsgeschwindigkeit unterhalb der Glasübergangstemperatur, (c) typisches Spannung-Dehnungsverhalten der PVB-Folie unter konstanter Verformungsgeschwindigkeit oberhalb der Glasübergangstemperatur, (d) Spannung-Dehnungsverhalten der PVB-Folie bei unterschiedlichen Verformungsgeschwindigkeiten oberhalb der Glasübergangstemperatur.

**Fig 5.2** Deformation behaviour of the PVB-foil under tension; (a) creep of the foil under constant load, (b) typical stress-strain behaviour curve under constant deformation rate below the glass transition temperature, (c) typical stress-strain behaviour curve under constant deformation rate above the glass transition temperature, (d) stress-strain behaviour curves with different deformation rates above the glass transition temperature.

### Vierpunktbiegeversuche an zweiseitig einfach gelagertem Verbundsicherheitsglas

- In ungebrochenem Zustand I konnte die Tragfähigkeit bestimmt werden. Das Last-Verformungsverhalten ist annähernd linear elastisch (siehe Bild 5.3).
- Der Schubmodul der Zwischenschicht ist nicht konstant und nimmt mit der Beanspruchungsdauer ab.

- Die höchste Tragfähigkeit wurde bei Verbundsicherheitsglas aus Einscheibensicherheitsglas gemessen. Das teilvorgespannte Glas hatte eine kleinere Traglast. Sie war jedoch höher als bei dem herkömmlichen nicht vorgespannten Floatglas.
- Einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit hat die Wahl des Querschnitts der Verbundsicherheitsglasscheibe. Scheiben mit asymmetrischen Querschnitten weisen eine höhere Tragfähigkeit auf als solche mit symmetrischem Aufbau (vorausgesetzt, dass die Gesamtdicke sich nicht verändert).
- Unterschiedlich dicke Zwischenschichten (bis 3.04 mm) haben keinen grossen Einfluss auf die Tragfähigkeit im Zustand I.
- In Vierpunktbiegeversuchen bricht bei Verbundsicherheitsglasscheiben mit symmetrischen Querschnitten zuerst die untere Glasschicht. Dagegen versagt bei Verbundsicherheitsglasscheiben mit asymmetrischem Gesamtquerschnitt zuerst die Glasschicht mit dem dickeren Querschnitt.
- Durch einen harten Stoss geschädigte Verbundsicherheitsglasscheiben versagen zuerst am Berührungsort. Dies kann unabhängig von der Glasdicke die obere oder die untere Glasschicht sein.
- Die Auswertung der Bruchbilder nach dem Kollaps zeigte, dass Verbundsicherheitsgläser aus Einscheibensicherheitsglas unabhängig von der Belastungsart über die gesamte Fläche in viele kleine Stücke zerfallen. Die Grösse und Menge der Bruchstücke ist von dem Vorspanngrad und dem Abstand zum Initialbruch abhängig. Zum Initialbruch hin nimmt die Grösse der Bruchstücke ab und die Anzahl pro definierte Fläche zu.
- Mit dem Bruchbild von Einscheibensicherheitsglas lassen sich im Zustand II die verbliebenen Krümmung der entlasteten Verbundsicherheitsglasscheibe (untere Glasschicht gebrochen, obere intakt) und die gemessenen Längsverformungen der ausgebauten VSG-Scheiben nach dem völligen Versagen erklären.
- Beim gebrochenen teilvorgespannten Glas ist nach der Bruchursache zu unterscheiden. Je nach Belastungsart kann sich ein anderes Bruchbild ausbilden.
- Verbundsicherheitsglasscheiben aus teilvorgespanntem Glas, durch eine Stahlkugel beschädigt, zeigen mehrere einzelne Risse, welche vom Zentrum des Bruches bis zum Rand reichen. In der Nähe der Ränder können sich die Risse verzweigen.
- Verbundsicherheitsglasscheiben aus teilvorgespanntem Glas, belastet in Vierpunktbiegeversuchen, brechen wie Einscheibensicherheitsglas in der ganzen Fläche.
- Floatglasscheiben, die aufgrund eines Stosses gebrochen waren, zeigten nur einzelne Risse ausgehend vom Zentrum des Auftreffpunkts.
- Bei teilvorgespannten und nicht vorgespannten Verbundsicherheitsglasscheiben kündigt sich das Versagen der zweiten Glasschicht mit dem Fortschreiten der bestehenden Risse und mit dem Entstehen neuer Risse in der schon bereits gebrochenen

Glasschicht an. Die Rissbildung ist abgeschlossen, wenn die gesamte Verbundsicherheitsglasscheibe Zustand II erreicht hat.

- Im Zustand II ist das Last-Verformungsverhalten nicht mehr linear elastisch. Mit der Entstehung und Ausbreitung weiterer Risse in der schon gebrochenen Glasschicht ist das Verhalten nur noch teilweise linear.
- Ein Resttragverhalten im Zustand III wurde nur bei den Versuchskörpern festgestellt, welche Fließgelenklinien aufwiesen. Deshalb haben Verbundsicherheitsglasscheiben aus Einscheibensicherheitsglas in Vierpunktbiegeversuchen kein Resttragvermögen.
- Mithilfe asymmetrischer Gesamtquerschnitte oder mithilfe einer dickeren Zwischenschicht kann die Resttragfähigkeit im Zustand III erhöht werden.
- Versuchskörper mit Fließgelenklinien, welche sich senkrecht zur Längsseite ausbildeten, hatten die kleinste Resttragfähigkeit als Versuchskörper mit teilweise diagonalen Fließgelenklinien.

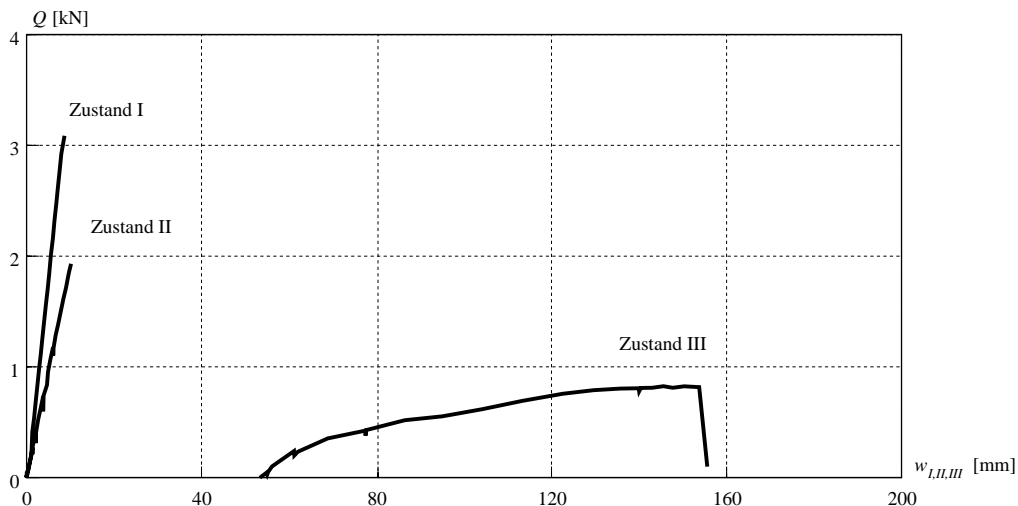


Bild 5.3 Typischer Last-Durchbiegungsverlauf einer Verbundsicherheitsglasscheibe, be- und entlastet in einem Vierpunktbiegeversuch im Zustand I, II und III.

Fig 5.3 Typical load-deflection behaviour of laminated safety glass, loaded and unloaded in a four point bending test in stage I, II and III.

### Biegeversuche an vierseitig einfach gelagertem Verbundsicherheitsglas

- Das Verformungsverhalten der Versuchskörper im Zustand I war nichtlinear elastisch. Die Last stieg im Zustand I und II überproportional zur Durchbiegung (siehe Bild 5.4).
- Die Traglasten waren viel höher als die entsprechenden Traglasten aus Vierpunktbiegeversuchen.
- Alle Initialbrüche der Verbundsicherheitsglasscheiben lagen im Zentrum der Platte.
- Da alle Verbundsicherheitsglasscheiben einen symmetrischen Querschnittstyp besaßen, brach zuerst die untere Glasschicht.

- Das Last-Verformungsverhalten im Zustand II ist wegen der grossen Durchbiegungen und der neu entstehenden Risse nichtlinear und ebenfalls nicht elastisch.
- Für die Ermittlung der Traglast im Zustand II sollte die Mitwirkung des Glases auf Zug mitberücksichtigt werden.
- Im Zustand III konnte die Last bei allen Versuchskörpern bis zum Erreichen der Resttraglast gesteigert werden.
- Das Versagen der Verbundsicherheitsglasscheiben erfolgte nicht spröde, sondern zuerst durch die Ausbildung und das Versagen der Fliessgelenklinien (Absplitterungen an der Glasoberfläche mit anschliessendem Reissen der Folie).
- Die Höhe der Resttraglast im Zustand III ist abhängig vom Fliessgelenkbild.
- Versuchskörper, die durch eine Stahlkugel zuerst geschädigt wurden, wiesen höhere Resttraglasten auf als solche, die unbeschädigt und in der Versuchseinrichtung belastet worden waren.
- Nach dem Erreichen der Resttraglast fiel keiner der Versuchskörper von der Lagerung herunter. Stattdessen stanzte der Kolben die Glasplatte im Zentrum durch und die Folie riss auseinander.

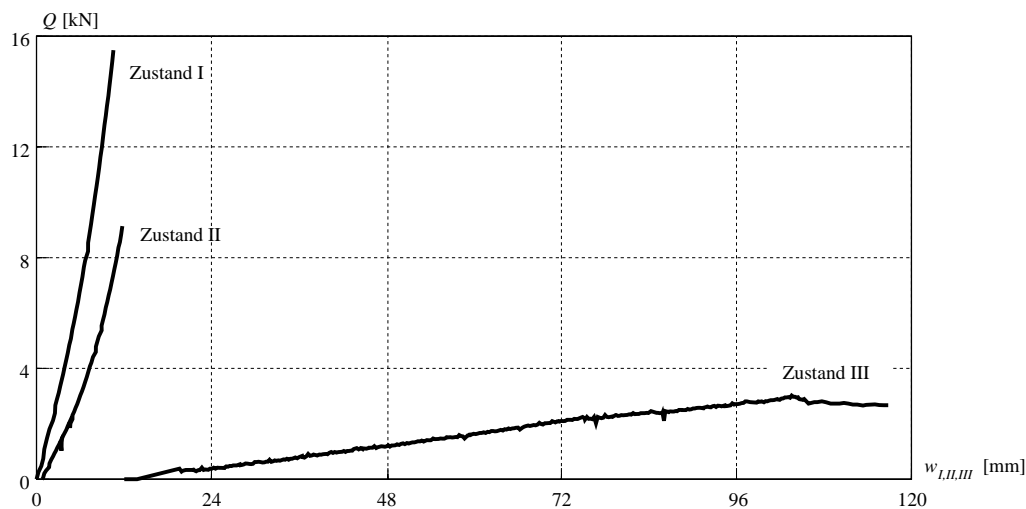


Bild 5.4 Typischer Last-Durchbiegungsverlauf einer Verbundsicherheitsglasscheibe, be- und entlastet in einem Plattenversuch im Zustand I, II und III.

Fig 5.4 Typical load-deflection behaviour of laminated safety glass, loaded and unloaded in a plate test in stage I, II and III.



## 5.2 Summary

For overhead glazing or accessible glass elements not only a load carrying capacity but also a remaining structural capacity is required [N 1], [N 2]. Glass panes consisting of one glass sheet fail immediately without exhibiting a remaining structural capacity. Therefore composite materials like laminated safety glass are used. The term “remaining structural capacity“ has not been appropriately defined until now. Various publications and guidelines [F 2], [D 3] refer to different requirements for such glass structures. Two aspects are commonly considered in all these publications; the amount of the load (the ultimate load in stage II or the collapse load in stage III) and the lifetime of the structure in stage III. For the verification of the remaining structural capacity neither mechanical models nor numerical simulations for both, the ultimate load and lifetime exist. Therefore, full scale tests are carried out to determine the remaining structural capacity.

The research project „Remaining Structural Capacity of Laminated Safety Glass“ is a part of the research program „COST-Action C13 - Glass and Interactive Building Envelopes“. Within the scope of this research project tensile tests and bending tests have been carried out at the Institute of Structural Engineering (IBK) of the ETH Zurich with laminated safety glass (see Fig 5.1).

The bending tests have shown that the load carrying capacity of laminated safety glass has to be considered in three stages. As a result, the remaining structural capacity can be formulated only according to the stage of damage (stage II or III). The results of the bending tests are the basis for the calculation of the remaining structural capacity. A mechanical model can be formulated considering the crack patterns as well as the measured loads and deformations. Furthermore, different structural options to increase the remaining structural capacity were investigated. In order to be able to simulate the material behaviour of the PVB-foil and to apply the constitutive laws to the mechanical model, tensile tests were carried out under different environmental conditions.

### **Tests for the determination of the material behaviour under tensile forces**

- In tensile tests with constant load the creep of the PVB-foil could be observed (see Fig 5.2a).
- In displacement-controlled tensile tests the temperature has a strong influence on the material behaviour of the thermoplastic foil. A differentiation has to be made whether the temperature is below (see Fig 5.2b) or above the glass transition temperature (see Fig 5.2c).
- Three different stages of the PVB-foil over a period of loading are discussed. First, the foil behaves linear-elastically until the material reaches the yield point. Then the stage of softening can be observed. Before the foil tears apart, the stage of hardening ends. If the actual temperature remains under the glass transition temperature all sta-

ges of the foil can be observed. Otherwise, the foil shows no linear-elastic behaviour. Instead, the higher the temperature, the larger are the plastic deformations and the foil tends to behave like a viscous fluid.

- Besides the ambient temperature, the deformation rate influences the material behaviour of the foil. The stiffness of the PVB-foil increases with higher deformation rates (see Fig 5.2d).

#### **Four point bending tests with panes of laminated safety glass on two opposite sides**

- In stage I, with the unbroken pane the load carrying capacity could be determined. The load-deformation behaviour is approximately linear-elastic (see Fig 5.3).
- The shear modulus of the interlayer is not constant and decreases as long as the pane is loaded.
- Panes of laminated toughened glass have the highest load carrying capacity. Panes of laminated heat strengthened glass exhibit smaller ultimate loads compared to those of toughened glass but higher ones compared to those of float glass.
- The cross-section of a laminated safety glass has a decisive influence on the load carrying capacity. Panes with an asymmetrical cross-section show a higher load carrying capacity compared to those of a symmetrical cross-section (provided that the total thickness remains the same).
- The thickness of the interlayer (up to 3.04 mm) does not influence the load carrying capacity.
- During the four point bending tests the lower glass sheet of the pane with a symmetrical cross-section breaks first. However, in panes with an asymmetrical cross-section the thicker glass layer fails first.
- Laminated safety glass damaged by a steel sphere fails first at the point of the impact. This can be either the lower or the upper glass layer, irrespective of the glass thickness.
- The evaluation of fracture patterns after failure shows that, irrespective of the kind of loading, panes of laminated tempered glass divide into small pieces enclosing the entire area. Size and quantity of the fragments depend on the degree of prestressing and on the distance to the initial failure. Approaching the point of initial failure the size of the fragments decreases and the number per defined area increases.
- The residual curvature after unloading from stage II (lower glass layer broken, upper glass layer intact) and the measured elongation of the dismantled glass panes after total failure can be explained by the fracture pattern.
- With regard to heat strengthened glass the cause of the failure has to be taken into account. Depending on the kind of loading the fracture pattern differs.

- Panes of laminated heat strengthened glass damaged by a steel sphere show several cracks reaching from the centre of the initial failure to the edges of the pane. Close to the edges the cracks can branch out.
- Panes of laminated heat strengthened glass loaded in four point bending tests break like those out of toughened glass in stage II forming small fragments in the entire broken glass layer.
- Panes of laminated float glass damaged by a steel sphere showed some few cracks spreading from the point of impact.
- In panes of laminated heat strengthened or float glass the failure of the second layer is announced by the progression of existing cracks and the development of new cracks. Development of cracks is completed when the entire broken glass layer has reached stage II.
- The load-deformation behaviour in stage II is between the development of new cracks partially linear.
- An ability to carry load in stage III could be observed only for panes which develop yield lines. Consequently, panes of laminated toughened glass have no remaining structural capacity in stage III.
- The remaining structural capacity in stage III can be increased by applying a thicker interlayer or by arranging an asymmetrical cross-section.
- Test-specimens with yield lines perpendicular to the longer edges showed a higher remaining structural capacity than panes with yield lines developing to some extent diagonally.

#### **Plate tests with panes of laminated safety glass simply supported on all four sides**

- The deformation behaviour of laminated safety glass in stage I was nonlinear-elastic. The load increased in stage I and II over-proportionally to the deformation (see Fig 5.4).
- The ultimate loads in plate tests were considerably higher than the respective ultimate loads in four point bending tests.
- All initial failures occurred began in the centre of the plates.
- Since the cross-sections of all plates were symmetrical the lower layer broke first.
- Due to the high deflections and occurring of new cracks the load-deformation behaviour in stage II is nonlinear and not elastic.
- For the calculation of the ultimate load in stage II the contribution of glass in tension should be taken into account.
- In stage III the load could be increased up to the final collapse with all specimens.

- The final collapse of the pane was not brittle, at first yield lines developed and later failed (by splitting of the glass surface and subsequent tearing of the foil).
- The level of the ultimate load in stage III depends on the yield line pattern.
- Laminated safety glass panes damaged by a steel sphere show higher ultimate loads than those loaded in the experimental setup without prior damage.
- After the ultimate load was reached the ram of the experimental setup punched the centre of the plate and the foil tore apart. The specimen fell not from the supports.

## 6 Verdankungen

Der vorliegende Versuchsbericht wurde im Rahmen des Forschungsprojekts “Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas” am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ausgearbeitet.

Für die Übernahme der Kosten für die Bereitstellung und den Transport der zahlreichen Versuchskörper möchten wir der Firma *Pilkington AG* in Wikon, insbesondere Herrn B. Candolo und Herrn J. Herde, herzlich danken. Erwähnenswert ist die unkomplizierte Bereitschaft des Produzenten die unterschiedlichen, teilweise auch seltsam erscheinenden Ideen umzusetzen. Die Möglichkeit für die Mitarbeiter der ETH bei der Produktion dabei gewesen zu sein und den Herstellprozess des Vorverbundes zu beobachten erlaubte die vielen unterschiedlichen Wünsche bezüglich der Querschnittszusammensetzungen zu berücksichtigen und die geforderte Genauigkeit der Proben zu erreichen, was dank Sorgfalt und Kompetenz aller Beteiligten gelang.

Für die finanzielle Unterstützung des Projekts sei auch dem *Bundesamt für Bildung und Wissenschaft* aufrichtig gedankt.

Ein grosser Dank der Verfasser ist an Herrn Heinz Richner gerichtet. Mit seiner Hilfe und Erfahrung konnte in einer frühen Phase der Forschungsarbeit im HIF Gebäude am Institut für Baustoffe (IfB) der ETH die Zugversuche vorbereitet und durchgeführt werden. Für die sorgfältige und genaue Herstellung der Zugprobekörper möchten die Verfasser Frau Sara Luzon danken.

Herr Markus Baumann leistete neben der Mitarbeit bei der Durchführung und bei der Lösung von mess- und regeltechnischen Problemen wertvolle Hilfe. Gerade bei der Planung der Versuchseinrichtungen, sowohl bei den ungewöhnlichen Versuchsaufbau der Vierpunktbiegeversuche, als auch bei den Plattenversuchen, konnten dank seiner Vorschläge die Tragfähigkeit und die Resttragfähigkeit der Verbundsicherheitsgläser untersucht werden.

Herrn Stefan Buchmüller sei für die Hilfe bei der Vorbereitung und Durchführung von fünf Plattenversuchen im Rahmen seiner Semesterarbeit herzlich gedankt.

## Verdankungen

## 7 Begriffe

<i>Begehbare Verglasung</i>	Glaskonstruktion, auf welcher sich Personen planmässig bewegen bzw. aufhalten.
<i>Betretbare Verglasung</i>	Glaskonstruktion, welche nur zu Wartungs- und Reinigungszwecken betreten wird (z.B. Dächer etc.).
<i>Einfachglas</i>	Flachglas bestehend aus nur einer Glasschicht.
<i>Einscheibensicherheitsglas</i>	Einfachglas mit Vorspannung. Die eingeprägte Druckspannung an der Oberfläche beträgt $75 \text{ N/mm}^2$ .
<i>Extrudieren</i>	Verarbeitungsvorgang bei dem die Formmasse in der Plastiziereinheit (Extruder) eingezogen und homogenisiert wird.
<i>Flachglas</i>	Oberbegriff für alle ebenen und gebogenen Glasscheiben.
<i>Floatglas</i>	Einfachglas, das im Floatglasverfahren hergestellt wird.
<i>Fliessgelenklinie</i>	Ort in Verbundsicherheitsglas, an welchem die Krümmungen nach dem Bruch der Scheibe durch Plastifizierung der Folie konzentriert werden.
<i>Glasscheibe</i>	Flächiges Tragelement aus Glas, welches durch beliebige Kräfte beansprucht wird. Der Begriff wird auch bei reiner Plattenbeanspruchung verwendet.
<i>Glasübergangstemperatur</i>	Temperatur, bei dem ein Polymer von der festen in eine viskose Phase übergeht.
<i>Polymer</i>	Chemische Verbindung, die aus Molekülketten besteht.
<i>Polyvinylbutyral</i>	Material, welches für die Zwischenschicht in Verbundsicherheitsgläsern verwendet wird; besteht aus Polyvinylazetyl und Butyraldehyd.
<i>Reststandzeit</i>	Zeitdauer bis zum völligen Versagen einer Verbundsicherheitsglasscheibe bei einer konstanten Belastung.

## Begriffe

<i>Resttragfähigkeit</i>	Fähigkeit einer Verbundsicherheitsglasscheibe in gebrochenem Zustand II oder III weiterer Beanspruchung standzuhalten.
<i>Resttraglast</i>	Maximal erreichbare Last im Zustand II oder III.
<i>Resttragvermögen</i>	Sammelbegriff für das Tragverhalten einer Verbundsicherheitsglasscheibe im Zustand II oder III.
<i>Sandwichkonstruktion</i>	Konstruktion mit Querschnitt aus Verbundsicherheitsglas.
<i>Tension stiffening</i>	Versteifende Mitwirkung des Glases auf Zug zwischen Rissen.
<i>Thermoplast</i>	Kunststoff, der aus linearen oder verzweigten Molekülfäden besteht.
<i>Traglast</i>	Maximal erreichbare Last.
<i>Teilvorgespannten Glas</i>	Floatglas mit Vorspannung. Die eingeprägte Druckspannung an der Oberfläche beträgt $25 \text{ N/mm}^2$ .
<i>Viskoses Verhalten</i>	Von Belastungsdauer abhängiges Spannungs-Dehnungsverhalten.
<i>Vorspannung</i>	Eigen Spannungszustand eines Einfachglases mit Druckspannungen an den Oberflächen und Zugspannungen im Innern der Scheibe.
<i>Verbundsicherheitsglas</i>	Glasscheibe, die im Querschnitt aus mindestens zwei Glasschichten besteht. Diese sind durch eine PVB-Folie miteinander verbunden.



# 8 Bezeichnungen und Abkürzungen

## Lateinische Grossbuchstaben

*A* Querschnittsfläche der Folie

*B* Breite, Biegesteifigkeit

*COST* European COoperation in the field of Scientific and Technical research.

*E* Elastizitätsmodul

*ESG* Einscheibensicherheitsglas

*F* Kraft, Last

*FLG* Floatglas

*GFK* Glas-Faser-Kunststoff

*G* Schubmodul

*L* Länge

*M* Biegemoment

*PVB* Polyvinylbutyral

*Q* Kraft, Last

*R* Reststandzeit

*S* Schubsteifigkeit

*T* Temperatur

*TVG* Teilvorgespanntes Glas

*VSG* Verbundsicherheitsglas

## Lateinische Kleinbuchstaben

*a* Querschnittsdicke

*e* Abstand der neutralen Achsen

*h* Fallhöhe

*r* Radius

*t* Zeit

*v* Verformungsgeschwindigkeit

*w* Durchbiegung; Verschiebung

*x, y* Abstände, Koordinaten

## Griechische Buchstaben

$\alpha, \beta$  Hilfswerte

$\delta$  Versatzmass

$\varepsilon$	Dehnung
$\gamma$	Scherwinkel
$\lambda$	Hilfswert
$\sigma$	Normalspannung

### **Weitere Zeichen**

$\emptyset$	Durchmesser
<i>IP</i>	Plattenversuch
<i>4S</i>	Vierpunktbiegeversuch
<i>Zug</i>	Zugversuch

### **Fusszeiger – Zahlen**

<i>I,II,III</i>	Bruchzustand 1, 2, 3
<i>1 - 6</i>	Indizes

### **Fusszeiger – Grossbuchstaben**

<i>A</i>	Abstand der inneren Auflager
<i>D</i>	Deckschicht
<i>F</i>	Abstand der äusseren von den inneren Auflagern
<i>G</i>	Glasübergangstemperatur, gesamt
<i>K</i>	Klemmabstand
<i>M</i>	Gemittelter Wert
<i>N</i>	Nennwert
<i>S</i>	Stütz-; Klemm-; Sandwich
<i>T</i>	Temperatur
<i>U</i>	Umgebungstemperatur

### **Fusszeiger – Kleinbuchstaben**

<i>e</i>	Elastischer Bereich
<i>h</i>	Hardening; Verfestigung
<i>i</i>	Einzelgrösse
<i>k</i>	Kriechen
<i>o</i>	Obere Schicht
<i>r</i>	Bleibende Verformung in einem bestimmten Zustand
<i>s</i>	Softening; Entfestigung
<i>t</i>	Zug-; Zugfestigkeit
<i>u</i>	Trag-; Resttrag-; untere Schicht
<i>y</i>	Fliessen
<i>z</i>	Zwischenschicht

## 9 Literaturverzeichnis

### Normen und Richtlinien

- [N 1]                   TRLV; *Technische Regeln für die Verwendung von linienförmige gelagerten Verglasung*; Fachverband Konstruktiver Glasbau (FKG); Berlin, 1998; 9 pp.
- [N 2]                   DIN EN ISO 12543 Teil 1-6; *Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas*; Beuth Verlag; Berlin, 1998.
- [N 3]                   TRAV; *Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen*; Fachverband Konstruktiver Glasbau (FKG); Berlin, 2003; 14 pp.
- [N 4]                   EN 572-2 Teil 2; *Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Floatglas*; Beuth Verlag; Berlin, 1995; 46 pp.
- [N 5]                   DIN EN ISO 12543 Teil 5; *Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Masse und Kantenbearbeitung*; Beuth Verlag; Berlin, 1998; 10 pp.
- [N 6]                   DIN EN 1863-1; *Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Glas, Definition und Beschreibung*; Beuth Verlag; Berlin, 1995; 14 pp.
- [N 7]                   DIN EN 12150-1; *Glas im Bauwesen - Thermisch vorgespanntes Einscheiben-Sicherheitsglas, Definition und Beschreibung*; Beuth Verlag; Berlin, 1996; 14 pp.
- [N 8]                   DIN EN ISO 527 Teil 1-5; *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*; Beuth Verlag; Berlin, 1996; 36 pp.
- [N 9]                   DIN EN 1288 Teil 1-4; *Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas*; Beuth Verlag; Berlin, 2000; 12 pp.
- [N 10]                  DIN EN 13474 Teil 1; *Glas im Bauwesen - Bemessung von Glasscheiben - Allgemeine Grundlagen für Entwurf, Berechnungen und Bemessungen*; Beuth Verlag; Berlin, 1999; 46 pp.
- [N 11]                 DIN 53505; *Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Härteprüfung nach Shore A und Shore D*; Beuth Verlag; Berlin, 1999; 5 pp.

## **Fachbücher und Dissertationen**

- [F 1] Sedlacek, G.; Blank, K.; Laufs, W.; GÜsgen, J.; *Glas im Konstruktiven Ingenieurbau*; Ernst & Sohn; Berlin, 1999; 220 pp.
- [F 2] Wörner, J.; Schneider, J.; Fink, A.; *Glasbau*; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 2001; 275 pp.
- [F 3] Siebert, G.; *Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im konstruktiven Ingenieurbau*; Universität München; München 1999; 228 pp.
- [F 4] Hiese W.; Backe H.; *Baustoffkunde für Ausbildung und Praxis*; Werner Verlag; Berlin 2004; p. 15.
- [F 5] Luible, A.; *Stabilität von Tragelementen aus Glas*; EPFL These No. 3014; Lausanne, 2004; 275 pp.
- [F 6] Laufs, W.; *Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser*; Shaker Verlag; Aachen, Maastricht, 2000; 146 pp.
- [F 7] Stamm, K.; Witte, H.; *Sandwichkonstruktionen*; Springer-Verlag; Wien, New York, 1974; 337 pp.
- [F 8] Fink, A.; *Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen*; Universität Darmstadt; Darmstadt, 2000; 112 pp.
- [F 9] Schuler W.; *Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im konstruktiven Ingenieurbau*; Universität München; München, 2003; 160 pp.

## **Fachartikel aus Symposien und Kongressen**

- [A 1] Kott, A.; Vogel, T.; *Remaining Structural Capacity of Broken Laminated Safety Glass*; Glass Processing Days 2003; Tampere, 2003; pp. 403-407.
- [A 2] Kott, A.; Vogel, T.; *Safety of Laminated Glass Structures after Initial Failure*; Structural Engineering Internationala Vol. 14, No. 2; IABSE, 2004; pp. 134-138.
- [A 3] Kott, A.; Vogel, T.; *Safety of Laminated Glass Structures after Initial Failure*; IABSE Symposium Metropolitan Habitats and Infrastructures; Shanghai, 2004; pp. 434-435.

- [A 4] Sobek, W.; Kutterer, M.; Messmer, R.; *Untersuchungen zum Schubverbund bei Verbundsicherheitsglas - Ermittlung des zeit- und temperaturabhängigen Schubmoduls von PVB*; Bauingenieur Vol. 75, No. 1; Springer VDI Verlag, 2000; pp. 41-46.
- [A 5] Kott, A.; Vogel, T.; *Controlling the Post-Breakage Behaviour of Laminated Safety Glass*; International Symposium on the Application of Architectural Glass 2004; Munich, 2004; pp. 9-11.

### **Dokumentationen, Versuchsberichte, Skripte**

- [D 1] Haas, C.; Haldimann M.; *Entwurf und Bemessung von Tragelementen aus Glas - Wissenstandsbericht*; Rapport ICOM 493; EPFL-ICOM; Lausanne, 2004; 100 pp.
- [D 2] Buchmüller, S.; *Tragfähigkeit von zweiseitig abtragenden Glasplatten aus Verbundsicherheitsglas*; Versuchsbericht Semesterarbeit, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion; Zürich, 2004; 46 pp.
- [D 3] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; *Anwendung nicht geregelter Bauarten nach §20 der Hessischen Bauordnung im Bereich der Glaskonstruktionen*; VII 2-2-64b 16/01; 2003.