

FAT-Schriftenreihe 339

Stochastisches Bruchverhalten von Glas



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben "Stochastisches Bruchverhalten von Glas" - 18295 N - der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Stochastisches Bruchverhalten von Glas

Technische Hochschule Mittelhessen (THM)
Institut für Mechanik und Materialforschung
Projektleiter: Prof. Dr. Stefan Kolling

Technische Universität Darmstadt (TUD)
Institut für Statik und Konstruktion
Projektleiter: Prof. Dr. Jens Schneider

Inhalt

1	Projektbeschreibung	4
1.1	Forschungsthema	4
1.2	Wirtschaftliche Relevanz für KMU	5
1.2.1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
1.2.2	Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU	8
1.3	Stand der Forschung und Entwicklung	9
1.4	Arbeitshypothese	10
2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	11
2.1	Allgemeines zu den Arbeitspaketen 1-3	11
2.2	AP1 – Eigenspannungsanalyse	12
2.2.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	13
2.2.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	14
2.3	AP2 – Untersuchungen Fläche	20
2.3.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	20
2.3.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	21
2.4	AP3 - Untersuchungen Kante	28
2.4.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	28
2.4.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	29
2.5	AP 4 - Bruchursprungsanalyse der Flächen und Kantenfestigkeit aus AP 2 und AP 3	34
2.5.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	35
2.5.2	Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse	35
2.6	AP5 – Verteilungsfunktionen Flächen und Kantenfestigkeit aus AP 2 und AP 3	40
2.6.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	40
2.6.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	41
2.7	AP6 – Kopfaufpralltests Windschutzscheiben	51
2.7.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	51
2.7.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	51
2.8	AP7 – Stochastische Simulation / Validierung	59
2.8.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	59
2.8.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	59
2.9	AP8 – Erarbeitung einer effizienten Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas in der Crashsimulation	61
2.9.1	Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes	61
2.9.2	Stochastisches Versagensmodell	62

2.9.3	Modellvalidierung	67
2.9.4	Kopplung Nachbruchverhalten	77
2.9.5	Stochastische Berechnungsmethodik für Crashsimulationen	81
2.9.6	Sensitivitätsanalyse des Kopfaufpralles	84
2.9.7	Zusammenfassung und Fazit	86
3	Verwendung der Zuwendung	87
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	87
5	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	88
6	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	88
6.1	Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Projektes	88
6.2	Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projektes	90
7	Literaturverzeichnis	91

1 Projektbeschreibung

1.1 Forschungsthema

Der Fußgängerschutz ist mittlerweile der gesellschaftlich und entwicklungstechnisch relevanteste Bereich der passiven Sicherheit. Im Lastfall Kopfaufprall wird ein spezieller Impaktor auf Strukturbereiche des PKW geschossen und dabei die Beschleunigung gemessen und als Verletzungskriterium (HIC) ausgewertet. Trifft dieser Impaktor auf die Windschutzscheibe, so ist das Bruchverhalten des Glases entscheidend für den Beschleunigungsverlauf und damit für das Verletzungsrisiko des Fußgängers. Der Zeitpunkt des Versagens und damit der Beschleunigungsverlauf sind allerdings aufgrund der stochastischen Verteilung der den Bruch auslösenden Mikrorisse nicht deterministisch vorhersagbar, siehe hierzu [1], welche Grundlage des vorliegenden Antrages ist und eine Übersicht zur Streuung der Festigkeit zeigt. Mit Hilfe von statistischen Methoden können jedoch Bruchwahrscheinlichkeiten zur Auslegung herangezogen werden. Diese stellen das Kernthema des vorliegenden Antrags dar und sollen an Kleinproben ermittelt werden, die aus Windschutzscheiben entnommen werden.

Ein wichtiges Instrument in der Fahrzeugauslegung ist die numerische Simulation. Die Berechnungen werden in der Automobilindustrie hierbei fast ausschließlich von KMU durchgeführt. Eine Methodik wie man mit der statistischen Streuung der Ergebnisse beim Kopfaufprall auf Windschutzscheiben in der Berechnungspraxis umgeht liegt allerdings nicht vor. Ziel des Projektes ist es, für die KMU eine Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas in der Crashsimulation zu entwickeln, um damit Streuungen im Versuch verstehen und sicher bewerten zu können.

Hierfür wird zunächst das stochastische Bruchverhalten von Glas auf Probenebene untersucht und mittels statistischer Verteilung beschrieben. Durch Bruchursprungsanalysen werden die Versagensmechanismen bestimmt, wodurch die statistischen Verteilungen differenziert und entscheidende Parameter für das stochastische Verhalten ermittelt werden.

Mit den gewonnenen Festigkeitsverteilungsfunktionen unterschiedlicher Bereiche der Windschutzscheibe (Fläche, siebbedruckter Randbereich und Kante) werden stochastische Crashsimulationen durchgeführt und mit den Bauteilversuchen verglichen. Die Auswertung liefert eine Wahrscheinlichkeit des HIC-Wertes und damit des vorliegenden Verletzungsrisikos. Da stochastische Simulationen sehr rechenintensiv sind, wird Stochastisches Bruchverhalten von Glas die Anzahl der erforderlichen Rechenläufe final optimiert, um eine effiziente Berechnungsmethodik für die tägliche Praxis der KMU in der Crashsimulation zu erhalten.

1.2 Wirtschaftliche Relevanz für KMU

1.2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Bei Verkehrsunfällen von PKW mit Fußgängern birgt der Aufprall des Kopfes auf Strukturteile des Fahrzeugs ein maßgebliches Verletzungsrisiko. Je nach Größe des Fußgängers und des Fahrzeuges schlägt der Kopf dabei entweder auf die Motorhaube oder auf die Windschutzscheibe auf.

Um den Unfallvorgang im Labor nachzubilden, werden speziell entwickelte Kopfindaktoren unter fest definierten Randbedingungen (Geschwindigkeit und Abschusswinkel) auf die Motorhaube oder die Windschutzscheibe geschossen, siehe Abb. 1.

Hierbei wird die resultierende Beschleunigung $a_{res}(t)$ des Impaktors in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Durch Integration der resultierenden Beschleunigung lässt sich das Verletzungskriterium HIC („head injury criterion“) nach EC 78/2009 ermitteln:

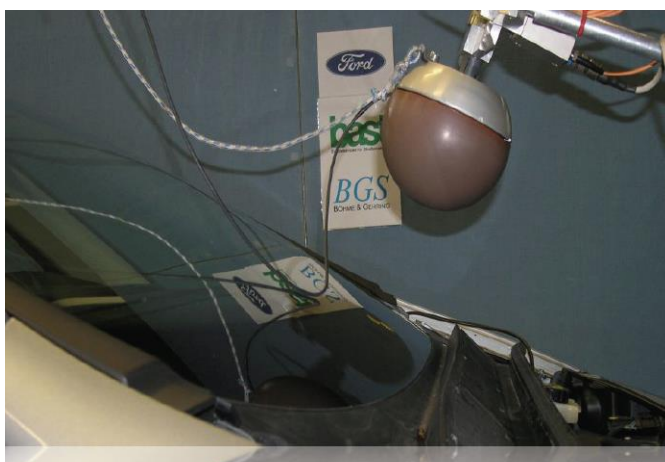


Abb. 1: Kopfaufpralltest auf Windschutzscheibe

(mit freundlicher Genehmigung der Ford Werke GmbH)

$$HIC = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{res}(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \leq 1000 \quad (1)$$

Der HIC darf den Wert 1000 nicht überschreiten, da man ab diesem Grenzwert von tödlichen Verletzungen ausgehen kann. Die Integrationsgrenzen sind hierbei nicht fest, sondern im Messfenster derart zu variieren, dass der HIC maximal wird.

Während der HIC beim Kopfaufprall auf Motorhauben mittlerweile durch verschiedene Maßnahmen wie optimiertes Design oder aktive Haube sehr gut beherrschbar und in der Crashesimulation prognostizierbar ist, stellt der Kopfaufprall auf Windschutzscheiben ein großes Problem im Fahrzeugentwicklungsprozess dar. Der Grund hierfür ist die starke Streuung in den Versuchsergebnissen. Beim Schuss auf die Motorhaube werden die Bleche zwar plastisch verformt, es kommt aber nicht zum Bruch. Beim Schuss auf die Windschutzscheibe hingegen kommt es grundsätzlich zum Bruch der Glasscheiben. Aufgrund der stochastischen Verteilung (Häufigkeit und Größe) von Mikroinhomogenitäten wie z.B. Rissen, Bläschen oder Steinchen unterliegt die Festigkeit von Glas jedoch einer hohen statistischen Streuung, siehe [2] [3] [1] und [4].

Diese Streuung im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung rein versuchsseitig abzubilden, ist aufgrund des erforderlichen Zeit- und Kostenaufwandes nicht abzuleisten. Ein wichtiger Schritt im Entwicklungsprozess einer modernen Fahrzeugentwicklung ist der Aufbau von virtuellen Prototypen, welche über Berechnungsmodelle abgesichert werden. Realcrashes sollen im Idealfall die Berechnungen final lediglich noch bestätigen, so auch der im Rahmen des im beantragten Projekt untersuchten Kopfaufpralls auf Windschutzscheiben im Fußgängerschutz. Es besteht daher der dringende Bedarf an Simulationsmodellen, die diesen Lastfall unter Berücksichtigung des stochastischen Versagens von Glas berechnen können.

Durch die starke Streuung der Festigkeit von Glas ist das Verletzungskriterium HIC beim Kopfaufprall auf Windschutzscheiben rein deterministisch nicht prognostizierbar. Windschutzscheiben sind daher hinsichtlich ihres Bruchverhaltens statistisch zu untersuchen. Eine Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas in der Crashsimulation muss entwickelt werden.

Bauteile aus Glas brechen in Abhängigkeit der Verzerrungsrate sprödelastisch. Sie zeigen eine starke Streuung der Bruchspannungen, die nur durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung sinnvoll beschrieben werden kann. In vielen Fällen kann die Verteilung der Bruchspannungen für eine feste Verzerrungsrate durch eine Weibull-Verteilung angepasst werden [5]. Es gibt aber auch Beispiele, in denen eine Normal- oder Lognormal-Verteilung gemessene Daten besser wiedergibt, [6] [7].

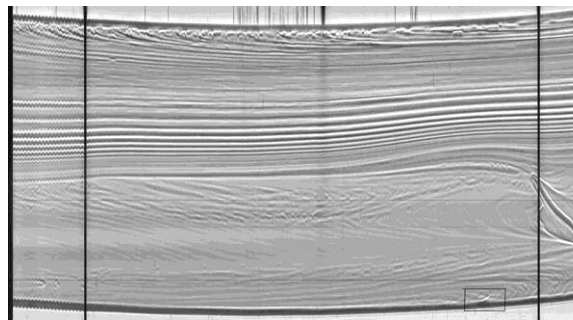


Abb. 2: Herstellungsbedingte Schichtung in Flachglas der Dicke 4 mm [55]

Die Versagenswahrscheinlichkeit in einem bestimmten Punkt setzt sich aus der lokalen Spannung und dem Vorhandensein von mikroskopischen Inhomogenitäten zusammen. Jede Glasoberfläche weist selbst unter optimalen Herstellungsbedingungen Inhomogenitäten in Form von Schichtungen (Abb. 2) und Mikrorissen (sog. Griffith-Risse [8]) auf. In der industriellen Glasherstellung lassen sich allerdings auch Schmelzrelikte wie Knoten, Steinchen oder Blasen nicht vollständig oder nur mit extremem Aufwand vermeiden. Solche Inhomogenitäten wirken als Spannungskonzentratoren, wobei die Art der Inhomogenität eine ganz wesentliche Rolle für die Festigkeitsminderung spielt. Abb. 3 zeigt links exemplarisch an einem Standardglasbehälter die Verteilung der Berstdrücke. Diese lässt sich gut durch eine Weibullverteilung beschreiben.

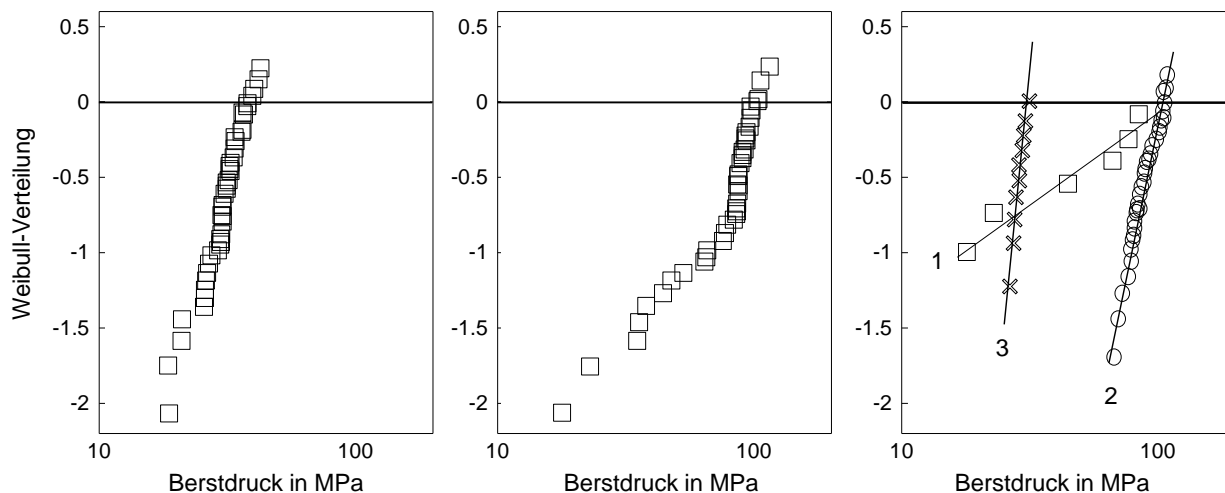


Abb. 3: links: Berstdruckverteilung an einem Standardglasbehälter, mittig: Verteilung der zugehörigen lokalen Bruchspannungen, rechts Festigkeitsverteilung bei Aufteilung nach unterschiedlichen Bruchursachen, 1: Blasen, 2: Steinchen, 3: sandgestrahlt.

Mit Hilfe von FEM-Berechnungen lassen sich die lokalen Spannungen im Bruchsprung berechnen. Diese weichen deutlich von der Weibullverteilung der Berstdrücke ab, wobei zwei in der Weibullauftragung lineare Bereiche erkennbar sind. Eine weitergehende Analyse zeigt, dass sich diese Bereiche unterschiedlichen Fehlertypen zuordnen lassen. Den Einfluss unterschiedlicher

Glasfehler bzw. Beschädigungen auf die Bruchspannungsverteilung zeigt Abb. 3 rechts [9]. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Extremwerte und der Bereich um den charakteristischen Wert einer Verteilung von unterschiedlichen Fehlern verursacht werden können. Um zutreffende Schlüsse aus Verteilungen ziehen zu können, muss ihr Aufbau zunächst analysiert werden. Insbesondere muss überprüft werden, ob den Extremwerten nicht ein fremder Fehlertyp zugrunde liegt.

Das statistische Bruchverhalten von Glas resultiert aus Mikroinhomogenitäten. Eine statistische Verteilungsfunktion der Bruchspannung bei fester Verzerrungsrate muss für eine differenzierte Beschreibung des Bruchverhaltens mittels Bruchursprungsanalyse einem Auslösemechanismus eindeutig zugeordnet werden.

Bei Windschutzscheiben sind die Bruchursachen meist Mikrorisse (siehe Abb. 4) die aufgrund der Bearbeitung an den Kanten anders verteilt sind als in der Fläche. Auch durch das Siebdruckverfahren können Mikrorisse (Abb. 4) und lokale Eigenspannungen in die Scheiben eingebracht werden. Diese möglichen Ursachen für ein Versagen müssen getrennt voneinander untersucht und bewertet werden.

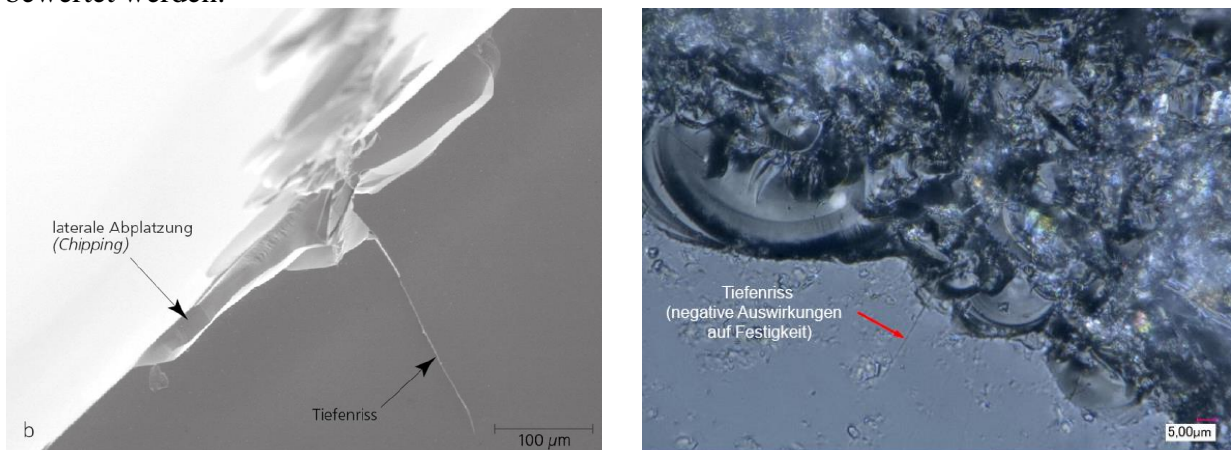


Abb. 4: Tiefenrisse in Glas infolge Oberflächendefekt (links) und infolge Kantenbearbeitung (rechts).

In [1] wurden bereits phänomenologische Voruntersuchungen durchgeführt, die diese Effekte zeigen. Die wissenschaftliche Problemstellung ist nun, die Ursachen dieser Effekte zu verstehen und in der Berechnung zu berücksichtigen.

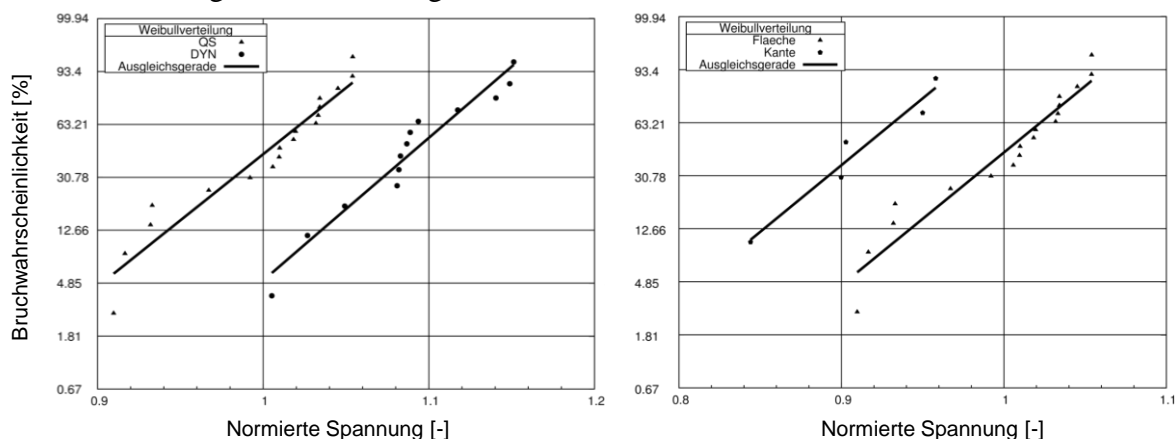


Abb. 5: Auf das arithmetische Mittel der quasistatischen Versuche normierte Weibullverteilung bei Windschutzscheibenversuche. Links: Abhängigkeit der Bruchwahrscheinlichkeit von der Belastungsgeschwindigkeit. Rechts: Unterschiedliche Bruchwahrscheinlichkeiten von Kante und Fläche.

Hierfür werden Verteilungsfunktionen der Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeiten der Verzerrungsrate und des Ortes (Fläche, Kante, Siebdruckbereich) benötigt.

Ziel der Untersuchungen auf Kleinprobenebene ist es, diese unterschiedlichen stochastischen Verteilungen für die verschiedenen Bereiche der Windschutzscheibe für die Simulation zur Verfügung zu stellen. Kleinproben sind hierfür billiger, schneller zu prüfen und der Spannungszustand sowie die Bruchursache sind klarer als bei der kompletten Windschutzscheibe. Die Bauteilversuche dienen der Validierung dieser Ergebnisse, insbesondere für die Berücksichtigung des Größeneffektes und der Verzerrungsrate. Bei zukünftigen Untersuchungen würden, basierend auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens, alleinige Tests auf Kleinprobenebene die Eingangsparameter für die FE-Berechnungen liefern.

Nicht zuletzt ist die Bruchspannung auch von Eigenspannung im Glas abhängig. Grundsätzlich sind Windschutzscheiben nicht thermisch vorgespannt. Jedoch können durch den thermischen Umformprozess Eigenspannungen entstehen. Deren Berücksichtigung wird derzeit in den Kopfaufprallsimulationen allerdings vernachlässigt. Es muss geklärt werden, ob diese Vernachlässigung zulässig ist.

1.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU

Ein wichtiges Instrument in der Fahrzeugauslegung ist die numerische Simulation. Die Berechnungen werden in der Automobilindustrie hierbei fast ausschließlich von KMU durchgeführt. Eine Methodik wie mit der Streuung der Ergebnisse beim Kopfaufprall auf Windschutzscheiben in der Berechnungspraxis umgegangen werden muss liegt allerdings nicht vor. Ziel des Projektes ist es, für die KMU eine Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas in der Crashsimulation zu entwickeln, um damit Streuungen im Versuch verstehen und sicher bewerten zu können. Dies bedeutet einen klaren Wettbewerbsvorteil für die einheimischen KMU. Darüber hinaus liefert die abgesicherte Prognose die Möglichkeit zum energieeffizienten Leichtbau.

Hierfür wird zunächst das stochastische Bruchverhalten von Glas sowohl auf Probenebene als auch im Bauteiltest an der Windschutzscheibe untersucht und mittels statistischer Verteilung beschrieben. Die Ansätze unterscheiden dabei das unterschiedliche Verhalten von Fläche und Kante sowie den siebbedruckten Bereich der Scheiben und werden jeweils über Bruchursprungsanalysen überprüft.

Mit den gewonnenen Verteilungsfunktionen werden anschließend stochastische Crashsimulationen durchgeführt. Die Anzahl der erforderlichen Simulationen wird final optimiert, um eine effiziente Berechnungsmethodik für die tägliche Praxis der KMU in der Crashsimulation zu erhalten. Die hierfür erforderlichen Eingangsparameter der Simulationen werden im Rahmen des Projektes durch Versuche auf Kleinprobenebene ermittelt.

Darüber hinaus liefert das Vorhaben einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von Rating-Verfahren wie dem Euro NCAP und damit auch zur Erfüllung gesetzlicher Auflagen im Rahmen des Fußgängerschutzes. Mit Hilfe der Ergebnisse können die im Crashtest erhaltenen HIC-Werte sicher interpretiert und entsprechende konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des Fußgängerschutzes sinnvoll eingeleitet werden.

Auch in der Bauindustrie sind gebogene Gläser normativ nicht geregelt, sodass für die Verwendung von gebogenem Glas eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [10] oder eine Zustimmung im Einzelfall nötig ist. Dementsprechend sind die hier vorgeschlagenen weiterführenden Untersuchungen auch im Hinblick auf die grundsätzlichen Regelungen in [11] von großer Bedeutung. Die aus diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse können somit auf Anwendungen im Bauwesen übertragen werden.

1.3 Stand der Forschung und Entwicklung

Bruchverhalten von Glas

Die Festigkeit von Gläsern ist gut untersucht und in einer Reihe von Büchern ausführlich dargestellt, siehe [2] [12]. Prüfverfahren zur Festigkeit sind in Normen definiert. Dabei führt die Prüfung von Flachgläsern unmittelbar auf die lokalen Bruchspannungen im Bruchsprung, während für komplexere Strukturen in der Regel nur Maßzahlen wie z.B. Berstdrücke bei innendruckbelasteten Behältergläsern angegeben werden können. Aus Untersuchungen zur Festigkeit von Behälterglas sind die Zusammenhänge für verschiedene Lasten an komplexen Strukturen gut bekannt, siehe [9] [13] [3].

Statistische Auswertung

Die Verteilung der Bruchspannungen oder Bruchbelastungen erfolgt meist mit einer Weibull-Verteilung, einer Normal-Verteilung oder einer Extremwert Typ I-Verteilung [6]. Um zuverlässig zu höheren oder niedrigeren Lasten extrapolieren zu können, muss die Güte der Anpassung mit einem Signifikanztest geprüft werden [7]. Solche Signifikanztests geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Datensatz mit der angenommenen Verteilung vereinbar ist. Bei Festigkeitsanalysen handelt es sich meist um eine zerstörende Prüfung. Das führt sowohl in der industriellen Qualitätssicherung als auch bei wissenschaftlichen Prüfungen zu merklichen Kosten für die Bereitstellung der Proben. Deshalb muss aus ökonomischen Gründen die Zahl der Proben begrenzt werden. Die Signifikanz einer Versuchsreihe sinkt aber mit abnehmender Größe der Stichproben, so dass eine 100%ige Absicherung einer Verteilung ausgeschlossen ist.

Kantenfestigkeit und Flächenfestigkeit

Die Kantenfestigkeit von Flachgläsern ist von verschiedenen Faktoren, wie Herstellprozess, Kantenart, Größe und Lasteinwirkungsdauer abhängig. Insbesondere die herstellerabhängige Kantenbearbeitung hat einen großen Einfluss auf die Kantenfestigkeit [4] [14] [15] [16]. Automobilverglasungen haben im Allgemeinen sehr hohe Anforderungen an die Kantenqualität [17]. Dies hat sowohl mechanische als auch optische Gründe.

Die Flächenfestigkeit von Glas ist vom Oberflächenzustand abhängig. Eine Verglasung versagt, sofern die kritische Kombination aus Risstiefe und anliegender Spannung zum Erreichen der kritischen Spannungsintensität führt [29]. Da Oberflächendefekte nicht homogen und mit gleicher Risstiefe verteilt sind sondern einer gewissen Streuung bzw. statistischen Verteilung unterliegen, unterliegen experimentelle Biegeversuche von Glas einem gewissen Größeneinfluss der unter Zug stehenden Oberfläche. Je höher die Streuung der Intensität der Oberflächendefekte ist, desto höher ist der Einfluss der geprüften, unter Zug stehenden Glasoberfläche. Anders verhält es sich für gleichmäßig geschädigte Oberflächen. Hier ist der Einfluss als gering einzuschätzen. Vereinfachend kann auf Grundlage statistischer Auswertungen mittels Weibullverteilung der Einfluss von unterschiedlichen Flächen A_1 und A_2 auf das Verhältnis der Spannungen zu

$$\frac{\sigma(A_1)}{\sigma(A_2)} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

angenommen werden. β ist hierbei der Form-Parameter (Maß für die Streuung innerhalb der Zufallsvariablen) der Weibullverteilungen. Für beide zugrunde gelegten Verteilungen sollte dieser nahezu identisch sein [18], [19].

Die Erkenntnisse von Bau- und Behälterglas in Hinblick auf die Kantenfestigkeit und Flächenfestigkeit (mit und ohne Siebdruck) lassen sich auf Windschutzscheiben aufgrund der Krümmung und des Herstellprozesses jedoch nicht ohne weiteres übertragen. Eine ausführliche experimentelle Untersuchung zu den Themenfeldern Kantenfestigkeit, Flächenfestigkeit (mit und ohne

Siebdruck) und Eigenspannung ist sowohl auf Proben- als auch auf Windschutzscheibenebene nicht bekannt.

Numerische Simulationen

Deterministische Simulationen stellen den Stand der Technik in der virtuellen Fahrzeugauslegung dar. Man geht bei der Berechnung des Kopfaufpralls auf Windschutzscheiben von einer festen Bruchdehnung des Glases aus, die an Komponenten- oder Gesamtfahrzeugtests angepasst wird. Berechnungsmodelle für Windschutzscheiben sind hierbei ausreichend erforscht [1] sowie in der Praxis getestet und etabliert [20], [21]. Eine Erweiterung der Modellierungstechnik bezüglich der Berechnung von gezielt vorgeschädigtem Glas wird in [22] vorgeschlagen und auf PKW-Seitenscheiben angewendet. In [23] wird die Berücksichtigung von Eigenspannungen in Windschutzscheiben für den Kopfaufprall erstmals thematisiert. Die Untersuchung beschränkt sich jedoch auf eine einzige Windschutzscheibe, womit keine abgesicherte Aussage getroffen werden kann.

Stochastische Simulationen berücksichtigen die Streuungen von Eingangs- und Ausgangsgrößen in der FE-Berechnung [24] [25]. Innerhalb der stochastischen Simulation hat sich die sogenannte Robustheitsanalyse als eigenständige Simulationsdisziplin entwickelt, mit der Strukturen unempfindlicher gegen Störeinflüsse ausgelegt werden können [26]. Diese Simulationen sind bereits Stand der Technik und werden auch dazu verwendet, Streuungen in Materialdaten in der Crashsimulation insbesondere bei metallischen Strukturbauteilen zu berücksichtigen und zu bewerten [27]. Als kommerzielle Software sind hier in der Berechnungspraxis hauptsächlich optiS-Lang, SoS3 und zur Robustheitsanalyse DIFFCRASH etabliert. Die Softwarehersteller dieser Produkte sind im projektbegleitenden Ausschuss des Forschungsprojektes vertreten, womit die Softwarepakete für das beantragte Projekt zur Verfügung stehen.

Eine Untersuchung hinsichtlich des zu betrachteten Falles Kopfaufprall auf Windschutzscheiben ist noch nicht erfolgt. Bei dieser Berechnung wird sich in der Literatur und in der Praxis noch auf die deterministische Berechnung mit Extremwertbetrachtungen („best case / worst case“) beschränkt.

1.4 Arbeitshypothese

Ziel des beantragten Projektes ist es, eine Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas für die Crashsimulation des Kopfaufpralls auf Windschutzscheiben zu entwickeln, um die Wahrscheinlichkeit des HIC-Wertes und damit der Verletzungsschwere zu prognostizieren.

Das stochastische Bruchverhalten von Glas wird auf Kleinprobenebene unter quasi-statischer Belastung und an kompletten Windschutzscheiben für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten untersucht sowie mittels statistischer Verteilung beschrieben. Die Übertragbarkeit der Kleinprobenversuche wird mittels Korrelationsfunktionen sichergestellt.

Die Festigkeitsverteilungen werden durch unterschiedliches Verhalten von Fläche, Kante und siebbedrucktem Bereich der Scheiben beeinflusst. Um differenzierte und zuverlässige Aussagen treffen zu können, muss sichergestellt werden, dass den Verteilungsfunktionen eindeutige Bruchursachen zugeordnet werden. Dies wird durch die mikroskopische Analyse der Bruchsprünge sichergestellt.

Mit den gewonnenen Verteilungsfunktionen werden stochastische Crashsimulationen durchgeführt. Die Anzahl der erforderlichen Simulationen wird final optimiert, um eine effiziente Berechnungsmethodik zu erhalten.

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Allgemeines zu den Arbeitspaketen 1-3

Die Arbeitspakete 1 bis 3 beinhalten experimentelle Untersuchungen an Windschutzscheiben. Hierbei wurden Windschutzscheiben aus einem Produktionsprozess untersucht, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden kann. Die Arbeiten wurden anfangs dahingehend fokussiert, dass umfassende Voruntersuchungen den reibungslosen Ablauf der eigentlichen Untersuchungen an den Windschutzscheiben gewährleisten konnten. Hierzu wurden aus einem Vorgängerprojekt [1] nicht mehr benötigte Windschutzscheiben verwendet, anhand derer die geplanten Untersuchungen optimiert wurden.

Insbesondere der Umgang mit der mehrachsig gekrümmten Oberfläche bedurfte einer intensiven Auseinandersetzung. So stellte sich heraus, dass für die zerstörenden Festigkeitsuntersuchungen große Radien und geringe Unterschiede der Radien zueinander benötigt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden zudem in einem internationalen Journal veröffentlicht [28]. Mit diesem Hintergrund wurde zunächst mittels dem 3D-Modellierungsprogramm Rhino und dem Plugin Grasshopper ein Tool entwickelt, das diese Kriterien für eine gegebene Windschutzscheibengeometrie auswertet und darstellt. In Abb. 6 ist eine beispielhafte Auswertung einer zweiachsig gekrümmten Geometrie dargestellt. Die grünen Bereiche sind hier für die eingestellten Parameter geeignet für die Probekörperentnahme. Diese Auswertung wurde mit dem Windschutzscheiben-ty, der in diesem Forschungsprojekt betrachtet wurde, durchgeführt (Siehe Arbeitspaket 2).

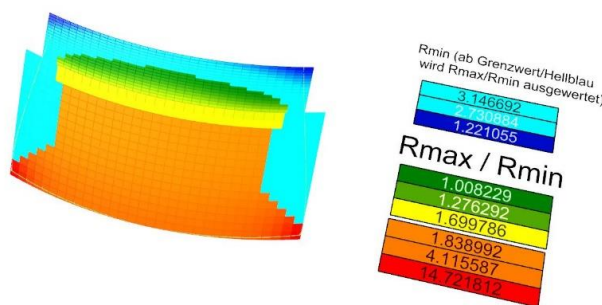


Abb. 6: Krümmungsanalyse einer beispielhaften Windschutzscheibengeometrie

Neben der Problematik der mehrachsigen Krümmung wurde sich intensiv mit den benötigten Abmessungen der Probekörper sowie deren Gewinnung aus den Windschutzscheiben beschäftigt. Durch Versuche an unterschiedlich großen Probekörpern haben sich schlussendlich kleinere Geometrien der Probekörper herauskristallisiert (Siehe Arbeitspakete 2 und 3). Zudem wurde nach einigen Recherchen festgelegt, dass die Probekörper mittels Wasserstrahlschneiden hergestellt werden sollen. Hierzu wurden testweise aus den Windschutzscheiben des Vorgängerprojektes Probekörper herausgeschnitten, um sicherzustellen, dass die Probekörperentnahme gelingt, da bei gekrümmten Oberflächen dies problematisch ist. In Abb. 7 sind erfolgreich hergestellte Probekörper für die Flächenfestigkeit (Arbeitspaket 2) und Kantenfestigkeit (Arbeitspakete 3) dargestellt. Weiterhin wurde eine umfangreiche Arbeitsanweisung zur Erstellung der Probekörper erarbeitet, da das Wasserstrahlschneiden durch ein externes Unternehmen erfolgt, um sicherzustellen, dass alle Anforderungen an die Probekörper erfüllt werden und insbesondere dieser weitere Bearbeitungsschritt keinen Einfluss auf die zu ermittelnde Bruchfestigkeit hat.

Neben Probekörpern aus laminierten Windschutzscheiben sollten auch Proben aus nicht laminierten Einzelscheiben untersucht werden. Hier hat sich das Wasserstrahlschneiden als nicht zielführend herausgestellt, da der Anfangsimpuls des Wasserstrahls hier in der Regel zu einem Bruch der

Scheiben geführt hat. Aus diesem Grund wurde festgelegt, dass diese Probekörper händisch mittels Schneidrädchen aus den Einzelscheiben geschnitten werden sollen (Abb. 7 rechts).



Abb. 7: Beispielhafte Probekörper aus dem mittleren Bereich der Windschutzscheibe, sowie dem Randbereich (links), Entnahmestellen aus einer Windschutzscheibe (mitte), Probekörperherstellung mittels Glasschneider an nicht laminierten Einzelscheiben (rechts)

In der Anfangsphase des Projektes wurde festgelegt, welcher Windschutzscheibentyp als Probekörper zum Einsatz kommen soll. Die Probekörper wurden durch die Firma Pilkington Automotive Deutschland GmbH, Otto-Seeling-Straße 7, 58455 Witten zur Verfügung gestellt. In enger Abstimmung wurden schlussendlich Scheiben gewählt, die eine Version der Windschutzscheibe für einen Audi A3 sind. Diese Probekörper entsprachen den Kriterien, die die Forschungsstellen formuliert hatten. So haben diese Scheiben keine weiteren Anbauteile, keine elektrischen Anschlüsse, Drähte oder Profile. Die Scheiben entsprechen Serienstand und stammen aus einem Einzelscheiben-Pressbiegeprozess. Zudem können aus dem Produktionsprozess (anderes Fertigungslos) nicht laminierte Einzelscheiben entnommen werden. In Abb. 8 ist dieser Windschutzscheibentyp dargestellt. Die beiden Glasscheiben haben jeweils eine Nenndicke von 1,8 mm. Auf beiden Glasscheiben befindet sich im Randbereich eine Emaille, die im Siebdruckverfahren aufgebracht wird. Bei der Außenscheibe ist diese Emaille bis zum Rand geführt und bei den Innenscheiben ist ein Abstand von wenigen Millimetern vorhanden. Die Verbundfolie ist 0,76 mm starkes Akustik PVB.

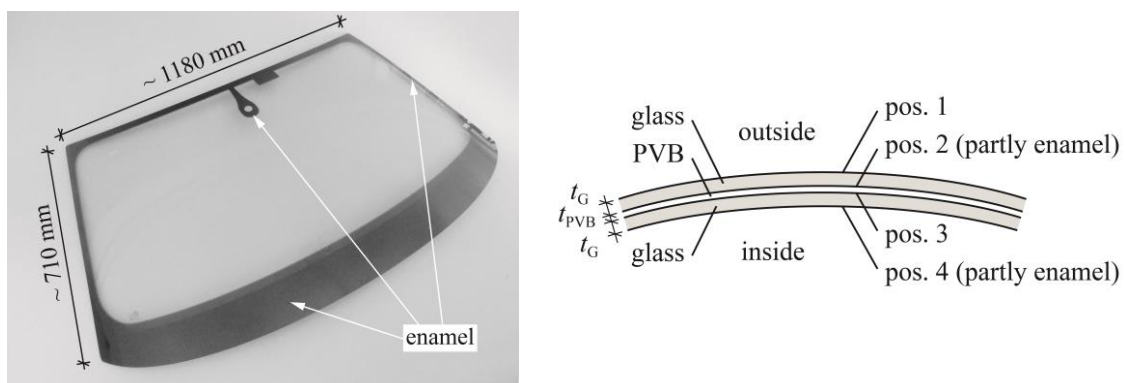


Abb. 8: Windschutzscheibentyp der Gegenstand der Untersuchungen war

2.2 AP1 – Eigenspannungsanalyse

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 2, Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion bearbeitet.

2.2.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Für die Erfassung der Eigenspannungen und deren Streuungen von Automobilverglasungen sollen spannungsoptische Messungen an fabrikneuen Einzelscheiben durchgeführt werden. Die Messungen erfolgen quantitativ mittels eines Scattered Light Polarimeters (SCALP, Abb. 9 links) womit der Eigenspannungsverlauf über die Glasdicke ermittelt werden kann. Die so ermittelten Spannungsverläufe sollen durch Messungen der Oberflächendruckspannungen mittels eines Epibiaskops unterstützt und verifiziert werden (Laser GASP, Abb. 9 mittig).



Abb. 9: links: SCALP-Messung an gebogenem Glas, mittig: Laser GASP, rechts: Polfilteraufnahme von thermisch gebogenem, vorgespanntem Glas.

Die Messungen an den Scheiben werden an unterschiedlichen Stellen durchgeführt, wodurch die Streuung der Eigenspannung innerhalb einer Scheibe erfasst werden soll. Zusätzlich sollen die Ergebnisse durch Polfilteraufnahmen qualitativ überprüft werden (Abb. 9 rechts).

Tab. 1: Zu Beginn des Projektes geplante Prüfmatrix der Eigenspannungsanalyse an Windschutzscheiben als Einzelscheiben

Versuche	Anzahl der Scheiben
SCALP Messungen	30
Polfilteraufnahmen	5 aus den obigen 30
Laser GASP Messungen	5 aus den obigen 30
3D Vermessung	5 aus den obigen 30

Der Einfluss der Krümmung auf die Eigenspannungen wird ebenfalls untersucht. Von den untersuchten Scheiben werden fünf dreidimensional vermessen, damit die vorhandenen Krümmungen erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt werden können. Dabei werden Eigenspannungsmessungen zusätzlich zu den Einzelscheiben auch am Verbundglas durchgeführt, um einen Einfluss des Laminationsprozesses abzuschätzen. Abschließend werden die Messergebnisse statistisch ausgewertet und aufbereitet.

Meilenstein 1: Eigenspannungen der Windschutzscheiben sind quantifiziert.

2.2.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.2.2.1 Eigenspannungen

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Quantifizierung der Eigenspannungsverteilungen der Windschutzscheiben. Die Ergebnisse sollten anschließend auf das FE-Netz übertragen werden, um systematisch den Einfluss der Eigenspannungen auf den HIC-Wert zu untersuchen sowie zu klären, inwiefern Eigenspannungsverteilungen bei der Simulation des Kopfaufpralls berücksichtigt werden müssen. Die Untersuchungen fanden an ganzen Einzelscheiben und für die Untersuchung des Einflusses des Laminierungsprozesses zudem an ganzen Verbundscheiben statt. Die Messungen wurden mittels eines "SCALP" - Gerätes durchgeführt. Insgesamt sollen 10 Innenscheiben als Einzelscheiben, 10 Außenscheiben als Einzelscheiben und 10 Verbundscheiben untersucht werden. Zu Beginn des Projektes standen die eigentlichen Probekörper noch nicht zur Verfügung und es wurde zunächst das Verfahren zur Bestimmung der Eigenspannungen erarbeitet und optimiert. So wurde an den vorhandenen Windschutzscheiben des Vorgängerprojektes Untersuchungen mit dem SCALP durchgeführt, um den Einfluss und den Umgang mit den Krümmungen zu untersuchen. Weiterhin wurde ein Raster festgelegt, in dem die Messungen stattfinden sollen. In Abb. 10 ist eine beispielhafte Messung dargestellt. Zudem ist die festgelegte Darstellungsweise für eine Windschutzscheibenoberfläche aufgezeigt. Durch diese Voruntersuchungen wurde weiterhin deutlich, dass die Lagerung der Windschutzscheibe während der Messung einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis hat. Hierdurch konnten mögliche Lagerungsarten erarbeitet werden, wie zum Beispiel ein Luftkissen, welche diesen Einfluss minimieren.



Spannungen in horizontaler Richtung auf Pos 1 [MPa]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K
1		-3	0	-1			-2	-3	-1	1
2	4	-3	-3	-4	-2	-5	-3	-3	-4	0
3	-1	1	-2	-2	-1	0	0	-2	-2	0
4	-4	-2	-2	-1	0	0	-3	-3	-2	-1
5	-2	0	-2	0	0	0	-2	-1	-2,5	-1

Abb. 10: Untersuchungen der Eigenspannungen einer Windschutzscheibe Mittels SCALP (links) und Darstellung der gemessenen Eigenspannungen auf einer Windschutzscheibe (rechts)

In einem weiteren Schritt wurden die Eigenspannungsmessungen mittels SCALP an den ersten zur Verfügung stehenden endgültigen Probekörpern durchgeführt. Es wurden 2 Verbundscheiben und jeweils 3 Außenscheiben und Innenscheiben als Einzelscheiben untersucht. Die Messungen gestalteten sich wesentlich aufwendiger als angenommen. Dies lag an dem benötigten Messraster, der Problematik, dass die Spannungen nicht isotrop waren, dem für dünne Scheiben benötigten flachen Einfallwinkel des Messlasers, der die Messung anfälliger für Fehler macht und die Lagerung der Windschutzscheiben während der Messung und deren Einfluss auf die Messergebnisse. Durch die gleichmäßigen Ergebnisse der einzelnen Probekörper zueinander konnte der erhöhte Aufwand zunächst durch eine Reduktion der Anzahl zu untersuchenden Windschutzscheiben kompensiert werden. In Abb. 11 sind beispielhaft die Ergebnisse (Hauptspannungen und die dazugehörigen Hauptspannungsrichtungen) dieser Messungen der Pos. 1 einer einzelnen Außenscheibe dargestellt.

Sigma 1 [MPa]										Hauptspannungsrichtung Sigma 1									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	-8,3	-10,4	-7,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-9,5	-9,7	-7,9	1	/	/	\	###	###	###	\	\	\
2	-9,0	-7,8	-6,5	-4,9	-6,8	-6,5	-6,9	-9,2	-9,0	2	\	\	\	\	\	\	\	\	\
3	-9,0	-9,7	-8,6	-7,7	-8,8	-8,7	-9,8	-9,4	-11,3	3	\	\	\	\	\	\	\	\	\
4	-7,2	-8,4	-8,7	-8,4	-7,8	-7,9	-6,4	-8,9	-10,9	4	\	\	\	\	\	\	\	\	\
5	#DIV/0!	#DIV/0!	-9,3	-9,3	-9,3	-10,2	-10,0	#DIV/0!	#DIV/0!	5	###	###	\	\	\	\	\	###	###

Sigma 2 [MPa]										Hauptspannungsrichtung Sigma 2									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	-17,7	-16,8	-13,2	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-14,9	-16,8	-20,8	1	\	\	\	###	###	###	/	/	/
2	-14,0	-13,3	-13,5	-12,7	-13,6	-14,4	-13,1	-12,1	-19,5	2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
3	-12,6	-14,3	-14,1	-13,6	-14,5	-14,1	-14,4	-12,8	-14,3	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/
4	-12,7	-15,1	-15,8	-15,5	-15,0	-15,1	-15,0	-14,6	-14,7	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/
5	#DIV/0!	#DIV/0!	-17,2	-17,0	-16,9	-17,4	-19,0	#DIV/0!	#DIV/0!	5	###	###	/	/	/	/	/	###	###

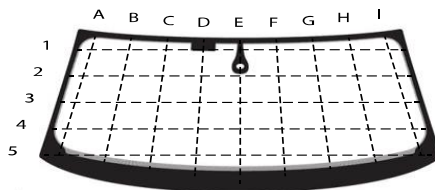


Abb. 11: Beispielhaftes Ergebnis der ersten Messungen, Haupteigenstressungen auf der Pos. 1 einer einzelnen Außenscheibe mit dazugehörigen Hauptspannungsrichtungen ("#DIV/0!" und "###": keine Messung möglich)

Die bisherigen Messungen der Eigenstressungen erfolgten mit einer direkten Lagerung der Windschutzscheiben auf einem Luftkissen. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass diese Art der Lagerung einen Einfluss auf die Messergebnisse hat, da kein isotroper Spannungszustand herrscht und die Spannungstrajektorien auf die Ecken der Windschutzscheibe zulaufen. Dies war ein Indiz dafür, dass der Lastabtrag des Eigengewichtes über die Ecken der Windschutzscheibe gewährleistet ist und nicht durch eine flächige und somit spannungsfreie Lagerung auf dem Luftkissen. Um die Lagerung zu optimieren und eventuelle Einflüsse daraus zu eliminieren wurden neue Messungen durchgeführt, bei denen die zu messenden Windschutzscheiben (Einzelscheiben und Verbundscheiben) zusätzlich zum Luftkissen auf zwei weiteren Verbundscheiben gelagert wurden. Durch die formschlüssige Lagerung sollte so die gewünschte spannungsfreie Lagerung erreicht werden. Insgesamt wurden so zwei Verbundscheiben und je zwei einzelne Außenscheiben und Innenscheiben an jeweils 15 Messpunkten untersucht.

Verbundscheiben außen (Pos. 1)	VS_03	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Sigma 1 [MPa]</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-7,8</td><td>-8,7</td><td>-7,6</td><td>-8,2</td><td>-7,8</td><td>-8,2</td><td>-7,8</td><td>-7,8</td><td>-7,8</td></tr> <tr><td>2</td><td>-8,0</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-9,5</td><td>-8,3</td><td>-8,0</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-8,0</td></tr> <tr><td>3</td><td>-8,0</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-9,5</td><td>-8,3</td><td>-8,0</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-8,0</td></tr> <tr><td>4</td><td>-7,8</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-9,5</td><td>-8,3</td><td>-8,0</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-8,0</td></tr> <tr><td>5</td><td>-7,8</td><td>-9,3</td><td>-9,5</td><td>-10,0</td><td>-5,6</td><td>-7,8</td><td>-8,6</td><td>-7,8</td><td>-8,0</td></tr> </tbody> </table>	Sigma 1 [MPa]										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	-7,8	-8,7	-7,6	-8,2	-7,8	-8,2	-7,8	-7,8	-7,8	2	-8,0	-8,6	-7,8	-9,5	-8,3	-8,0	-8,6	-7,8	-8,0	3	-8,0	-8,6	-7,8	-9,5	-8,3	-8,0	-8,6	-7,8	-8,0	4	-7,8	-8,6	-7,8	-9,5	-8,3	-8,0	-8,6	-7,8	-8,0	5	-7,8	-9,3	-9,5	-10,0	-5,6	-7,8	-8,6	-7,8	-8,0	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Hauptspannungsrichtung Sigma 1</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>/</td><td>/</td><td>\</td><td>/</td><td>/</td><td>\</td><td>/</td><td>/</td><td>\</td></tr> <tr><td>2</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>3</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>4</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>5</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> </tbody> </table>	Hauptspannungsrichtung Sigma 1										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	/	/	\	/	/	\	/	/	\	2	\	\	\	\	\	\	\	\	\	3	\	\	\	\	\	\	\	\	\	4	\	\	\	\	\	\	\	\	\	5	\	\	\	\	\	\	\	\	\
		Sigma 1 [MPa]																																																																																																																																											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																			
		1	-7,8	-8,7	-7,6	-8,2	-7,8	-8,2	-7,8	-7,8	-7,8																																																																																																																																		
		2	-8,0	-8,6	-7,8	-9,5	-8,3	-8,0	-8,6	-7,8	-8,0																																																																																																																																		
		3	-8,0	-8,6	-7,8	-9,5	-8,3	-8,0	-8,6	-7,8	-8,0																																																																																																																																		
4	-7,8	-8,6	-7,8	-9,5	-8,3	-8,0	-8,6	-7,8	-8,0																																																																																																																																				
5	-7,8	-9,3	-9,5	-10,0	-5,6	-7,8	-8,6	-7,8	-8,0																																																																																																																																				
Hauptspannungsrichtung Sigma 1																																																																																																																																													
A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																					
1	/	/	\	/	/	\	/	/	\																																																																																																																																				
2	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
3	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
4	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
5	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
VS_09	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Sigma 2 [MPa]</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-16,9</td><td>-11,9</td><td>-11,6</td><td>-11,3</td><td>-16,7</td><td>-16,9</td><td>-11,9</td><td>-11,6</td><td>-11,3</td></tr> <tr><td>2</td><td>-11,4</td><td>-10,5</td><td>-10,8</td><td>-10,0</td><td>-11,9</td><td>-11,4</td><td>-10,5</td><td>-10,8</td><td>-10,0</td></tr> <tr><td>3</td><td>-11,4</td><td>-10,5</td><td>-10,8</td><td>-10,0</td><td>-11,9</td><td>-11,4</td><td>-10,5</td><td>-10,8</td><td>-10,0</td></tr> <tr><td>4</td><td>-10,7</td><td>-10,8</td><td>-10,8</td><td>-12,2</td><td>-12,9</td><td>-10,7</td><td>-10,8</td><td>-10,8</td><td>-12,2</td></tr> <tr><td>5</td><td>-10,7</td><td>-10,8</td><td>-10,8</td><td>-12,2</td><td>-12,9</td><td>-10,7</td><td>-10,8</td><td>-10,8</td><td>-12,2</td></tr> </tbody> </table>	Sigma 2 [MPa]										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	-16,9	-11,9	-11,6	-11,3	-16,7	-16,9	-11,9	-11,6	-11,3	2	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0	-11,9	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0	3	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0	-11,9	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0	4	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2	-12,9	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2	5	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2	-12,9	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Hauptspannungsrichtung Sigma 2</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>2</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>3</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>4</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>5</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> </tbody> </table>	Hauptspannungsrichtung Sigma 2										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	\	\	\	\	\	\	\	\	\	2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	Sigma 2 [MPa]																																																																																																																																												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																				
	1	-16,9	-11,9	-11,6	-11,3	-16,7	-16,9	-11,9	-11,6	-11,3																																																																																																																																			
	2	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0	-11,9	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0																																																																																																																																			
	3	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0	-11,9	-11,4	-10,5	-10,8	-10,0																																																																																																																																			
4	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2	-12,9	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2																																																																																																																																				
5	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2	-12,9	-10,7	-10,8	-10,8	-12,2																																																																																																																																				
Hauptspannungsrichtung Sigma 2																																																																																																																																													
A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																					
1	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
2	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
3	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
4	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
	VS_09	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Sigma 1 [MPa]</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-9,6</td><td>-11,5</td><td>-9,1</td><td>-11,8</td><td>-6,4</td><td>-9,6</td><td>-11,5</td><td>-9,1</td><td>-11,8</td></tr> <tr><td>2</td><td>-10,2</td><td>-9,1</td><td>-9,7</td><td>-11,2</td><td>-10,3</td><td>-10,2</td><td>-9,1</td><td>-9,7</td><td>-11,2</td></tr> <tr><td>3</td><td>-10,2</td><td>-9,1</td><td>-9,7</td><td>-11,2</td><td>-10,3</td><td>-10,2</td><td>-9,1</td><td>-9,7</td><td>-11,2</td></tr> <tr><td>4</td><td>-10,5</td><td>-11,5</td><td>-11,7</td><td>-12,3</td><td>-6,2</td><td>-10,5</td><td>-11,5</td><td>-11,7</td><td>-12,3</td></tr> <tr><td>5</td><td>-10,5</td><td>-11,5</td><td>-11,7</td><td>-12,3</td><td>-6,2</td><td>-10,5</td><td>-11,5</td><td>-11,7</td><td>-12,3</td></tr> </tbody> </table>	Sigma 1 [MPa]										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	-9,6	-11,5	-9,1	-11,8	-6,4	-9,6	-11,5	-9,1	-11,8	2	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2	-10,3	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2	3	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2	-10,3	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2	4	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3	-6,2	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3	5	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3	-6,2	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Hauptspannungsrichtung Sigma 1</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>/</td><td>/</td><td>\</td><td>/</td><td>/</td><td>\</td><td>/</td><td>/</td><td>\</td></tr> <tr><td>2</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>3</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>4</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>5</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> </tbody> </table>	Hauptspannungsrichtung Sigma 1										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	/	/	\	/	/	\	/	/	\	2	\	\	\	\	\	\	\	\	\	3	\	\	\	\	\	\	\	\	\	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	5	/	/	/	/	/	/	/	/	/
		Sigma 1 [MPa]																																																																																																																																											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																			
		1	-9,6	-11,5	-9,1	-11,8	-6,4	-9,6	-11,5	-9,1	-11,8																																																																																																																																		
		2	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2	-10,3	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2																																																																																																																																		
		3	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2	-10,3	-10,2	-9,1	-9,7	-11,2																																																																																																																																		
4	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3	-6,2	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3																																																																																																																																				
5	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3	-6,2	-10,5	-11,5	-11,7	-12,3																																																																																																																																				
Hauptspannungsrichtung Sigma 1																																																																																																																																													
A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																					
1	/	/	\	/	/	\	/	/	\																																																																																																																																				
2	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
3	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
4	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
VS_09	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Sigma 2 [MPa]</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-18,5</td><td>-13,4</td><td>-11,4</td><td>-13,3</td><td>-20,7</td><td>-18,5</td><td>-13,4</td><td>-11,4</td><td>-13,3</td></tr> <tr><td>2</td><td>-11,5</td><td>-11,0</td><td>-11,6</td><td>-12,8</td><td>-12,3</td><td>-11,5</td><td>-11,0</td><td>-11,6</td><td>-12,8</td></tr> <tr><td>3</td><td>-11,5</td><td>-11,0</td><td>-11,6</td><td>-12,8</td><td>-12,3</td><td>-11,5</td><td>-11,0</td><td>-11,6</td><td>-12,8</td></tr> <tr><td>4</td><td>-12,5</td><td>-12,3</td><td>-13,1</td><td>-16,7</td><td>-12,6</td><td>-12,5</td><td>-12,3</td><td>-13,1</td><td>-16,7</td></tr> <tr><td>5</td><td>-12,5</td><td>-12,3</td><td>-13,1</td><td>-16,7</td><td>-12,6</td><td>-12,5</td><td>-12,3</td><td>-13,1</td><td>-16,7</td></tr> </tbody> </table>	Sigma 2 [MPa]										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	-18,5	-13,4	-11,4	-13,3	-20,7	-18,5	-13,4	-11,4	-13,3	2	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8	-12,3	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8	3	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8	-12,3	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8	4	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7	-12,6	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7	5	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7	-12,6	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7	<table border="1"> <thead> <tr><th colspan="10">Hauptspannungsrichtung Sigma 2</th></tr> <tr><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th><th>E</th><th>F</th><th>G</th><th>H</th><th>I</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td><td>\</td></tr> <tr><td>2</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>3</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>4</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> <tr><td>5</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></tr> </tbody> </table>	Hauptspannungsrichtung Sigma 2										A	B	C	D	E	F	G	H	I	1	\	\	\	\	\	\	\	\	\	2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	5	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	Sigma 2 [MPa]																																																																																																																																												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																				
	1	-18,5	-13,4	-11,4	-13,3	-20,7	-18,5	-13,4	-11,4	-13,3																																																																																																																																			
	2	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8	-12,3	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8																																																																																																																																			
	3	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8	-12,3	-11,5	-11,0	-11,6	-12,8																																																																																																																																			
4	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7	-12,6	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7																																																																																																																																				
5	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7	-12,6	-12,5	-12,3	-13,1	-16,7																																																																																																																																				
Hauptspannungsrichtung Sigma 2																																																																																																																																													
A	B	C	D	E	F	G	H	I																																																																																																																																					
1	\	\	\	\	\	\	\	\	\																																																																																																																																				
2	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
3	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
4	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				
5	/	/	/	/	/	/	/	/	/																																																																																																																																				

Abb. 12: Ergebnis der optimierten Eigenstressungsmessung der zwei Verbundscheiben, dargestellt sind die Werte der beiden Hauptspannungen sowie deren Richtung auf der Pos. 1

In allen Fällen konnte nach wie vor nur die konvexe Seite der Windschutzscheibe untersucht werden. Im Falle der konkaven Seite entsteht ein Luftspalt zwischen Messgerät und Glasoberfläche, welcher eine Messung erschwert bzw. zu unplausiblen Ergebnissen führt. In Abb. 12 sind beispielhaft die Ergebnisse der Vermessung der Verbundscheiben VS_03 und VS_09 dargestellt.

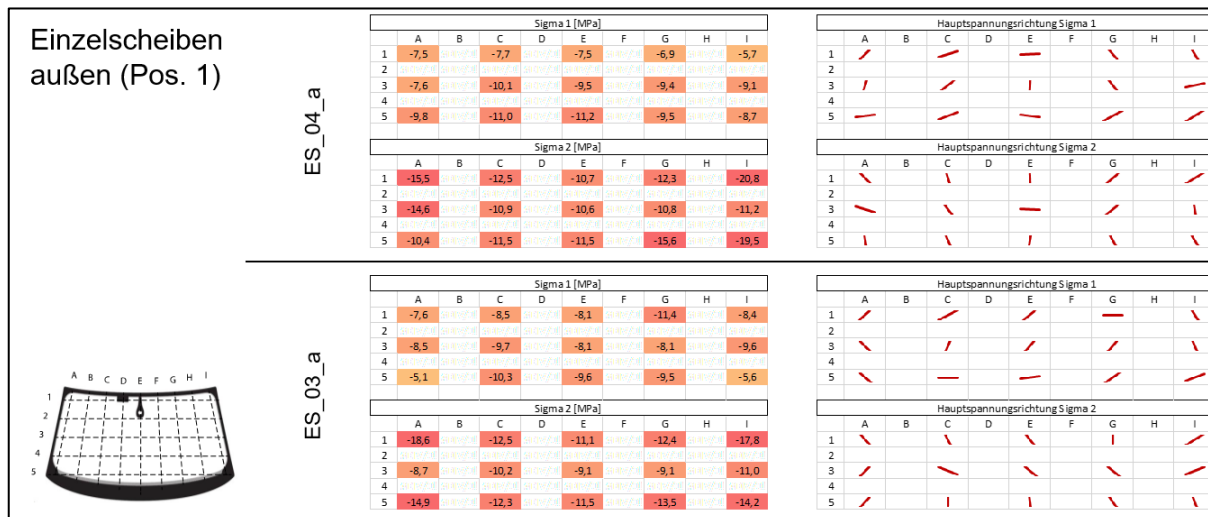


Abb. 13: Ergebnis der optimierten Eigenspannungsmessung der zwei äußeren Einzelscheiben, dargestellt sind die Werte der beiden Hauptspannungen sowie deren Richtung auf der Pos. 1

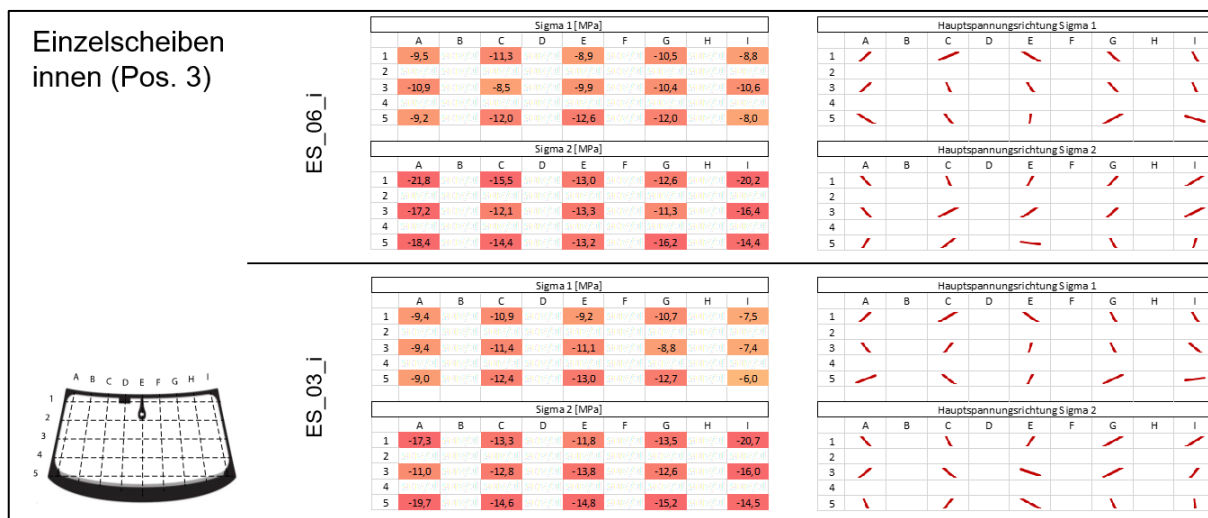


Abb. 14: Ergebnis der optimierten Eigenspannungsmessung der zwei inneren Einzelscheiben, dargestellt sind die Werte der beiden Hauptspannungen sowie deren Richtung auf der Pos. 3

Es ist zu beobachten, dass die Spannungen im mittleren Bereich nahezu isotrop sind und an den Ecken einen Faktor von ca. zwei zwischen den beiden Hauptspannungen aufweisen. Zudem zeigen die Spannungstrajektorien nicht mehr ein strikt auf die Ecken ausgerichtetes Muster. Somit ist diese Lagerungsmethode besser geeignet, um die reinen Eigenspannungen zu untersuchen. Die Verbundscheiben weisen gegenüber den Einzelscheiben nur sehr kleine Unterschiede auf, sodass der Einfluss der Lamination als sehr gering eingeschätzt werden kann. Um das Ergebnis weiter zu verifizieren wurden zudem Messungen an kleinen Probekörpern aus den Windschutzscheiben, die für die zerstörenden Prüfungen im Arbeitspaket 2 vorgesehen waren, durchgeführt (Abb. 15). Die Ergebnisse dieser Messungen lagen nur geringfügig unterhalb denen der entsprechenden Stelle der

ganzen Windschutzscheibe, sodass die Messungen an den ganzen Scheiben bestätigt werden konnten.



Abb. 15: Eigenspannungsmessung mittels SCALP an einem aus einer Windschutzscheibe herausgetrennten kleinen, runden Probekörper.

Neben den Untersuchungen der Eigenspannungen in der Fläche wurden Eigenspannungen an der Kante untersucht. Eine Messung mittels dem Edge-Stress Meter GES-100-MWA der Firma Strainoptic Technologies Inc. ist nur für die Innenscheiben und nicht für die Außenscheiben möglich, da der Siebdruck bei den Außenscheiben bis zum Rand und bei den Innenscheiben knapp bis vor den Rand aufgebracht ist.

Aus diesem Grund wurden spezielle Windschutzscheiben gefertigt, bei denen an gewissen Stellen der Siebdruckbereich ausgespart wurde. An diesen Probekörpern wurden Spannungsoptische Messungen mittels des Edge-Stress Meters durchgeführt, um die Eigenspannungen an den Kanten zu quantifizieren. Die Messungen ergaben sehr hohe Druckeigenspannungen zwischen -43 MPa und -80 MPa. Da diese Werte unplausibel hoch erschienen wurden weitere Spannungsoptische Messungen an Innenscheiben mit unverändertem Siebdruck durchgeführt. In Abb. 16 rechts ist oben eine Innenscheibe mit Standard Siebdruck (Probennummer 311_C) und unten eine Außenscheibe mit ausgespartem Siebdruck (Probennummer #02_B) in einem spannungsoptischen Versuchsaufbau dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist, dass bei dem ausgesparten Siebdruck der Druckspannungsbereich stärker ausgeprägt ist als im Vergleich zum kontinuierlich aufgetragenen Siebdruck. Folglich hat der Siebdruck Einfluss auf die resultierenden Eigenspannungen an der Kante. Aus diesem Grund wurden die Messergebnisse an den Scheiben mit verändertem Siebdruck als nicht repräsentativ angesehen. In Abb. 16 links ist eine Messung mittels dem Edge-Stress Meter an einer einzelnen Innenscheibe mit unverändertem Siebdruck (Probekörper Nr. 311) dargestellt. Trotz des Siebdruckbereichs (unterer Bildbereich) konnten die Messungen hinreichend genau durchgeführt werden. An den Außenscheiben konnten, wie bereits beschrieben keine Messungen durchgeführt werden.

Das Ziel des Arbeitspaketes wurde erreicht und zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich im mittleren Bereich der Windschutzscheibe (Innenscheibe und Außenscheibe) isotrope Eigenspannungen in der Höhe von ca. -10 MPa messen lassen. Zu den vier Ecken hin ergeben sich nicht isotope Spannungszustände mit Werten für die erste Hauptspannung von ca. -9 MPa und für die zweite Hauptspannung von ca. -18 MPa. Einzelne Außenscheiben (auf Pos.1), einzelne Innenscheiben (auf Pos 3) und Verbundscheiben (auf Pos 1) weisen sehr ähnliche Eigenspannungen auf, sodass der Einfluss der Lamination als gering eingestuft werden kann. Direkt an den Kanten der Innenscheibe lassen sich Druckeigenspannung in der Höhe von ca. -33 MPa messen. Werte für die Druckeigenspannung der Außenscheibe können nicht direkt ermittelt werden.

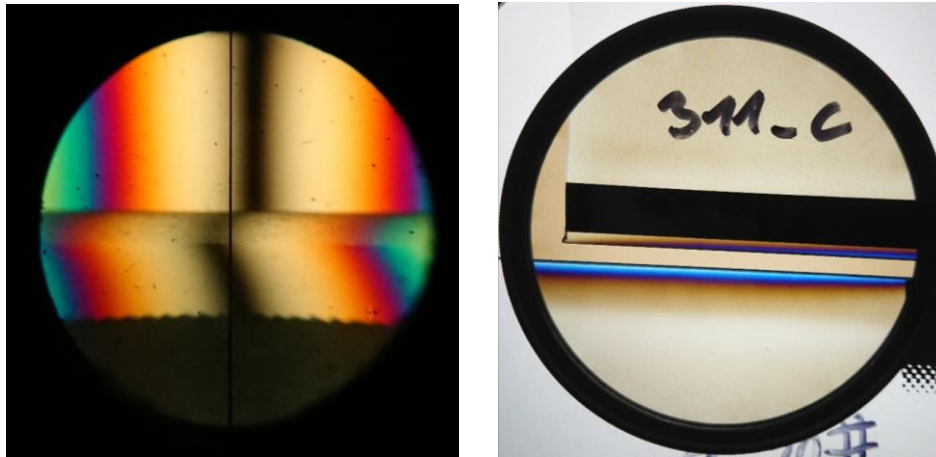


Abb. 16: Spannungsoptische Messung an der Kante, links: Messung einer Innenscheibe mittels Edge-Stress-Meter, rechts: Betrachtung der Kante einer Innenscheibe (oben) und einer Außenscheibe mit teilweise nicht aufgebrachtem Siebdruck (unten) im spannungsoptischen Versuchsaufbau

Der ursprünglich geplante Probenumfang wurde während des Projektes angepasst. Der Arbeitsaufwand stellte sich als wesentlich höher als angesetzt heraus, da die Problematik der Lagerung während der Projektbearbeitung aufgekommen ist. Weiterhin wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenspannungen an der Kante zu verifizieren. Aufgrund der geringen Streuung der Ergebnisse zweier Scheiben ist die Anpassung des Probenumfangs jedoch hinsichtlich der Aussagekraft akzeptabel. Referenzmessungen mittels eines Epibiaskops wurden aufgrund der Krümmung der Scheiben während der Projektbearbeitung als nicht zielführend erachtet.

2.2.2.2 Krümmungsanalyse

Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspaketes war die Analyse der Krümmung der Windschutzscheibe. Neben der Zusammenhängenden Betrachtung mit den Eigenspannungen war die Analyse insbesondere für die Festlegung der Entnahmestellen für die Probekörper nötig. Diese Entnahmestellen für die zerstörenden Festigkeitsprüfungen mussten so festgelegt werden, dass die Krümmungsradien möglichst klein sind und dass die Unterschiede der beiden Hauptkrümmungen zueinander gering sind. Hierzu wurden zwei Windschutzscheiben, jeweils als ganze Verbundscheibe, sowie jeweils zwei einzelne, nicht verbundene Außenscheiben und Innenscheiben geometrisch vermessen.

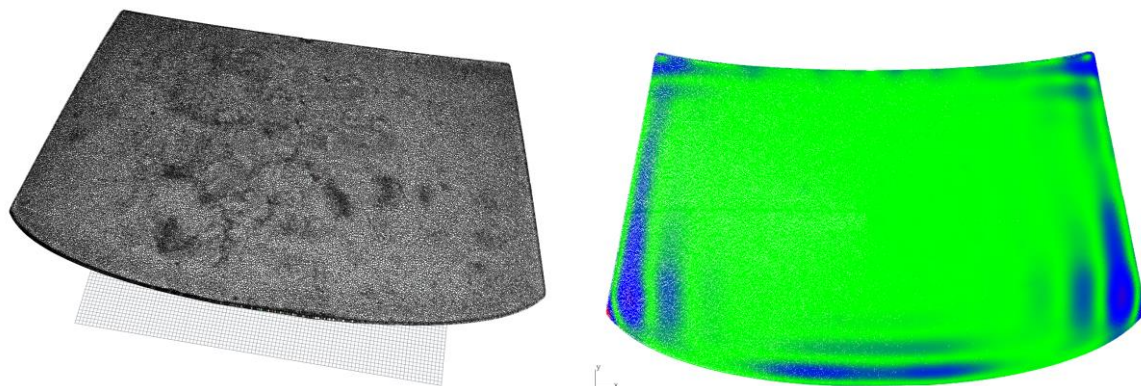


Abb. 17: links: Punktwolke als Ergebnis der 3D Vermessung, rechts: Visualisierung der Genauigkeit der Anpassung der NURBS-Fläche an die Punktwolke (Abweichungen: grün ca. 0,0003 mm, blau ca. 0,05 mm, maximale Abweichung: rot 0,93 mm)

Das Ergebnis der Vermessung einer Scheibe ist eine Punktwolke, die die Oberfläche der Scheibe darstellt (Abb. 17 links). Damit diese Daten analysiert werden konnten wurden die Punktwolken durch NURBS-Flächen angenähert. Mittels Rhino und Grasshopper wurde zudem die Qualität der Anpassung, die durch die Anzahl der Unterteilungen der NURBS-Flächen beeinflusst werden kann, bewertet. Hierbei konnte die Fehlerquadratsumme der senkrechten Abstände der Punkte zur Fläche ausgewertet werden und die Abweichung der Punktwolke zur NURBS-Fläche konnte visualisiert werden (Abb. 17 rechts).

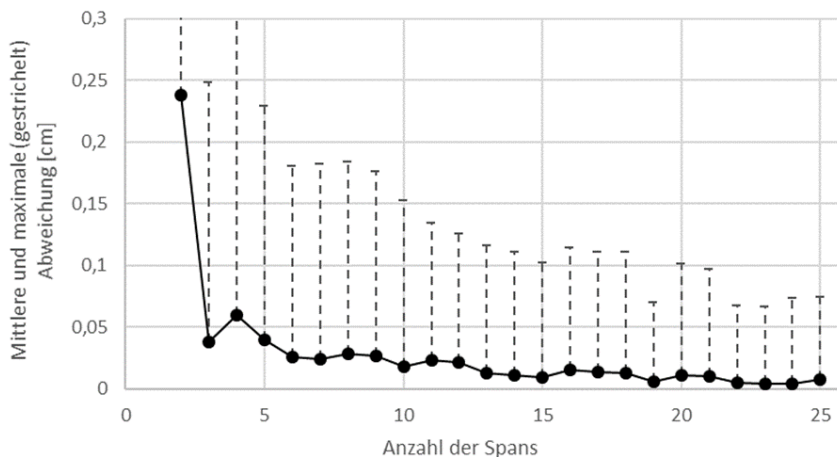


Abb. 18: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung der nötigen Anzahl an Spans für die Anpassung der NURBS-Fläche an die Punktwolke

Durch eine Parameterstudie in Bezug auf die Abweichung (Abb. 18) wurde die Unterteilung der NURBS-Fläche zu 15 Spans (entspricht 18 x 18 Kontrollpunkte der NURBS-Fläche) gewählt. Mit dieser Geometrie wurde schlussendlich die Untersuchung durchgeführt, die zu den Entnahmestellen der Probekörper geführt hat (Abb. 19, siehe auch Arbeitspaket 2).

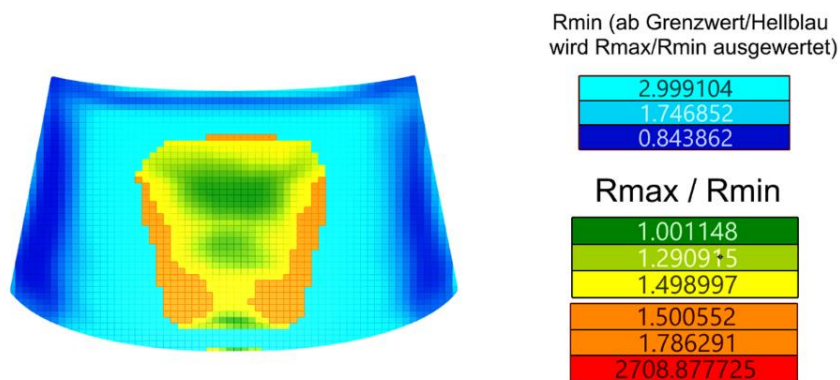


Abb. 19: Analyse der Krümmungsradien zur Bestimmung der Probenentnahmestellen, die grünen bis gelbe Bereiche sind zur Entnahme von Probekörpern geeignet

In Abb. 19 ist zudem ersichtlich, dass die Krümmungsradien am Rand der Windschutzscheibe kleiner sind als im mittleren Bereich. Zudem sind die Unterschiede der Krümmung zum Rand hin größer. Die Krümmung ist im mittleren Bereich nahezu sphärisch, während sie am Rand eher einachsiger ist. In Bezug auf die gemessenen Eigenspannungen lässt sich somit schlussfolgern, dass bei eher einachsiger Krümmung die Unterschiede der Haupteigenspannungen größer sind und je stärker die Krümmung ist, umso höher sind schlussendlich auch die Eigenspannungen.

2.3 AP2 – Untersuchungen Fläche

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 2, Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion bearbeitet.

2.3.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Die Biegefestigkeit in der Fläche des unbedruckten und siebbedruckten Bereiches von Automobilverglasungen sollte durch Doppelring-Biegeversuche untersucht werden (Abb. 20). Für den Siebdruckbereich sollten automobiltypische Bedruckungsgrade betrachtet werden. Die Versuche sollten an fabrikneuen nicht laminierten Einzelscheiben erfolgen.

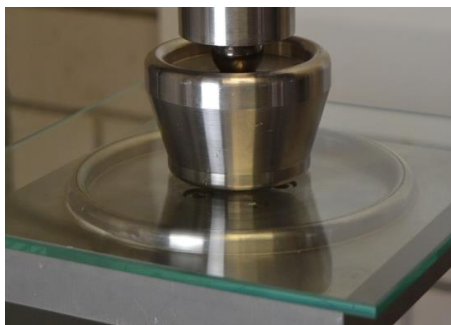


Abb. 20: Prüfstand Doppelring-Biegeversuch

Für die Bestimmung der Flächenfestigkeit ist nach [28] eine gleichförmige Biegespannung über einen Teil der Probefläche zu erzeugen. In Abb. 21 ist dargestellt, dass für den Versuchsaufbau R45 (Kantenlänge der Probe = 10 cm) ein solches Spannungsfeld auch bei kleinen Krümmungsradien (sphärisch gekrümmt) erzeugt werden kann.

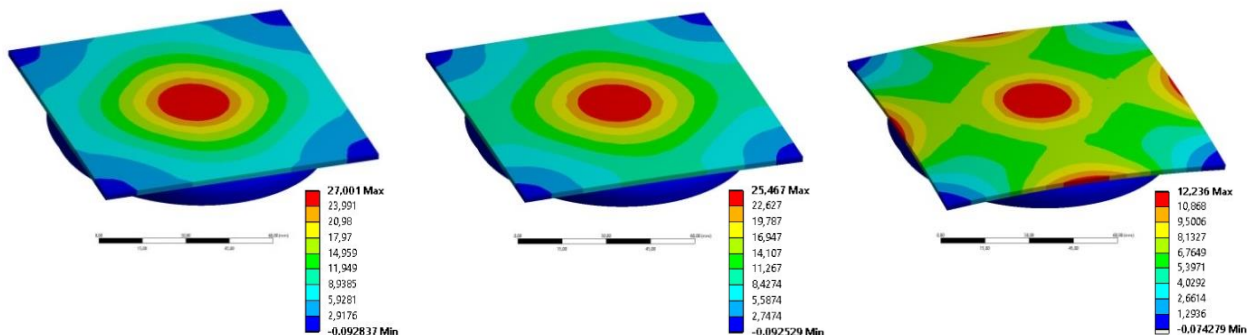


Abb. 21: FEM-Berechnungen Doppelringbiegeversuch R45 nach [28] mit 100 N Belastung und Scheibendicke $t = 2 \text{ mm}$, maximale Hauptspannungen an der Unterseite in N/mm^2 , links: flache Scheibe, Mitte: Krümmungsradius = 3m (sphärisch gekrümmt), rechts: Krümmungsradius = 0,5m (sphärisch gekrümmt)

Für automobiltypische Krümmungsradien der Windschutzscheiben können so die Flächenfestigkeiten bestimmt werden. Der Einfluss der Probengeometrie (quadratisch oder rund) und die Auswirkungen auf das Spannungsfeld infolge nicht sphärisch, doppelt gekrümmter Scheiben (liegen nicht überall auf) sollten vorab untersucht und berücksichtigt werden. Ebenso sollte für die Rückrechnung der Bruchspannung untersucht werden, welche Intensität des Spannungsfeldes in Abhängigkeit der Krümmung vorliegt.

Weiterhin sollten die bekannten Einflussfaktoren auf die Festigkeit (Zinnseite, bedruckt/ unbedruckt) für den benötigten Probenumfang berücksichtigt werden.

Tab. 2: Zu Projektbeginn geplante Prüfmatrix der Festigkeitsuntersuchungen an Windschutzscheiben als Einzelscheiben (Fläche)

	Zinnseite	Luftseite	bedruckt 100%	bedruckt 50%	bedruckt 20%
Anzahl Scheiben	15	15	15	15	15
Probekörper je Scheibe	5	5	5	5	5
Summe	75	75	75	75	75

Mittels bruchmechanischer Ansätze sollten zum einen die so gewonnen statischen Festigkeiten auf dynamische Festigkeiten extrapoliert und zum anderen der Größeneinfluss berücksichtigt werden. Diese berechneten Festigkeiten sollten durch Bauteilversuche an der THM im AP7 validiert.

Meilenstein 2: Flächenfestigkeiten sind untersucht und ausgewertet

2.3.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel dieses Arbeitspaketes war es die statistische Grundlage für die Verteilungsfunktionen der Flächenfestigkeiten zu erarbeiten. Diese Verteilungsfunktionen bilden die Grundlage für die späteren stochastischen FE-Simulationen des Kopfaufpralls.

Zunächst wurde in diesem Arbeitspaket auf Grundlage des Projektantrages erarbeitet, welche unterschiedlichen Oberflächen zu untersuchen sind. Es wurde sich intensiv mit dem Herstellprozess der Windschutzscheiben beschäftigt und die Produktion wurde besichtigt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass aufgrund des Herstellungsprozesses alle 4 Oberflächen unterschiedlichen Prozesshistorien unterliegen. Zudem sind die Siebdruckbereiche, als stark festigkeitsbeeinflussender Parameter, zu untersuchen. Es wurde darauf aufbauend zunächst festgelegt, dass je Oberfläche 75 Proben zu testen sind, um eine belastbare statistische Verteilungsfunktion zu bestimmen. Insgesamt ergaben sich somit zunächst $5 \times 75 = 375$ Proben. Je Oberfläche sollten zunächst 25 Proben aus Einzelscheiben und 50 Proben aus Verbundscheiben gewonnen werden. Weiterhin wurde festgehalten, dass die zerstörenden Prüfungen an Einzelscheiben und nicht im Verbund erfolgen muss. Der Nachteil des Verbundes ist, dass die mechanischen Eigenschaften der PVB-Folie genau bekannt sein müssen, um die Versagensspannungen zu ermitteln. Zudem wird bei einem Verbund in der Regel das Versagen von der äußersten Glasoberfläche ausgehen. Ein Prüfen der innenliegenden Positionen 2 und 3 wäre somit nicht möglich.

Hinsichtlich der ursprünglich geplanten Versuchsmatrix ergaben sich folglich einige Anpassungen. Ein wesentlicher Punkt war, dass neben Einzelscheiben auch Verbundscheiben (mit anschließendem Trennen) geprüft werden sollten. Zudem wurden die unterschiedlichen Bedruckungsgrade diskutiert und schlussendlich festgehalten, dass ein Bedruckungsgrad von 100% auch repräsentativ für alle Bedruckungsgrade ist.

Für die Probekörpergeometrie wurden umfangreiche FE Parameterstudien durchgeführt. In Abb. 22 (rechts) ist ein verwendetes FE-Modell dargestellt. Hierbei wurde geklärt, welchen Einfluss die Krümmung auf die Spannungsverteilung im Versuch hat. Die Untersuchungen sollten in Anlehnung an den Doppelringbiegeversuch nach DIN EN 1288-5 durchgeführt werden. Hintergrund dieses Versuchsaufbaus ist, dass eine bestimmte Fläche mit einer gleichmäßigen,

richtungsunabhängigen Zugspannung beaufschlagt wird. Somit ist gewährleistet, dass die für das Versagen maßgeblichen Mikrorisse an der Glasoberfläche senkrecht zu den Flanken belasten sind und zudem eine Referenzfläche angegeben werden kann, da unterschiedlich große Mikrorisse frei auf der Glasoberfläche verteilt sind. Die Untersuchungen zeigten, dass ein homogenes Spannungsfeld (kleine prozentuale Abweichungen) bei ausreichend großen Radien und geringen Unterschieden der Radien zueinander erreicht werden kann. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in [29] veröffentlicht worden. Aus diesen Untersuchungen resultieren die bereits beschriebenen Krümmungsauswertungen der Windschutzscheibe, um die Probenentnahmestellen festzulegen.

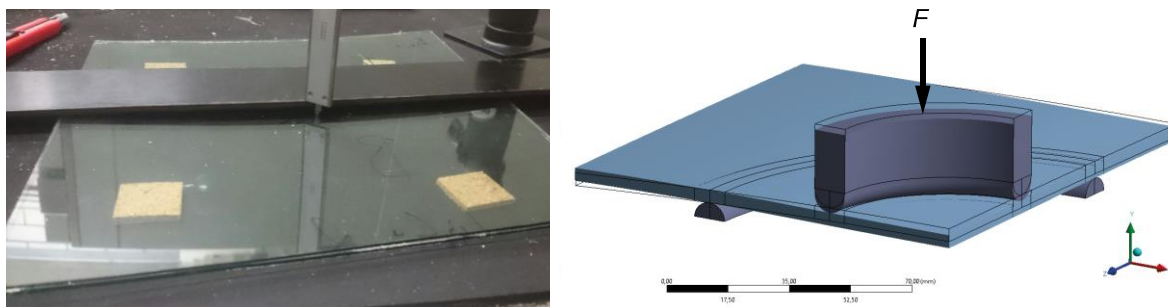


Abb. 22: Erste Tastversuche zur Probekörperherstellung und Vermessung dieser für die Prüfungen der Flächenfestigkeit (links) und FEM Modell (ein Viertel) des Versuchsaufbaues

Zu Projektbeginn wurden zunächst Probekörper aus Windschutzscheiben des Vorgängerprojektes mittels Schneidrädchen herausgeschnitten und anschließend vermessen (Siehe Abb. 22 links). Hierdurch wurde geklärt, welche Möglichkeiten bezüglich der Probenentnahme und der Probengeometrie bestehen. Zudem wurde erarbeitet, wie die Dokumentation der Probekörper zu erfolgen hat.

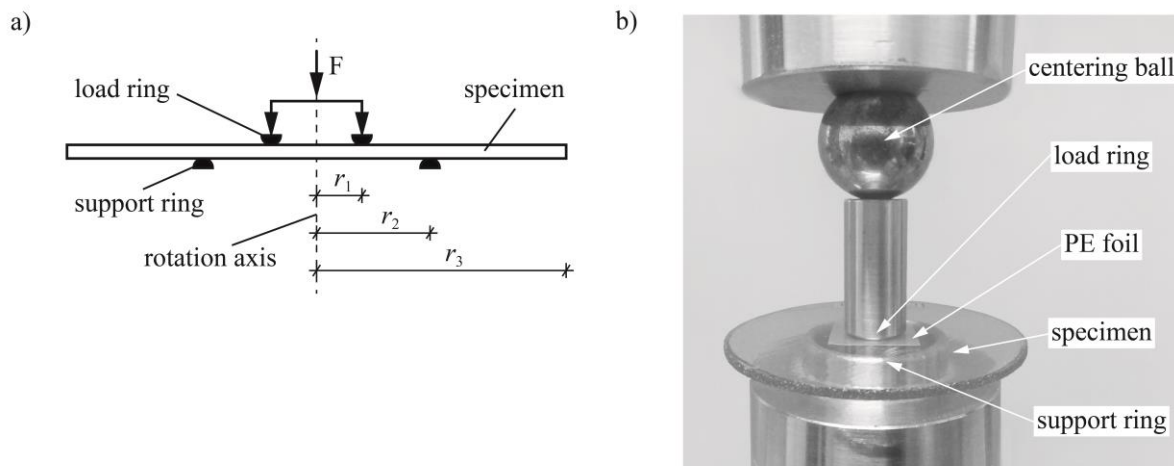


Abb. 23: Verwendeter Versuchsaufbau des Doppelring-Biegeversuchs mit $r_1 = 6 \text{ mm}$, $r_2 = 15 \text{ mm}$, $r_3 = 33 \text{ mm}$

Aufbauend auf den genannten Untersuchungen wurde festgehalten, dass die Versuche an kreisrunden Probekörpern mit einem Durchmesser von 66 mm durchgeführt und mittels Wasserstrahlschneiden hergestellt werden sollen. Ebenfalls wurde der Doppelring-Biegeversuch (Abb. 23 b)) hinsichtlich seiner Eignung genauer betrachtet. Insbesondere die Radien des Stützrings und des Lastrings wurden nochmals kritisch hinterfragt werden. Bei Tastversuchen an dem in [28] definierten Aufbau "R30" mit $r_1 = 6 \text{ mm}$, $r_2 = 30 \text{ mm}$, $r_3 = 33 \text{ mm}$ (Abb. 23 a)) brachen die Probekörper in ca 75% der Fälle vom Rand der Probe aus und waren somit ungültig. Gültig ist eine Probe dann, wenn der Bruchsprung innerhalb des Lastrings liegt (Abb. 24 rechts) Um die Effizienz zu

erhöhen wurde mittels einer FE-Simulation der Radius des Stützrings optimiert. In Abb. 24 links ist dargestellt, dass die radialen Spannungen am Rand bei der "R30" Konfiguration bei einem Lastniveau von 300 MPa bei ca. 60 MPa liegen. Dies erklärt die hohe Anzahl der Proben der Tastversuche, welche ausgehend vom Rand gebrochen sind. Durch die Optimierung des Radius des Stützrings auf $r_2 = 15$ mm konnte die Zugspannung am Rand mehr als halbiert werden.

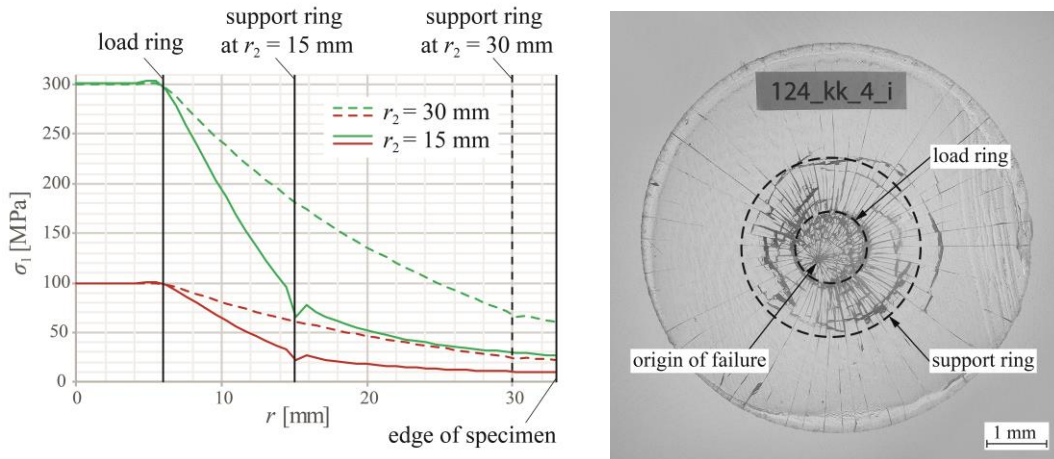


Abb. 24: links: Parameterstudie zur Optimierung des Aufbaus des Doppelring-Biegeversuchs, dargestellt sind zwei Lastniveaus bei unterschiedlicher Anordnung des Stützrings, rechts: Geprüfter und gültiger Probekörper

Mit Hilfe der in Arbeitspaket 1 durchgeführten Krümmungsanalyse konnten die Stellen für die Probeentnahmen gemäß Abb. 25 festgelegt werden und die Proben wurden mittels Wasserstahlschneiden hergestellt.

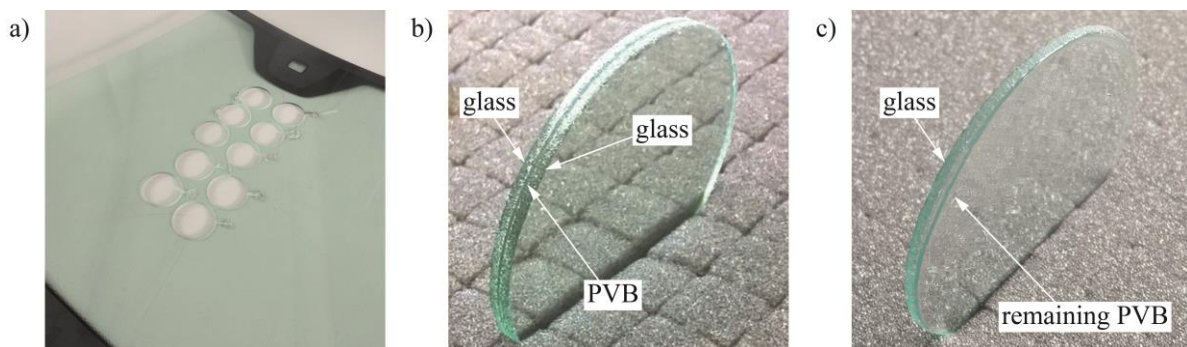


Abb. 25: a) Abscheren der Proben aus den Verbundscheiben bei 170 °C, b) zerstörende Prüfung im Doppelring Biegeversuch, c) gültige Probe nach zerstörender Prüfung mit Bruchsprung im Zentrum

Hierbei wurde die erarbeitete Arbeitsanweisung berücksichtigt. Die Einzelscheiben konnten nicht mittels Wasserstrahlschneiden geschnitten werden, da aufgrund der nicht vorhandenen PVB-Folie diese sofort beim Anschnitt zerbrachen. Aus diesem Grund wurden die Proben aus den Einzelscheiben händisch mittels Schneidrädchen geschnitten. Auch hier wurde schlussendlich für das Trennen der beiden Einzelscheiben das Abscheren durch Herabsetzen des Schubmoduls der PVB-Schicht mittels Temperaturerhöhung gewählt. Vorteile dieser Methode sind zum einen der nicht allzu hohe zeitliche Aufwand und zum anderen verbleibt auf den Probekörpern eine PVB-Schicht, sodass der Zustand der Proben auf dieser Seite nach dem Trennen der gleiche ist wie im Laminat. Beim Prüfen der Probekörper im Doppelring-Biegeversuch kann diese Schicht zudem aufgrund des sehr hohen Steifigkeitsunterschiedes bei niedrigen Dehnraten vernachlässigt werden.

Für diesen Trennvorgang wurde eine Trennvorrichtung, zunächst aus Holz, hergestellt. Anschließend wurde in einer Temperier Kammer die optimale Temperatur anhand von Tastversuchen zu 170°C festgelegt. Abb. 25 zeigt die einzelnen Schritte für das Herstellen der Probekörper aus den laminierten Windschutzscheiben.

In Abb. 26 ist die angepasste Prüfmatrix dargestellt. In einem ersten Schritt wurden zunächst ca. 450 Versuche durchgeführt. Diese Anzahl überschritt bereits die anfangs geplante Anzahl von 375 Versuchen. Für die gewünschte statistische Aussagekraft wurde aber bei der Projektbearbeitung ersichtlich, dass relativ viele Proben ungültig waren und so die Anzahl an Versuchen deutlich erhöht werden musste. In Abb. 26 ist weiterhin zu erkennen, wie viele Proben pro Position bereits geprüft wurden und wie viele davon jeweils gültig waren. Gültig ist ein Versuch dann, wenn der Bruchsprung innerhalb der vom Lastring eingeschlossenen Fläche liegt. In Abb. 24 rechts ist ein gültiger Probekörper dargestellt. Entgegen der ursprünglichen Planung, bei der pro Position insgesamt 50 bzw. 25 Proben geprüft werden sollten, wurde das Ziel definiert, dass pro Serie ca. 30 gültige Proben für die statistische Auswertung zur Verfügung stehen. Bei den in Abb. 5 dargestellten Quoten ergaben sich somit in Summe ca. 750 Proben. In Abb. 27 sind zudem die ersten Ergebnisse der zerstörenden Prüfungen statistisch mittels einer 2 Parameter Weibullverteilung ausgewertet.

Scheibentyp	Prüfposition	Siebdruck	Bezeichnung	Anzahl Versuche	Anzahl gültige Versuche	Quote gültig
Einzelscheiben	Pos. 1	nein	ES_1_OS	31	9	29,0%
	Pos. 2	ja	ES_2_MS	34	21	61,8%
		nein	ES_2_OS	50	21	42,0%
	Pos. 3	nein	ES_3_OS	60	33	55,0%
	Pos. 4	ja	ES_4_MS	26	14	53,8%
		nein	ES_4_OS	55	25	45,5%
Verbundscheiben	Pos. 1	nein	VS_1_OS	0	0	
	Pos. 2 (PVB)	ja	VS_2_MS_PVB	32	24	75,0%
		nein	VS_2_OS_PVB	66	22	33,3%
	Pos. 3 (PVB)	nein	VS_3_OS_PVB	37	22	59,5%
	Pos. 4	ja	VS_4_MS	14	10	71,4%
		nein	VS_4_OS	46	30	65,2%
Summe:				451	231	51,2%

Abb. 26: Angepasste Prüfmatrix zur Ermittlung der statistischen Bruchfestigkeit der Fläche mit Prüffortschritt

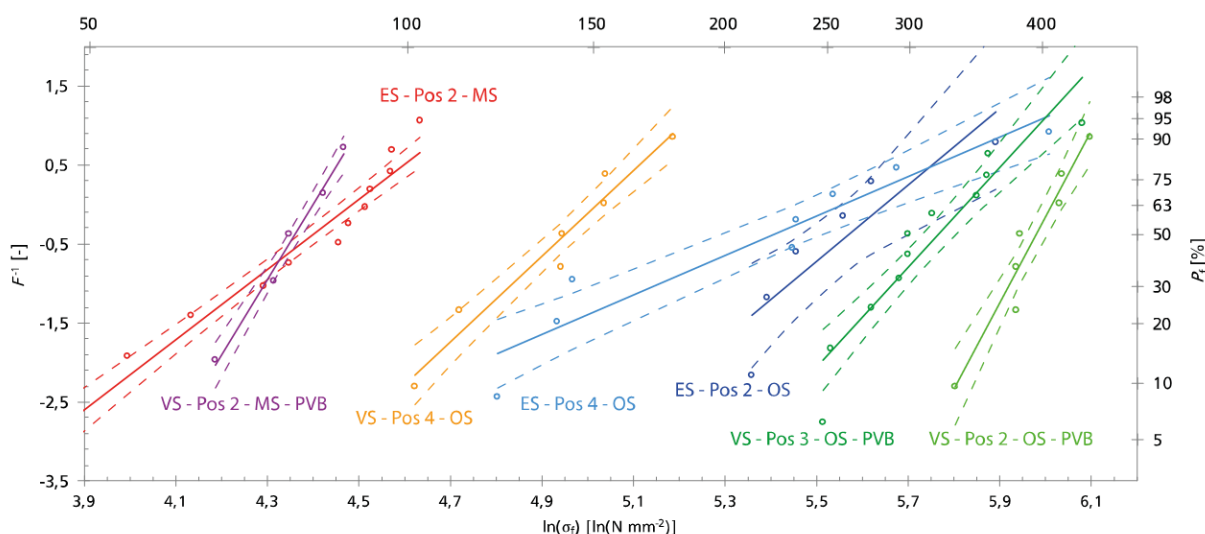


Abb. 27: Erste Auswertung mit Weibullplots der Flächenfestigkeiten für die einzelnen Positionen auf Basis erster Versuchsergebnisse (ES: Einzelscheibe, VS: Verbundscheibe, OS: Ohne Siebdruck, MS: Mit Siebdruck)

Es zeigte sich bereits, dass die PVB-Seiten der Windschutzscheiben hohe Festigkeiten aufweisen, während Bereiche ohne PVB und ohne Siebdruck mittlere Festigkeiten und Bereiche mit Siebdruck geringe Festigkeiten aufweisen. Bei der weiteren Auswertung sollten zudem die geometrischen Einflüsse infolge der Krümmung gemäß den Vorarbeiten berücksichtigt werden.

Im weiteren Projektverlauf wurde der Aufbau zum Trennen der Probekörper, die aus den Verbundscheiben gewonnen wurden, weiter optimiert, um ein möglichst sicheres und schnelles Trennen der Probekörper zu erreichen (Abb. 28). Insbesondere die ursprüngliche Klemmvorrichtung aus Holz zeigte schnell Abnutzungserscheinung, sodass die Probekörper nicht mehr sicher eingebaut werden konnten. Die Klemmvorrichtung wurde somit durch Aluminium ersetzt.

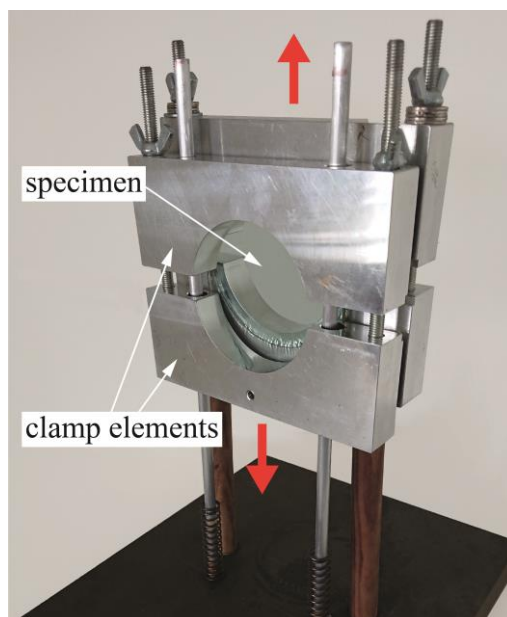


Abb. 28: Optimierter Aufbau zum Trennen der laminierten Probekörper

In Tab. 3 ist der abschließende Versuchsplan mit allen durchgeführten Versuchen dargestellt. Die angestrebte Anzahl von 30 gültigen Proben wurde bei fast allen Serien erreicht. Nur bei den Serien zur Untersuchung des Siebdrucks wurde die Anzahl unterschritten. Dies lag hauptsächlich daran, dass je Scheibe nur maximal 4 bis 5 Proben mit Siebdruck gewonnen werden konnten, ohne Siebdruck jedoch 12. Für den Siebdruckbereich ergeben sich bei der Auswertung aber nur geringe Streuungen der Bruchspannungen, sodass auch mit der geringeren Anzahl an gültigen Proben die Verteilungsfunktion sehr gut angepasst werden konnte.

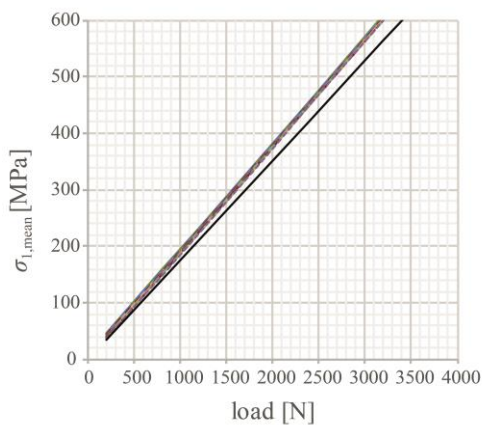
Weiterhin wurde für die Auswertung der Bruchspannung ein Korrekturfaktor bestimmt, der die Krümmung der Probe berücksichtigt (Abb. 29). Die analytische Lösung der Hauptspannungen für den Doppelring-Biegeversuch ist nur für den linearen Bereich gültig. Durch die Krümmung ergeben sich jedoch leicht nicht-lineare Effekte, die über den Korrekturfaktor berücksichtigt werden können. Der Faktor wurde für jede Probenentnahmestelle (unterschiedliche Krümmungen) und unterschiedliche Prüflasten bestimmt, sodass für jede Versagenslast die korrigierte Bruchspannung interpoliert werden konnte. Die Bestimmung der Korrekturfaktoren erfolgte über die Finite Elemente Methode mit Hilfe des Programms ANSYS.

Zudem wurden die Spannungsunterschiede für die erste Hauptspannung an der Probenunterseite innerhalb des Lastrings genauer verifiziert (Abb. 30). So konnte für jeden gültigen Versuch neben der korrigierten Bruchspannung ein Wert für die Spannungsunterschiede innerhalb der Referenzfläche angegeben werden.

Tab. 3: Übersicht der zerstörenden Prüfungen für die Flächenfestigkeit nach Abschluss der Arbeiten

Scheibentyp	Prüfposition	Siebdruck	Bezeichnung	Anzahl Versuche (Summe: 750)	Anzahl gültige Versuche (Summe 341)
Einzelscheiben	Pos. 1	nein	ES_1_OS	70	31
	Pos. 2	ja	ES_2_MS	50	25
		nein	ES_2_OS	83	30
	Pos. 3	nein	ES_3_OS	63	35
	Pos. 4	ja	ES_4_MS	43	23
		nein	ES_4_OS	65	27
Verbundscheiben	Pos. 1	nein	VS_1_OS	56	32
	Pos. 2 (PVB)	ja	VS_2_MS_PVB	54	29
		nein	VS_2_OS_PVB	92	28
	Pos. 3 (PVB)	nein	VS_3_OS_PVB	85	33
	Pos. 4	ja	VS_4_MS	34	19
		nein	VS_4_OS	55	29

a) convex test setup (pos. 2 & 4)



b) concave test setup (pos. 1 & 3)

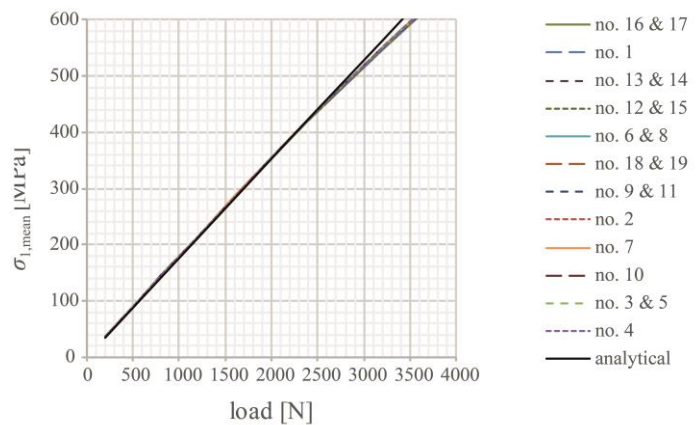
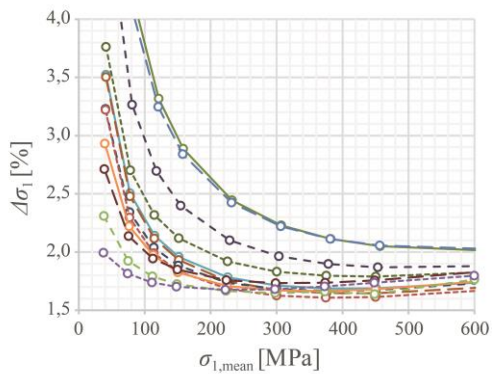


Abb. 29: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung nichtlinearer Effekte für die einzelnen Probenentnahmestellen

a) convex test setup (pos. 2 & 4)



b) concave test setup (pos. 1 & 3)

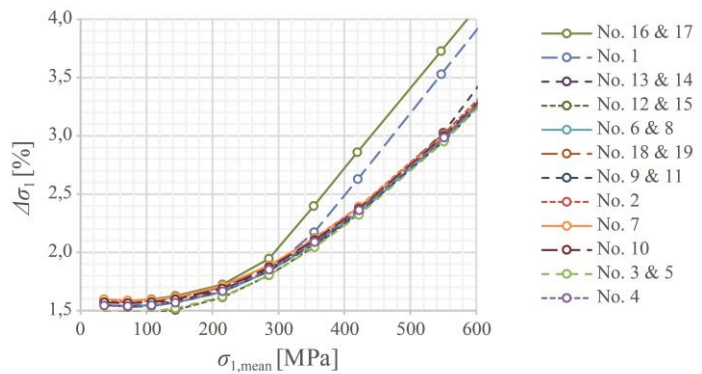


Abb. 30: Überprüfung der homogenen Spannungsverteilung innerhalb des Lastringbereichs für die einzelnen Probenentnahmestellen, dargestellt ist die Differenz der ersten Hauptspannung in Abhängigkeit der mittleren ersten Hauptspannung innerhalb des Lastring

In Abb. 31 sind die Ergebnisse der Untersuchungen für die Flächenfestigkeit dargestellt. Die statistische Anpassung erfolgte über die zwei-parametrische Weibullverteilung. Für jede Position der Windschutzscheibe (Einzelscheiben und Verbundscheiben) ist die Funktion im Weibullnetz zusammen mit den Weibull-Parametern sowie der Streuung der ersten Hauptspannung für jeden Versuchswert dargestellt. Zudem sind in Abb. 32 die Ergebnisse der Verbundscheiben den Einzelscheiben für jede Position der Windschutzscheibe gegenübergestellt.

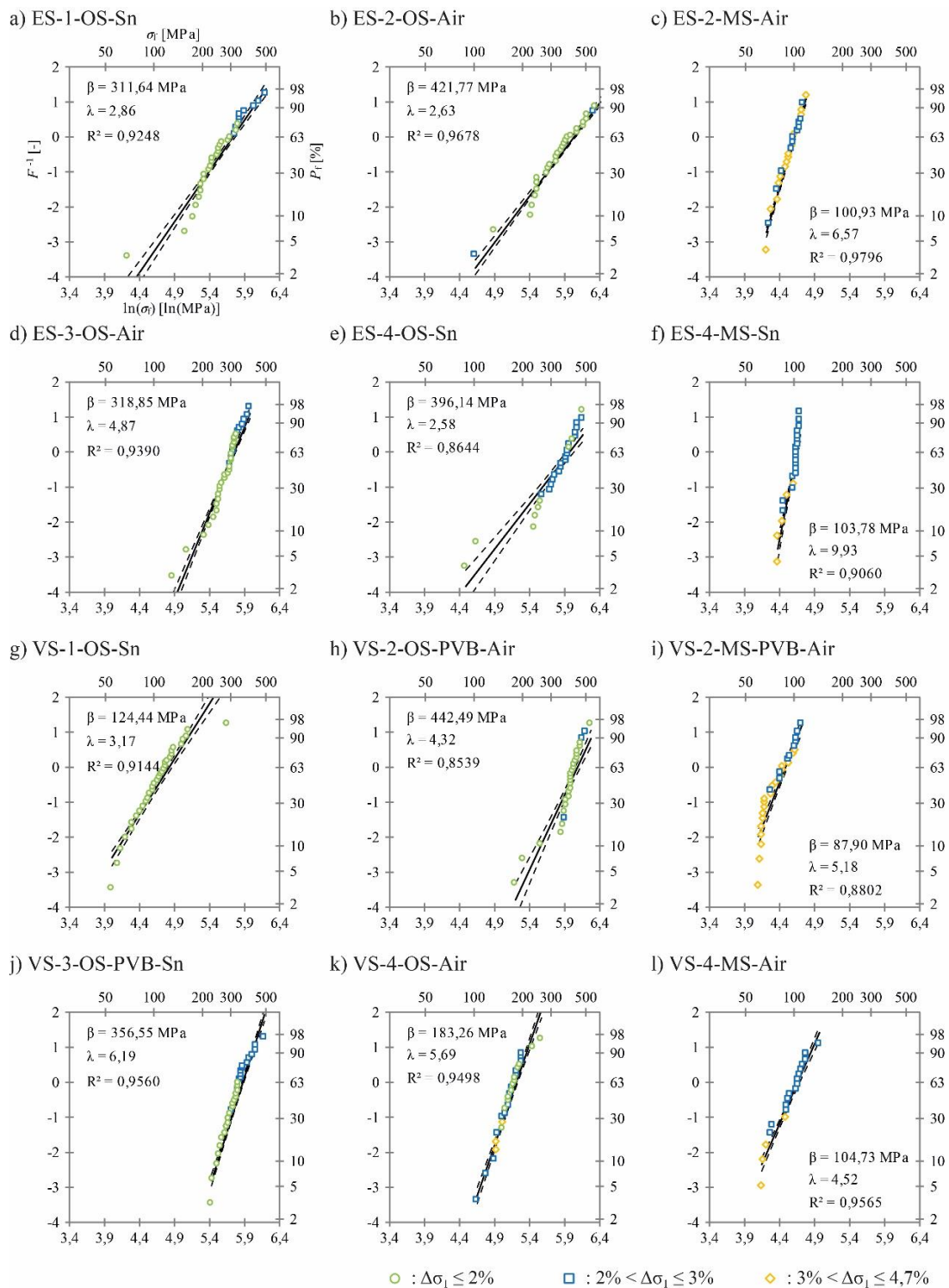


Abb. 31: Statistische Auswertung der Flächenfestigkeiten für die einzelnen Positionen mittels 2-parametrischer Weibullverteilung mit Angabe der Hauptspannungsunterschiede innerhalb des Lastrings für jeden Versuch

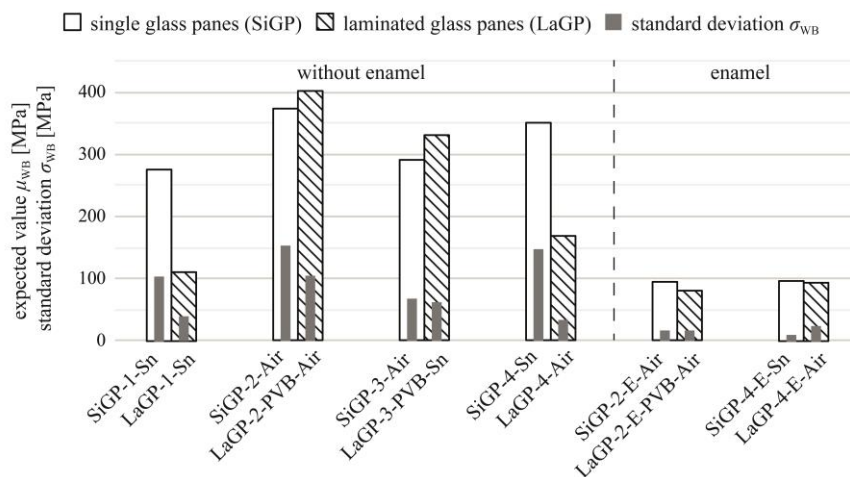


Abb. 32: Gegenüberstellung der Ergebnisse der zerstörenden Prüfungen der Flächenfestigkeit für die einzelnen Positionen der Windschutzscheibe

Das Ziel des Arbeitspaketes wurde erreicht. Es wurden zudem mehr Versuche durchgeführt als ursprünglich vorgesehen. Dies war erforderlich, um die benötigte statistische Aussagekraft sicher zu stellen. Es kann festgehalten werden, dass beim Siebdruckbereich keine deutlichen Unterschiede zwischen Einzelschieben und Verbundscheiben zu erkennen sind. Weiterhin liegen bei den Einzelscheiben die Festigkeiten der konkaven Seite über denen der konvexen Seite, wobei die Streuung höher ist. Die Positionen 1 und 4 weisen nach dem Laminieren geringere Festigkeiten mit geringerer Streuung auf und die Positionen 2 und 3 weisen nach dem Laminieren mit verbleibender PVB-Schicht höhere Festigkeiten mit geringerer Streuung auf. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in [30] veröffentlicht.

2.4 AP3 - Untersuchungen Kante

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 2, Technische Universität Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion bearbeitet.

2.4.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Die Biegefestigkeit an den Kanten von Automobilverglasungen sollte durch 4-Punkt-Biegeversuche (Abb. 33) untersucht werden. Die Versuche sollten an fabrikneuen Einzelscheiben vor Laminierung erfolgen.

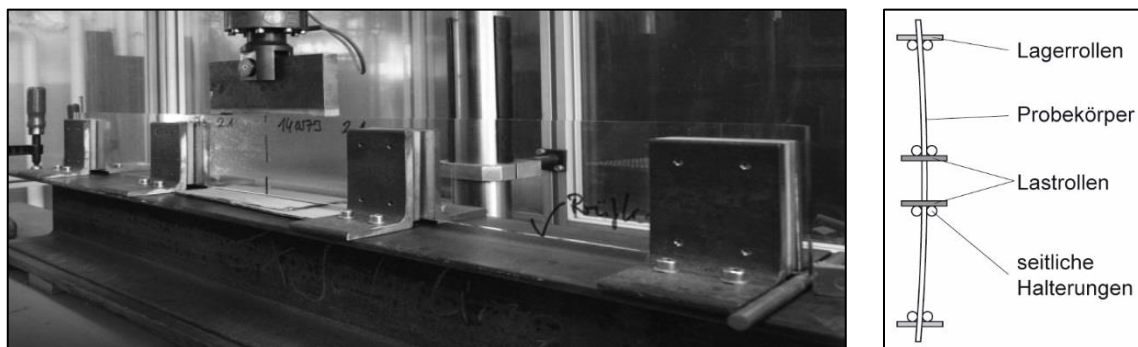


Abb. 33: Prüfstand 4-Punkt-Biegeversuch hochkant, links: Versuchsaufbau, rechts: Draufsicht

Die Probekörper sollten hochkant getestet werden, sodass die Kante zwischen den Lastrollen mit einer annähernd gleichmäßigen Zugspannung belastet wird. Die Abmessungen der Probekörper sollten so gewählt werden, dass der Krümmungsradius und die hierdurch entstehenden Torsionsmomente eine untergeordnete Rolle spielen. Ebenfalls muss die Versuchseinrichtung so gewählt werden, dass diese an den gekrümmten Verlauf der Kante angepasst werden kann.

Tab. 4: Zu Projektbeginn geplante Prüfmatrix der Festigkeitsuntersuchungen an Windschutzscheiben als Einzelscheiben (Kante)

	bedruckt	unbedruckt
Anzahl Scheiben	15	15
Probekörper je Scheibe	5	5
Summe	75	75

Auch hier sollten mittels bruchmechanischer Ansätze zum einen die so gewonnenen statistischen Festigkeiten auf dynamische Festigkeiten extrapoliert und zum anderen der Größeneinfluss abgeschätzt werden. Die Ergebnisse sollten anschließend durch Bauteilversuche an der THM im AP7 validiert werden.

MS 3: Kantenfestigkeiten sind untersucht und ausgewertet

2.4.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel dieses Arbeitspaketes war es die statistische Grundlage für die Verteilungsfunktionen der Kantenfestigkeit zu erarbeiten. Diese Verteilungsfunktion bildet zusammen mit denjenigen für die Flächenfestigkeit die Grundlage für die späteren stochastischen FE-Simulationen des Kopfaufpralls.

Wie für die Flächenfestigkeit wurde in diesem Arbeitspaket zunächst erarbeitet, welche unterschiedlichen Kanten zu untersuchen sind. Schlussendlich wurde hier festgelegt, dass sowohl die innere Scheibe als auch die äußere Scheibe bezüglich der Kantenfestigkeit untersucht werden muss. Zudem wurde zunächst davon ausgegangen, dass beide Scheiben ein ähnliches Bedruckungsbild aufweisen, und dieses umlaufend bis zur Kante hingeführt ist. Somit wurde zu Projektbeginn davon ausgegangen, dass in diesem Fall nicht weiter unterschieden werden muss und sich insgesamt $2 \times 75 = 150$ Probekörper ergeben. Auch hier sollten zu Projektbeginn je Serie 25 Proben aus Einzelscheiben und 50 Proben aus Verbundscheiben gewonnen werden.

Für die Bestimmung der Festigkeit sollten die Probekörper hochkant in einem Vierpunktbiegeversuch geprüft werden (Abb. 34 links). Auch hier gilt, wie bereits für die Flächenfestigkeit beschrieben, dass ein bestimmter Bereich der Kante mit einer homogenen Zugbeanspruchung belastet wird. Mittels FE-Simulationen wurde der Einfluss der Krümmung untersucht (Abb. 34 rechts) und es wurden zunächst Tastversuche an mittels Schneidrädchen zugeschnittenen Proben, die den Windschutzscheiben aus dem Vorgängerprojekt entnommen wurden, durchgeführt.

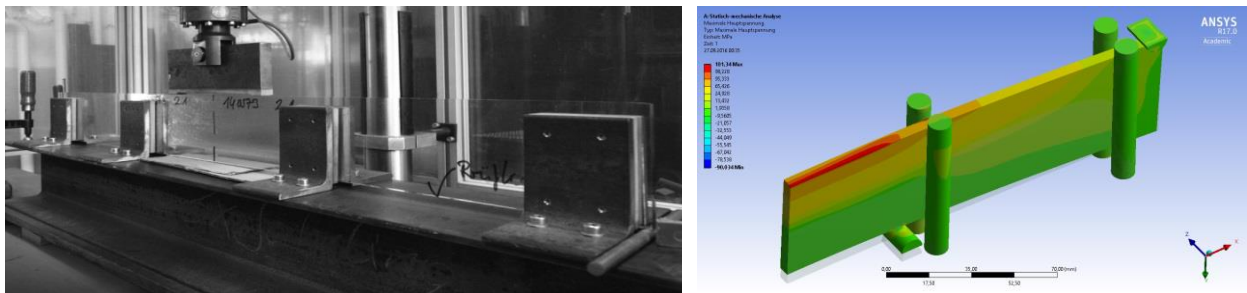


Abb. 34: Beispielhafter Versuchsaufbau zur Bestimmung der Kantenfestigkeit (links) und Untersuchung der sich einstellenden Spannungsverteilung mittel der FEM

Aufbauend auf den genannten Untersuchungen wurde festgelegt, dass die Versuche an rechteckigen Probekörpern mit den Abmessungen 130 mm x 15 mm durchgeführt und wie bereits beschrieben mittels Wasserstrahlschneiden hergestellt werden sollten. Der Aufbau des gewählten Vierpunktbiegeversuchs mit eingebautem Probekörper ist in Abb. 35 links dargestellt. Der Abstand der Lagerrollen wurde zu 124 mm und der Abstand der Lastrollen zu 30 mm festgelegt. Um ein Kippen der Probekörper beim Versuch zu verhindern wurden mit Teflon beschichtete seitliche Halterungen angeordnet.

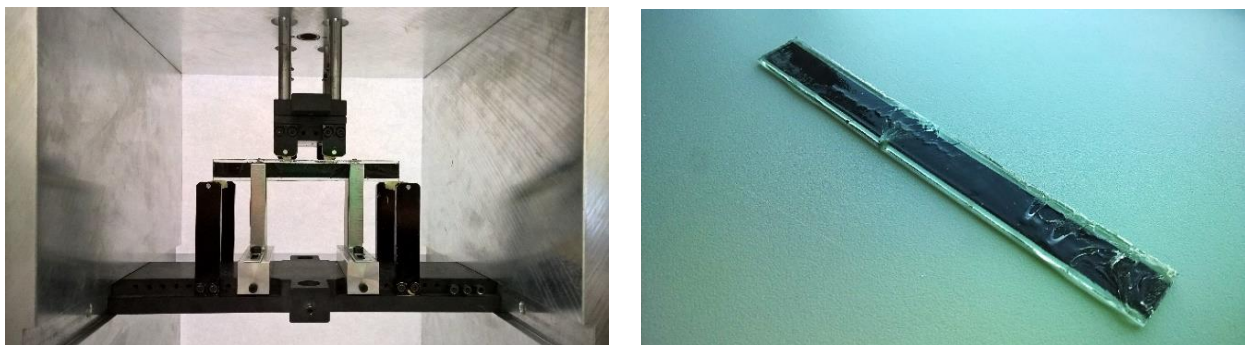


Abb. 35: links: Verwendeter Aufbau des Vierpunktbiegeversuch hochkant, rechts: Probekörper nach Prüfung mit leicht nach links versetztem Bruchsprung

Durch den gewählten Aufbau, in Kombination mit der Auswahl geeigneter Probeentnahmestellen, konnte gewährleistet werden, dass sich eine konstante Zugspannung an der Unterkante des Probekörpers zwischen den Lastrollen einstellt. Die Probenentnahmestellen wurden mit Hilfe der in Arbeitspaket 1 durchgeführten Krümmungsanalyse festgelegt und sind in Abb. 36 dargestellt. Die Krümmung der Probekörper musste so in diesem Arbeitspaket nicht bei der weiteren Auswertung berücksichtigt werden.

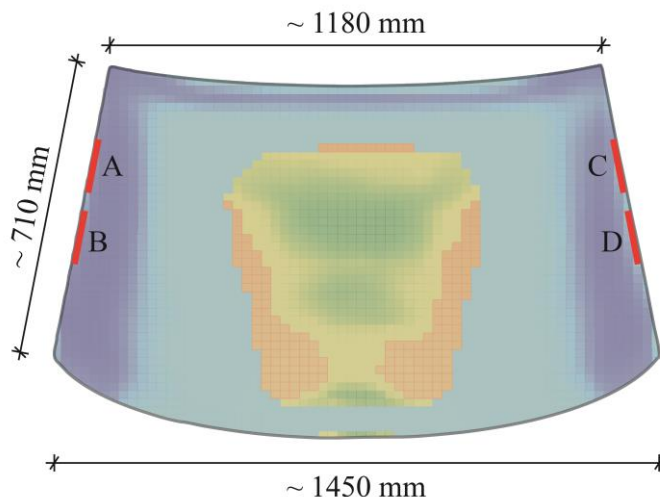


Abb. 36: Entnahmestellen A-D für die Proben der zerstörenden Prüfung der Kantenfestigkeit

Analog zu den Probekörpern zur Ermittlung der Flächenfestigkeit wurde das Prüfen von laminierten Probekörpern als nicht zielführend erachtet. Dementsprechend wurden alle Probekörper, die aus laminierten Windschutzscheiben gewonnen wurden, ebenfalls mit dem in Arbeitspaket 2 beschriebenen Trennverfahren getrennt. Die in Abb. 28 dargestellte Trennvorrichtung wurde dementsprechend so konzipiert, dass neben den runden Probekörpern auch die rechteckigen Probekörper für die Ermittlung der Kantenfestigkeit eingebaut und bei 170°C abgeschert werden konnten. Auch hier verblieb auf den Probekörpern eine PVB-Schicht (Abb. 35 rechts). Diese kann aber, analog zu den runden Proben für die Flächenfestigkeit, bei der Ermittlung der Bruchspannung vernachlässigt werden.

Neben den Verbundscheiben sollten auch Probekörper aus Einzelscheiben geprüft werden. Auch hier konnten die Probekörper nicht mittels Wasserstrahlschneiden gewonnen werden, sodass diese händisch mittels Schneidrädchen aus den ganzen Einzelscheiben hergestellt werden mussten. Die in Arbeitspaket 1 festgestellten Eigenspannungen an der Kante erschwerten jedoch den Zuschnitt der Probekörper erheblich, sodass ein erfolgreicher Zuschnitt nur bei ca. jeder dritten Entnahmestelle erfolgreich war.

Im weiteren Projektverlauf wurde analog zu den Versuchen für die Flächenfestigkeit festgelegt, dass auch hier für die statistische Beschreibung der Festigkeiten ca. 30 gültige Proben je Position vorhanden sein sollten. Eine Probe ist dann gültig, sobald der Bruchsprung zwischen den Lastschneiden liegt (Abb. 35). In Abb. 37 ist die angepasste Prüfmatrix zur Ermittlung der Kantenfestigkeiten dargestellt. Bis zu dem dargestellten Projektstand wurden knapp 50 Proben aus Verbundscheiben geprüft. Unter Berücksichtigung der dargestellten Quoten der gültigen Proben wurde ersichtlich, dass ca. 200 statt der ursprünglich geplanten 150 Versuche nötig sind, damit die Vorgabe von ca. 30 gültigen Proben erfüllt werden kann.

Scheibentyp	Prüfposition	Bezeichnung	Anzahl Versuche	Anzahl gültige Versuche	Quote gültig
Einzelscheiben	Außenscheiben	ES_a	0	0	
	Innenscheiben	ES_i	0	0	
Verbundscheiben	Außenscheiben	VS_a	24	16	66,7%
	Innenscheiben	VS_i	25	13	52,0%
Summe:			49	29	59,2%

Abb. 37: Angepasste Prüfmatrix zur Ermittlung der statistischen Bruchfestigkeit der Kante mit Prüffortschritt

Aufgrund der beschriebenen problematischen Probekörpergewinnung bei den Einzelscheiben konnten schlussendlich jedoch nur ca. die Hälfte der gewünschten 30 gültigen Versuche für die Einzelscheiben erreicht werden. Da die Ergebnisse eine geringe Streuung aufwiesen wurde die geringere Anzahl an gültigen Versuchen jedoch als ausreichend erachtet.

In Tab. 5 sind die endgültigen Versuchsserien für die Kantenfestigkeit dargestellt. In Summe wurden 130 Prüfungen durchgeführt. Die statistische Auswertung erfolgte mittels der zwei-parametrischen Weibullfunktion. Zudem wurde bei der rechnerischen Ermittlung der Bruchspannung der tatsächliche Ort (Höhenkoordinate) des Bruchsprungs und die genaue Querschnittsgeometrie (C-Schliff an der zu prüfenden Kante) berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abb. 38 Form der Verteilungsfunktionen im Weibullnetz mit Angabe der Weibullparameter dargestellt. In Abb. 39 sind zudem die Ergebnisse der Verbundscheiben denen der Einzelscheiben gegenübergestellt.

Tab. 5: Übersicht der zerstörenden Prüfungen für die Kantenfestigkeit

Scheibentyp	Prüfposition	Bezeichnung	Anzahl Versuche (Summe: 130)	Anzahl gültige Versuche (Summe 93)
Einzelscheiben	Außenscheibe	ES_a	19	16
	Innenscheibe	ES_i	20	15
Verbundscheiben	Außenscheibe	VS_a	39	30
	Innenscheibe	VS_i	52	32

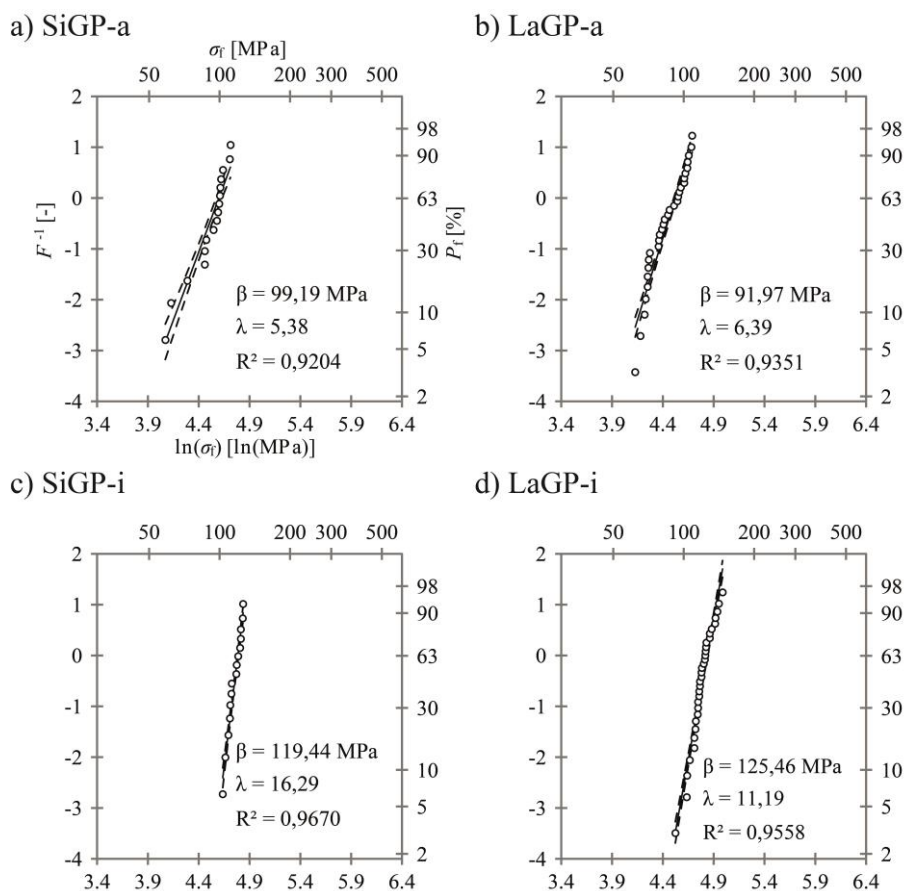


Abb. 38: Statistische Auswertung der Kantenfestigkeiten für die einzelnen Positionen mittels 2-parametrischer Weibullverteilung

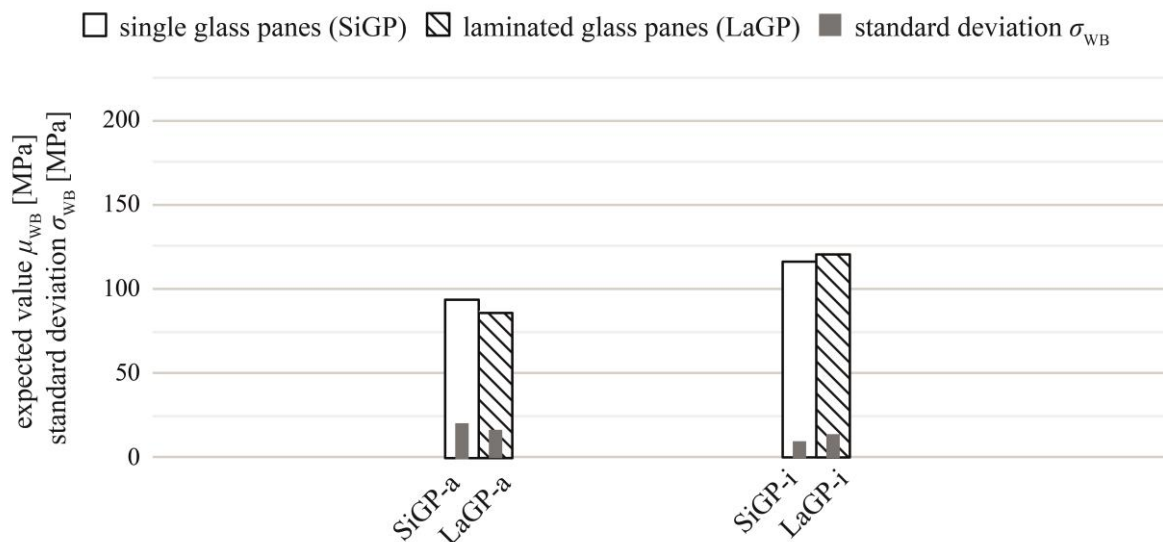


Abb. 39: Gegenüberstellung der Ergebnisse der zerstörenden Prüfungen der Kantenfestigkeit für die unterschiedlichen Scheiben der Windschutzscheibe, a: Außenscheibe, i: Innenscheibe

Auffällig bei den Probekörpern ist, dass entgegen der Annahme zu Projektbeginn, bei den Innenscheiben der Siebdruck nicht ganz bis zum Rand der C-Kante geht, während er bei den Außenscheiben stets bis zum Rand geführt ist (Abb. 41). In Abb. 40 sind die festgestellten Orte der Bruchursprünge für die einzelnen Serien dargestellt. Es ist offensichtlich, dass bei den Außenscheiben der Bruchursprung hauptsächlich von der emaillierten Seite aus geht. Somit beeinflusst der Siebdruckbereich die Kantenfestigkeit, bzw. im Fall der Außenscheiben wird nicht die Festigkeit der Kante, sondern die Festigkeit des Siebdrucks geprüft. Die Festigkeiten der Kante der Außenscheibe stimmen zudem sehr gut mit denen der Prüfungen der Flächenfestigkeit mit Siebdruck überein. Dies spricht ebenfalls dafür, dass bei den Außenscheiben die Siebdruckfestigkeit die Kantenfestigkeit überlagert.

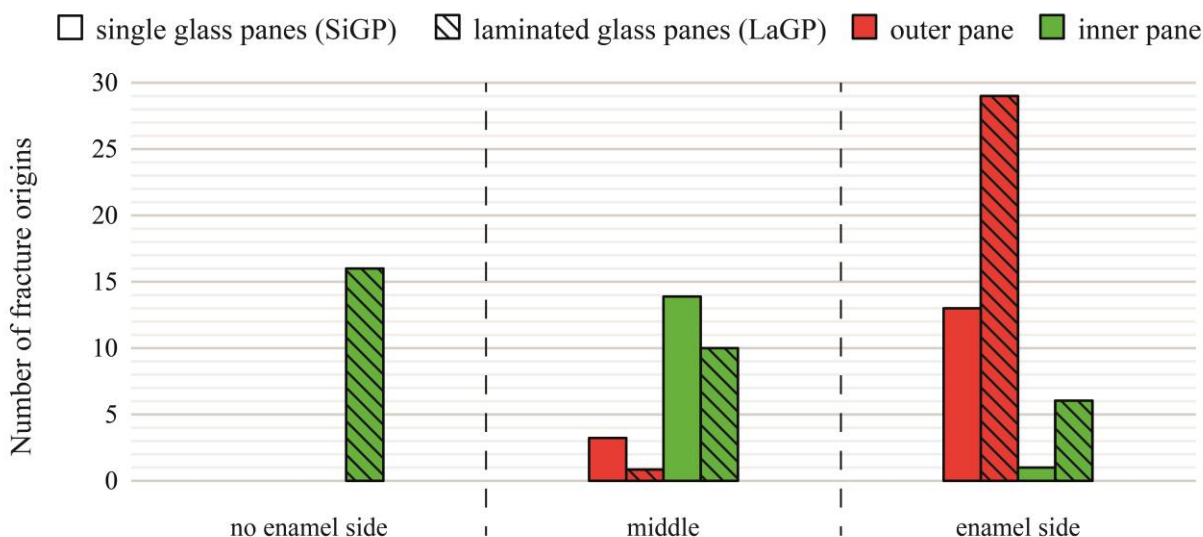


Abb. 40: Gegenüberstellung der Orte der Bruchursprünge an der Kante, die Außenscheiben brechen vornehmlich an der Seite mit Siebdruck



Abb. 41: links: Siebdruck an der Kante, rechts: Versuchsaufbau zur Prüfung der Kantenfestigkeit (Probekörper aus einer Innenscheibe)

Das Ziel des Arbeitspaketes wurde erreicht. Es wurden zudem mehr Versuche durchgeführt als ursprünglich vorgesehen. Dies war erforderlich, um die benötigte statistische Aussagekraft sicher zu stellen. Es kann festgehalten werden, dass die Kantenfestigkeit zwischen laminierte Scheibe und Einzelscheibe nahezu gleich ist. Die Unterschiede zwischen innerer und äußerer Scheibe können durch den Siebdruckbereich erklärt werden, da dieser bei der Außenscheibe bis zum Rand der Kante geführt ist und so die Kantenfestigkeit des C-Schliffes überlagert. Folglich können alle Werte der Bruchspannung deren Bruchursprung direkt an der C-Kante zu verorten sind und zudem nicht am Siebdruck liegen gemeinsam ausgewertet werden. Als Eingangsparameter für die Berechnungsmethodik ist somit für die C-Schliff-Bereiche der Windschutzscheibe eine Verteilungsfunktion gültig. Diese ist in Abb. 42 gegeben.

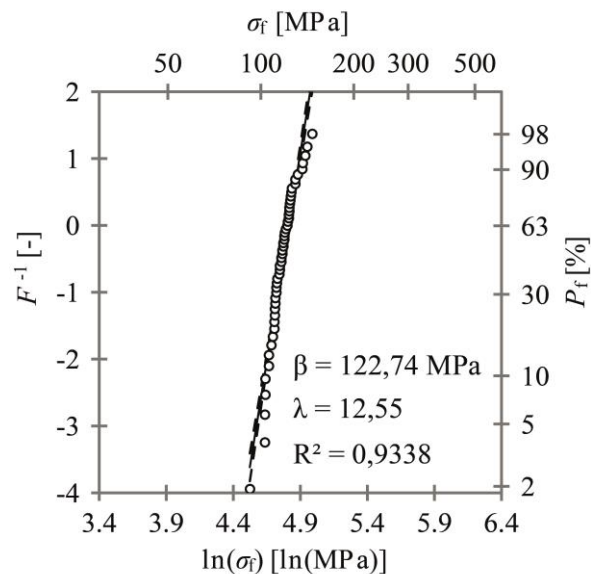


Abb. 42: Statistische Auswertung der Kantenfestigkeiten mittels 2-parametrischer Weibullverteilung, die Auswertung beinhaltet alle Proben, die im Bereich des C-Schliffes und nicht am Siebdruck gebrochen sind

2.5 AP 4 - Bruchursprungsanalyse der Flächen und Kantenfestigkeit aus AP 2 und AP 3

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 1, Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Mechanik und Materialforschung bearbeitet.

2.5.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Ziel des Arbeitspaketes 4 ist die Überprüfung der Bruchsprünge aus Arbeitspaket 2 (Flächenfestigkeit) und Arbeitspaket 3 (Kantenfestigkeit). Im Fokus liegen die Identifizierung und Klassifikation der Ursache des Versagens des Materials. Die Ursache für das Versagen von Glas sind Mikrodefekte die durch Lufteinschlüsse, Kantenbearbeitung o.Ä. induziert werden. Von besonderer Bedeutung sind Geometrien der Risse, die zu Extremwerten in der Festigkeitsverteilung führen. Als Ursachen dieser Risse ist beispielsweise eine Stoßbelastung bei dem Transport der Windschutzscheiben möglich. Da ausschließlich die unterschiedlichen Festigkeiten der Windschutzscheibe aufgrund der Fertigungsverfahren ermittelt werden sollen, müssen Defekte die während der Probenfertigung entstanden sind ebenfalls identifiziert und ausgeschlossen werden.

Es wurden folgende Meilensteine definiert:

- MS 4.1.: Bruchsprungsanalysen Flächenfestigkeit aus AP2 sind durchgeführt.
- MS 4.2.: Bruchsprungsanalysen Kantenfestigkeit aus AP3 sind durchgeführt.

2.5.2 Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Die für Arbeitspaket 4 gesteckten Ziele wurden vollends erreicht. Die Bruchsprungsanalyse für Proben der Flächen- und Kantenfestigkeit konnten durchgeführt werden. Hierbei wurden Erkenntnisse gewonnen, die zur weiteren Bearbeitung des Projektes, besonders im Bereich der Kantenfestigkeit, von grundlegender Bedeutung sind.

Im Bereich Flächenfestigkeit wurden alle zunächst als gültig markierten Proben auf Versagen innerhalb des Lastringes untersucht. Insgesamt mussten 37 von 381 Proben nachträglich als ungültig markiert werden, da der Bruchsprung auf dem Lastring zu verorten ist. Dies ist erst durch Aufnahmen am Lichtmikroskop ersichtlich geworden. Drei weitere Proben konnten aufgrund der Art ihrer Schädigung ausgeschlossen werden, da diese nicht auf die Produktion des Glases, sondern auf die Probengewinnung zurückzuführen sind. Die ermittelten Bruchsprünge wurden aufgrund ihrer Geometrie klassifiziert. Dabei zeigte sich wie erwartet ein deutlicher Einfluss des Siebdruckes und der Produktion zwischen Einzel- und Verbundscheiben auf der Form des initialen Risses im Glas.

Im Teilpaket zu Kantenfestigkeit wurde festgestellt, dass die verwendeten Proben nicht an der Seite der maximalen Zugspannung versagten, sondern dass dies durch den Einfluss der Bedruckung variiert. Zu Beginn des Projektes wurde davon ausgegangen, dass die Bedruckung nicht bis in den Bereich der geschliffenen Kante ragt. Eine genaue Trennung zwischen Versagen durch Indizierung initialer Risse durch den Schleifprozess oder der Bedruckung ist nicht möglich. Für abschließende stochastische Simulationen sind diese trotzdem verwendbar, da die Festigkeit von Innen- und Außenscheibe getrennt untersucht wurde und den Festigkeitsbedingungen unter realen Bedingungen der verwendeten Audi A3 Windschutzscheiben entsprechen.

2.5.2.1 Bruchsprungsanalyse Flächenfestigkeit

Zur Analyse der Bruchsprungsanalyse der Flächenfestigkeit werden die Proben aus AP 2 zunächst auf ihre Gültigkeit untersucht. Ein Doppelring-Biegeversuch ist als gültig anzusehen, wenn die Probe innerhalb des Lastringes initial versagt [28]. Besonders bei höheren Spannungen liegt eine Bruchenergie vor, welche die Proben stark fragmentiert. Bei diesen Proben ist für eine genaue Bruchsprungsanalyse eine übliche visuelle Begutachtung nicht ausreichend [12]. Abhilfe schafft ein Übersichtsbild des Lastringes mittels Lichtmikroskop. Zwei Aufnahmen des Bruchsprungs der Doppelring-Biegeproben sind in Abb. 44 dargestellt. Insgesamt mussten aufgrund des Versagens am Lastring 37 Proben, welche zunächst als gültig angenommen wurden, als ungültig markiert werden.

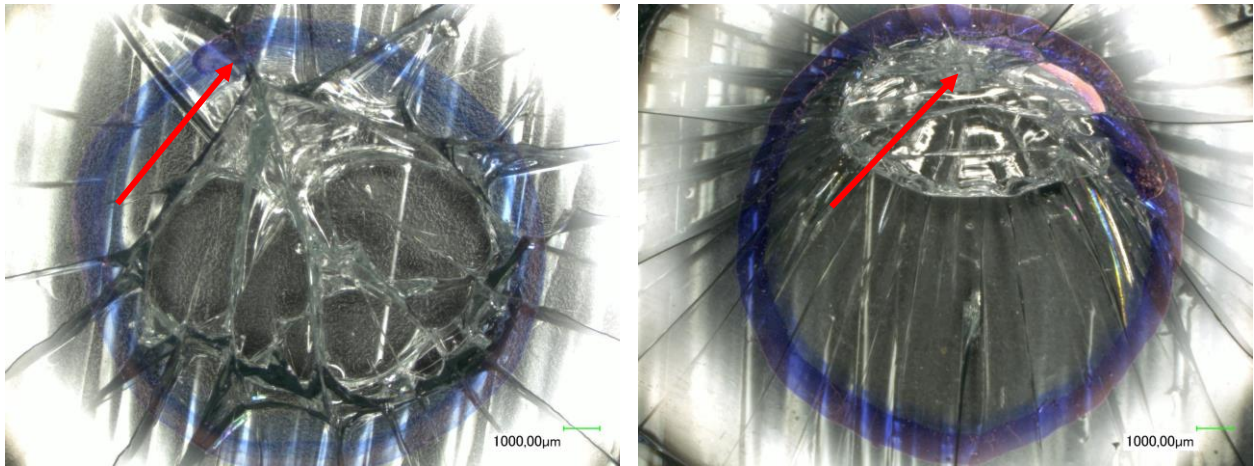


Abb. 43: Übersicht über den Bruchbereich von Doppelring-Biegeversuch Proben. Abgebildet ist die Markierung des Lastringes in blau). Im linken Abb. entstand das initiale Versagen auf dem Lastring, womit die Probe als ungültig zu sehen ist. Rechts ist eine gültige Probe mit initialem Versagen innerhalb des Lastringes abgebildet.

Die Hauptaufgabe dieses Arbeitspaketes ist die Ermittlung der Art des Bruchsprungs und Identifizierung von Ausreißern. Als Ausreißer sind Defekte zu verstehen, die nach der Entfernung der Glasscheiben aus der Produktion entstanden sind. Diese Werte müssen aus der Festigkeitsverteilung der Windschutzscheiben extrahiert werden, um die tatsächliche Festigkeitsverteilung der Windschutzscheiben nach der Produktion zu erhalten, da diese sonst als Grundlage für stochastische Simulationen ein realitätsnahes Ergebnis verzerren würden.

Der Bruchsprung ist entweder auf der Oberfläche oder im Volumen des Glases zu finden. Während Volumendefekte durch heutige Qualitätskontrollen in der Produktion nur eine untergeordnete Rolle darstellen, unterscheidet sich die Art und Geometrie der Oberflächendefekte je nach Art der ihnen zugrunde liegenden Belastung. Diese entstehen hauptsächlich durch das Handling und das Bearbeiten der Windschutzscheiben. Einflüsse wie u.a. der Transport auf Rollen, das Biegen der Scheiben sowie die Laminierung erzeugen und vergrößern mikroskopische Risse, die charakteristische Formen aufweisen. Eine Übersicht häufiger Geometrien der Risse ist in Abb. 49 dargestellt. Um eine Klassifikation der Bruchsprünge aus den Proben dieses Projektes vornehmen zu können, wird im weiteren Verlauf eine kurze Übersicht der Geometrien initialer Risse gegeben.

Längliche parallele Risse, welche häufig mit einem oder mehreren Mikrorissen auftreten, entstehen durch Schleif- und Schneidprozesse. In Bezug auf Windschutzscheiben treten diese ebenfalls im bedruckten Bereich auf. Der Prozess zum Aufbringen der keramischen Siebdruckfarbe induziert Mikrorisse durch den Druck der kristallinen Partikel innerhalb der Farbe auf das Glas.

Durch beispielsweise dem Schleifen von Kanten oder das „Reiben“ der Glasoberfläche über eine zweite Oberfläche entstehen Reißverschluss-Risse. Bei diesen Rissystemen handelt es sich um mehrere halb-elliptischen Risse, welche sich zu einem System verbunden haben. Ebenfalls durch den Schleifprozess entstehen sogenannte „V-machining-cracks“.

In Abb. 45 ist eine kreisrunde Abplatzung als stumpfer Kontaktschaden dargestellt. Dieser tritt häufig durch Handling und Transport des Glases auf. Oftmals sind aus dem Ursprung in die Bruchoberfläche übergehende Mikrorisse erkennbar.

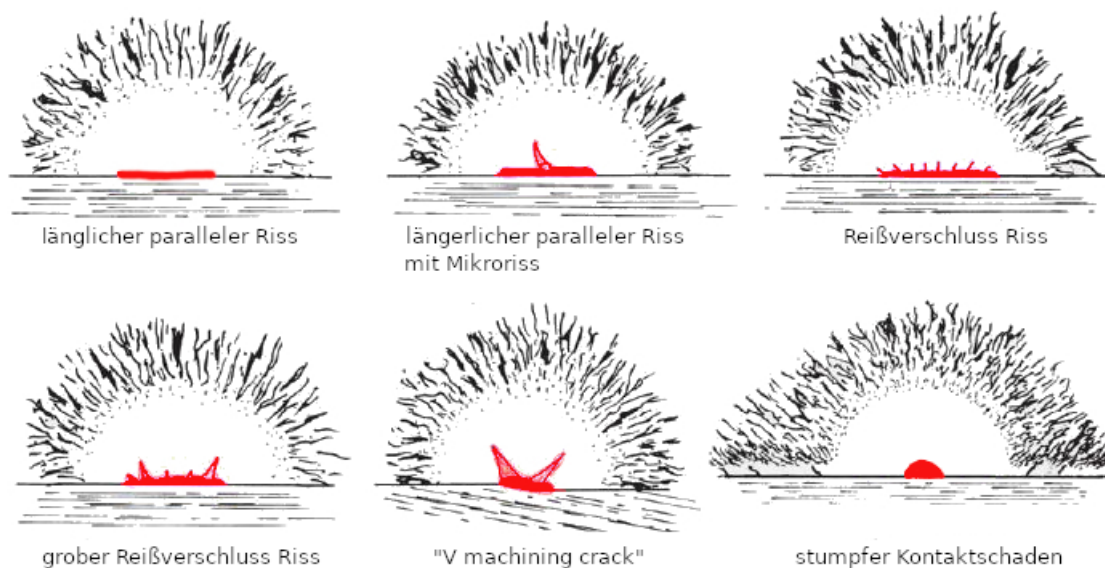


Abb. 44: Auswahl verschiedener Geometrien initialer Risse, die während der Handhabung und des Schleifens von Glas entstehen können. Abb. nach [12]

Nachfolgend werden die am Bruchsprung identifizierten Geometrien der initialen Schädigungen folgenden Abkürzungen verwendet:

- lpR: länglicher paralleler Riss
- lpRM: länglicher paralleler Riss mit Mikrodefekt
- RR: Reißverschluss Riss
- gRR: grober Reißverschluss Riss
- sKS: stumpfer Kontaktschaden
- besch.: beschädigt, unkenntlich oder nicht entdeckt

In Tab. 6 sind die klassifizierte Bruchsprünge der Einzelscheiben dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass überwiegend zum Bruchsprung parallel verlaufende Risse vorhanden sind. Diese werden im Bereich des Siebdrucks häufig von Mikrodefekten begleitet, was sich durch das Aufbringen der Siebdruckfarbe mit kristallinen Partikeln erklären lässt.

Während des Floatprozesses der Einzelscheiben hatte Seite 1 und Seite 4 Kontakt zum flüssigen Zinn. Dies ist nicht allgemein gültig. Die Zinn Seite lässt sich durch UV-Licht bestimmen, durch welches diese milchig wirkt. Die Seite hat allgemein eine niedrigere Festigkeit durch ihren Kontakt zu den Transportrollen. Im dem vorliegenden Projekt ist bei der gegebenen Stichprobe keine eindeutige Unterscheidung nach Luft- und Zinnseite nach Klassifikation des Bruchsprunges zu machen. Weiter ist zu sehen, dass schwere Vorschädigungen (RR, gRR, sKS) im Vergleich zu den restlichen Bruchsprüngen nur in geringer Anzahl vorhanden sind.

Tab. 6: Klassifikation der Bruchsprünge an den untersuchten Einzelscheiben

	ES_1_OS	ES_2_MS	ES_2_OS	ES_3_OS	ES_4_MS	ES_4_OS
lpR	14	1	14	23	8	14
lpRM	9	22	10	6	13	7
RR	0	0	0	2	1	1
gRR	0	0	0	0	0	0
sKS	1	0	0	1	0	0
besch.	5	2	6	3	1	5

Diese Beobachtungen bleiben für die Bruchsprünge der Verbundscheiben, dargestellt in Tab. 7, gültig. Es ist weiterhin zu sehen, dass die Klassifikation der Bruchsprünge der Bundscheiben ähnlich die der Einzelscheiben ist. Abweichend davon ist an Seite 1 der Verbundscheiben eine höhere Zahl schwerer Vorschädigungen zu sehen. Zu erklären ist dies, dass nach dem Biegeprozess Seite 1 und 3, sowie nach der Laminierung nur noch Seite 1 Kontakt zu den Transportrollen hat. Auf Seite 1 und 3 wurden auch die einzigen Reißverschluss Risse an Verbundscheiben identifiziert, welche u.a. durch den Kontakt mit den Transportrollen entstanden sein könnten. Weiterhin sind die Bruchsprünge, wie bei den Einzelscheiben, an der bedruckten Glasseite häufiger von Mikrorissen als bei den nicht bedruckten Glasseiten betroffen. Dies ist ebenfalls auf die Bedruckung mit Farbe, welche kristalline Zusatzstoffe aufweist, zurück zu führen.

Tab. 7: Klassifikation der Bruchsprünge an untersuchten Verbundscheiben

	VS_1_OS	VS_2_MS	VS_2_OS	VS_3_OS	VS_4_MS	VS_4_OS
lpR	13	8	11	11	2	12
lpRM	10	21	4	7	15	12
RR	2	0	0	2	0	0
gRR	5	0	0	0	0	0
sKS	1	0	6	4	0	4
besch.	1	0	7	9	2	1

Weiter konnten fünf Proben der Verbund- und Einzelscheiben als ungültig markiert werden, welche ihren Bruchsprung vermutlich während der Probenfertigung oder dem Hantieren mit eben diesen erlangt haben. Abb. 45 zeigt exemplarisch zwei dieser Bruchsprünge. Im linken Teilbild ist ein tiefer paralleler Riss unterhalb der Eindringzone zu sehen, welcher von mehreren Tiefenrisse begleitet wird. Im rechten Teilbild ist ein Eindringkonus zu sehen. Beweis, dass dieser nicht wie die über ihn gelagerten Kratzer erst beim Untersuchen der Bruchstücke nach Prüfung entstanden ist, geben die Wallnerlinien. Diese passen sich in ihrer Form dem Eindringbereich an.

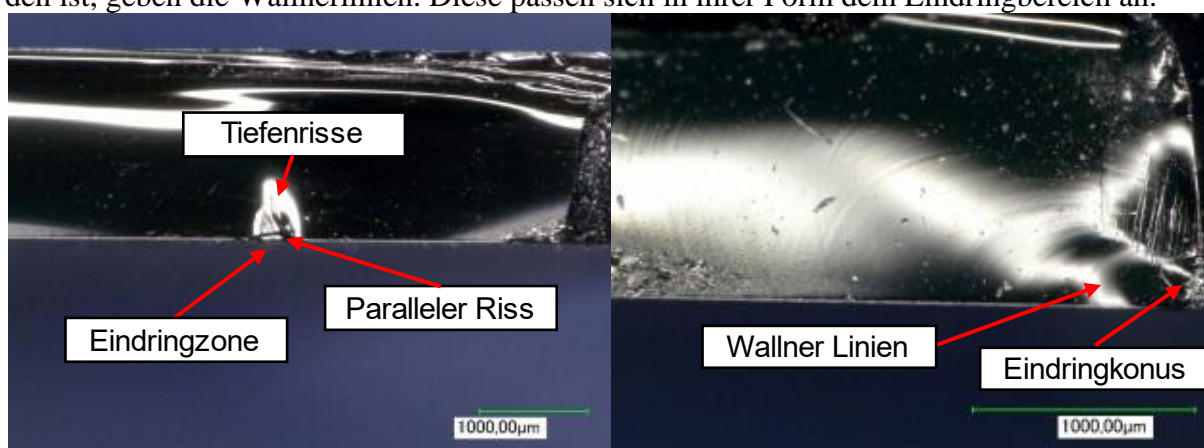


Abb. 45: Bruchmuster die auf eine Schädigung während der Probenherstellung, beziehungsweise dem Hantieren mit den Proben schließen lassen. Beide Proben entstanden durch stumpfen Kontakt oder den Aufprall auf einen stumpfen Gegenstand. Links sind typische Tiefenrisse unterhalb des parallelen Risses zu sehen. Im rechten Abb. ist der Eindringkonus zu sehen. Die Form der Wallner-Linien deutet ebenfalls auf eine Vorschädigung hin.

2.5.2.2 Bruchsprungsanalyse Kantenfestigkeit

Analog zur Bruchsprungsanalyse der Flächenfestigkeit wird in diesem Arbeitspaket die Kantenfestigkeit aus AP 3 verifiziert.

Entgegen anfänglicher Annahmen fiel bei Begutachtung der Proben unter dem Lichtmikroskop auf, dass diese nicht ausschließlich im Bereich der Kante versagt sind. Abb. 47 stellt zwei Proben dar, welche an unterschiedlichen Positionen versagt sind. Während auf dem linken Teilbild das Versagen im Bereich der geschliffenen Kante, am Ort maximaler Spannung während der Vier-Punkt-Biegeversuche stattfand, ist in der rechten Abb. deutlich ein anderer Ort des initialen Versagens auszumachen. Der Bruchursprung im rechten Teilbild befindet sich im Übergang zwischen dem bedruckten und unbedruckten Bereich einer Innenscheibe.

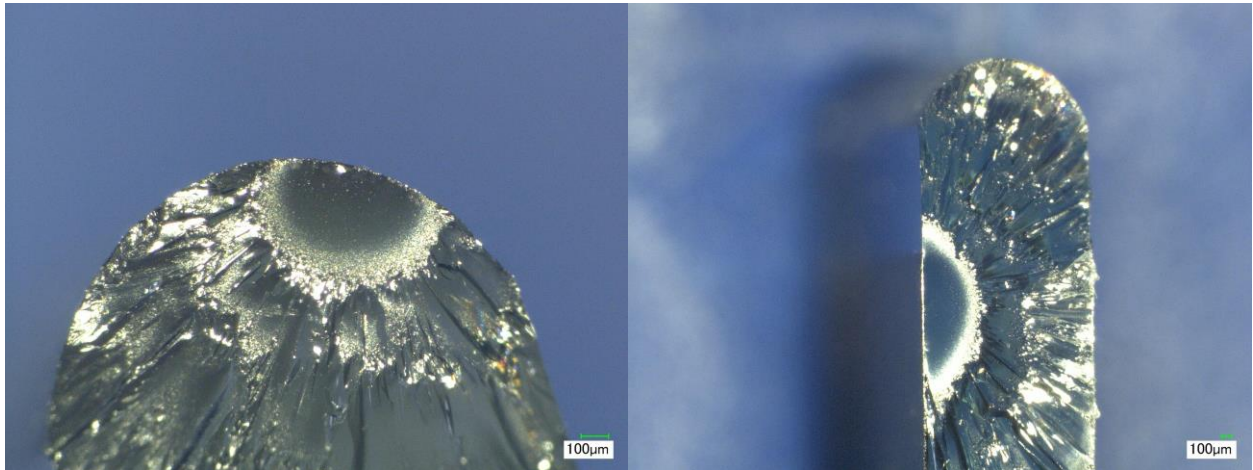


Abb. 46: Bruchursprung der Proben für die Kantenfestigkeit. Links: Bruchursprung am Ort maximaler Belastung. Rechts: Versagen am Übergang Siebdruck

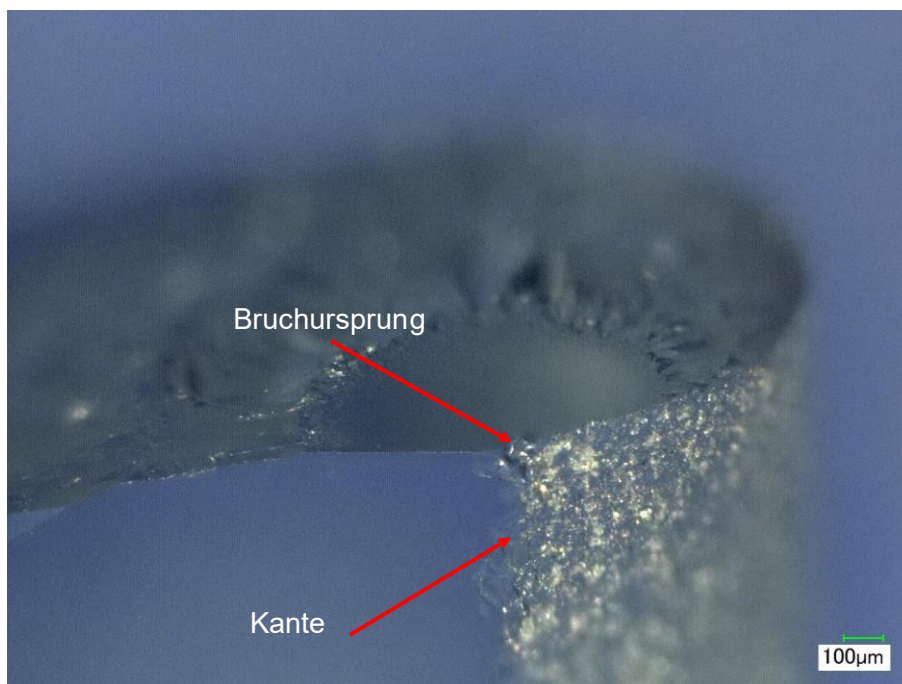


Abb. 47: Bruchursprung Probe Kantenfestigkeit. Versagen im Bereich der Überlappung Siebdruck und Schleifbereich Kante

Während der Siebdruck bei Proben der Außenscheibe bis zur Schleifkante aufgedruckt ist, ist dieser bei Innenscheiben nicht bis zur Kante vorhanden. Das rechte Teilbild in Abb. 47 zeigt ebenfalls, dass das Versagen in diesem Fall am Siebdruck und nicht an der vermeintlich schwächeren

Kante aufgetreten ist. Dies stellt die Grundgesamtheit der zu ermittelnden Versagensverteilung in Frage, da zunächst nicht zwischen Siebdruck und Kantenfestigkeit unterschieden werden kann. In Abb. 48 ist der Bruchursprung am Übergang zwischen Kante und Fläche zu sehen. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass der Ort des initialen Versagens weiterhin im Bereich des Siebdruckes liegt. Eine klare Trennung der Proben nach Versagen durch die Einbringung initialer Defekte durch den Siebdruck oder durch das Bearbeiten der Kanten ist daher nicht möglich. Da jedoch die Kanten an Windschutzscheiben vom hier betrachteten Typ Audi A3 ebenfalls bis zur Kante bedruckt sind, kann diese Verteilung der Festigkeit trotzdem für spätere stochastische Simulationen verwendet werden.

In

Tab. 8 sind die ermittelten Bruchursprünge dargestellt. Es konnten insgesamt 90 von 93 Bruchur-

	ES_i	ES_a	VS_i	VS_a
Rundung	9	8	24	4
Übergang	5	8	6	23
Fläche	1	0	0	2
nicht identifizierbar	0	0	1	1
Summe	15	16	32	30

sprünge identifiziert und klassifiziert werden. Es ist deutlich erkennbar, dass die Innenscheiben (ES_i und VS_i), deren Bedruckung nicht bis zur Kante reicht, wesentlich häufiger an der Rundung, dem Bereich des Schleifprozesses, versagt haben. Im Gegensatz dazu ist das Versagen der Außenscheiben häufiger im Übergang zwischen der geschliffenen Zone zur seitlichen Fläche der Probe zu beobachten. Dies ist der Bereich in dem der Schleifprozess endet bzw. beginnt und welcher ebenfalls bedruckt ist.

Tab. 8: Klassifikation der Bruchursprünge der Proben zur Ermittlung der Kantenfestigkeit

	ES_i	ES_a	VS_i	VS_a
Rundung	9	8	24	4
Übergang	5	8	6	23
Fläche	1	0	0	2
nicht identifizierbar	0	0	1	1
Summe	15	16	32	30

Von besonderer Bedeutung ist die Entfernung des Versagens von der Probenoberseite. Für die analytische Auswertung der Versagensspannungen der Vier-Punkt-Biegeversuche muss diese beachtet werden. Dementsprechend wurden alle Proben zusätzlich auf die Entfernung zwischen Bruchursprung und Oberkante der Probe hin untersucht. Die ermittelten Abstände wurden darauf in AP 3 berücksichtigt.

2.6 AP5 – Verteilungsfunktionen Flächen und Kantenfestigkeit aus AP 2 und AP 3

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 1, Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Mechanik und Materialforschung bearbeitet.

2.6.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Innerhalb Arbeitspaket 5 werden die in Arbeitspaket 2 und 3 geprüften Proben auf ihre fraktografische Versagensspannung überprüft. Dies ist nötig, da die geprüften Proben eine nicht

gleichmäßige Krümmung aufweisen, da diese aus den fertigen Windschutzscheiben entnommen worden sind. Die fraktografische Versagensspannung dient der Verifizierung der analytischen Werte, welche mittels FE-Simulation um den Einfluss der Krümmung korrigiert worden sind.

Für eine fraktografische Spannung wird der sogenannte Bruchspiegel am Bruchsprung identifiziert und vermessen. Über dessen Radius lässt sich mittels einer materialtypischen Konstante die Versagensspannung berechnen.

Diese materialtypische Konstante, die Bruchspiegelkonstante, wird bedingt durch Unterschiede in den Literaturwerten zusätzlich zur Verfügung gestellten Proben selbst bestimmt.

Abschließend werden die beobachteten Unterschiede der experimentellen und fraktografischen Versagensspannungen im Bereich bedruckter Proben, welche im Rahmen der für das Projekt beantragten Arbeiten auftraten, gesondert untersucht.

Es wurden folgende Meilensteine definiert:

- MS 5.1.: Verteilungsfunktionen der Bruchursachen Flächenfestigkeit aus AP2 sind überprüft und validiert.
- MS 5.2.: Verteilungsfunktionen der Bruchursachen Kantenfestigkeit aus AP3 sind überprüft und validiert.

2.6.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die durchgeführten Arbeiten sind unterteilt in allgemeine Arbeiten, dem Vergleich fraktografischer und analytischer Festigkeitsverteilungen der Einzel- und Verbundscheiben aus AP 2, sowie dem Vergleich der Kantenfestigkeiten aus AP 3.

2.6.2.1 Allgemeine Arbeiten

Alle gültigen Proben wurden auf ein charakteristisches Bruchmuster in ihrem Bruchsprung, dem sogenannten Bruchspiegel untersucht. Einer der gefundenen Bruchspiegel ist in Abb. 49 dargestellt. Mit dem Radius der Spiegelzone r lässt sich die zum Zeitpunkt des Versagens anliegende Spannung am Riss σ_f exklusive der Eigenspannungen mittels der Bruchspiegelkonstanten A über den Zusammenhang

$$\sigma_f = A \sqrt{r} + \sigma_0 \quad (3)$$

ermitteln. Die sogenannte Bruchspiegelkonstante A kann als Materialkonstante angesehen werden [31] [12]. Die für die Bruchspiegel vorhandenen Literaturwerte für das in Windschutzscheiben üblicherweise verwendete Kalk-Natron-Silikat Glas schwanken zwischen 1.47 und 3.15 MPa \sqrt{m} . Dies ist möglicherweise auf einen bis dato unbekanntem Einfluss der chemischen Bestandteile des betrachteten Glases auf die Entstehung der Spiegelzone zurückzuführen oder auf unzureichende Angaben der Eigenspannungen bei Bestimmung der Konstanten. Die chemische Zusammensetzung von Kalk-Natron-Silikat Glas unterliegt Schwankungen je nach Anwendung und Hersteller. Aus diesem Grund wurden zusätzlich, zu den innerhalb des Projektes geplanten Versuchen, weitere Doppelring-Biegeversuche zur Ermittlung der Bruchspiegelkonstanten durchgeführt. Es wurden 30 Doppelring-Biegeversuche an flachen Kalk-Natron-Silikat Glas durchgeführt, welches identisch zu dem Glas in den verwendeten Audi A3 Windschutzscheiben ist. Die verwendeten Proben wurden zunächst zum Beseitigen der Kühlspannungen auf 520°C erhitzt und mit maximal 2°C pro Minute in einem Temperierofen abgekühlt. Anschließend wurden diese nach DIN EN 1288-5 mittels Doppelring-Biegeversuch getestet. Von 30 Versuchen sind 15 Proben gültig als gültig anzusehen, weil diese innerhalb des Lastringes versagt haben [28]. Über die ermittelten Versagensspannungen und den Radien der Bruchspiegel lässt sich über die Darstellung in Abb. 50 mittels der Steigung einer Ausgleichgeraden die Bruchspiegelkonstante bestimmen. Diese wurde für das vorliegende Glas zu $A = 1.7384$ MPa \sqrt{m} mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.9963$

bestimmt. Diese kann nun im nachfolgenden verwendet werden, um die fraktographische Versagensspannung der Glasproben aus AP 2 und AP 3 zu bestimmen.

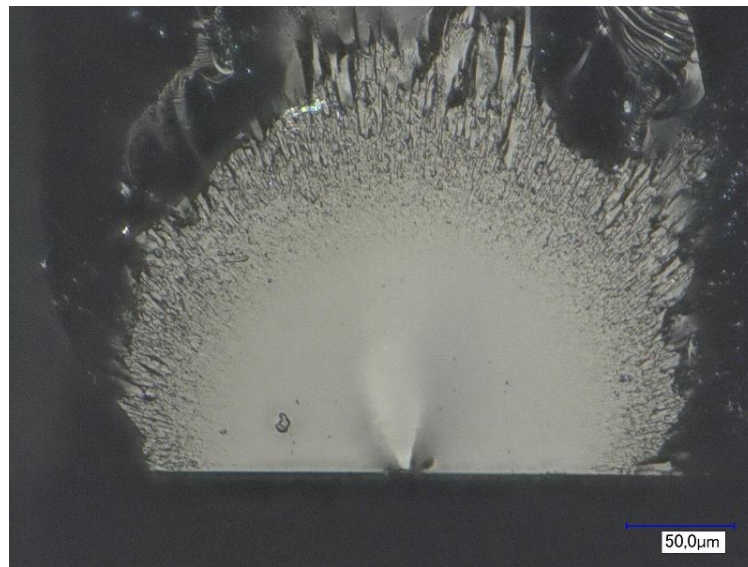


Abb. 48: Bruchspiegel einer Doppelring-Biegeprobe. Bruchspiegel wird der glatte, halbkreisförmige Bereich um den Bruchsprung genannt.

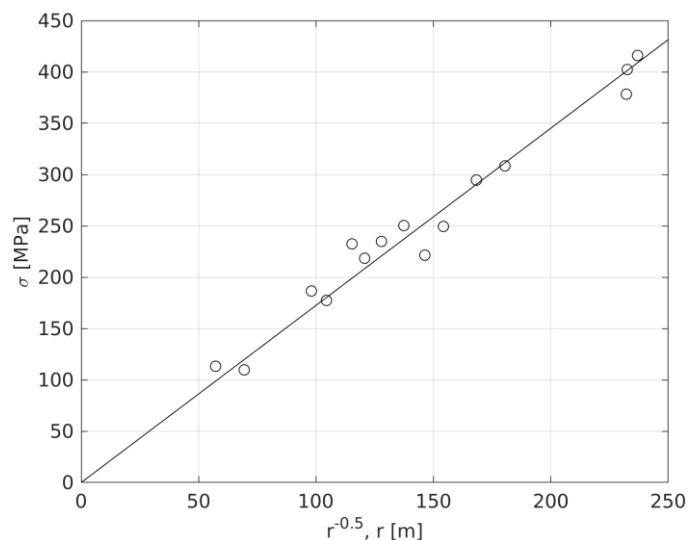


Abb. 49: Versagensspannung über Kehrwert der Wurzel der Bruchspiegelradien zur Ermittlung der Bruchspiegelkonstanten.

2.6.2.2 Verteilungsfunktionen Flächenfestigkeit Einzelscheibe

Ziel dieses Punktes ist, die Verteilungsfunktionen der Einzelscheibe aus AP 3 zu verifizieren. Von 171 gültigen Doppelring-Biegeversuchen konnte bei 149 Proben der Bruchspiegel identifiziert und vermessen werden. Die Anzahl der gefundenen Bruchspiegel je Serie ist in Tab. 9 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Quote der vermessenen Bruchspiegel zu den analytischen Versuchen, mit Ausnahme von Seite 2 unbedruckt (ES_2_OS) und Seite 4 unbedruckt (ES_4_OS) über 87 % liegt.

Tab. 9: Anzahl der identifizierten und vermessenen Bruchspiegel im Vergleich zu den gültigen Versuchen aus AP 2 für die aus Einzelscheiben gewonnen Proben.

Prüfposition	Siebdruck	Bezeichnung	Gültige Versuche analytisch	identifizierte Bruchspiegel	Quote [%]
Pos. 1	nein	ES_1_OS	31	27	87,10
Pos. 2	ja	ES_2_MS	25	25	100,00
	nein	ES_2_OS	30	21	70,00
Pos. 3	nein	ES_3_OS	35	32	91,43
Pos. 4	ja	ES_4_MS	23	22	95,65
	nein	ES_4_OS	27	22	81,48
Summe			171	149	87,13

Da während der Produktion Seite 1 und Seite 3 Kontakt zu den Rollen der Förderbänder hatten, ist dort eine geringere Festigkeit im Vergleich zu Seite 2 und Seite 4 zu erwarten. Eine höhere Festigkeit geht immer mit einem höherem Fragmentierungsgrad der Probe einher, wodurch das Identifizieren des Bruchsprungs erschwert wird.

Die ermittelten Parameter wurden analog zu Abb. 31 auf ihre statistische Verteilung hinsichtlich einer zwei Parameter Weibull-Verteilung untersucht. Die ermittelten Parameter wurden mittels LogLikelihood-Methode geschätzt und sind in Tab. 10 aufgeführt. Ein grafischer Vergleich ist in Abb. 51 dargestellt.

Tab. 10: Vergleich analytischer Versagensspannungen aus AP 2 mit den innerhalb AP 5 ermittelten fraktografischen Werten der Einzelscheiben.

Bezeichnung	Weibull AP2		Weibull AP5		Differenz	
	β [MPa]	λ [-]	β [MPa]	λ [-]	β [%]	λ [%]
ES_1_OS	306,42	3,22	285,06	3,37	6,97	-4,66
ES_2_MS	100,67	7,41	109,07	14,28	-8,34	-92,71
ES_2_OS	416,10	3,04	377,44	2,63	9,29	13,49
ES_3_OS	314,18	6,13	315,56	5,75	-0,44	6,20
ES_4_MS	102,91	14,88	101,37	15,48	1,50	-4,03
ES_4_OS	376,52	4,25	359,90	3,92	4,41	7,76

Es ist zu sehen, dass mit Ausnahme der bedruckten Bereiche (_MS), der Unterschied der analytischen zu fraktografischen Parameter im Toleranzbereich der fraktografischen Auswertung liegt. Dieser liegt für die Versagensspannung bei etwa 10 % [12].

Auffällig ist, dass der fraktografische Skalenparameter λ der bedruckten Glasseite 2 (ES_2_MS) eine Abweichung von über 92 % zum analytischen Kontrapart hat. In Abb. 51 ist zu sehen, dass unterhalb von circa $\ln(90 \text{ MPa}) = 4,5$, die Versagensspannungen der analytischen und fraktografischen Werte nicht mehr korrelieren.

Insgesamt ist bei den Einzelscheiben eine Korrelation fraktografischer und analytischer Werte unterhalb der Toleranzen der fraktografischen Auswertung zu beobachten. Die Unterschiede im Bereich der bedruckten Gläser lassen sich durch eine mögliche Änderung des Verhaltens am Bruchsprung durch die Bedruckung und dessen Prozess vermuten. Dies wird in Abschnitt 2.6.2.4 zusätzlich untersucht.

2.6.2.3 Verteilungsfunktionen Flächenfestigkeit Verbundscheibe

Ziel dieses Vorganges ist, die Verteilungsfunktionen der Verbundscheiben aus AP 3 zu verifizieren. Von 170 gültigen Doppelring-Biegeversuchen konnte bei 150 Proben der Bruchspiegel identifiziert und vermessen werden. Die Anzahl der gefundenen Bruchspiegel je Serie ist in Tab. 11 dargestellt.

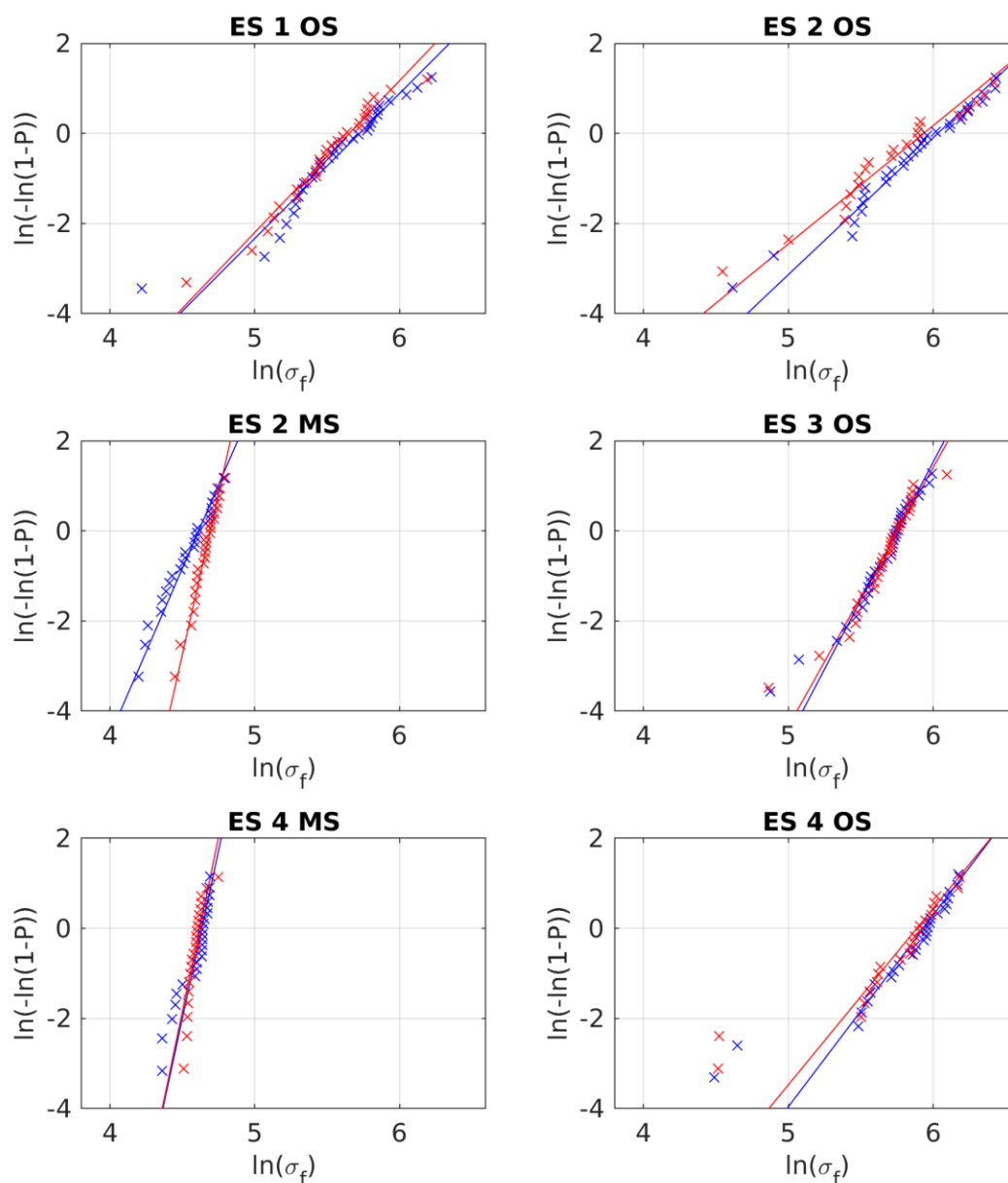


Abb. 50 Vergleich der analytischen (blau) mit den fraktografischen (rot) Werten der Festigkeiten der Einzelscheiben mittels 2 Parameter Weibull-Verteilung.

Es konnten für alle Stichproben, mit Ausnahme der unbedruckten und mit PVB beschichteten Proben, annähernd 90 % und der Bruchspiegel identifiziert und vermessen werden. Im Bereich hoher Festigkeiten wurden erneut im Vergleich zu den anderen Stichproben weniger Bruchspiegel gefunden. Dies liegt, wie bereits bei den Einzelscheiben, am hohen Grad der Fragmentierung im Bereich hoher Festigkeiten.

Tab. 11: Anzahl der identifizierten und vermessenen Bruchspiegel im Vergleich zu den gültigen Versuchen aus AP 2 für die aus Verbundscheiben gewonnen Proben.

Prüfposition	Siebdruck	Bezeichnung	Gültige Versuche analytisch	identifizierte Bruchspiegel	Quote [%]
Pos. 1	nein	VS_1_OS	32	31	96,88
Pos. 2	ja	VS_2_MS_PVB	29	29	100,00
	nein	VS_2_OS_PVB	28	19	67,86
Pos. 3	nein	VS_3_OS_PVB	33	25	75,76
Pos. 4	ja	VS_4_MS	19	17	89,47
	nein	VS_4_OS	29	29	100,00
Summe			170	150	88,24

In Tab. 12 sind die mittel LogLikelihood-Methode ermittelten Parameter einer 2 Parameter Weibull-Verteilung der analytischen und fraktografischen Festigkeiten aus den betrachteten Verbundscheiben dargestellt. Mit Ausnahme des bedruckten Bereiches ist erneut eine Übereinstimmung unterhalb der allgemeinen Toleranz der Bestimmung von Versagensspannungen mittels Bruchspiele von 10 % zu sehen. Lediglich der Skalenparameter λ für Seite 2 ohne Bedruckung (VS_2_MS_PVB) weicht um mehr als 11 % ab. Dies ist darin begründet, dass die hohe Grundfestigkeit aus den Einzelscheiben durch die Beschichtung mit PVB erhalten blieb und dazu führte, dass keine Bruchspiegel aufgrund hoher Fragmentierung gefunden werden konnten. Dies ist zwar auch für die unbedruckte Seite 3 der Verbundscheiben zutreffend. Hier wurden jedoch anstatt der 19 Bruchursprünge von Seite 2 insgesamt mehr Bruchursprünge identifiziert, was die statistische Aussagefähigkeit steigert.

Tab. 12: Vergleich analytischer Versagensspannungen aus AP 2 mit den innerhalb AP 5 ermittelten fraktografischen Werten der Verbundscheiben.

Bezeichnung	Weibull AP2		Weibull AP5		Differenz	
	β [MPa]	λ [-]	β [MPa]	λ [-]	β [%]	λ [%]
VS_1_OS	125,1	2,62	132,00	2,67	-5,52	-1,91
VS_2_MS_PVB	87,68	5,48	112,42	8,06	-28,22	-47,08
VS_2_OS_PVB	429,43	6,74	410,17	5,99	4,52	11,13
VS_3_OS_PVB	357,17	5,76	365,69	5,54	-2,39	3,82
VS_4_MS	104,19	4,98	105,79	14,39	-1,54	-188,96
VS_4_OS	183,33	5,23	183,66	5,44	-0,18	-4,02

Der grafische Vergleich der fraktografischen und analytischen Versagensverteilungen ist in Abb. 52 dargestellt. Es ist zu sehen, dass mit Ausnahme der bedruckten Bereiche die Extremwerte der Festigkeiten im selben Bereich liegen.

Verteilungsfunktionen Kantenfestigkeit

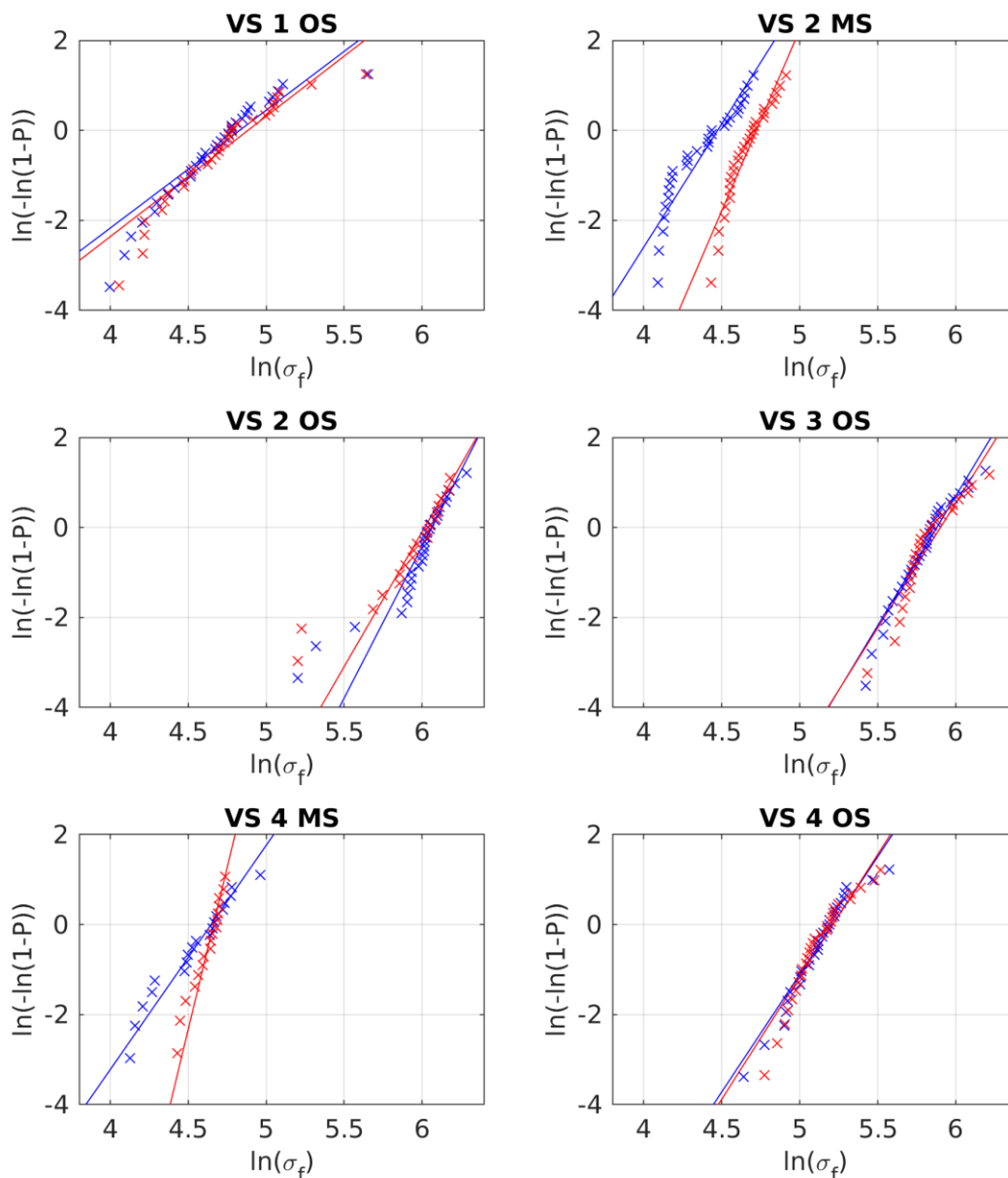


Abb. 51: Vergleich der analytischen (blau) mit den fraktografischen (rot) Werten der Festigkeiten der Verbundscheiben mittels 2 Parameter Weibull-Verteilung.

Für die in AP 5 durchgeführten Vier-Punkt-Biegeversuche wurden ebenfalls die Bruchspiegel am Bruchursprung identifiziert und vermessen. Wie bereits in Abschnitt 2.5.2.2 erläutert, sind die Proben für die Kantenfestigkeit hingegen erster Annahmen bedruckt. Die Bedruckung reicht bei den Außenscheiben bis über die Kante, während diese bei den Innenscheiben bis kurz vor die Kante reicht. Diese zu Beginn des Projektes unbekannte Problematik wurde bereits in AP 3 diskutiert. Die Anzahl der gefundenen Bruchspiegel für die Festigkeitsverteilungen der Kante sind in Tab. 13 aufgezeigt. Durch die im Vergleich zu den Flächenprüfungen geringeren Festigkeiten an der Kante und der dadurch geringeren Fragmentierung wurden nahezu alle Bruchsprünge gefunden.

Tab. 13: Anzahl der identifizierten und vermessenen Bruchspiegel im Vergleich zu den gültigen Versuchen aus AP 3 für die Festigkeiten der Kante.

Prüfposition	Bezeichnung	Gültige Versuche analytisch	identifizierte Bruchspiegel	Quote [%]
Einzelscheibe, innen	ES_i	15	15	100,00
Einzelscheibe, außen	ES_a	16	16	100,00
Verbundscheibe, innen	VS_i	32	31	96,88
Verbundscheibe, außen	VS_a	30	29	96,67
	Summe	93	91	97,85

Bei Vergleich der analytischen und fraktografischen Stichproben, angenähert mittels einer 2 Parameter Weibull-Verteilung in Tab. 14, ist zu sehen, dass diese sich teilweise deutlich unterscheiden. Besonders der Skalenparameter λ , ein Wert für die Streuung der Parameter, liegt bei den fraktografischen Werten höher, was eine geringere Streuung der Festigkeiten bedeutet.

Tab. 14: Vergleich analytischer Versagensspannungen aus AP 3 mit den innerhalb AP 5 ermittelten fraktografischen Werten der Kantenfestigkeiten.

Bezeichnung	Weibull AP2		Weibull AP5		Differenz	
	β [MPa]	λ [-]	β [MPa]	λ [-]	β [%]	λ [%]
ES_i	119,23	19,56	117,18	19,82	1,72	-1,33
ES_a	97,53	8,15	108,39	9,61	-11,14	-17,91
VS_i	125,48	10,82	119,95	13,2	4,41	-22,00
VS_a	91,85	6,89	91,04	9,52	0,88	-38,17

Der grafische Vergleich der statistischen Verteilungen der Kantenfestigkeiten ist in Abb. 53 dargestellt. Es zeigt sich erneut, dass für bedruckte Festigkeiten im unteren Bereich keine Übereinstimmung zwischen analytischen und fraktografischen Werten erreicht werden kann. Es ist ebenfalls zu sehen, dass die Festigkeiten der im geringeren Umfang bedruckten Proben der Innenscheiben (ES_i, VS_i) besser korrelieren als die bis zum Rand bedruckten Außenscheiben (ES_a, VS_a).

Allgemein ist festzuhalten, dass die in AP 3 ermittelten Festigkeiten mit den fraktografischen Werten aus AP 5 korrelieren. Die Extremwerte im oberen Bereich sind mit Abweichung unterhalb der

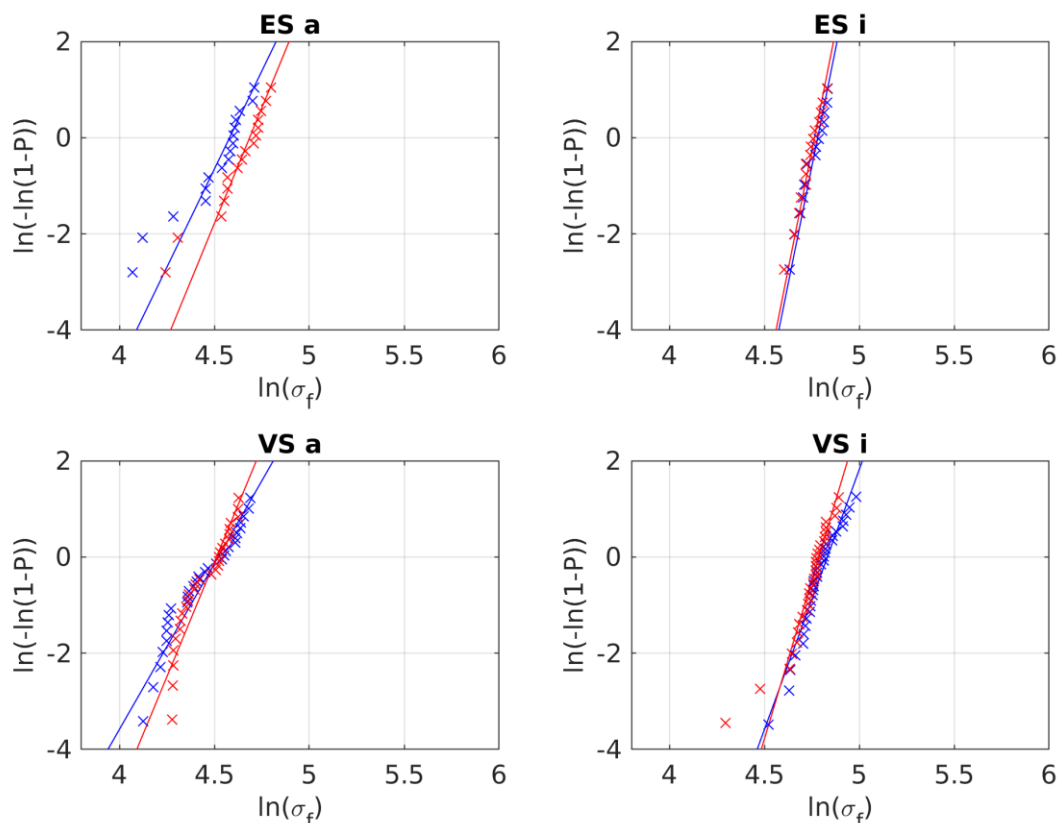


Abb. 52: Vergleich der analytischen (blau) mit den fraktografischen (rot) Werten der Festigkeiten der Kanten mittels 2 Parameter Weibull-Verteilung.

etwa 10 % Toleranz der fraktografischen Versagensspannungen vergleichbar [12]. Im unteren Bereich existieren Diskrepanzen, die auf Abweichung fraktografischer Versagensspannungen im Bereich der Bedruckung hindeutet.

2.6.2.4 Bruchspiegelkonstante bedruckter Gläser

Da sowohl im Bereich der Flächenfestigkeit der Einzel- und Verbundscheiben, sowie der Kantenfestigkeit unerklärliche Abweichungen bei dem Vergleich experimenteller und fraktografischer Versagensspannungen zu beobachten sind, wurde mit Hilfe dem im Projekt beteiligten Glashersteller Pilkington eine zusätzliche Untersuchung durchgeführt. Im Rahmen der projektbegleitenden Treffen zeigte sich, dass diese Problematik und deren Aufklärung auf allgemeines Interesse bei den am Projekt beteiligten beschäftigten Firmen und Instituten stößt.

Für die folgenden Untersuchungen stellte Pilkington bedrucktes und unbedrucktes Glas desselben Typs zur Verfügung, welches jedoch nicht im Rahmen des Projektes verwendeten Glas der Audi A3 Windschutzscheiben entspricht. Ziel der folgenden Untersuchung ist herauszufinden, ob bei gleichem Glas die Bedruckung eine Änderung der Bruchspiegelkonstanten bewirkt. Dies würde mittels Vergleichsproben aus den Audi A3 Windschutzscheiben verifiziert werden. Zunächst wird auf eine andere Glassorte zurückgegriffen, da diese nicht gekrümmt ist und es direkte unbedruckte Vergleichswerte zu ermitteln gibt.

Zunächst wurde analog zu dem Vorgehen für die im Rahmen des Projektes untersuchten Festigkeiten, die Eigenspannungen der Proben ermittelt. Hierfür wurde auf zwei Methoden zurückgegriffen. Sie wurden mittels Streulichtpolariskop (GlasStress SCALP-05) und zum Vergleich der Messwerte in einem externen Institut mittels Berek-Kompensators untersucht. Beide Methoden

verwenden die Verzögerung des durch die Probe geleiteten Lichtes zur Ermittlung der Eigenspannungen durch den Kühlprozess nach Herstellung des Glases. Während der Berek-Kompensator lediglich den Wert der maximalen Zugspannung und die Homogenität der Eigenspannungen messen kann, kann das Streulichtpolariskop den gesamten Verlauf der Eigenspannungen aufnehmen. Die Wellenlängenverzögerung einer bedruckten Probe, aufgenommen mittels Berek-Kompensators, ist in Abb. 54 dargestellt. Die ermittelten Eigenspannungen sind in Tab. 15 dargestellt.

Tab. 15: Messwerte der Bestimmung von Eigenspannungen (Kühlspannungen) der Proben zur Ermittlung des Einflusses von Bedruckungen auf die Bruchspiegelkonstante.

	Bedruckte Proben		Unbedruckte Proben	
	max. Zug [MPa]	Oberfläche [MPa]	max. Zug [MPa]	Oberfläche [MPa]
Berek Komp.	4.00	-	3.88	-
SCALP	4.00 [3.4;4.7]	-9.93 [-9.5;-10.2]	3.98 [3.4;4.7]	-8.94 [-6.9;-10.5]

Mit dem zur Verfügung gestelltem Glas wurden kreisrunde Proben mit einem Durchmesser von 80 mm hergestellt, um Doppelring-Biegeversuche nach DIN EN 1288-5 durchzuführen [28]. Insgesamt konnten 53 unbedruckte und 57 bedruckte Proben hergestellt und getestet werden. Die verringerte Festigkeit durch das Schneiden mittels Glasschneider kann vernachlässigt werden, da ausschließlich die Flächenfestigkeit und nicht die Kantenfestigkeit geprüft wird. Alle getesteten Proben wurden mittels Lichtmikroskop auf ihren Bruchspiegel untersucht. Die experimentellen Festigkeiten wurden den fraktografischen Festigkeiten nach Gl. (3) gegenübergestellt, welche in Abb. 55 dargestellt sind. Die Ergebnisse sind in Tab. 16 aufgeführt.

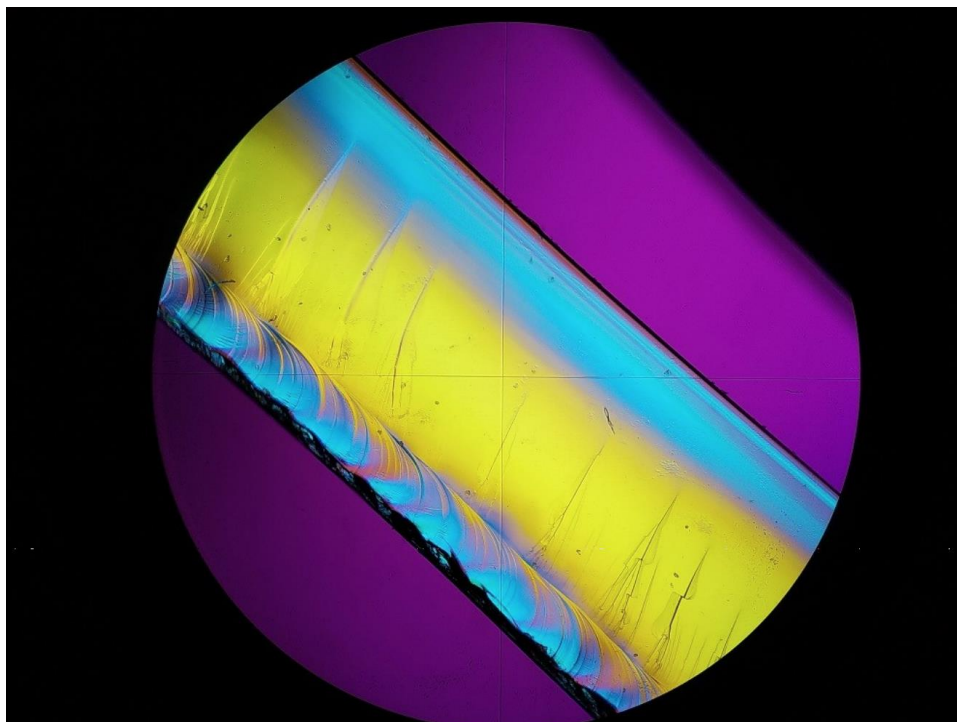


Abb. 53: Abb. erstellt mittels Berek Kompensators an einer bedruckten Probe. Bedruckung als schwarze Linie SW sichtbar. Zu sehen ist die farbliche Darstellung der Wellenlängenverzögerung.

Tab. 16: Ermittelte Bruchspiegelkonstanten der bedruckten und unbedruckten Proben mit Bestimmtheitsmaß der linearen Korrelation.

	unbedruckte Proben	bedruckte Proben	gesamte Proben
Bruchspiegelkonstante A	1,6150	1,7250	1,6340
Bestimmtheitsmaß R^2	0,9631	-0,5000	0,9620

Es ist erkennbar, dass bei unbedruckten Proben eine Korrelation vorliegt. Für bedruckte Proben ist dies nicht der Fall, was sehr deutlich durch ein negatives Bestimmtheitsmaß dargestellt wird. Bei Betrachtung der bedruckten und unbedruckten Proben als eine Stichprobe zeigt sich, dass die Bruchspiegelkonstante nur unwesentlich verändert ist im Vergleich zu den unbedruckten Proben. Dies legt den Schluss nahe, dass durch die Bedruckung eine allgemein höhere Abweichung zwischen fraktografischen und experimentellen Werten zu erwarten ist.

Zukünftige Untersuchungen in diesem Bereich sollten bedruckte Proben mit modifizierter Spannungsrate untersuchen, um den Bereich der Versagensspannung auszuweiten. Sollte die Abweichung der experimentellen Werte dann ebenfalls größer als die der unbedruckten sein, wäre dies ein Indiz für die These einer größeren Streuung durch die Bedruckung. Weiter besteht die Möglichkeit, dass der Zusammenhang der experimentellen Spannung zum Bruchspiegelradius nicht mit Gl. (3), sondern einer alternativen Formulierung im unteren Bereich beschrieben werden muss [32].

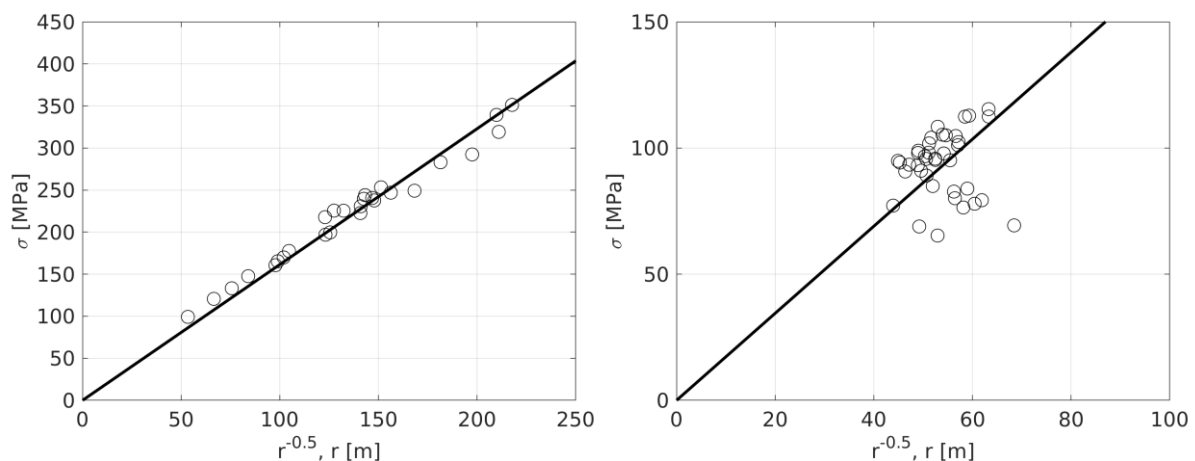


Abb. 54: Ermittlung der Bruchspiegelkonstanten an unbedruckten (links) und mit für Windschutzscheiben typischen Siebdruck bedruckten (rechts) Glas.

2.7 AP6 – Kopfaufpralltests Windschutzscheiben

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 1, Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Mechanik und Materialforschung bearbeitet.

2.7.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Ziel von Arbeitspaket 6 ist die Ermittlung der statistischen Versagensspannungen in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit an Windschutzscheiben. Im Rahmen dessen werden Windschutzscheiben mit einem per Elektrozyylinder geführtem Impaktor belastet und zum Versagen gebracht. Während der Versuche wird das Kraft- und das Wegsignal aufgezeichnet, um spätere Simulationen validieren zu können. Ebenfalls wird mittels Schallortung der Bruchursprung ermittelt, um mit diesem die Spannung innerhalb der Simulation zum Zeitpunkt des experimentell ermittelten Versagens mit den fraktografischen Spannungen vergleichen zu können.

Die durchzuführenden Bauteilersatzversuche bei dem externen Anbieter ACTS werden in AP 8 verwendet, um das stochastische Versagensmodell zu validieren. Da bei diesen Versuchen keine Kraft und Wegsignale vorhanden sind, ist eine Validierung des Beschleunigungsverlaufes sowie des HIC Wertes sinnvoller.

Es wurden folgende Meilensteine definiert:

- MS 6.1.: Die Bauteilversuche unter moderaten Belastungsgeschwindigkeiten sind durchgeführt. Die statistischen Bruchverteilungen sind ermittelt und bestätigt.
- MS 6.2.: Die Bauteilversuche unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten sind durchgeführt. Die statistischen Bruchverteilungen sind ermittelt und bestätigt.

2.7.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die durchgeführten Arbeiten teilen sich in experimentelle und numerische Arbeiten, welche nachfolgend verglichen und diskutiert werden.

2.7.2.1 Kopfaufprallersatzversuche

Zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit der Windschutzscheibe in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit werden sogenannte Kopfaufprallersatzversuche durchgeführt. Diese unterscheiden sich von standardisierten Versuchen, welche beispielsweise im Rahmen von EuroNCAP durchgeführt werden, durch einen mittels Elektrozyylinder mit konstanter Geschwindigkeit geführten Impaktor. Der Impaktor besteht aus einer metallischen Halbkugel mit einem Durchmesser von 136 mm, die mit einer nach EuroNCAP genormten Kopfhaut der Stärke von 14 mm überzogen ist. Die Kopfhaut bildet das mechanische Verhalten des menschlichen Kopfes während des Aufpralls auf die Windschutzscheibe nach. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 56 dargestellt. Bei den von Pilkington zur Verfügung gestellten Windschutzscheiben handelt es sich um Audi A3 Windschutzscheiben, aus dem Jahr 2017. Diese bestehen aus zwei Glasscheiben mit je 1,8 mm Durchmesser, die mit einer 0,76 mm dicken Schicht aus Polyvinylbutyral verbunden sind. Während der Versuche werden die Windschutzscheiben auf einer Vierpunktlagerung gelagert. Sie bestehen aus einer Halbkugel mit einem Durchmesser von 36 mm, welche aus Polyvinylchlorid hergestellt sind. Dies dient zur Reduzierung der Reibung und anderen unerwünschten Einflüssen, wie beispielsweise der Verklebung der Windschutzscheibe im Fahrzeug. Da es Ziel ist die

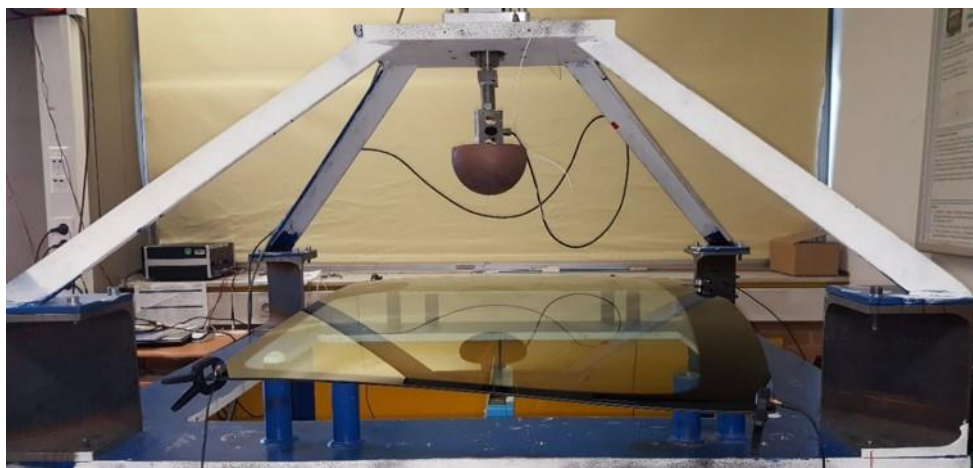


Abb. 55: Kopfaufprallersatztest Versuchsaufbau mit Windschutzscheibe in konvexer Lagerung

Versagenswahrscheinlichkeit der Windschutzscheiben zu ermitteln und numerisch nachzubilden, sollten weitere Einflüsse wie z.B. die Verklebung der Scheibe möglichst reduziert werden. Besonders beim Vergleich fraktografischer Spannungen mit FE-Simulationen wäre das viskos-hyperelastische Verhalten der Klebung schwer zu charakterisieren.

Es werden insgesamt 190 Versuche durchgeführt. Dabei werden die Scheiben konkav und konvex bei Geschwindigkeit von 0,01, 0,1, 1 und 10 m/s von dem Impaktor getroffen. Während die Versuche für 0,01, 0,1 und 1 m/s am in Abb. 56 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt werden, werden die Versuche bei 10 m/s mit einem freifliegendem Impaktor extern durchgeführt. Eine Unterscheidung in konvexe und konkave Lagerung erfolgt, um den Bruchursprung gezielt zu beeinflussen und so die Festigkeitsverteilungen für sowohl den bedruckten als auch den unbedruckten Bereich zu erhalten.

Die Versuche werden zusätzlich mittels Schallemissionsortung überwacht, um den Ort des initialen Versagens bestimmen zu können. Die Anzahl der durchgeführten Versuche ist in Tab. 17 dargestellt. Da während des Projekts mehr Scheiben als ursprünglich geplant zur Verfügung standen, wurden anstatt der beantragten 25 Versuche pro Serien 30 Versuche pro Serie durchgeführt. Ebenfalls wurden die Versuche bei 1 m/s mit einem elektrischen Zylinder durchgeführt. Ursprünglich war die Verwendung eines pneumatischen Zylinders geplant, welcher durch seine nicht konstante Geschwindigkeit jedoch eine höhere Komplexität an die Nachbildung der zugehörigen Simulationen liefert. Aus diesem Grund wurde ein mit höheren Geschwindigkeiten verfahrbarer elektrischer Zylinder verbaut, der konstante Geschwindigkeiten realisieren kann.

Tab. 17: Prüfmatrix der Kopfaufprallersatzversuche

Geschwindigkeit [m/s]	Lagerung	
	Konvex	Konkav
0,01	30 (25)	30 (25)
0,1	30 (25)	30 (25)
1	30 (25)	30 (25)
10	10	

Lediglich für die externen Versuche mit einem freifliegendem Impaktor und einer Aufprallgeschwindigkeit von 10 m/s wurde an der ursprünglichen Versuchszahl festgehalten. Während der

Versuche trifft der Impaktor mittig, 422 mm unterhalb der Oberkante auf die Windschutzscheibe. Das Prinzip der Schallortung an Windschutzscheiben wurde bereits in einer durch dieses Projekt entstandene Veröffentlichung erläutert [33].

In Abb. 57 ist der gemessenen Kraft- und Verfahrweg, unterteilt nach Lagerung der Windschutzscheibe und der Verfahrweggeschwindigkeit für konvexe und konkave Belastung bei 0,1 m/s exemplarisch dargestellt. In beiden Diagrammen wurde zur besseren Erkennbarkeit des Bruchzeitpunktes das Kraftsignal nach Ortung des Versagens abgeschnitten und auf null gesetzt.

Der Unterschied im Verfahrweg zum Bruchzeitpunkt ist deutlich erkennbar. Während dieser im

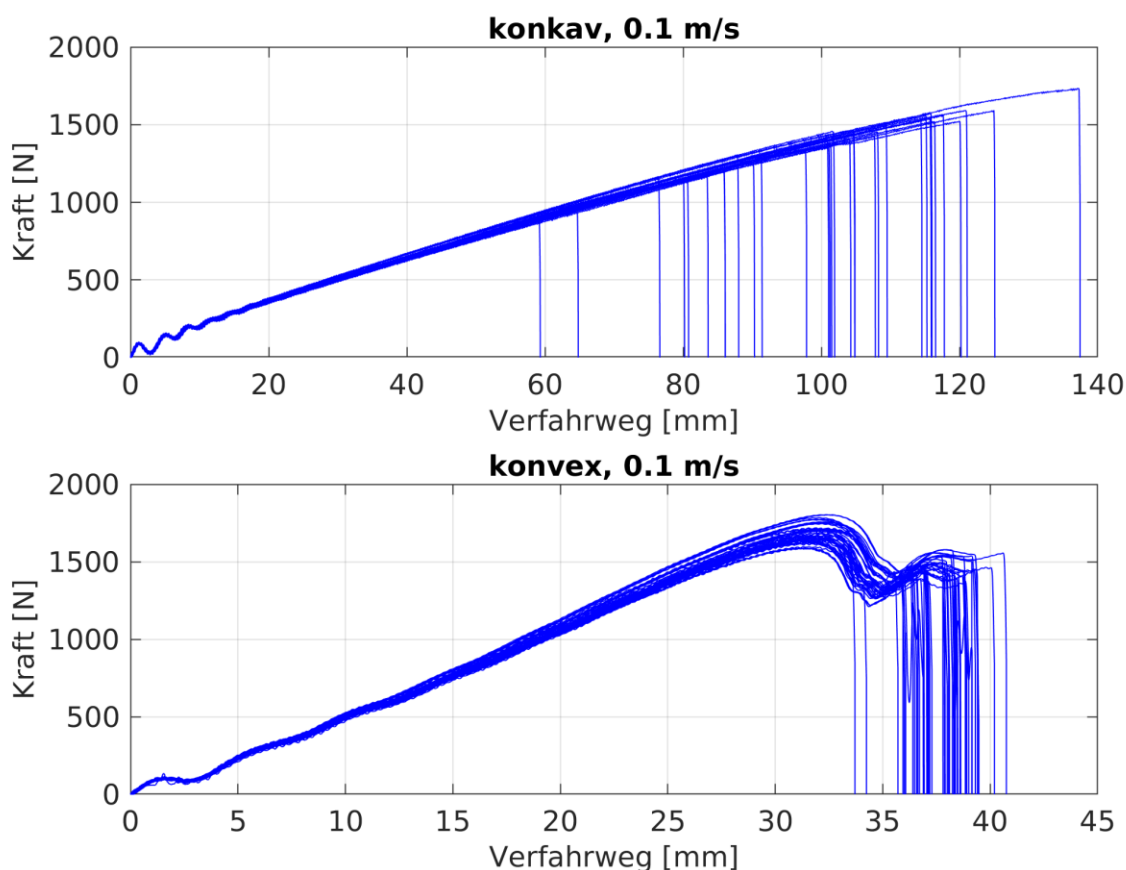


Abb. 56: Kraft über Verfahrweg Kurven in konvexer und konkaver Lagerung bei einer Geschwindigkeit des Impaktors von 0.1 m/s

Fälle der konvexen Belastung kurz nach Abknicken des Kraftsignals gehäuft auftritt, ist er im Falle einer konkaven Belastung von 60 bis 140 mm Verfahrweg, ohne deutliche Clusterung, verteilt.

Tab. 18: Zwei Parameter Weibull-Verteilungen der fraktografischen Versagensspannungen aus den Bauteilersatzversuche

Lagerung Geschwindig- keit	konvex			konkav		
	0,01	0,1	1	0,01	0,1	1
β	137,74	131,83	169,83	132,74	147,51	150,85
λ	3,81	6,05	4,52	4,93	5,75	3,28
Anzahl	30	28	17	18	29	27

In Abb. 58 sind beispielhaft Ortungsergebnisse der Versuche bei 0,1 m/s Geschwindigkeit des Impaktors der Bauteilersatzversuche in konvexer und konkaver Lage dargestellt. Die Streuung des Bruchursprungs in konvexer Lage konzentriert sich im bedruckten Bereich der Unterkante der Scheibe. Während der Versuche war zu erkennen, dass dieser nicht direkt an der Kante vorzufinden war, sondern einen Abstand von 2-3 cm von der Kante hatte. Bei Besichtigung der Produktionslinie der Firma Pilkington ist aufgefallen, dass die zum Biegen erwärmten Scheiben auf einem Metallrahmen zur Formgebung gehalten werden. Dieser Rahmen ist 2 cm breit und hält den Rand der Scheibe in Position. Durch den hohen Gradienten im Temperaturfeld entstehen am Rand der Scheibe im Vergleich zum restlichen Bereich höhere Eigenspannungen durch eine schnellere Abkühlung der Randschichten. Diese Beobachtung wurde bereits gesondert in AP 3 betrachtet und ist eine plausible Erläuterung, dass die Windschutzscheiben mit nicht direkt am Rand, sondern mit Abstand dazu versagen.

Im Falle der konkaven Belastung im linken Teil der Abb. 58 ist zu sehen, dass das Versagen sich auf den mittleren Bereich der Windschutzscheibe konzentriert, jedoch auch in den Randbereichen vorkommt. Im Rahmen der Darstellung der Ergebnisse der Bruchortung, welche im Kontext mit der Breite der Bruchzeitpunkte aus Abb. 57 besonders deutlich wird, dass das stochastische Bruchverhalten einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das Versagen der Windschutzscheibe hat.

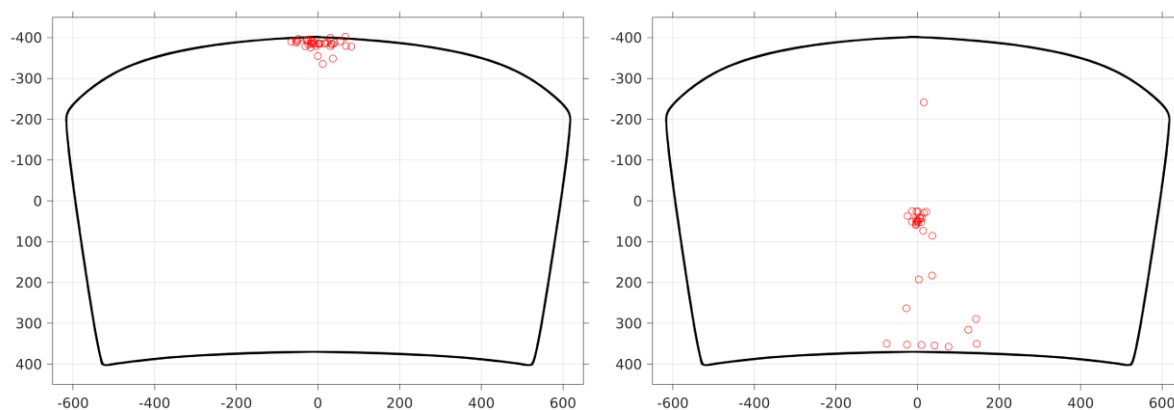


Abb. 57: Beispiel für Ortungsergebnisse der Kopfaufprallersatzversuche. Links: Ortungsergebnisse für konvexe Belastung bei 0,1 m/s. Rechts: Ortungsergebnisse für konkave Belastung bei 0,1 m/s.

2.7.2.2 Numerische Validierung

Zur Validierung der experimentellen Versagensspannungen aus Tab. 18 werden FE-Simulationen durchgeführt. Das Vorgehen zur Ermittlung von Versagensspannungen an Windschutzscheiben mittels Simulation und Schallortung wurde bereits im Rahmen dieses Projektes veröffentlicht [33]. Zur Ermittlung numerischer Versagensspannungen wird durch die Schallemissionsprüfung lokalisierten Bruchursprung innerhalb der FE-Simulation die Spannung des dort vorhandenen Elementes betrachtet, inklusive der Elemente im Bereich der Ungenauigkeit der Schallemissionsanalyse. Zum Zeitpunkt des experimentellen Versagens wird die numerische Spannung am Ort des Versagens in Reichweite der Ungenauigkeit der Schallortung aller Elemente ausgelesen und das arithmetische Mittel daraus gewonnen.

Das im Rahmen der Kopfaufprallersatzversuche verwendete FE-Modell ist in Abb. 59 dargestellt. Zu sehen ist der verwendete Impaktor, welcher mittels Zylinder auf die Windschutzscheibe geführt wird. Für die Kopfhaut wird ein kommerzielles Modell der Firma LASSO Ingenieurgesellschaft mbH verwendet. Der Zylinder besteht aus Stahl, welcher in Anlehnung an den verwendeten Elektrozylinder modelliert wurde. Die Windschutzscheibe ist in drei Bereiche, den bedruckten und unbedruckten Bereich sowie die Kante unterteilt. Die Kantenlänge der FE Elemente der Windschutzscheibe beträgt circa 5 mm. Die verwendete FE-Modellierungstechnik für die Windschutzscheibe besteht aus einem koinzidentem Schalen-Solid-Schalen Modell welche bereits in gängigen Modellen verwendet wird [34]. Hierbei werden die Schalenelemente mit den geometrischen Knoten der unteren und oberen Fläche der Solid Elemente verbunden, um den Transfer der Schubspannungen gewährleisten zu können. Um die physikalische Geometrie der Windschutzscheiben beibehalten zu können, wird die Dicke der Schalenelemente nach außen verlagert, sodass die geometrischen Knoten jeweils am unteren und oberen Ende der Elemente verortet sind. Das mechanische Verhalten der Glasschicht wird als linear elastisch mit einem E-Modul von $E = 70 \text{ GPa}$ und einer Querkontraktionszahl von $\nu = 0,23$ modelliert. Die PVB-Zwischenschicht wird durch das Blatz-Ko Modell für das mechanische Verhalten von Gummi [35] [36] modelliert. Die Eingabeparameter wurden der jeweiligen Belastungsgeschwindigkeit angepasst, um das ratenabhängige

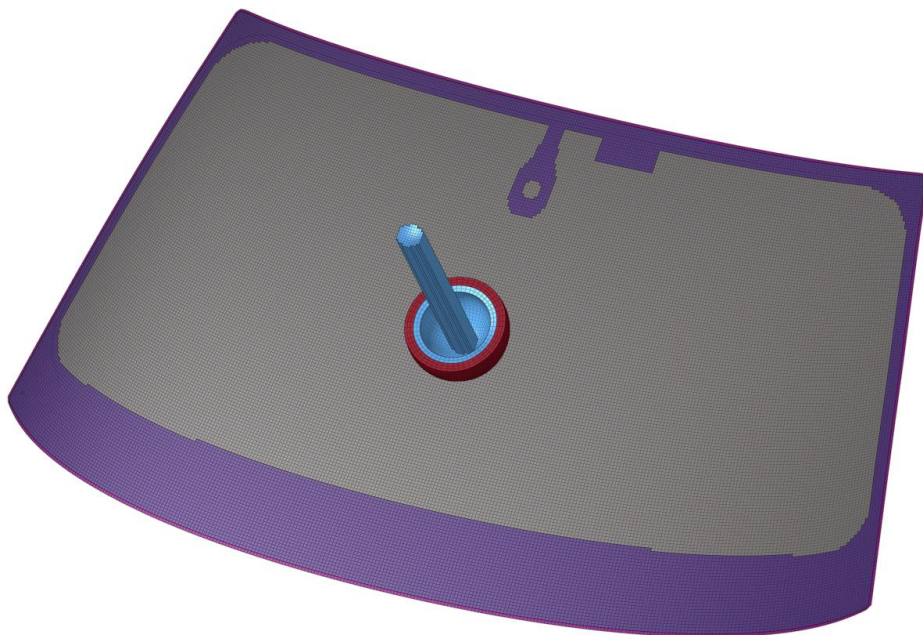


Abb. 58: Verwendete FE-Modell der Audi A3 Windschutzscheibe. Dargestellt ist die Windschutzscheibe mit bedrucktem, unbedrucktem und Kantenbereich sowie der für Kopfaufprallersatzversuche verwendete Zylinder.

Verhalten der PVB Schicht nachzubilden. Der Aufbau des koinzidenten Verbindens von Shell Elementen auf eine Solid Zwischenschicht im aktuellen Modell ist in Abb. 60 dargestellt.

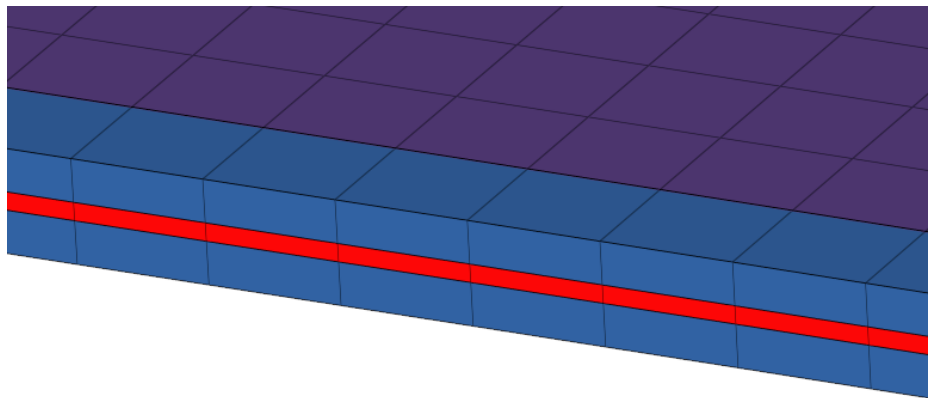


Abb. 59: Koinzidente Verbindung von Shell Elementen (blau, lila) mit einer Solid Zwischenschicht (rot). Der blaue Bereich stellt die Kante der Windschutzscheibe dar.

Die berechneten Verläufe des Kraft über Verfahrweges der Kopfaufprallersatzversuche und der numerischen Nachbildung sind in Abb. 61 exemplarisch für konvex und konkave Lagerung der Scheibe mit einer Geschwindigkeit des Impaktors von 0,1 m/s dargestellt.

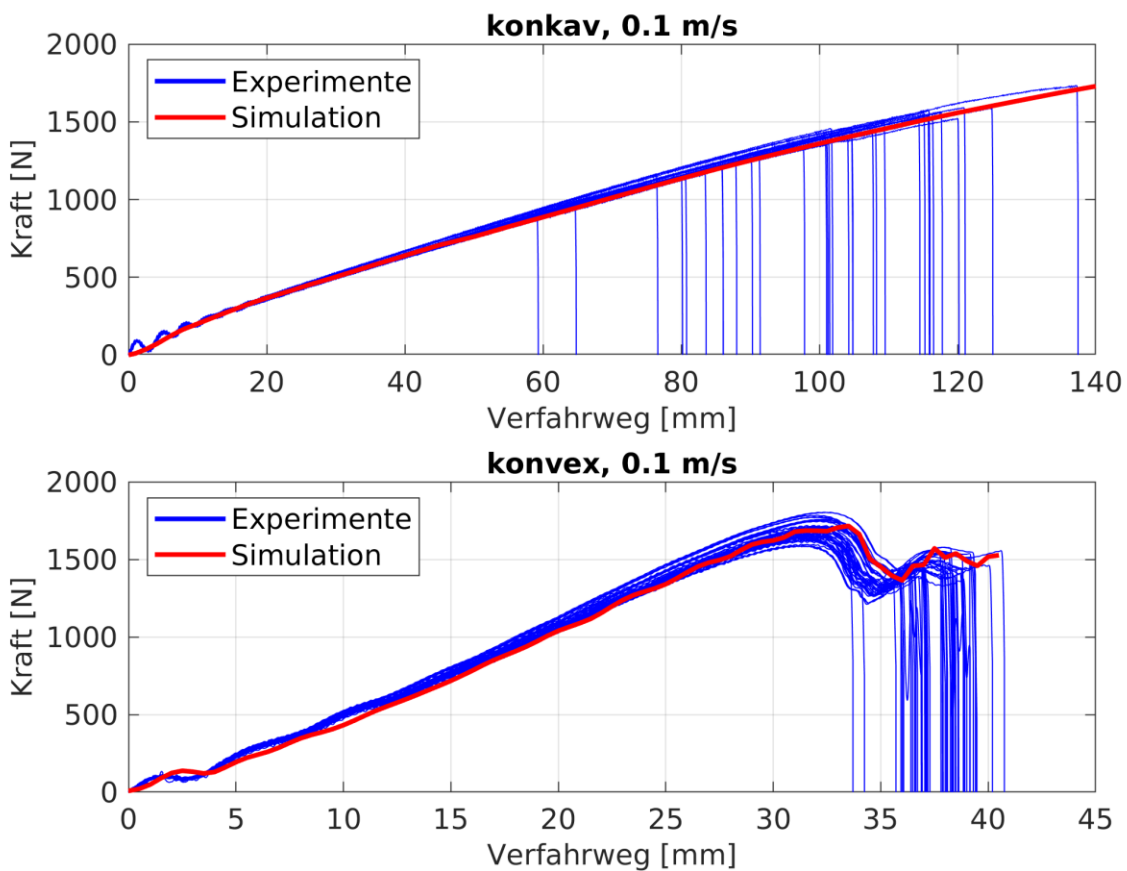


Abb. 60: Vergleich experimenteller (blau) und numerische (rot) Kraft über Verfahrweg Kurven der Bauteilersatzversuche bei konkaver und konvexer Lagerung mit je 0,1 m/s Verfahrsgeschwindigkeit des Impaktors

Um numerische Spannung zu erhalten wird das Prinzip der Schallortung verwendet [37]. Dieses unterliegt Messungenauigkeiten, die im Rahmen der Ermittlung von numerischen Versagensspannungen beachtet werden müssen. Das verwendete Schallortungssystem der Firma Vallen gibt einen „location uncertainty value“, kurz LUCY Wert aus [38]. Untersuchungen ergaben, dass die Ungenauigkeit im Falle eines Kopfaufpralles auf die Windschutzscheibe circa das Vierfache des LUCY Wertes ergibt [33]. Dies wurde in einer Master-Thesis in Zusammenarbeit mit diesem Projekt bestätigt.

Zur Bestimmung numerischer Versagensspannungen wird im Rahmen der Kopfaufprallersatzversuche der bestimmter Bruchzeitpunkt und lokalisierte Bruchursprung verwendet. Am Punkt des Bruchursprunges wird im Umkreis des vierfachen Wertes der Ortungsunsicherheit der Mittelwert der zum Bruchzeitpunkt vorhandenen Spannungen der anliegenden Elemente verwendet. Das erläuterte Vorgehen ist in Abb. 62 dargestellt.

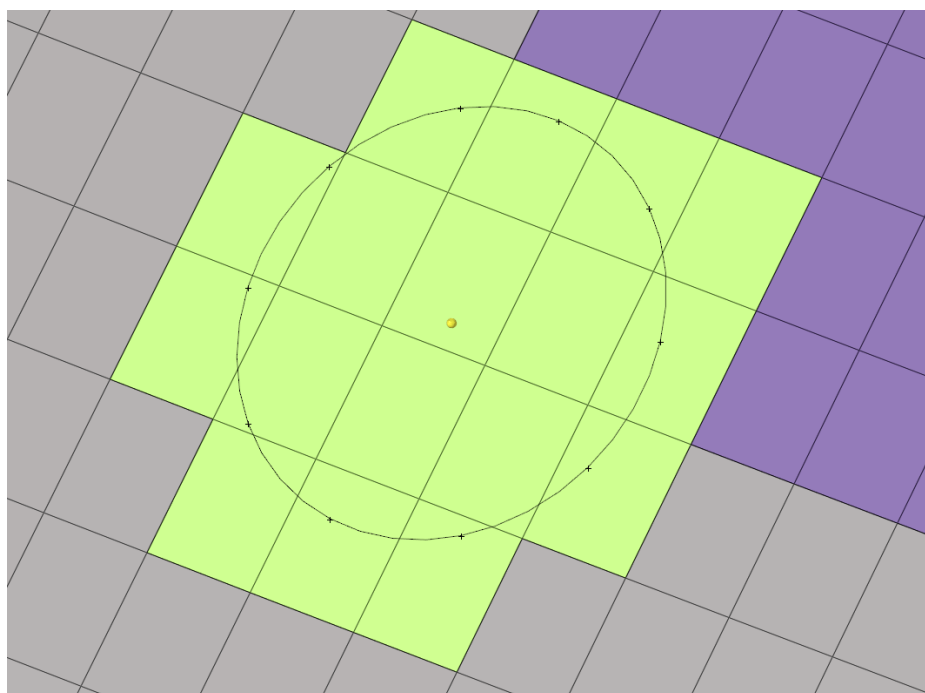


Abb. 61: Prinzip zur Ermittlung von numerischen Versagensspannung am Vergleich des Bruchortes und Zeitpunktes experimenteller Daten mit FE-Simulation. Mittelwert aller Elemente im Bereich der Ortungsungenauigkeit (Kreis) in grün dargestellt.

Die mittels FE-Simulation und Vergleich des durch Schallemissionsanalyse lokalisierten Bruchursprunges ermittelten numerischen Versagensspannungen sind in Tab. 19 dargestellt.

Tab. 19: Zwei Parameter Weibull-Verteilungen der mittels der durch Schallemissionsanalyse lokalisierten Bruchursprünge vorhandenen Spannung der Simulation der Bauteilersatzversuche.

Lagerung Geschwindigkeit	konvex			konkav		
	0,01	0,1	1	0,01	0,1	1
β	124,03	126,54	160,07	138,40	137,97	162,93
λ	3,05	2,39	5,71	4,22	4,15	4,99
Anzahl	30	30	30	30	30	30

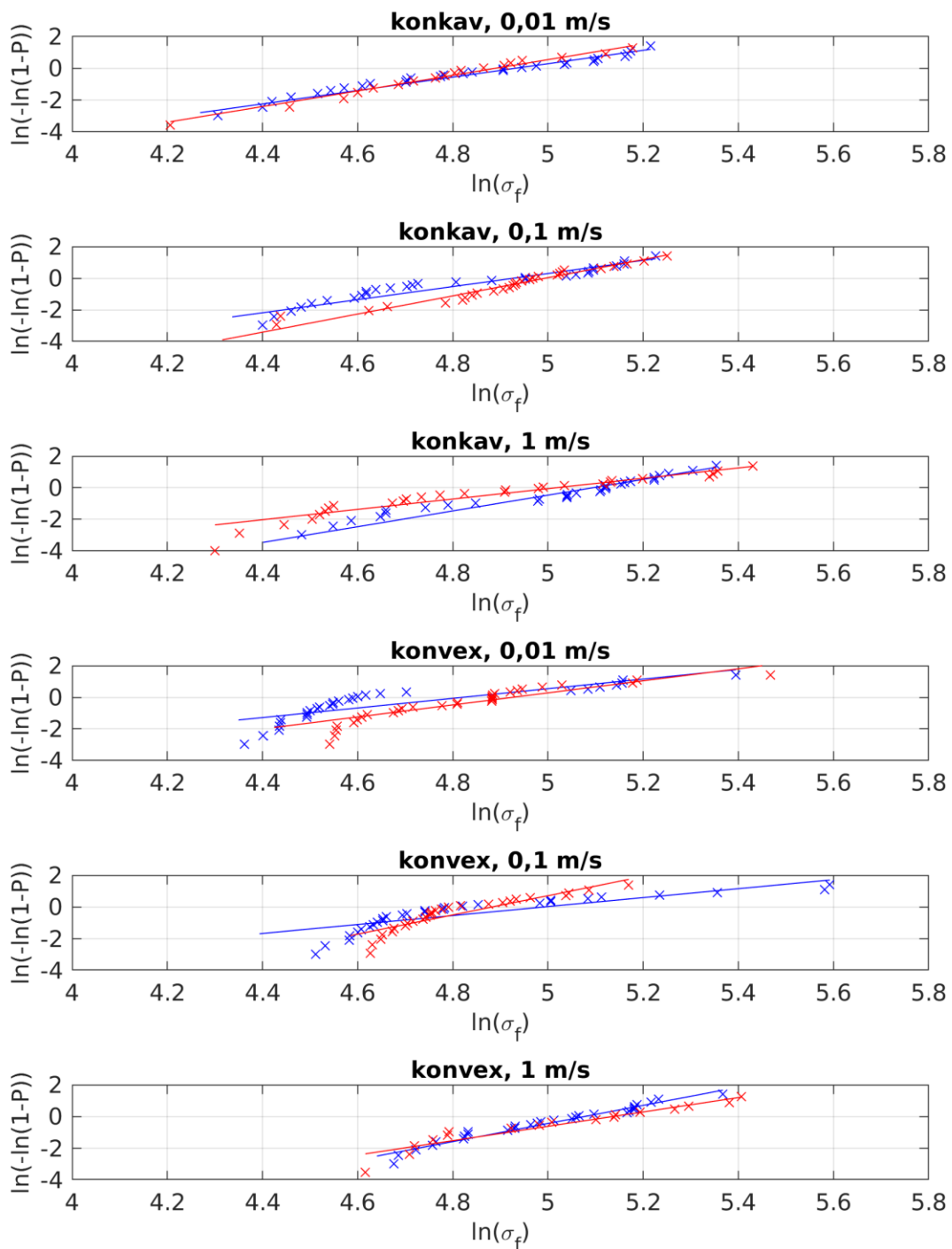


Abb. 62: Vergleich fraktografischer Versagensspannungen (rot) der Kopfaufprallversuche mit den numerischen Werten (blau) am Ort des durch die Schallemissionsanalyse lokalisierten Bruchsprungs.

In Abb. 63 sind die fraktografischen Spannungen aus Tab. 18 den numerischen Werten aus Tab. 19 gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die numerischen und fraktografischen Werte der Versuche mit konkav gelagerter Scheibe korrelieren. Lediglich bei 1 m/s Verfahrensgeschwindigkeit des Impaktors ist eine Abweichung im unteren Bereich zu erkennen. Dies könnte an einer höheren

Ortungsungenauigkeit liegen, die bei höheren Verfahrensgeschwindigkeit zu beobachten war. Der Vergleich der Versagensspannungen in konvexer Lage unterscheidet sich im Vergleich zu den konkaven Werten mehr, jedoch noch in einem akzeptablen Bereich. Da der lokalisierten Versagensursprung oftmals im Bereich der bedruckten Fläche lag, könnte eine Abweichung durch den Einfluss des Siebdruckes auf die fraktografischen Spannungen eine mögliche Ursache sein. Besonders im Bereich niedrigerer Spannungen ist dies ein bereits beobachtetes Phänomen beim Vergleich der Flächen und Kantenfestigkeiten. Die Abweichung fraktographischer Spannungen zu analytischen Gegenwerten wurde bereits in AP 5 in Kapitel 2.6 diskutiert. Die hier beobachtete Krümmung der Versagensspannungen in der Weibull-Ebene für konvexe Versuche wurde ebenfalls bereits in Vorversuchen zu diesem Projekt beobachtet [33] und konnte bis dato nicht erklärt werden.

2.8 AP7 – Stochastische Simulation / Validierung

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 1, Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Mechanik und Materialforschung bearbeitet.

2.8.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

Ziel von AP 7 ist erste stochastische Simulationen der Kopfaufprallerversuche durchzuführen und den Einfluss der Eigenspannungen zu untersuchen. Es wird der allgemeine Einfluss von Eigenspannungen auf die Versagenswahrscheinlichkeit diskutiert und mit Ergebnissen aus den vergangenen Arbeitspaketen verglichen.

Um eine Validationsmöglichkeit für das in AP 8 vorzustellende stochastische Versagensmodell für Glas zu haben, wird Meilenstein 7.2. in AP 8 verschoben. Mit dem stochastischen Versagensmodell werden, bevor Kopfaufprallversuche und deren HIC Werte simuliert werden, die Kopfaufprallerversuche aus AP 6 nachgerechnet und die so erhaltenen Ergebnisse verglichen.

Es wurden folgende Meilensteine für AP 7 definiert:

- MS 7.1.: Der Einfluss der Eigenspannungsverteilungen in den Windschutzscheiben auf den Kopfaufprall und die Notwendigkeit derer Berücksichtigung in der Simulation ist geklärt.
- ~~MS 7.2.: Stochastische Simulationen von Kopfaufprallerversuchstests an Windschutzscheiben sind durchgeführt. Eine Korrelationsfunktion zur Berücksichtigung des Größeneffektes ist erstellt.~~

2.8.2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Eigenspannungen in Glas werden in thermisch und chemisch induzierte Eigenspannungen unterschieden. Die im Rahmen dieses Projektes zu betrachteten Eigenspannungen sind ausschließlich thermisch induzierte Kühlspannungen. Diese entstehen dadurch, dass bei der Abkühlung von Glas der Kern des Materials langsamer kühlt als außenliegende Schichten. Durch diesen Verzug entstehen im Kern des Glases Zug- und in den äußeren Schichten Druckspannungen. Da Risse im Glas nur durch Zugspannungen geöffnet werden können, verzögern diese Druckspannungen das Versagen der Probe, exemplarisch in Abb. 64 dargestellt. Dieser Effekt wird beispielsweise für Einscheibensicherheitsglas (ESG) verwendet. Dort werden die Proben gezielt mit Wasser oder vergleichbaren Medien an der Oberfläche gekühlt.

Liegen die Eigenspannungen im Verhältnis zu den erwartenden Versagensspannungen im vernachlässigbaren Bereich, müssen diese je nach Anwendungsfall nicht zwingend berücksichtigt werden. Dies ist im vorliegenden Fall jedoch nichtzutreffend. Ein anschauliches Beispiel für den Einfluss der Eigenspannungen auf das Bruchverhalten liefern die Kopfaufprallerversuche in

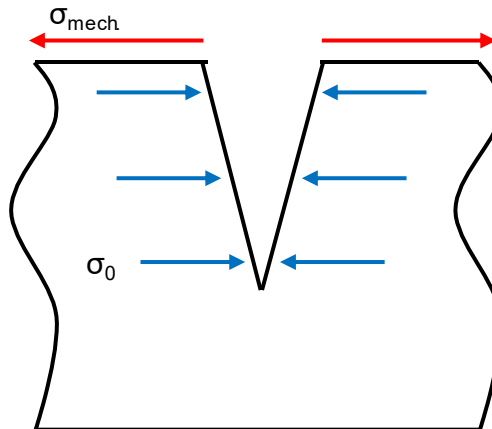


Abb. 63: Darstellung des Einflusses von Eigenspannungen (σ_0) auf die Rissöffnung durch eine mechanische Spannung (σ_{mech})

konvexer Lagerung aus AP 6. In Abb. 58 sind u.a. die Ortungsergebnisse der Versuche in konvexer Lagerung mit 0,1 m/s Verfahrensgeschwindigkeit dargestellt. Das mittels Schallemissionsanalyse lokalisierte initiale Versagen der Scheiben fand ausschließlich im Randbereich mit 2-3 cm Abstand zur Kante statt. Ursache dafür ist, dass die Einzelscheiben im Prozess der Formgebung für die spätere Windschutzscheibe auf einem 2 cm breiten Metallrahmen am Rand gehalten werden, während diese bis unterhalb der Glasübergangstemperatur erwärmt werden. Durch den im Vergleich zur umliegenden Luft deutlich höheren Temperaturgradienten werden so im Randbereich der Windschutzscheiben höhere Eigenspannungen durch Kühlung erreicht. Dies wurde bereits bei Vergleich fraktographischer mit experimentellen Versagensspannungen in AP 5 deutlich. Die Eigenspannungen im Randbereich konnten in AP 1 auf ungefähr 20 MPa bestimmt werden, während das 63,21-Quantil der Kantenfestigkeit sich bei 88,14 MPa für die Außenscheibe und 124,52 MPa für die Innenscheibe befindet.

Voruntersuchungen in [33] sowie im Vergleich fraktographischer und experimenteller Versagensspannungen in AP 5 zeigen, dass die gemessenen Eigenspannungen gut mittels den Bruchspiegelnradien zu den experimentellen Versagensspannung korreliert werden können, weshalb einer Verwendung innerhalb eines stochastischen Versagensmodells nichts entgegenzusetzen ist.

Für Simulationen des Kopfaufpralles und der anschließenden Auswertung der Beschleunigungskurven mittels HIC Wert werden für das Versagen der ersten Scheibe, mittig unterhalb des Impaktors, Versagensspannungen von mehreren hundert Megapascal erwartet. Dort sind nach den Untersuchungen aus AP 1 Eigenspannungen von bis zu 15 MPa in den hier untersuchten Audi A3 Scheiben vorhanden. Zwar mag dieses Verhältnis gering erscheinen, jedoch ist für die Beschleunigungskurven ebenfalls das Versagen der zweiten Scheibe und die Rissausbreitung sowie das Rissmuster von Bedeutung. Diese Faktoren können von den vorherrschenden Eigenspannungen massiv beeinflusst werden, weshalb die Eigenspannungen nicht vernachlässigbar sind.

2.9 AP8 – Erarbeitung einer effizienten Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas in der Crashsimulation

Dieses Arbeitspaket wurde durch die Forschungsstelle 1, Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Mechanik und Materialforschung bearbeitet.

2.9.1 Allgemeine Beschreibung und Ziel des Arbeitspaketes

In der Beantragung dieses Projektes war es angedacht, die in AP 6 durchgeführten Kopfaufprallersatzversuche zur Bestimmung des Größen- und Geschwindigkeitseinflusses auf das Versagen von Glas zu untersuchen. Mit den dadurch gewonnenen Erkenntnissen und den Versagensverteilungen der Doppelring-Biegeversuche sowie Vier-Punkt-Biegeversuche sollten Rückschlüsse auf das stochastische Bruchverhalten der Audi A3 Windschutzscheiben im Falle eines Kopfaufpralles auf diese gezogen werden.

Während der Bearbeitung des Projektes und der regen Rücksprache mit den beteiligten Unternehmen wurde klar, dass ein Versagensmodell ebenfalls weitere Geometrien und Belastungsgeschwindigkeiten abbilden können sollte, um zukünftige Lastfälle zu simulieren. Bedingt durch eine mögliche breitere Anwendung eines stochastischen Versagensmodells wurde die Gliederung umstrukturiert.

Im weiteren Verlauf wird das im Rahmen dieses Projektes erarbeitete stochastische Versagensmodell vorgestellt. Es wurden parallel zu den in diesem Projekt beantragten Versuchen weitere Versuche durchgeführt, um das zu entwickelnde Modell validieren zu können. Die Kopfaufprallersatzversuche aus AP 6 werden numerisch nachgebildet, der Ort des Bruchursprung, der Verfahrweg bei Versagen und die Bruchspannung der Versuche und Simulationen wird verglichen. Das vorzustellende Modell kann dadurch zeigen, dass es in Abhängigkeit von Größen und Geschwindigkeitseffekten das Versagen von Windschutzscheiben auf Vier-Punkt-Lagerung nachbilden kann.

Abschließend wird der aktuelle Stand des Modells und dessen Implementierung in den kommerziellen Finite Elemente Solver Radioss aufgezeigt. Dabei werden die Kopfaufprallersatzversuche unter hohen Belastung Geschwindigkeiten nachgebildet um anschließend den realen Kopfaufprall eines Fußgängers auf die Windschutzscheibe und die daraus resultierende Verletzungswahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Es wurden folgende Meilensteine definiert:

- MS 7.2.: Stochastische Simulationen von Kopfaufprallersatztests an Windschutzscheiben sind durchgeführt. Eine Korrelationsfunktion zur Berücksichtigung des Größeneffektes ist erstellt.
- MS 8.: Die finalen Verteilungsfunktionen sind bezüglich Größen- und Geschwindigkeitsabhängigkeit für alle Bereiche aufgearbeitet und stochastische Simulationen des Kopfaufpralls sind durchgeführt. Eine Berechnungsvorschrift ist erstellt.

Diese werden in der folgenden Gliederung bearbeitet:

- 2.9.2.: Stochastische Versagensmodell
- 2.9.3.: Modellvalidierung
- 2.9.4.: Kopplung Nachbruchverhalten
- 2.9.5.: Stochastische Berechnungsmethodik für Crashsimulationen
- 2.9.6.: Sensitivitätsanalyse des Kopfaufpralles

➤ 2.9.7.: Zusammenfassung und Fazit

2.9.2 Stochastisches Versagensmodell

Das vorzustellende Versagensmodell orientiert sich an den physikalischen Vorgängen, welche zum stochastischen Bruchverhalten von Glas führen. Während einer mechanischen Belastung von Glas, bevor dieses schlagartig versagt, wachsen auf der Oberfläche des Glases Risse subkritisch [39]. Diese Risse sind in ihrer Länge und Geometrie annähernd zufällig verteilt, was dazu führt, dass ebenfalls die Versagensspannung von Glas stochastisch verteilt ist [5]. Ein physikalisch motiviertes, stochastisches Versagensmodell sollte dementsprechend initiale Risse auf FE-Elemente verteilen können, welche nach der Initialisierung subkritisch wachsen, bis die Kombination aus anliegender Spannung und Risslänge zum Versagen führt.

Das im folgenden vorzustellende Modell berechnet initiale Risslängen ausgehend von der Versagensspannung, die aus Doppelring-Biegeversuchen stammen. Diese Risse wachsen je nach Belastungsform, bis die Kombination aus anliegender Spannung und Risslänge zum Versagen führt.

2.9.2.1 Herleitung initialer Risslängen

Wird die Geschwindigkeit des subkritischen Risswachstums als Funktion der Spannungsintensität K_I dargestellt, durchläuft diese vier Regionen [39]. Die Spannungsintensität

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a} \tag{4}$$

wird mittels der anliegenden Spannung am Riss σ , dem Geometrie-Korrektor-Faktor Y und der aktuellen Risslänge a definiert. In Abb. 65 sind Kurven der subkritischen Risswachstumsgeschwindigkeit abgebildet. Auf dem linken Teilbild ist der Einfluss der an der Risspitze vorhandenen Feuchtigkeit dargestellt, an dem zu erkennen ist, dass die Risswachstumsgeschwindigkeit vier Bereiche durchläuft [39]. Es ist zu sehen, dass die Kurven nach einem linearen Bereich, dem Bereich I, in eine Sättigung übergehen, dem Bereich II. Kurz vor Erreichen der kritischen Spannungsintensität K_{IC} , welche das Versagen definiert, wird Bereich III erreicht. Bereich 0 liegt un-

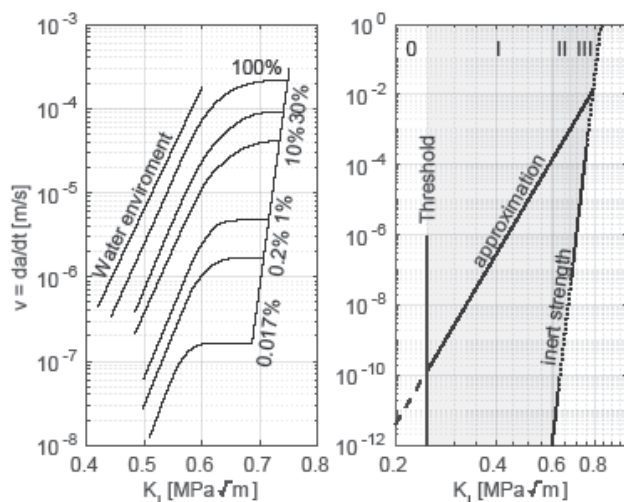


Abb. 64: Subkritische Risswachstumsgeschwindigkeit in Glas als Funktion der Spannungsintensität. Links: Messwerte von [39] übertragen von [54]. Rechts: Lineare Approximation nach Gl. (5). [46]

terhalb dieser Bereiche des subkritischen Risswachstums, innerhalb dessen kein Wachstum stattfindet [40] [41]. Da das Risswachstum zeitlich am längsten in Bereich I stattfindet, wird für

ingenieurtechnische Anwendungen häufig eine lineare Approximation der Bereiche I bis III vorgenommen. In dieser linearen Approximation wird die Geschwindigkeit des subkritischen Risswachstums v mit zwei Risswachstumsparameter, dem Risswachstumsexponenten n und der maximalen Rissgeschwindigkeit v_0 als Funktion der Spannungsintensität über

$$v = \frac{da}{dt} = v_0 \left(\frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^n \quad (5)$$

formuliert [42] [43]. Bei Annahme, dass die lineare Approximation über den gesamten Bereich des subkritischen Risswachstums gültig ist und durch separieren der Variablen, kann die folgende Formulierung aufgestellt werden:

$$a^{\frac{n}{2}} da = v_0 \left(\frac{Y\sigma\sqrt{\pi}}{K_{Ic}} \right)^n dt \quad (6)$$

Wird weiter davon ausgegangen, dass ein Riss von der initialen Belastung ($t = 0$) bis zum Zeitpunkt des Versagens ($t = t_f$) von seiner anfänglichen Länge a_i auf eine kritische Risslänge a_f wächst, kann Gl. (6) zu

$$\int_{a_i}^{a_f} a^{-\frac{n}{2}} da = v_0 K_{Ic}^{-n} Y^n \pi^{\frac{n}{2}} \int_{t_0}^{t_f} \sigma(t)^n dt \quad (7)$$

umgestellt werden.

Zwar ist die linke Seite in Gl. (7) trivial zu lösen, daher kann der Spannungsverlauf $\sigma(t)$ nicht a-priori bekannt sein für die meisten Anwendungsfälle. Eine weitere Annahme ist, dass der Geometrie-Korrektur-Faktor Y zeitlich unverändert bleibt. Zum aktuellen Wissenstand der Autoren wurde der Geometrie-Korrektur-Faktor und dessen Evolution während des subkritischen Wachstums von Rissen in Glas nicht vollständig untersucht. Der Geometrie-Korrektur-Faktor ist nötig, da die Herleitung der Spannungsintensität von einem Riss in einer endlosen Platte ausgeht.

Für geradlinige Risse an einer Oberfläche, die wesentlich kleiner als die Dicke des umliegenden Mediums sind, kann $Y = 1.122$ angenommen werden [44]. $Y = 1.122$ wurde zuerst von [45] verwendet und anschließend in mehreren Untersuchungen und Versagensmodellen für Glas benutzt [34] [46] [47] [48]. In [47] ist eine Übersicht der Geometrie-Korrektur-Faktoren für unterschiedliche Schädigungsformen in Glas zu sehen. Beispielsweise sei erwähnt, dass bei Schädigung mit Schleifpapier ein Geometrie-Korrektur-Faktor von $Y = 0.999$ erreicht wird [49] oder bei einer Vorschädigung mittels Vickers Härteprüfverfahren ein Rissystem mit Geometrie-Korrektur-Faktor $Y = 0.666$ entsteht [49]. Die Entwicklung des Geometrie-Korrektur-Faktors für Risse, induziert durch einen Vickers Diamanten, kann in [50] [46] nachgelesen werden.

Dennoch sollte bei Verwendung eines über die Rissentwicklung konstanten Geometrie-Korrektur-Faktors stets der Ursprung des Risses bedacht werden. Für Windschutzscheiben, welche ohne Sonderbehandlungen aus der Fertigung eines Herstellers kommen und über sogenannte „natürliche“ Risse verfügen, kann $Y = 1.122$ zunächst als valide angenommen werden [47].

Um in Gl. (7) den zeitlichen Verlauf der Spannungen integrieren zu können, wird angenommen das der Spannungsverlauf aus einem Doppelring-Biegeversuch stammt. Doppelring-Biegeversuche werden mit einer konstante Spannungsrate durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit der erhaltenen Versagensspannungen miteinander zu ermöglichen. Wird dementsprechend angenommen, dass die Spannungsrate $\dot{\sigma}$ konstant ist, kann der zeitliche Spannungsverlauf $\sigma(t)$ in Gl. (7) als Produkt der Spannungsrate und der Zeit bis zum Versagen $\sigma(t) = \dot{\sigma} t_f$ dargestellt und zu

$$\frac{2}{n-2} \left(-a_f^{1-\frac{n}{2}} + a_i^{1-\frac{n}{2}} \right) = v_0 K_{Ic}^{-n} Y^n \pi^{\frac{n}{2}} \dot{\sigma}^n \frac{t_f^{n+1}}{n+1} \quad (8)$$

integriert werden.

Wenn nun die Zeit bis zum Versagen t_f mit der Versagensspannung σ_f durch eine Erweiterung mit der Spannungsrate $\dot{\sigma}$ durch

$$\sigma_f^{n+1} \dot{\sigma}^{-1} = \dot{\sigma}^n t_f^{n+1} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma}, \quad (9)$$

substituiert wird, kann die Zeit bis zum Versagen, welche oftmals nicht bekannt ist, ersetzt werden, wodurch sich aus Gl. (8) folgende Formulierung ergibt:

$$\frac{2}{n-2} \left(-a_f^{1-\frac{n}{2}} + a_i^{1-\frac{n}{2}} \right) = v_0 K_{Ic}^{-n} Y^n \pi^{\frac{n}{2}} \dot{\sigma}^{-1} \frac{\sigma_f^{n+1}}{n+1} \quad (10)$$

Durch Umstellung von Gl. (10) kann die initiale Risslänge a_i durch

$$a_i = \left[\frac{n-2}{2(n+1)} v_0 K_{Ic}^{-n} Y^n \pi^{\frac{n}{2}} \dot{\sigma}^{-1} \sigma_f^{n+1} + a_f^{1-\frac{n}{2}} \right]^{-\frac{2}{n-2}} \quad (11)$$

erzielt werden.

Für die Versagensspannung muss noch der Einfluss der Eigenspannungen berücksichtigt werden. Wird beispielsweise während eines Doppelring-Biegeversuches die Versagensspannung aus der an der Maschine gemessenen Kraft berechnet, beinhaltet diese die Spannung zur Rissöffnung σ_{cos} inklusive der anliegenden mechanischen Spannung, die nötig ist, um die Eigenspannungen im Glas σ_0 zu überwinden. Da während der anfänglichen Phase der Belastung, wenn die anliegende mechanische Spannung geringer als die Eigenspannungen im Glas ist, kein Risswachstum stattfindet, müssen die Eigenspannungen von der Versagensspannung in Gl. (11) abgezogen werden. Mit der Betrachtung der Eigenspannungen und der Substitution der kritischen Risslänge a_f mittels der kritischen Spannungsintensität K_{Ic} nach Gl. (4) kann die initiale Risslänge final über

$$a_i = \left[\frac{n-2}{2(n+1)} v_0 K_{Ic}^{-n} Y^n \pi^{\frac{n}{2}} \dot{\sigma}^{-1} (\sigma_f - \sigma_0)^{n+1} + \left(\frac{K_{Ic}^2}{Y^2 (\sigma_f - \sigma_0)^2 \pi} \right)^{1-\frac{n}{2}} \right]^{-\frac{2}{n-2}} \quad (12)$$

bestimmt werden.

Der Vorteil dieser neuartigen Formulierung liegt darin, dass mit Ausnahme des Geometrie-Korrektur-Faktors Y nur bereits in der Literatur für verschiedenste Glassorten vorhandene Parameter verwendet werden. Eine Auflistung dieser Parameter und die im Rahmen dieser Veröffentlichung verwendeten Werte für Kalk-Natron-Silikat Glas sind in Tab. 20 dargestellt.

Das Verhalten des Risswachstumsexponenten n und der maximalen Rissgeschwindigkeit v_0 in Abhängigkeit der Umweltbedingungen wurde im Rahmen dieses Projektes in [46] bereits veröffentlicht. Die kritische Spannungsintensität K_{Ic} wurde in mehreren Veröffentlichungen für Kalk-Natron-Silikat Glas ermittelt, wobei die Werte im Bereich von 0,72 bis 0,8 schwanken. Häufig kommt der Wert von 0,75 für Kalk-Natron-Silikat Glas zur Anwendung, was auch im Rahmen dieses Projektes geschieht [34] [48]. Die nötige Spannungsrate $\dot{\sigma}$ muss der Spannungsrate entsprechen, mit derer die Versagensspannungen σ_f in Doppelring-Biegeversuchen ermittelt worden ist.

Tab. 20: Werte zur Berechnung initialer Risslängen aus Doppelring-Biegeversuchen (DRB). Angegebene Werte sind recherchierte oder im Rahmen des Projektes bestimmte Werte für Kalk-Natron-Silikat Glas in Windschutzscheiben bei Raumtemperatur.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Quelle
Risswachstumsexponent	n	15.098	-	[46]
maximale Rissgeschwindigkeit	v_0	10.22	mm/s	[46]
kritische Spannungsintensität	K_{Ic}	0.75	MPa \sqrt{m}	[34] [48]
Spannungsrate DRB	$\dot{\sigma}$	2	MPa/s	[28]
Geometrie-Korrektur-Faktor	Y	1.122	-	[45]
Versagensspannung DRB	σ_f	-	MPa	Via DRB
Eigenspannung DRB	σ_0	-	MPa	Via DRB

Um eine stochastische Streuung der initialen Risslängen zu gewährleisten, muss die für Gl. (12) zu verwendende Versagensspannungen für jedes FE-Element einer stochastischen Streuung unterliegen. Hierfür kann die Inverse einer Verteilung von Versagensspannungen aus Doppelring-Biegeversuchen verwendet werden, mit $P \in [0,1)$ als gleichverteilte Zufallszahl. Häufig wird die zwei Parameter Weibull-Verteilung

$$P(\sigma_f; \lambda, \beta) = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_f}{\beta}\right)^\lambda \quad (13)$$

mit den Verteilungsparameter β und λ , wie bereits in den vorherigen Arbeitspaketen angeführt, verwendet. Neuere Überlegungen im Bereich des Bruchverhaltens von Glas diskutieren einen weiteren Parameter, der eine untere Grenze der Versagensspannungen einführt. Bei Verwendung der Weibull-Verteilung nach Gl. (13) können unrealistische Spannungswerte gegen null auftreten. Da dies durch heutige Fertigungsverfahren und Qualitätskontrollen auszuschließen ist, kann die left-truncated Weibull-Verteilung für Glas ebenfalls in Betracht gezogen werden, um die Festigkeit von Glas zu beschreiben [51]. Die left-truncated Weibull-Verteilung unterscheidet sich von Gl. (13) durch Erweiterung um eine untere Grenze τ zu

$$P(\sigma_f; \lambda, \beta, \tau) = 1 - \exp\left(\frac{\tau}{\beta} - \frac{\sigma_f}{\beta}\right)^\lambda. \quad (14)$$

Bei Betrachtung des Verfahrenswegs zum Zeitpunkt des Versagens der Scheibe aus den Kopfaufprallversuchen in AP 6 wird deutlich, dass ein Versagen erst ab einer gewissen Grenze auftritt, unterhalb derer keine Scheibe versagt ist. Aus diesem Grund wird für kommende stochastische Simulationen die left-truncated Weibull-Verteilung verwendet.

Um Unterschiede in der Kantenlänge der FE-Elemente und verschiedene Größen der zu simulierenden Oberfläche zu berücksichtigen, muss auch der Größeneffekt für Glas berücksichtigt werden. Mit zunehmender Oberfläche steigt durch die stochastische Natur der auf ihr behafteten Risse ebenfalls die Wahrscheinlichkeit einen tieferen Riss und damit eine niedrigere Versagensspannung zu haben. Bevor für jedes FE-Element die Versagensspannung aus der Inversen von Gl. (14) gezogen werden kann, muss daher zunächst der Skalenparameter β mittels Weibull Oberflächenshift nach

$$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{A_{DRB}}{A_{Element}}\right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (15)$$

angepasst werden. Dies geschieht mit Hilfe des Flächeninhalts des FE-Elements $A_{Element}$, dem Flächeninhalt, der während der Doppelring-Biegeversuche verwendet wurde A_{DRB} und dem Lageparameter der Eingangsverteilung λ .

Um mögliche Richtungsabhängigkeiten im Festigkeitsverhalten von Glas untersuchen zu können, erhält jeder Riss einen gleichverteilten Winkel ϕ zur Abszisse zwischen null und π . Entstehen die tiefsten Risse in Scheiben einer Produktionslinie zum Beispiel durch eine beschädigte Rolle im Förderband, kann dies zur Folge haben, dass die größten Risse eine Vorzugsrichtung haben und dementsprechend das Versagen ebenfalls richtungsabhängig ist. Dies kann in weiteren Untersuchungen mittels des Risswinkels berücksichtigt werden.

Mit der aufgezeigten Formulierung für initiale Risslängen und der Verwendung Weibull verteilter Versagensspannung als Eingabewert lässt sich für jedes FE-Element zur Initialisierung der Simulation eine initiale Risslänge berechnen. Vorteilhaft ist, dass für unterschiedliche Grundgesamtheiten (Kante, Bedruckung, etc.) sich unterschiedliche Eingangsverteilungen der Versagensspannung formulieren lassen. Dies ermöglicht es, unterschiedlichste Festigkeitsbereiche der Windschutzscheibe definieren zu können, um so möglichst realitätsnahe Simulationen zu erhalten.

2.9.2.2 Versagensformulierung

Die im vorherigen Abschnitt in ihrer Länge zufällig auf die Elemente der FE-Simulation verteilten Risse wachsen in Abhängigkeit ihrer Belastung subkritisch, bis die kritische Spannungsintensität K_{Ic} , als Kombination aus anliegender Spannung und Risstiefe erreicht wird. Die anliegende Rissöffnungsspannung σ_{cos} kann über die geometrische Beziehung zwischen den Spannungen in x und y Richtung (σ_x , σ_y) sowie der Schubspannung τ_{xy} für jeden Zeitschritt m unter Zuhilfenahme des Risswinkels ϕ mittels

$$\sigma_{cos,m} = \frac{\sigma_{x,m} + \sigma_{y,m}}{2} + \frac{\sigma_{x,m} - \sigma_{y,m}}{2} \cos(2\phi) + \tau_{xy,m} \sin(2\phi) - \sigma_0 \quad (16)$$

berechnet werden. Mögliche vorhandene Eigenspannungen σ_0 , welche in AP 1 diskutiert wurden, müssen von der Rissöffnungsspannung subtrahiert werden. Die Ausrichtung eines Risses in einem Element ist exemplarisch in Abb. 66 dargestellt.

Bei der im Rahmen dieses Projektes verwendeten Annahme für Eigenspannungen wird davon ausgegangen, dass Diese über die gesamte Risslänge konstant sind. Wie bereits diskutiert, wirken durch thermische Eigenschaften des Glases bei dem Abkühlen im Kern des Glases Zug- und in den Randschichten Druckspannungen. Bei den im Rahmen dieses Projektes betrachteten Festigkeiten werden initiale Risslängen berechnet, die im Verhältnis zum Durchmesser der Glasscheiben

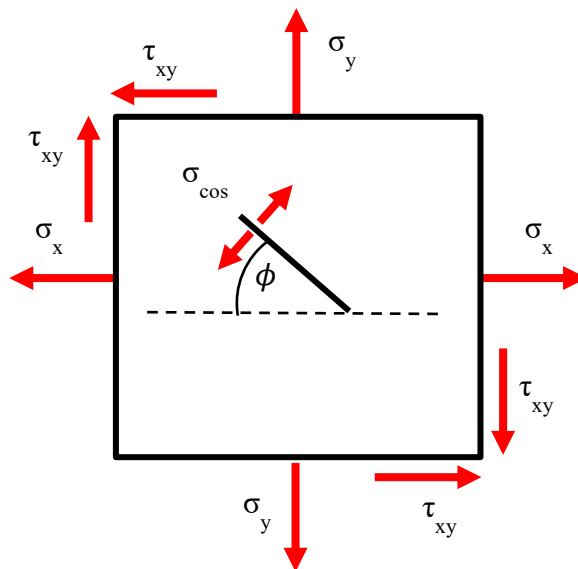


Abb. 65: Exemplarische Darstellung eines Shell-Elements mit innenliegendem Riss

innerhalb der Windschutzscheibe im vernachlässigbar kleinen Bereich sind. In diesem kann angenommen werden, dass die Eigenspannungen konstant sind. Sollte dieses Modell für dünnere Gläser oder chemisch vorgespannte Gläser zur Anwendung kommen, muss die Eigenspannung als Funktion der Risstiefe bestimmt werden.

Mit der bekannten Rissöffnungsspannung σ_{cos} und der linearen Approximation der subkritischen Risswachstumsgeschwindigkeit nach Gl. (5) kann das zum aktuellen Zeitschritt m erzeugte Rissinkrement da_m über(4)

$$da_m = dt v_0 \left(\frac{Y \sigma_{cos,m} \sqrt{\pi a_{m-1}}}{K_{Ic}} \right)^n \quad (17)$$

mit dem Zeitschritt dt , dem Risswachstumsexponenten n , der maximalen Rissgeschwindigkeit v_0 , dem Geometrie-Korrektur-Faktor Y , sowie der im letzten Zeitschritt ermittelten Risslänge a_{m-1}

berechnet werden. Die neue Risslänge erfolgt über Addition des Inkrements auf die vorherige Risslänge:

$$a_m = a_{m-1} + da_m. \quad (18)$$

Risswachstum findet nur statt, wenn die untere Schwelle für Risswachstums K_{th} überschritten wurde. Das Versagen des Elementes findet statt, wenn die kritischen Spannungsintensität K_{Ic} erreicht wird. Risswachstum findet daher im Bereich $K_{th} \leq K_I < K_{Ic}$ statt.

Es sei angemerkt, dass das vorgestellte Modell für das Nachbilden des initialen Versagens von Glas angedacht ist, da eben dieses Versagen stochastisch streut, bedingt durch die zufällige Verteilung initialer Risse. Sobald das Wachstum eines Risses in den kritischen Bereich übergeht steht mehr elastische Energie zur Verfügung als benötigt wird um zwei neue Bruchflächen durch das Wachstum eines Risses zu erschaffen. Dies ist eine vom subkritischen Risswachstum verschiedene Mechanik, die im Rahmen dieses Projektes nicht betrachtet wurde. Um das Nachbruchverhalten für Kopfaufprallversuche abbilden zu können, ist eine Kopplung des hier vorgestellten Modells mit dem Modell entstanden über das FAT Vorgängerprojekt „Experimentelle und numerische Untersuchungen von Windschutzscheiben unter stoßartiger Belastung zur Verbesserung des Fußgänger- und Insassenschutzes“ [1] der Arbeitsgruppe „Modellierung von Verbundsicherheitsglas“ geplant, welches bereits veröffentlicht ist [34] und im kommerziellen FE-Solver Radioss implementiert wurde.

2.9.3 Modellvalidierung

Die Validierung des Modells unterteilt sich in zwei Bereiche: Zunächst wird das Modell auf seine Fähigkeit bei unterschiedlichen Kantenlänge der Elemente innerhalb einer FE-Simulation gleiche Ergebnisse reproduzieren zu können untersucht. Anschließend wird geprüft, ob der Einfluss der betrachteten Größe einer Scheibe und die Belastungsgeschwindigkeit auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Glas korrekt abgebildet werden können.

Im Anschluss daran werden die in AP 6 durchgeführten Kopfaufprallersatzversuche simuliert und die experimentellen Versagensgrößen mit dem berechneten Werten des hier vorgestellten Versagensmodells verglichen.

Abschließend wird der Arbeitsstand zur Implementierung in den kommerziellen FE-Solver Radioss der Firma Altair aufgezeigt. Im Zuge dessen die Kopfaufprallersatzversuche mit freifliegendem Impaktor mit einer Geschwindigkeit bei Impact von 10 m/s sowie Simulationen mit einer im Rahmen eingeklebten Scheibe in Anlehnung an EuroNCAP [52] gezeigt. Das vorzustellende Modell wurde im kleineren Umfang bereits auf einer internationalen Tagung präsentiert [53].

2.9.3.1 Validierung anhand Kleinversuche

Die Validation des stochastischen Versagensmodells basiert auf der Kantenlänge der verwendeten finiten Elemente und den Haupteinflussfaktoren auf das Versagensverhalten von Glas, dem Einfluss der betrachteten Oberfläche und der Belastungsgeschwindigkeit.

2.9.3.1.1 Abhängigkeit Diskretisierung

Zuerst wird die Abhängigkeit vom gewählten Mesh betrachtet, indem eine Simulation mit konstanter Gesamtfläche aber unterschiedlicher Diskretisierung durchgeführt wird, welches exemplarisch für eine Diskretisierung mit 1x1 und 2x2 Elementen in Abb. 67 dargestellt ist.

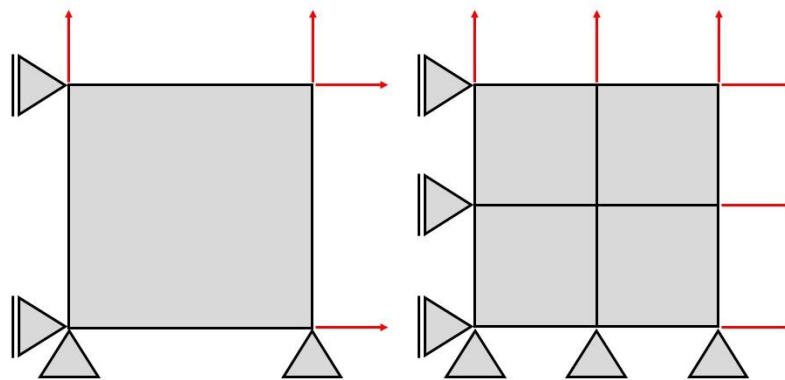


Abb. 66: Darstellung der Simulation zur Untersuchung des Einflusses der Kantenlänge auf die zu erwartende Versagensspannung. Gezeigt ist eine Diskretisierung mit 1x1 und 2x2 Elementen.

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass bei gleichbleibender Fläche auch die zu erwartende Zielverteilung, die der Eingangsverteilung entspricht und nicht über die Weibull Oberflächenkorrektur korrigiert werden muss (vgl. Gl. (15)), was zusätzliche Störgrößen vermeidet. Für die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Simulationen bei unterschiedlicher Diskretisierung wurden für die zwei Parameter Weibull-Verteilung und die left-truncated Weibull-Verteilung Diskretisierungen von 1x1, 2x2, 4x4 und 10x10 Elementen für eine Fläche von 100 mm² vorgenommen, mit 500 Simulationen je Stichprobe. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tab. 21 dargestellt.

Tab. 21: Ergebnisse der Simulationen zur Bestimmung der Abhängigkeit der Elementkantenlänge. Als Eingabeverteilung diente für die zwei Parameter Weibull-Verteilung $\beta = 100$ MPa, $\lambda = 5$ und zusätzlich für die left-truncated Weibull-Verteilung $\tau = 50$ MPa bei einer Prüffläche von jeweils 100 mm².

Diskretisierung	Kantenlänge [mm]	β [MPa]	λ [-]	τ [MPa]
Zwei Parameter Weibull-Verteilung:				
1x1	10	100,63	4,87	-
2x2	5	102,56	5,06	-
4x4	2,5	100,57	5,13	-
10x10	1	99,60	4,93	-
Left-truncated Weibull-Verteilung:				
1x1	10	100,63	5,30	56,58
2x2	5	101,39	5,14	53,58
4x4	2,5	99,86	4,74	49,92
10x10	1	101,79	4,98	51,88

Zu erkennen ist, dass die berechneten Verteilungen im akzeptablen Rahmen abweichen. Die erhaltenen Abweichungen liegen im Bereich der Streuung des Parameterschätzers. Ebenfalls ist kein systematischer Fehler zu beobachten. Demnach kann ein Einfluss der Kantenlänge auf die Versagensspannungen ausgeschlossen werden.

2.9.3.1.2 Größeneffekt

Um das stochastische Bruchverhalten von Glas korrekt darstellen zu können, muss auch der Größeneffekt als Regularisierung betrachtet werden. Bei zunehmender Oberfläche und somit auch Anzahl an Mikrodefekten, steigt ebenfalls die Wahrscheinlichkeit einen tieferen Defekt und damit eine geringere Versagensspannung zu erhalten. Analytisch kann der Größeneffekt über die Weibull Oberflächenkorrektur mit

$$\sigma_2 = \sigma_1 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^\lambda \quad (19)$$

berücksichtigt werden. Es werden die jeweiligen Versagensspannungen $\sigma_{1/2}$ und die zugehörige Prüffläche $A_{1/2}$ sowie der Weibull Lageparameter der Ausgangsverteilung λ benötigt. Für das vorliegende Versagensmodell wurden Simulationen mit einem quadratischen Element verschiedener Größen durchgeführt. Insgesamt konnten 1000 Simulationen mit einer Eingangsverteilung von $\beta = 100$ MPa, $\lambda = 5$ und einer korrespondierenden Fläche von 100 mm^2 durchgeführt werden. Als Spannungsrate wurde 2 MPa/s gewählt.

Die berechneten Versagensspannungen wurden auf ihre Verteilung mittels zwei Parameter Weibull-Verteilung untersucht. In Tab. 22 sind die berechneten Skalenparameter der Weibullverteilung und der Vergleich zur analytischen Lösung mittels Gl. (19) dargestellt. Es ist zu sehen, dass das stochastische Versagensmodell ebenfalls den Einfluss verschiedener Größen der zu simulierenden Oberfläche mit einer maximalen Abweichung des Skalenparameter von unter zwei Prozent darstellen kann. Ebenfalls kann kein systematischer Fehler beobachtet werden, der darauf hinweist, dass sich bei weiterer Vergrößerung der gesamten Oberfläche eine größere Abweichung einstellt.

Tab. 22: Ergebnisse der Ein-Element-Tests mit verschiedenen Oberflächen und Vergleich des berechneten Weibull Skalenparameters mit der analytischen Lösung der Weibull Oberflächenkorrektur.

Oberfläche [mm ²]	Simulationen	$\beta_{\text{num.}}$ [MPa]	$\beta_{\text{ana.}}$ [MPa]	Abweichung [%]
25	1000	133,51	131,95	-1,18
50	1000	116,77	114,87	-1,65
100	1000	100,63	100,00	-0,63
200	1000	87,96	87,06	-1,03
350	1000	79,17	77,84	-1,71
500	1000	73,27	72,48	-1,09
650	1000	69,24	68,77	-0,68
800	1000	66,16	65,98	-0,27
1000	1000	64,24	63,10	-1,81

2.9.3.1.3 Ratenabhängigkeit

Da die Rate der am Riss anliegenden Spannung das Versagen ebenfalls maßgeblich beeinflusst, muss die Spannungsrate ebenfalls zur Validierung berücksichtigt werden. Um Vergleichswerte für numerische Ergebnisse zu erhalten, wurden 300 Doppelring-Biegeversuche zusätzlich zu denen im Projekt beantragten Versuchen durchgeführt. Bei Spannungsraten von $0,2$; 2 und 20 MPa/s wurden je 100 Proben geprüft. Die Proben bestehen ebenfalls aus Kalk-Natron-Silikat Glas,

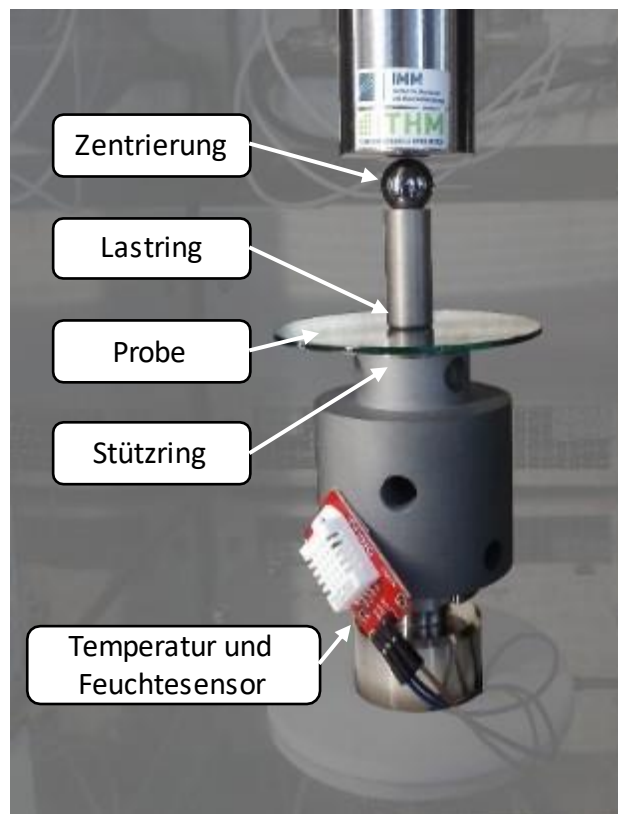


Abb. 67: Aufbau des Doppelring-Biegeversuchs innerhalb der Klimakammer.

welches zur Produktion von Windschutzscheiben angedacht war. Alle Proben wurden vor der Prüfung auf 520°C erhitzt und mit maximal 2 K/min abgekühlt, um während der Produktion entstandene Kühlspannungen zu entfernen. Dies wurde mittels Streulichtpolariskop verifiziert. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von 25°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % innerhalb einer Klimakammer durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 68 dargestellt.

Von 300 Versuchen können 135 als gültig angesehen werden, da das Versagen innerhalb des Lastringes auftrat. Tab. 23 zeigt die Matrix der Doppelring-Biegeversuche sowie die geschätzten Parameter einer zwei Parameter Weibull-Verteilung für die experimentellen Werte. Ebenfalls sind die Parameter einer zwei Parameter Weibull-Verteilung der numerischen Versagenswerte dargestellt. Für alle drei Spannungsraten wurde als Eingabewert die experimentelle Verteilung, welche bei 2 MPa/s verwendet. Abb. 69 zeigt die grafische Darstellung der experimentellen Werte sowie die Weibull-Verteilungen der numerischen Versagenswerte.

Tab. 23: Experimentelle Matrix der Doppelring-Biegeversuche bei unterschiedlichen Spannungsraten. Ebenfalls sind die geschätzten Parameter der experimentellen und numerischen Versagensspannungen aufgeführt.

$\dot{\sigma}$ [MPa/s]	Gültige Versuche	$\beta_{exp.}$ [MPa]	$\lambda_{exp.}$ [-]	Simulationen	$\beta_{num.}$ [MPa]	$\lambda_{num.}$ [-]
0,2	35 (100)	233,39	5,14	200	249,22	4,13
2	55 (100)	285,15	4,01	200	287,45	4,13
20	45 (100)	340,15	4,45	200	331,07	4,10

Zu sehen ist, dass die experimentellen Versagensspannungen bei 2 MPa/s und 20 MPa/s in guter Übereinkunft reproduziert werden können. Bei einer Rate von 0,2 MPa/s überschätzt das hier zu

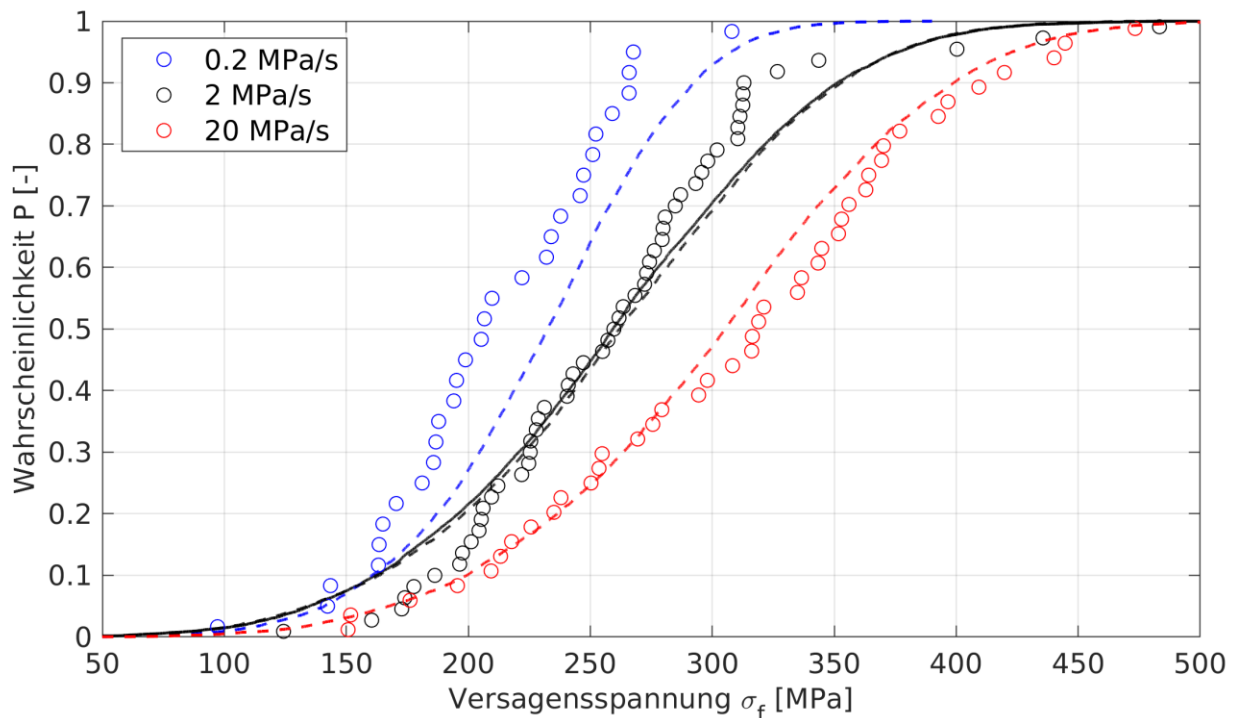


Abb. 68: Experimentelle Werte (Kreis) in Abhängigkeit der Spannungsrate während der Doppelring-Biegeversuche. Die Versagensverteilung der experimentellen Daten welche bei $\dot{\sigma} = 2$ MPa/s ermittelt wurden (durchgezogene Linie) dienen als Eingabe zur Ermittlung der numerischen Versagensverteilungen (gestrichelte Linien).

validierende Versagensmodell die experimentellen Werte im mittleren Bereich der gemessenen Werte. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass die Stichprobe der experimentellen Werte mit 35 gültigen Versuchen zu gering ist und daher eine Abweichung zur tatsächlichen Grundgesamtheit enthält.

Zusammenfassend ist zu sehen, dass das stochastische Versagensmodell die Abhängigkeit der Versagensspannungen von der Belastungsgeschwindigkeit abbilden kann.

2.9.3.1.4 Zusammenfassung Validierung Kleinversuche

Das im Kapitel 2.9.2 vorgestellte stochastische Versagensmodell wurde im Bereich der Validierung, mittels Kleinversuchen auf seine Fähigkeit Einflüsse auf die Versagensspannungen darstellen zu können, untersucht. Eine Abhängigkeit von der gewählten Diskretisierung und einer damit einhergehenden unterschiedlichen Kantenlänge der Simulation konnte ausgeschlossen werden.

Physikalische Einflüsse auf das stochastische Bruchverhalten wurden ebenfalls untersucht. Dies ist zum einen eine veränderte Größe der betrachteten Oberfläche und zum anderen die Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit. Es wurde deutlich, dass der Einfluss der Oberfläche berücksichtigt wird. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde mittels experimenteller Daten verglichen und ebenfalls in guter Näherung nachgebildet.

2.9.3.2 Validierung Kopfaufprallerversuche

Im Folgenden werden die in AP 6 durchgeführten Kopfaufprallerversuche mit dem erarbeiteten stochastischen Versagensmodell nachgebildet. Vorteilhaft an diesem Vorgehen ist, dass das Versagensmodell anhand von Bauteilversuchen in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit

validiert werden kann. Der Zeitpunkt des Versagens, der dazugehörige Verfahrweg und den mittels Schallemissionsanalyse lokalisierte Bruchsprung können verglichen werden.

Die extern durchgeführten Kopfaufprallversuche mit einer Geschwindigkeit des freifliegenden Impaktors von 10 m/s werden hier nicht betrachtet, da bei diesen Versuchen kein Kraft- und Wegsignal zum Vergleich vorhanden ist. Bei diesen Versuchen wurden die resultierenden Beschleunigungen auf den Impaktor, analog zum Vorgehen mit eingeklebten Scheiben im Gesamtfahrzeug (z.B. EuroNCAP [52]) gemessen. Zu der numerischen Nachbildung des Beschleunigungsverhaltens wird ein korrektes Nachbruchverhalten vorausgesetzt, welches das hier vorgestellte Modell nicht abbilden kann. Daher werden diese mit einer Kopplung des stochastischen Versagensmodells mit dem Modell des Vorgängerprojektes in einer frühen Implementierungsphase des kommerziellen Solver Radioss berechnet.

Für die Berechnung der Kopfaufprallversuche aus AP 6 mit dem stochastischen Versagensmodell wird das FE-Modell aus Abb. 59 verwendet. Die linear-elastische Formulierung für das Glas wird um das stochastische Versagensmodell erweitert. Als Eingabeparameter dienen die Versagenswerte aus AP 2 für die Flächenfestigkeit und AP 3 für die Kantenfestigkeit angepasst an eine left-truncated Weibull-Verteilung [51]. Die Parameter für jede Stichprobe werden mittels Maximierung des Bestimmtheitsmaßes geschätzt. Die left-truncated Weibull-Verteilung beinhaltet drei Parameter: Den Skalenparameter β , den Lageparameter λ sowie den Parameter für den unteren Grenzwert τ . Analog zur zwei Parameter Weibull-Verteilung gibt der Skalenparameter β das 63,21 %-Quantil an. Der Lageparameter λ ist ein Maß für die Streuung der Werte. Je höher der Wert des Lageparameters, desto geringer ist die Streuung der Werte zueinander. Eine untere Grenze der Versagensspannungen wird über den Parameter für den Grenzwert τ definiert. Unterhalb dieses Wertes kann kein Wert auftreten. Für die Festigkeit von Glas bedeutet dies, das Produktionsverfahren und Qualitätskontrollen innerhalb der Fertigung Risse ab einer gewissen Tiefe verhindern bzw. aussortieren können. Mit Hilfe der links abgeschnittenen Weibull-Verteilung kann die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Versagensspannung auftritt, über

$$P(\sigma_f) = 1 - \exp\left(\frac{\tau - \sigma_f}{\beta}\right)^\lambda \quad (20)$$

bestimmt werden. Mittels der in AP 2 und AP 3 ermittelten Festigkeiten wurden die Parameter der links abgeschnittenen Weibull-Verteilung bestimmt, welche in Tab. 24 dargestellt sind.

Tab. 24: Ermittelte Parameter für die left-truncated Weibull-Verteilung für die Festigkeitsbereiche der im Rahmen dieses Projektes verwendeten Audi A3 Windschutzscheibe.

Reihe	β [MPa]	λ [-]	τ [MPa]	R2 [-]
VS_1_OS	109,79	2,22	53,69	0,96
VS_2_MS	85,15	4,28	53,59	0,97
VS_2_OS	401,53	5,42	356,57	0,99
VS_3_OS	343,14	4,99	197,59	0,99
VS_4_OS	171,07	4,31	90,25	0,98
VS_4_MS	100,27	3,89	58,44	0,97
VS_Kante_a	88,14	4,87	59,51	0,97
VS_Kante_i	124,52	10,40	91,92	0,96

Mit den Versagensverteilungen in Abhängigkeit des Bereichs der Windschutzscheibe wurden die experimentellen Versuche aus AP 6 nachgerechnet. Die Windschutzscheibe wurde jeweils in konkaver und konvexer Lagerung mit Verfahrensgeschwindigkeiten des Impaktors von 0,01, 0,1 und 1 m/s Simulationen belastet. Abb. 70 zeigt den experimentell gemessenen Verfahrweg bei

Versagen im Vergleich zu den numerischen ermittelten Werten auf. Es ist erkennbar, dass bei konkaver Lagerung der Verfahrweg des Impaktors zum Zeitpunkt des Versagens in guter Übereinkunft zwischen numerischen und experimentellen Werten liegt. Bei einer Geschwindigkeit von 0,1 und 1 m/s konnten die Extremwerte sowie das Maxima der kumulativen Verteilung getroffen werden. Bei konkaver Lagerung und einer Geschwindigkeit des Impaktors von 0,01 m/s wurde der unteren Grenzwerte um 8,36 mm Verfahrweg verfehlt. Die untere Grenze des Versagens wird hauptsächlich von dem Parameter des unteren Grenzwertes der für das Modell verwendeten Versagensverteilung τ definiert. Eine mögliche Ursache bei Abweichungen der unteren Grenzwerte kann daher durch die Schätzung dieses Parameters begründet sein. Zum aktuellen Wissensstand

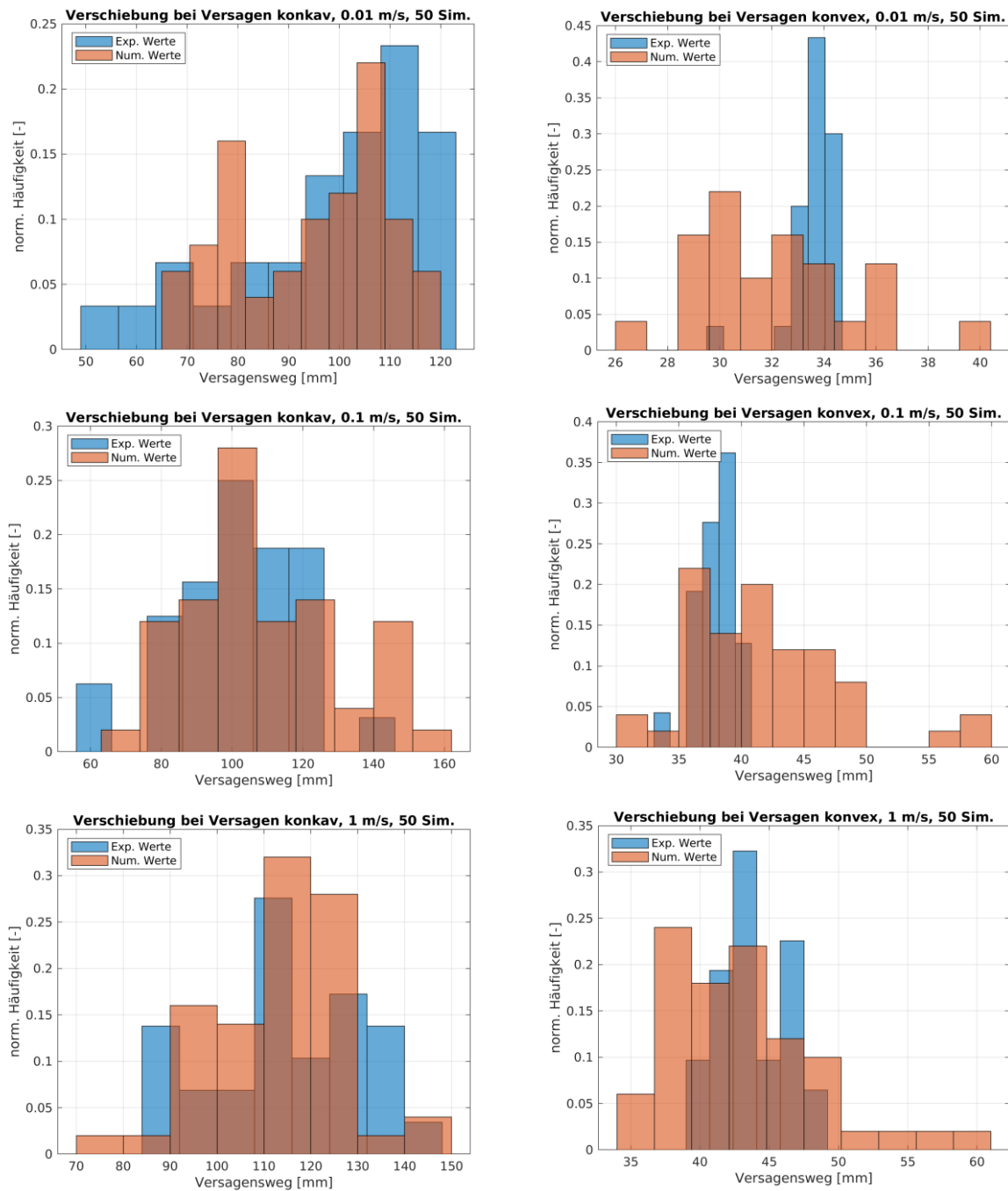


Abb. 69: Histogramme des Verfahrweges bei lokalisiertem Versagen der Windschutzscheibe der Kopfaufprallerversuche (blau) und im Vergleich der numerisch ermittelte Verfahrweg bei Versagen.

der Autoren gibt es keine Untersuchungen, die sich mit der Schätzung und deren Güte eben jenes Parameters für Glas beschäftigen. Mit den innerhalb dieses Projektes gewonnenen Stichproben zur Festigkeitsverteilung der verschiedenen Bereiche der Windschutzscheibe ist hierfür eine gute Basis erzeugt worden, die für zukünftige Untersuchungen des unteren Grenzwertes und dessen Schätzung dienen wird.

In Abb. 71 ist der Vergleich mittels Schallemissionsortung in Kombination mit FE-Simulation aus AP 6 ermittelten Versagensspannungen denen des stochastischen Versagensmodells gegenübergestellt. Es ist zu sehen, dass für Versuche mit einer konkav gelagerten Scheibe die Versagensspannungen korrelieren. Im unteren Bereich sind größere Abweichungen erkennbar, was aber auf die doppellogarithmische Skalierung zurück zu führen ist.

Im Gegensatz zu den Versagensspannungen in konkaver Lage korrelieren diese bei Versuchen mit konvex gelagerten Scheiben nicht. Zwischen den in AP 6 ermittelten Spannungen und den berechneten Werten mit Hilfe des stochastischen Versagensmodells liegen deutliche Unterschiede. Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte stochastische Versagensmodell überschätzt die Versagensspannungen deutlich. Ursache dafür ist, dass das stochastische Versagensmodell nicht den korrekten Ort des initialen Versagens für konvex gelagerte Versuche nachbilden kann. In Abb. 72 sind die lokalisierten Bruchsprünge der Kopfaufprallversuche und der des stochastischen Versagensmodells gegenübergestellt. Erkennbar ist, dass im Falle einer Geschwindigkeit bei Impact von 0,1 m/s und einer konkaven Lagerung auch der Ort des Versagens korrekt nachgebildet werden kann. Im Falle einer konvexen Lagerung ist dies nicht der Fall. Innerhalb der konvexen Kopfaufprallversuche fand das initiale Versagen der Windschutzscheiben nahezu ausschließlich im Randbereich statt, während das Versagensmodell das initiale Versagen im Bereich des Auftreffpunkts des Impaktors verortet.

Die Ursache für das abweichende Bruchverhalten für konvexe Versuche ist aktuell nicht bekannt. Eine mögliche Ursache der vorhandenen Abweichungen könnte das in Abb. 61 dargestellte Kraft-Weg-Signal der konvex gelagerten Versuche sein. Die Messwerte für Kraft und Weg unterlaufen kurz vor Versagen innerhalb der konvexen Experimente eine geometrische Instabilität, in der das Kraftsignal kurzfristig abnimmt, was bei konkaven Versuchen nicht zu beobachten war. Diese geometrische Instabilität, welche besonders bei Versuchen mit geringerer Geschwindigkeit des Impaktors deutlicher zu beobachten war, könnte einen noch unbekanntem Einfluss auf das Risswachstum haben oder die berechneten Spannungen während der Instabilität werden von dem FE-Modell nicht korrekt wiedergegeben.

Eine weitere mögliche Erklärung ist, dass für den bedruckten Bereich der Innenscheibe, welcher in den konvex gelagerten Versuchen dominant für das Versagen ist, eine unzureichende Größe der Stichprobe erreicht wurde. Aktuell werden die Weibull-Parameter aus diesem Bereich (VS_4_MS) mit nur 20 Werten geschätzt, siehe Tab. 3. Die Festigkeit im Bereich der Bedruckung zeigte im Rahmen dieses Projektes weitere Unstimmigkeiten bei dem Vergleich fraktographischer Spannungen mit dem experimentell ermittelten Gegenpart. Zukünftige Untersuchungen sollten auf die Festigkeit der Windschutzscheibe im Bereich der Bedruckung und dessen stochastische Modellierung abzielen, um zu untersuchen, ob die hier erläuterten Ungenauigkeiten aus der Beschreibung der Festigkeiten von bedrucktem Glas oder dem hier vorgestellten stochastischen Versagensmodell stammen.

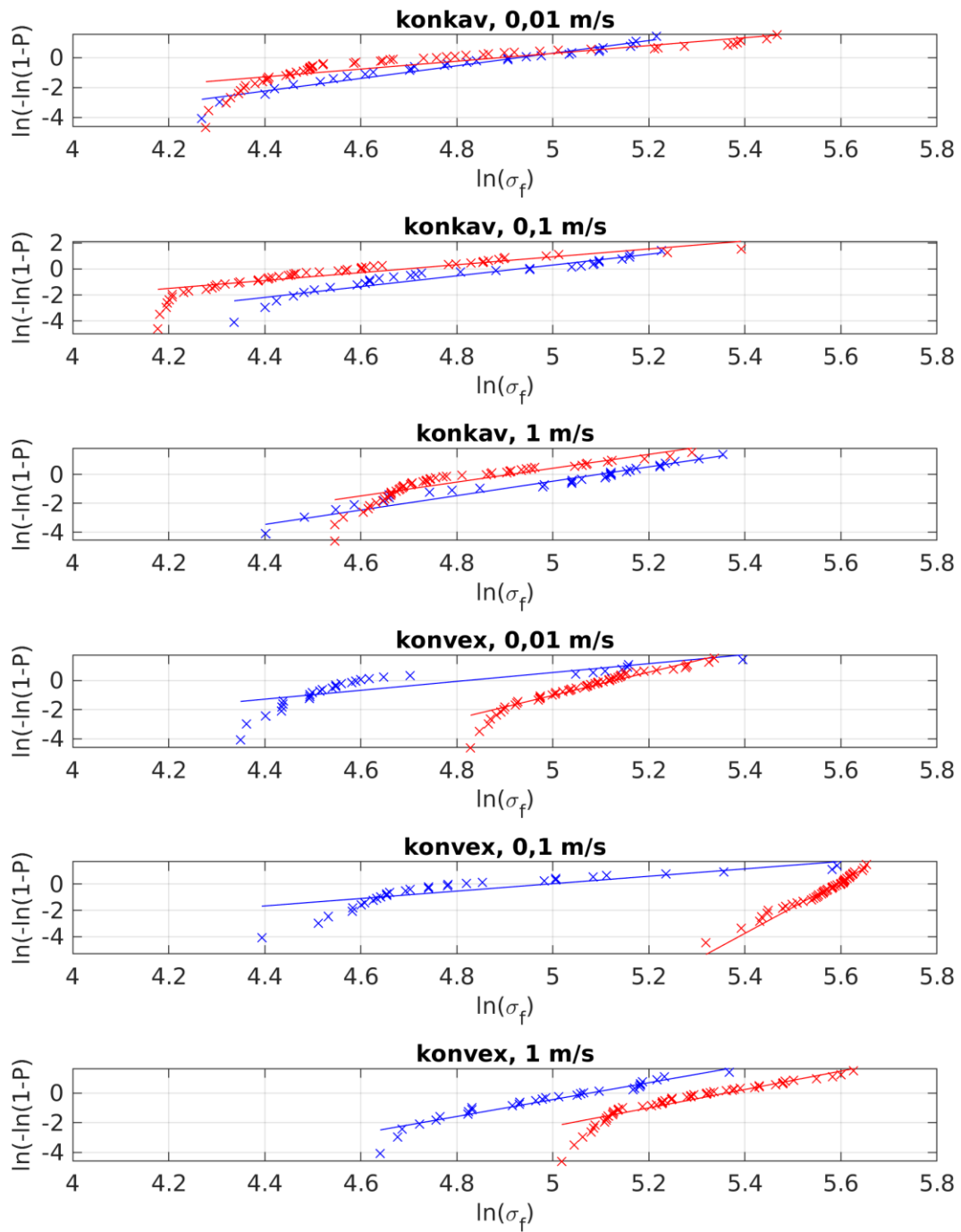


Abb. 70: Vergleich der Verteilung von Versagensspannungen. Ergebnisse des Abgleichs von Simulation und Schallortungsanalyse (blau) und der Werte des stochastischen Versagensmodells (rot).

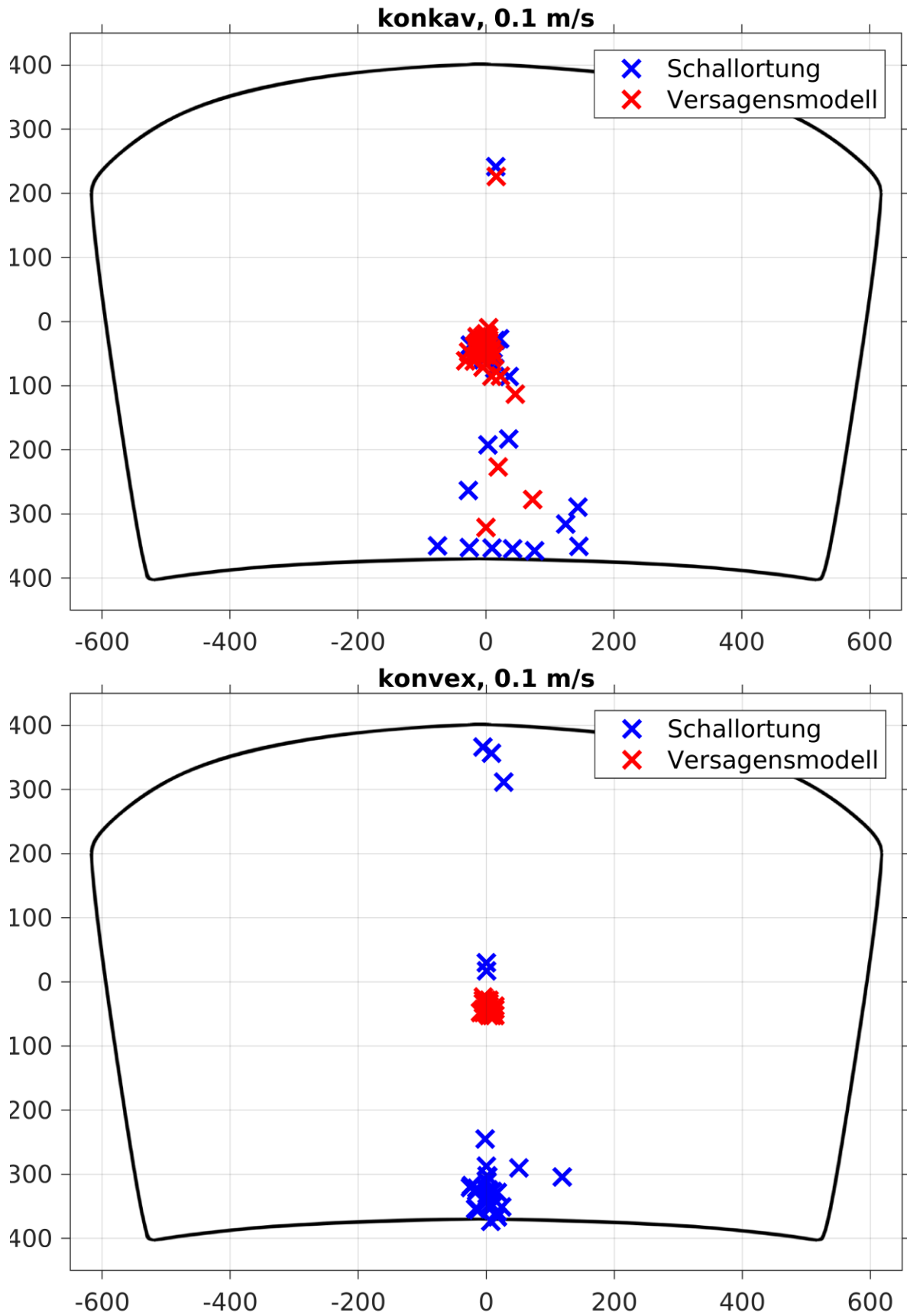


Abb. 71: Vergleich der Bruchursprünge der Kopfaufprallersatzversuche mit dem initialen Versagen des stochastischen Versagensmodells. Für eine konkave Lagerung bei 0.1 m/s wurden 18 Versuche im Zentrum geortet, welche durch die starke Clusterung an diesem Ort nicht erkennbar sind.

2.9.4 Kopplung Nachbruchverhalten

Um die innerhalb von AP 6 beantragten Versuche mit freifliegendem Impaktor bei 10 m/s Impakt Geschwindigkeit nachbilden zu können, muss zusätzlich zum initialen Versagen ebenfalls das Nachbruchverhalten modelliert werden. Um dies zu erreichen, wird das im Rahmen dieses Projektes entwickelte stochastische Versagensmodell mit dem Modell des Vorgängerprojektes kombiniert [34]. Dieses wurde von der Firma Altair bereits in ihren kommerziellen FE-Solver Radioss implementiert, welche ebenfalls Interesse an einer Erweiterung um das stochastische Bruchverhalten von Glas hat. Die Kombination beider Modelle wird intensiv vorangetrieben, ist zum aktuellen Stand jedoch nicht vollends abgeschlossen. Die folgenden Simulationen wurden mit einer noch nicht veröffentlichten Arbeitsversion innerhalb des Radioss Solvers berechnet. Zum aktuellen Stand kann das stochastische Bruchverhalten wiedergegeben werden, wobei besonders das überkritische Wachstum von Rissen nach dem initialen Versagen nicht realistisch wiedergegeben wird. Ziel der Firma Altair ist es, das stochastische Versagensmodell fest in den kommerziellen Solver zu integrieren.

Das Modell fail/alter/ innerhalb des Solvers Radioss besitzt als Eingabeparameter Risslängen, die verwendet werden, um die Versagensspannung pro Element in Abhängigkeit der Spannungsrate zu definieren. Die bisher verwendeten Risslängen für /fail/alter/ wurden als konstante Werte angegeben. Die Kombination mit dem stochastischen Versagensmodell setzt dort an und streut die initialen Risslängen für jedes FE-Element anhand des Algorithmus, welcher in Abschnitt 2.9.2.1 eingeführt wurde. Als Eingabeverteilungen dienen die bereits für die Kopfaufprallversuche unter moderaten Geschwindigkeiten verwendeten Verteilungen aus AP 2 und AP 3. Für eine Erläuterung der Funktionsweise des in Radioss bereits vorhandenen Modells fail/alter/ sei auf die Dokumentation von Radioss und die Veröffentlichung des Modells verwiesen [34].

2.9.4.1 ACTS Versuche

Die ursprünglich für AP 6 beantragten Kopfaufprallversuche mit einer Geschwindigkeit des Impaktors bei Erreichen der Scheibe von 10 m/s werden verwendet, um das stochastische Versagensmodell in Kopplung mit dem Versagensmodell für Glas /fail/alter/ aus Radioss zu validieren. Grund dafür ist, dass kein Kraft und Wegsignal aufgezeichnet werden kann bei einem freifliegenden Impaktor. Vielmehr stehen die Beschleunigungen auf den Impaktor, wie auch bei realen Kopfaufprallversuchen, zur Verfügung.

In Abb. 73 ist der Aufbau der Versuche bei dem externen Dienstleister dargestellt. Zu sehen ist der Kopfimpaktor, welcher ebenfalls für standardisierte Kopfaufprallversuche z.B. im Rahmen von EuroNCAP verwendet wird. Der Kopfimpaktor trifft die Windschutzscheibe 433 mm oberhalb der Unterkante, auf der Symmetrielinie der Windschutzscheibe. Insgesamt wurden zehn Versuche durchgeführt und die auf den Impaktor einwirkenden Beschleunigungen, das Zeitsignal sowie der Bruchsprung mittels Schallemissionsanalyse ermittelt.

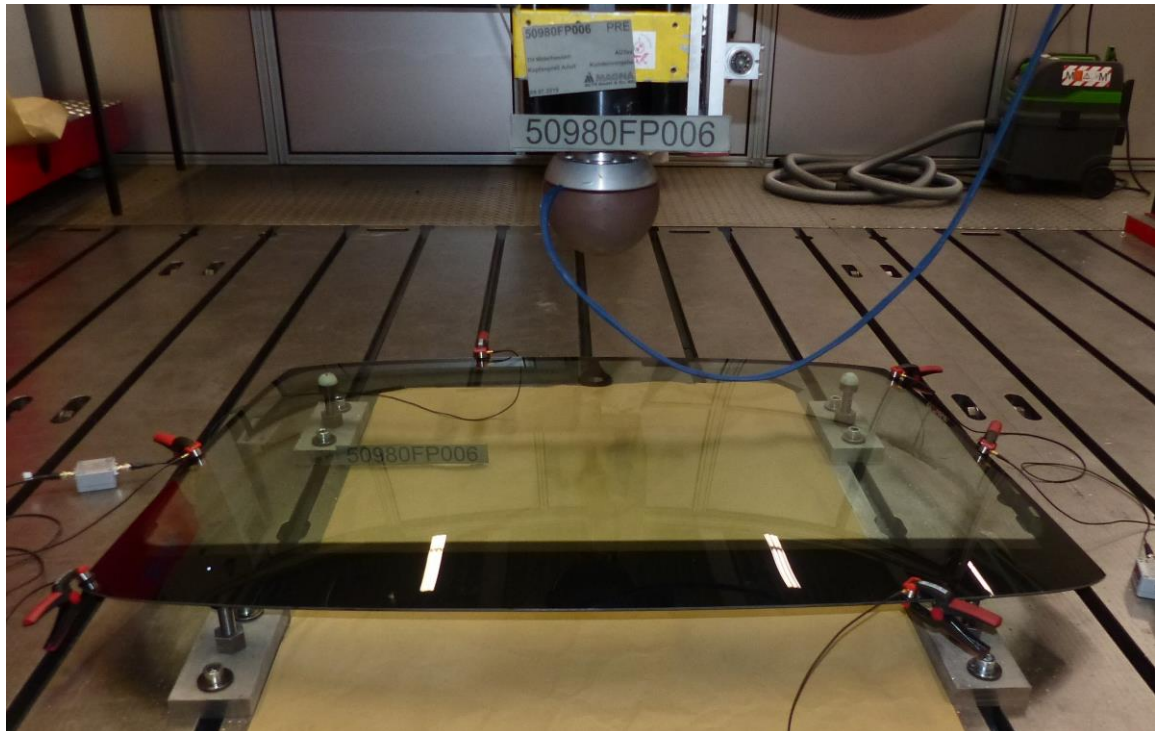


Abb. 72: Aufbau der Kopfaufprallersatzversuche mit freifliegendem Impaktor. Zu sehen ist eine Audi A3 Windschutzscheibe auf einer vier-Punkt-Lagerung. Weiter sind Sensoren zur Schallemissionsanalyse am Rand zu sehen.

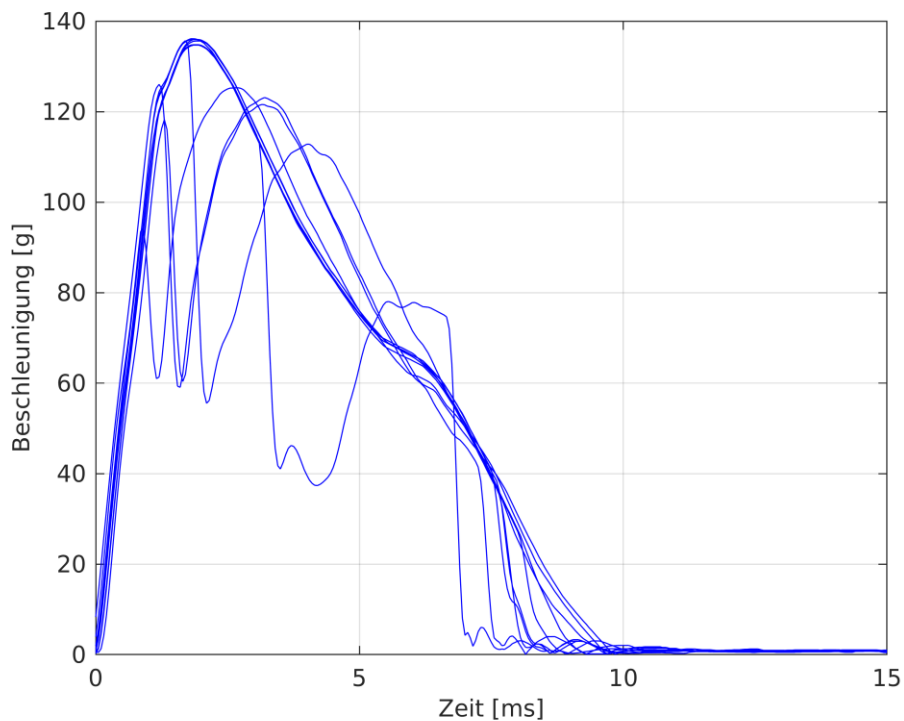


Abb. 73: Berechnete resultierende Beschleunigungen aus 10 Kopfaufprallersatzversuche mit freifliegendem Impaktor.

Die resultierenden Beschleunigungen aller zehn Versuche sind in Abb. 74 dargestellt. Der Einfluss des stochastischen Bruchverhaltens ist deutlich erkennbar durch die unterschiedlich gelagerten

Zeitpunkte des Abfalles des Beschleunigungssignales. Die maximale Beschleunigung, das Head-Injury-Criterion (HIC) sowie die für den HIC15 berechneten Zeitgrenzen sind in Tab. 25 dargestellt. Das HIC liegt für alle zehn Versuche zwischen 418.71 und 566.03. Die maximalen Beschleunigungen liegen zwischen 122.91 g und 136.17 g. Obwohl für die Berechnung des HIC Wertes das Zeitintervall mit seinen Grenzen t_1 und t_2 kaum variiert, unterscheidet sich der HIC um bis zu 147.32. In Abb. 74 ist an den Beschleunigungsverläufen erkennbar, dass das instantane Sinken der Beschleunigung zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfindet. Diese Reduzierung der Beschleunigung stammt aus dem Versagen einer der Scheiben innerhalb der Windschutzscheibe und der dadurch drastisch reduzierten Steifigkeit. Dieses Abflachen und dessen zeitlicher Unterschied innerhalb der Versuche ist für die Kopfaufprallersatzversuche maßgebliche Einflussfaktor für die Streuung des HIC Wertes.

Tab. 25: Resultierende Werte aus den Kopfaufprallersatzversuchen mit freifliegendem Impaktor.

Versuch	HIC15 [-]	t_1 [ms]	t_2 [ms]
1	492,47	0,60	6,60
2	482,99	0,60	6,90
3	418,71	0,60	6,95
4	554,11	0,65	6,75
5	562,47	0,65	6,75
6	561,82	0,65	6,75
7	559,88	0,65	6,75
8	566,03	0,60	6,75
9	518,48	0,60	6,85
10	508,26	0,60	6,60

Für die numerische Nachbildung der durchgeführten Versuche wurde das in AP 6 verwendete FE-Modell benutzt. Als Impaktor wurde eine kommerzielle Version der Firma LASSO verwendet, welche sich an dem für die Versuche freifliegendem Impaktor orientiert. Es wurden insgesamt 15 Simulationen mit der in Radioss implementierten Arbeitsversion durchgeführt. Die während der Simulationen berechneten resultierenden Beschleunigungen auf den Impaktor sind den experimentellen Werten in Abb. 75 dargestellt. Die berechneten HIC Werte und die korrespondierenden Zeitintervalle sind in Tab. 26 zusammengefasst. Bei Betrachtung der berechneten Beschleunigungskurven fällt auf, dass das initiale Versagen kurz vor Erreichen von 80 g bei allen Simulationen identisch ist. Weiter ist jedoch zu sehen, dass das initiale Versagen der Außenscheibe, welches nach dem Versagen der Innenscheibe eintritt, stochastisch verteilt ist. Dies weist auf einen noch nicht entdeckten Fehler innerhalb der Implementierung in Radioss und Kombination mit dem Modell für das Nachbruchverhalten /fail/alter hin. Die Behebung dieses Fehlverhaltens wird aktuell in Zusammenarbeit der Forschungsstellen und der Firma Altair, welche den FE-Solver Radioss entwickelt, behoben.

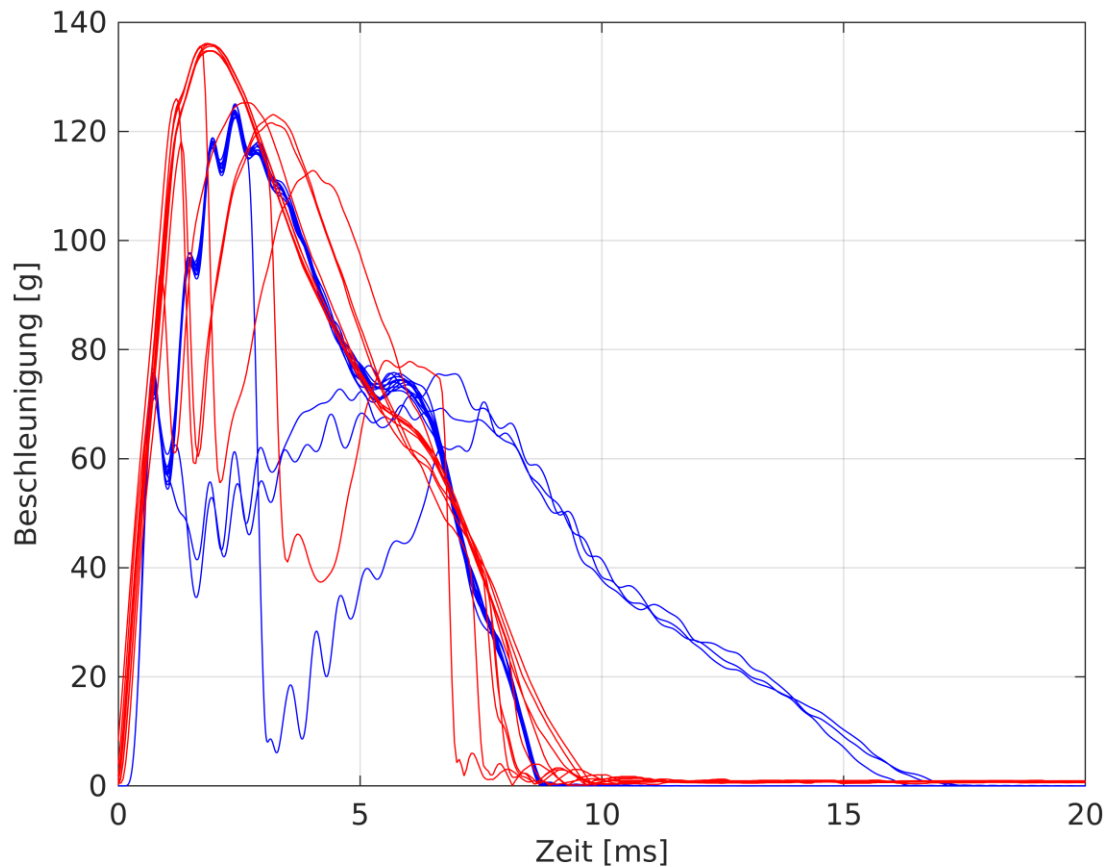


Abb. 74: Vergleich der resultierenden Beschleunigungen der Versuche mit freifliegendem Impaktor (rot) und die numerische Nachbildung dieser mittels des stochastischen Versagensmodells in 15 Simulationen (blau).

Tab. 26: Resultierende Werte aus den Simulationen der Kopfaufprallersatzversuchen mit freifliegendem Impaktor.

Versuch	HIC15 [-]	t ₁ [ms]	t ₂ [ms]
1	465,91	0,56	6,87
2	268,82	0,48	10,80
3	464,20	0,56	6,87
4	468,44	0,55	6,85
5	464,16	0,54	6,87
6	466,72	0,55	6,89
7	468,36	0,55	6,88
8	466,00	0,55	6,94
9	469,32	0,55	6,87
10	466,86	0,55	6,94
11	272,61	0,48	10,38
12	224,81	0,46	11,38
13	463,24	0,55	6,86
14	470,23	0,56	6,91
15	465,17	0,57	6,91

2.9.5 Stochastische Berechnungsmethodik für Crashsimulationen

Die Berechnungsvorschrift für das stochastische Bruchverhalten von Glas, im Falle eines Kopfaufpralles auf die automobile Windschutzscheibe, verwendet das hier vorgestellte stochastische Versagensmodell in Kombination mit einem bereits kommerziell erhältlichen Modell (fail/alter/) innerhalb der FE-Software Radioss. Die Kombination beider Modelle wurde bereits in Abschnitt 2.9.4.3 erläutert. Ziel des Projektes ist es, eine stochastische Berechnungsvorschrift allen KMU zur Verfügung zu stellen. Dies soll mit der Implementierung und Kombination beider Modelle und der anschließenden Veröffentlichung des Solvers geschehen. Beide Modelle sind bereits veröffentlicht oder befinden sich im Review Prozess, wodurch eine unabhängige Verwendung dritter jederzeit möglich ist und diese dadurch nicht an eine kommerzielle Software gebunden ist.

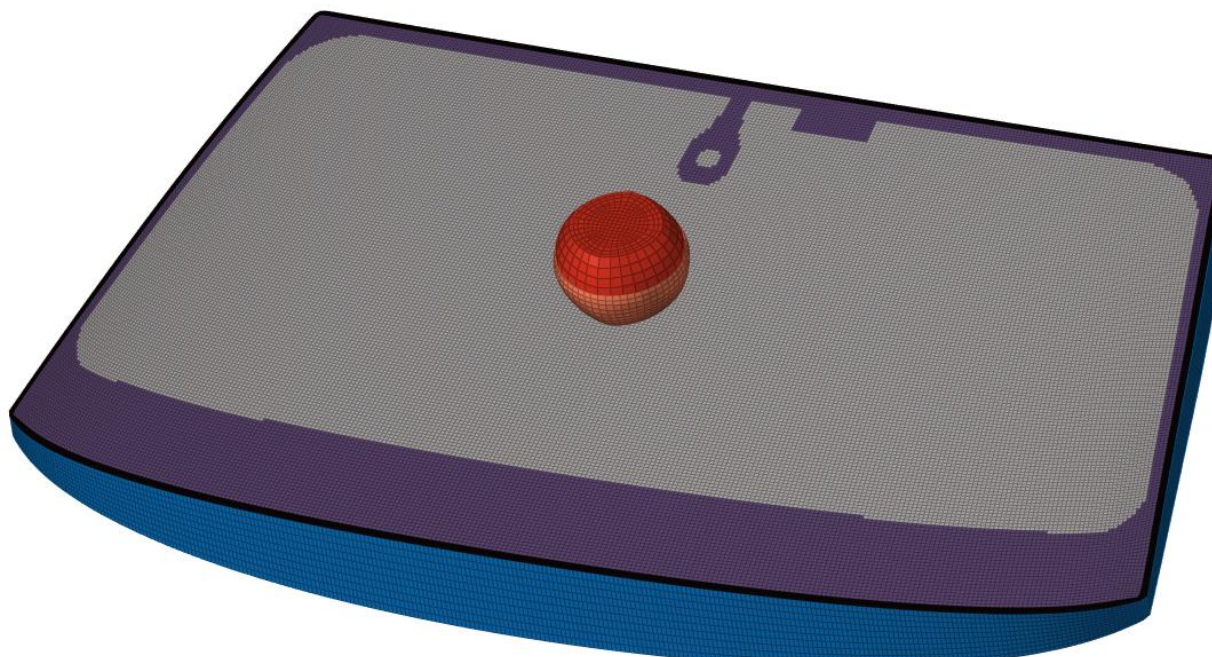


Abb. 75: FE Modell für die Berechnung der stochastischen Streuung der Verletzungswahrscheinlichkeit während des Kopfaufpralles auf eine Audi A3 Windschutzscheibe. Dargestellt sind der Impaktor (rot/orange), die Windschutzscheibe, der Holzrahmen (blau) und der Klebstoff (schwarz).

Um die stochastische Verteilung des HIC Wertes mit dem aktuellen Arbeitsstand aufzuzeigen, wurden insgesamt 100 Simulationen eines Kopfaufpralles auf eine im Projekt untersuchte Audi A3 Windschutzscheibe durchgeführt. In [34] wurden drei Versuche mit einer ähnlichen Windschutzscheibe, einer Mercedes C Klasse Scheibe durchgeführt, welche auf einem Holzrahmen verklebt war. Um aufgrund fehlender experimenteller Vergleichswerte in diesem Projekt die zu berechnenden HIC Werte auf ihre Gültigkeit abschätzen zu können, wurde die Formulierung des mechanischen Verhaltens des Klebstoffes und des Holzrahmens adaptiert, anstatt den Rahmen eines Vollfahrzeuges zu verwenden. In der ursprünglichen Veröffentlichung wurden drei Versuche mit einem freifliegenden Impaktor nach EuroNCAP durchgeführt und die berechneten HIC Werte, mit dem für die Kombination mit dem stochastischen Versagensmodell veranschlagtem Modell validiert. Abb. 76 zeigt das verwendete FE-Modell mit Windschutzscheibe, Holzrahmen und Kopffimpaktor. Im Mittel wurde eine Kantenlänge der FE-Elemente von 5 mm für die Windschutzscheibe gewählt. Die Glasscheiben wurden analog zu dem Vorgehen in AP 6 über koinzidente Knoten mit der PVB Zwischenschicht verbunden. Der Auftreffpunkt des Impaktors wurde gleichbleibend zu den Kopfaufprallerversuchen 433 mm oberhalb der Unterkante, mittig auf der Symmetrielinie gewählt. Insgesamt wurden 100 Simulationen durchgeführt. Die

resultierenden Beschleunigungen aller Simulationen, aufgetragen über die Zeit nach Impact, sind in Abb. 77 dargestellt.

Ein deutlicher Unterschied zwischen den Beschleunigungskurven, bedingt durch das stochastische Bruchverhalten ist erkennbar. Ebenfalls ist erkennbar, dass die Kurven sich in zwei Bereiche aufteilen. Während ein Teil der Verläufe vor 10 ms in das Nachbruchverhalten übergeht, strebt der andere Teil der Verläufe ein zweites Maxima bei kurz vor 10 ms an, was im Vergleich mit in der Literatur vorhandenen Messkurven als unrealistisch einzustufen ist [34]. Grund dafür ist, dass das Nachbruchverhalten, die Resttragfähigkeit in Abhängigkeit der vorhandenen Fragmentierung, nicht korrekt wiedergegeben wird. Das Resttragverhalten einer Windschutzscheibe in Abhängigkeit des Fragmentierungsgrades sollte Ziel zukünftiger Untersuchungen sein, um den Kopfaufprall auf die Windschutzscheibe vollends wiedergeben zu können.

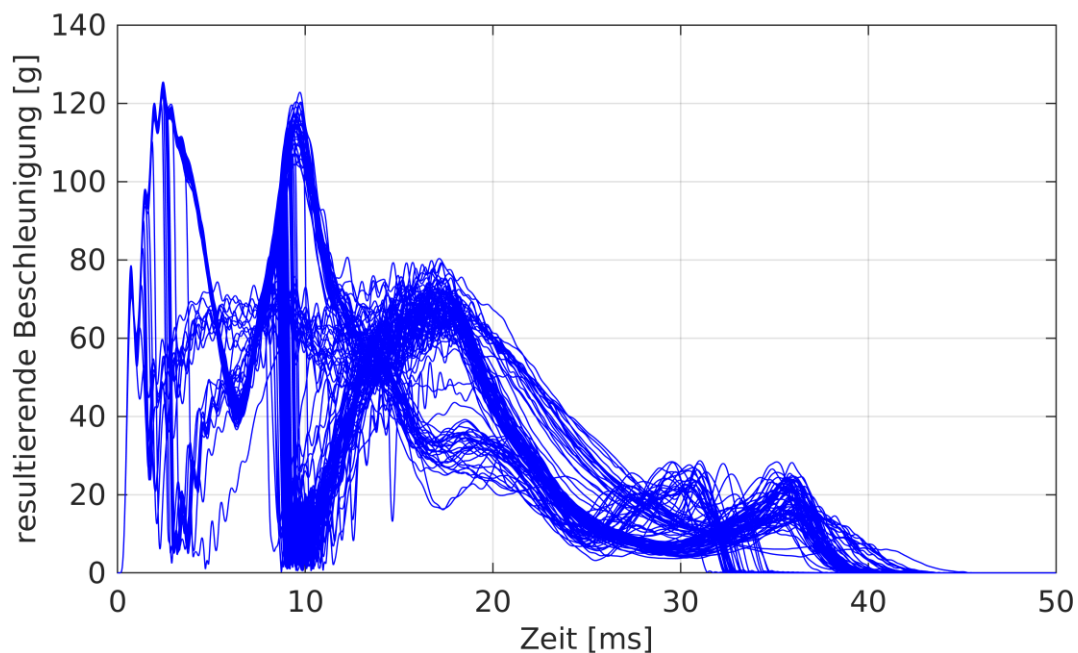


Abb. 76: Berechnete Beschleunigung über die Zeit aus 100 Simulationen eines Kopfaufpralles auf die Windschutzscheibe unter Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas.

Weiter ist zu beobachten, dass der Bruchursprung der Außenscheibe an zwei verschiedenen Bereichen zu lokalisieren ist. Das initiale Versagen der Außenscheibe findet entweder an der unteren Außenkante oder im Bereich unterhalb des Impaktors statt. Zum aktuellen Stand der Autoren gibt es keine Untersuchungen, welches der beiden Bruchursprünge in realen Versuchen auftritt oder ob tatsächlich beide Orte im Wechsel zueinander auftreten. In Abb. 78 sind die Bruchmuster zweier

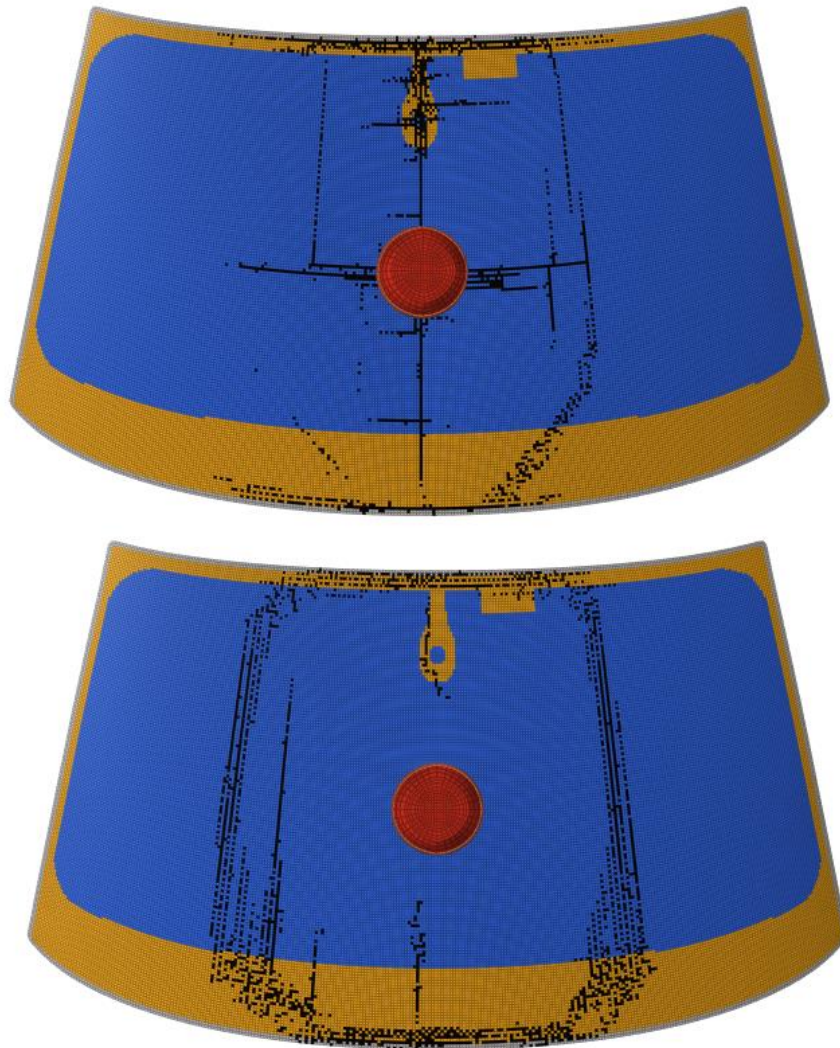


Abb. 77: Unterschiede im Bruchmuster der Außenscheibe 15 ms nach Impact. Bruchursprung der oberen Abbildung im Bereich unterhalb des Impaktors und Bruchursprung der unteren Abbildung an der unteren Kante.

Simulationen bei 15 ms nach Impact mit unterschiedlichem Bruchursprung der Außenscheibe gegenübergestellt. Das Versagen der Außenscheibe in der oberen Teilabbildung fand unterhalb des Impaktors statt, während es in der unteren Teilabbildung an der Unterkante initial auftritt.

Die Häufigkeitsverteilung der HIC Werte aus 100 Simulationen ist in Abb. 79 dargestellt. Analog zum Bruchursprung der Außenscheibe lässt sich der HIC Wert in zwei Bereiche einteilen. Die HIC Werte kumulieren um 470 und 780 in Abhängigkeit des Bruchursprunges der Außenscheibe. Bei Versagen ausgehend von der Kante ist die Häufigkeitsverteilung um 470, während bei einem Bruchursprung unterhalb des Impaktors die HIC Verteilung im oberen Bereich erreicht wird. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die Häufung von HIC Werten im oberen Bereich durch eine inkorrekte Modellierung des Nachbruchverhaltens zustande kommt. Unterstützt wird diese These durch die zweiten Maxima der Beschleunigungskurven in Abb. 77. Eine weitere Möglichkeit ist, dass die aktuell verwendete und noch nicht vollends validierte Arbeitsversion des verwendeten Radioss Solvers einen bis dato unentdeckte Fehler bei der Kombination des stochastischen Modells und des bereits implementierten Modells hat. Dies wird aktuell intensiv untersucht.

2.9.6 Sensitivitätsanalyse des Kopfaufpralles

Um den Einfluss weiterer Parameter des FE-Modells auf die resultierende Beschleunigung und dementsprechend auch auf den HIC Wert zu quantifizieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Zum Einsatz kamen dabei die Programme optiSLang, Statistics on Structures 3 und DIF-FCRASH, deren Hersteller im projektbegleitenden Ausschuss diese Untersuchung unterstützt haben. Um den Einfluss streuender Materialparameter identifizieren zu können, ist ohne entsprechende numerische Verfahren ein hoher experimenteller Versuchs- und Zeitaufwand notwendig. Von besonderer Bedeutung ist eine solche Untersuchung, wenn die Wahrscheinlichkeit einer schweren Verletzung zu bestimmen ist, wie im vorliegenden Fall eines Kopfaufpralles auf die Windschutzscheibe.

Im Rahmen dieses Projektes wurden mit Hilfe der erwähnten Programme Simulationen erstellt, in denen die Steifigkeit der PVB Zwischenschicht, initiale Risslängen in der Windschutzscheibe und die Geschwindigkeit des Impaktors variiert wurden. Diese Faktoren unterliegen den meisten Schwankungen während realer Kopfaufprallversuche. Für die folgenden Untersuchungen wurde

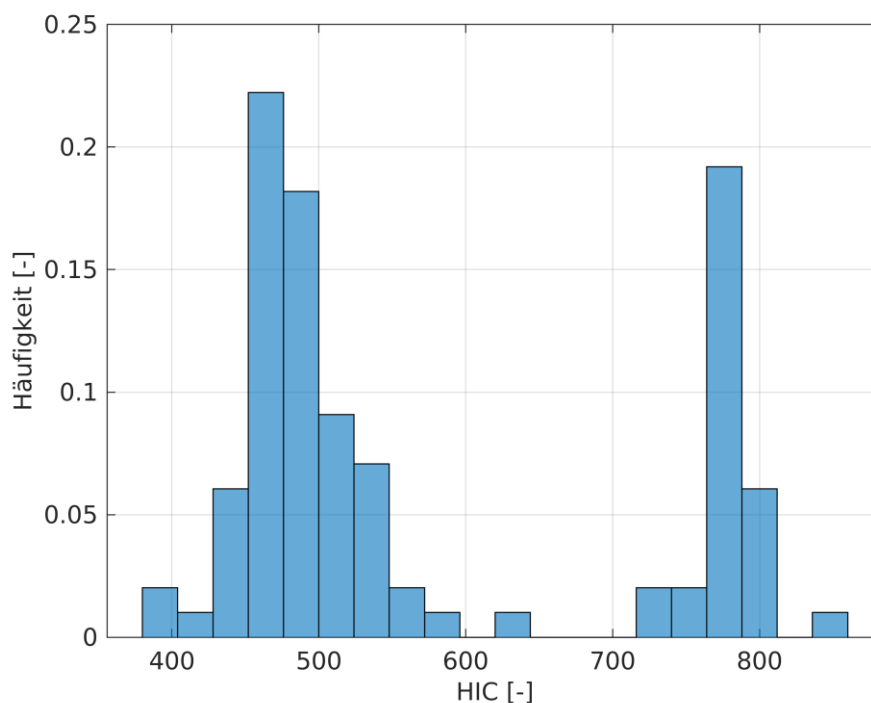


Abb. 78: Häufigkeitsverteilung der berechneten HIC Werte aus 100 Simulationen.

das in Radioss 2020 veröffentlichte Materialmodell /fail/alter ohne stochastisches Versagensmodell verwendet.

Für die PVB Zwischenschicht werden verschiedenste Varianten in modernen Windschutzscheiben verbaut. Diese unterscheiden sich in Dicke und Anzahl der Lagen. Häufig kommen dreilagige Folien zum Einsatz, die durch eine schallabsorbierende mittlere Lage den Fahrkomfort erhöhen sollen. Im Rahmen dieses Projektes wurde in einer Master Thesis das Verhalten der PVB Zwischenschicht in Abhängigkeit der Belastungsrate und Temperatur charakterisiert. Es zeigte sich wie erwartet eine hohe Abhängigkeit der mechanischen Antwort auf Belastung aufgrund beider Faktoren, weshalb der Einfluss der PVB-Schicht auf den HIC Wert untersucht wurde. Maßgeblich für die Beschreibung des mechanischen Verhaltens der PVB Zwischenschicht innerhalb eines Verbundsicherheitsglases ist das Schubmodul. Diese wurde automatisch mit Hilfe der erwähnten kommerziellen Programme variiert mittels eines Skalierungsfaktors. Abb: 80 zeigt die Variation des

HIC Wertes für bei Modifikation des Schubmodules. Weiter wurde untersucht, welchen Einfluss die konstant zu wählenden Risslängen für /fail/alter innerhalb von Radioss und die Geschwindigkeit bei Impakt auf den HIC Wert haben.

Es ist zu sehen, dass das Schubmodul der PVB Zwischenschicht und dessen Variation einen im Vergleich zum Einfluss der beiden anderen untersuchten Faktoren unerheblichen Anteil hat. Die für /fail/alter nötigen Risslängen für die Kante, die Oberfläche und der PVB Seite der Scheiben die in [34] validiert wurden, wurden gleichmäßig um einen konstanten Faktor skaliert. Dies stellt höhere bzw. niedrigere Festigkeiten der Glasscheiben dar, welche durch Modifikationen der Fertigung entstehen können. In Abb: 80 ist zu sehen, dass der Einfluss der Glasqualität erheblichen Einfluss auf die Festigkeit der Windschutzscheibe und dementsprechend auf den HIC Wert hat. Bei Verringerung der Risstiefen steigt der HIC drastischer an, als er bei Erhöhung der Risstiefen sinkt. Eine Begründung dafür könnte sein, dass der HIC aufgrund der Resttragfähigkeit des Glases selbst bei frühem Versagen der Scheiben gegen einen festen Wert tangiert.

Im Bereich der Geschwindigkeit bei Impakt ist wie zu erwarten ein steigender HIC bei zunehmender Geschwindigkeit zu beobachten. Zwischen 8 m/s und 12.5 m/s verdoppelt sich dieser nahezu von 569.2 auf 1043.3.

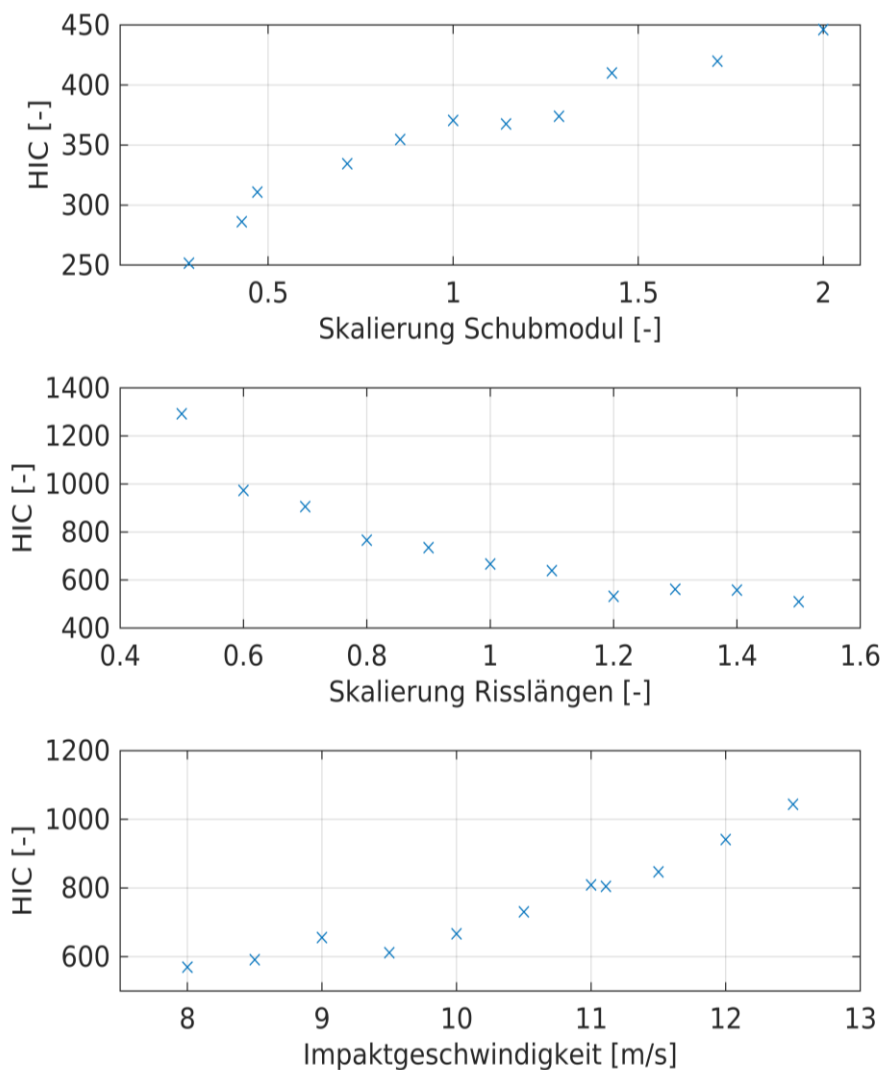


Abb: 79: Einfluss mehrerer Faktoren auf den HIC Wert während eines Kopfaufpralles auf die Windschutzscheibe.

2.9.7 Zusammenfassung und Fazit

Im vorliegenden Arbeitspaket konnte ein stochastisches Versagensmodell vorgestellt werden. Dieses basiert auf der Verteilung initialer Risse auf FE-Elemente, welche bei einer anliegenden Belastung wachsen, bis eine vorgegebene Kombination aus Spannung und Risstiefe zum Versagen des Elements führt. Als Eingabewerte für das stochastische Versagensmodell dienen die Parameter einer sogenannten „left truncated“ Weibull Verteilung von Versagensspannungen, welche eine Erweiterung der oftmals verwendeten und im industriellen Umfeld verbreiteten zwei Parameter Weibull Verteilung um eine untere Grenze darstellt. Die dafür nötigen Versagensspannungen lassen sich mittels genormter Doppelring-Biegeversuche bestimmen.

Das stochastische Versagensmodell wurde folgend auf seine Fähigkeit untersucht, Verteilungen von Versagensspannungen in Abhängigkeit der Diskretisierung innerhalb der Simulation, der zu simulierenden Oberfläche und der Spannungsrate korrekt wiedergeben zu können. Weiter wurden die in AP 6 durchgeführten Kopfaufprallerversuche nachgebildet. Dabei wurden die Werte des Bruchursprunges, der Versagensspannungen und der Verfahrweg des Kopffimpaktors zwischen den experimentellen und den numerischen Ergebnissen verglichen. Für Windschutzscheiben in konkaver Lagerung konnte eine gute Korrelation dieser Werte erreicht werden. Im Falle konvex gelagerter Scheiben waren gewisse Abweichungen zu beobachten. Mögliche Ursachen sind eine geometrische Instabilität bei konvexer Lagerung oder die unzureichende Größe der Stichprobe für die Verteilung der Festigkeit im entsprechenden Bereich des zu erwartenden Versagens.

Für Kopfaufprallerversuche mit freifliegendem Impaktor wurde das stochastische Versagensmodell im kommerziellen Solver Radioss mit einem dort bereits vorhandenen Modell für den Kopfaufprall auf eine Windschutzscheibe gekoppelt. Für die Kopfaufprallerversuche konnte so die Streuung der Verletzungswahrscheinlichkeit in akzeptabler Näherung wiedergegeben werden.

Folgend wurde eine Berechnungsvorschrift zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas im Falle eines Kopfaufpralles auf die Windschutzscheibe am Modell einer eingeklebten Scheibe in einen Rahmen verwendet. Zwar konnte das stochastische Versagen von Glas auch in diesem Falle wiedergegeben werden, jedoch erschien das Nachbruchverhalten der Windschutzscheibe unrealistisch.

Mit dem vorhandenen Modell wurden 100 identische Simulationen eines Kopfaufpralles auf die Windschutzscheibe unter Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas durchgeführt. Der Kopfverletzungsfaktor, kurz HIC, wurde an den resultierenden Beschleunigungen auf den Impaktor ausgewertet. Es ergaben sich zwei Bereiche, abhängig davon, ob die Außenscheibe initial unterhalb des Impaktors oder am Rand versagt. In beiden Bereichen ist ebenfalls eine nicht unerhebliche Streuung des Verletzungsfaktors zu beobachten.

Abschließend wurde die Simulation des Kopfaufpralles auf die Sensitivität der Eingabeparameter untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass bei Variation der initialen Risstiefen im Glas die Verletzungswahrscheinlichkeit ebenfalls stark variiert. Dies zeigt ebenfalls, dass das stochastische Bruchverhalten von Glas einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Verletzungswahrscheinlichkeit im Falle eines Kopfaufpralles hat.

3 Verwendung der Zuwendung

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
Der Gesamtpersonaleinsatz in Monaten den beiden Forschungseinrichtungen THM und TUD erfolgte wie folgt:

Personaleinsatz	Summe (Monate)
THM	39
TUD	30

Am Anfang des Projektes war mit der HVG eine dritte Forschungseinrichtung mit 1,2 PM (Dipl.-Ing. TU) involviert- Die wissenschaftliche Mitarbeiterin, die die fraktografischen Untersuchungen der Proben vornehmen sollte, konnte auf Grund der Verzögerung der Probenbeschaffung leider die Arbeitspakete nicht vollständig bearbeiten, da sie (im Oktober 2017) die Forschungseinrichtung aus beruflichen Gründen verlassen hat. Die bewilligten Mittel wurden der THM durch einen Änderungsantrag zur Verfügung gestellt. Die HVG hat die erforderliche Unterstützungsarbeiten geleistet, um die Forschungseinrichtung 1 (THM) in die Lage zu versetzen, die beiden Arbeitspakete 4 und 5 weiter zu bearbeiten.

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
Es wurden keine Geräte beantragt.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
Kopfaufprallversuche mit 10m/s wurden wie geplant bei ACTS in Aschaffenburg durchgeführt. Die Versuche fanden am 09. und 10.04.2019 statt.

Die geplanten REM-Aufnahmen in AP 5 wurden nicht durchgeführt, da das Lichtmikroskop anstatt der ursprünglichen 2000fachen Vergrößerung auf 5000fach aufgerüstet worden ist. Die Kosten hierfür hat die FE1 (THM) aus internen Mittel beglichen.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Untersuchungen bezogen sich ausschließlich auf die im Antrag festgestellten notwendigen Arbeiten zur Beantwortung der technisch-wissenschaftlichen Fragestellung zum stochastischen Bruchverhalten von Glas. Alle geplanten Ziele wurden, wie im Abschnitt 2 gezeigt, vollumfänglich erreicht. Die hierzu geleisteten Arbeiten waren stets mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmt und zur Erreichung des Ziels als notwendig und angemessen befunden.

Eine hieraus resultierende Abweichung vom Antrag gab es bei der fraktografischen Analyse. Durch die Aufrüstung eines Lichtmikroskops an der FE1 (THM) aus Eigenmitteln konnte die beantragte Fremdvergabe von REM-Aufnahmen eingespart werden. Eine zum Antrag weitere Abweichung gab es bei der Eigenspannungsanalyse. Hier mussten zur Bestimmung der Eigenspannungen (siehe Abschnitt 2.2.2.1) die Windschutzscheiben auf Luftkissen gelagert werden, um zusätzliche schwerkraftinduzierte Spannungen zu vermeiden.

Die Ergebnisse sind bereits größtenteils in Zeitschriften sowie Tagungsbandbeiträgen veröffentlicht und wurden über den PbA in die Praxis erfolgreich transferiert. Das entwickelte stochastische Glasmodell wird derzeit von der Firma Altair in den kommerziellen FE-Solver Radioss implementiert. Die Ergebnisse stehen somit im kommenden Release einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung.

5 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die Fahrzeugentwicklung läuft im Wesentlichen digital. Ein wichtiges Instrument ist hierbei die numerische Simulation. Solche Berechnungen werden in der Automobilindustrie fast ausschließlich von KMU durchgeführt. Eine Methodik, wie mit der Streuung der Ergebnisse beim Kopfaufprall auf Windschutzscheiben in der Berechnungspraxis umgegangen werden muss, liegt mit Abschluss des Projektes nun vor. Mit der entwickelten Berechnungsmethodik zur Berücksichtigung des stochastischen Bruchverhaltens von Glas in der Crashsimulation lassen sich Streuungen im Versuch verstehen und bewerten. Die abgesicherte Prognose bietet zudem die Voraussetzung zum energieeffizienten Leichtbau. Scheibendicken können nun gezielt optimiert werden. Hierbei ist die Methode nicht nur auf Fahrzeugverglasungen beschränkt, sondern kann allgemein für Glas verwendet werden. Technische Anwendungsbereiche gibt es bei der Auslegung von Mobiltelefonen (Dünnglas) und im Bauwesen (Fassadentechnik).

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Im nachfolgenden werden die durchgeführten Transfermaßnahmen tabellarisch aufgeführt. Grau hinterlegte Felder sind im Vergleich zum Antrag im Laufe des Projektes neu hinzugekommen. Entfallene Maßnahmen sind in der rechten Spalte als solche gekennzeichnet.

6.1 Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Projektes

Maßnahme	Rahmen	Zeitraum	
Maßnahme A Projektbegleitende Berichterstattung	A1	1. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses 2. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses 3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses 4. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses 5. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses 6. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses 7. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	21.03.2017, Köln 26.09.2017, DA 24.04.2018, DA 23.10.2018, GI 05.09.2019, Köln 12.11.2019, DA 20.10.2020 (online)
	A2	Berichte in den beteiligten Firmen	Firmenintern nach den pbA-Sitzungen
	A3	Tätigkeitsberichte der Forschungsstellen	IMM Jahresberichte 2017 -2020 der THM
Maßnahme B Vorträge in Arbeitskreisen und Gremien	B1	DGG-Fachausschuss IV "Glasformtechnologie und Qualitätssicherung"	Aufgrund des Wegfalls der FE HVG gestrichen
	B2	FAT-Sitzung des UA „Crash- und Insassensimulation“	21.03.2017 Opel, Rüsselsheim
	B3	Fachausschuss „Polymerwerkstoffe“ der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM)	15.-16.11.2018, Uni Kassel
	B4	Arbeitskreis „Werkstoffmodelle und Simulation“ der Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V.	20.09.2018, LBF, Darmstadt
Maßnahme C Elektronische Verbreitung	C1	HVG-Newsletter	Aufgrund des Wegfalls der FE HVG gestrichen
	C2	HVG-Mitteilung	
	C3	dgg-journal	

	C4	Homepage der Institute	2017-2020
	C5	S. Müller-Braun, J. Schneider: Biaxially curved glass with large radii – determination of strength using the coaxial double ring test. Glass Structures & Engineering, Volume 2, Issue 2, pp.121–131, 2017	2017
	C6	C. Brokmann, C. Alter, S. Kolling: Experimental determination of failure strength in automotive windscreens using acoustic emission and fractography. Glass Structures & Engineering 4, pp. 229-241, 2019	2019
	C7	C. Brokmann, M. Berlinger, P. Schrader, S. Kolling: Fraktographische Bruchspannungs-Analyse von Acrylglas. Glasbau 2019, ce/papers 3, No. 1, pp. 225-237, 2019. Glass Structures & Engineering, online first, 2020	2019
	V8	C. Brokmann, S. Kolling, J. Schneider: Subcritical crack growth parameters in glass as a function of environmental conditions	2020
Maßnahme D Fachkonferenzen, Messen	D1	91. Glastechnische Tagung der DGG	29.-31.05.2017, Weimar
	D2	Glasstec	23. bis 26.10.2018 Düsseldorf
	D3	Annual Meeting/ Congress der ICG	Durch Wegfall der FE HVG gestrichen
	D4	Glass Performance Days	28.-30.06.2017, Tampere (Finnland)
	D5	CAE Grand Challenge	05.-06.04.2017, Hanau
	D6	European LS-DYNA Conference	09.-11.05.2017, Salzburg (Österreich)
	D7	15th German LS-DYNA Forum	15.-17.10 2018, Bamberg
	D8	8th International Workshop for Material and Structural Behaviour at Crash Processes - crashMAT	08.-09.05.2018, Freiburg
	D9	16th International LS-DYNA Conference	31.05-02.06.2020, Detroit (online)
	D10	CAE Grand Challenge	20.-21.04.2020, Hanau (online)
	D11	17. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage (WOST) 2020	25.-26.06.2020, Weimar (online)
Maßnahme E Seminare	E1	HVG-Seminar „Grundlagen der industriellen Glasherstellung“	26.-27.04.2017, Ofenbach
	E2	Dynamore-Seminar „Polymers/Elastomers“	27.-28.11.2018, Stuttgart
		Dynamore-Seminar „Polymers/Elastomers“	26.-27.08.2019 Gothenburg, Sweden
	E3	HVG-Seminar „Grundlagen der industriellen Glasherstellung“	10.-11.04.2018, Ofenbach
	E4	VDI-Seminar „Strukturmechanik“	07.-08.02.2018, Nürnberg
	E5	Carhs-Seminar „Material Models of Plastics and Foams for Crash Simulation“	26.-27.03.2018, München

E6	VDI-Seminar „Strukturmechanik“	07.-08.06.2018, Frankfurt am Main
E7	VDI-Seminar „Strukturmechanik“	10.-11.10.2018, Karlsruhe
E8	Carhs-Seminar „Material Models of Plastics and Foams for Crash Simulation“	23.-24.10.2018, Alzenau
E9	Seminar „Strukturmechanik, Haus der Technik“	18.-19.03.2019 Essen
E10	1 st seminar on modelling of glass fracture and fractured glass in glass laminates	07.06.2019 Darmstadt
E11	VDI-Seminar „Strukturmechanik“	25.-26.09.2019 Karlsruhe
E12	2 nd seminar on modelling of glass fracture and fractured glass in glass laminates	14.08.2020 Darmstadt (online)

6.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projektes

Maßnahme	Rahmen		Zeitraum
Maßnahme F projektbezogene Weiterbildung	F1	Schulungen inhouse und extern	ab 2021 analog Maßnahme E2, E10, E12
Maßnahme G Fachkonferenzen, Messen	G1	DGG-Jahrestagung	Aufgrund des Wegfalls der FE HVG gestrichen
	G2	Glasstec	
	G3	Annual Meeting / Kongress der Int. Commission on Glass	
	G4	Conf. Eur. Soc. Glass Technol.	zwei-jährlich
	G5	Glass performance days, Finnland	zweijährlich
	G6	User Meetings der Softwarehersteller (LS-DYNA, OptiSlang)	jährlich analog D6, D7, D9, D11
	G7	CAE Grand Challenge, Hanau	jährlich analog D5, D10
Maßnahme H Veröffentlichungen in Fachzeitschriften	H1	dgg-journal	Aufgrund des Wegfalls der FE HVG gestrichen 2018
	H2	Glass Technology	
	H3	Glass Structures & Engineering	2021
	H4	Glasbau Handbuch 2020	2020
Maßnahme I Weiterbildungsseminare, Vorlesungen	I1	HVG-Seminare „Industrielle Glasherstellung“ und „Festigkeit von Glas“	Aufgrund des Wegfalls der FE HVG gestrichen
	I2	Vorlesung „Industrielle Glasschmelztechnologie“ RWTH Aachen	
	I3	Vorlesung „Glasformgebung“ TU Freiberg	

	I4	Dynamore-Seminar „Polymers/Elastomers“	jährlich
	I5	Carhs-Seminar „Material Models of Plastics and Foams for Crash Simulation“	jährlich
Maßnahme J Implementierung in einen kommerziellen FE Solver	J1	Implementierung des entwickelten Modells in Altair RADIOSS	2021
	J2	Implementierung des entwickelten Modells in ANSYS LS-DYNA	2022

Die in Abschnitt 6.1 aufgeführten Maßnahmen zum Transfer in die Praxis sind bereits umgesetzt. Die Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projektes in Abschnitt 6.2 lassen sich sehr gut umsetzen. Eine für die Verbreitung der entwickelten Methodik zur stochastischen Simulation von Glas besonders wirksame Maßnahme ist die Implementierung des entwickelten Bruchmodells für Glas in kommerzielle Software. In der FE-Software RADIOSS (Maßnahme J1) ist diese bereits 2020 in ein Beta-Release implementiert worden und wird 2021 verfügbar sein. Für den FE-Solver LS-DYNA (Maßnahme J2) wurde bereits von der Forschungseinrichtung THM eine User-Subroutine erstellt. Mit einer offiziellen Implementierung wird allerdings erst 2022 gerechnet. Mit den aufgeführten Maßnahmen G6 und G7 sowie den entsprechenden Weiterbildungsseminaren I4 und I5 werden ganz gezielt die KMU erreicht. Zudem entstehen durch die Implementierung (Maßnahmen J1, J2) die Nutzungsmöglichkeiten für KMUs im wichtigen Berechnungsdienstleistungsbereich ohne weitere Kosten.

7 Literaturverzeichnis

- [1] S. Kolling, C. Alter und A. Rühl, Experimentelle und numerische Untersuchungen von Windschutzscheiben unter stoßartigen Belastungen zur Verbesserung des Fußgänger- und Insassenschutzes, AiF Projekt 17N1111, 2015.
- [2] R. Weißmann, J. Varner und K. Nattermann, Festigkeit von Glas - Grundlagen und Messverfahren, Verlag der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, 2001.
- [3] H. Müller-Simon, „Festigkeit von Behälterglas,“ in *HVG-Fortbildungskurs: Festigkeit von Glas*, Frankfurt Main, 2001.
- [4] J. Kleuderlein, F. Ensslen und J. Schneider, „Investigation of edge strength dependent on different types of edge processing,“ in *engineered transparency. International Conference at glasstec*, Düsseldorf, 2014.
- [5] W. Weibull, A statistical theory of the strength of materials, Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar, 1939.
- [6] R. Doremus, Fracture statistics: A comparison of Normal, Weibull and Type I extrem value distributions, Bd. 54, A. I. o. Physics, Hrsg., Journal of Applied Physics, 1983, pp. 193-198.
- [7] A. H. K. Nattermann, „Bruchstatistik,“ in *HVG Fortbildungskurs: Festigkeit von Glas*, Frankfurt Main, 2001.
- [8] A. Griffith und J. Gilman, „The phenomena of rupture and flow in solids,“ *Transactions of the ASM*, Bd. 61, pp. 855-906, 1968.
- [9] H. Müller-Simon, J. Wagner und A. Lenhart, „Practical strength of glass containers, part I: Influence of the type of defect,“ *Glastechnische Berichte*, Bd. 67, pp. 134-142, 1994.
- [10] DIN 18008-1: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln, 2010.

- [11] ISO 11485: Glas im Bauwesen - gebogenes Glas, 2014.
- [12] G. D. Quinn, Fractography of ceramics and glasses, NIST, 2007.
- [13] J. Wagner, H. Müller-Simon und A. Lenhart, „Practical strength of glass containers, part II: influence of handling,“ *Glastechnische Berichte*, Bd. 67, p. 196, 1994.
- [14] M. Vanderbroek, M. Lindqvist, J. Belis und C. Louter, „Edge strength of cut and polished glass beams,“ in *Glass Performance Days Proceedings*, 2011.
- [15] M. Lindqvist, M. Vandebroek, C. Louter und J. Belis, „Influence of edge flaws on failure strength of glass,“ in *Glass Performance Days Proceedings*, Tampere, Finland, 2011.
- [16] M. Lindqvist und C. Louter, „Experimental study on glass edge machining flaw characterization,“ *Engineering Fracture Mechanics*, Bd. 127, pp. 56-70, 2014.
- [17] R. Weißmann, „Prüfung der Kantenfestigkeit von Flachglas mittels Vierpunktbiegemethode,“ HVG Mitteilung Nr 2040, 2003.
- [18] M. Haldimann, A. Luible und M. Overend, „Structural use of glass,“ *International Association for Bridge and Structural Engineering*, 2008.
- [19] F. Andreas, Ein Beitrag zum Einsatz von Floatglas als dauerhaft tragender Konstruktionswerkstoff im Bauwesen, Darmstadt, 2000.
- [20] T. Pyttel, H. Liebertz und J. Caic, „Failure criterion for laminated glass under impact loading and its application in finite element simulation,“ *International Journal of Impact Engineering*, Bd. 39, pp. 252-263, 2012.
- [21] M. Gevers und M. Konrad, „Modelloptimierung von Verbundglas für die Crashsimulation,“ *Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 02, pp. 118-123, 2012.
- [22] C. Liebold, A. Hirth, R. Kirchner und A. Haufe, „An approach to capture the residual strength of laminated safety glass according to the FMVSS226 load case Ejection Mitigation with the finite-element software LS-Dyna,“ *International Journal of Crashworthiness*, Bd. 18, Nr. 6, pp. 606-619, 2012.
- [23] G. Thompson und A. Kilgur, „Detailed Windscreen Model for Pedestrian Head Impact,“ in *9. LS-Dyna Anwenderforum*, Bamberg, 2010.
- [24] J. Will, „Zusammenspiel Simulation und Versuch bei der statistischen Absicherung der virtuellen Produktentwicklung,“ Wiesbaden, 2008.
- [25] V. Bayer, „Zufallsfelder in der Robustheits- und Zuverlässigkeitsbeurteilung von Bauteilen,“ in *VDI Kongress Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau SIMVEC*, Baden-Baden, 2010.
- [26] D. Borsotto, C. Thole und R. Strickstock, „Robustness Analysis - Identification of Scatter Sources and Significant Reduction of Scatter Occurrence,“ in *NAFEMS Seminar "Optimierung und Robust Design"*, 2015.
- [27] D.-Z. Sun, F. Andrieux und M. Feucht, „Simulation der Prozesskette von Umformen bis Crach unter Berücksichtigung stochastischer Aspekte,“ in *9. LS-Dyna Forum*, Bamberg, 2010.
- [28] DIN EN 1288: Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas, Berlin, 2000.
- [29] S. Müller-Braun und J. Schneider, „Biaxially curved glass with large radii - determination of strength using the coaxial double ring test,“ *Glass Structures & Engineering*, Bd. 2, pp. 121-131, 2017.
- [30] S. Müller-Braun, C. Brokmann, J. Schneider und S. Kolling, „Strehgth of the individual glasses of curved, annealed and laminated glass used in automotive windscreens,“ *Engineering Failure Analysis (under review 10.2020)*.

- [31] v. D. Frechette, Failure analysis of brittle materials, John Wiley & Sons, 1990.
- [32] L. Ma, R. Dugnani und A. Moulins, „Non-Linearity of the Mirror Constant for Glasses Fractured in Flexure,“ *Journal of Shanghai Jiaotong University*, Bd. 23, Nr. 1, pp. 182-189, 2018.
- [33] C. Brokmann, C. Alter und S. Kolling, „Experimental determination of failure strength in automotive windscreens using acoustic emission and fractography,“ *Glass Structures and Engineering*, Bd. 4, Nr. 2, pp. 229-241, 2019.
- [34] C. Alter, S. Kolling und J. Schneider, „An enhanced non-local failure criterion for laminated glass under low velocity impact,“ *International Journal of Impact engineering*, Bd. 109, pp. 342-353, 2017.
- [35] P. Blatz und W. Ko, „Application of finite elastic theory to the deformation of rubbery materials,“ *Transactions of the Society of Rheology*, Bd. 6, Nr. 1, pp. 223-252, 1962.
- [36] P. Du Bois, S. Kolling und W. Fassnacht, „Modelling of safety glass for crash simulation,“ *Computational materials science*, Bd. 28, Nr. 3-4, pp. 675-683, 2003.
- [37] G. Manthei, C. Alter und S. Kolling, „Localization of initial cracks in laminated glass using acoustic emission analysis: Part I,“ in *31th Conference of the European Working Group on Acoustic Emission*, Dresden, Germany, 2014.
- [38] T. Thenikl, D. Altmann und H. Vallen, „Quantifying location errors,“ in *32nd European Conference on Acoustic Emission Testing*, Prague, Czech Republic, 2016.
- [39] S. Wiederhorn, „Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass,“ *Journal of the American Ceramic Society*, Bd. 50, Nr. 8, pp. 407-414, 1967.
- [40] S. Wiederhorn und L. Bolz, „Stress corrosion and static fatigue of glass,“ *Journal of the American Ceramic Society*, Bd. 53, Nr. 10, pp. 543-548, 1970.
- [41] V. Sglavo und M. Bertoldi, „Vickers indentation: A powerful tool for the analysis of fatigue behavior on glass,“ *Ceramic Transactions*, Bd. 156, pp. 13-22, 2004.
- [42] A. Evans und H. Johnson, „The fracture stress and its dependence on slow crack growth,“ *Journal of Materials Science*, Bd. 10, Nr. 2, pp. 214-222, 1975.
- [43] D. Maugis, „Subcritical crack growth, surface energy, fracture toughness, stick-slip and embrittlement,“ *Journal of Materials Science*, Bd. 20, Nr. 9, pp. 3941-3073, 1985.
- [44] T. Anderson, Fracture mechanics: fundamentals and application, CRC Press, 2017.
- [45] K. Blank, „Dickenbemessung von vierseitig gelagerten rechteckigen Glasscheiben und gleichförmiger Flächenlast,“ Institut für konstruktiven Glasbau, Gelsenkirchen, 1993.
- [46] C. Brokmann, S. Kolling und J. Schneider, „Subcritical crack growth parameters in glass as a function of environmental conditions,“ *Glass Structures & Engineering*, pp. 1-13, 2020.
- [47] M. Haldimann, Fracture strength of structural glass elements: analytical and numerical modelling, testing and design, Lausanne: EPFL, 2006.
- [48] M. Overend und K. Zammit, „A computer algorithm for determining the tensile strength of float glass,“ *Engineering Structures*, Bd. 45, pp. 68-77, 2012.
- [49] C. Ullner, „Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Kalk-Natronsilicatglas nach mechanischer Vorschädigung durch Korundberieselung,“ Berlin, 1993.
- [50] P. Dwivedi und D. Green, „Determination of subcritical crack growth parameters by in situ observation of indentation cracks,“ *Journal of the American Ceramic Society*, Bd. 78, Nr. 8, pp. 2122-2128, 1995.

- [51] R. Bellarini, G. Pisano und G. Royer-Carfagni, „The lower bound for glass strength and its interpretation with generalized Weibull statistics for structural applications,“ *Journal of Engineering Mechanics*, Bd. 142, Nr. 12, p. 04016100, 2016.
- [52] Euro NCAP, „Pedestrian testing protocol,“ 2008.
- [53] C. Brokmann und S. Kolling, „A Model for the Stochastic Fracture Behavior of Glass,“ in *16th LSTC World Conference*, Detroit (virtual), 2020.
- [54] S. Schula, Charakterisierung der Kratzanfälligkeit von Gläsern im Bauwesen, Darmstadt: Springer-Verlag, 2015.
- [55] F. Kloesel, „Formgebung und Veredelung von Flachglas,“ in *HVG Fortbildungskurs*, 2014.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2015)

Nr.	Titel
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
286	χMCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
287	Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
288	Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
289	Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
290	Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
291	Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
292	Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017

- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopferschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018
- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashsimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019

- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
- 334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
- 335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
- 336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
- 337 Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
- 338 Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020
- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2020

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik