

Anwendung der Schallemissionsanalyse an Windschutzscheiben unter stoßartiger Belastung zur Verbesserung des Fußgänger- und Insassenschutzes

Gerd MANTHEI, Christian ALTER, Stefan KOLLING
THM Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

Kurzfassung. Verbundsicherheitsglas wird im Automobilbereich bevorzugt für Windschutzscheiben eingesetzt. Bei Verkehrsunfällen von PKWs mit Fußgängern birgt der Aufprall des Kopfs auf Strukturteile des Fahrzeugs ein maßgebliches Verletzungsrisiko, welches im Rahmen der Fahrzeugentwicklung zu senken gilt. Um den Unfallvorgang im Labor nachzubilden, werden speziell entwickelte Kopfpaktoren unter fest definierten Randbedingungen auf kritische Strukturbauteile wie z.B. Windschutzscheibe geschossen. Dabei wird das Deformations- und Bruchverhalten von Verbundglassicherheitsglas untersucht. Zur Bestimmung des beim Kopfaufprall entstehenden Initialrisses werden im vorliegenden Beitrag Schallemissionsmessung durchgeführt und die Ortungsergebnisse der Schallemissionsanalyse mit optischen Messverfahren verglichen.

1 Einleitung

Verbundsicherheitsglas besteht im Allgemeinen aus zwei Glasplatten, die durch eine dünne Verbundfolie aus Polyvinylbutyral (PVB) miteinander verbunden sind. Diese Folie hat hauptsächlich die Aufgabe, Scherben und Glassplitter bei einem Autounfall zu binden, um Verletzungen von Fußgängern und Insassen zu vermeiden. Nach dem Bruch weist Verbundsicherheitsglas noch eine gewisse Resttragfähigkeit auf und ist daher in der Lage weiterhin geringe Druck- und Biegelasten aufzunehmen und zu übertragen. Um diese Resttragfähigkeit in den Berechnungscode von Finite-Elemente-Programmen implementieren zu können sind zuverlässige und physikalisch sinnvolle Materialmodelle notwendig.

In einem laufenden Forschungsprojekt mit Fokus auf den Fußgängerschutz werden Kopfaufschlagprüfungen auf Windschutzscheiben durchgeführt und die Rissausbreitung mit dem FE-Programm LS-DYNA simuliert. Das Ziel des Projekts ist es, eine Technik zu entwickeln, mit der die rechnerische Modellierung in der Lage ist, das Bruchverhalten von Bauteilen aus Verbundglas unter Stoßbelastung zu simulieren [1-3]. Dazu ist es notwendig das Verhalten von Verbundglas vor und nach einer Beschädigung sowie die Rissausbreitung experimentell zu untersuchen. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt mit welcher Genauigkeit die Rissausbreitung durch ein Standard-FE-Modell für Kopfaufschlagprüfungen auf Windschutzscheiben simuliert werden kann. Insbesondere wird gezeigt wie genau die Position des ersten Risses prognostiziert werden kann. Die Bestimmung des Initialrisses

erfolgt hierbei mittels Schallemissionsmessung. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Ergebnisse werden die Ortungsergebnisse mit einer optischen 3D-Messung verglichen.

2 Experimentelle Analysen

2.1 Versuchseinrichtung

Die Belastungsvorrichtung ist in Abbildung 1 (linkes Teilbild) dargestellt. Sie besteht im Wesentlichen aus einem massiven Rahmen aus Flach- und Winkelprofilen (blauer Anstrich), auf welchem die Windschutzscheibe vierpunktgelagert über einen Pneumatikzylinder stoßartig beansprucht wird. Zur Simulation eines Kopfaufpralls von Außen (Fußgänger) und von Innen (Fahrzeuginsasse) können die Scheiben in konkaver bzw. konvexer Lage belastet werden.

Der Impaktor, der den menschlichen Kopf darstellen soll, besteht aus einer Halbkugelschale aus Aluminium mit einem 15 mm dicken Gummiüberzug zur Simulation des mechanischen Verhaltens eines Kopfs [4]. Der Impaktor ist an der Kolbenstange eines Pneumatikzylinders befestigt. Der Pneumatikzylinder seinerseits ist an ein Aufsatzgestell angeflanscht, sodass der Impaktor in vertikaler Richtung im Zentrum der Windschutzscheibe auftrifft (vertikale Bewegungsrichtung). Zwischen Impaktor und Kolbenstange (rechtes Teilbild in Abbildung 1) befindet sich ein präziser Kraftaufnehmer von HBM, Typ S9, Druckkraft 50 kN, Klasse 0,05 (Messfehler kleiner als 0,05 Prozent der maximalen Druckkraft). Der Weg des Impaktors wurde mit einem potentiometrischen Wegsensor der Fa. Buster, Typ 8719, gemessen. Zur direkten Messung der Beschleunigung beim Aufprall des Impaktors wurde ein Beschleunigungssensor Typ 8702B500 der Fa. Kistler eingesetzt. Zusätzlich wurde der Versuchsverlauf mit einer hochauflösenden Hochgeschwindigkeitskamera ARAMIS der Fa. GOM mbH zur optischen 3D-Verformungsanalyse. Um den Einfluss des Eigengewichts der Windschutzscheibe zu untersuchen, wurde die komplette Versuchseinrichtung auf die Seite gelegt, sodass der Impaktor in horizontaler Richtung auf die senkrecht stehende Scheibe auftrifft (horizontale Bewegungsrichtung).

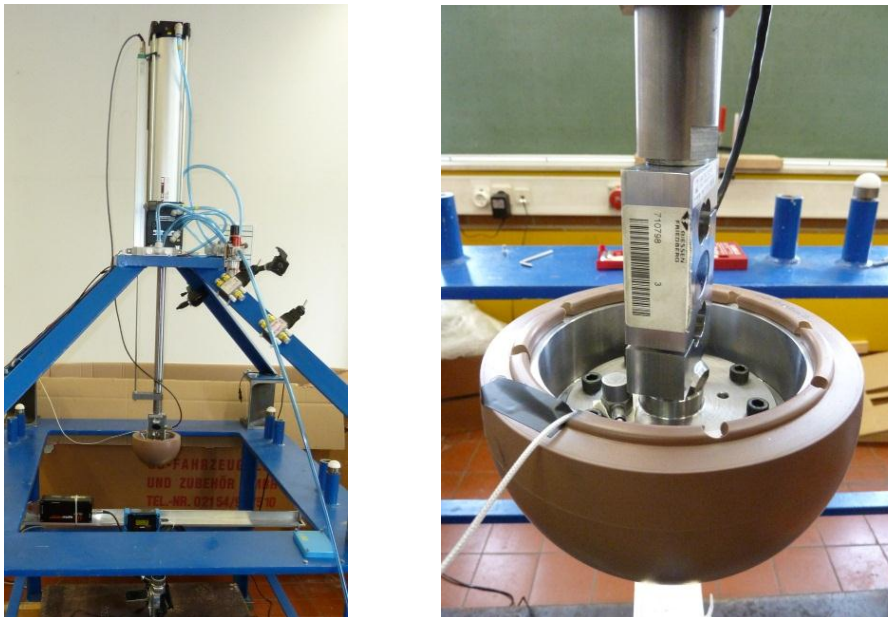


Abbildung 1: Links: Photographie der Belastungsvorrichtung mit Pneumatikzylinder und Kopfimpaktor. Rechts: Kopfimpaktor mit Kraftaufnehmer und Beschleunigungssensor.

Zur Schallemissionsmessung wurden sechs SE-Aufnehmer (Typ Vallen VS 900-M) an der lastzugewandten Oberfläche der Probe mit einem zähen Koppelmittel angebracht. Vier Aufnehmer befanden sich in den Ecken der Scheibe und jeweils ein Aufnehmer in der Mitte der oberen bzw. unteren Kante, siehe auch Abbildung 6. Es wurde ein 8-Kanal-Gerät, Typ AMSY 6 der Fa. Vallen eingesetzt, das die Signale mit einer Abtastfrequenz von 1 MHz und einer Amplitudenauflösung von 16 bit digitalisierte.

2.2 Versuchsdurchführung

Vor den eigentlichen Versuchen wurden Durchschallungsmessungen durchgeführt, um den Einfluss der dünnen Zwischenfolie auf die Schallausbreitung zu bestimmen. Dazu wurde an der Ober- und Unterseite der Scheibe in gegenüberliegender Position jeweils ein Empfänger angekoppelt. Der Sender befand sich auf der oberen Oberfläche im Abstand von ca. 770 mm zu den Empfängern. Als Sendesignal wurde ein breitbandiger Puls verwendet.

Abbildung 2 zeigt das breitbandige Sendesignal (oberes Teilbild) und die empfangenen Signale der SE-Aufnehmer an der oberen (mittleres Teilbild) und unteren (unteres Teilbild) Oberfläche und die Frequenzspektren. Die Signale weisen eine komplexe Signalform auf, die sich durch die durch eine Überlagerung von vielen, unter verschiedenen Winkeln reflektierten und zickzackförmig sich ausbreitenden Volumenwellen ergeben. Es sind mehrere Wellentypen (Plattenmoden) mit unterschiedlicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit angeregt worden (sogenannte Dispersion). Die mittlere Geschwindigkeit des ersten Wellenmodes (entspricht der S_0 -Welle) beträgt ca. 5.2 mm/s und liegt damit etwas unterhalb der Geschwindigkeit der Longitudinalwelle in Glas von ca. 5.5 mm/s.

Die Abbildung 2 zeigt deutlich, dass die Signalformen und Frequenzspektren sehr ähnlich sind. Ein Einfluss der Zwischenfolie auf die Schallausbreitung und damit auf die Ortungsgenauigkeit kann weitgehend ausgeschlossen werden. Die Aussage, ob der Beginn der Rissausbreitung aus der unteren oder oberen Glasscheibe stammt, kann demnach nicht getroffen werden.

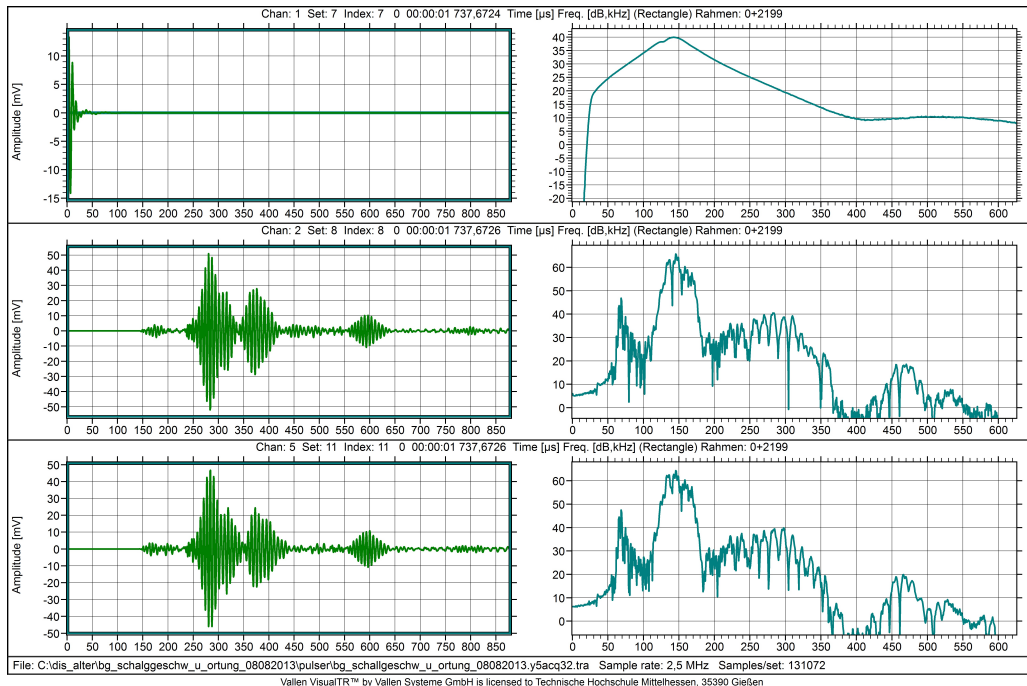


Abbildung 2: Breitbandiges Sendesignal (Teilbild oben) und Zeitsignale der Durchschallungsmessungen mit Empfängern an der oberen (Teilbild Mitte) und unteren Oberfläche der Windschutzscheibe (Teilbild unten) mit ihren Frequenzspektren.

Insgesamt wurden zwölf Versuche bei einer geringen Impaktorgeschwindigkeit von ca. 2 cm/s (also quasi-statisch) durchgeführt. Davon wurden jeweils drei Versuche in konvexer und konkaver Lage und mit und ohne Einfluss des Eigengewichts der Scheibe durchgeführt.

2.3 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden nur die Ergebnisse eines Versuchs in konvexer Lage (Impakt von Außen auf das Fahrzeug) und in horizontaler Belastungsrichtung (ohne Einfluss des Eigengewichts) beschrieben. Abbildung 3 zeigt die Kraft-Weg-Kurve eines repräsentativen Versuchs.

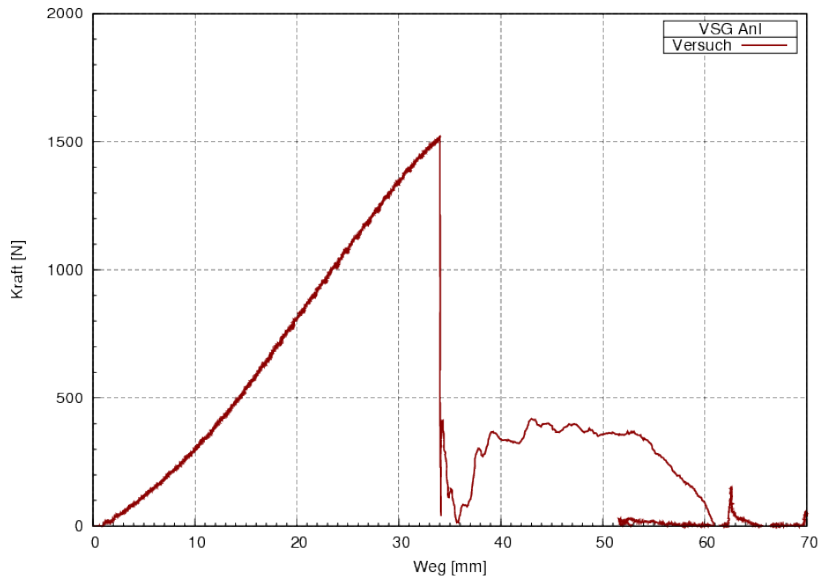


Abbildung 3: Kraft in Abhängigkeit des Weges bei einem Versuch in konvexer Lage der Windschutzscheibe mit Belastung in horizontaler Richtung.

Es ist zu sehen, dass die Kraft bis zum Bruch bei ca. 1500 N annähernd linear zunimmt. Nach dem Bruch weist die Probe zwischen 38 und 52 mm Durchbiegung noch eine Restkraft von ca. 400 N auf. Abbildung 4 zeigt die SE-Signale der sechs Aufnehmer, die an der oberen Oberfläche der Windschutzscheibe fixiert waren.

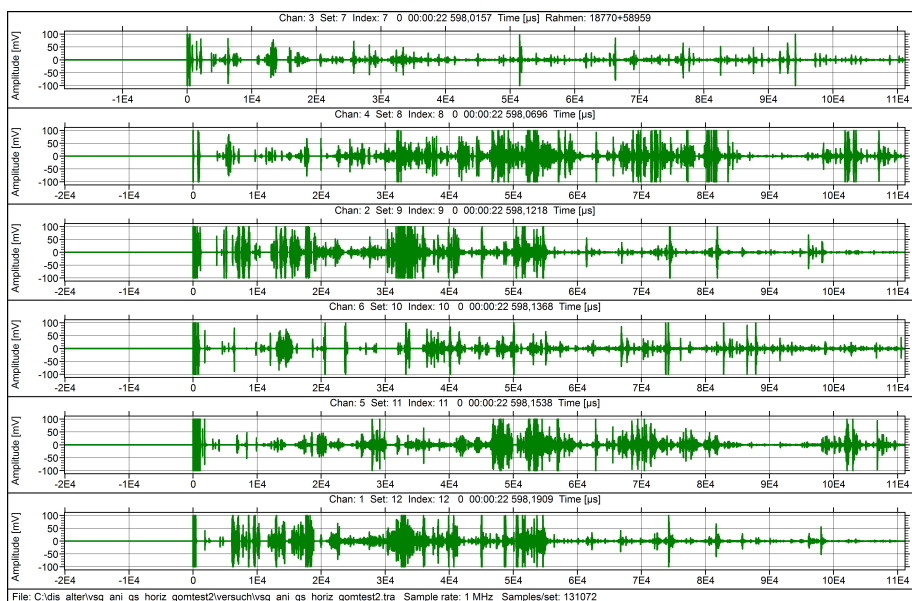


Abbildung 4: Gemessene Zeitsignale der an der oberen Oberfläche angebrachten SE-Aufnehmer.

Die Reihenfolge der Signale entspricht der Ansprechreihenfolge der gemessenen Ersteinsatzzeiten. Die Abbildung zeigt, dass alle Signale sehr scharf einsetzende Erstampplituden aufweisen, die mit einer Triggerschwelle von 40 dB automatisch bestimmt wurden. Die vielen später einsetzenden Bursts stammen von der Bildung des Rissgeflechtes in der Glasscheibe während des sehr schnellen Rissfortschritts.

Zur planaren Ortung des Ereignisses wurde das Hyperbelverfahren verwendet. Beim Hyperbelverfahren werden Entfernungsdifferenzen bestimmt. Dazu konstruiert das Verfahren aus den Laufzeitdifferenzen der Ersteinsatzzeiten eine hyperbolische Positionsfunktion (Hyperbellinien) zu einem Aufnehmerpaar mit der Eigenschaft, dass alle Positionen auf dieser Funktion denselben gemessenen Laufzeitunterschied zu den Aufnehmern haben. Aus den Schnittpunkten mehrerer dieser Funktionen zu verschiedenen Aufnehmerpaaren lässt sich dann der Ort des Ereignisses errechnen [5]. Abbildung 5 zeigt das Ortungsergebnis. Dargestellt ist eine Projektion auf die x-y-Ebene mit dem Verlauf der Hyperbellinien.

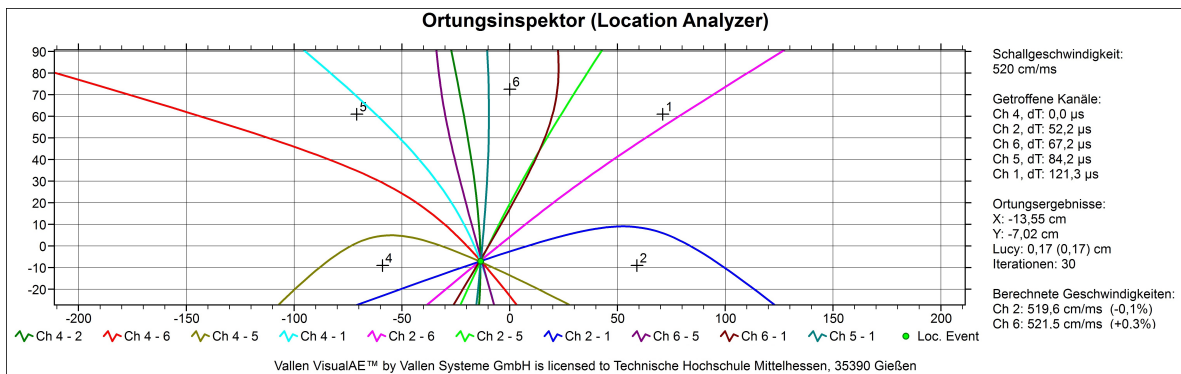


Abbildung 5: Projektion auf die x-y-Ebene mit dem Verlauf der Hyperbellinien.

Der Schnittpunkt der Hyperbellinien liegt am unteren Rand der Scheibe und hat die Koordinaten $x = -13,55$ cm und $y = -7,02$ cm. Der Koordinatenursprung liegt auf der vertikalen Symmetrielinie 10 cm entfernt vom unteren Rand der Glasscheibe. Abbildung 6 zeigt die Projektion auf die x-y-Ebene mit eingezeichneter Kontur der Windschutzscheibe. Die Zahlen geben die Lage der sechs SE-Aufnehmer wieder. Der Ort des Ereignisses wird durch einen grünen Punkt markiert. Nach Aussage der Schallemission startet der Riss am unteren Rand der Scheibe.

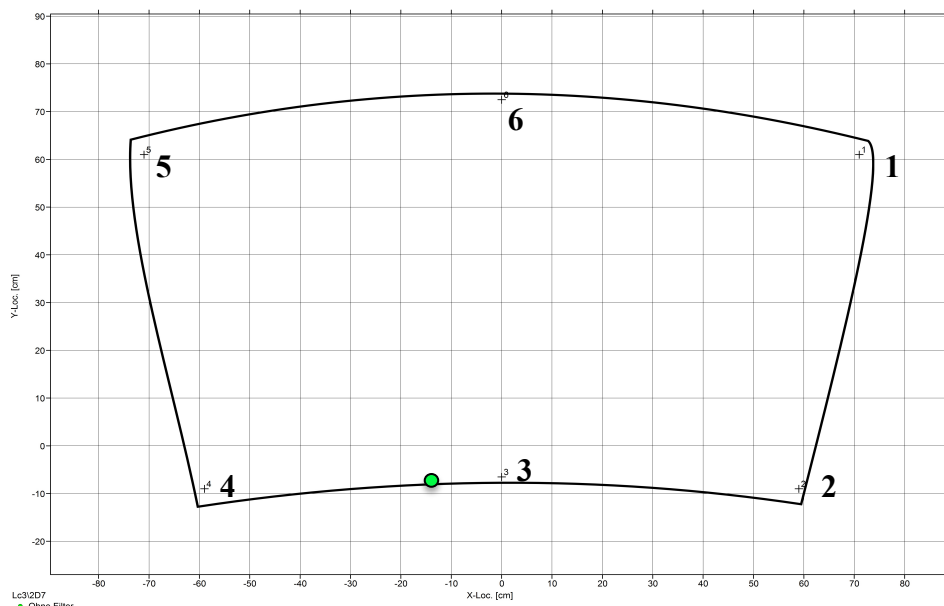


Abbildung 6: Projektion auf die x-y-Ebene mit der Kontur der Windschutzscheibe, der Lage der sechs SE-Aufnehmer (Zahlen) und die Lage des georteten Ereignisses (grüner Punkt).

2.4 Verifizierung der Ergebnisse mittels optischer Messtechnik

Zur Verifizierung der Ortungsergebnisse der SE-Messungen wurden während des Versuchs Verschiebungs- und Dehnungsmessungen mit dem optischen Messsystem ARAMIS durchgeführt. Der große Vorteil dieses Messsystem gegenüber z.B. Messungen mit Dehnungsmessstreifen ist, dass ein großes Bauteil berührungslos integral vermessen werden kann mit hoher Zeit- und Ortsauflösung. Abbildung 7 zeigt im linken Teilbild, wie Abbildung 6, die Projektion auf die x-y-Ebene mit der Lage der SE-Aufnehmer, der Kontur der Scheibe, der Ort des SE-Ereignisses des Initialrisses (grüner Punkt) und die mit ARAMIS berechneten Dehnungsdaten des Messfeldes.

Das rechte Teilbild zeigt die Photographie eines Ausschnitts der Windschutzscheibe nach dem Versuch. Die Lage des Initialrisses ergibt sich über die optisch ermittelte maximale Dehnung, welche in der Abbildung farblich dargestellt ist. Im Bereich der roten Färbung ist die Bruchdehnung von Glas überschritten. Ausgehend von dieser Stelle breitet sich der Riss in Richtung des Zentrums der Scheibe aus (blauer Pfeil im rechten Teilbild), wo der eigentliche Impact stattgefunden hat. Die Ergebnisse von beiden Messverfahren stimmen sehr gut mit der wirklichen Lage des Initialrisses überein. Obwohl der Riss an der Peripherie der Aufnehmeranordnung liegt und nur mit einem Einsatzzeitpunkt je Signal (S_0 -Mode) geortet wurde, beträgt die Abweichung nur wenige Millimeter.

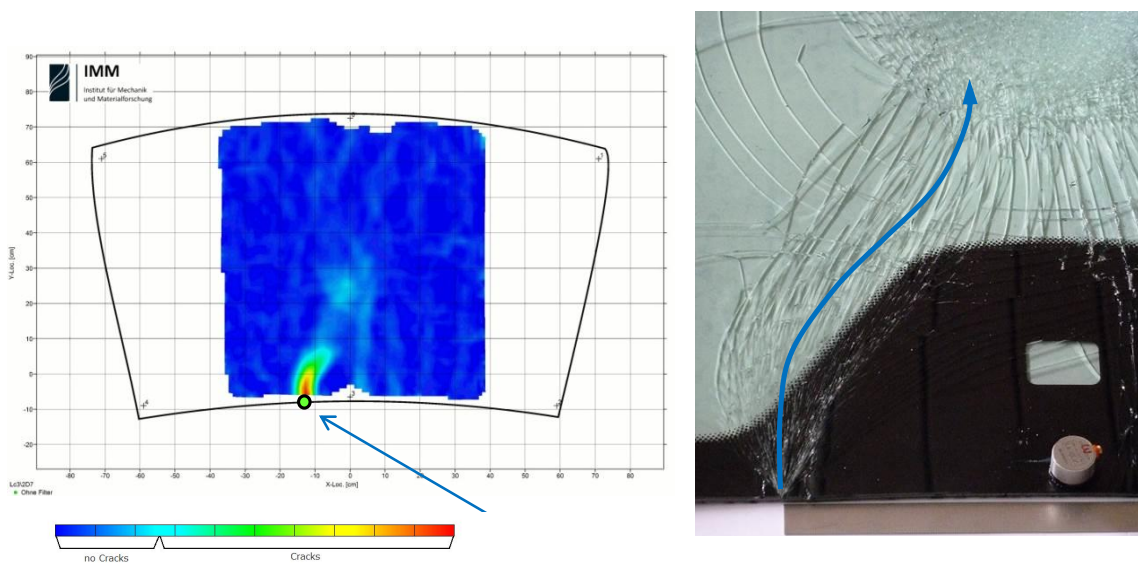


Abbildung 7: Linkes Teilbild: Projektion auf die x-y-Ebene mit der Kontur der Windschutzscheibe, der mit der Schallemission geortete Initialriss (grüner Punkt mit Pfeil) und der optisch ermittelten Oberflächendehnung. Rechtes Teilbild: Photographie des Rissgeflechtes nach dem Versuch mit dem Starterriss an der unteren Kante ca. 13,5 cm links von Aufnehmer 3 mit dem Verlauf der Rissausbreitung (blauer Pfeil).

3 Zusammenfassende Diskussion

Mit Hilfe der Schallemissionsanalyse konnte im Rahmen von experimentellen Untersuchungen des Bruch- und Deformationsverhaltens von Verbundsicherheitsglas unter einer dem Fußgängerschutz angelehnten stoßartigen Belastung der Initialriss des Rissgeflechtes

geortet werden. Die Ortungsergebnisse wurden mit einer optischen Messmethode verifiziert.

Der Riss startete vom Rand der Scheibe aus und pflanzte sich fächerartig in Richtung des Zentrums der Windschutzscheibe bis zur Stelle des Impakts fort. Im Randbereich ist die sogenannte Kantenfestigkeit geringer, als im Innern der Scheibe. Durch die Bearbeitung der Kante beim Schleifen und Anfasen entstehen kleine Mikrorisse, die zu einer Verringerung der Festigkeit führen. Laut DIN 18008-1 kann von einer Minderung der Festigkeit um 20% bei Zugbelastung ausgegangen werden. Der genau Text der Norm in Unterpunkt 8.3.8 lautet: *"Bei planmäßig unter Zugbeanspruchung stehenden kanten (z.B. bei zweiseitig linienförmiger Lagerung) von Scheiben ohne thermische Vorspannung dürfen unabhängig von der Kantebearbeitung nur 80% der charakteristischen Biegezugfestigkeit angesetzt werden"*.

Mit Kenntnis des Rissinitiierungspunktes können nun in einem Validierungsprozess das Versagen von Verbundsicherheitsglas durch ein elastisches Schädigungsmodell realistisch abgebildet werden.

Des Weiteren weisen die großen Amplituden der SE-Signale darauf hin, dass es sich bei der Rissbildung in Glas um schnelle Prozesse handelt, mit Rissausbreitungsgeschwindigkeiten, die durchaus im Bereich der Scherwellengeschwindigkeit liegen können.

Referenzen

- [1] M. Timmel, S. Kolling, P. Osterrieder, P.A. Du Bois: A finite element model for impact simulation with laminated glass, *International Journal of Impact Engineering*, 34(8): 1465-1478, 2007.
- [2] C. Alter, G. Manthei, S. Kolling, J. Schneider: Localization of initial cracks in laminated glass in the context of large deformations. *Proceedings of the international conference at glasstec, Düsseldorf, 2012.*
- [3] C. Alter, S. Kolling, J. Schneider: Head Impact on Windscreens - Modeling, Validation and Verification. *Proceedings of the 11th LS-DYNA Forum, Ulm, Germany, 2012.*
- [4] T. Frank, A. Kurz, M. Pitzer, M. Söllner: Development and validation of numerical pedestrian impactor models. *Proceedings of the 4th European LS-DYNA Users Conference, pp. C-II-01/18, 2003.*
- [5] C. U. Grosse, M. Ohtsu (Eds.): *Acoustic Emission Testing*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

Danksagung

Die Ergebnisse dieses Artikels entstanden im Rahmen des Forschungsprojektes 17N1111 "Experimentelle und numerische Untersuchungen von Windschutzscheiben unter stoßartiger Belastung zur Verbesserung des Fußgänger- und Insassenschutzes", welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert wird. Die Autoren bedanken sich für diese Unterstützung. Das Forschungsvorhaben wurde von den Mitgliedern des Arbeitskreises 27 "FE-Simulation, UA Crash und Insassensimulation" der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) wissenschaftlich und organisatorisch begleitet. Den Mitgliedern danken wir für wertvolle Anregungen und Diskussionen.