

Zur Simulation von Sicherheitsglas unter stoßartiger Belastung

Teil II: Validierung eines FE-Modells für Verbundsicherheitsglas

André Haufe, Ngoc Bao Nguyen
andre.haufe@dynamore.de, ngocbaonguyen@web.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:

Verglasungen aus Verbundsicherheitsglas (VSG) haben heute ein breites Einsatzgebiet, sowohl im Bauwesen als auch im Automobilbau, hier z.B. als Windschutzscheibe. Bei einem Versagen ergeben sich durch eine splitterbindende Wirkung und einer Resttragfähigkeit Vorteile gegenüber herkömmlichem Glas. Ein Finite Elemente Modell für VSG wird vorgestellt, mit dem sich das Tragverhalten auch im gerissenen Zustand unter statischer und dynamischer Belastung numerisch simulieren lässt. In dem vorgeschlagenen Modell wird eine koinzidente Elementierung verwendet: ein Schalenelement mit sprödem Versagen für das Glas und ein Membranelement, mit dem das Verhalten nach Versagen des Glases abgebildet werden kann. Als Validierungsgrundlage dienen Stoßversuche, bei denen ein kugelförmiger Impaktor auf eine Windschutzscheibe geschossen wurde. Desweiteren wird anhand eines statischen Vierschneiden-Biegeversuches gezeigt, wie das Verfahren dazu verwendet werden kann, die Verbundwirkung zwischen Glas und Folie zu beschreiben, womit sich für das Modell ein breites Einsatzfeld ergibt.

Nowadays, laminated safety glass (VSG) has a wide range of applications both, in the field of civil and automotive engineering. The advantage unlike ordinary glass is a bonding of broken glass pieces and a load-bearing capacity of the PVB-interlayer. A finite element model for simulating the behaviour of VSG under static and impact loading is presented with respect to the load-bearing capacity after fracture. Two coincident finite elements are used to model the layered set-up of laminated safety glass: a shell element with brittle failure for the glass component and a membrane element to simulate the ultimate load bearing capacity. To establish a basis for the validation of the model an impact test, whereby a sphere-like impactor has been shot on a windscreen, has been performed. Furthermore, the model is applied in the situation of a static four point bending test to identify the composite efficiency between glass and interlayer. For that reason the model makes accessible a wide field of applications.

Keywords:

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

Tempered glass, single-layer safety glass, laminated safety glass, explicit finite elements, pendulum impact test, crash simulation

1 Einführung

Für die Erfüllung von Normen und technischen Regeln wie die *Technische Regel für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen* (TRLV) [4] oder die *Technische Regel für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen* (TRAV) [5] ist es im Bauwesen ausreichend, das Tragverhalten einer VSG-Scheibe nur bis zum Versagen numerisch abzubilden. Auch der Nachweis mittels der im Anhang C der TRAV enthaltenen Spannungstabellen, die auf einem Rechenmodell basieren [6], beruht auf der Voraussetzung, die „zulässigen Spannungen“ der Kurzzeitfestigkeit des Glases nicht zu überschreiten. Demgegenüber wird beim experimentellen Nachweis das Versagen des Glases durchaus zugelassen. Eine realistische Abbildung des Tragverhaltens nach dem Glasbruch kann daher durchaus wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen und zu einer geringeren Glasdicke führen. Aufgrund der Komplexität eines solchen Modells gibt es aber bisher kaum Untersuchungen, die sich mit der numerischen Abbildung der Resttragfähigkeit beschäftigen. In der Automobilindustrie, insbesondere in der Crash-Simulation, ist dies von großem Interesse, da die Windschutzscheibe z.B. bei einem Dachfall auch nach Versagen des Glases noch einen wesentlichen Beitrag zur Aussteifung der Karosserie leistet. Vernachlässigt man bei einem solchen Lastfall das Tragverhalten der VSG-Scheibe im Rechenmodell nach Überschreitung der Bruchspannung, hat der weitere Verlauf der Simulation nur noch wenig mit dem realen Tragverhalten zu tun. Die genaue Beschreibung und somit die Prognose des Deformationsverhaltens ist jedoch Ziel einer Crash-Simulation. Von daher ist es wichtig und notwendig auch das Tragverhalten einer gerissenen VSG-Scheibe mit Hilfe der Finiten Elemente Methode abbilden zu können. Um dies zu erreichen wurden in Anlehnung an [7] Versuche durchgeführt, bei denen ein kugelförmiger Impaktor auf einen Windschutzscheibe geschossen wurde [8]. Diese Versuche dienen als Grundlage zur Validierung des Modells. Mit dem daraus gewonnenen Versagensmodell wurde ein weiterer Impaktorversuch und ein quasi-statischer Vierschneiden-Biegeversuch nachgerechnet, um die generelle Einsatzfähigkeit des gewonnen Versagensmodell zu testen und es für allgemeine Anwendungen zugänglich zu machen.

2 FE Modellierung von Verbundsicherheitsglas

In der Crashsimulation kommen zur Berücksichtigung der hochfrequenten Schwingungen im kurzzeitdynamischen Bereich vorwiegend explizite FE Programme zum Einsatz. Für die vorliegenden Berechnungen wurde das Programm LS-DYNA verwendet. VSG, wie es im Fahrzeugbau bei Windschutzscheiben verwendet wird, besteht aus zwei Lagen entspanntem Floatglas und einer Zwischenschicht aus Polyvinylbutyral (PVB). Die PVB-Folie hat primär die Aufgabe im Falle eines Scheibenbruches die entstehenden scharfkantigen Bruchstücke zusammenzuhalten und somit das Verletzungsrisiko der Insassen zu minimieren. Zur realistischen numerischen Simulation, beispielsweise eines Dacheindrückttests oder eines Fahrzeugüberschlages, ist es notwendig, das Tragverhalten des Verbundglases auch nach Versagen der Glasscheiben möglichst genau zu erfassen. Hierfür werden im Folgenden einige mögliche Ansätze aufgezeigt und diskutiert.

In LS-DYNA steht mit dem Materialgesetz MAT_LAMINATED_GLASS bereits ein Modell zur Verfügung, welches das Tragverhalten näherungsweise abbildet. Hierbei werden den Integrationspunkten in Schalendickenrichtung unterschiedliche Materialeigenschaften zugeordnet - je nach dem, ob sich der Gaußpunkt in der Glas- oder der Folienschicht befindet. Das Materialmodell kommt zwar mit einer einzigen Schale zur Abbildung des Verbundglases aus, erweist sich jedoch als numerisch instabil und wenig flexibel, da neben dem PVB auch für das Glas ein bilineares Stoffgesetz angenommen wird. Auch die Annahme der plastischen Vergleichsdehnung als Versagenskriterium für Glas ist unphysikalisch, siehe z.B. [9]. Von daher wurde diese Möglichkeit der Abbildung einer VSG-Scheibe nicht weiterverfolgt. Stattdessen wird eine in [3] vorgeschlagene Modellierungstechnik verwendet, siehe auch [12]. Hierbei werden zwei Schalenelemente koinzident gekoppelt; d.h. beide Schalen besitzen die gleichen Knoten. Den einzelnen Schalen werden hierbei entweder Glas- oder Folieneigenschaften mit entsprechender Materialformulierung zugewiesen. Das Glas wird dabei als Schale mit linear elastischem Verhalten bis zum Sprödbbruch (maximale Hauptdehnung ε_1^B als Versagenskriterium) und die Folie als Membran mit hyperelastischem Verhalten modelliert. In der hierbei verwendeten Versagensformulierung trägt nur noch die PVB-Folie, sobald das Glas ε_1^B überschreitet.

Für reine Zugbeanspruchung ist dieses Modell recht gut geeignet. Unter Biegung jedoch geht die auf Zug belastete Scheibe zwar zu Bruch, aber durch die Haftung der Glassplitter an der PVB-Folie ist immer noch eine Reststeifigkeit vorhanden, da man davon ausgehen kann, dass auf der druckbean-

spruchten Seite der gebrochenen Scheibe Lasten weiter abgetragen werden können und die Folie die entsprechenden Zugkräfte übernimmt.

Damit ist die in [3] vorgeschlagene Modellierungstechnik für Biegebeanspruchung zu weich. Um die Steifigkeit im gerissenen Zustand besser zu erfassen wird in Anlehnung an [3] ein modifizierter Ansatz gewählt. Die Folie wird hierbei nicht mehr über ein hyperelastisches sondern über ein elastisch-plastisches Stoffgesetz beschrieben. Dies berücksichtigt die bleibende Verformung, die bei einer Biegebeanspruchung im gerissenen Zustand der Glasscheibe entsteht. Im ungerissenen Zustand muss die Steifigkeit der einzelnen Schichten die der Gesamtsteifigkeit EI_{VSG} angepasst werden. Hierfür wird für die beiden Glasscheiben und der PVB-Folie eine Ersatzdicke $t_{Element}$ ermittelt und mit dieser die Dichte der Scheibe angepasst, um ihre Masse nicht zu verändern, da diese für die dynamische Rechnung eine entscheidende Rolle spielt. Durch die kurze Belastungsdauer wird eine vollständige Verbundtragwirkung angenommen. Für eine Windschutzscheibe der Gesamtdicke von 4.96mm (2x2.1mm Glas und 0.76mm Folie, einem E-Modul von Glas von 70.000N/mm²), einem E-Modul der PVB-Folie von 3N/mm² und einer Dichte von $\rho = 2,5\text{kg/dm}^3$ ergeben sich die entsprechenden Größen für das Rechenmodell zu

$$EI_{VSG} = 2 \cdot 70.000 \cdot \left[\frac{2,1^3}{12} + 2,1 \cdot \left(\frac{2,1 + 0,76}{2} \right)^2 \right] + 3 \cdot \frac{0,76^3}{12} = 709.250 \text{ Nmm}^2 \quad (1)$$

$$EI_{Modell} = 2 \cdot 70.000 \cdot \frac{t_{Modell}^3}{12}$$

Mit der Forderung $EI_{VSG} = EI_{Modell}$ ergibt sich die gesuchte Elementdicke der Schalen zu $t_{Element} = 3,93\text{mm}$ und die modifizierte Dichte zu $\rho_{Element} = 2,5 \text{ kg/dm}^3 \cdot 2,1/3,93 = 1,34 \text{ kg/dm}^3$. Damit lässt sich die Steifigkeit der gerissenen Scheibe berechnen. Mit der Annahme, dass die gerissene druckbeanspruchte Scheibe die Steifigkeit einer intakten Scheibe und die Scheibe auf der Zugseite keine Steifigkeit mehr besitzt, verschiebt sich der Schwerpunkt der Scheibe und die Steiner-Glieder ändern sich zu

$$EI^II = 70.000 \cdot \left\{ \frac{2,1^3}{12} + 2,1 \cdot \left[\left(\frac{2,1 + 0,76}{2} \right) - 2,1/2 \right]^2 \right\} + 3 \cdot \left\{ \frac{0,76^3}{12} + 0,76 \cdot \left[\left(\frac{2,1 + 0,76}{2} \right) - 0,76/2 \right]^2 \right\} = 75.250 \text{ Nmm}^2 \quad (2)$$

$$EI^II = \frac{EI^II}{\frac{t_{Modell}^3}{12}} \approx 15.000 \text{ N/mm}^2$$

Somit ergibt sich für die Folie ein modifiziertes E-Modul von $E_{PVB} = E^II = 15.000 \text{ N/mm}^2$ und für das Glas (sprödes Versagen) ein modifiziertes E-Modul von $E_{Glas,mod} = 2 \cdot 70.000 - 15.000 = 125.000 \text{ N/mm}^2$. Bei der Verwendung des Modells muss berücksichtigt werden, dass für andere Glas- und Foliendicken sich die Werte für $t_{Element}$, $\rho_{Element}$, $E_{Glas,mod}$ und $E_{PVB,mod}$ entsprechend ändern.

3 Impaktorversuch auf eine Windschutzscheibe

Als Grundlage zur Validierung des Rechenmodells für eine stoßartige Belastung dienen Versuche, bei denen kugelförmige Impaktoren mit einem Durchmesser von ca. 170mm auf Windschutzscheiben geschossen wurden. Die Versuchsreihe bestand aus insgesamt sechs solcher Tests. Hierbei wurden die ersten drei Versuche mit einem Impaktor der Masse 3.5kg und unter einem Winkel von 50° zur Horizontalen geschossen. Die Versuche 4 bis 6 wurden mit einem Impaktor der Masse 4.8kg und unter einem Winkel von 35° zur Horizontalen durchgeführt. Bei allen sechs Versuchen war der Auftreffpunkt die Scheibenmitte und die Auftreffgeschwindigkeit betrug 35km/h.

3.1 Versuchsergebnisse

Aus den Versuchen erhielt man zum einen den zeitlichen Beschleunigungsverlauf des Impaktors und zum anderen die Verformung der Glasscheibe, die über eine 3D-Filmauswertung ermittelt wurde. In *Abbildung 1* sind die resultierenden Impaktorbeschleunigungen der ersten drei Versuche abgebildet.

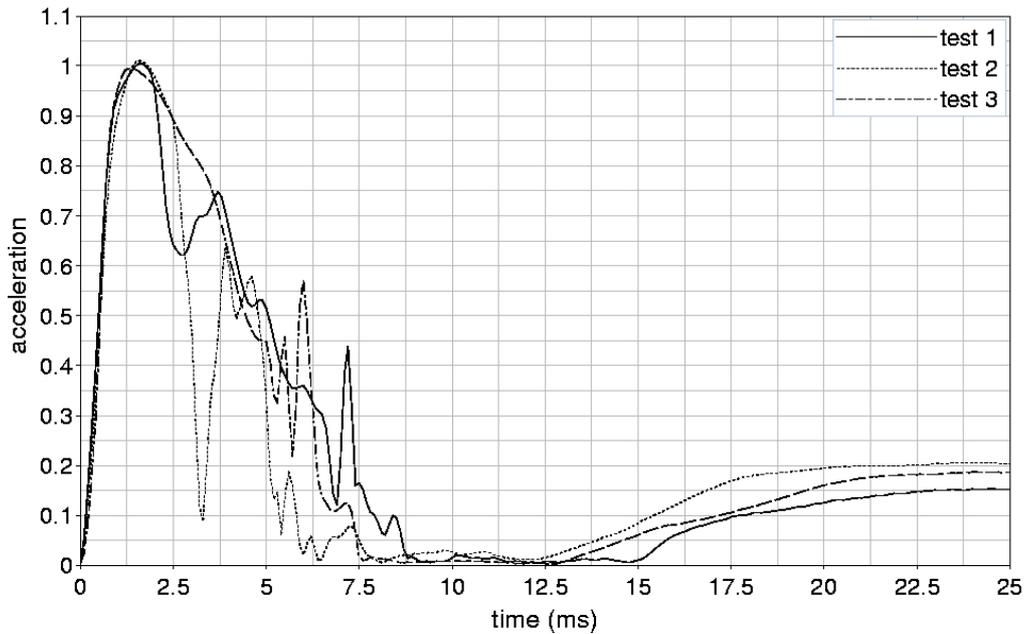


Abbildung 1 Resultierende Impaktorbeschleunigung der Versuche 1-3
 Figure 1 Resultant impactor acceleration obtained by test series 1-3

Innerhalb der ersten 2ms des Aufpralls erreicht der Impaktor seine maximale Beschleunigung. Nach diesem Maximum kommt es zu einer starken Schädigung der Windschutzscheibe im Bereich des Aufprallpunktes. Der nachfolgende Verlauf der Kurve ist sehr stark von der Schädigung der Scheibe abhängig. Dies resultiert in größeren Streuungen im Nachtragverhalten. Die Dauer des Aufpralls beträgt circa 10ms; die nachfolgende, wieder ansteigende Beschleunigung ergibt sich aus der elastischen Rückfederung. Aus diesen drei Kurven sowie aus den Kurven der Versuchen 4 bis 6 wurde jeweils eine gemittelte Beschleunigungskurve berechnet, die für die späteren Simulationen als Referenzkurve verwendet wird (s. Abb. *Abbildung 2*). Die Dauer der Beschleunigung ist bei beiden Versuchskurven annähernd gleich. Der Maximalwert der Beschleunigung ist aufgrund des steileren Schusswinkels allerdings bei dem leichteren Impaktor höher.

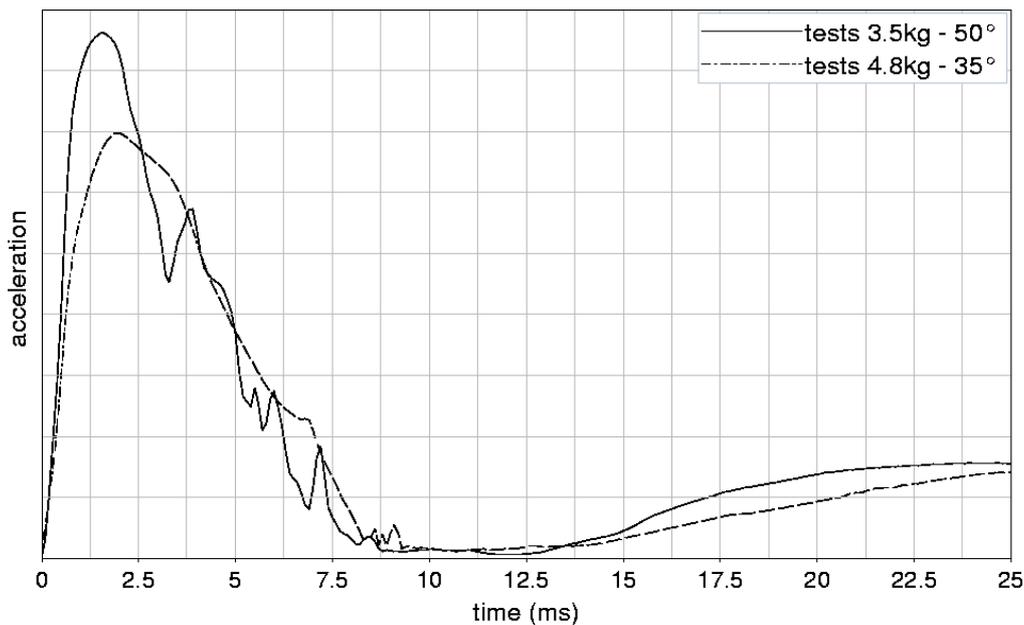


Abbildung 2 Gemittelte Beschleunigungskurven aus den Versuchen
 Figure 2 Averaged test results

Als Grundlage der Validierung des numerischen Modells dient die gemittelte Beschleunigungskurve der ersten drei Versuche (3.5kg; 50°; 35km/h). Mit diesem Modell wird dann auch die zweite Versuchsreihe nachgerechnet und mit der entsprechenden experimentellen Referenzkurve verglichen. Mit Hilfe einer 3D-Filmauswertung wurde die zeitliche Deformation der Windschutzscheibe dokumentiert. Dafür wurden Auswertepunkte in einem Rasterabstand von 100mm auf der Scheibe festgelegt. Für diese Punkte erhält man die zeitlich veränderlichen x, y und z-Koordinaten der Verformung. Zum Zeitpunkt der maximalen Verformung im Auftreffpunkt wurde ein Längsschnitt in Höhe des Auftreffpunktes durch die Windschutzscheibe gelegt. Damit ergab sich die in *Abbildung 3* wiedergegebene Durchbiegung der Scheibe. Der Schnitt quer durch den Auftreffpunkt zum Zeitpunkt der maximalen Verformung ist in *Abbildung 4* dargestellt.

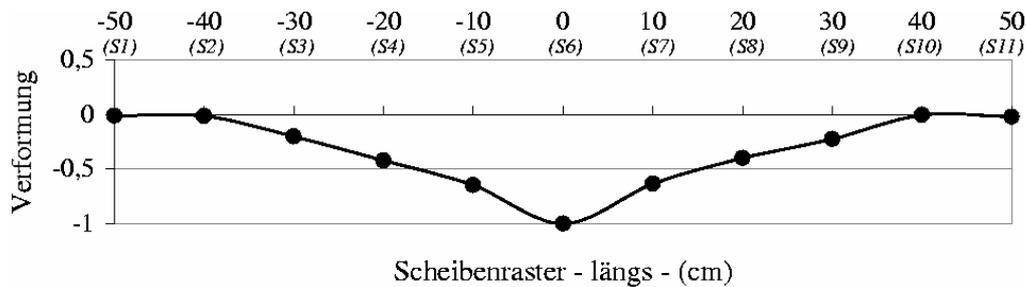


Abbildung 3 Längsschnitt durch die Windschutzscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Verformung im Auftreffpunkt, Versuch 4-6

Figure 3 Cross section in y-z plane through the windshield at maximum displacement, test series 4-6

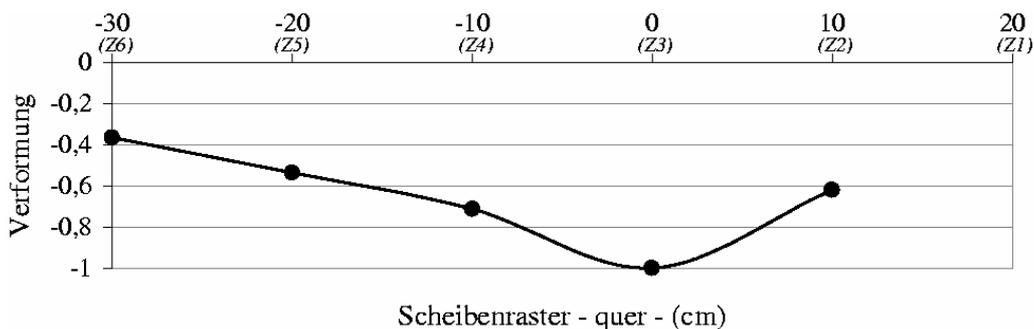


Abbildung 4 Schnitt quer durch die Windschutzscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Verformung im Auftreffpunkt, Versuch 4-6

Figure 4 Cross section in x-z plane through the windshield at maximum displacement, test series 4-6

Obwohl die aus den einzelnen Versuchen resultierenden Beschleunigungswerte und die Verformungen nach dem Bruch der Scheibe sehr stark schwanken, sind die Bruchbilder sehr ähnlich. Im Bereich des Auftreffpunktes kommt es erwartungsgemäß zur größten Schädigung, die sich dann wellenförmig über die Scheibe bis hin zum Rand ausbreitet. In der *Abbildung 5* sind die Bruchbilder der Windschutzscheiben aus den sechs Versuchen wiedergegeben.



tests 1 to 3

tests 4 to 6

Abbildung 5 Bruchbilder der Windschutzscheiben
 Figure 5 Fracture patterns of the windshields

3.2 Simulationsergebnisse

Die Validierung des Modells beruht auf einem gemittelten Beschleunigungsverlauf der Versuche 1 bis 3 (3.5kg; 50°; 35km/h). Um Rechenzeit zu sparen wurde ein Teilmodell des Gesamtfahrzeuges verwendet, dessen translatorische Freiheitsgrade an den unteren und oberen Trennlinien (siehe Abbildung 6) gesperrt sind. Die gewählten Randbedingungen zeigten im Vergleich mit einer Gesamtfahrzeugsimulation sehr gute Übereinstimmungen.

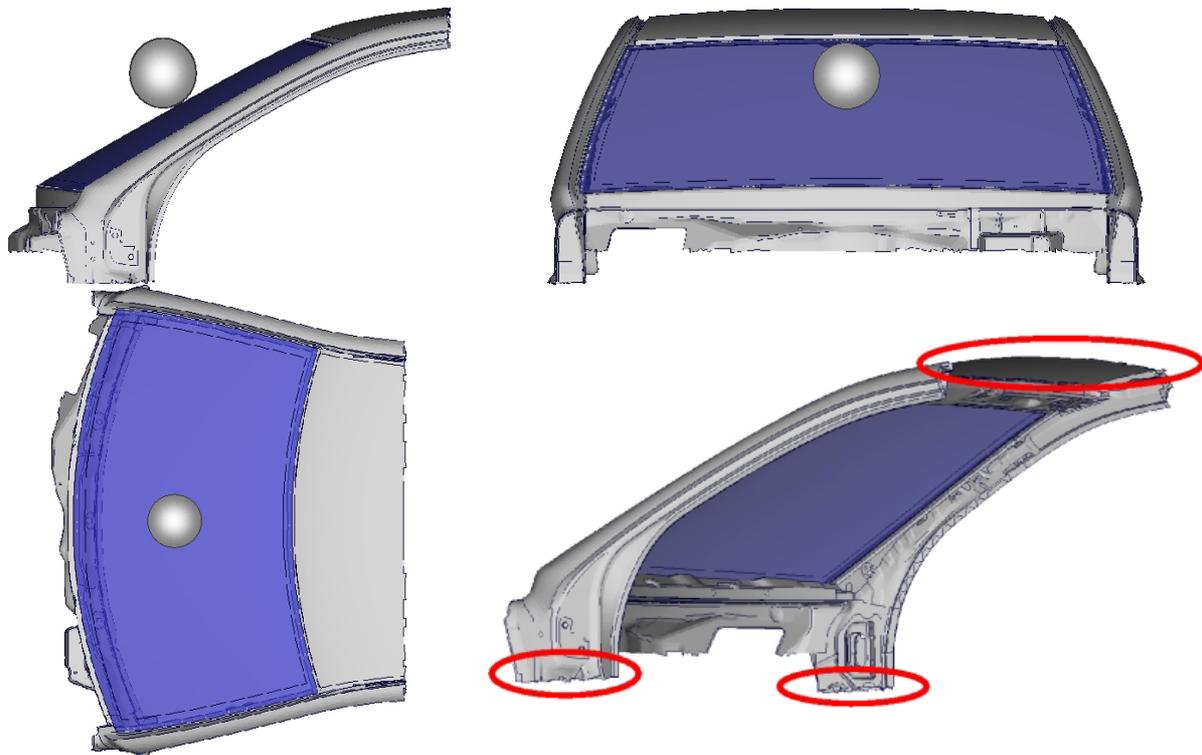


Abbildung 6 Ansichten und Kennzeichnung der Lagerung des Rechenmodells
 Figure 6 Views and boundary condition of the numerical model

Das Ergebnis der Validierung ist in Abbildung 7 anhand des Beschleunigungsverlaufes dargestellt. Mit dem entwickelten Versagensmodell lässt sich das Beschleunigungsverhalten sehr gut berechnen. Sowohl das Maximum der Beschleunigung bis zum Bruch als auch das Nachtragverhalten und die elastische Rückfederung stehen in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

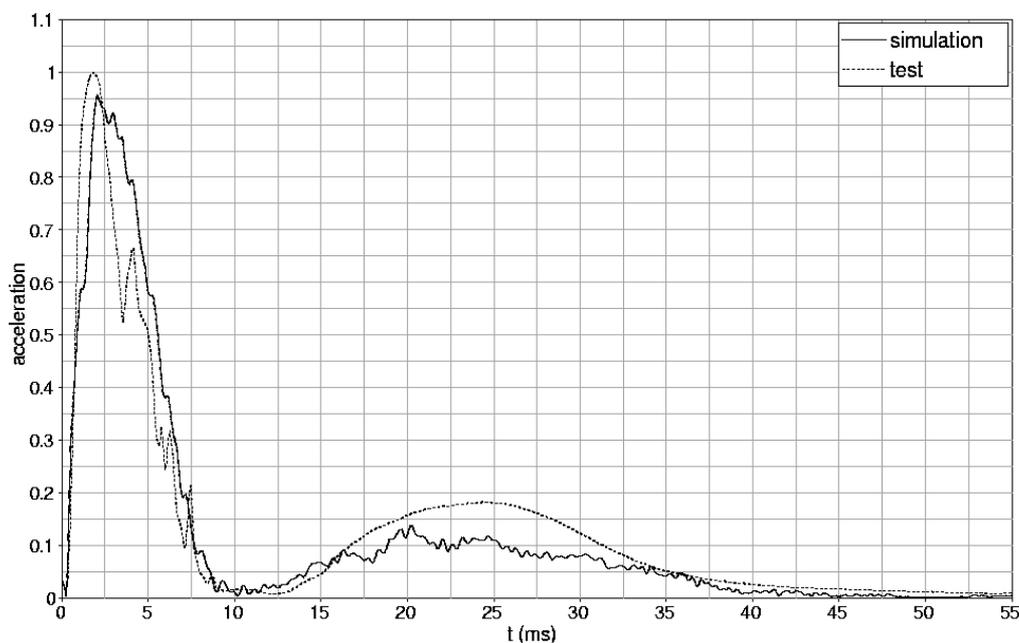


Abbildung 7 Beschleunigung: Vergleich der Simulation mit dem Versuch, Serie 1-3
 Figure 7 Acceleration: comparison of the simulation with test results, series 1-3

Auch der Verformungsverlauf an den Messpunkten zum Zeitpunkt der maximalen Deformation, siehe *Abbildung 9* zeigt zufriedenstellende Übereinstimmungen mit dem Versuch. Allerdings streut das Verformungsverhalten lokal sehr stark im Bereich des Auftreffpunktes. Die zeitliche Entwicklung des Bruchverhaltens während der Impaktbelastung ist in *Abbildung 9* dargestellt.

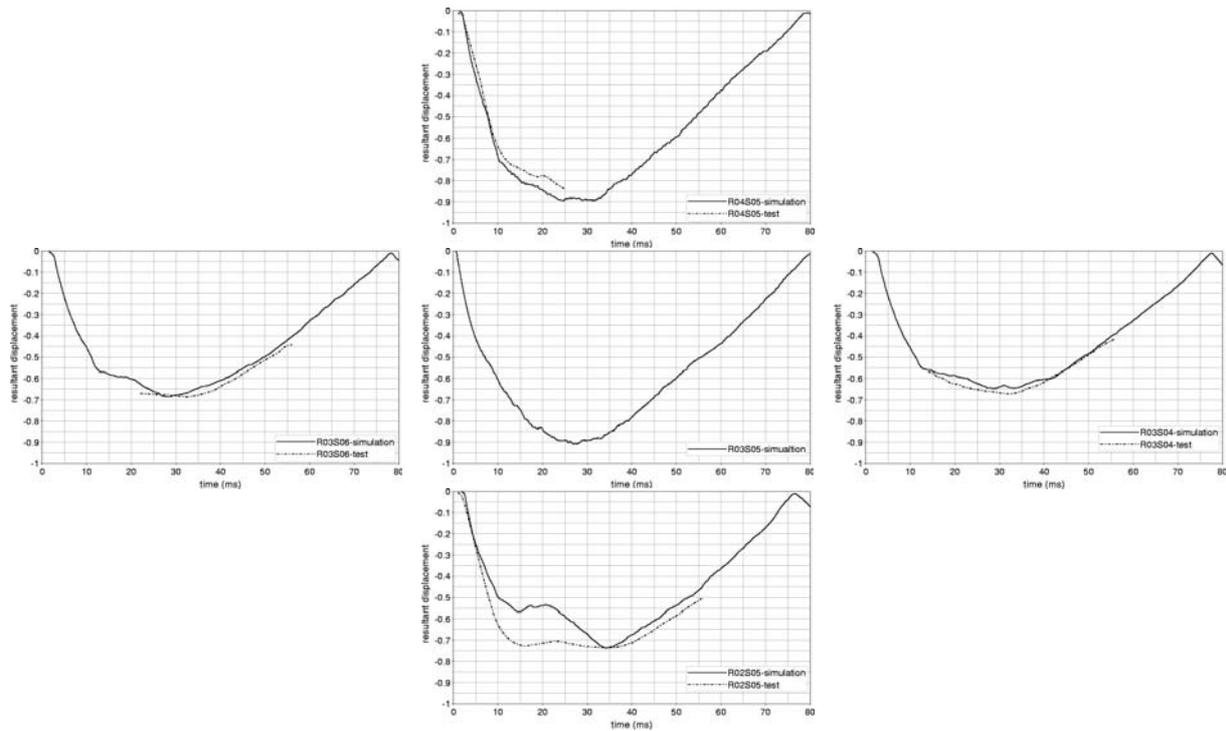


Abbildung 8 Resultierende Verformung an den Messpunkten aus der Filmauswertung
 Figure 8 Resultant displacement obtained by the test

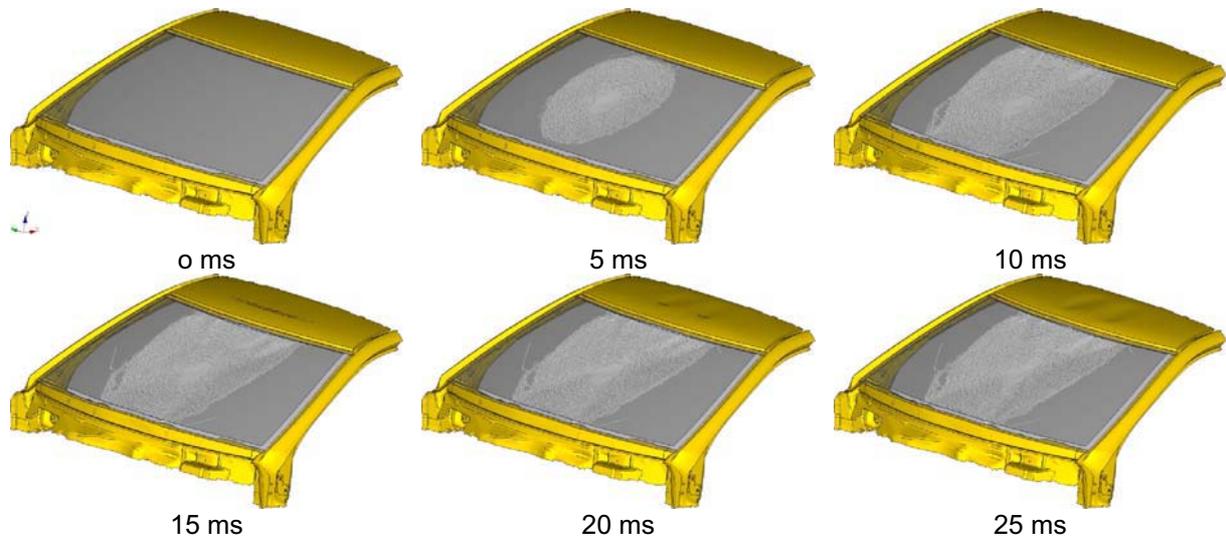


Abbildung 9 Zeitlicher Ablauf des Bruchbildes
 Figure 9 Temporal evolution of the fracture pattern

Man erkennt, dass die Großzahl der Elemente bereits zu dem Zeitpunkt $t=10\text{ms}$ ihre Bruchdehnung erreicht haben. Dieser zeitliche Rahmen stimmt mit der Dauer des Aufpralls überein. Nach diesen 10ms gibt es nur noch sehr niedrige Beschleunigungen. Für die Simulation hat demnach der Übergang vom ungebrochenen Glas zur ersten Rissbildung den größten Einfluss auf die Beschleunigungskurve des Impaktors.

Bis zum Zeitpunkt von 10ms bewegt sich der Impaktor fast nur in Schussrichtung. Danach rotiert er um die y-Achse und rollt auf der Windschutzscheibe ab. Bei diesem Vorgang drückt er die Scheibe weiter nach unten, welche bei ca. 25 ms ihre maximale Verformung erreicht. Danach federt die Windschutzscheibe wieder zurück und der Impaktor bewegt sich von der Scheibe weg. Mit dem vorgestellten Modell und den dazugehörigen Parametern wurden auch die Versuche 4 bis 6 nachgerechnet. Die sich hieraus ergebende Beschleunigungskurve ist in *Abbildung 10* dargestellt.

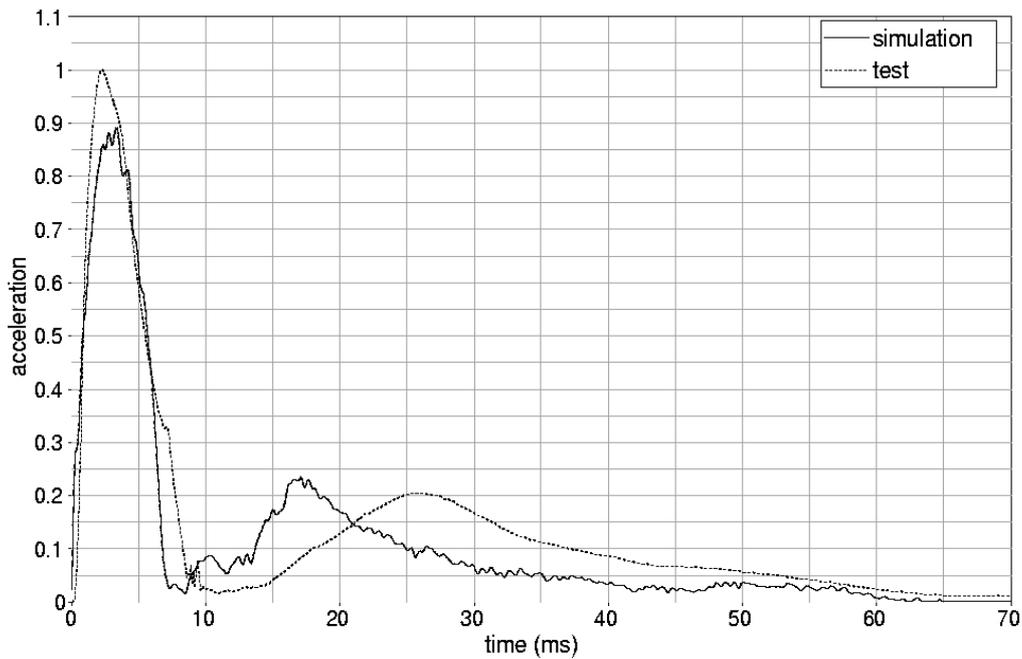


Abbildung 10 Beschleunigung: Vergleich der Simulation mit dem Versuch, Serie 4 bis 6
 Figure 10 Acceleration: comparison of the simulation with test results, series 4-6

Wie schon bei der Validierung wurde auch hierbei zum Vergleich zwischen Simulation und Experiment die aus den drei Versuchen gemittelte Beschleunigungskurve herangezogen. Auch für diesen Lastfall erhält man mit dem gewählten Versagensmodell eine gute Übereinstimmung der Simulation mit dem Versuch. Allerdings wird die maximale Verformung in der Mitte der Scheibe nicht erreicht, siehe *Abbildung 11*. Die Deformation aus der Simulation ist wesentlich geringer als die in den Versuchen gemessene Verformung. Man erkennt, dass im Versuch die extreme Durchbiegung der Scheibe allerdings örtlich begrenzt ist.

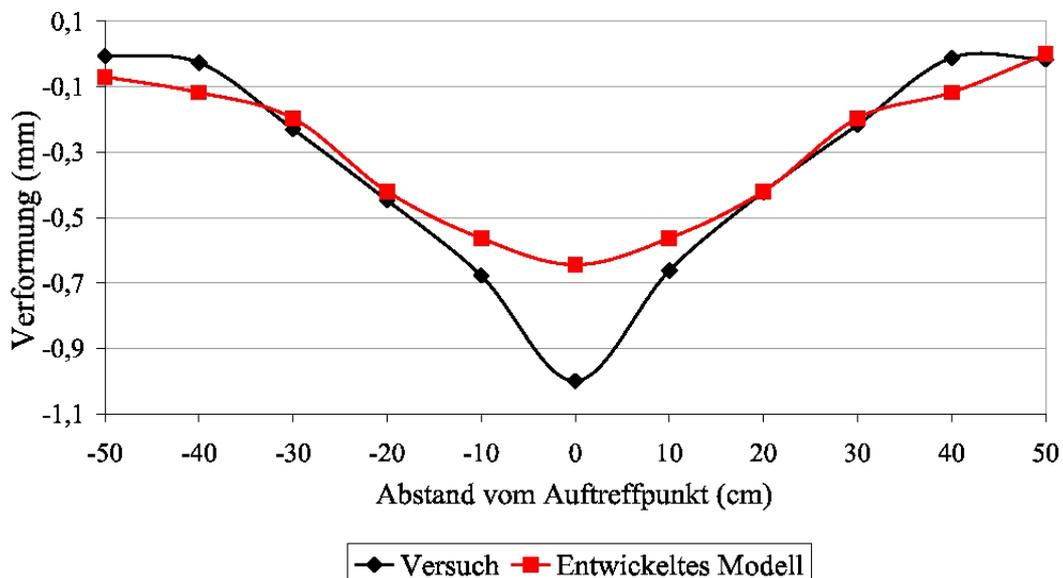


Abbildung 11 Längsschnitt durch die Windschutzscheibe zum Zeitpunkt der maximalen Verformung
 Figure 11 Cross section through the windshield at maximum deformation

Der Impaktor „bohrt“ sich in die zerstörte Scheibe. Die zugbelastete Folie plastifiziert an dieser Stelle, wodurch die restliche Scheibe entlastet wird und sich weniger stark verformt als in der Simulation. Die berechneten Verformungen werden somit unterschätzt, da die zerstörte Scheibe im Bereich der Auftreffstelle zu steif reagiert.

Dies zeigt auch die Grenzen des numerischen Modells auf. Darüber hinaus lässt sich ein Reißen der Folie nicht abbilden. Ein solches Versagen ist schwer vorherzusagen, da es nicht nur von der Belastung der Folie, sondern auch von der Form der Glasbruchstücke abhängt, die in dem Modell nicht berücksichtigt werden können.

4 Vierschneiden-Biegeversuch

Das vorgestellte Modell wird nun anhand eines einfachen quasi-statischen Vierschneiden-Biegeversuchs, siehe [10], überprüft. Der Versuchsaufbau und die Abmessungen sind in *Abbildung 12* dargestellt.

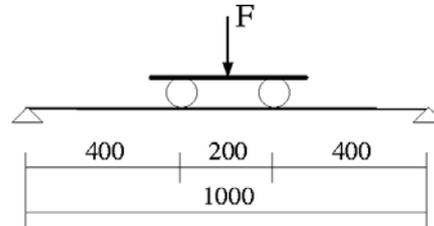


Abbildung 12 Aufbau und Abmessungen des Vierschneiden-Biegeversuches (Einheiten in mm)

Figure 12 Test configuration for a four-point bending test (units in mm)

Die VSG-Scheibe besteht aus zwei 6mm dicken Floatglasscheiben und einer 0.76mm dicken PVB-Folie. Die Gesamtbreite der VSG-Scheibe beträgt 360mm. Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von $v=0.4\text{mm/s}$ durchgeführt.

Zur Berechnung dieses quasi-statischen Versuchs wurde die Bruchdehnung zu $\varepsilon_1^B = 0.13$ gesetzt. Darüber hinaus muss noch die bei quasi-statischer Belastung reduzierte Verbundwirkung im Modell berücksichtigt werden, da die Annahme eines vollständigen Verbunds nur für eine kurzzeitige, stoßartige Belastung getroffen werden kann. Dies ist auf das Kriechverhalten der PVB-Folie zurückzuführen, deren Materialeigenschaften nicht nur zeitabhängig sondern in Wirklichkeit auch stark temperaturabhängig sind. Nach [5] wird bei der Bemessung einer VSG-Scheibe unter statischer Belastung die Verbundwirkung, auf der sicheren Seite liegend, vollständig vernachlässigt. Im Folgenden wird zur Berücksichtigung die Verbundwirkung bei der Berechnung der Steifigkeiten vor den Steiner-Gliedern der Glasscheiben ein Verbundwirkunsfaktor α eingeführt:

$$I = \sum I_i + \alpha \cdot z_{si} \cdot A_i \quad (3)$$

Für $\alpha = 0$ ist keine Verbundtragwirkung vorhanden und die einzelnen Glasscheiben des VSG Sandwichs biegen sich um ihre eigene Schwerachse. Bei $\alpha = 1$ liegt voller Verbund vor, beide Scheiben verhalten sich wie ein Körper. Mit diesem Ansatz und den sich aus den Gleichungen (1) und (2) erhaltenen Größen ergeben sich die in *Tabelle 1* angegebenen Werte für die Elementdicke, Dichte und die E-Moduli der beiden Schalen.

α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
t_{Element}	6,00	6,68	7,25	7,73	8,17	8,56
ρ_{Element}	2,50	2,25	2,07	1,94	1,84	1,75
$E_{\text{PVB,mod}}$	70.000	50.939	40.119	33.145	28.276	24.684
$E_{\text{Glas,mod}}$	70.000	89.061	99.881	106.855	111.724	115.316
α	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9	1
t_{Element}	8,74	8,92	9,25	9,56	9,85	10,13
ρ_{Element}	1,72	1,68	1,62	1,57	1,52	1,48
$E_{\text{PVB,mod}}$	23.220	21.925	19.739	17.965	16.496	15.260
$E_{\text{Glas,mod}}$	116.780	118.075	120.261	122.035	123.504	124.740

Tabelle 1 Elastizitätsmodul und Dicke der koinzidenten Schalen
Table 1 Young's modulus and thickness of the coincident shells

Mit diesen Werten und mit den Parametern aus dem entwickelten Versagensmodell ergeben sich die in *Abbildung 13* dargestellten Kraft-Weg-Kurven für verschiedene α . Die Verbundwirkung der VSG-Scheibe beträgt im vorliegenden Fall $\alpha = 0,55$. Durch diese Vorgehensweise kommt man ohne genaue Kenntnis des Materialverhaltens der PVB-Folie aus. Für weitergehende Untersuchungen zum Verbundverhalten von VSG sei auf [13] verwiesen.

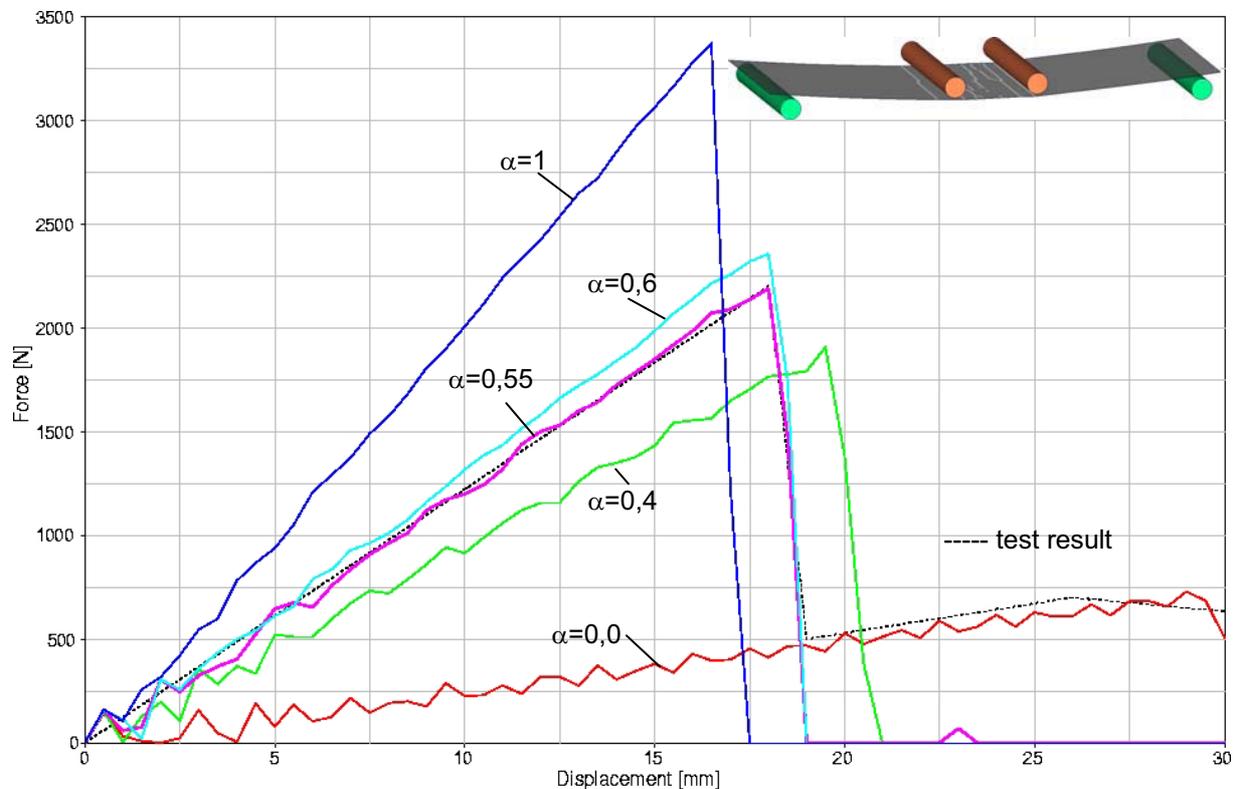


Abbildung 13 Ermittlung der Verbundwirkung beim quasistatischen Vierschneiden-Biegeversuch

Figure 13 Determination of the composite efficiency during a four-point bending test

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein FE Modell für eine Verbundsicherheitsglasscheibe unter statischer und stoßartiger Belastung entwickelt. Zur Validierung des Modells wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Mit dem vorgeschlagenen Modell konnte das Beschleunigungsverhalten eines auf eine Windschutzscheibe geschossenen Impaktors rechnerisch gut nachgebildet werden. Allerdings lieferte die Berechnung der Verformung auf Grund großer lokaler Dehnungen deutliche Abweichungen zu den Versuchsergebnissen.

Das Modell kann des Weiteren zur Bestimmung der Verbundwirkung zwischen Glas und PVB-Folie verwendet werden, was anhand eines statischen Vierschneiden-Biegeversuches gezeigt wurde.

6 Literatur

- [1] LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation.
- [2] Du Bois, P.A.: Crashworthiness Engineering Course Notes, Livermore Software Technology Corporation, 2004.
- [3] Du Bois, P.A.; Kolling, S.; Fassnacht, W.: Material modeling with LS-DYNA for crashworthiness analysis. LS-DYNA Forum 2002, Bad Mergentheim, Germany, V2:1-56.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen (TRAV), Entwurfsfassung November 2002, Mitteilung des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin 2002.

-
- [5] Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV), Fassung September 1998. Mitteilung des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin 1998.
 - [6] Wörner J.D.; Schneider J.; Fink A.: Abschlußbericht zur experimentellen und rechnerischen Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß. Forschungsbericht, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 2000.
 - [7] Browne A.L.: 2-Ply Windshields: Laboratory Impactor Tests of the Polyvinyl Butyral/Polyester Construction. SAE-Paper No 950047, 1995.
 - [8] Sonntag B.: Numerische und experimentelle Untersuchung eines Impaktoraufpralls auf eine Windschutzscheibe. DaimlerChrysler AG Sindelfingen, IWMB TU Darmstadt. Diplomarbeit 2003.
 - [9] Timmel M.: Numerische Simulation von Verbundsicherheitsglas unter Crashbeanspruchung. DaimlerChrysler AG Sindelfingen, BTU Cottbus. Diplomarbeit 2003.
 - [10] Sobek W.; Maier F.; Kutterer M.: Versuche an Verbundsicherheitsgläsern zur Beurteilung der Resttragfähigkeit und des Verbundverhaltens. Universität Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke. Forschungsbericht 1/98.
 - [11] Du Bois P.A.; Kolling S.; Fassnacht W.: Modelling of safety glass for crash simulation. Computational Material Science, 28/3-4, 2003: 675-683.
 - [12] Timmel M.; Kolling S.; Osterrieder P.; Du Bois P.A.: A finite element model for impact simulation with laminated glass. International Journal of Impact Engineering, 2004, submitted.
 - [13] Bohmann D.: Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben. Dissertation, RWTH Aachen, 1999.
 - [14] Nguyen N.B.: Untersuchungen zur Modellbildung von Einscheibensicherheits- und Verbundsicherheitsglas unter Stoßbelastung. Dynamore GmbH Stuttgart, Institut für Statik, Universität Stuttgart. Diplomarbeit 2004.