

# Zur Simulation von Sicherheitsglas unter stoßartiger Belastung

## Teil I: FE-Modelle für Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas

Ngoc Bao Nguyen, André Haufe  
ngocbaonguyen@web.de, andre.haufe@dynamore.de  
DYNAmore GmbH, Industriestr. 2, 70565 Stuttgart, Deutschland

Bärbel Sonntag, Stefan Kolling  
baerbel.sonntag@daimlerchrysler.com, stefan.kolling@daimlerchrysler.com  
DaimlerChrysler AG, EP/CSB, HPC X411, 71059 Sindelfingen, Deutschland

### Abstract:

Während im Automobilbau Sicherheitsgläser schon seit langen Jahren ein unverzichtbares Element des Insassenschutzes sind, gewinnt auch im konstruktiven Ingenieurbau mit zunehmendem Einsatz von Gläsern als Baustoff der Sicherheitsaspekt immer mehr an Bedeutung. Thermisch vorgespannte Gläser oder Einscheibensicherheitsgläser (ESG) ermöglichen die Aufnahme hoher Lasten und finden beispielsweise in tragenden Glaskonstruktionen vielfältige Anwendung. Einscheibensicherheitsglas zerfällt im Versagensfall in kleine stumpfkantige Krümel, sodass die Verletzungsgefahr in hohem Maße reduziert wird. Als Seiten- und Heckscheiben in Kraftfahrzeugen eingesetzt, erleichtern sie bei einem Unfall die Rettung von Fahrzeuginsassen. Bei begehbaren oder absturzsichernden Verglasungen wird aufgrund der relativ hohen Resttragfähigkeit bevorzugt Verbundsicherheitsglas (VSG) eingesetzt. In der Fahrzeugindustrie ist im Hinblick auf die splitterbindende Wirkung, durch die zwischen den Scheiben befindliche Folie, der Einsatz von Verbundsicherheitsglas als Windschutzscheibe vorgeschrieben.

Die Überprüfung der Tragfähigkeit von Sicherheitsglas erfolgte lange Zeit durch kostenintensive Versuche, da sich Berechnungsansätze – insbesondere wenn eine Berechnung bis in den Versagensbereich erforderlich war – noch in der Entwicklung befanden. Die Untersuchung des Tragverhaltens unter Stoßbelastungen, wie zum Beispiel durch Anprall, spielt dabei sowohl im Bauwesen (Absturzsicherungen) als auch im Automobilbau (Dachlastfall, Überschlag) eine immer wesentlichere Rolle. Versuchstechnisch kommen heute meist Pendelschlagversuche und Impakttests zum Einsatz, um die Tragwirkung von konstruktiven Gläsern ingenieurmäßig zu erfassen. Der Vorliegende Beitrag soll die Möglichkeiten aufzeigen, wie mit der Finiten Element-Methode solch komplexe dynamische und hochgradig nichtlineare Vorgänge zu simulieren sind. Hierfür werden sowohl für ESG als auch für VSG geeignete FE-Modelle vorgestellt und diskutiert.

### Keywords:

Vorgespanntes Glas, Einscheibensicherheitsglas, Verbundsicherheitsglas, Explizite FEM, Pendelschlagversuch, Crashsimulation

## 1 Einleitung

Der Einsatz von Sicherheitsglas ist sowohl im Bauwesen als auch in der Fahrzeugindustrie, insbesondere im Hinblick auf den Verletzungsschutz Insassen, unverzichtbar. Bei konventionellem Floatglas entstehen im Falle eines Scheibenbruchs große, scharfkantige Splitter. Thermisch vorgespanntes Glas oder Einscheibensicherheitsglas (ESG) zerfällt dagegen in kleine, stumpfkantige Krümel. Zudem wird durch den Druckzustand an der Glasoberfläche eine erhöhte Festigkeit der Scheibe erreicht. Im Automobilbau werden Einscheibensicherheitsgläser als Seiten- und Heckscheiben eingesetzt; im Bauwesen kommen diese bei Überkopferverglasungen zum Einsatz.

Die im Fahrzeugbau als Windschutzscheibe eingesetzten Verbundsicherheitsgläser (VSG) bestehen aus zwei durch eine Folie aus Polyvinylbutyral (PVB) verbundene Glasscheiben. Das Bruchbild von VSG aus Floatgläsern ist durch grobe, scharfkantige Bruchstücke gekennzeichnet, die jedoch durch die Zwischenschicht aus PVB zusammengehalten werden und daher eine gewisse Resttragfähigkeit sicherstellen.

In diesem Beitrag werden zunächst die besonderen Notwendigkeiten zur Simulation von thermisch vorgespanntem Einscheibensicherheitsglas diskutiert und ein Lösungsweg zur Berücksichtigung der Vorspannung vorgeschlagen. Im zweiten Teil wird für VSG ein dreischichtiges Modell entwickelt, das den realen Aufbau einer VSG-Scheibe im Vergleich zu früheren Modellen (vgl. [11, 14, 15, 17]) besser wiederzugeben in der Lage ist. Anhand eines Pendelschlagversuchs (vgl. [2]) wird das neu entwickelte FE-Modell im Vergleich zu den bereits bestehenden, validierten FE-Modellen vergleichend diskutiert.

## 2 Einscheibensicherheitsglas (ESG)

### 2.1 Thermische Vorspannung

Nicht behandeltes Floatglas ist durch mikro- und makroskopische Oberflächenrisse gekennzeichnet, welche die Ursache für die sehr geringe Zugfestigkeit im Vergleich zur relativ hohen Druckfestigkeit des Werkstoffes Glas sind. Die praktische Zugfestigkeit von Glas ist dabei keine Materialkonstante im klassischen Sinne, sondern sie ist sehr stark von der Anzahl der Oberflächendefekte, also der Vorschädigung, abhängig. Um den Einfluss der Oberflächendefekte zu mindern, kann Glas im Herstellungsprozess thermisch vorgespannt werden. Hierbei wird die Glasscheibe zunächst über die Glasübergangstemperatur hinaus erhitzt und anschließend von beiden Seiten rasch abgekühlt. Aufgrund der steigenden Viskosität werden die Glasoberflächen im Verlauf des Abkühlens überdrückt. Im Glas stellt sich ein Eigenspannungszustand ein, bei dem die an den Oberflächen thermisch eingepprägten Druckspannungen mit den im Glasinneren bestehenden Zugspannungen im Gleichgewicht stehen. Wird dieses Querschnittsgleichgewicht wie im Falle eines Scheibenbruchs (Initialriss) gestört, zerfällt die Scheibe schlagartig in unzählige kleine stumpfkantige „Krümel“. In ausreichendem Abstand (St. Venant) von Kanten und ggf. vorhandenen Lochbohrungen ergibt sich ein parabelförmiger Vorspannungsverlauf über die Scheibendicke, bei dem das Verhältnis von Oberflächendruckspannung und zentraler Zugspannung ungefähr 2:1 beträgt. Der Betrag der eingepprägten Oberflächendruckspannung ist die maßgebende Bemessungsgröße und beträgt je nach Scheibendicke und Wärmeübergangszahl zwischen 100 und 150 N/mm<sup>2</sup>.

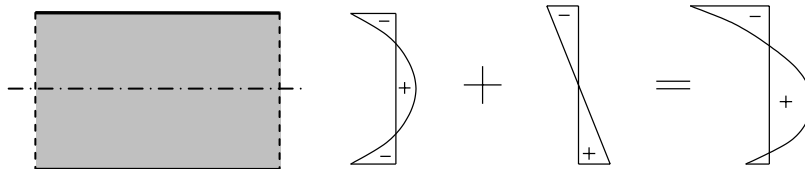


Bild 1: Spannungsverlauf bei steigender Biegebeanspruchung

Die erhöhte Festigkeit von ESG im Vergleich zum nicht vorgespannten Floatglas lässt sich durch das Überdrücken der Oberflächenrisse erklären. Somit muss bei einer zugbeanspruchten Glasoberfläche zunächst die eingepprägte Druckspannung abgebaut werden, ehe es zum Risswachstum und damit zum Sprödbruch kommt. Die Biegezugfestigkeit von Einscheibensicherheitsglas ist folglich genau um den Wert der eingepprägten Oberflächendruckspannung höher als die von Floatglas. Während die Biegezugfestigkeit von Floatglas nach [1] 45 N/mm<sup>2</sup> beträgt, werden durch thermische Vorspannung Fest-

tigkeitswerte zwischen 120 und 150 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Bild 1 zeigt den Spannungsverlauf über die Dicke für eine Platte aus Einscheibensicherheitsglas bei steigender Biegebeanspruchung.

## 2.2 Numerische Simulation

### 2.2.1 Modellierung des Glases

Zur Modellierung der ESG-Scheiben werden im vorliegenden Beitrag Belytschko-Lin-Tsay Schalenelemente verwendet. Das bis zum Sprödbbruch linear-elastische Verhalten von Glas wird mit einem elasto-plastischen Materialgesetz (MAT\_123) abgebildet, welches die Definition einer Hauptversagensdehnung erlaubt. Diese kann sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich liegen. Setzt man daher die Fließgrenze so hoch, dass plastisches Versagen nicht eintreten kann, ist es möglich das spröde Bruchverhalten von Glas abzubilden.

### 2.2.2 Berücksichtigung der thermischen Vorspannung

Zur Berücksichtigung des Vorspannungsverlaufes während der Berechnung kann die thermische Vorspannung als Anfangsspannung in die einzelnen Integrationspunkte über die Dicke eingebracht werden. Als numerische Integrationsregel wurde hierbei die Quadraturformeln nach Gauss-Lobatto gewählt. Der Vorteil der Gauss-Lobatto-Integration gegenüber der üblicherweise verwendeten Gauss-Integration ist, dass die äußeren Integrationspunkte genau auf der Schalenoberfläche liegen und die Oberflächendruckspannungen somit direkt eingegeben werden können.

Zum Abbilden des parabelförmigen Vorspannungsverlaufes sind drei Stützstellen erforderlich. Für die Spannungsinitialisierung liegen bei der Gauss-Lobatto-Quadratur die beiden Stützstellen am Rand  $\zeta_{1,2} = \pm 1$  und der Zugspannungswert für  $\zeta_3 = 0$  vor. Um jedoch den sich ändernden Spannungsverlauf über die Belastungsdauer hinreichend genau darstellen zu können, werden sieben Integrationspunkte über die Elementdicke gewählt, die jeder für sich initialisiert werden müssen. Die Lage der Stützstellen ist in Bild 2 dargestellt.

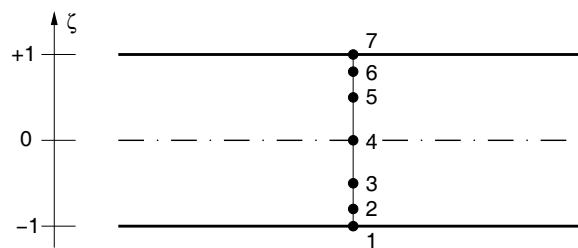


Bild 2: Stützstellen der Gauß-Lobatto-Quadratur

Mit dieser Modellierung ist jedoch unter Verwendung des vorliegenden Schalenelements weder eine Festigkeitssteigerung gegenüber dem nicht vorgespannten Floatglas, noch die Darstellung eines realitätsnahen Bruchbildes möglich. Hierfür wäre eine Verwölbung des Querschnitts notwendig, die die dem Schalenelement zugrunde liegende Reissner-Mindlin-Kinematik (fünf Freiheitsgrade), mit nur einem Schalendirektor über die Schalendicke, jedoch nicht abzubilden in der Lage ist. Eine hier nötige, höhere Schalentheorie (Multi-Direktor-Theorie oder auch p-Ansätze in Dickenrichtung mit entsprechend höherer Anzahl an Freiheitsgraden) wäre dann in der Lage, eine Störung des Gleichgewichts in Querrichtung innerhalb eines betroffenen Elements zu den Nachbarelementen zu „kommunizieren“. Auf diese Weise könnte sich eine lokale Störung schlagartig ausbreiten und somit zu dem in der Realität beobachteten Versagen der gesamten Platte führen. Solche Schalenformulierungen sind Gegenstand der aktuellen Forschung, jedoch kommerziell noch nicht verfügbar.

Durch die Erhöhung der Versagensdehnung um den Anteil der Vorspannung ist jedoch auch mit dem vorliegenden Schalenelement die Berücksichtigung der erhöhten Festigkeit einer ESG-Scheibe möglich. Hierzu ist die für das Floatglas angenommene Versagensdehnung von 0,1% um den Anteil der Vorspannung zu erhöhen, so dass sich für ESG eine Versagensdehnung von 0,2% ergibt (vgl. Bild 3).

Zusätzlich ist bei Stoßbelastungen das Phänomen der erhöhten Kurzzeitfestigkeit zu berücksichtigen. Mit steigender Beanspruchungsgeschwindigkeit nimmt auch die Festigkeit des Glases, wie bei fast allen ingenieurmäßig relevanten Materialien, zu. Bei einer sehr kurzen Belastung einer Glasplatte ist folglich eine deutliche Festigkeitssteigerung gegenüber einem Normbiegeversuch zu beobachten ([12, 13]. Mit Hilfe der Spannungskorrosionstheorie von CHARLES [8] und HILLIG [9] lassen sich diese Zusammenhänge quantitativ erfassen. Nach KERKHOF [10] beträgt die Festigkeit einer mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit  $\dot{\sigma}$  belasteten Glasplatte

$$\sigma_f = \left( \frac{2(n_v + 1)}{(n_v - 2)S_v f^{n_v}} a_0^{\frac{n_v-2}{2}} \dot{\sigma} \right)^{\frac{1}{n_v+1}} \quad (1)$$

Hierbei sind  $n_v$  und  $S_v$  bruchmechanische Konstanten,  $f$  ist eine Korrekturfunktion,  $a_0$  bezeichnet die Anfangsrisstiefe und  $\dot{\sigma}$  die Spannungsrate. Mit dem Verhältnis der Bruchspannungen

$$\frac{\sigma_{f,1}}{\sigma_{f,2}} = \left( \frac{\dot{\sigma}_1}{\dot{\sigma}_2} \right)^{\frac{1}{n_v+1}} \quad (2)$$

ergibt sich eine Festigkeitssteigerung um den Faktor 1,5 bei einer nicht vorgespannten Glasscheibe. Bei einer vorgespannten Glasscheibe ist zu beachten, dass die Festigkeit von Umgebungsbedingungen und Beanspruchungsgeschwindigkeit unabhängig ist, so lange die Oberflächendruckspannung nicht abgebaut ist und die Mikro- und Makrorisse überdrückt sind. Für ESG ist daher für den Anteil der Vorspannung kein Erhöhungsfaktor anzusetzen. Mit den bisherigen Annahmen ergibt sich schließlich eine festzulegende Hauptversagensdehnung von 0,3%.

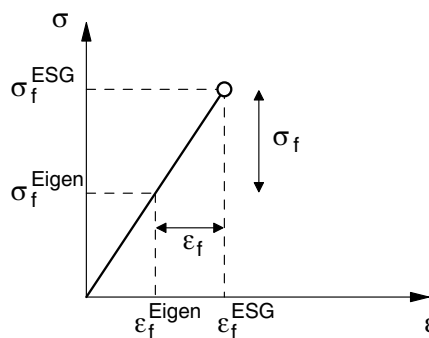


Bild 3: Versagensdehnung von Einscheibensicherheitsglas

### 2.3 Anwendungsbeispiel

Am Beispiel eines Impaktversuchs soll das Verhalten von Einscheibensicherheitsglas unter kurzzeitdynamischer Belastung untersucht werden. Bei dem vorliegenden harten Stoß wird ein würfelförmiger Impaktor der Masse  $m = 111 \text{ kg}$  mit einer Geschwindigkeit von  $v = 10 \text{ m/s}$  auf eine allseitig eingespannte quadratische Platte mit der Kantenlänge  $1500 \text{ mm}$  geschossen. Für die  $5 \text{ mm}$  dicke ESG-Platte wurde die oben beschriebene Modellierung mit sieben Integrationspunkten über die Dicke verwendet. Die Oberflächendruckspannung wird zu  $0,1 \text{ kN/mm}^2$  angenommen, die Hauptversagensdehnung zu  $0,3\%$ . Die Kantenlänge der Elemente beträgt  $15 \text{ mm}$ .

Sobald der Impaktor auf die Glasplatte trifft, baut sich im Bereich des Auftreffens auf der zugbeanspruchten Seite die eingepreßte Oberflächendruckspannung ab. Wird in einem Element die vorgegebene Versagensdehnung in einem Integrationspunkt erreicht, fällt dieses aus. Die durch den Aufprall verursachte Druckwelle breitet sich schlagartig in der Platte aus und führt zu einem kurz darauf folgenden Versagen der Elemente im äußeren Bereich der Glasscheibe. In Bild 4 ist das sich über die Zeit entwickelnde Bruchbild dargestellt. Bild 5 zeigt den sich zu diskreten Zeitpunkten einstellenden Vorspannungsverlauf über die Dicke. Hier ist gut zu erkennen, wie sich bei steigender Belastung zunächst die aufgeprägten Oberflächendruckspannung an der in diesem Falle untenliegenden biegezugbeanspruchten Seite abbaut, bis die Festigkeit in den Rissspitzen erreicht ist und die Glasplatte versagt. Zu beobachten ist allerdings ebenfalls ein Versagen auf Druck in einigen Elementen. In Wirklichkeit ist bei Glas jedoch die Druckfestigkeit im Vergleich zur Zugfestigkeit sehr hoch. Für das angewendete Materialgesetz ist es derzeit jedoch noch nicht möglich, eine vorzeichenbehaftete Hauptversagensdehnung zu definieren.

Bei Betrachtung der Spannungen nach dem Versagen erkennt man ebenfalls, dass in den an ausgefallene Elemente angrenzenden Bereichen die Vorspannung erhalten geblieben ist. Dies ist auf die für das vorliegende Problem unzureichende Schalenformulierung zurückzuführen, in der eine Verwölbung des Elementquerschnitts nicht darstellbar ist und somit das Gleichgewicht in den verbleibenden Elementen a priori bestehen bleibt. Bei der vorliegenden Modellierung mit Schalenelementen mit Reiss-

ner-Mindlin-Kinematik wird ein Element nur dann gelöscht, wenn dieses biegebeansprucht wird und dabei die Versagensdehnung erreicht wird. Das reale Bruchverhalten von ESG kann mit dieser Modellierung folglich nicht dargestellt werden. Notwendig ist ein Versagensmodell, in dem eine Verwölbung der Querschnittsfläche und damit eine Störung des inneren Gleichgewichts in einem einzelnen Element möglich ist. Die Diskretisierung mit Volumenelementen stellt selbstverständlich für Detailuntersuchungen eine Alternative dar.

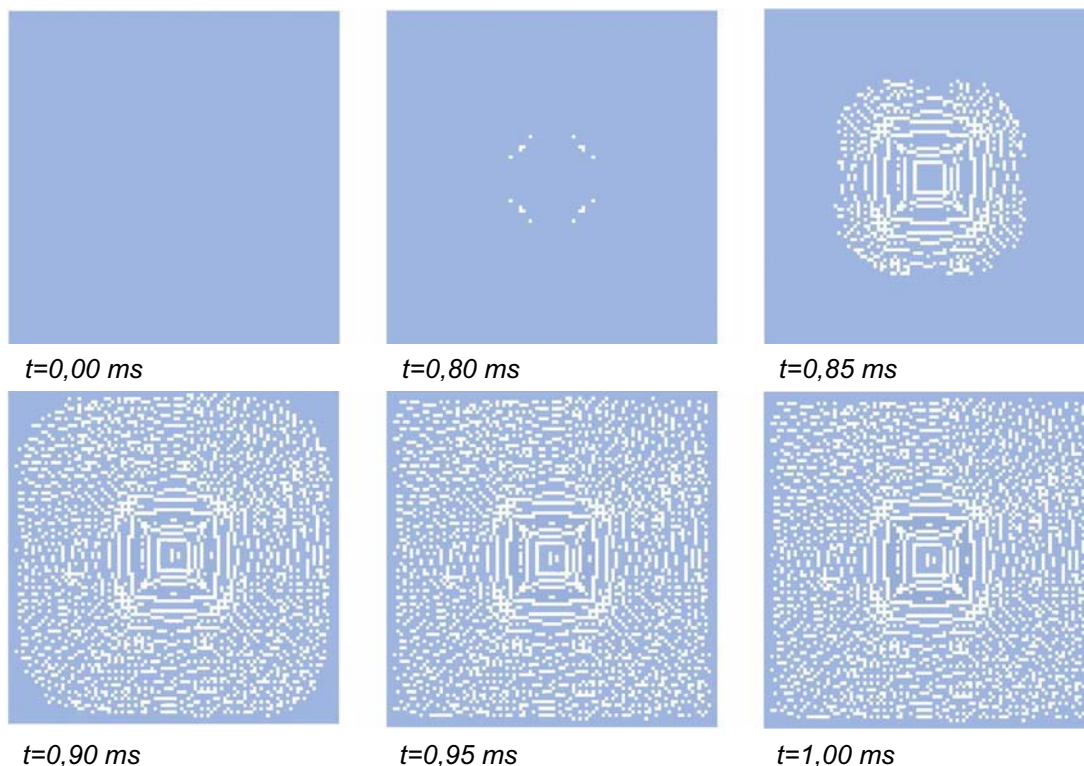


Bild 4: Zeitliche Entwicklung des Bruchbildes

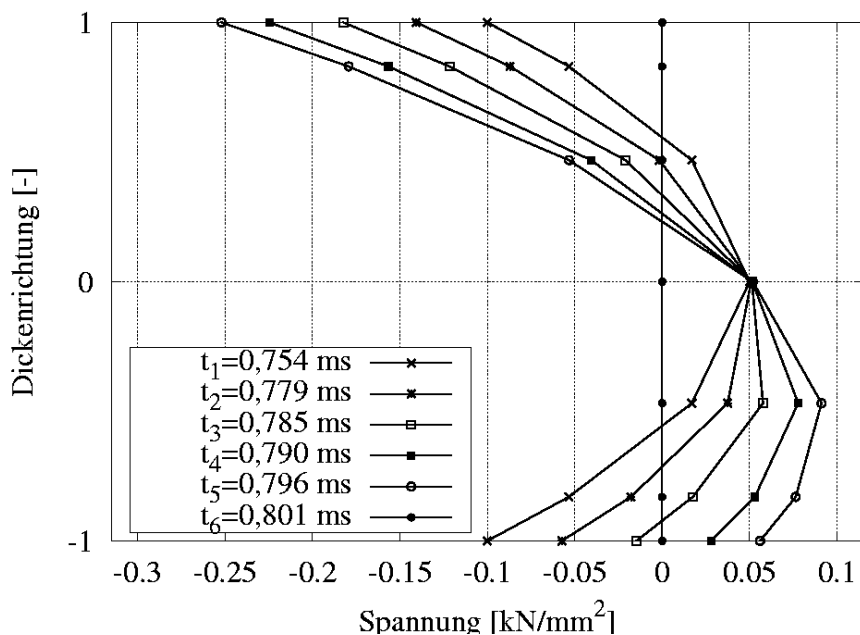


Bild 5: Zeitliche Entwicklung des Vorspannungsverlaufes

### 3 Verbundsicherheitsglas (VSG)

#### 3.1 Tragverhalten

Das Steifigkeitsverhalten von VSG wird in großem Maße durch das Verbundtragverhalten der Glasscheiben in Kombination mit der PVB-Folie bestimmt. Dieses beruht auf der Fähigkeit der Folie bzw. der Grenzschichten, Schubspannungen zu übertragen.

Polyvinylbutyral (PVB) zählt innerhalb der Polymere zur Gruppe der amorphen Thermoplaste. Das inkompressible Material besitzt bei Gebrauchstemperatur ein ausgeprägt visko-elastisches Verhalten, das neben einer extrem hohen Reißdehnung von 300 % durch ein stark dehnraten- und temperaturabhängiges Verhalten gekennzeichnet ist. Mit zunehmender Dehnrate bzw. abnehmender Temperatur weist PVB ein immer weniger gummielastisches und dafür immer glasähnlicheres, linear-elastisches, Verhalten auf. Entsprechend verändert sich das Tragverhalten des Verbundwerkstoffes VSG.

#### 3.2 Numerische Simulation

Das hier vorgestellte Modell C für Verbundsicherheitsglas basiert auf zwei vereinfachten Glasmodellen A und B (vgl. [14, 15, 17, 19]). Alle drei Modelle bestehen aus Schalenelementen, welche an den Knoten koinzident (topologiegleich) verknüpft sind. Ausgegangen wird von einer 5 mm dicken VSG-Scheibe mit einer 0,76 mm dicken PVB-Folie.

##### 3.2.1 Modell A

Das in [15] betrachtete Modell besteht aus zwei koinzident verknüpften Belytschko-Lin-Tsay Schalen. Mit der ersten Schale werden beide Glasscheiben zusammengefasst. Hiermit wird ein gleichzeitiges Versagen beider Scheiben angenommen. Die zweite Schale repräsentiert die PVB-Folie und wirkt mit nur einem Integrationspunkt über die Dicke als Membran (Bild 6).

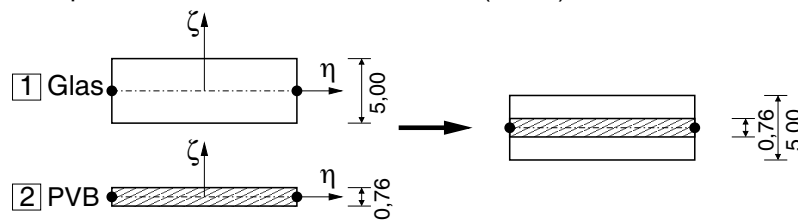


Bild 6: VSG-Modell A

Das Glas wird mit einem elasto-plastischen Materialgesetz (MAT\_123) modelliert, mit welchem das spröde Materialverhalten von Glas abgebildet werden kann. Um das gummielastische Verhalten der PVB-Folie wiederzugeben, wird das hyperelastische, in LS-DYNA (siehe [3, 4]) implementierte Materialmodell nach BLATZ und KO [5] (MAT\_7) verwendet.

Das Versagensmodell beruht auf der Annahme, dass bei Erreichen der Versagensdehnung die betroffenen Glaselemente ausfallen und danach nur noch die Elemente der PVB-Folie tragen, welche als Membran wirkt (Bild 7).

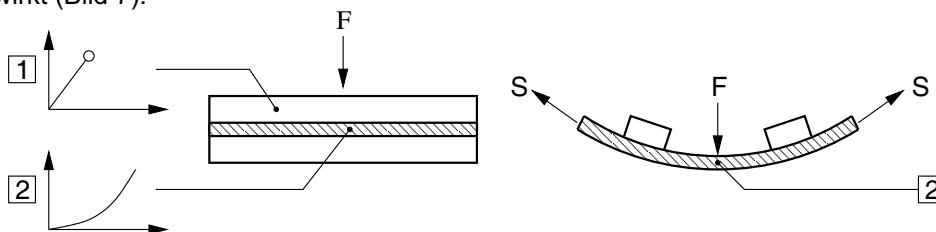


Bild 7: Tragwirkung Modell A

In der Realität wird jedoch eine relativ hohe Resttragfähigkeit der gebrochenen Scheibe beobachtet, die auf die auf der Folie haftenden Glassplitter zurückzuführen ist. Diese sind auf der druckbeanspruchten Seite der Scheibe in der Lage, sich gegeneinander abzustützen und somit Biegemomente aufzunehmen. Das vorgestellte Modell A ist nicht in der Lage diesen Effekt abzubilden.

3.2.2 Modell B

Um der realen Tragwirkung des VSG Rechnung zu tragen, wurde in [14] ein weiteres, zweischaliges koinzidentes Modell entwickelt, bei dem jedoch die erste Schale zusammen mit der zweiten Schale die VSG-Scheibe im ungerissenen Zustand I und die zweite Schale die Scheibe im gerissenen Zustand II abbildet (Bild 8).

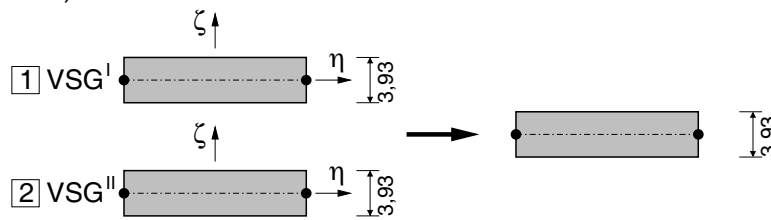


Bild 8: VSG-Modell B

Das linear-elastische Materialverhalten der Scheibe bis zum spröden Bruch wird wie zuvor über das Materialgesetz MAT\_123 mit einer definierten Hauptversagensdehnung abgebildet. Für das Verhalten nach dem Bruch wird ein elasto-plastisches Materialverhalten angesetzt, welches wiederum mit MAT\_123 – jedoch ohne Versagen – modelliert wird. Bei Versagen der ersten Schale übernimmt somit die zweite Schale die volle Tragwirkung. Im Gegensatz zu Modell A ist die zweite Schale in diesem Fall jedoch in der Lage größere Spannungen abzutragen. Bild 9 zeigt eine schematische Darstellung der Tragwirkung des Modells.

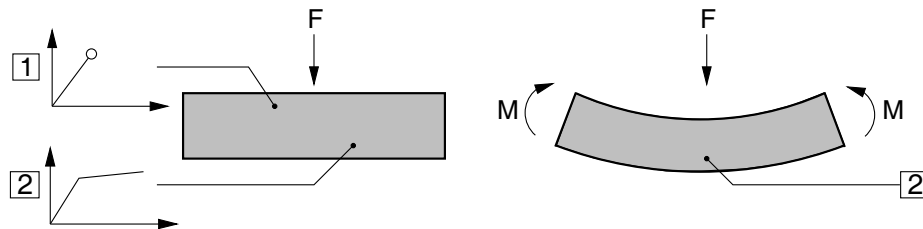


Bild 9: Tragverhalten Modell B

Um die Gesamtbiegesteifigkeit  $EI_{VSG}$  der realen VSG-Scheibe beizubehalten, wurden für das „verschmierte“ Modell Ersatzwerte für die Dicke  $t_{Modell}$ , die spezifische Dichte  $\rho_{Modell}$  und die Elastizitätsmoduli  $E^I_{Modell}$  und  $E^{II}_{Modell}$  für den ungerissenen bzw. gerissenen Zustand verwendet (vgl. [17]).

3.2.3 Modell C

Das Modell B ist zwar für den Lastfall eines Impaktoraufpralls auf eine Windschutzscheibe validiert (vgl. [17]), gibt jedoch die Eigenschaften einer Verbundglasscheibe lediglich „verschmiert“ wieder. Mit dem modifizierten Modell C soll nun der reale Aufbau einer VSG-Scheibe angenähert werden. Hierbei wird von drei koinzidenten Schalen ausgegangen, welche – entsprechend dem wirklichen Aufbau – die drei Schichten des VSG repräsentieren (Bild 10).

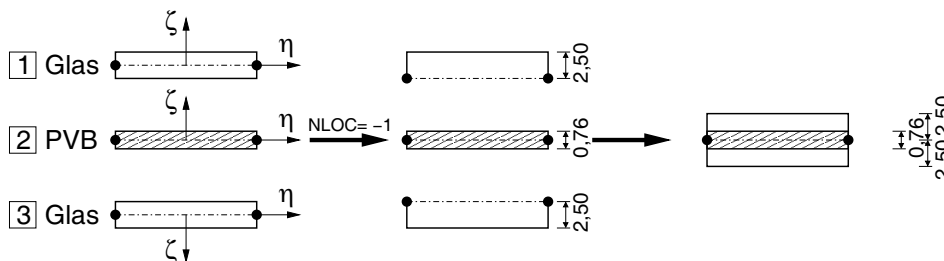


Bild 10: VSG-Modell C

Während bei den vorangegangenen koinzidenten Formulierungen die Schichten gleichsam ineinander liegen, ist es unter Verwendung von Hughes-Liu Elementen möglich, die Referenzflächen der Schalenelemente innerhalb des Schalenraumes zu verschieben. Diese kann nunmehr entlang der Schalenormalen an die Oberflächen des Schalenelements verschoben werden. Die Lage der Referenzfläche ist durch den Parameter  $\bar{\zeta}$  festgelegt. Dieser kann Werte zwischen  $-1$  und  $+1$  annehmen und bewirkt somit ein Verschieben der Referenzfläche; Extremfälle sind die Unterseite, die Mittelfläche bzw. die Oberseite des Schalenelementes (Bild 11). Somit können die beiden Glasscheiben bis zur halben Schalendicke nach innen bzw. außen versetzt werden. Bild 10 zeigt den verwendeten Modellaufbau. Für die Einzelscheiben wurde jeweils eine Dicke von 2,5 mm angesetzt, sodass nach dem Verschieben der Referenzflächen um 1,25 mm wieder eine Gesamtdicke der beiden Scheiben von 5 mm gegeben ist.

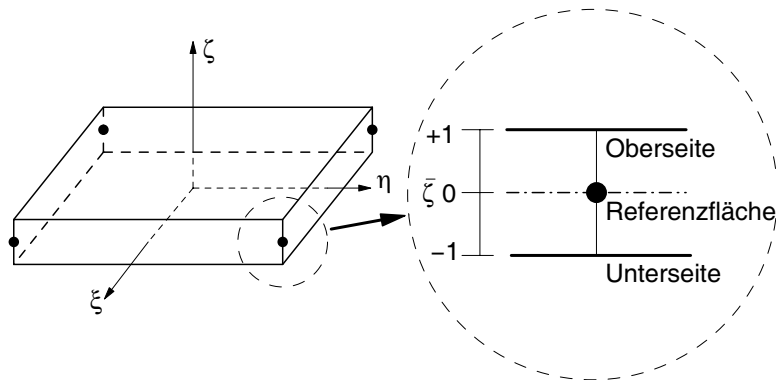


Bild 11: Lage der Referenzfläche beim Hughes-Liu Element

Da in diesem Fall beide Schalenormalen der Glasscheibe nach außen zeigen, ist für beide Schalen die Referenzfläche jeweils nach innen, also entgegen der Normalenrichtung, zu verschieben. Zu beachten ist, dass die Kontaktdicke verdoppelt werden muss, um nach dem Verschieben der Referenzflächen die ursprüngliche Lage der Kontaktoberflächen zu erhalten. Wie schon in Modell A erfolgt die Modellierung der beiden Glasscheiben über das Materialgesetz MAT\_123 und die der PVB-Folie mit dem hyperelastischen Materialgesetz MAT\_7.

Die in diesem Modell durch die Verschiebung der Referenzflächen entstandene örtliche Trennung der beiden Glas-Schalen ermöglicht es nun auch der unterschiedlichen Festigkeit von Glas unter Zug- und Druckbeanspruchung Rechnung zu tragen. Ist die Belastungsrichtung *a priori* bekannt, können für die Scheiben auf der druck- und der zugbeanspruchten Seite unterschiedliche Festigkeitswerte definiert werden, um ein vorzeitiges Versagen durch Druckbelastung auszuschließen.

### 3.3 Anwendungsbeispiel

Die Güte der drei Verbundglasmodelle wird in einer Simulation des im Bauwesen häufig angewandten Pendelschlagversuchs nach DIN EN 12600 ([6, 7]) überprüft. Hierbei wird ein 50 kg schwerer, an einem Seil hängender Stoßkörper, bestehend aus einem Doppelreifen mit 4 bar Luftdruck und einem Stahlkern, ausgeleitet und auf Glaselement den Abmessungen 847 mm x 1910 mm fallengelassen (vgl. [18] und Bild 12). Der Fallhöhe von 190 mm entspricht eine Anprallgeschwindigkeit von 2,97 m/s. Die in dem Anwendungsbeispiel verwendete VSG-Scheibe besteht aus 2 x 3 mm Floatglas und 0,38 mm PVB-Zwischenschicht. Verglichen werden die Berechnungsergebnisse mit Versuchswerten aus [16].

Der Vergleich der Beschleunigungs-Zeitverläufe in Bild 13 zeigt, dass die Beschleunigung des Stoßkörpers von allen Verbundsicherheitsglasmodellen unterschätzt wurde. Dabei wird die Versuchskurve am ehesten durch die Simulation mit Modell B angenähert. Die Berechnungen mit Modell A und C haben sich erneut

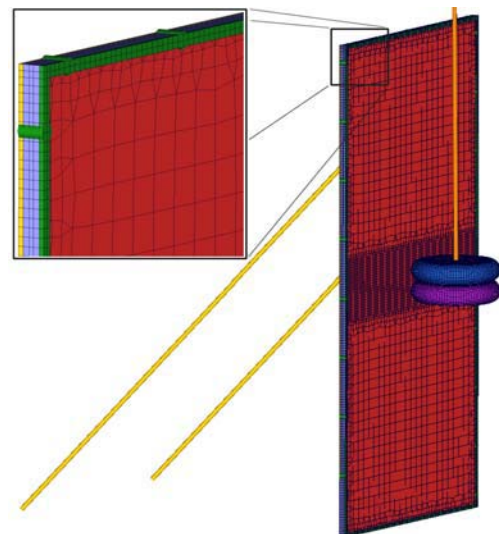


Bild 12: Modell für des Pendelschlagversuchs nach [18]



als zu weich erwiesen. Der Grund für die Unterschätzung kann im momentan vernachlässigten Einfluss der Elastomerlager der Versuchseinrichtung begründet liegen.

Mit dem neuen Modell C ist die Möglichkeit gegeben, durch Veränderung der Materialparameter auf der druckbeanspruchten Scheibe eine Steifigkeitserhöhung zu erzielen. Dies wurde anhand einer Rechnung überprüft, in der für die Scheibe auf der druckbeanspruchten Seite kein Versagen definiert wurde (Modell C1). Der damit ermittelte Beschleunigungs-Zeitverlauf (Bild 14) ist aufgrund der nicht versagenden Scheibe wie erwartet zu steif, zeigt jedoch eine relativ gute Übereinstimmung mit der Versuchskurve. Der Vergleich der Verformungen über die Scheibenbreite verdeutlicht das unterschiedliche Tragverhalten der Verbundsicherheitsglasmodelle (Bild 15). Anstatt ein Versagen der druckbeanspruchten Scheibe ganz auszuschließen, könnte eine höhere Bruchdehnung definiert werden, um ein späteres Versagen der Scheibe auf der druckbeanspruchten Seite zu erreichen. Auf diese Weise könnte zukünftig ein etwas weiches Tragverhalten und somit eine noch bessere Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt werden.

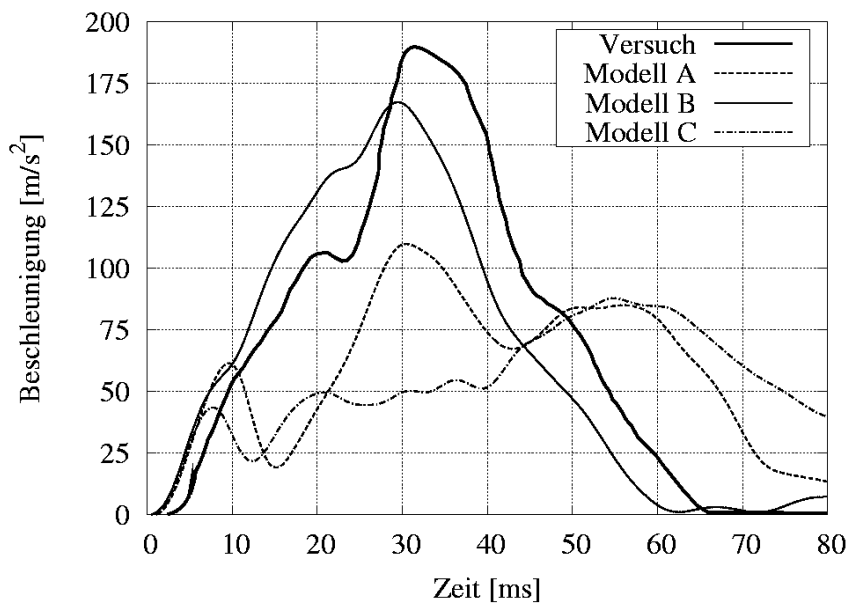


Bild 13: Vergleich der Pendelbeschleunigungen zwischen Versuch und Berechnung

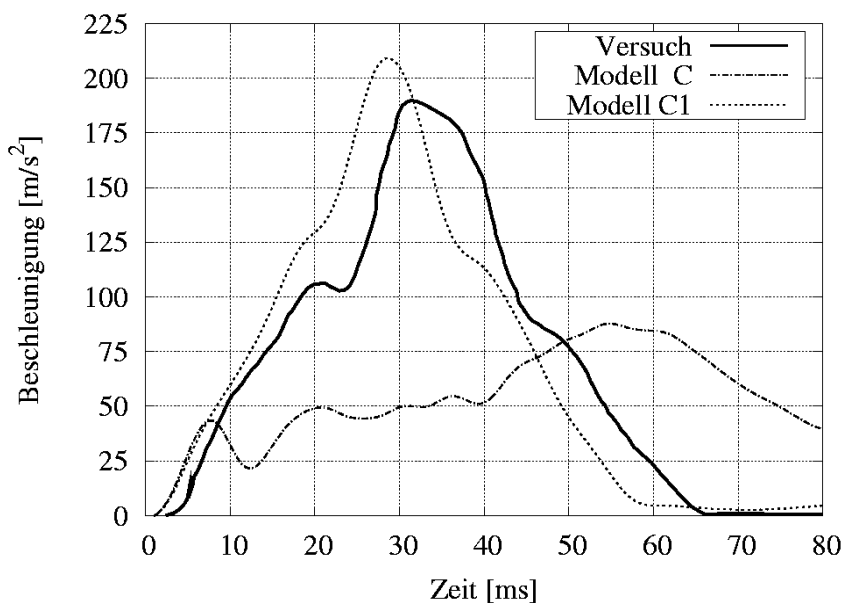


Bild 14: Vergleich der Pendelbeschleunigungen von Modell C und C1 mit dem Versuch

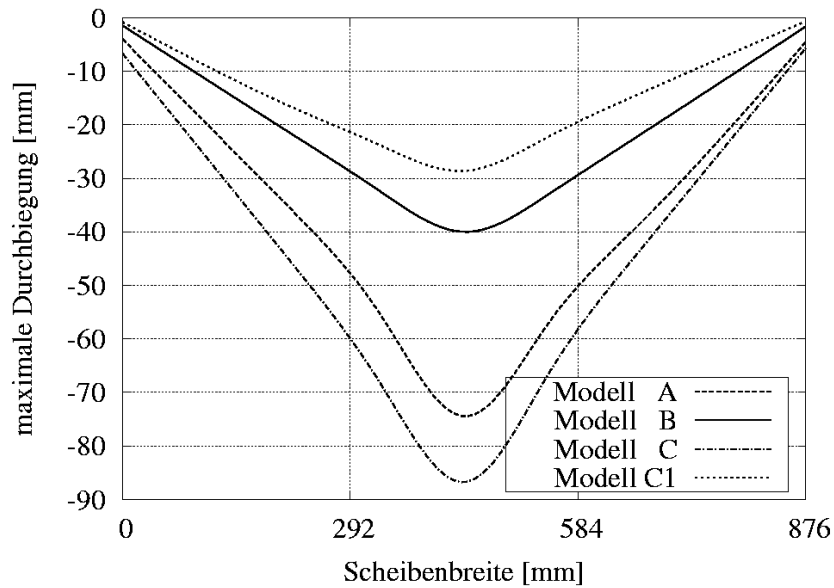


Bild 15: Verformungsprofile über die Scheibenbreite

Nachfolgend ist der zeitliche Verlauf des Bruchbilds von Modell C (Bild 16), sowie ein Vergleich der Versagensbilder der drei Modelle A, B und C (Bild 17) dargestellt. Vergleicht man die in Bild 17 dargestellten Bruchbilder der drei Modelle, entspricht das in Modell A und C entstandene Bruchbild am ehesten einem realen Versagensbild. Man erkennt einen radialen Sprungverlauf mit groben Bruchstücken und einem eindeutigen Bruchzentrum. Hingegen wird bei Modell B das Ausbilden eines groben Bruchbildes durch die nicht versagende Schale verhindert.

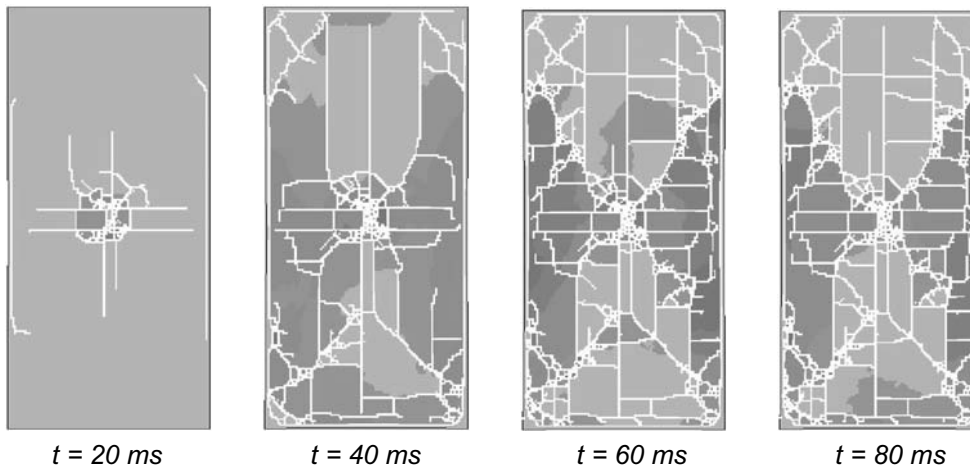


Bild 16: Zeitlicher Verlauf des Bruchbildes bei Modell C

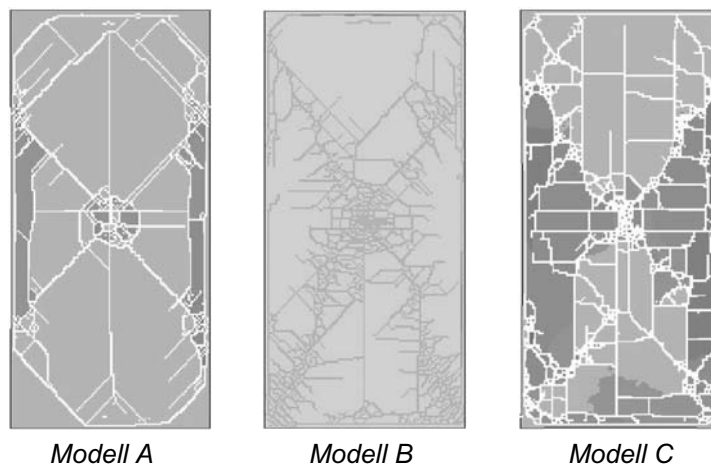


Bild 17: Vergleich der Bruchbilder der VSG-Modelle

## 4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden Methoden und Modelle zur Simulation des Tagverhaltens von Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas vorgestellt. Alle vorgestellten Modelle beinhalten das Tragverhalten bis zum spröden Versagen der Glasscheibe.

Für das ESG-Modell wurde ein Verfahren zur Berücksichtigung der thermischen Vorspannung vorgestellt; Einflüssen aus der Vorspannung und der Belastungsgeschwindigkeit auf die Festigkeit wurde Rechnung getragen. Das Modell ist in der Lage, das dynamische, sukzessive Versagen der Glasscheibe (stumpfkörniges Splintern) bei Biegebelastung ausreichend genau abzubilden. Defizite sind bei reiner Belastung in Scheibenebene vorhanden. Hier wird das dynamische Versagen durch die Schalenelemente, die die Bernoulli-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte beinhalten, nicht zum Nachbarlement weitergeben.

Für VSG wurde ein neu entwickeltes, dreischichtiges Modell, das die Möglichkeiten exzentrisch verlaufender Referenzflächen nutzt, bereits vorhandenen, zweischichtigen Modellen gegenüber gestellt. Hierzu wurden Standard-Pendeltests, wie sie im Bauwesen üblicherweise zur Anwendung kommen, simuliert. Sämtliche Modelle setzen koinzidente Knotenanbindungen voraus. Während die zweischichtigen Modelle bereits an Windschutzscheiben im Automobilbau validiert wurden, stehen entsprechende Arbeiten beim neu vorgestellten Modell noch aus. Trotzdem versprechen die bisher verfügbaren Ergebnisse eine weiter verbesserte Detailtreue der Berechnungsmodelle.

## 5 Literatur

- [1] DIN EN 52 300-2: "Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas", Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1993
- [2] EN 12600:2002: "Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch", Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2002
- [3] Livermore Software Technologie Corporation, "LS-DYNA Theoretical Manual", 1998
- [4] Livermore Software Technologie Corporation, "LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 970", 2003
- [5] Blatz, P.J.; Ko, W.L.: "Application of finite elastic theory of the deformation of rubbery materials", Transactions of the Society of Rheology VI, 1962, S. 223-251
- [6] Bohmann, D.: "Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben", Dissertation, RWTH Aachen, 1999
- [7] Bohmann, D.; Schneider, J.: "Glasscheiben unter Stoßbelastung – Experimentelle und theoretische Untersuchungen für absturzsichernde Verglasung bei weichem Stoß", Bauingenieur 77, 2002, S. 581-592
- [8] Charles, R.J.: "Static fatigue of glass", Journal of Applied Physics 29, 1958, S. 1549-1560
- [9] Hillig, W.B.; Charles, R.J.: "Surfaces, stress-dependent surface reactions and strength", High Strength Materials, John Wiley & Sons, Ltd., New York, 1965, S. 682-705
- [10] Kerkhof, F.: "Festigkeit von Glas – Zur Abhängigkeit von Belastungsdauer und -verlauf", Glastechnische Berichte 54, 1981, S. 265-277
- [11] Kolling, S.; Fassnacht, W.; du Bois, P.A.: "Numerical simulation of a windshield for crashworthiness", LS-DYNA Forum, 2002
- [12] Laufs, W.: "Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser", Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [13] Rück, R.: "Tragverhalten von Mehrscheiben-Isolierglas", Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [14] Sonntag, B.: "Numerische und experimentelle Untersuchung eines Impaktoraufpralls auf eine Windschutzscheibe im Rahmen des Fußgängerschutzes", Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2003
- [15] Timmel, M.: "Numerische Simulation von Verbundsicherheitsglas unter Crashbeanspruchung", Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2003
- [16] Wörner, J.D.; Schneider, J.: "Zwischenbericht zur Durchführung von Versuchen zum weichen Stoß mit dem Pendelkörper nach DIN EN 12600", Institut für Statik, TU Darmstadt, 1999
- [17] Haufe, A., Nguyen, N. B., Sonntag, B., Kolling, S.: „Zur Simulation von Sicherheitsglas unter stoßartiger Belastung. Teil II: Validierung eines FE-Modells für Verbundsicherheitsglas“, LS-DYNA Forum, 2004, Bamberg, Deutschland.
- [18] Brendler, S., Haufe, A., Ummenhofer, T., „A Detailed Numerical Investigation of Insulated Glass subjected to the Standard Pendulum Test“, LS-DYNA Forum, 2004, Bamberg, Germany.
- [19] Du Bois P.A.; Kolling S.; Fassnacht W., "Modelling of safety glass for crash simulation", Computational Material Science, 28/3-4, 2003: 675-683.