

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der zunehmende Einsatz von Glas im Bauwesen, bedingt durch den architektonischen Wunsch nach filigranen und transparenten Strukturen, erfordert ein grundlegendes Verständnis für eine materialgerechte Konstruktion und Bemessung dieses Werkstoffs. Dem spröden, unangekündigten Bruchverhalten von Glas wird durch den Einsatz von Verbundglas begegnet, bei welchem Kunststoffschichten zwischen zwei oder mehreren Glasplatten angeordnet werden. Sind nach dem Glasbruch sicherheitsrelevante Aspekte wie Splitterbindung und Resttragfähigkeit der Konstruktion sichergestellt, spricht man von Verbund-sicherheitsglas.

Diese Produktbezeichnung lässt bereits auf die üblichen Einsatzgebiete von Verbundgläsern schließen, bei denen die Gefährdung von Personen durch einen Glasbruch zu verhindern ist. Beispiele hierfür sind Horizontalverglasungen mit darunter befindlichen Verkehrsflächen sowie absturzsichernde, begehbare oder zu Reinigungszwecken betretbare Verglasungen. Auch Verglasungen, die eine Schutzfunktion gegenüber Einbruch, Beschuss oder Explosion aufweisen sollen, werden üblicherweise mit Verbundglas ausgeführt. Die Verwendung von monolithischen Verglasungen führt insbesondere bei dem Lastfall Explo-



**Abbildung 1.1** Anwendung von Verbundglas im Bauwesen: konstruktiver Werkstoff, Absturzsicherung und Horizontalverglasung (a) sowie begehbare Verglasung im Apple Store New York (b); konstruktiver Werkstoff, Absturzsicherung und Horizontalverglasung im Museum Mauritshuis Den Haag (c)



**Abbildung 1.2** Auswirkungen einer Explosion auf ein Gerichtsgebäude in Athen mit monolithischem Glas, Bildnachweis: dpa (a); Verbundglas nach einer Prüfung auf Explosionsschutz im Stoßrohr (b)

sion zu einem hohen Sicherheitsrisiko: Eine Vielzahl an Verletzungen entsteht bei einem solchen Ereignis durch fliegende Glassplitter (NORVILLE, 2005).

Immer häufiger wird Glas zudem als konstruktiver Werkstoff eingesetzt. Hier ist ein unangekündigtes Versagen des Glasbauteils, welches zum vollständigen Versagen der Konstruktion führt, nicht akzeptabel. In Abbildung 1.1 werden typische Anwendungen von Verbundgläsern dargestellt.

In Abbildung 1.2 wird die signifikante Verbesserung des Nachbruchverhaltens und die damit einhergehende Reduktion des Gefährdungspotentials von Verbundglas gegenüber monolithischen Verglasungen im Lastfall Explosion verdeutlicht. Während bei monolithischen Verglasungen (a) die Glassplitter mit hoher Geschwindigkeit in den Schutzbereich fliegen, werden sie bei Verbundgläsern (b) von der Folie zurückgehalten.

Die Verwendung von Zwischenschichten aus Kunststoff führt zu der Fragestellung nach der Dauer der Belastung und der dabei vorherrschenden Temperatur, da beide Einflussfaktoren signifikante Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffs haben. Für das wachsende Angebot unterschiedlicher Zwischenschichtmaterialien sind vergleichende Untersuchungen nötig, um Materialeigenschaften und die Eignung für bestimmte Anwendungssituationen zu beurteilen.

Im intakten Zustand, wenn keine Glasplatte gebrochen ist, wirkt sich die Steifigkeit der Zwischenschicht direkt auf die Schubkopplung der Glasplatten und damit auf die erzeugten Deformationen und Spannungen im Glas aus. Zur realitätsnahen Modellierung eines Verbundglases ist daher die temperatur- und zeitabhängige Steifigkeit der Zwischenschicht zu berücksichtigen.

Bei einem Bruch der Glasplatten erfährt die Zwischenschicht große Dehnungen bis zum Versagen. Dabei löst sich lokal an den Bruchstellen die Verbindung von Folie und

Glas (Delamination), sodass neben der Steifigkeit auch die Haftung einen maßgebenden Einfluss auf das Nachbruchverhalten ausübt.

Die Steifigkeit des Werkstoffs Glas zeigt im baupraktischen Einsatzbereich demgegenüber keine Abhängigkeit von Belastungsdauer und Temperatur, die Festigkeit dagegen schon.

Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Verbundglas im Lastfall Explosion, welcher als außergewöhnlicher Lastfall in bestimmten Bauprojekten maßgebend werden kann, wurden bisher nur wenige veröffentlicht. Die Besonderheit gegenüber den im Bauwesen üblichen Einwirkungen liegt in der zwar kurzzeitigen aber hohen Intensität der Belastung. Ein Tragfähigkeitsnachweis wird derzeit üblicherweise mittels zeit- und kostenintensiver Experimente geführt, da noch keine zuverlässigen rechnerischen Bemessungsmethoden existieren.

Die experimentelle Ermittlung und rechnerische Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften von Verbundglas im intakten und im gebrochenen Zustand stellt ein aktuelles wissenschaftliches und wirtschaftliches Interesse dar und wird in der vorliegenden Arbeit behandelt. Der intakte Zustand wird dabei allgemeingültig für beliebige Belastungsdauern und -temperaturen und im Besonderen für den Lastfall Explosion betrachtet. Die Untersuchungen zum gebrochenen Zustand, welcher in mechanischer Hinsicht wesentlich komplexer zu beschreiben ist, beschränken sich auf den Lastfall Explosion.

## 1.2 Zielsetzung

Das Verständnis zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Verbundglas beinhaltet unterschiedliche Aspekte, die sich auf den Werkstoff Glas, die verwendete Zwischenschicht oder die Interaktion beider Werkstoffe beziehen. Die hierfür angestrebten Forschungsbeiträge dieser Arbeit werden in diesem und dem folgenden Abschnitt verdeutlicht und in den aktuellen Stand der Forschung eingeordnet.

Das isotrope Materialverhalten des Werkstoffs Glas lässt sich ausreichend genau mithilfe der linearen Elastizitätstheorie beschreiben. Die Materialparameter zur Beschreibung der Steifigkeit sind bekannt und in hinreichendem Maß bestätigt (SCHOLZE, 1988, DIN EN 572-1). Für eine Versagensprognose werden darüber hinaus Festigkeitswerte benötigt. Hier zeigt Glas eine Abhängigkeit von der Belastungsdauer. Der quasistatischen Belastung widmen sich bereits eine Vielzahl von Untersuchungen. Für kurzzeitige dynamische Einwirkungen, denen auch der Lastfall Explosion zuzuordnen ist, liegen dagegen nur wenige Veröffentlichungen vor. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher experimentelle Untersuchungen durchgeführt und mit der Theorie der linear-elastischen Bruchmechanik verglichen, um Werte für die Kurzzeitfestigkeit im Lastfall Explosion abzuleiten.

Zur Charakterisierung des mechanischen Verhaltens der Kunststoff-Zwischenschichten ist eine Unterscheidung zwischen der Belastung im intakten und im gebrochenen Verbundglas zweckmäßig. Die beschränkten Verzerrungen, welche die Zwischenschicht im intak-

ten Verbundglas erfährt, ermöglicht die Anwendung der linearen Viskoelastizität. In Verbindung mit dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip kann die Steifigkeit vollständig in Abhängigkeit von Belastungszeit und Temperatur beschrieben werden. Hierzu werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt und Auswertemethoden entwickelt, um Parameter für geeignete Materialmodelle abzuleiten. Eine Validierung der Materialparameter erfolgt anhand von Bauteilversuchen. Die Untersuchungen erfolgen im Hinblick auf im Bauwesen übliche Belastungsdauern und darüber hinaus auf den Lastfall Explosion.

Nach einem Versagen der Gläser erfährt die Zwischenschicht große Dehnungen im Bereich der Bruchstellen. Die Anwendung der linearen Viskoelastizität ist hierfür nicht mehr gerechtfertigt, da die Kunststoffe sich sowohl in Bezug auf die Elastizität als auch auf die Viskosität bei großen Dehnungen nichtlinear verhalten. Im Lastfall Explosion entstehen diese großen Dehnungen in sehr kurzer Zeit, weshalb die Dehnraten (Ableitung der Dehnung nach der Zeit) nicht mit denen aus quasistatischen Belastungen vergleichbar sind. Der Einfluss der Dehnraten auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird daher in dieser Arbeit experimentell untersucht.

Neben den in Verbundglas überwiegend eingesetzten Folien aus Polyvinylbutyral (PVB) werden für bestimmte Anwendungen andere Zwischenschichten beispielsweise aus Ethylvinylacetat (EVA), Ionoplast oder thermoplastischem Polyurethan (TPU) verwendet. Zur Beurteilung der Materialeigenschaften und Empfehlung hinsichtlich einer geeigneten Materialauswahl in Abhängigkeit des Anwendungsfalles beleuchten die Untersuchungen dieser Arbeit einen Großteil der im Bauwesen verwendeten Zwischenschichten im direkten Vergleich.

Schließlich wird das mechanische Verhalten von Verbundglas im Lastfall Explosion unter Beachtung der Interaktion von Glas und Zwischenschicht untersucht. Die Berechnung des intakten Zustands ist mithilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) möglich. Eine Validierung dessen erfolgt anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen, um zukünftig zeit- und kostenintensive Bauteilprüfungen zu reduzieren.

Das mechanische Verhalten im gebrochenen Zustand wird durch mehrere Aspekte beeinflusst. Maßgeblich ist neben der Steifigkeit der Zwischenschicht bei großen Dehnungen auch die Haftung zum Glas. Der Einfluss beider Parameter auf das Nachbruchverhalten im Lastfall Explosion wird im Hinblick auf eine Optimierung untersucht. Die Berechnung des gebrochenen Zustands ist noch nicht zuverlässig möglich. Ein Vergleich mit den derzeit möglichen Berechnungsmethoden und dem realen Tragverhalten wird durchgeführt und kritisch hinterfragt, um eine Orientierung für weiterführenden Forschungsbedarf abzuleiten.

## 1.3 Aktueller Stand der Forschung

Nachfolgend wird der Stand der Forschung bezüglich des mechanischen Verhaltens von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung zusammenfassend dargelegt. Der Struktur dieser Arbeit entsprechend erfolgt dies durch eine Gliederung in die Bereiche Glasfestigkeit, Zwischenschichten, intaktes Verbundglas und Nachbruchverhalten. Dabei werden noch offene Aspekte angesprochen, zu denen im Rahmen dieser Arbeit Beiträge geleistet wurden.

Eine gesicherte Aussage zur **Festigkeit von Glas** unter kurzzeitigen dynamischen Einwirkungen ist derzeit nur eingeschränkt möglich. Das ist insbesondere begründet durch die geringe Anzahl an experimentellen Untersuchungen in Verbindung mit der üblichen starken Streuung bei Festigkeitsuntersuchungen mit Glas. Hier sind die Arbeiten von SCHNEIDER, 2001, NIE et al., 2010 und PERONI et al., 2011 zu nennen, deren Ergebnisse in Abschnitt 2.2.2 ausführlich dargelegt werden.

Die linear-elastische Bruchmechanik ist eine geeignete Theorie zur Beschreibung des Versagens von spröden Werkstoffen. Wird das bei Glas beobachtete subkritische Risswachstum erfasst, kann der Einfluss der Belastungsdauer auf die Festigkeit anhand von Lebensdauerprognosen quantifiziert werden. Eine umfängliche Berücksichtigung der verschiedenen Bereiche des subkritischen Risswachstums zur Prognose der Kurzzeitfestigkeit von Glas ist bisher allerdings noch nicht erfolgt.

Unterschiedliche Aspekte des mechanischen Verhaltens von **Verbundglas-Zwischenschichten** wurden bereits an einzelnen Produkten untersucht. Das zeit- und temperaturabhängige Verhalten von Folien aus PVB bei kleinen Verzerrungen wurde in VALLABHAN et al., 1992, FRIED, 1995, SOBEK et al., 2000, SCHULER, 2003, ENSSLEN, 2005, KASPER, 2005 und SACKMANN, 2008 anhand von Kriech- oder Relaxationsversuchen im Glaslaminat untersucht. Ergebnisse aus Dynamisch-Mechanisch-Thermischen Analysen (DMTA) sind in VAN DUSER et al., 1999, HOOPER, 2011, BARREDO et al., 2011 und KOTHE, 2013 veröffentlicht. Für Ionoplastfolien hat der damalige Hersteller des Produkts SentryGlas® Steifigkeitsparameter in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur publiziert (BENNISON et al., 2008). Darüber hinaus wurden Kriechversuche bei verschiedenen Temperaturen in CALLEWAERT, 2011 und DMTA in KOTHE, 2013 durchgeführt.

Kriech- oder Relaxationsversuche am Laminat zeigen starke Einschränkungen bei der messtechnischen Erfassung des breiten Steifigkeitsbereichs eines Kunststoffes. Hier und in Bezug auf die Gesamtprüfzeit zeichnen sich DMTA durch eine höhere Effizienz aus. Der Einfluss des Belastungsmodus (Zug, Scherung, Torsion etc.) auf die Ergebnisse über den gesamten Steifigkeitsbereich ist aber auch hier signifikant und wurde bisher nicht untersucht. Eine wissenschaftlich belastbare Empfehlung, wie eine DMTA zur Ermittlung von mechanischen Materialparametern für Verbundglas-Zwischenschichten durchzuführen ist, steht somit nicht zur Verfügung.

Viskoelastische Materialmodelle in Form von Prony-Reihen wurden für PVB in VAN DUSER et al., 1999, SCHULER, 2003, ENSSLEN, 2005, SACKMANN, 2008, BARREDO et al., 2011 und HOOPER, 2011 veröffentlicht. Ein Vergleich wird in Abschnitt 4.3.3 dargestellt. Die maximale Anzahl an Reihengliedern ist bei allen Modellen eingeschränkt, sodass nur ein bestimmter Zeitbereich erfasst werden kann. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Beschreibung des zeitabhängigen Materialverhaltens mithilfe der linearen Viskoelastizität bereits mehrfach angewandt wurde. Eine strukturierte Vorgehensweise zur Ermittlung der benötigten Materialparameter bis hin zur experimentellen Validierung liegt jedoch noch nicht vor.

Das uniaxiale Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Zwischenschicht bei großen Dehnungen bis zum Bruch kann anhand von Zugversuchen ermittelt werden. Die Zeitabhängigkeit lässt sich dabei über die Belastungsgeschwindigkeit erfassen. Kurzzeitige dynamische Belastungen, die bei dem Lastfall Explosion auftreten, lassen sich in Hochgeschwindigkeitsprüfmaschinen realisieren. Diesbezügliche Untersuchungen an PVB-Folien wurden erst in jüngerer Zeit durchgeführt und von BENNISON et al., 2005, IWASAKI et al., 2007, MORISON, 2007 und HOOPER, 2011 veröffentlicht. Zu Ionoplastfolien existieren bisher nur Untersuchungen des Herstellers (BENNISON et al., 2005). Andere Untersuchungen beschränken sich auf quasistatische Belastungsgeschwindigkeiten (MEISSNER et al., 2005; BELIS et al., 2009; PULLER, 2012; KOTHE, 2013). In Abschnitt 4.3.3 werden die Ergebnisse der genannten Untersuchungen verglichen. Folien aus EVA oder TPU wurden bisher nicht in Versuchen mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten untersucht. Parameter für geeignete Materialmodelle wurden selten abgeleitet. Zudem erfolgte bei keiner der Untersuchungen eine Auswertung zu Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bei konstanter wahrer Dehnrate, die für einen aussagekräftigen Vergleich von unterschiedlichen Materialien untereinander sowie für eine Implementierung in geeignete Materialmodelle erforderlich sind.

Das **mechanische Verhalten eines intakten Verbundglases** lässt sich bei Kenntnis der Zwischenschichtsteifigkeit im für die jeweilige Problemstellung relevanten Zeit- und Temperaturbereich beschreiben. Für eine konstant angenommene Zwischenschichtsteifigkeit existieren analytische Näherungsverfahren (STAMM et al., 1974; WÖLFEL, 1987; KUTTERER, 2005). Zur Abbildung komplexer Geometrien oder zur Berücksichtigung der Zeit- und Temperaturabhängigkeit stehen eine Vielzahl kommerzieller Finite-Elemente-Programme zur Verfügung. Bisher wurde noch nicht anhand experimenteller Untersuchungen umfassend validiert, dass mithilfe eines solchen FE-Modells der Deformations- und Spannungsverlauf in einer intakten Verglasung im Lastfall Explosion bei Berücksichtigung von Lagerungssituation und Massenträgheit realitätsnah abgebildet werden kann.

Rechnerische Prognosen zum **mechanischen Verhalten eines gebrochenen Verbundglases** stellen ein wesentlich komplexeres Problem dar. Untersuchungen unter quasistatischer Belastung wurden bereits mehrfach veröffentlicht. Jedoch stellen sowohl die experimentelle Auswertung bestimmter Aspekte (Rissfortschritt im Glas, Delamination der



Zwischenschicht vom Glas, Verzerrungen der Zwischenschicht an der Bruchstelle) als auch deren numerische Abbildung noch nicht abschließend gelöste Fragestellungen dar (SESHADRI et al., 2002; KOTT, 2006; FAHLBUSCH, 2007; NIELSEN et al., 2009; BUTCHART et al., 2012; FRANZ, 2015).

Für den kurzzeitigen dynamischen Lastfall Explosion können einige Aspekte der quasistatischen Belastung vereinfacht werden. Beispielsweise kann die Zeitabhängigkeit der Belastung durch eine Dehnratenabhängigkeit der Zwischenschicht im Modell erfasst werden. Die Simulation von Kriechprozessen ist hiermit nicht möglich aber auch nicht erforderlich.

Bisherige **Untersuchungen zur Explosionsbeanspruchung** von Verglasungen stammen insbesondere aus Großbritannien und den USA. Oftmals wurde dabei für eine Bemessung eine Reduktion auf einen Einfreiheitsgradschwinger durchgeführt (ARA, 2005; WEI et al., 2006; MORISON, 2007; ZOBEC et al., 2015). Eine realitätsnahe Abbildung der Schwingung des Plattenmittelpunkts über die Ermittlung von Ersatzsteifigkeit und -masse ist für den intakten Zustand auch unter Beachtung geometrischer Nichtlinearität ohne Weiteres möglich (BIGGS, 1964; SMITH, 2001; MORISON, 2007; UFC 3-340-02, 2008). Problematisch ist dagegen die Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens und die Ermittlung des Versagens, welches als Auslenkungskriterium (Verformungskriterium) definiert werden muss. Letzteres erfolgt in der Regel mittels experimenteller Untersuchungen, konservativer Abschätzungen oder Finite-Elemente-Berechnungen. Eine Übertragbarkeit des Auslenkungskriteriums auf andere Geometrien, Randbedingungen, Abmessungen und Glasaufbauten ist daher nur eingeschränkt möglich und nicht validiert. Die gestiegene Leistungsfähigkeit von Rechnern und Finite-Element-Programmen stellt zudem die Berechtigung solcher vereinfachter Bemessungsmodelle in Frage.

Aktuelle Dissertationen zum mechanischen Verhalten von explosionshemmenden Verglasungen stammen von MORISON, 2007 und HOOPER, 2011. MORISON, 2007 fasst die früheren Untersuchungen zu Einfreiheitsgradschwingern zusammen und entwickelt darauf aufbauend eine Analyseverfahren zur Bemessung von Verbundglas unter Explosionsbelastung. Nach Glasbruch wird dabei dem Einfreiheitsgradschwinger die Steifigkeit der reinen PVB-Membran zugewiesen. HOOPER, 2011 führte experimentelle und numerische Untersuchungen zu silikonverklebten Verglasungen unter Explosionsbelastung durch. Das dabei erstellte FE-Modell berücksichtigt das Nachbruchverhalten durch eine global reduzierte Steifigkeit in Verbindung mit einem Plastizitätsmodell. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag in der Dimensionierung der Silikonverklebung.

Nur wenige Ergebnisse experimenteller Untersuchungen von Verglasungen unter Explosionsbelastungen liegen bisher als frei zugängliche Veröffentlichungen vor (KRANZER et al., 2005; BURMEISTER et al., 2005; MORISON, 2007; HOOPER, 2011; LARCHER et al., 2012). Insofern besteht generelles Forschungsinteresse, weitere Versuchsergebnisse unter Angabe der gewählten Instrumentierung und validierungsfähiger Ergebnisgrößen zu veröffentlichen.

Die Haftung (Adhäsion) zwischen Glas und Zwischenschicht beeinflusst maßgeblich das Delaminationsverhalten und damit das Nachbruchverhalten von Verbundgläsern. Eine hierzu geeignete Untersuchungsmethode im Kleinformat ist der Through Cracked Tensile (TCT) Test, welcher quasistatisch bereits mehrfach mit Zwischenschichten aus PVB oder Ionoplasten durchgeführt wurde (SESHADRI et al., 2002; FERRETTI et al., 2012; BUTCHART et al., 2012; DELINCÉ, 2014; FRANZ, 2015). Untersuchungen mit hohen Belastungsgeschwindigkeiten, die den Lastfall Explosion beschreiben, liegen dagegen kaum vor. Lediglich HOOPER, 2011 führte quasistatische und dynamische TCT Tests mit mehrfach gebrochenen PVB-Laminaten durch, um den Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit und Foliendicke auf das Delaminationsverhalten zu untersuchen und ein verschmiertes (globales) Materialmodell für das gebrochene Verbundglas abzuleiten. Der Einfluss unterschiedlicher Haftgrade und Zwischenschichtsteifigkeiten auf das Nachbruchverhalten wurde bisher weder in TCT Tests noch in Explosionsversuchen untersucht.

Die Simulation des Nachbruchverhaltens von Verbundglas unter Explosionsbeanspruchung mit der Methode der Finiten Elemente beinhaltet noch einige ungelöste Fragestellungen. Neben der Abbildung des Rissfortschritts im Glas betrifft dies insbesondere das Materialverhalten der Zwischenschicht sowie die lokale Delamination der Zwischenschicht vom Glas an den Bruchstellen. Die heute gängige Methode zur Rissfortschrittssimulation unter kurzzeitigen dynamischen Beanspruchungen ist das Löschen von Elementen bei Erreichen eines definierten Versagenskriteriums (Erosion). Neue Methoden wie beispielsweise die Extended FEM (XFEM) (BELYTSCHKO et al., 2009) zeigen diesbezüglich vielversprechende Ansätze, sind jedoch in ihrer Anwendung auf komplexe Bruchvorgänge hinsichtlich Rissverzweigung und einer großen Anzahl an Rissen noch beschränkt.

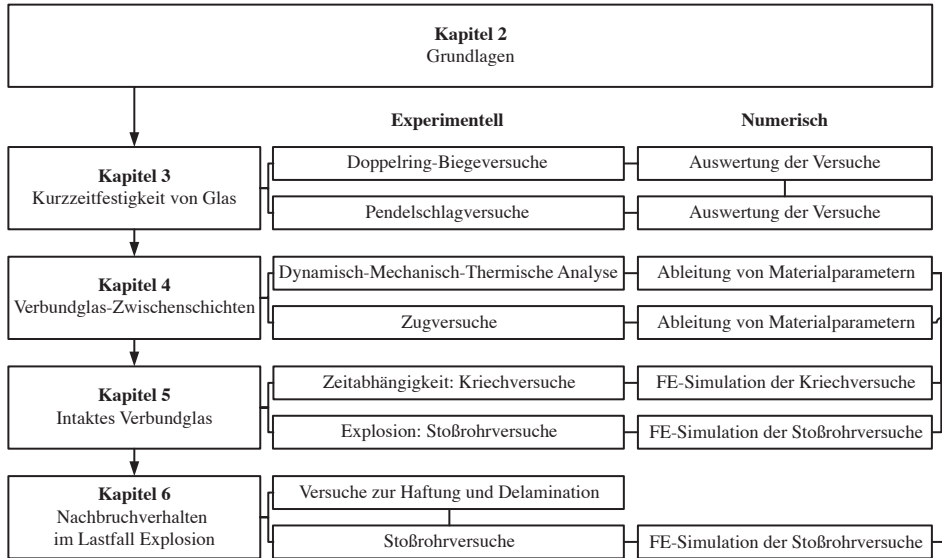
Die angewandten Modellierungstechniken reichen von der Simulation des gesamten Verbundglases mit Ein-Schalen-Modellen bis zur Abbildung aller Schichten mit Volumenelementen (SCHNEIDER et al., 2004; TIMMEL et al., 2007; KONRAD et al., 2010; THOMPSON, 2010; LARCHER et al., 2012). Eine thermodynamisch konsistente Kopplung des viskoelastischen Verhaltens der Zwischenschicht und der Nichtlinearität bei großen Dehnungen ist derzeit noch nicht als zuverlässiges Materialmodell in kommerziellen FE-Programmen verfügbar. Eine vereinfachte Möglichkeit stellt die dehnratenabhängige Hyperelastizität dar (KOLLING et al., 2007). Die Delamination der Zwischenschicht vom Glas kann mittels Kohäsivzonelementen numerisch abgebildet werden (SESHADRI et al., 2002; WU et al., 2010; FRANZ, 2015).

Insgesamt ist festzustellen, dass es derzeit noch nicht möglich ist, mit einem FE-Modell das mechanische Verhalten eines gebrochenen Verbundglases prognosesicher abzubilden.



## 1.4 Inhalt und Gliederung der Arbeit

Die Gliederung der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.3 dargestellt.



**Abbildung 1.3** Übersicht über experimentelle und numerische Untersuchungen dieser Arbeit

In **Kapitel 2** werden die für diese Arbeit relevanten **Grundlagen** zusammengefasst. Ausgehend von einer zeitlichen Einordnung der im Glasbau üblichen Einwirkungen werden die Besonderheiten des Lastfalls Explosion dargelegt. Anschließend wird das mechanische Verhalten des Werkstoffs Glas und von Kunststoffen erläutert. Darauf aufbauend folgt eine Beschreibung des Bauprodukts Verbundglas sowie dessen Zwischenschichten und der Anwendung als explosionshemmende Verglasung. Die Beschreibung der Zwischenschichten wird ausführlich gehalten, da diese einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darstellen und bisher in keinem Standardwerk vergleichbar dargestellt wurden. Schließlich werden wichtige Aspekte bei der numerischen Behandlung zeitabhängiger Probleme erläutert.

Die eigenen Untersuchungen werden in den Kapiteln 3 bis 6 beschrieben. Diese Kapitel sind, sofern möglich, symmetrisch aufgebaut mit einer allgemeinen Einführung, der Darstellung der experimentellen und numerischen Untersuchungen und einer Zusammenfassung am Ende des Kapitels.

**Kapitel 3** behandelt die durchgeführten **Untersuchungen zur Kurzzeitfestigkeit von Glas**. Um die Steigerung der Festigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung gegenüber den

normativ angegebenen Werten experimentell zu untersuchen, wurden quasistatische Doppelring-Biegeversuche (DRBV) und dynamische Pendelschlagversuche (PSV) durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit numerischen Hilfsmitteln: Für die Doppelring-Biegeversuche wurde ein FE-Modell erstellt, um die Spannungen im Glas bei der jeweils gemessenen Kraft sowie die vorliegenden Elastizitätsmoduln der verschiedenen Glasarten zu ermitteln. Die Pendelschlagversuche wurden ebenfalls exemplarisch mithilfe eines FE-Modells nachgerechnet. Für die Auswertung der Versuche war die bruchmechanische Ermittlung der Anfangsrisstiefe entscheidend, welche für die dynamischen Pendelschlagversuche anhand einer transienten Simulation numerisch erfolgte. Hierbei wurden erstmals alle Bereiche des subkritischen Risswachstums berücksichtigt. Darauf aufbauend erfolgte eine Prognose der Kurzzeitfestigkeit in Abhängigkeit der Anfangsrisstiefe und der Spannungsrate.

In **Kapitel 4** werden die **Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Verbundglas-Zwischenschichten** dargestellt. Zur Charakterisierung der Steifigkeit verschiedener Verbundglas-Zwischenschichten in Abhängigkeit von Belastungszeit und Temperatur im Bereich kleiner Verzerrungen wurden Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analysen (DMTA) durchgeführt. Ein Vergleich verschiedener Belastungsmodi dient dazu, Empfehlungen für geeignete Prüfmethode abzuleiten. Das zeitabhängige Verhalten bei großen Dehnungen wurde anhand von uniaxialen Zugversuchen bei Raumtemperatur untersucht. Hierbei wurden verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten realisiert, um quasistatische Belastungen bis hin zu Explosionsbeanspruchungen zu erfassen. Anschließend erfolgte eine Auswertung zu Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bei konstanter wahrer Dehnrate.

Aus den DMTA an PVB wurden Materialparameter für viskoelastische Materialgesetze (Prony-Reihen) und Zeit-Temperatur-Verschiebungsansätze abgeleitet. Hierfür wurde ein allgemein anwendbares Optimierungswerkzeug entwickelt, welches eine beliebige Anzahl an unbekanntem Parametern zulässt. Aus den Zugversuchen wurden linear-elastische und hyperelastische Materialparameter ermittelt. Neben einem umfassenden Vergleich der untersuchten Materialien untereinander wird ein Vergleich der ermittelten Materialkennwerte mit Literaturangaben dargestellt.

Die in **Kapitel 5** beschriebenen **Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von intaktem Verbundglas** gliedern sich in zwei Aspekte. Anhand von Kriechversuchen wurden die viskoelastischen Materialparameter von PVB validiert. Der Lastfall Explosion wurde mittels Stoßrohrversuchen an zwei Verbundglasaufbauten mit jeweils drei Probekörpern untersucht. Die Belastung im Stoßrohr wurde dabei stufenweise bis zum Glasbruch gesteigert. Mithilfe zweier Finite-Elemente-Modelle wurden die Stoßrohrversuche abgebildet und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

In **Kapitel 6** werden die **Untersuchungen zum Nachbruchverhalten von Verbundglas im Lastfall Explosion** dargestellt. Neben Glasart, Glasdicke und der Lagerung der

Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter  
zeitabhängiger Belastung und  
Explosionsbeanspruchung

Mechanical behaviour of laminated glass under  
time-dependent and explosion loading

Kuntsche, J.K.

2015, XX, 254 S. 148 Abb., 95 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-48830-0