Deutscher Ausschuß für Stahlbau DASt

# 2/2018

# Forschungsbericht

Robustheit und Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas in Hinblick auf bauaufsichtliche Anforderungen

18512 N

# Urheberbezeichnung (Copyright); Haftungsausschluss

Dieses Werk und dessen Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungs- und Verwertungsrechte liegen beim Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. DASt (Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf). Verstöße gegen das Urheberrecht (z.B. das unberechtigte Kopieren von Texten) sind gemäß §§ 106 ff. UrhG strafbar und wird mit Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bestraft. Der Versuch ist ebenfalls strafbar. Daneben könne zivilrechtliche Schadensersatzund Vergütungsansprüche bestehen.

Bei der Erstellung dieses Werkes wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Für fehlerhafte Angaben und deren Folgen kann daher keine Haftung übernommen werden; dies gilt nicht für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit. Rechtsansprüche aus der Benutzung der Daten sind insoweit ausgeschlossen.

Angaben über Normen beziehen sich auf den Veröffentlichungszeitpunkt.

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind wir stets dankbar.

Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt, Düsseldorf

Vertrieb: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Oktober 2021



Forschungsvereinigung	Deutscher Ausschuß für Stahlbau e.V. DASt
Forschungsstelle	RWTH Aachen Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau
	UnivProf. DrIng. Markus Feldmann
IGF-Nummer	18512N

**DASt-Homepage** 

www.stahlbauforschung.de





Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben "Robustheit und Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas in Hinblick auf bauaufsichtliche Anforderungen", IGF-Projekt Nr. 18512 N, der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

# Zusammenfassung

Betrachtet man die Anwendung von primär tragenden Bauteilen aus Glas auf nationaler (DIN 18008: Tragende Bauteile aus Glas, Teil 7 Sonderkonstruktionen) und internationaler (CEN/TC250/SC11 "Structural Glass") Ebene, so kann festgehalten werden, dass die normativen Regelungen für dieses Anwendungsprinzip beschränkt sind. Somit wäre der Einsatz von Glasstützen, Schubfeldern aus Glas und allen längsbeanspruchten Glaselementen, die Lasten aus darüber liegenden Bauteilen aufnehmen, nur über eine Zustimmung im Einzelfall möglich. Immer deutlicher wird, dass eine größer werdende Nachfrage im Konstruktiven Ingenieurbau in Hinblick auf primär tragende Strukturen aus Glas vorhanden ist. Trotz der bereits vorhandenen Lösungsansätze zur Bemessung dieser primär tragenden Strukturen, konnte bislang eine Übertragung der Ansätze nicht ohne weiteres durchgeführt werden. Die vorgeschlagenen Bemessungskonzepte konzentrieren sich unter anderem auf den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Ausnutzung der Reserven beim Erreichen der Druck- bzw. Biegezugfestigkeit. Diese beinhalten die Fragestellung der maximalen statisch bemessenen Tragfähigkeit von Mono- und Verbundquerschnitten. Um allerdings die besonders bei primär tragenden Konstruktionen unerlässliche Fragestellung der Robustheit und Schadenstoleranz zu beantworten, sind die beschriebenen Untersuchungen nicht vollständig ausgearbeitet. Für sekundär tragende Bauteile aus Glas sind sicherheitsrelevante Überlegungen für die Nutzung im Konstruktiven Glasbau bereits vorhanden. Diese können jedoch mit dem üblichen Konstruktionsprinzip, VSG-Querschnitte aus inneren, tragend angesetzten Glasschichten und äußeren, nicht tragend angesetzten Schutzschichten aus Glas auszubilden, nicht ohne weiteres auf primär tragende Bauteile aus Glas übertragen werden. Denn fällt eine der (Schutz-) Glasschichten aus, so findet eine plötzliche dynamische Lastumlagerung auf den Restquerschnitt statt, der wenn auch nur teilweise erfolgende Steifigkeits- und Festigkeitsverlust, mit einer dynamischen Stoßreaktion vergleichbar ist.

Das Ziel der im Folgenden beschriebenen Arbeiten war deshalb, zunächst das Verhalten des Querschnittsausfalls bei primär tragenden Bauteilen aus Glas zu untersuchen und zu beschreiben. Aus den Ergebnissen sollten anschließend Regeln für robuste und schadenstolerante Glasbauteile abgeleitet werden, sodass die Stoßreaktion in der Folge von ausfallenden (Schutz-) Glasschichten nicht zu einer Überbelastung der tragenden Glasschichten und somit zu einem Versagen der Gesamtstruktur führt. Anhand der durchgeführten Versuchsreihen in diesem Forschungsvorhaben wurde der plötzliche Querschnittsausfall simuliert und die notwendigen statischen sowie dynamischen Parameter zur Charakterisierung des Ausfalls ermittelt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde somit gänzlich erreicht.

#### Danksagung

Das IGF-Vorhaben "Robustheit und Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas in Hin-blick auf bauaufsichtliche Anforderungen - ROGLAS", IGF-Projekt Nr. 18512 N, der Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuß für Stahlbau DASt e. V. (DASt), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Das Vorhaben wurde durch das Institut für Stahlbau und Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen als alleinige Forschungsstelle bearbeitet.

Wir bedanken uns besonders bei den am Projekt beteiligten Industrievertretern für die fachliche Begleitung des Projektes sowie die umfangreiche Unterstützung durch vorhabenbezogene Dienst- und Sachleistungen.

Für die vorhabenbezogene Unterstützungen bedanken wir uns bei den Firmen:



Semcoglas Holding GmbH

# Inhaltsverzeichnis

Da	DanksagungIII				
1	Einleitung1				
	1.1 Forschungsanlass1				
	1.2 Forschungsziel1				
	1.3 Vorgehensweise1				
2	Stand der Technik3				
	2.1 Stand der Normung				
	2.1.1 DIN 18008				
	2.1.2 EC 10 "Design of Structural Glass"4				
	2.1.3 DIN EN16612 und DIN EN166137				
	2.2 Konstruktiver Glasbau8				
	2.2.1 Tragverhalten und Stabilität von Glasbauteilen8				
	2.2.2 Materialverhalten von Zwischenschichten9				
	2.3 Robustheit und Schadenstoleranz				
	2.3.1 Einführung13				
	2.3.2 Robustheit und Schadenstoleranz im globalen Kontext				
	2.3.3 Ansätze zur Bewertung der Robustheit14				
	2.4 Robustheit im Konstruktiven Glasbau17				
	2.4.1 Robustheit sekundär tragender Bauteile aus Glas				
	2.4.2 Ausfallszenarien und Resttragfähigkeit von Glasschichten				
	2.4.3 Robustheit primär tragender Bauteile aus Glas20				
3	Auswirkung von Querschnittsausfällen bei VSG-Querschnitten				
	3.1 Einleitung				
	3.2 Dynamische Stoßreaktion22				
	3.2.1 Herleitung des dynamischen Lastfaktors über Kräftegleichgewicht und Energieerhaltung22				
	3.2.2 Bewegungsgleichung für das schwingende System für Querschnittsverlust24				
4	Durchgeführte Bauteilversuche26				
	4.1 Versuchsbeschreibung				
	4.1.1 Zielsetzung und Umsetzung26				

	4.1.2 Messtechnik	.27
4.2	Versuchsdurchführung	. 29
	4.2.1 Probekörpervermessung	.29
	4.2.2 Versuchsablauf	.29
4.3	Biegeträger	. 30
	4.3.1 Beschreibung	.30
	4.3.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessungen	.32
	4.3.4 Dynamischer Lastfaktor	.37
	4.3.5 Bewegungsgleichung für das schwingende System für Querschnittsverlust zusätzlichem Versatz	bei .40
	4.3.6 Viskoelastisches Materialverhalten bei den Versuchen	.42
	4.3.7 Normalkräfte und Biegemomente im gebrochenen Träger	.44
	4.3.8 Zusammenfassung und Fazit	.46
4.4	Knickversuche bei Querschnittsausfall	.47
	4.4.1 Beschreibung	.47
	4.4.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessung	.49
	4.4.3 Ansatz zur Bestimmung der Steifigkeit	.60
	4.4.4 Dynamischer Lastfaktor	.62
	4.4.5 Zusammenfassung und Fazit	.66
4.5	Knickversuche mit seitlichem Impuls	.67
	4.5.1 Beschreibung	.67
	4.5.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessungen	.69
	4.5.3 Bestimmung der Steifigkeit	.74
	4.5.4 Analytische Beschreibung des aufgebrachten Impulses	.76
	4.5.5 Zusammenfassung und Fazit	.83
4.6	Schubfeldversuche mit Querschnittsausfall	.83
	4.6.1 Planung und Beschreibung des Versuchsaufbaus	.83
	4.6.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessung	.88
	4.6.3 Bestimmung der Steifigkeit	.89
	4.6.4 Dynamischer Lastfaktor	.90
	4.6.5 Fazit	.91

5	Numeris	che Untersuchungen	93	
	5.1 Entw	ricklung des FE-Modells	93	
	5.1.1	Modellierung und Eigenschaften des numerischen Modells	93	
	5.1.2	2 Grundlage der dynamischen Berechnung im FE-Modell	96	
	5.1.3	Biegeträger	100	
	5.1.4	Knickversuche	101	
	5.2 Erge	bnisse und Auswertung	104	
	5.3 Bem	essungsrelevante Einflussparameter auf den Stoßfaktor	111	
	5.4 Zusa	mmenfassung und Fazit der numerischen Untersuchungen	113	
6	Robusth	eitskonzept und Bemessungsregeln	114	
	6.1 Robi	ustheit für primär tragende Bauteile aus Glas	114	
	6.2 Ansä	atze für die Beurteilung der Schichten	115	
	6.3 Fazit	t	117	
7	Zusamm	enfassung und Fazit	118	
Lit	Literaturverzeichnis			
Ab	bildungs	verzeichnis	124	
Та	Tabellenverzeichnis			
Ar	hang A	Übersicht Schlussbericht	130	
Ar	hang B	Verwendung der Zuwendung	134	
Ar	hang C	Übersicht Steifigkeiten Biegeträger	138	
Ar	hang D	Übersicht Probekörper kleinmaßstäblicher Versuche	139	
An	hang E	Tabellarische Übersicht der Eigenfrequenzen und Dämpfungen gK	V143	

# 1 Einleitung

# 1.1 Forschungsanlass

Der Einsatz von primär tragenden Bauteilen aus Glas (Glasstützen, Glasträger, Schubfelder aus Glas, Bild 1) ist derzeit nur über Zustimmungen im Einzelfall möglich. Obwohl deutliche Fortschritte in Hinblick auf die Berechnung und Bemessung von insbesondere stabilitätsgefährdeten Bauteilen erzielt wurden, ist die Überführung der Bemessungsvorschläge in deutsche (DIN 18008: Tragende Bauteile aus Glas, Teil 7 Sonderkonstruktionen [1]), oder europäische Normen (CEN/TC250/SC11 "Structural Glass"[2] [5]) behindert, weil Regeln für die Ausbildung von "robusten" bzw. schadenstoleranten" Querschnitten und Bauteilen in primär tragenden Einsätzen fehlen.

Denn im Gegensatz zu sekundär tragenden Glasbauteilen, die i.a. keine Tragfunktionen oder Lasten aus übergeordneten Bauteilen übernehmen (und deswegen für den Fall des Bruchs einer Scheibe oder Glasschicht lediglich eine eingeschränkte Resttragfähigkeit für das Bauteil unter einer reduzierten Auflast sicherzustellen ist), müssen primär tragende Bauteile aus Glas so ausgebildet werden, dass auch nach Beschädigung des Glasbauteils die tragende Funktion für das Gesamttragwerk erhalten bleibt.

Dafür ist neben der Tragfähigkeit im ungestörten Zustand also auch eine entsprechende Robustheit oder Schadenstoleranz nachzuweisen, die über die Anforderungen sekundär tragender Bauteile hinausgeht und in den gegenwärtigen Normen nicht so behandelt wird, um die Zuverlässigkeitsanforderungen der EN 1990-1 [3] zu erfüllen.

# 1.2 Forschungsziel

vorrangige Ziel des Forschungsprojektes, Regeln für die Robustheit und Das Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas zu schaffen. Primär tragende Bauteile aus Glas müssen so bemessen werden, dass Sie nach Ausfall eines Querschnitts die Lasten aus den darüber liegenden Bauteilen weiterhin tragen, bzw. so ausgebildet werden, dass eine Lastumverteilung auf die Nachbarelemente gewährleistet werden kann. Um genau diese Effekte genauer beschreiben zu können, fehlen bislang allerdings weitere Untersuchungen, weshalb in diesem Forschungsvorhaben, die Grundlage hierfür geschaffen sollen werden soll. Die notwendigen Informationen über eigens entwickelte Dämpfungsversuche abgeleitet werden. Hier sollen insbesondere die bei Querschnittsausfall resultierenden Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte ermittelt und Stoßfaktoren für unterschiedliche Querschnittsaufbauten abgeleitet werden. Hieraus können Regeln für robuste und schadenstolerante Querschnittsaufbauten bestimmt werden. Darüber hinaus soll eine Klassifizierung der primär tragenden Bauteile aus Glas für die Bedeutung im Tragwerk und der Schadensfolge überprüft werden.

# 1.3 Vorgehensweise

Im Folgenden werden die zur Erreichung des Forschungsziels notwendigen Schritte erläutert. Zunächst wird ein kurzer Überblick über den Stand der Technik gegeben. Dieser soll aufzeigen wo die aktuellen Forschungslücken zu diesem Thema sind. Über den aktuellen Stand der nationalen sowie europäischen Normung soll zudem erläutert werden, inwiefern die Ergebnisse aus diesem Forschungsvorhaben in die entsprechenden Teile der Norm eingegliedert werden können und sollen. Anschließend wird auf die mit dem Querschnittsausfall einhergehenden Besonderheiten des Konstruktiven Glasbaus eingegangen. Sodass in der Folge eine globale Einsicht in die Robustheit im allgemeinen sowie der Robustheit im Konstruktiven Glasbau aufgezeigt werden kann. Das Kernthema des Forschungsvorhabens ist die Simulation der Querschnittsausfalls und die Ermittlung der statischen sowie dynamischen Kennwerte zur Charakterisierung des Verhaltens bei Ausfall. Hierfür werden analytischen Grundlagen vorgestellt die besonders im Konstruktiven Glasbau verwendet werden können. Weiterhin werden die Versuche vorgestellt bei denen sowohl der Querschnittsausfall simuliert werden soll und an denen die Eigenschaften eines Querschnitts bzw. Scheibenaufbaus bei Ausfall abgeleitet werden sollen. Die hier erzielten Ergebnisse sollen anschließend dazu dienen ein numerisches Modell zu erstellen und dieses zu kalibrieren. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse zusammengeführt und anhand dieser ein Robustheitskonzept sowie Bemessungsregeln aufgestellt.

# 2 Stand der Technik

# 2.1 Stand der Normung

#### 2.1.1 DIN 18008

Die Bemessung und Konstruktion von tragenden Glasbauteilen ist in DIN 18008 "Glas im Bauwesen – Bemessung und Konstruktionsregeln" [DIN18008a] geregelt.

In DIN 18008-1 ist (für Sekundärbauteile) festgelegt, dass der Nachweis der Resttragfähigkeit entweder über die Einhaltung von konstruktiven Vorgaben oder durch versuchstechnische Nachweise geführt werden kann. Möglich ist für manche Fälle, dass über die Wahl einer ausreichenden Anzahl von Glasschichten und über die Betrachtung von Ausfallszenarien der Nachweis der Resttragfähigkeit auch rechnerisch geführt werden kann.

In Abhängigkeit von Vertikal- und Horizontalverglasungen sind in DIN 18008-2 [DIN18008a] konstruktive Randbedingungen angegeben, um ausreichende Resttragfähigkeiten zu erreichen.

DIN 18008-4 [DIN18008a] enthält explizite Regeln für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei stoßartigen Einwirkungen, in deren Anhang C rechnerische Verfahren zur Stoßsicherheit aufgeführt sind. Die Einwirkung bezieht sich dabei auf DIN 1055-9: "Außergewöhnliche Einwirkungen" [DIN1055a]. Für einen weichen Stoß wird hier die Ersatzlast mit einer Basisenergie von E<sub>Basis</sub>=100 Nm angesetzt. Dies entspricht einer Körpermasse von 50 kg und einer Aufprallgeschwindigkeit von 2,0 m/s. Dem Anwender stehen zwei Verfahren zur Verfügung: einerseits ein vereinfachtes Verfahren auf rechnerischer Basis nach ETB-Richtlinie [ETB85] für zwei- oder vierseitig linienförmig gelagerte rechteckige Verglasungen und andererseits die numerische Simulation eines volldynamischen, transienten Stoßvorgangs für zwei-, drei- oder vierseitig linienförmig gelagerte Verglasungen. Hierzu wird in 2.2.2 noch näher eingegangen.

Der Anwendungsbereich von DIN 18008-5 [DIN18008a] bezieht sich auch auf begehbare Verglasungen ohne Dauerlasten, die nicht befahren werden, oder bei denen eine erhöhte Stoßgefahr besteht. Als Glasprodukt ist VSG aus drei Glasschichten zu wählen, derzeit ist in Deutschland Regel, für die unteren zwei Schichten grob brechende Glasqualitäten (Float oder TVG) anzuordnen. Der statische Nachweis orientiert sich an den Vorgaben des DIBt aus dem Jahr 2010 [Dibt10]. Das Ausfallszenario "gebrochene obere Glasschicht" wird über einen Tragfähigkeitsnachweis nach DIN 1055-100 [DIN1055b] nachgewiesen.

Die Stoßsicherheit und die Resttragfähigkeit sind für die Bauteile dieses Normenteils durch Versuche nachzuweisen. Die Anforderungen decken sich mit den Vorgaben des DIBt [30]. Ausgenommen werden hier Lichtschächte, bei denen ein lichter Abstand von weniger als 50 cm unter der Konstruktion vorhanden ist.

Bisher wurden beim Nachweis der Resttragfähigkeit stets alle Glasschichten (vor-) geschädigt. Der vorliegende Normenentwurf sieht hier eine Differenzierung je nach Schadensrisiko vor. Alle Glasschichten müssen nur bei Konstruktionen, die sich hinsichtlich Resttragfähigkeit "ungünstig" verhalten, geschädigt werden. Sofern Glasschichten mit ungeschützten Glaskanten vorhanden sind, müssen diese vor Versuch geschädigt werden.

Alternativ sind (Muster-) Konstruktionen vorgegeben, deren Stoßsicherheit und Resttragfähigkeit bereits vorab nachgewiesen wurden. Allseitig linienförmig gelagerte begehbare Verglasungen sind deswegen bis zu Abmessung von 2,0 m x 1,4 m (Podeste) ohne weiteren versuchs-technischen Nachweis baubar, sofern die Vorgaben eingehalten werden.

Der derzeit vorliegende Entwurf der DIN 18008-6 [16] unterscheidet zwischen "betretbaren" und "durchsturzsicheren" Verglasungen im Einklang mit dem Regelwerk der Berufsgenossenschaften "GS-Bau-18" [GSB18]. Man orientiert sich bei diesen Verglasungen an den konstruktiven Regelungen für Horizontalverglasungen nach DIN 18008-2 [DIN18008a]. Die untere Glasschicht muss eine VSG-Scheibe aus einer grob brechenden Glasart sein. Für die oberste Glasschicht (z.B. bei Isolierverglasungen) muss ESG oder VSG verwendet werden.

Der bei betretbaren Verglasungen vor der Resttragfähigkeit vorab zu führende, bekannte Glaskugelsack-Versuch wird durch einen Versuch in Anlehnung an den (bei der Absturzsicherung bewährten) Pendelschlagversuch ersetzt. Variiert werden hier die Fallhöhe und die erforderliche Zusatzlast in Abhängigkeit von betretbarer oder durchsturzsichernder Verglasung. Dabei ist vor den Versuchen die oberste Glasschicht zu brechen. Nach dem Stoßversuch schließt direkt der Resttragfähigkeitsversuch an. Die endgültigen Prüfbedingungen und Bewertungskriterien bedürfen noch einer Diskussion. Durch die Anpassung des Stoßkörpers an den Doppelreifen-Prüfkörper eröffnet sich die Möglichkeit, den Nachweis der Stoßsicherheit auch über eine Berechnung in Analogie zum Rechenverfahren nach DIN 18008-4 [DIN18008a] zu führen. Die bauaufsichtliche Einführung solcher Nachweismöglichkeiten bleibt jedoch auch hier abzuwarten.

Der Teil DIN 18008-7 "Sonderkonstruktionen" [DIN18008b], in dem primär tragende Bauteile aus Glas geregelt werden sollen, befindet sich noch in Bearbeitung, nicht zuletzt deswegen, weil Regeln zur Robustheit (Redundanz und Resttragfähigkeit) sowie die hier anzusetzenden Schadensszenarios noch fehlen."

# 2.1.2 EC 10 "Design of Structural Glass"

In den verschiedenen Staaten Europas wird derzeit der Glasbau bemessungstechnisch durchaus unterschiedlich behandelt. Während in einigen Ländern Regelwerke überhaupt fehlen, unterliegt in anderen Ländern die Glasbemessung dem Glashersteller. Auch die Sicherheitsphilosophien beim Entwurf eines Glasbauteils unterscheiden sich deutlich. Daher und in Hinblick auf den freien Güterverkehr besteht großer Bedarf an einheitlichen Bemessungsvorgaben, insbesondere bei den überwiegend auf europäischer Ebene arbeitenden Fassadenfirmen und Glasherstellern. Hier setzt dieser Artikel an und gibt einen kurzen Überblick über die Arbeiten der europäischen Normung für tragende Glasbauteile im CEN TC 250. Die schrittweise Erarbeitung des Eurocodes für tragendes Glas erfolgt in drei sogenannten Tasks. Zunächst wurde in Task 1 der SaP: Scientific and Policy Report erstellt,

die Arbeiten hierzu sind bereits abgeschlossen. Anschließend kommt es derzeit in Task 2 zur Erarbeitung des normenähnlichen Dokuments "CEN – Technical Specification" für die Glasbemessung. Diese CEN-TS wird dann in Task 3 in einen Eurocode für die Bemessung von tragendem Glas umgewandelt.

Das CEN-TS "Design of Structural Glass" ist in die Teile gegliedert: Teil 1 "Konstruktions- und Werkstoffgrundlagen", Teil 2 "Out-of-Plane belastete Glasbauteile" und Teil 3 "Konstruktion von planbelasteten Glasbauteilen und ihren mechanischen Verbindungen".

Sie enthält einen modernen Ansatz, da die wichtigsten Aspekte der Glaskonstruktion einem übergeordneten Klassifizierungssystem unterworfen sind, von dem aus die verschiedenen Bemessungsfälle hinsichtlich ihres Sicherheitsniveaus vergleichbar behandelt werden können. Neu ist, dass neben den "klassischen" Grenzzuständen, dem Gebrauchstauglichkeitsgrenzzustand (SLS) und dem Ultimate Limit State (ULS), zwei weitere Grenzzustände eingeführt werden, der Bruchgrenzzustand (FLS) und der Post Fracture Limit State (PFLS) unter Berücksichtigung der Sicherheit während und nach dem Bruch.

Diese beiden neuen Grenzzustände berücksichtigen die Sprödigkeit von Glas, d.h. die Tatsache, dass Glas durch harte oder weiche Stöße brechen kann und daher eine ausreichende Redundanz während und nach dem Bruch erfordert, um die Robustheitsanforderungen der EN1990 [EN1990] zu erfüllen. Während dieses Bruch- und Nachbruchverhalten schon immer eine wichtige Anforderung auch an andere Werkstoffe war, aber implizit in ULS enthalten ist, werden diese Grenzwerte für Glas nun aus Gründen der Wichtigkeit explizit festgelegt, wie aufgrund seines besonderen Materialverhaltens erwähnt. Allgemein bekannt ist, dass für die Wahl des Glastyps (monolithisch oder laminiert) meist der Bruchgrenzzustand entscheidend ist. Die Übertragung des Klassifizierungssystems der Konsequenzklassen (CC) der EN 1990 auf die Komponentenebene, so genannte "Fracture Consequence Classes (FCCS)" in Abhängigkeit von den Ausfallfolgen der einzelnen Komponenten werden etabliert. Die jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeiten der FCCs beziehen sich auf die der CCs der EN 1990.

Durch die Anwendung dieses Systems ist es dann möglich, auf nationaler Ebene generell zu entscheiden welche Komponente unter welche FCC (0, 1, 2, 3) fällt und welche Grenzzustandsüberprüfungen durchgeführt werden müssen

# Teil 1 - Stand 2017/2018

Das Hauptprinzip der gesamten Struktur des EC 10 ist zuvor erläutert worden und spiegelt die Grundlagen wieder, welche in Teil 1 benötigt werden. Über die grundsätzliche Struktur hinaus sind für Teil 1 des CEN-TS die wichtigsten Punkte nachfolgend aufgeführt.

Gemäß EN 1990[2] können verschiedene Glaskomponenten in verschiedene Folgeklassen (CCs) eingeteilt werden, die hier "Fracture Consequence Classes" (FCC) genannt werden. Über die eine definierte Abgrenzung wird dann ersichtlich, welche Nachweise dann in Bezug auf FLS und PLFS erforderlich sind. Hierbei ist es wichtig zu erwähnen, dass das Konzept beinhaltet das jedes europäische Land die Freiheit hat, nach seinen nationalen

Sicherheitsanforderungen zu klassifizieren. Der CEN TS und auch der Eurocode schreiben also keine Vorgaben vor, ob ein Glasbauteil in FCC-0 oder FCC-1, FCC-2, FCC-3 klassifiziert werden soll.

Erwähnenswert ist auch, dass seine Struktur den Konsens in allen europäischen Ländern erleichtert. Es ist klar, dass diese explizite Klassifizierung in vielen Ländern bereits implizit durch die Festlegung unterschiedlicher Resttragfähigkeitsanforderungen für verschiedene Glasbauteile in Abhängigkeit vom Gefährdungsgrad verwendet wurde.

CEN TS Das gibt Teilsicherheitsbeiwerte kalibriert verfügbaren nach den für Festigkeitsverteilungen nicht vorgespanntes, thermisch vorgespanntes und vollvorgespanntes Kalk-Natron-Silicatglas an.

In Teil 1 des CEN TS sind darüber hinaus Alternativen zur Bestimmung der Widerstandsbemessungswerte für die Biegefestigkeit geplant. Zum einen kann die Bemessung auf die Eigenfestigkeit des Glases und der Vorspannung der Glasoberfläche basieren und zum anderen kann die Bemessung so berücksichtigt werden, dass im Falle von vorgespanntem Glas die Oberflächenvorspannung auf der Lastseite berücksichtigt wird.

Die Arbeiten zu Teil 1 sind aktuell noch nicht abgeschlossen und werden in einem nächsten Schritt durch das neue Project Team vervollständigt.

# Teil 2 - Stand 2017/2018

Teil 2 des CEN TS enthält grundlegende Regeln für die Tragwerksplanung von mechanisch unterstützten Glasbauteilen, die in erster Linie einer "Out-of-Plane" - Belastung ausgesetzt sind. Hier werden unterschiedliche Empfehlungen für die Berücksichtigung der FCCs gegeben. Darüber hinaus werden Konstruktionsprinzipien und explizite Regeln für die PFLS in Bezug auf die Auswahl des Komponententyps in Abhängigkeit von der Anwendung und der Art der Unterstützung gegeben. Die PFLS können durch Testen oder durch verifiziert werden.

Zusätzlich enthält Teil 2 empfohlene Durchbiegungsgrenzwerte je nach Anwendungsfall und Stützbedingung sowie für die Kantenabdeckung.

Besonderes Interesse gilt dabei den Fugen und Anschlüssen. Hier werden die grundlegenden Anforderungen an out-of-plane belastete Glasbauteile in Abhängigkeit von der Art des Trägermodells sowie an die entsprechenden Konstruktionsmodelle gestellt. Dies betrifft beispielsweise kontinuierlich kantengestützte Glasbauteile, punktgestützte Glasbauteile mit Bohrungen, eingespannte Glasbauteile, Kragarmsysteme oder verklebtes Glas durch Kleben von Klebstoffen. Die Berücksichtigung der verschiedenen Arten von Punkthaltesystemen ist gewährleistet.

# Teil 3 - Stand 2017/2018

Teil 3 des CEN TS behandelt in der Scheibenebene belastete Glasbauteile. Aufgrund der Beschaffenheit solcher Konfigurationen ist neben der Lasteinleitung und den Anschlüssen sehr oft die Stabilität das vorherrschende mechanische Problem. Daher befassen sich viele Regeln des dritten Teils mit diesen Fragen. Sie beziehen sich größtenteils auch auf die bereits

in den Teilen 1 und 2 genannten Anforderungen, jedoch gibt es in einigen Fällen strengere Einschränkungen, insbesondere vor dem Hintergrund, dass in Scheibenrichtung belastete Elemente manchmal oder sogar oft Lasten aus anderen Teilen der Gesamtkonstruktion tragen können. Zu diesem Zweck wird in Teil 3 des CEN TS werden einige Empfehlungen für eine Mindestanzahl von Glasschichten für Glasbauteile von FCC2 oder 3 in Abhängigkeit davon, ob ein alternierender Lastpfad vorhanden ist oder nicht.

Wie bereits erwähnt, gibt es viele Regeln, wie Stabilitätsprobleme durchgeführt werden können. Für die Torsionsverformung, Biegedrillknicken und Plattenbeulen gibt es prinzipiell zwei Stufen zur Verifizierung, entweder durch eine nichtlineare Berechnung unter Berücksichtigung einer äquivalenten Imperfektion, wie sie in der CEN TS angegeben ist, oder durch unter Verwendung der Ersatzstabverfahren mit vorgegebenen Knickkurven, die implizit die nichtlinearen Effekte von Axialspannung, Imperfektion und Massenträgheit berücksichtigen.

Auch werden hier die besonderen Schwierigkeiten für Verbundsicherheitsglas erläutert, die darin bestehen, mit der Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Schubverbindung der Zwischenschicht auch in Anbetracht unterschiedlicher Belastungsdauern und eventuell damit verbundener Temperaturen umgehen zu können. Teil 3 des CEN TS soll hier Vorschläge machen sowohl für die nichtlineare Berechnungsmethode als auch für die Ersatzstabverfahren.

#### 2.1.3 DIN EN16612 und DIN EN16613

Bisher wurde kein europäisches Regelwerk für den Glasbau veröffentlicht. Seit diesem Jahr liegt die unter CEN TC 129 erarbeitete prEN 16612" [EN16612]. als Entwurf vor. Eine Veröffentlichung dieser Norm steht nach dem derzeitigen Kenntnisstand noch nicht bevor. Die prEN 16612 regelt allerdings nur die Verwendung von rechteckig umrandeten linienförmig gelagerten Scheiben für solche Fälle, bei denen bei Glasbruch nur eine geringe Schadensfolge zu erwarten ist. Da im Vergleich zu DIN 18008 [DIN18008a] die prEN16612 [EN16612]. sich lediglich auf die Glasdickenbestimmung beschränkt, liefert sie keine Bemessungsregeln im Sinne der DIN 18008 [DIN18008a] mit Anforderungen an die Unterkonstruktion, den Glasaufbau und sonstige Bestimmungen für die zahlreichen weiteren Glaskonstruktionen. Tragende Elemente und Bauteile aus Glas wie sie in EC10 berücksichtigt werden, sind hier nicht Inhalt dieses Regelwerks.

Auch prEN 16613:2017 [En16613] befasst sich nicht mit tragenden Bauteilen aus Glas, stattdessen beschreibt dieses Regelwerk ein Prüfverfahren zur Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von Zwischenschichten in Verbundglasscheiben.

#### 2.2 Konstruktiver Glasbau

#### 2.2.1 Tragverhalten und Stabilität von Glasbauteilen

Wie zuvor in Kapitel 2.2 beschrieben sind tragende Bauteile aus Glas in einem gewissen Maß bereits definiert. Hier fehlt allerdings die Übertragung der Regeln von sekundär in primär tragende Bauteile. Wird Glas in primär tragenden Elementen eingesetzt, so verlässt man nämlich in den meisten Fällen den derzeit geregelten Bereich. Dies ist beispielsweise bei Stützen, Schubaussteifungen oder Trägern der Fall. Hier ist in der Regel eine ZiE (Zustimmung im Einzelfall) erforderlich. Nach der Realisierung von zahlreichen Bauwerken mit tragenden Bauteilen aus Glas im nationalen und internationalen Raum sind Forschungsinitiativen zur Bemessung von tragenden Glasbauteilen durchgeführt worden. Besonders für den Stabilitätsfall Knicken, entwickelten bereits mehrere Autoren auf der Grundlage des Ersatzstabverfahrens Knickspannungslinien für unterschiedliche Glasaufbauten. Zunächst Weiler beschreibt in [Wei00] die Herleitung der Knickspannungslinien aufbauend auf dem Konzept der europäischen Knickkurven. Diese basieren auf den Abminderungsfaktoren  $\chi$  in Abhängigkeit von bezogenen Schlankheiten  $\overline{\lambda}$ . Ebenfalls die Untersuchungen von Liess in [Lie01] basieren auf der Herleitung von Knickkurven. Genauso wie Weiler wurden hier Knickspannungslinien separat für Monoverglasungen mit den üblichen Glasarten Float, TVG und ESG und dem Ansatz einer Vorimperfektion von  $e_0 = L/400$  untersucht. In einem weiteren Schritt leitete Luible in [Lui04] Knickspannungslinien durch numerischer Simulation nicht explizit für einzelne Glasarten sondern durch die Betrachtung eines definierten Bereiches der Biegezugfestigkeit her. Hierfür benutze dieser unteranderem unterschiedliche Imperfektionen von  $e_0 = L/100$  bis von  $e_0 = L/1000$ . Die hier unterschiedlich erarbeiteten Lösungsansätze zur Bemessung stabilitätsgefährdeter Glasbauteile basieren auf unterschiedliche Vorgehensweisen und demzufolge unterschiedlichen Annahmen zugrunde liegen. Auch am Institut für Stahlbau wurden Forschungsprojekte zum Thema Stabilität von Glasbauteilen durchgeführt. In [Lan12] wurde diesbezüglich ein einheitliches Bemessungskonzept für den Stabilitätsfallknicken für Mono- sowie Verbundverglasungen erarbeitet. Grundlegend wurden hier die Besonderheiten des Werkstoffes Glas, sowie die Materialeigenschaften der Zwischenschichten berücksichtigt. Beispielsweise sind nun Knickkurven inklusive. ihrer Imperfektionsansätze für intakte Mono- und Verbundglasguerschnitte, sowie Regelvorschläge für Knicken und Biegung und für Langzeit- und Kurzzeitbelastung vorhanden. Der hier hergeleitete Bemessungsansatz wurde durch experimentelle Untersuchungen sowie numerischen Berechnungen validiert.

In [Wel06] wird eine Bemessungsmethode eingeführt, die für Wandscheiben unter Plattenbelastung und diagonaler Druckkraft bzw. Schubkraft gilt. Hierin wurde das Tragverhalten als randverklebte und eckgeklotzte Glasscheibe experimentell, analytisch und numerisch betrachtet, um hieraus ein Bemessungskonzept zu entwickeln.

Durch alle diese Forschungsarbeiten sind erhebliche Fortschritte bei der Bemessung von stabilitätsgefährdeten Bauteilen aus Glas erzielt worden. Die vorgeschlagenen Bemessungskonzepte konzentrieren sich auf den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Ausnutzung der Reserven beim Erreichen der Druck- bzw. Biegezugfestigkeit unter einer statisch wirkenden Belastung. Der Ausfall eines statisch bemessenen Querschnitts und die daraus folgende dynamische Überbeanspruchung des Restquerschnitts waren in keinem der zuvor beschriebenen Forschungsvorhaben. Ebenfalls die Anordnung von Schutzschichten und deren Bruch und somit Robustheitsfragen waren nicht Bestandteil der bisherigen Forschung.

# 2.2.2 Materialverhalten von Zwischenschichten

Im Konstruktiven Glasbau werden in Abhängigkeit der Anwendung üblicherweise Querschnitte mit Zwischenschicht verwendet. Zur Ausbildung von Konstruktionen, welche eine Resttragfähigkeit aufweisen, wird eine PVB-Folie verwendet.

Bei PVB-Folie handelt es sich um einen Polymer-Werkstoff, dessen mechanische Temperatur, der Belastungsdauer und Eigenschaften sehr stark von der der Belastungsgeschwindigkeit abhängig sind [Lan12]. Allgemein werden Polymer-Werkstoffe in vier Gruppen klassifiziert: Amorphe Thermoplaste, teilkristalline Thermoplaste, Elastomere und Duromere. Durch die Klassifizierung sollen die Gebrauchseigenschaften erfasst und durch eine einzige charakteristische Kurve wiedergegeben werden [Lan12]. Als Messgröße für die Klassifizierung wird der Schubmodul  $G_f$  in Abhängigkeit von der Temperatur herangezogen. PVB gehört zur Gruppe der amorphen Thermoplaste. Bei diesen können durch eine Erhöhung der Temperatur die Moleküle in Bewegung gesetzt und die zwischenmolekularen Kräfte überwunden werden [Lan12]. Dadurch wird der amorphe Polymer-Werkstoff erst weichelastisch und schließlich plastisch verformt. Die Eigenschaften von Polymer-Werkstoffen können außerdem durch die Zugabe von z.B. Weichmachern verändert werden, welche für einen geringeren E-Modul und somit für eine höhere Flexibilität des Werkstoffs sorgen [Lan12].

Das Materialverhalten amorpher Thermoplaste wie PVB ist viskoelastisch (rheologisch) und ebenfalls abhängig von der Temperatur (mechanisch-thermisch), der Belastungsdauer (mechanisch-zeitabhängig) und der Belastungsgeschwindigkeit. Wenn die Spannungen und Dehnungen klein genug bleiben, sodass die Spannungs-Dehnungsbeziehung unabhängig von der Höhe der Belastung ist, so spricht man von linear-viskoelastischem Materialverhalten [Sac08]. Zur Beschreibung des Materialverhaltens ist der Schubmodul alleine unzureichend. Bei einer statischen Belastung wird hier der sogenannte Relaxationsmodul oder der Kriechmodul herangezogen. Bei einer dynamischen Belastung dagegen wird als Messgröße der komplexe Schubmodul herangezogen, welcher sich aus einem elastischen, reversiblen Anteil (Speichermodul  $G'_f$ ) und einem viskosen, irreversiblen Anteil (Verlustmodul  $G''_f$ ) zusammensetzt [Lan12]. In diesem Forschungsvorhaben ist es aufgrund des zu untersuchenden Gegenstandes unerlässlich auch den Schubmodul bei dynamischer Belastung zu berücksichtigen.

Immer mehr kommen auch weitere Zwischenschichten zum Einsatz, besonders wenn erhöhte Anforderungen an die Tragfähigkeit sowie z.B. auch an den Schallschutz gestellt werden. Eine besonders immer populär werdende Zwischenschicht ist die sogenannte Sentry-Glas Plus welche auch in diesem Forschungsvorhaben zum Einsatz kam.

#### 2.2.2.1 Poly-Vinyl-Butyral-Folie (PVB-Folie) bei statischer Beanspruchung

Bei einer statischen Beanspruchung von PVB-Folie zeigt diese insbesondere das Materialverhalten von Relaxation bzw. Kriechen. Die beiden Eigenschaften können mit den folgenden Formeln beschrieben werden [Sac08]:

$$\tau(t) = \int_{-\infty}^{t} G(t - t') \frac{d\gamma(t')}{dt'} dt'$$
(2-1)

$$\gamma(t) = \int_{-\infty}^{t} J(t-t') \frac{d\tau(t')}{dt'} dt'$$
(2-2)

Dabei ist G(t - t') der Relaxationsmodul und J(t - t') die Kriechnachgiebigkeit der PVB-Folie. Die beiden Gleichungen sind integrale Darstellungen des Blotzmann'schen Superpositionsprinzip, welches besagt, dass die Dehnungs- bzw. Spannungsantworten verschiedener Einwirkungen unabhängig von der Belastungsgeschichte addiert werden [Sac08]. Somit kann man den Scherwinkel  $\gamma$  zum Zeitpunkt t für eine beliebige Belastungsgeschichte  $\tau(t)$  durch Addition bzw. Integration infinitesimaler Kriechvorgänge ab dem Zeitpunkt t' [Sac08].

Der zeitlich abhängige Schubmodul kann nach der Elastizitätstheorie mit

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\mu)}$$
(2-3)

berechnet werden. Der Relaxationsmodul oder die Kriechnachgiebigkeit von PVB kann durch eine Kombination von Federn und Dämpfern modelliert werden. Diese Modelle sind zwar bei der Bemessung von Verbundglasscheiben unhandlich, eignen sich aber für eine qualitative Darstellung von viskoelastischen Relaxations- und Kriechvorgängen [Sac08]. Die Spannungsrelaxation wird durch das Maxwell-Modell, das Kriechen durch das Kelvin-Voigt-Modell beschrieben. Um irreversible Fließvorgänge oder elastische Verhaltensweisen genauer zu beschreiben, können den Modellen weitere Federn und Dämpfer hinzugefügt werden. Der zeitliche Verlauf der Steifigkeitsänderung wird durch die Relaxations- bzw. Kriechzeiten  $\lambda_i = \eta_i/G_i$  bestimmt. Je größer diese Konstanten sind, umso langsamer nimmt die Steifigkeit ab.

Nach [Ens05] kann der Schubmodul von PVB für Temperaturen über bzw. unter 10°C mit den folgenden beiden Formeln ermittelt werden:

 $T \ge 10^{\circ}C$ :

$$G_{PVB}(t) = 0,008 \cdot (100 - T_{PVB}) - 0,0011 \cdot (50 + T_{PVB}) \cdot log(t_{Last})$$
(2-4)

 $T \leq 10^{\circ}C$ :

$$G_{PVB}(t) = 2,0 - 0,2 \cdot \log(t_{Last})$$
(2-5)

#### 2.2.2.2 Poly-Vinyl-Butyral-Folie (PVB-Folie) bei dynamischer Beanspruchung

Bei einer dynamischen bzw. periodischen Belastung der PVB-Folie in Form einer harmonisch schwingenden Schubverformung  $\gamma(t) = \gamma_0 sin(\omega t)$  mit der Kreisfrequenz  $\omega$  ist die resultierende Schubspannung auch eine harmonische Schwingung gleicher Frequenz, welche gegenüber der Dehnung jedoch um den Winkel  $\delta$  phasenverschoben ist.

Nach Gleichung (2-1) ergeben sich für die Schubspannung und die Phasenverschiebung folgende Funktionen [Sac08]:

$$\tau(t) = \gamma_0 \cdot \sqrt{G'^2 + G''^2} \cdot \sin(\omega t + \delta) - \sum_{i=1}^n \gamma_0 \frac{\omega \lambda_i G_i}{1 + \omega^2 \lambda_i^2} e^{-\frac{t}{\lambda_i}}$$
(2-6)

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \tag{2-7}$$

Bereits nach wenigen Schwingungen konvergiert der letzte, nicht-periodische Term in Gleichung (2-6) gegen Null und kann entfallen (eingeschwungener Zustand) [Sac08]. Für die in [Sac08] gezeigten Modelle berechnen sich die beiden dynamischen Moduln G' und G'' mit den Formeln [Sac08]:

$$G' = G'(\omega) = G_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega^2 \lambda_i^2 G_i}{(1 + \omega^2 \lambda_i^2)}$$
(2-8)

$$G'' = G''(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega \lambda_i G_i}{(1 + \omega^2 \lambda_i^2)}$$
(2-9)

Der Speichermodul G' ist ein Maß für die in einer Schwingungsperiode elastisch gespeicherten Energien. Der Verlustmodul G'' quantifiziert dagegen die pro Periode in Wärme umgewandelte Energie infolge der Viskosität des Materials [Sac08]. Aus den beiden dynamischen Moduln G'und G'' kann die dynamische Kriechnachgiebigkeit J' bzw. J'' nach Gleichung ((2-10) und Gleichung ((2-11) ermittelt werden [Sac08].

$$J' = J'(\omega) = \frac{G'}{G'^2 + G''^2}$$
(2-10)

$$J'' = J''(\omega) = \frac{G''}{G'^2 + G''^2}$$
(2-11)

Die oben genannten dynamischen Materialkennwerte  $G'(\omega)$ ,  $G''(\omega)$ ,  $J'(\omega)$  und  $J''(\omega)$  ermöglichen eine Ermittlung des Relaxationsmoduls G(t) und der Kriechnachgiebigkeit J(t) [Sac08].

$$G(t) = G'(\omega) - 0.4G''(0.4\omega) + 0.014G''(10\omega)$$
(2-12)

$$J(t) = J'(\omega) + 0.4J''(0.4\omega) - 0.014J''(10\omega)$$
(2-13)

Mithilfe dieser beiden Formeln ist es möglich, für begrenzte Zeitbereiche den Relaxationsmodul bzw. die Kriechnachgiebigkeit aus den Ergebnissen dynamischer Versuche zu ermitteln.

Gleichung (2-8) und Gleichung (2-9) geben nur theoretische Werte für den Speicher- und Verlustmodul angeben, deshalb kann zur Ermittlung der Parameter eine dynamischmechanische Analyse (DMA-Analyse) durchgeführt werden. Dabei wird eine Probe bei unterschiedlichen Temperaturen mit verschiedenen Frequenzen harmonisch schwingend tordiert und bei jeder Frequenz der Speichermodul  $G'(\omega)$  sowie der Verlustmodul  $G''(\omega)$ ermittelt [Lan12].

Der Zusammenhang zwischen Speichermodul, Verlustmodul, komplexem Schubmodul und Phasenverschiebung wird in Abbildung 2-1 dargestellt. Mithilfe der DMA-Analyse kann man außerdem die Glasübergangstemperatur bestimmen, welche den Erweichungsbereich der PVB-Folie darstellt.



Abbildung 2-1: Zusammenhang zwischen Speichermodul, Verlustmodul und komplexem Schubmodul (oben, links); Phasenverschiebung einer DMA-Analyse (unten, links) und schematische Darstellung eines Zustandsdiagramms amorpher Thermoplaste gemäß der DMA-Analyse (rechts) [Lan12].

#### 2.2.2.3 Sentry-Glas Plus

Für das Bauwesen sind für tragende Zwecke insbesondere ionomerische Folien wichtig. Sie sind speziell für tragende Anforderungen entwickelt worden, da sie über weite Temperaturbereiche einen gegenüber PVB höhere Schubkopplung zwischen den

Glasscheiben darstellt. Besonders bei Anforderungen an die Resttragfähigkeit kommt diese Folie inzwischen verstärkter zum Einsatz. Ein in der Fachwelt bekanntes Produkt ist die von der Firma Kuraray entwickelte Folie SentryGlas®. Im Konstruktiven Glasbau ist ein günstig wirkender Schubverbund für die üblichen Folienarten bei Verwendung als VSG nicht erlaubt, allerdings ist seit 2009 für die SentryGlas®-Folie ein abZ vorhanden, das es ermöglicht bei der Bemessung von Verbundsicherheitsgläsern einen günstig wirkenden Schubverbund anzusetzen. Aufgrund der hohen Steifigkeit kann das Produkt laut Herstellerangaben in den Dicken 0,89mm, 1,52mm und 2,28mm produziert werden. Aufgrund der Anforderungen der Glashersteller und Veredler kann die Folie als Rollen- und Plattenware hergestellt werden.

# 2.3 Robustheit und Schadenstoleranz

# 2.3.1 Einführung

Unter Robustheit wird häufig die Fähigkeit eines Tragwerks und seiner Bauteile verstanden, Schädigungen oder ein Versagen auf Ausmaße zu begrenzen, die in einem vertretbaren Verhältnis zur Ursache stehen [SIA260]. Das Verhältnis ist dabei sowohl auf die räumliche Ausdehnung der meist lokal begrenzten Initialursache als auch auf die sonstigen Folgen zu beziehen. Dementsprechend fordert die DIN EN 1990-1 [EN1990] unter Abs. 2.1(4):

"Ein Tragwerk ist so auszubilden und auszuführen, dass durch Ereignisse wie Explosionen, Anprall oder menschliches Versagen keine Schadensfolgen entstehen, die in keinem Verhältnis zur Schadensursache stehen"

Wird Glas als primär tragendes Bauteil eingesetzt, muss eine ausreichende Robustheit und Schadenstoleranz sichergestellt werden, um unverhältnismäßige Folgen einer lokalen Schädigung zu vermeiden.

# 2.3.2 Robustheit und Schadenstoleranz im globalen Kontext

Bei herkömmlichen Baustoffen (Stahl, Stahlbeton, Holz etc.) wird dabei der Initialschaden in der Regel als Folge einer außergewöhnlichen Einwirkung wie Erdbeben, Fahrzeuganprall, Bombenanschlag etc. unterstellt. Das Auftreten außergewöhnlicher Belastungen signalisiert aber nicht allein die Notwendigkeit robusten Konstruierens und Bemessens, auch unter ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen in den Grundkombinationen nach Eurocode [EN1990] ist Robustheit durchaus ein Thema, ganz besonders bei tragenden Glasbauteilen. Hier ist der Grenzzustand der Tragfähigkeit stets auch im Lichte eines unplanmäßigen Schadensereignisses in Form des Bruchs einer (oder mehrerer) Glasschicht(en) zu betrachten.

Zur Robustheitsmachung wurden unabhängig von der Bauweise folgende Strategien entwickelt:

 Bereitstellung alternativer Lastpfade (Bauwerksebene): es ist nachzuweisen, dass der Ausfall eines tragenden (vertikalen) Bauteils nicht zum Teil- oder Gesamtversagen des Bauwerks führt [FEM03],

- Überfeste Ausbildung und Schutz von Haupttragelementen (Bauteilebene): kritische (vertikale) Haupttragelemente sind so auszubilden oder zu schützen, das sie einer expliziten außergewöhnlichen Einwirkung ohne Reduktion der Tragfähigkeit widerstehen [FEM03],
- Ausnutzung von Resttragfähigkeiten und Energiedissipation (Bauteil- und Bauwerksebene): plastische Verformungen von Bauteilen unter der außergewöhnlichen Einwirkung werden zur Energiedissipation zugelassen, allerdings ist die Integrität sicherzustellen, so-dass beim Nachweis des Gesamtsystems die Resttragfähigkeit des geschädigten Bauteils herangezogen werden kann [Gün12],
- Isolierung kollabierender Bereiche (Bauwerksebene): durch das Aufheben der Kontinuität des Bauwerks wird der kollabierende Bereich räumlich begrenzt [Sta05].

Diese Strategien gehen häufig über allgemeine Entwurfsprinzipien (Ausbildung statisch unbestimmter Strukturen, Vermeidung von Reißverschlusseffekten etc.) hinaus [EN1990]. Regelungen zur Vermeidung des Versagenstyps progressiver Kollaps haben für herkömmliche Baustoffe (Stahlbeton, Stahl, Holz, etc.) mittlerweile Einzug in die europäischen Bemessungsnormen gefunden [DIN1055a] [EN1991] [BS5950].

#### 2.3.3 Ansätze zur Bewertung der Robustheit

Zusätzlich zu den oben genannten Entwurfsprinzipien können ebenfalls Ansätze zur Beurteilung der Robustheit von Bauteilen und Systemen herangezogen werden. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze mit der Betrachtung unterschiedlicher Methoden vorgestellt.

#### 2.3.3.1 Ansatz nach Smith (2006)

Smith betrachtet in seinem Ansatz die Energie, die für das Versagen eines Bauteils aufgewendet werden muss. Demnach gilt: Je mehr Energie es bedarf ein Tragwerk zu beschädigen, desto robuster ist es. Kann die durch den Initialschaden, z.B infolge eines Querschnittsausfalls, freigesetzte Energie, nicht von den angeschlossenen Bauteilen oder intakten Querschnitten aufgenommen werden, so können benachbarte Elemente ebenfalls beschädigt werden und so zu einem progressiven Kollaps führen [Hab07]. Dementsprechend wird zur Beurteilung der Robustheit der minimal benötigte Energiebedarf herangezogen. Für die Betrachtung von spröden Werkstoffen, was besonders eine wichtige Rolle im Konstruktiven Glasbau spielt, dann kann die von Smith vorgestellte Energiebilanz wie folgt vereinfacht werden:

$$\delta W_e \ge \delta U + W_f + \delta V \tag{2-14}$$

Die Veränderung der äußeren Arbeit  $W_e$  als Resultat des Querschnittsausfall muss größer sein als ist die Summe der Veränderung der Verformungsenergie  $\delta U$  als Resultat der Zerstörung des Elements, sowie die erforderliche Arbeit bzw. Energie  $W_f$  die aufgebracht werden muss um das Element zu zerstören und die Veränderung der kinetischen Energie  $\delta V$ . Daraus kann anschließend die zu verrichtende Arbeit, die zur Beschädigung des nächsten Elements aufgewendet werden muss, aus der Energiebilanz abgeleitet werden. Die erwähnte Versagensarbeit  $W_f$  kann experimentell oder numerisch ermittelt werden und bildet in dieser Energiebetrachtung die wichtigste Größe.

# 2.3.3.2 Ansatz nach U. Starossek

Starrosek entwickelte mehrere Ansätze, die die Robustheit anhand von Robustheitsindizes veranschaulichen. Im Folgenden wird auf die Ansätze eingegangen, welche mit der Fragestellung dieses Forschungsvorhaben besonders einhergehen. Zieht man quantifizierende Definitionen von Robustheit heran, so eignen sich in Bezug auf den Glasbau solche besonders, welche auf Energiebetrachtungen basieren.

# Energie/differentiell

Ähnlich wie bei Smith basiert dieser Ansatz darin, dass die freigesetzte Energie größer als die zur Zerstörung des nächsten Elements erforderliche Energie, sodass dann ein fortschreiten des Kollapses stattfindet [Hab07].

Eine Verallgemeinerung der beschriebenen Bedingung ermöglicht die Abschätzung des Versagens für das jeweils folgende Element.

$$E_{r,j} \ge E_{s,j+1} \tag{2-15}$$

Darüber hinaus ist es notwendig die gesamte Energie, die durch das Versagen der Bauteile freigesetzt wird, zu berücksichtigen.

$$\sum_{k=0}^{j} E_{r,k} \ge \sum_{k=0}^{j} E_{s,k+1} , \quad j = 1, \dots, n-1$$
 (2-16)

# mit *n*: Anzahl der am untersuchten Versagensszenario beteiligten Elemente

Für den Fall, dass die Summe der freigesetzten Energien kleiner als die Summe der zum Versagen erforderlichen Energien ist, wird sich keine weitere Schadensprogression fortbilden. Diese Bedingung stellt eine Verhältnismäßigkeit von Initialschaden und Schadensausbreitung her und lässt sich ebenfalls als möglicher Robustheitsindex abbilden:

$$RI = \frac{\sum_{k=0}^{n} E_{s,k+1}}{\sum_{k=0}^{n} E_{r,k}}$$
(2-17)

mit

RI > 1: Es tritt kein totales Versagen ein

 $RI \leq 1$ : Es tritt möglicherweise totales Versagen ein

Ist der Robustheitsindex größer als 1, so tritt kein totales Versagen ein. Ist das Ergebnis für RI allerdings kleiner/ gleich 1 so kann mögliches totales Versagen nicht ausgeschlossen werden.

Insgesamt kann zu diesem Ansatz gesagt werden, dass es sich um ein sehr aufwendiges Verfahren handelt, da verschiedenste Versagensszenarien untersucht werden müssen [Hab07].

#### Energie/ integral

In einem weiteren Ansatz entwirft Starossek einen Index zur Beschreibung der Kollapsresistenz (collapse resistance index, CRI). Dazu vergleicht er zu Beginn die zur vollständigen Zerstörung des Tragwerks erforderliche Energie  $E_d$  mit der Gesamtmasse des Tragwerks [Hab07].

$$CRI = \frac{\min E_d}{M}$$
(2-18)

In einem weiteren Schritt kann durch die Bestimmung der potentiellen Energie  $E_p$  des Tragwerks die Gleichung 2-18 einheitsfrei dargestellt werden. Dazu wird das Integral über alle Volumenelemente multipliziert mit den zugehörigen Höhen gebildet. Der einheitsfreie CRI ergibt sich zu:

$$CRI^* = \frac{\min E_d}{E_p} \tag{2-19}$$

Alternativ zur potentiellen Energie  $E_p$  kann auch die Bindungsernergie  $E_b$  als Bezugswert herangezogen werden. Die genaue Ermittlung wird jedoch nicht weiter ausgeführt [Hab07].

Beim CRI wird, wie schon im zu vorigen Ansatz (vgl. [Hab07]) berücksichtigt, dass die durch das Versagen von Bauteilen freigesetzte Energie zur weiteren Zerstörung des Tragwerks beiträgt.

#### Steifigkeit

Zusätzlich zu den auf Energien beruhenden Formen wird im Folgenden einen auf der Steifigkeitsmatrix beruhender Robustheitsindex beschrieben. Die zuvor beschriebenen Ansätze erfordern die mehrfache Lösung eines statischen sowie dynamischen Problems was besonders eine nichtlineare Berechnung sehr komplex und aufwendig macht [Hab07]. Der Robustheitsindex soll aber eine möglichst einfach zu ermittelnde Eigenschaft des Tragwerks sein. Das auf der Steifigkeitsmatrix beruhender Robustheitsindex soll dabei eine Verringerung des Tragwerkverhaltens infolge einer Beschädigung durch das Steifigkeitsverhältnis im beschädigten und unbeschädigten Zustand erfassen [Hab07].

Zum einen kann ein Mittelwert über alle beschädigten Tragwerke ermittelt und mit dem ursprünglichen Zustand verglichen werden[Hab07].

$$RI = \frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K_{i}\right)}{K_{0}} \tag{2-20}$$

In der zweiten Variante wird die ungünstigste Beschädigung mit dem ursprünglichen Zustand verglichen [Hab07]

$$RI = \frac{\min_i(K_i)}{K_0} \tag{2-21}$$

mit

*n*: Anzahl der Elemente oder der (inneren und äußeren) Bindungen

 $det(K_i)$  (Determinante der modifizierten Steifigkeitsmatrix,  $K_i$ : entstanden aus der Entfernung eines Tragwerkselements oder einer Bindung i aus dem Tragwerksmodell)

$$K_0$$
:   
*det*( $K_0$ ) (Determinante der Steifigkeitsmatrix des ursprünglichen Tragwerks)

Der Robustheitsindex kann dann über die Steifigkeitsanteile des Entfernten (beschädigten) Elements sowie der Steifigkeitsanteile des ursprünglichen Elements bestimmt werden. Damit lässt sich der Robustheitsindex berechnen, ohne ein statisches bzw. dynamisches Problem explizit lösen zu müssen. Als Grenzwert gilt wieder 0 < RI < 1.

Der große Nachteil dieses Ansatzes besteht darin, dass Stoßvorgänge sowie Einflüsse der im Tragwerk gespeicherten potentiellen Energie nicht berücksichtigt werden. Deshalb können Versagensszenarien, welche primär durch Stoß- oder Fallvorgänge charakterisiert sind, nicht erfasst werden [Hab07].

2.3.4 Fazit

Zur Beschreibung der Robustheit sind in der Literatur bereits einige Vorarbeiten geleistet worden. Während zum einen die Robustheit und die Schadentoleranz über verschiedene Strategien gewährleistet werden kann, ist es auf der anderen Seite möglich eine Charakterisierung und Einordnung der Robustheit über sogenannte Robustheitsindizes durchzuführen.

Alle die genannten Strategien und Ansätze lassen sich nicht ohne glasbauspezifische Erweiterungen auf tragende Bauteile aus Glas übertragen, weshalb im Folgenden auf die genauen Hintergründe eingegangen wird und mögliche Lösungsvorschläge gegeben werden.

# 2.4 Robustheit im Konstruktiven Glasbau

2.4.1 Robustheit sekundär tragender Bauteile aus Glas

Bei sekundär tragenden Bauteilen aus Glas sind sowohl für die Situationen während eines Stoßes (Situation 1) als auch nach dem Stoß (Situation 2) Anforderungen zu erfüllen, welche durch unterschiedliche Verfahren nachgewiesen werden können. Dies sind zusätzliche Nachweise unter den besonderen Bedingungen der Situationen 1 und 2, die ersatzweise zur

Erzielung notwendiger Robustheit eingeführt wurden. Bei der Betrachtung von Situation 1, also während des Stoßes, ist ein begrenzter Ausfall während des Auspralls erlaubt. Hierbei richtigen sich die Anforderungen nach dem Ausfallszenario.





Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben sind Stoß- und Schlagbelastungen auch normativ geregelt, diese werden allerdings ausschließlich vor dem Hintergrund sekundärer Bauteile betrachtet. Denn auch sekundäre Glaskonstruktionen müssen neben den statischen Betrachtungen ggfs. auch Anforderungen hinsichtlich der Absturzsicherung erfüllen, allerdings sind diese im Vergleich zu primären Bauteilen geringer. Über statische Lasten hinaus ist speziell bei absturzsichernden Verglasungen die Anprallbelastung durch Personen wichtig. Die Beanspruchung des Bauteils durch eine stürzende Person (deformierbarer Körper) wird in diesem Zusammenhang als "weicher Stoß" bezeichnet. Aus Sicherheitsaspekten ist aufgrund der Bruchgefahr die Verwendung von Monoglas unzureichend, so dass nur Verbundsicherheitsglas eingesetzt werden kann. Bei der absturzsichernden Verglasung spielt ebenfalls die Lagerungsbedingung der VSG-Scheiben eine wichtige Rolle. Eine händische Berechnung ist daher nicht ohne weiteres möglich. In Deutschland wird der Nachweis der Stoßsicherheit daher mit Hilfe eines Pendelschlagkörpers (Pendel-schlag mit Doppelreifen) in Anlehnung an DIN EN 12600 [EN12600] (Glas im Bauwesen: Pendelschlagversuch -Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas) geführt, damit die Beanspruchungs- und Lagerungsart versuchstechnisch erfasst und letztendlich die geforderten Sicherheitsansprüche an absturzsichernde Verglasungen auf ihre Tauglichkeit bei weichem Stoß überprüft werden. Je nach Situation und Gefährdungspotential sind dabei unterschiedliche Schlagenergien (Fallhöhen) zu berücksichtigen. Der Versuch und die Bewertungskriterien sind wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben in DIN 18008-4 - Anhang A [DIN18008a] aufgeführt.

Zur Vereinfachung wurden bereits geprüfte Standardkonstruktionen zusammengefasst, so dass hier kein Versuch mehr erforderlich ist (DIN 18008-4 – Anhang B) [DIN18008a]. Hiervon abweichende Konstruktionen müssen jedoch weiterhin experimentell geprüft werden. Auch aus diesem Grund entstand der Wunsch, die stoßartige Wirkung auf die Verglasung unter Berücksichtigung der Lagerungsbedingungen rechnerisch zu simulieren, um eine Vordimensionierung zu einem frühen Planungszeitpunkt zu ermöglichen.

Erste Forschungsansätze zur numerischen Simulation von dynamischer Wirkung auf Verbundsicherheitsglas sind in [Boh99] zu finden. Dort wurde zunächst der Frage nachgegangen, inwiefern das viskoelastische Materialverhalten der Zwischenschicht mathematisch beschrieben und numerisch implementiert werden kann. Für ein Mehrschichtmodell wurden dann Lösungsverfahren dargelegt, welche in der Lage sind, das zeit- und temperaturabhängige Verhalten von Zwischenschichten zu erfassen. Dies fand Eingang in das FEM Programm SJMepla, in dem VSG-Scheiben nicht nur statisch, sondern auch unter dynamischen Kurzzeitstoßbelastungen, wie. z.B. Pendelschlag, simuliert werden können.

Aufbauend (auf [Boh99] [Bre01] muss noch ausformuliert werden) wurden weitere Forschungsarbeiten zur numerischen Bestimmung des dynamischen Verhaltens von VSG-Scheiben unter weichem Stoß, insbesondere in [Wör00] [Sch01] [Sch02] [Sch03] und [Kol12] unternommen. In [Sch01] hat sich Schneider u.a. mit der Thematik auseinandergesetzt, stoßbeanspruchte Gläser infolge von Pendelschlagversuchen mit ANSYS abzubilden. Ein Vergleich der beiden numerischen Verfahren von SJMepla und ANSYS mit experimentellen Ergebnissen [Sch02] führt jeweils zu guten Übereinstimmungen. In [Bre07] wurden die bereits vorhandenen numerischen Verfahren durch die Anwendung von LSDYNA erweitert.

Die numerischen Simulationen von Pendelschlagversuchen haben in erster Linie gezeigt, dass volldynamisch transiente Berechnungen von durch weichen Stoß beanspruchte Glasscheiben, mit universeller FE-Software möglich sind. Diese Erkenntnisse führten zu der Akzeptanz von numerischen Berechnungsverfahren als Ersatz für experimentelle Pendelschlagversuche, so dass diese in DIN 18008 T.4 Anhang C3 als alternatives Nachweisverfahren neben den experimentell aufgestellten und numerisch überarbeiteten Bemessungstafeln nach DIN 18008-4 – Anhang B [DIN18008a] aufgenommen wurden.

Allen bisherigen FE- Berechnungen und Forschungsergebnissen ist jedoch gemein, dass sie i.d.R. nur den weichen Stoß ohne Schädigung an sekundären Glasbauteilen simulieren. Für Glasbauteile mit Stoß und weiteren Belastungen aus der übergeordneten Struktur fehlen weitgehend Ergebnisse, genauso wie solche von "harten" Stoßbelastungen, d.h. mit Bruch einer Glasschicht.

#### 2.4.2 Ausfallszenarien und Resttragfähigkeit von Glasschichten

In einer begrenzten Anzahl von Arbeiten ist die statische Restbiegetragfähigkeit von Verbundglasquerschnitten, unter Querlasten nach Ausfall einer Glasschicht sowie der Wirksamkeit der dann insbesondere bei SGP- Folien als "externe" Bewehrung wirkenden Verbundfolie untersucht worden. Die daraus entstandenen Ergebnisse wurden in diesem Forschungsvorhaben berücksichtigt und durch weitere, auf die Theorie II. Ordnungs- bzw. Stabilitätsproblematik ausgerichtete Untersuchungen ergänzt. Allerdings ist bei den bisher durchgeführten Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von VSG festzustellen, dass sie nicht in Hinblick auf dynamische Stoßereignisse, weder bei Quer- noch bei Axiallasten, untersucht wurden, sondern nur auf eine allgemeine Langzeittragfähigkeit. Die Grundlegende Vorarbeit zum Tragverhalten von VSG-Scheiben wurde in [Sie99] geschaffen. Es wurde unteranderem die Schlagbeanspruchung im konstruktiven Ingenieurbau auf die Resttragfähigkeit, das Resttragverhalten von gebrochenem Verbundglas sowie die Spannungsverteilung und umlagerung im Bereich des Risses untersucht. In [Kot06] wurden in erster Linie die Materialeigenschaften von Glas und PVB bestimmt und vereinfachte Stoffgesetzte formuliert. Darüber hinaus wurde für die Beschreibung des Trag- und Resttragverhaltens der Begriff der Resttragfähigkeit definiert und die Bruchzustände im VSG beschrieben. Auch [Del08] hat sich mit der Beschreibung und Erläuterung des Nachbruchverhaltens bei VSG-Scheiben beschäftigt. [Del08] untersuchte diesen Gegenstand in Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften der Zwischenschicht (SGP und PVB) bei großen Dehnungen/ Verformungen.

Bei der Betrachtung der Resttragfähigkeit spielt der im Stahlbeton bekannte und oft verwendete Begriff des "tension-stiffening-effects" auch bei VSG-Scheiben eine wichtige Rolle. [Yan12] hat diesbezüglich Formeln zur Lösung dieses Effekts in bereits vorhandene Modelle zur Beschreibung des Nachbruchverhaltens von VSG-Scheiben implementiert. Die zu Grunde liegenden analytischen Modelle waren in diesem Zusammenhang die von [Kot06] vorgestellten Bruchzustände.

Alle bisher genannten Untersuchungen haben eins gemeinsam, die dynamischen Effekte infolge eines Ausfalls einer Glasscheibe unter statischer Belastung wurden in allen Arbeiten nicht berücksichtigt.

#### 2.4.3 Robustheit primär tragender Bauteile aus Glas

Wird Glas in **primär tragenden Elementen** eingesetzt, so verlässt man in den meisten Fällen den derzeit geregelten Bereich. Dies ist beispielsweise bei Stützen, Schubaussteifungen oder Trägern der Fall. Neben den Tragfähigkeitsnachweisen ist auch eine entsprechende Robustheit sicherzustellen, die über die Anforderungen an sekundär tragende Bauteile hinausgeht und in den gegenwärtigen Normen (vgl. [DIN18008a] und [EN16612] nicht umfassend behandelt wird.

Bei primären Glasbauteilen ist in der Regel eine ZiE (Zustimmung im Einzelfall) erforderlich. Das Sicherheitskonzept hinsichtlich der Belastungs- und Ausfallszenarien ist dabei individuell zu erarbeiten. Es müssen hier die Nutzung des Bauwerks, die Schadenswahrscheinlichkeit, die Schadensfolgen und das damit verbundene Schadensrisiko Berücksichtigung finden.

# 3 Auswirkung von Querschnittsausfällen bei VSG-Querschnitten

#### 3.1 Einleitung

Mit dem üblichen Konstruktionsprinzip, VSG-Querschnitte aus inneren, tragend angesetzten Glasschichten und äußeren, nicht tragend angesetzten Schutzschichten aus Glas auszubilden, ist eine Schadenstoleranz bei primär tragenden Bauteilen aus Glas nicht ohne Weiteres garantiert. Ein Grund dafür ist die bei Bruch einer (Schutz-) Glasschicht stattfindende plötzliche dynamische Lastumlagerung auf den Restquerschnitt. Denn der plötzliche, wenn auch nur teilweise erfolgende Steifigkeits- und Festigkeitsverlust ist mit einer dynamischen Stoßreaktion vergleichbar. In den bisherigen Regelungen wird diese Stoßreaktion jedoch nicht berücksichtigt. Wird weiterhin der Bruch einer (Schutz-) Glasschicht durch einen Queranprall die ohnehin erfolgende Beanspruchungserhöhung begleitet, kann infolge der Querschnittsreduzierung (gegen-über weichem Queranprall ohne Zerstörung einer Schicht) durch die Axialstoßreaktion noch weiter verstärkt werden. Dies ist insofern wichtig, als die Queranpralltests (Pendelschlagversuch) derzeit nur für sekundäre Bauteile als "weicher Stoß" ohne Axial- oder "in-plane"-Belastung konzipiert sind.

Fällt beispielsweise eine Glasschicht eines statisch belasteten VSG-Querschnitts plötzlich aus, so erhöhen sich die Schnittgrößen des Restquerschnitts stoßartig. Ohne Ansatz von Dämpfung erzeugt der Stoß theoretisch eine kurzzeitige Vergrößerung der umlagernden Beanspruchungen von  $\phi$ = 2,0, siehe Bilder 2, 3 und 8, wenn der Last-Zeitverlauf der umlagernden Beanspruchungen näherungsweise als rechteckförmig angesehen wird [Pet96]. Bei einer Rissausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 1500 m/s und einem entsprechend ausgeprägten Rissbild bei TVG oder ESG kann dies zunächst durchaus angenommen werden. Bezogen auf die Biegespannungen ist dieser Wert bei Strukturen mit ideal-elastischem Materialverhalten näherungsweise nicht von geometrischen Nichtlinearitäten abhängig (im Gegensatz zu werkstofflichen Nichtlinearitäten), siehe Bild 8.

Bei plötzlichem Ausfall einer Glasschicht erhöhen sich die Beanspruchungen infolge der Stoßreaktion erheblich, was bereits einfache theoretische Überlegungen, Bild 3, wie auch Versuche, Bild 4, zeigen, was Überbeanspruchungen von theoretisch bis zu 50% in der verbleibenden Glasschicht (bei sym. 2-fach Laminat) gegenüber der rein statischen Betrachtung erzeugt.

Während für die in den Technischen Regeln bzw. in DIN 18008 [DIN18008a] derzeit behandelten, in der Regel sekundären Bauteile das Sicherheitsdefizit, das aus dem geschilderten und ähnlichen Szenarios entsteht, in Wirklichkeit entweder über zusätzlich geforderte, versuchstechnisch zu führende Resttragfähigkeitsnachweise oder in einigen Fällen über Regeln zum Glasaufbau (z.B. bei Überkopfverglasungen durch VSG-Querschnitte mit grobbrechenden Restglasschichten) wieder "geheilt" wird, sind diese für primär tragende Bauteile weitgehend ausgeschlossen. Denn die Integration primärer Glasbauteile in die übergeordnete Struktur schließt aufgrund des Versagensrisikos einen versuchstechnischen

Nachweis am Originalbauwerk aus, und auch die herkömmlichen konstruktiven Regeln in Bezug auf den Restquerschnitt und Lagerungsbedingungen sind nicht mehr ausreichend.

# 3.2 Dynamische Stoßreaktion

In der Baupraxis wird fast ausschließlich Verbundsicherheitsglas verwendet. Dabei wird die mittlere, zur statischen Lastabtragung angesetzte Glasstütze in der Regel durch Schutzschichten geschützt. Die beiden äußeren Scheiben dienen also nur als Schutz der inneren Scheibe, übernehmen jedoch im intakten Fall ebenfalls einen Teil der auf die Stütze wirkenden Kräfte. Kommt es durch eine äußere Einwirkung zum Bruch einer Scheibe, so erfährt diese durch den plötzlichen Steifigkeitsverlust einen Ruck. Die einwirkenden Kräfte müssen schlagartig umgelagert werden und es kommt zu einer Schwingung des Systems. Diese Schwingung muss durch eine geeignete analytische Gleichung erfasst werden. Eine Möglichkeit, die dynamischen Effekte zu berücksichtigen, ist die Einführung des Stoßfaktors. Dieser wird auch als dynamischer Lastfaktor (DLF) bezeichnet und kann vereinfacht sich aus dem Verhältnis der maximalen dynamischen Auslenkung unmittelbar nach dem Bruch einer Scheibe zur statischen Endauslenkung des Systems [Pet96] berechnet werden.

$$DLF = \frac{x_{dyn}}{x_{stat,End}}$$
(3-1)

Gleichung (3-1) geht allerdings davon aus, dass die Scheibe vor und nach dem Bruch die gleiche statische Auslenkung aufweist. Beim Bruch einer Scheibe wird jedoch die statische Auslenkung im Vergleich zum intakten VSG vergrößert und somit wird der DLF über die folgende Gleichung ermittelt:

$$DLF = \frac{x_{dyn} - x_{stat}}{x_{stat,End} - x_{stat}}$$
(3-2)

Der dynamische Lastfaktor kann Werte zwischen 1 (dynamische Auslenkung gleich statischer Auslenkung  $\rightarrow$  keine Schwingung) und 2 (dynamische Auslenkung doppelt so groß wie statische Endauslenkung) annehmen [Pet96].

Um diese Aussage analytisch nachzuweisen, gibt es zwei verschiedene Lösungsansätze: Die erste Möglichkeit ist die Ermittlung der statischen und dynamischen Auslenkung über Kräftegleichgewichte und Energieerhaltungssätze. Die zweite Möglichkeit ist die Herleitung einer Bewegungsgleichung für das schwingende System unmittelbar nach dem Bruch.

# 3.2.1 Herleitung des dynamischen Lastfaktors über Kräftegleichgewicht und Energieerhaltung

Vereinfachend kann die Glasscheibe als Feder angesehen werden, auf welche die Masse m wirkt [Big64]. Betrachtet man in diesem Zusammenhang zunächst eine unbelastete Feder, auf der anschließend eine plötzlich wirkende Masse aufgebracht wird, so erhält man das in Abbildung 3-1 veranschaulichte vereinfachte Federsystem.



#### Abbildung 3-1: Vereinfachtes Federsystem

Die auf die Feder wirkende Kraft sowie die Federkraft selbst ergeben sich aus den folgenden beiden Grundgleichungen:

$$F_{pot} = m \cdot g \tag{3-3}$$

$$F_{Fed} = c_f \cdot x \tag{3-4}$$

Bei einer statischen Beanspruchung kann der Federweg durch Gleichsetzen der beiden Kräfte ermittelt werden (Kräftegleichgewicht).

$$F_{pot} = F_{Fed} \tag{3-5}$$

Zur Bestimmung der maximalen dynamischen Durchbiegung muss der Energieerhaltungssatz verwendet werden. Die energetischen Grundgleichungen ergeben sich aus dem Integral der Kraft über den zurückgelegten Weg der Feder:

$$E_{pot} = \int_0^{x_{dyn}} m \cdot g \, dx = \left[m \cdot g \cdot x\right]_0^{x_{dyn}} = m \cdot g \cdot x_{dyn} \tag{3-6}$$

$$E_{Fed} = \int_{0}^{x_{dyn}} c_{f} \cdot s \, dx = \left[\frac{1}{2} \cdot c_{f} \cdot x^{2}\right]_{0}^{x_{dyn}} = \frac{1}{2} \cdot c_{f} \cdot x_{dyn}^{2}$$
(3-7)

Durch Gleichsetzen der beiden Energien (Energieerhaltungssatz) kann die maximale dynamische Durchbiegung ermittelt werden:

$$E_{pot} = E_{Fed} \tag{3-8}$$

Der Stoßfaktor kann schließlich über das Verhältnis von  $x_{dyn}$  zu  $x_{stat}$  bestimmt werden und kann einen maximalen Wert von 2 annehmen.

$$\frac{x_{dyn}}{x_{stat,End}} = 2 \tag{3-9}$$

Aus der Herleitung geht hervor, dass der DLF unabhängig von der auf das System aufgebrachten Masse ist, da diese sich beim Verhältnis von  $x_{dvn}$  zu  $x_{stat}$  rauskürzt.

Allerdings ist die Herleitung sehr abstrakt und beinhaltet lediglich den Kräfte- und Energieerhaltungssatz. Die Eigenfrequenz des schwingenden Systems unmittelbar nach dem Bruch sowie Dämpfungseffekte oder zeitliche Abhängigkeiten werden nicht berücksichtigt. Deshalb wird zur Überprüfung die Bewegungsgleichung des Systems hergeleitet.

# 3.2.2 Bewegungsgleichung für das schwingende System für Querschnittsverlust

Die Schwingung der belasteten VSG-Scheibe entsteht durch den schlagartigen Querschnittsverlust der unteren Glasscheibe. Anders als bei einer impulsartigen Belastung wie z.B. durch eine Rechteckfunktion des Stoßes, bei welchem nach einer bestimmten Zeit die aufgebrachte Kraft, welche das System zum Schwingen bringt, wieder vom System entfernt wird, bleibt der Querschnittsverlust vorhanden. Dieses Szenario wird mithilfe einer Sprungfunktion beschrieben, bei welcher die Kraft plötzlich auf das System aufgebracht wird und anschließend quasi unendlich lange vorhanden bleibt. Der Unterschied ist in Abbildung 3-2 dargestellt.



Abbildung 3-2: Vergleich zwischen Sprungfunktion (links) bzw. Rampenfunktion (Mitte) und Rechteckstoß (rechts)

Zunächst muss das System ausgelenkt und alle einwirkenden Kräfte angesetzt werden. Anschließend muss ein Gleichgewicht zwischen äußeren und inneren Kräften gebildet werden.



#### Abbildung 3-3: Innere und äußere Kräfte am ausgelenkten Einmassenschwinger

Durch das Gleichsetzen der Kräfte ergibt sich die folgende Beziehung:

$$mg - c\dot{u} - ku = m\ddot{u} \tag{3-10}$$

Hierbei handelt es sich um eine inhomogene DGL, welche sich aus einem homogenen und einem partikulären Teil zusammensetzt. Während die partikuläre Lösung gleich dem inhomogenen Teil der DGL entsprechen soll, ist die homogene Lösung der DGL gleich der einer schwach gedämpften, freien Schwingung:

$$u(t) = C_1 + e^{-D\omega_0 t} (C_2 \sin(\omega_D t) + C_3 \cos(\omega_D t))$$
(3-11)

Die entsprechenden Konstanten können über die Randbedingungen im System vor und nach Querschnittsausfall des betrachteten Glasprobekörpers ermittelt wurden. Diese Bewegungsgleichung kann für verschiedene Lastfälle und verschiedene Anfangs- bzw. Enddurchbiegungen als Diagramm ausgegeben werden. Beispielhaft wird in Abbildung 3-4 eine gedämpfte Schwingung zum Zeitpunkt eines Querschnittsausfalls dargestellt.



Abbildung 3-4: gedämpfte Schwingung unmittelbar nach Lastaufbringung (bzw. Bruch) ohne Versatz

An dieser abgebildeten gedämpften Schwingung kann anschließend durch die oben beschriebene Bewegungsgleichung durch Einsetzen der relevanten Randbedingungen, wie z.B. die statische Durchbiegung vor Bruch oder der statischen Enddurchbiegung nach Bruch, auf den dynamischen Lastfaktor DLF geschlossen werden.

$$\rightarrow \qquad DLF(\omega,D) = 1 + e^{-\frac{\pi D}{\sqrt{1-D^2}}} \tag{3-12}$$

Hieraus geht hervor, dass der dynamische Lastfaktor DLF unabhängig von der Eigenfrequenz oder den statischen Durchbiegungen vor bzw. nach dem Bruch ist. Stattdessen fließt hier wesentlich die hervorgerufene Dämpfung des Systems ein. Durch Anwendung der Bewegungsgleichung für Allgemeine Systeme, so kann nach [Wöl06] dieser Ansatz bestätigt werden.

#### 4 Durchgeführte Bauteilversuche

Das Ziel von Bauteilversuchen ist es, die in der Theorie herangezogenen Ansätze mittels dieser zu Verifizieren und das reale Verhalten abzubilden. Bei den Versuchsreihen in diesem Forschungsvorhaben, sollte der plötzliche Querschnittsausfall simuliert werden und die notwendigen Parameter zur Charakterisierung des Ausfalls aufgenommen werden. Im folgenden Kapitel wird das Prinzip der durchgeführten Versuche beschrieben. Es wird besonders auf die unterschiedlichen Versuchsarten und deren Besonderheiten eingegangen und anschließend darauf eingegangen, wie die Versuche durchgeführt wurden. Zunächst findet eine vollständige Beschreibung der Kennwertuntersuchungen an Biegeträgern aus Glas statt. In einem nächsten Schritt wird das Verhalten des Querschnittsausfalls unter Axialbeanspruchung untersucht. Hierbei wurden zum einen Kleinteiluntersuchungen sowie großmaßstäbliche Versuche durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Querschnittsausfall ebenfalls an großmaßstäblichen Probekörpern mit statisch wirkender Kopfmasse und einem seitlichen Impuls hervorgerufen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde an einer kleineren Anzahl von Probekörpern der Querschnittsausfall ebenfalls an Schubfeldern aus Glas durchgeführt.

#### 4.1 Versuchsbeschreibung

#### 4.1.1 Zielsetzung und Umsetzung

Insgesamt wurde an vier unterschiedlichen Versuchs- und Bauteilarten der Querschnittsausfall simuliert. Hier wurden zunächst Kennwertuntersuchungen an querbelasteten Verbundglasscheiben durchgeführt, die als Bedingung möglichst (affine) Momentenverläufe wie bei axial beanspruchten Glasscheiben aufweisen müssen. Aufgrund der hier erlangten Informationen konnten anschließend kleinmaßstäbliche und großmaßstäbliche Versuche durchgeführt werden. Um einen weiteren Stabilitätsfall zu untersuchen, wurde ebenfalls an einigen Probekörpern aus Glas, welche auf Schub beansprucht wurden, der Querschnittsausfall simuliert. Bei diesen Versuchen lag die Hauptaufgabe darin einen Querschnittsausfall zu erzeugen ohne einen seitlichen Impuls in die Probekörper einzutragen. Darüber hinaus hatten alle Versuchsarten gemein, dass auf diesen eine statische Masse aufgebracht werden sollte, welche bei Bruch des Querschnitts frei mitschwingen kann. Aus dieser Vorgabe ergab sich somit, dass eine Lastaufbringung nicht durch einen Prüfzylinder möglich war, denn dieser würde insgesamt zu träge reagieren und zu einer Dämpfung des Systems führen. Anschließend wurden, in der eigens für das Forschungsvorhaben entwickelten Versuchseinrichtung für Knickversuche, in einem nächsten Schritt großmaßstäbliche Probekörper aus Glas untersucht, welche einen Querschnittsausfall durch einen Seitenimpuls erfahren sollten. Zum Aufbringen des seitlichen Impulses wurde hier, den in der 18008-4 [DIN18008a] bekannten Zwillingsreifen mit definierter Pendelmasse verwendet und dieser modifiziert. Da der ursprüngliche Pendelkörper nicht zwangsläufig zu einem Querschnittsausfall führt, wurde an diesem zusätzlich ein Körner mittig angebracht, sodass der als erstes in kontakttretende Querschnitt mit dem Körner beschädigt und infinitesimal danach der Impuls aufgebracht werden kann.

# 4.1.2 Messtechnik

Zur Aufnahme der externen Vorgänge wie z.B. der Lastumlagerung bei schlagartigem Querschnittsausfall und der daraus folgenden Reaktionen auf den Restquerschnitt, wurde auf die Anwendung unterschiedlicher Messtechnik zurückgegriffen. Je nach Versuchsart variierte dann ebenfalls die Anordnung dieser.

Bei den querbelasteten Versuchen wurden insgesamt sechs Messstellen berücksichtigt. Zum einen wurden Dehnungsmesstreifen (DMS) zur Aufnahme der in Längsrichtung auftretenden Oberflächendehnungen jeweils im Schnittpunkt der Symmetrieachsen auf der Ober- und Unterseite der Scheibe appliziert. Zur Aufnahme der statischen sowie dynamischen Durchbiegungen wurden sowohl Linearpotentiometer (Novotechnik TR100, potentiometrisch, Messbereich 100mm) als auch Laser-Wegaufnehmer (WayCon LAS-Z-100, Triangulation, Messbereich 100mm) benutzt und auf der biegedruckbeanspruchten Seite angebracht. Darüber hinaus wurden Beschleunigungssensoren (PCB, M3701, kapazitiv, Messbereich 3G) zur Aufnahme der Eigenfrequenzen eingesetzt. Diese wurden ebenfalls auf der Ober- und Unterseite der Scheibe befestigt.





Anders als bei den querbelasteten Trägern aus Glas, wurde bei den stützenförmigen Bauteilen, statt dem Laser-Wegaufnehmer ein zusätzlicher Linearpotentiometer in der Mitte der Scheibe angebracht, sodass die beiden Wegaufnehmer exakt gegenüber ausgerichtet sind. Hintergrund dieser Anordnung war, zu überprüfen, ob sich bei Aufbringen der Kopfmasse eine seitliche Verformung in Richtung der im Vorfeld aufgenommenen Auslenkung ausbildet, was in der Folge zu einer Vergrößerung der Auslenkung führen würde. Anders könnte es ebenfalls aufgrund der Einbautoleranzen dazu kommen, dass sich eine Auslenkung entgegen der Imperfektionsrichtung ausbildet. Hieraus lässt sich also letztendlich ermitteln, welcher Linearpotentiometer vor Bruch der Scheibe notwendig wird und welcher aus schutztechnischen Gründen dann entfernt werden kann. Insgesamt kamen bei den
Stützenversuchen sechs Linearpotentiometer zum Einsatz. Die vier weiteren wurden jeweils an den Ecken des Kopfpunktes angebracht und sollten die Verschiebung der Kopfmasse in Scheibenrichtung aufzeichnen. Bei dieser Versuchsart wurden wie vorher auch schon beschrieben zusätzlich DMS und Beschleunigungssensoren angebracht. Die gleiche Anordnung der Messtechnik kam bei der Versuchsart Stützen mit seitlichem Impuls zum Einsatz.





Bei den Schubfeldversuchen kamen ebenfalls mittig angeordnete Linearpotentiometer und Beschleunigungssensoren zum Einsatz. Hier wurde in der Mitte lediglich die Art der Dehnungsmessstreifen geändert. Die Streifen-DMS wurden durch DMS-Rosetten ersetzt und den Hauptspannungsrichtungen angebracht. Darüber hinaus wurde zusätzlich in der Ecke der Scheibe im Bereich des Lasteinleitungspunkt ein Streifen-DMS appliziert um die lokalen Spannungsspitzen zu untersuchen.



Abbildung 4-3 Anordnung der Messtechnik für Schubfeldversuche

Zur genauen Aufnahme aller für die dynamischen Prozesse wichtigen Parameter, wurde eine Abtastrate im Messsystem als Software- und Hardware-Takt gewählt. Es hat sich auch bereits in Vorversuchen gezeigt, dass hierbei alle notwendigen Daten ohne Verluste aufgenommen werden konnten.

# 4.2 Versuchsdurchführung

## 4.2.1 Probekörpervermessung

Vor Durchführung der Versuche wurde jeder Probekörper zur Ermittlung der im Glasbautypischen Parameter vermessen. Es wurde unteranderem die Scheibendicken sowie die Probekörperabmessungen ermittelt. Diese wurden an mehreren Stellen bestimmt und für jeden Versuchskörper auf einem Datenblatt (Versuchsprotokoll) nachgehalten. Besonders bei der analytischen Ermittlung der Eigenfrequenz ist eine Unterscheidung zwischen Soll- und Ist-Dicke unerlässlich. Zudem wurden Auffälligkeiten, wie Scheibenversätze und Lufteinschlüsse, dokumentiert. Des Weiteren wurde die Vorspannung an den Oberflächen der Glasscheiben gemessen. Die Messung der Spannung erfolgte an drei Stellen pro Seite und wurde mittels der Streulichtmethode mit dem Messgerät SCALP 04 bzw. SCALP 05 vorgenommen. Die Vorimperfektion der Verbundglasscheiben wurde ebenfalls gemessen.

# 4.2.2 Versuchsablauf

Im Folgenden soll auf die Besonderheiten der Versuchsdurchführung und des Versuchsablaufs eingegangen werden. Das Ziel, einen Querschnittsausfall zu simulieren und dabei so viele Informationen wie möglich zu generieren, setzt eine gründliche Planung voraus. Nicht nur die applizierte Messtechnik sondern auch die Abläufe bei der Versuchsdurchführen sollten stets beachtet werden. Allerdings sollen hier nicht nur Ergebnisse aus dem eigentlichen Bruchversuch ermittelt werden, sondern auch Informationen vor und nach dem Bruch gewonnen werden. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Zustände.

**Zustand I (unbelasteter Probekörper):** Der Probekörper ist in der Prüfeinrichtung eingebaut und ist unbelastet (max. Eigengewicht). Bei diesem Zustand wird die Eigenfrequenz durch Anregen der Scheibe ermittelt. Hierbei ist diese nur von der Lagerung und des Eigengewichts der Scheibe abhängig.

**Zustand II (belasteter Probekörper):** Nach Ermittlung des Eigenschwingverhaltens des Versuchskörpers, wurde die Last aufgebracht. Hierbei erwähnt, dass es sich bei der Aufgebrachten Masse um eine statisch ruhende Masse handelte. Diese wurde im Vorfeld für die jeweilige Versuchsart ermittelt. Nachdem die Masse aufgebracht wurde, konnte anschließend die Eigenfrequenz für diesen Zustand ermittelt werden.

**Zustand III (belasteter Probekörper zum Zeitpunkt des Bruchs):** Dieser Zustand simuliert den Ausfall des Querschnitts. Hierbei wir ein nahezu masseloser Körper in diesem Fall ein Körner an die Versuchsscheibe gependelt und somit der auf Zug beanspruchte Querschnitt kontrolliert beschädigt. Das Ausschwingverhalten was die Scheibe in diesem Zuge erfährt wird dazu genutzt die Eigenfrequenz im Bruchzustand zu ermitteln.

**Zustand IV (belasteter Probekörper nach Bruch):** Nach dem Bruch wird der Zustand IV betrachtet. Hier befindet sich der gebrochen Versuchskörper in einer statischen Ruhelage und ist zudem mit der Masse belastet. Diese Masse ist genau für diesen Zustand im Vorfeld bemessen worden, d.h. der Restquerschnitt ist gerade noch in der Lage, die Masse zu tragen, setzt man hier die charakteristischen Biegefestigkeiten für die jeweilige Glasart an und im Falle einer 3fach VSG die bekannten Schubmoduln für den statischen Langzeitfall. Auch hier wird anschließend mit der oben beschriebenen Methode die Eigenfrequenz ermittelt.

**Zustand V (unbelasteter Probekörper nach Bruch):** Nach Entlastung der Scheibe, d.h. die Masse wurde entfernt, stellt sich Zustand V ein. Hierbei handelt es sich um den gebrochenen Versuchskörper ohne Masse an dem anschließend die Eigenfrequenzmessung durchgeführt wurde. Dieser Zustand ist zusätzlich dadurch charakterisiert, dass sich eine eingeprägte Durchbiegung in dem Querschnitt, aufgrund der Bruchstücke einstellt

Grundsätzlich ist bei jeder Versuchsart der soeben beschriebene Versuchsablauf durchgeführt worden, lediglich bei den großmaßstäblichen Versuchen mit Seitenimpuls, wurde der Querschnittsverlust durch einen Pendelkörper an dem ein Körner angebracht wurde, hervorgerufen.

# 4.3 Biegeträger

# 4.3.1 Beschreibung

Für die Ermittlung der Stoß-, Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte wurden zunächst Versuche an querbelasteten VSG-Probekörpern durchgeführt, welche als Voruntersuchungen für Stützen und Schubfelder aus Glas dienen.

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Szenarien wurden an verschiedenen Probekörpern experimentell untersucht. Dabei wurde unteranderem die Glasart variiert und hier sowohl ESG- als auch TVG-Scheiben geprüft. Auch die zwei im Konstruktiven Glasbau üblichen Folienarten PVB und SGP wurden verwendet. In Tabelle 4-1 sind die geprüften Scheiben aufgelistet.

Querschnitt	Glasart	Folienart	Auflast	Anzahl Probekörper
[mm]	[-]	[-]	[kg]	[-]
		2-fach \	/SG	
6/6	TVO		119	2
10/10	IVG		332	1
6/6	500	PVB	221	1
10/10	ESG		332	1
6/6	TV0	G	119	2
10/10	IVG		332	2
6/6	500	SGP	220,8	1
10/10	ESG		332	1

#### Tabelle 4-1: Versuchsmatrix

3-fach VSG							
4/6/4	TVG		332	2			
4/6/4	ESG	PVB	332	2			
	TVG		332	2			
4/6/4	500	SGP	332	1			
	ESG		450	1			
0/0/0	6/8/6 TVG		332	1			
6/8/6		SGP	216	1			
3-fach VSG Restquerschnitt							
4/6/4	500	PVB	216	2			
4/6/4	ESG	SGP	216	2			

Bei den 2-fach-VSG-Scheiben wurden die Lasten so gewählt, dass nach dem Bruch der biegezugbeanspruchten Scheibe die Grenzspannung für die auf biegedruckbeanspruchten Scheibe (intakt) erreicht wird. Bei der Berechnung der Last wurde davon ausgegangen, dass die untere Scheibe zunächst keine Resttragfähigkeit hat und somit nur das Widerstandsmoment der oberen Scheibe zum Lastabtrag beiträgt. Für TVG wurde eine charakteristische Bruchspannung von  $\sigma = 70 N/mm^2$  und für ESG eine charakteristische Bruchspannung von  $\sigma = 120 N/mm^2$  für den Fall einer Langzeitbelastung vorausgesetzt, ohne Berücksichtigung von Überfestigkeiten. Entsprechende Kurzzeitfestigkeiten der Glasarten wurden hier nicht Berücksichtig, denn besonders bei den Biegeträgern hat sich bei Vorversuchen gezeigt, dass allein die Berechnung mit Überfestigkeiten, es bereits zum Kollaps des Gesamtsystems kommt. Voruntersuchungen an einer geringen Anzahl an 2-fach VSG Scheiben haben gezeigt, dass bereits eine Steigerung der Auflast von nur 10% bei dieser Versuchsart zu einem vollständigen Kollaps des Systems geführt hat, weshalb nur mit den charakteristischen Festigkeiten gerechnet wurde. Die ermittelten Lasten ergaben sich in diesem Fall vereinfacht nach der bekannten Balkentheorie aus dem Quotienten des Biege und Widerstandsmoments. Nach dem gleichen Verfahren wurden auch die anderen Lasten berechnet. Bei den 3-fach- Scheiben wurde als Querschnittshöhe nach dem Bruch lediglich die Summe der beiden intakten Scheiben als Höhe für das Widerstandsmoment gewählt, ohne Berücksichtigung eines eventuell wirkenden Schubverbundes der Folie.

Die Eigenfrequenzen und Tragfähigkeiten der VSG Scheiben sind vom Querschnitt der Biegeträger abhängig. Bei der Bemessung der Lasten ist von den Soll-Dicken ausgegangen worden, welche jedoch von den Ist-Dicken abweichen können. Tabelle 3-2 zeigt den Vergleich der beiden Scheibendicken.

Querschnitt	Glasart	Folienart	Soll-Dicke	lst-Dicke	Relative Abweichung
[mm]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[%]
		2-f	ach VSG		
6/6	7.0		13,52	13,24	-2,07
10/10	IVG		21,52	21,25	-1,25
6/6	500	PVB	13,52	13,27	-1,85
10/10	ESG		21,52	21,41	-0,51
6/6	TVO		13,52	13,28	-1,78
10/10	IVG	SOD	21,52	21,42	-0,46
6/6	500	SGP	13,52	13,34	-1,33
10/10	ESG		21,52	21,45	-0,33
		3-f	ach VSG		
4/6/4	TVG		17,04	16,37	-3,93
4/6/4	ESG	PVB	17,04	16,09	-5,58
4/6/4	TVG	000	17,04	16,68	-2,11
4/6/4	ESG	SGP	17,04	16,61	-2,52
6/8/6	TVC	60D	23,04	-	-
6/8/6	IVG	SGP	23,04	-	-

Tabelle 4-2: Übersicht der Probekörper

# 4.3.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessungen

Die Eigenfrequenzen und Ersatzhöhen wurden für die Zustände I - V wie in Kapitel 294.2.2 beschriebenen Verfahren ermittelt und sind in Tabelle 4-3 aufgelistet. Anhand der hier aufgezeigten Eigenfrequenzen wird in einem nächsten Schritt wie vorher beschrieben die Ersatzsteifigkeit für die untersuchten Biegeträger ermittelt. Hieraus kann eine statische und dynamische Steifigkeit ermittelt werden.

Tabelle 4-3: Durchschnittliche Eigenfrequenzen der Probekörper

Aufbau	Auflast	fZustand I	fzustand II	fzustand III	<b>f</b> Zustand IV	<b>f</b> Zustand V
[mm]	[kg]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
			2-fach VSG	·		
6/6 TVG-PVB	119	30,47	9,20	3,05	3,16	15,94
10/10 TVG-PVB	332	46,33	10,70	4,28	4,26	28,13
6/6 ESG-PVB	221	30,78	6,83	2,01	2,01	17,38
10/10 ESG-PVB	332	45,87	10,71	4,19	4,01	27,93
6/6 TVG-SGP	119	27,79	9,44	3,11	3,17	16,46
10/10 TVG-SGP	332	45,27	11,16	4,51	4,56	29,84
6/6 ESG-SGP	221	29,80	7,30	2,01	2,01	21,10
10/10 ESG-SGP	332	45,45	10,96	4,04	4,12	28,90
		3	3-fach VSG			

4/6/4 TVG-PVB	332	35,76	7,52	4,88	5,07	30,40		
4/6/4 ESG-PVB	332	36,50	7,02	4,59	4,34	27,32		
4/6/4 TVG-SGP	332	35,64	7,58	4,92	4,94	30,04		
4/6/4 ESG-SGP	332	36,49	7,55	4,84	5,05	30,86		
4/6/4 ESG-SGP	450	34,12	6,39	3,87	3,90	30,30		
6/8/6 TVG-SGP	332	43,81	11,58	9,78	9,64	41,38		
6/8/6 TVG-SGP	215,6	43,64	13,83	12,36	12,48	41,87		
3-fach VSG Restquerschnitt								
4/6/4 ESG-PVB	215,6	27,86	7,44	5,04	4,78	21,35		
4/6/4 ESG-SGP	215,6	30,58	8,01	5,94	6,14	25,98		

4.3.3 Ansatz zur Bestimmung der resultierende Ersatzhöhen und Ergebnisse

Mithilfe der gemessenen Eigenfrequenzen können die Ersatzsteifigkeit bzw. die Ersatzhöhe für den Biegeträger im belasteten und unbelasteten Fall berechnet werden. Dazu werden die allgemein bekannten dynamischen Schwingungsgrundlagen herangezogen.

$$\omega_0 = 2\pi f$$
 und  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  (4-1)

Die Ersatzsteifigkeit k für ein Bauteil ist der Kehrwert der Verschiebung  $\delta$ , also  $1/\delta$ . Die Verschiebung eines Einfeldträgers kann mithilfe von Integraltafeln bestimmt werden. Unter der Annahme einer Gleichstreckenlast ergibt sich die folgende Beziehung:

$$k = \frac{1}{\delta} = \frac{384 \cdot EI}{5 \cdot q \cdot l^4} \tag{4-2}$$

Die Ersatzhöhen werden anschließend aus dem Quotienten der beiden Eigenfrequenzen im intakten bzw. im gebrochenen Zustand gebildet. Dabei wird für die intakte Scheibe als Index die Zahl 1 verwendet, für die gebrochene Scheibe die Zahl 2.

$$\frac{\omega_{0,1}}{\omega_{0,2}} = \frac{\sqrt{\frac{k_1}{m}}}{\sqrt{\frac{k_2}{m}}} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$$
(4-3)

Durch das Einsetzen der Steifigkeitskomponenten erhält man ein resultierendes Flächenträgheitsmoment für den Restquerschnitt. Besonders im Falle der 3-fach VSG Probekörper, wenn die Folie eine mögliche Schubtragwirkung aufweist, zeigt sich dieser Ansatz über I<sub>eff</sub> als besonders hilfreich.

$$\frac{\omega_{0,1}}{\omega_{0,2}} = \sqrt{\frac{I_1}{I_2}}$$
(4-4)

Das Einsetzen von Gleichung (4-1) und (4-5) in Gleichung (4-4) ergibt und Auflösen nach h2 erhält man:

$$h_2 = \sqrt[3]{\frac{h_1^3}{(f_1/f_2)^2}} \tag{4-6}$$

Abbildung 4-4 zeigt die Vorgehensweise bei der Berechnung der Ersatzhöhe.



Abbildung 4-4: Vorgehensweise bei der Berechnung der Ersatzhöhen für den gebrochenen Biegeträger

Aufbau	Auflast	hers,Zustand V	hers,Zustand IV	Abweichung
[mm]	[kg]	[mm]	[mm]	[%]
		2-fach VS	G	
2x6 TVG-PVB	119	8,78	6,63	32,38
2x10 TVG-PVB	332	15,43	11,65	32,49
2x6 ESG-PVB	220,8	9,24	6,00*	54,41
2x10 ESG-PVB	332	15,46	11,18	38,29
2x6 TVG-SGP	119	9,54	6,53	45,98
2x10 TVG-SGP	332	16,30	11,85	37,55
2x6 ESG-SGP	220,8	10,74	6,00*	87,70
2x10 ESG-SGP	332	15,91	11,21	41,97
		3-fach VS	G	
4/6/4 TVG-PVB	332	15,29	13,10	16,71
4/6/4 ESG-PVB	332	14,05	12,37	13,59
4/6/4 TVG-SGP	332	15,20	12,81	18,71
4/6/4 ESG-SGP	332	15,24	13,03	16,93

Tabelle 4-4: Ersatzhöhen aus den Eigenfrequenzen

4/6/4 ESG-SGP	450	15,74	12,26	28,40			
6/8/6 TVG-SGP	332	22,18	20,39	8,78			
6/8/6 TVG-SGP	215,6	22,41	21,52	4,14			
3-fach VSG Restquerschnitt							
4/6/4 ESG-PVB	215,6	11,77	10,46	12,47			
4/6/4 ESG-SGP	215,6	13,89	12,97	7,10			

\*Die Ersatzhöhe der beiden 2x6 mm ESG-Scheiben konnte nicht mit der normalen Formel bestimmt werden. Der Grund dafür wird auf den folgenden Seiten erläutert.

Die Ergebnisse zeigen eine Differenz zwischen der Ersatzhöhe Zustand I und V, zur Ersatzhöhe belasteten Zustand II und IV. Nach dem Bruch der Glasscheibe werden die Bruchstücke aufgrund der wirkenden Last auf den Biegeträger auseinandergezogen. Es werden keine Druckkräfte übertragen und die Last wird ausschließlich von der intakten Scheibe aufgenommen. Nach dem Entfernen der Auflast kommt es zum Kontakt zwischen den Bruchstücken. Durch diesen Effekt kommt es zusätzlich zu einer Verkantung der Bruchstücke was anschließend zur Folge hat, dass der Querschnitt sich nicht wie im intakten Fall zurück bildet. Dadurch können während der Schwingung Druckkräfte zwischen den Bruchstücken übertragen werden. Das Flächenträgheitsmoment wird durch die Übertragung der Druckkräfte vergrößert. Die Eigenfrequenz im gebrochenen, unbelasteten Zustand liegt somit zwischen einem intakten und einem gebrochenen Querschnitt. Die folgenden Diagramme zeigen einen Vergleich zwischen den verschiedenen Ersatzhöhen.



Abbildung 4-5: Ersatzhöhen 2x6 mm Scheiben



Abbildung 4-6: Ersatzhöhen 2x10 mm Scheiben





Im gebrochenen Zustand muss die Ersatzhöhe bei 2-fach-VSG-Querschnitten mindestens der Dicke der intakten Scheibe entsprechen, bei 3-fach-VSG-Querschnitten mindestens der Dicke der beiden intakten Scheiben inklusive der Zwischenschicht. Bei den 2x6 mm ESG-Querschnitten fällt auf, dass die Ersatzhöhen im gebrochenen, belasteten Zustand genau der Mindestscheibendicke entsprechen. Die Begründung für dieses Phänomen liegt in der Lastverteilung vor bzw. nach dem Bruch. Vor dem Bruch sind die Stahlklötze gleichmäßig über den Träger verteilt. Da die Breite der Lastklötze begrenzt ist, wurde die entsprechende Bruchlast durch die Höhe der Lastklötze realisiert. Beim Bruchversuch hat sich die Scheibe so stark durchgebogen, dass die Lastklötze ein Stück nach innen verschoben wurden und zusätzlich noch nach innen umgekippt sind. Abbildung 4-8 zeigt die beiden Zustände vor und nach dem Bruch.

## Zustand II

Zustand IV





#### Abbildung 4-8: Vergleich zwischen Zustand II und III bei 2x6 mm ESG

Die Lasten sind nach dem Umkippen nicht mehr gleichverteilt sondern konzentrieren sich in der Mitte der Scheibe nahezu dreicksförmig, weshalb auch die statische Durchbiegung größer ist als bei einer gleichverteilten Auflast. Infolge einer größeren Durchbiegung ist also die Ersatzsteifigkeit des Systems geringer. Das zuvor beschriebene Prinzip ist allerdings nur unter Berücksichtigung gleicher Zustände vor und nach Bruch. Eine Umverteilung der Last und dadurch eine Veränderung der Durchbiegungsform haben zur Folge, dass die Ergebnisse verfälscht werden.

Zusätzlich wurde an zwei 3-fach VSG Scheiben aus ESG nach Bruch weitere Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurde die Scheibe mit der gebrochenen Seite nach oben gedreht. Bei erneuter Beanspruchung dieses Versuchskörpers mit gebrochener Schicht oben, befindet sich der gebrochene Querschnitt diesmal im biegedruckbeanspruchten Bereich. Anschließend wurde der intakte Querschnitt erneut kontrolliert angeschlagen und ein plötzlicher Querschnittsausfall simuliert. Hiermit sollte lediglich gezeigt werden, dass der gebrochene Querschnitt, weil dieser sich im Druckbereich befindet ebenfalls am Lastabtrag beteiligt, was sich ebenfalls in den Eigenfrequenzen wiederspiegelt, siehe Tabelle 3-3.

#### 4.3.4 Dynamischer Lastfaktor

Um den dynamischen Lastfaktor ermitteln zu können, werden die maximalen Durchbiegungen während des Bruchs, sowie die statischen Durchbiegungen vor und nach dem Bruch benötigt. Diese wurden mithilfe der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Messtechnik aufgenommen. In der folgenden Tabelle 4-5 sind die Ergebnisse des Linearpotentiometers dargestellt. Der zuvor im Kapitel Messtechnik erwähnte Laser-Wegaufnehmer wird hier nicht weiter erwähnt, da dieser die identischen Ergebnisse wie der Linearpotentiometer geliefert hat.

Aufbau	Auflast	Wstat	<b>W</b> dyn,max	Wstat,Ende	DLFw	Dämpfung	DLFξ	
[mm]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[%]	[-]	
	2-fach VSG							
6/6 TVG-PVB	119	-9,40	-52,44	-36,32	1,60	2,52	1,92	
10/10 TVG-PVB	332	-7,04	-21,50	-17,51	1,38	2,56	1,92	
6/6 ESG-PVB	221	-17,20	-	-	-	11,89	1,69	
10/10 ESG-PVB	332	-7,80	-32,90	-21,60	1,82	4,24	1,88	
6/6 TVG-SGP	119	-3,51	-55,78	34,01	1,71	0,83	1,98	

10/10 TVG-SGP	332	-2,34	-19,53	-15,19	1,34	0,77	1,98
6/6 ESG-SGP	221	-6,38	-	-	-	8,89	1,76
10/10 ESG-SGP	332	-2,83	-33,60	-20,50	1,74	4,93	1,86
8/8 TVG-SGP	220	-3,53	-19,40	-14,97	1,39	0,81	1,97
8/8 TVG-SGP	220	-3,43	-11,70	-9,51	1,36	1,43	1,96
8/8 TVG-SGP	220	-3,52	-18,17	-12,75	1,59	1,56	1,95
			3-fach V	'SG			
4/6/4 TVG-PVB	332	-26,05	-34,26	-32,18*	1,34	6,21	1,82
4/6/4 ESG-PVB	332	-21,22	-37,39	-30,50*	1,74	2,28	1,93
4/6/4 TVG-SGP	332	-5,65	-16,36	-13,12	1,43	0,77	1,98
4/6/4 ESG-SGP	332	-4,86	-21,60	-13,80	1,87	4,60	1,87
4/6/4 ESG-SGP	450	-7,69	-28,40	-19,60	1,74	0,89	1,97
6/8/6 TVG-SGP	332	-2,51	-4,49	-3,68	1,69	1,11	1,97
6/8/6 TVG-SGP	215,6	-1,55	-2,69	-2,25	1,63	1,62	1,95
3-fach VSG Restquerschnitt							
4/6/4 ESG-PVB	215,6	-16,19	-30,05	-24,19*	1,73	1,55	1,95
4/6/4 ESG-SGP	215,6	-5,37	-16,70	-11,64	1,81	0,80	1,98

\*Die statische Enddurchbiegung bei 3-fach-VSG-Scheiben mit PVB-Folie wurde als Mittelwert aus dem ersten dynamischen Maximum und dem ersten dynamischen Minimum ermittelt. Der Grund dafür wird auf den folgenden Seiten erläutert.

Bei der Auswertung der durch den Bruch erzeugten Abklingkurve hat sich gezeigt, dass es bei den 3-fach VSG Scheiben mit PVB als Zwischenschicht, dass ein deutlicher Kriechvorgang zu beobachten ist. Während im intakten Zustand die Last über alle drei Scheiben des Verbundes getragen wurde, ist die Last nach Bruch zu groß für den Restquerschnitt, was zu einem kriechen der Verbundfolie führt. Aufgrund der hohen Steifigkeit der SGP-Folie ist dieses Phänomen nicht beobachten worden.

Bei den 3-fach-VSG-Scheiben dagegen wird im Bruchmoment die Kraft, welche zuvor auf beide Verbundfugen verteilt war, schlagartig in die Verbundfuge zwischen den intakten Scheiben geleitet. Bei der SGP-Folie treten aufgrund der hohen Steifigkeit keine Kriecheffekte auf. Bei der PVB-Folie dagegen ist ein deutlicher Kriechvorgang nach dem Schwingen zu erkennen (Abbildung 4-9).



Abbildung 4-9: Schwingungsverlauf am Beispiel einer 4/6/4 mm TVG-Scheibe mit PVB-Folie

Das Materialverhalten von PVB-Folie ist nach Abschnitt 2.2.2 zeitabhängig. Die statische Enddurchbiegung wird also nicht unmittelbar nach dem Bruchereignis erreicht, sondern erst

nachdem der Kriechvorgang abgeschlossen ist. Deshalb wird zur Ermittlung des Stoßfaktors für den statischen Endwert der Mittelwert aus dem ersten dynamischen Maximum und dem ersten dynamischen Minimum gewählt (Abbildung 4-10).



Abbildung 4-10: Mittelwert aus den ersten beiden dynamischen Werten

Zusätzlich zu dem hier beschriebenen Einfluss der Zwischenschicht auf das Systemverhalten, wurde beobachtet, dass nach Bruch ebenfalls eine mögliche Glasarten Abhängigkeit vorhanden sein kann. Beobachtet man im Folgenden die Abklingkurve bei Bruch so ist ein Versatz S<sub>abs</sub> zu erkennen. Der mögliche Einfluss wird im folgenden Kapitel über die allgemeine Bewegungsgleichung hergeleitet.



Abbildung 4-11: Abklingkurve einer gedäpften Schwingung mit Versatz

Tabelle 4-5 zeigt, dass es Differenzen zwischen dem Stoßfaktor, welcher infolge der Durchbiegungen (siehe Kapitel 3.2.1) und dem Stoßfaktor, welcher infolge der Dämpfung (siehe Kapitel 3.2.2) berechnet wurde, gibt. Es ist zu beobachten, dass je größer der Unterschied zwischen den beiden Stoßfaktoren ist, desto größer ist auch der hier beobachtete entstandene Versatz. Der Unterschied ist in Abbildung 4-12 graphisch dargestellt.



Abbildung 4-12: Vergleich der dynamischen Lastfaktoren aus Durchbiegungen und Dämpfungen

4.3.5 Bewegungsgleichung für das schwingende System für Querschnittsverlust bei zusätzlichem Versatz

Unmittelbar nach dem Bruch einer Glasscheibe kommt es durch verschiedene Ursachen wie z.B. Energiefreisetzungen oder Verzahnungen der Bruchstücke zu einem Versatz der Bewegung. Das erste dynamische Maximum ist deutlich kleiner als nach Gleichung (4-33). Dieses Phänomen wird in Abbildung 4-5 dargestellt. Durch die Verringerung des dynamischen Maximalwertes wird auch der DLF deutlich kleiner. Die entsprechende Bewegungsgleichung sowie der DLF für diesen Fall müssen neu bestimmt werden.



Abbildung 4-13: Gedämpfte Schwingung unmittelbar nach Lastaufbringung (bzw. Bruch) mit Versatz

Bei der Herleitung der Bewegungsgleichung ohne Versatz ist  $u(t = 0) = x_{stat}$ . Allerdings findet die Bewegung des Systems durch den Versatz in einem kleineren Bereich statt, sodass für den dynamischen Lastfaktor als Anfangswert der Bewegung  $u(t = 0) = x_{stat} + S_{abs}$  angenommen wird. Gleichung ((3-11) ist die Grundbewegungsgleichung, welche unverändert bleibt. Ebenso bleibt auch die Konstante  $C_1 = x_{stat,End}$  unverändert, welche die neue Gleichgewichtslage definiert. Die Konstanten  $C_2$  und  $C_3$  müssen dagegen neu ermittelt werden.

$$u(t=0) = x_{stat} + S_{abs} = e^{0}(C_{2}\sin(0) + C_{3}\cos(0))$$
(4-7)

Aus dieser Gleichung kann  $C_3$  neu bestimmt werden:

$$C_3 = x_{stat} - C_1 = x_{stat} + S_{abs} - x_{stat,End}$$
 (4-8)

Die Anfangsgeschwindigkeit des Systems bleibt ebenfalls Null. Somit bleibt auch die Randbedingung  $\dot{u}(t = 0) = 0$  gleich. Durch Einsetzen der neu ermittelten Konstante  $C_3$  in diese Gleichung ergibt sich  $C_2$  zu.

$$C_2 = \frac{D\omega_0(x_{stat} + S_{abs} - x_{stat,End})}{\omega_D}$$
(4-9)

Mithilfe der neu ermittelten Konstanten lässt sich eine neue Bewegungsgleichung für das System aufstellen.

$$u(t) = x_{stat,End} + e^{-D\omega_0 t} \begin{bmatrix} \left(\frac{D\omega_0(x_{stat} + S_{abs} - x_{stat,End})}{\omega_D}\right) \cdot sin(\omega_D t) + \\ (x_{stat} - x_{stat,End}) \cdot cos(\omega_D t) \end{bmatrix}$$
(4-10)

Für die Berechnung des dynamischen Lastfaktors wird bei der neu ermittelten Bewegungsgleichung das dynamische Maximum auch zum Zeitpunkt t = T/2 berechnet.

$$DLF(\omega, D) = \frac{C_1 - e^{-\frac{D\pi}{\sqrt{1 - D^2}}} \cdot C_3 - x_{stat}}{x_{stat, End} - x_{stat}}$$
(4-11)

mit  $C_1 = x_{stat,End}$  und  $C_3 = x_{stat} + S_{abs} - x_{stat,End}$  (4-12)

Der Term  $\frac{S_{abs}}{x_{stat,End}-x_{stat}}$  wird mit  $S_{rel}$  zusammengefasst und beschreibt den auftretenden Versatz relativ zum maximal möglichen Versatz. Somit ergibt sich folgende Gleichung für den DLF [Dib19]:

$$DLF(\omega, D) = 1 + e^{-\frac{\pi D}{\sqrt{1 - D^2}}} \cdot (1 - S_{rel})$$
(4-13)

Mit Gleichung (4-14) lässt sich ein Diagramm erstellen, mit dessen Hilfe sich der Versatz, in Abhängigkeit der Dämpfung und des DLF's, direkt ablesen lässt. Zunächst muss dafür eine Masterlinie erstellt werden, welche nur den Stoßfaktor infolge Dämpfung wiedergibt. Diese Masterkurve ist in Abbildung 4 14 abgebildet.



Abbildung 4-14: Dynamischer Lastfaktor infolge Dämpfung ohne Versatz Srel=0

Für verschiedene Versatzwerte kann die Kurve angepasst werden und man erhält folgendes Diagramm:





In der Baudynamik kommen in der Regel sehr kleine Dämpfungen vor. Der Maximalwert bei den durchgeführten Versuchen liegt bei 12%. Damit die Werte im Diagramm besser abgelesen oder eingetragen werden können, wird das Diagramm nur bis zu einer Dämpfung von 15 % dargestellt.

#### 4.3.6 Viskoelastisches Materialverhalten bei den Versuchen

Während der Versuche konnte auch das in Abschnitt 2.2.2 beschriebene, viskoelastische Materialverhalten der PVB-Folie gezeigt werden. Viskoelastizität zeichnet sich dadurch aus, dass bei schnellen Belastungen (also hohen Frequenzen) einen erheblich größeren Schubmodul zu besitzen als im statischen Lastfall. Der Effekt zeigt sich bei einem Vergleich

der Eigenfrequenzen und den Durchbiegungen der intakten, belasteten Scheiben. Tabelle 4-6 zeigt die Eigenfrequenzwerte und die statischen Durchbiegungen im belasteten Zustand.

W <sub>stat</sub> [mm]		f <sub>mL</sub> [Hz]		
PVB	SGP	PVB	SGP	
2x6 m	m TVG	2x6 m	m TVG	
-9,40	-3,51	9,20	9,44	
2x6 m	m ESG	2x6 m	nm ESG	
-15,81	-6,17	6,83	7,30	
2x10 n	nm TVG	2x10 mm TVG		
-7,04	-2,34	10,70	11,16	
2x10 n	nm ESG	2x10 n	nm ESG	
-7,80	-2,83	10,71	10,96	
4/6/4 n	4/6/4 mm TVG		nm TVG	
-26,05	-5,65	7,52	7,58	
4/6/4 mm E	4/6/4 mm ESG (332 kg)		ESG (332 kg)	
-21,22	-4,86	7,02	7,55	

Tabelle 4-6: Vergleich zwischen PVB und SGP im statischen und im schwingenden Zustand

Die Tabelle zeigt, dass die Ergebnisse der Eigenfrequenzen sehr ähnlich zueinander und unabhängig von der Folienart sind. Damit kann das in Abschnitt 2.2.2.2 beschriebene Verhalten von PVB-Folie unter einer dynamischen Belastung bestätigt werden. Bei der Betrachtung der statischen Durchbiegung, werden die Unterschiede etwas deutlicher. Hier zeigt sich, dass die SGP-Folie welche eine hohe Steifigkeit besitzt eine geringere Durchbiegung aufweist als die PVB-Folie. Hier werden die Unterschiede und somit das Materialverhalten unter statischer Belastung deutlich.

Die Durchbiegung bei PVB-Folie im belasteten, statischen Zustand dagegen ist deutlich größer als die Durchbiegung bei SGP-Folie. Bei SGP-Folie entspricht die Durchbiegung ungefähr derjenigen, welche sich bei einem monolithischen Querschnitt mit der gleichen Dicke ergeben würde. Die Durchbiegungen der VSG-Scheiben mit PVB-Folie dagegen können zum Vergleich mithilfe der Formel für  $W_{ges}(x_1)$  nach [Lan12] analytisch ermittelt werden.

# 4.3.7 Normalkräfte und Biegemomente im gebrochenen Träger

Das letzte Phänomen, welches im Rahmen der Vorversuche beschrieben wird, ist eine nach dem Bruch eingeprägte Durchbiegung im Träger. Diese wird in Abbildung 4-16 dargestellt.





Infolge des Bruchs kommt es zu einer Verlängerung der zerstörten Scheibe. Der Eigenspannungszustand (mit Druckspannungen an der Oberfläche und Zugspannungen im Inneren) der Glasscheibe geht beim Bruch verloren. Die Anzahl an Bruchstücken ist maßgeblich von der Höhe der Vorspannung abhängig. Die unterschiedlichen Bruchbilder für TVG und ESG (jeweils 2x6 mm und 2x10 mm) sind in Abbildung 4-17 dargestellt. Die für beide Glasarten typischen Bruchbilder sind in der Folgenden Abbildung gut zu erkennen. Natürlich ist hierbei zu sagen, dass das Bruchbild der TVG Scheibe feiner ausfällt als bei der Bruchbilduntersuchung nach DIN EN 1863 [EN1863], was auf eine die Überlagerung der Vorspannung und der eingebrachten Energie zurück zu führen ist.



Abbildung 4-17: Bruchbild von 2x6 mm ESG (oben, links), 2x6 mm TVG (oben, rechts), 2x10 mm ESG (unten, links), 2x10 mm TVG (unten, rechts)

Beim Bruch kommt es zu einer Stauchung der Bruchstücke an den Stellen, wo vorher Druckspannungen vorlagen und zu einer Ausdehnung der Bruchstücke, wo vorher Zugspannungen vorlagen. Die Bruchstücke bleiben an der Folie haften, verkanten sich jedoch und liegen deshalb nicht mehr exakt nebeneinander, sondern drücken nur an vereinzelten Kontaktflächen gegeneinander. Deshalb kommt es zu einer Verlängerung der gebrochenen Scheibe in Abhängigkeit von der Bruchstückanzahl. Eine schematische Darstellung dieses Effekts ist Abbildung 4-18 zu sehen.



Abbildung 4-18: Schematische Darstellung der eingeprägten Durchbiegung infolge des Bruch [Kot06] Die Gesamtverlängerung der Scheibe wird mit  $L_a$  bezeichnet, sodass die Dehnung mit

$$\varepsilon_{gv} = \frac{L_a}{L} \tag{4-15}$$

beschrieben werden kann [Kot06].

Es kommt zu einer Ausdehnung der Folie und der gebrochenen Scheibe, weshalb die verschobenen Bruchstücke an der Folie Zugspannungen verursachen. Diese Zugspannungen werden in die intakte Scheibe weitergeleitet. Um ein Kräftegleichgewicht herzustellen, werden an der Unterseite der intakten Scheibe Druckspannungen erzeugt, weshalb es zu einer Stauchung der Unterseite der intakten Scheibe kommt.

Mithilfe der an der Scheibe angebrachten DMS kann man das eingeprägte Moment sowie die eingeprägte Normalkraft nachrechnen. Dazu wird die allgemeine Spannungsformel

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} \tag{4-16}$$

verwendet. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, welche Höhe zur Berechnung des Widerstandsmoments verwendet wird. Setzt man für das Widerstandsmoment nur die Höhe

der intakten Glasscheibe an und berechnet das Moment nach Gleichung ((4-17) so wird man infolge M/W nicht exakt auf die gemessene Spannung kommen. Somit kann man entweder darauf schließen, dass eine zusätzliche Normalkraft in die intakte Scheibe eingeprägt wurde oder dass der Restquerschnitt größer ist als 6 mm. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Normalkraft Null ist und der Träger durch den Ausgleich von Druckspannungen und Zugspannungen nur auf Biegung belastet wird. Wird nach dem Moment aufgelöst und anschließend für  $\delta$  die eingeprägte Durchbiegung eingesetzt, so lautet die dazugehörige Formel:

$$M = \frac{48 \cdot EI\delta}{5 \cdot l^2} \tag{4-17}$$

Für das Flächenträgheitsmoment kann als Höhe 6 mm oder die ermittelte Ersatzhöhe eingesetzt und somit das eingeprägte Moment ermittelt werden, welches zu der vorhandenen Durchbiegung führt. Die ermittelte Ersatzhöhe muss aus dem gebrochenen, belasteten Zustand verwendet werden, da die Ersatzhöhe infolge der Druckkräfte zwischen den Bruchstücken im unbelasteten Zustand zwar größer ist, allerdings die eingeprägte Durchbiegung gerade durch diese Druckkräfte erzeugt und nur in die intakte Scheibe übertragen wird.

Abschließend ist jedoch zu sagen, dass die eingeprägte Krümmung der Scheibe nur im gebrochenen, unbelasteten Fall auftritt. Im belasteten Fall wird die untere, gebrochene Scheibe auf Zug beansprucht und kann keine Druckkräfte aufnehmen. Die Bruchstücke werden auseinander gezogen und es kommt zu keiner Durchbiegungserhöhung im gebrochenen, belasteten Zustand.

# 4.3.8 Zusammenfassung und Fazit

Für die Ermittlung der Stoß-, Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte wurden hier Untersuchungen an querbelasteten Probekörpern aus Verbundsicherheitsglas durchgeführt. Ziel war es in erster Linie ein Querschnittsausfall zu simulieren und anhand der angebrachten Messtechnik das Verhalten zu dokumentieren. Das entwickelte Konzept, die angebrachte Messtechnik und die Durchführung der Versuche führten zu den erwarteten Ergebnissen. Diese haben ebenfalls gezeigt, dass mit den durchgeführten Versuchen, alle notwendigen Parameter bestimmt werden konnten und so an den Knickversuchen angewendet werden können. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Stoßfaktoren in einem Bereich von  $\phi = 1,4 - 2,0$  lagen. Hierbei sollte zusätzlich gesagt werden, dass eine Abhängigkeit der Dämpfung und des beobachteten Versatzes (siehe Kapitel 4.3.5) einen Einfluss auf den Stoßfaktor haben.

# 4.4 Knickversuche bei Querschnittsausfall

## 4.4.1 Beschreibung

Für die statische Bemessung von längsbelasteten Stützen ohne den Ansatz einer dynamischen Zusatzbeanspruchung infolge Querschnittsausfall existieren in der Forschung, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, bereits einige Ansätze. Die Erkenntnisse über die effektiven Querschnittswerte und die kritischen Knicklasten unter Berücksichtigung einer Vorimperfektion wurden somit für die Ermittlung der Versuchsauflast verwendet.

Tritt eine Beschädigung eines Querschnitts bei einer Glasstütze ein, müssen dynamische Effekte infolge des Querschnittverlustes berücksichtigt werden. Die durchgeführten Versuche sollen dazu dienen die dynamischen Effekte in den im Vorfeld definierten Zuständen zu erfassen. Durch die in Kapitel 4.2.2 definierte Beschädigung wird ein plötzliches Querschnittsversagen simuliert.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zunächst 34 Probekörper in kleinmaßstäblichen (kKV) (Versuchsmatrix siehe Anhang D) und anschließend 36 Probekörper in großmaßstäblichen Knickversuchen (gKV) auf ihr dynamisches Tragverhalten untersucht. Geprüft wurden VSG-Scheiben mit unterschiedlichem Aufbau. Die Höhe und Breite der Glasstützen betrug bei den kKV 1000 x 250 mm<sup>2</sup> und bei den gKV 1800 x 250 mm<sup>2</sup>. Es wurden sowohl 2-fach-VSG-Scheiben, als auch 3-fach-VSG-Scheiben geprüft, wobei als Glasart ESG und TVG zum Einsatz kam. Als Zwischenschicht wurden jeweils PVB- und SGP-Folien verwendet. Zudem variierte der Querschnitt der Glasstützen indem unterschiedliche Scheibendicken gewählt wurden. Eine Übersicht aller großmaßstäblichen Probekörper ist in Tabelle 4.7 gegeben.

Querschnitt	Folienart	Kritische Last*	Auflast	Abweichung
[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[%]
	:	2-fach-VSG aus ESG	6	
6/6	PVB	08.0	100.4	10.6
6/6	SGP	98,0	120,4	18,6
10/10	PVB	452,0	466.7	3,1
10/10	SGP	445,0	400,7	4,6
		781,0		2,2
10/10	PVD	779,0	700 5	2,4
12/12	000	777,0	790,5	2,7
	SGP	783,0		1,9
	;	3-fach-VSG aus ESG	6	
		341,8	240.0	1,8
4/0/4	PVB	343,1	348,2	1,5
4/0/4	SCD	669,3	690.0	1,7
	SGP	668,6	080,9	1,8

Tabelle 4.7: Ü	bersicht der Probekörper
----------------	--------------------------

	PVB	748,0	763,1	2,0
6/8/6	600	1650,0	4057.0	0,5
	SGP	1642,0	1657,9	1,0
	:	2-fach-VSG aus TVG	3	
	D) (D	07.0		19,4
0.10	PVB	97,0	100.1	
6/6	0.05	98,0	120,4	18,6
	SGP	96,0		20,3
40/40	PVB	446,0	500.4	11,2
10/10	SGP	451,0	502,1	10,2
	PVB	777,0		9,4
10/10		763,0	857,5	11,0
12/12	000	773,0		9,9
	SGP	770,0		10,2
	:	3-fach-VSG aus TVG	6	
		342,3	070.0	7,7
4/0/4	PVB	311,0	370,9	16,1
4/6/4	800	651,0	762.0	14,7
	SGP	641,0	763,0	16,0
		743,0	022.0	10,9
6/9/6	PVB	743,0	833,9	10,9
0/0/0	800	1627,0	1657,9	1,9
	SGP	1653,0	1741,9	5,1

\*Kritische Knicklast infolge gemessener Imperfektion bestimmt

Die kritische Knicklast wurde mit Hilfe der analytischen Ansätze nach [Lan12] berechnet. Aus sicherheitsrelevanten und robustheitssteigernden Aspekten werden tragende Glasbauteile in der Regel so bemessen, dass die außenliegenden Glasscheiben lediglich als Schutzschichten dienen und nicht in die Bemessung der kritischen Knicklast N<sub>cr</sub> einfließen. Für die Versuche wurde die Glasscheibe, die durch einen definierten Anschlag beschädigt wird, als Schutzschicht betrachtet und der Restquerschnitt für die Berechnung von N<sub>cr</sub> berücksichtigt. Für eine 2-fach-VSG Scheibe wurde demnach die kritische Knicklast für einen Monoquerschnitt berechnet und für eine 3-fach-VSG Scheibe wurde die diese für einen 2-fach Verbundquerschnitt, unter Berücksichtigung des Schubmoduls für die jeweilige Folienart, bestimmt. Bei den zuvor durchgeführten kleinmaßstäblichen Knickversuchen hat sich gezeigt, dass diese wesentlich höhere Lasten aufnehmen konnten als die zuvor berechneten, weshalb bei den großmaßstäblichen Versuchen die Lasten vergrößert wurden, um den Stoßeffekt deutlicher ausbilden zu können. Insbesondere bei VSG-Scheiben mit TVG hat die gebrochene Schicht, aufgrund des geringen Querschnittsverlustes, sehr stark zur Lastabtragung beigetragen. Da die großmaßstäblichen Knickversuche jedoch eine höhere Schlankheit aufweisen, wurde die Last in den ersten Versuchen im Vergleich zur berechneten Knicklast nur gering erhöht, um zunächst das Verhalten zu beobachten. Da sich auch hier Reserven des Tragwiderstandes zeigten, wurden in den weiteren Versuchen höhere Lasten gewählt. Die Differenz von Knicklast zu gewählter Auflast können der Tabelle 4.7 entnommen werden.

Ziel des Versuchsaufbaus ist es, eine zentrische und reibungsfreie Lasteinleitung der Kopfmasse in die Glasscheibe sicherzustellen. Dazu wurden vier vertikal verschiebliche Linearführungen angeordnet. Vor dem Einbau der Scheibe wird die Kopfmasse mit einem Kran in den Versuchsstand gehoben und auf die vier Linearführungen abgelassen. Nachdem die Kopfmasse exakt ausgerichtet und in Waage gebracht wurde, konnte diese mit den Linearführungen verbunden werden. Damit es zu keiner Verkantung kommt, wurde eine nahezu gelenkige Lösung gewählt. Die Verbindung zwischen der Kopfmasse und den Gleitlagern sollte verhindern, dass die Kopfmasse sich verschiebt und dadurch eine unplanmäßige Zusatzbewegung macht. Über zuvor durchgeführte Lasteinleitungsversuche konnte bestätigt werden, dass durch die Nutzung der Gleitlager die Last komplett, ohne z.B. Reibverluste, in die Scheibe und so auch in das untere Lager eingeleitet wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.19 gegeben. In der Abbildung ist darüber hinaus auch die Position der Linearpotentiometer zur Messung der Kopfverschiebung sowie der seitlichen Verschiebung in Scheibenmitte, für die jeweiligen Zustände, zu beobachten.



Abbildung 4.19 Seitenansicht des Versuchsstands mit qualitativer Darstellung der seitlichen Auslenkung für den Zustand I (links ohne Wirkung der Kopfmasse), Zustand II (mitte, mit aufgebrachter Kopfmasse), Zustand III (rechts, nach Querschnittsausfall)

# 4.4.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessung

Im folgenden Kapitel werden exemplarisch die Ergebnisse der großmaßstäblichen Versuche beschrieben und ausgewertet. Die Auswertung der kleinmaßstäblichen Untersuchungen ist im Anhang aufgeführt. Es werden zunächst die Eigenfrequenzen und die Dämpfungen der Stützen untersucht und ein Zusammenhang zur Steifigkeit hergestellt. Dabei werden auch die dynamischen Durchbiegungen in diese Betrachtung mit einbezogen

Die Entwicklung der Eigenfrequenz für die fünf Zustände ist in den folgenden Diagrammen getrennt nach Scheibenaufbau und Glasart dargestellt. Dabei sind auf der Abszisse die fünf Zustände in denen die Eigenfrequenz ermittelt wurde und auf der Ordinate die jeweils gemittelte Eigenfrequenz abgebildet. Die dargestellten Kurven bilden die Entwicklung der Eigenfrequenz für die unterschiedlichen Versuchskörper ab. In Abbildung 4.20 sind die Verläufe der Versuchskörper mit 2-fach-Verbund getrennt nach der Glasart ESG und TVG gegeben. Analog dazu zeigt die Abbildung 4.21 die Frequenzen der 3-fach-VSG-Stützen getrennt nach der Glasart.



Abbildung 4.20: Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: ESG 2-fach-Verbund (links), TVG 2-fach-Verbund (rechts)



# Abbildung 4.21: Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: ESG 3-fach-Verbund (links), TVG 3-fach-Verbund (rechts)

Die Darstellungen zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Glasart. Während die Eigenfrequenz bei Stützen mit TVG-Verbundquerschnitten kaum eine Verringerung infolge des

Querschnittverlustes verzeichnet, ist bei Stützen mit ESG eine starke Reduzierung der Frequenz infolge des Bruchereignisses festzustellen. Nach dem Bruchereignis nimmt die Eigenfrequenz bei fast allen ESG-Scheiben wieder zu (vgl. Abbildung 4.20 links und Abbildung 4.21 links). Die einzige Ausnahme bilden hierbei die 3-fach-Verbundstützen mit dem Aufbau 4/6/4 ESG/PVB. Auffällig ist zudem, dass die Frequenzen der 2-fach ESG-Scheiben in den Bruchzuständen nahezu identisch sind. Dahingegen ist ein solch ausgeprägter deutlicher Trend bei den 3-fach-ESG-Scheiben nicht zu erkennen. Trotzdem ist auch hier ein Verlaufsmuster sichtbar, welches sich mit zunehmendem Querschnitt in einem höheren Frequenzbereich wiederholt. Hierbei bildet allein die Eigenfrequenz während des Bruchvorganges der 6/8/6 ESG/SGP-Scheibe einen Ausreißer. Zudem wird deutlich, dass die Verringerung der Eigenfrequenz bei Bruch der ESG-Stützen mit einem 3-fach-Verbundquerschnitt nicht so stark wie bei denen mit einem 2-fach-Verbund ausfällt.

Im Gegensatz zu den ESG-Stützen zeigen die TVG-Stützen einen deutlich konstanteren Verlauf der Eigenfrequenz über die fünf Zustände. Bei den 2-fach-TVG-Scheiben mit PVB ist die Frequenz aus dem Bruchereignis etwas niedriger als bei den Stützen mit entsprechendem Querschnitt und SGP Folie. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Scheiben 10/10 TVG/PVB und 6/8/6 TVG/PVB mit demselben Glasquerschnitt einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen.

Zur detaillierteren Untersuchung werden im Folgenden die einzelnen Zustände getrennt betrachtet.

**Zustand I:** Im ungebrochenen Zustand I, ist zu erkennen, dass die Eigenfrequenz mit zunehmenden Querschnitt, somit auch einer zunehmenden Steifigkeit, ansteigt. Außerdem ergeben sich bei der Eigenfrequenz keine Unterschiede aufgrund der Glasart. Ein Unterschied der Eigenfrequenzen lässt sich jedoch bezogen auf die Zwischenschicht erkennen. Bei den Stützen mit der, im Vergleich zur PVB-Folie, steiferen SGP-Folie nehmen die Frequenzen etwas höhere Werte an. Am deutlichsten zeigt sich dieser Trend bei den 3-fach-VSG-Scheiben mit einen 6/8/6 Querschnitt. Der Einfluss der Zwischenschicht ist aufgrund der zwei Zwischenschichten bei einem 3-fach-Verbund im Vergleich zu einer Zwischenschicht bei einem 2-fach Verbund größer.

In der Abbildung 4.22 sind zwei Diagramme zur Veranschaulichung der Eigenfrequenzen im ungebrochenen Zustand ohne Last gegeben. Auf der Abszisse sind die verschiedenen Stützenquerschnitte und auf der Ordinate die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen angeordnet. Außerdem wurde eine Unterteilung nach der Glasart und der Zwischenschicht vorgenommen.



Abbildung 4.22: Eigenfrequenzen ohne Last: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-Scheiben (rechts)

**Zustand II:** Das Materialverhalten der Zwischenschicht wird von den 3 Einflussfaktoren Temperatur, Belastungsdauer und Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst (vgl. Kapitel 2.2.2). Dieses Phänomen ist besonders bei der Betrachtung der resultierenden Durchbiegungen bei langsamer Lastaufbringung deutlich. Wirkt die Last statisch auf den Querschnitt, kommt es zu einem Kriechen der PVB-Folie und demzufolge zu einer größeren seitlichen Auslenkung (vgl. Kapitel 2.2.2.1). Bei der PVB-Folie ist der Effekt etwas deutlicher ausgeprägt, da diese im Gebrauchstemperaturbereich einen geringeren Schubmodul besitzt als die SGP-Folie. Generell weisen die Versuchskörper mit PVB Folie im Vergleich zu den baugleichen Versuchskörpern mit SGP-Folie eine höhere Verformung im statischen Lastzustand auf.

	ESG		TVG			
Aufbau	Imperfektion e₀	Wzustand II	Aufbau	Imperfektion e₀	WZustand II	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	
	0,40	0,32		0,90	0,48	
0/0 FVB	0,30	0,52	0/0 FVB	0,70	0,27	
6/6 SCD	0,60	0,18	6/6 SCD	0,10	0,46	
6/6 SGP	0,40	0,53	0/0 SGP	2,20	0,76	
	0,10	1,30	10/10 PVB	1,00	0,52	
10/10 PVB	2,00	0,34	10/10 SGP	0,30	0,39	
	0,20	0,07	40/40 DV/D	0,70	0,84	
12/12 PVB	0,40	0,16	12/12 PVB	2,40	0,96	
10/10 800	0,70	0,21	10/10 800	1,20	0,06	
12/12 SGP	0,00	0,29	12/12 SGP	1,50	0,39	
	0,90	3,53		0,40	2,41	
4/0/4 F V D	0,30	3,37	4/0/4 F V D	1,40	0,30	
4/6/4 SGP	0,50	0,50	4/6/4 SGP	1,90	2,59	

Tabelle 4.8:	Durchbiegungen der	Versuchskörper	infolge La	staufbringung
--------------	--------------------	----------------	------------	---------------

	0,60	1,28		2,90	3,97
	0,20	2,29		0,60	3,84
0/0/0 PVD	0,20	0,53	0/0/0 PVD	5/8/6 PVB 0,60	3,83
	0,10	0,19		0,70	0,64
0/0/0 SGP	0,50	1,07	0/0/0 SGP	0,00	0,78

Allerdings gibt es auch Ausnahmen, wie die 3-fach-Verbundstützen mit 4/6/4 TVG Querschnitt, hier sei gesagt, dass die höheren seitlichen Auslenkungen auf die erhöhte Masse zurück zu führen ist. Hier ist die gemittelte Durchbiegung der SGP-Stützen höher als bei den baugleichen PVB-Stützen. Ausreißer darstellt. Außerdem überstieg die Kopfmasse die berechnete kritische Auflast bei den beiden Versuchskörpern 4/6/4 TVG/SGP um im Durchschnitt von ca. 15%.

Wie im zuvor betrachteten Zustand I ist ein allgemeiner Trend in Abhängigkeit der Höhe des Querschnitts zu erkennen. Mit größer werdenden Querschnitt, steigt zudem die Höhe der Eigenfrequenz.



Abbildung 4.23: Eigenfrequenzen mit Last: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-Scheiben (rechts)

**Zustand III** (Bruchzeitpunkt): Die Schwingung in Zustand III wird, anders als in den anderen Zuständen, durch den schlagartigen Querschnittsverlust erzeugt. Während sich beim Versagen einer ESG-Scheibe aufgrund der hohen eingeprägten Energie kleine Bruchstücke bilden, resultiert bei TVG lediglich ein horizontaler Riss ausgehend vom Anschlagspunkt (Abbildung 4.24).

![](_page_62_Picture_1.jpeg)

Abbildung 4.24: Bruchbild ESG aus Versuch (links), Bruchbild TVG aus Versuch (rechts)

Das unterschiedliche Bruchverhalten von ESG und TVG zeigt sich auch bei der Betrachtung der Durchbiegung. Diese ist nach dem Bruchereignis bei den ESG Scheiben deutlich höher als bei den TVG Scheiben. Die Durchbiegungen vor Bruch  $w_{vor Bruch}$ , die maximale dynamische Durchbiegung  $w_{max dyn}$  und die Durchbiegung nach Abklingen der Schwingung  $w_{max dyn}$  können der Tabelle 4.9 entnommen werden.

	ES	G		TVG			
Aufbau	WZustand II	WZustand III	WZustand V	Aufbau	WZustand II	WZustand III	WZustand V
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
			2-fach	n-VSG			
6/6 D\/B	-0,32			6/6 D\/B	-0,48	-2,12	-1,34
0/0 P V B	-0,52	Bri	ich	0/0 P VB	-0,27	-2,02	-1,22
6/6 SCP	-0,18	Dit		6/6 SCP	-0,46	-1,59	-0,75
0/0 33F	-0,53			0/0 3GF	-0,76	-1,90	-1,03
10/10 PVB	-1,30	-38,44	-21,34	10/10 PVB	-0,52	-1,28	-0,95
10/10 SGP	-0,34	-48,59	-24,91	10/10 SGP	-0,39	-1,05	-0,79
12/12 D\/P	-0,07	-39,91	-20,61		-0,84	-1,47	-1,23
12/12 F VD	-0,16	-41,52	-21,48	12/12 F VD	-0,96	-1,87	-1,60
12/12 SCP	-0,21	-36,92	-19,24	12/12 SCP	-0,06	-0,56	-0,33
12/12 3GF	-0,29	-40,76	-20,52	12/12 3GF	-0,39	-1,01	-0,74
			3-fach	n-VSG			
	-3,54	-21,86	-14,67		-2,41	-3,04	-2,55
4/0/4 FVD	-3,38	-22,68	-15,17	4/0/4 FVD	-0,30	-0,47	-0,32
	-0,48	-20,06	-12,85		-2,59	-3,15	-2,61
4/0/4 SGP	-1,29	-21,96	-13,72	4/0/4 3GP	-3,97	-4,81	-4,23
	-2,29	-21,82	-14,09		-3,84	-4,42	-4,16
0/0/0 FVB	-0,53	-18,05	-10,82	0/0/0 F V B	-3,83	-4,28	-4,13
	-0,19	-20,86	-12,38		-0,64	-0,91	-0,68
0/0/0 SGP	-1,07	-27,90	-16,17	0/0/0 3GP	-0,78	-1,01	-0,79

Tabelle 4.9: Ermittelte Durchbiegungen der VSG-Stützen

Insgesamt zeigt sich, wie auch im Vorfeld vermutet und durch die Kennwertuntersuchungen bestätigt, dass die seitlichen Verschiebungen bei den Versuchskörpern aus ESG, aufgrund des höheren Querschnittsverlustes, größer ausfallen als bei TVG. Demzufolge ist bei den ESG-Scheiben auch eine Unterscheidung zwischen den 2fach und 3fach Laminaten zu beobachten gewesen.

Bei den TVG-Stützen steigt die Durchbiegung infolge des Bruchereignisses nur gering an. Der Riss, welcher sich vom Anschlagspunkt ausbildet, verläuft in den meisten Fällen durch den kompletten Querschnitt der zerstörten Glasschicht. Im Gegensatz zu den kleinen Bruchstücken bei ESG bleibt bei TVG die Steifigkeit des Gesamtquerschnitts nahezu erhalten, weil trotz des Risses ein großflächiger Verbund der Schichten erhalten bleibt. Die Durchbiegungen nach dem Bruchereignis nehmen bei den 2-fach-TVG-Scheiben im Schnitt um 0,398 mm und bei 3-fach-TVG-Scheiben um 0,139 mm zu. Dahingegen liegt der Anstieg bei ESG-Stützen bei 20,957 mm für einen 2-fach Verbund und bei 12,138 mm für einen 3-fach Verbund.

Im Zustand III, wurde wie in Kapitel 4.2.2 bereits beschrieben, die Eigenfrequenz anhand des Auschwingverhaltens bei Bruch bestimmt. Die ermittelten Eigenfrequenzen sind in Abbildung 4.25 dargestellt. Die tabellarische Darstellung der Frequenzen kann dem Anhang entnommen werden.

![](_page_63_Figure_4.jpeg)

Abbildung 4.25: Eigenfrequenzen bei Bruch: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-Scheiben (rechts)

Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich sehr deutlich, dass die Eigenfrequenzen der TVG-Scheiben nur knapp unter den Frequenzen im intakten Zustand liegen. Dies ist auf die geringe Beschädigung zurückzuführen und es zeigt sich, analog zur Durchbiegung, dass der Steifigkeitsverlust infolge des Risses sehr klein ist. Die Frequenzen der TVG-Stützen mit PVB als Zwischenschicht fallen größtenteils geringer aus, als die der Scheiben mit SGP Folie. Dies ist wiederum durch die höhere Steifigkeit der SGP-Folie zu begründen. Eine Ausnahme stellt hier die Stütze TVG mit SGP und einem 4/6/4 Querschnitt dar, auf welcher eine höhere Kopfmasse aufgebracht wurde. Jedoch verringerte sich die Frequenz bereits bei

Lastaufbringung stärker als bei vergleichbaren Stützen. Die Eigenfrequenzen in Zustand II und die Eigenfrequenzen aus Zustand III sind hingegen nahezu identisch, was, wie vorher beschrieben, auf den insgesamt geringen Querschnittsverlust zurück zu führen.

Beim Vergleich der beiden Glasarten ist deutlich, dass die Frequenzen der ESG-Scheiben erheblich kleiner als bei den TVG-Scheiben des gleichen Querschnittes ausfallen. Hier lässt sich ebenfalls ein Steifigkeitsverlust über die Eigenfrequenz erkennen. Zudem fallen die Eigenfrequenzen der ESG-Scheiben mit einem 2-fach Verbund im Vergleich zum intakten Zustand stärker ab, als es bei ESG-Scheiben mit einem 3-fach Verbund der Fall ist (vgl. Tabelle 4.10). Die Eigenfrequenz bei einem 2-fach Verbund fällt im Mittel um ca. 66% im Vergleich zum intakten Zustand ab. Bei einem 3-fach Verbund beträgt der prozentuale Abfall lediglich ca. 37%.

	2-fach-V	SG		3-fach-VSG			
Aufbau	f <sub>Zustand II</sub>	<b>f</b> Zustand III	Red. der EF	Aufbau	<b>f</b> Zustand II	<b>f</b> Zustand III	Red. der EF
[-]	[Hz]	[Hz]	[%]	[-]	[Hz]	[Hz]	[%]
10/10 ESG-PVB	16,37	5,91	63,90		10,91	7,48	31,44
10/10 ESG-SGP	16,38	5,54	66,18	4/0/4 ESG FVD	11,13	7,59	31,81
	18,21	6,25	65,68		10,51	6,76	35,68
12/12 E3G-FVB	18,54	5,84	68,50	4/0/4 E3G 3GF	10,17	6,56	35,50
12/12 ESC SCP	18,96	6,52	65,61		16,64	10,37	37,68
12/12 E3G-3GF	18,92	6,49	65,70	0/0/0 E3G FVB	15,72	11,26	28,37
					16,15	8,72	46,01
				0/0/0 E3G 3GP	15,81	7,52	52,44
Mittelwert			65,93				37,36

 Tabelle 4.10:
 Prozentuale Verringerung der Eigenfrequenz bei Bruch für ESG-Scheiben

# **Zustand IV:**

Die Eigenfrequenzen im gebrochenen Zustand mit Last, bleiben bei den Versuchskörpern aus TVG, analog zu den anderen Zuständen, nahezu unverändert. Insgesamt liegt hierbei eine durchschnittliche Abweichung der 2-fach sowie 3-fach Laminate von ca. 0,40Hz vor. Insgesamt lässt sich auch hier beobachten, dass die steifere SGP Folie auch eine höhere Gesamtsteifigkeit der Stütze zur Folge hat.

 Tabelle 4.11:
 Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand IV und Zustand III

	ESG		TVG			
Aufbau	fzustand III	fzustand IV	Aufbau	fzustand III	fzustand IV	
[-]	[Hz]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	
6/6 D\/R				8,64	8,85	
0/0 F V B	Bruch		0/0 F V B	8,74	8,91	
6/6 SGP			6/6 SGP	9,58	9,64	

				10,09	9,71
10/10 PVB	5,91	7,17	10/10 PVB	14,26	13,89
10/10 SGP	5,54	7,58	10/10 SGP	14,99	14,88
12/12 0\/P	6,25	9,15	12/12 0\/0	17,03	17,45
12/12 FVD	5,84	6,99	12/12 FVD	15,52	16,62
12/12 SGP	6,52	8,35	10/10 500	17,72	18,05
	6,49	7,89	12/12 SGP	17,46	17,58
	7,48	5,43	4/6/4 PVB	11,11	10,39
4/0/4 FVD	7,59	5,74		11,19	10,6
	6,76	7,17	AIGIA SCD	10,37	9,6
4/0/4 3GF	6,56	6,95	4/0/4 3GF	10,05	9,8
	10,37	10,6		14,36	14,59
6/8/6 PVB	11,26	10,94	0/0/0 FVD	14,53	15,44
	8,72	13,38		16,25	16,26
0/0/0 SGP	7,52	26,33*	0/0/0 SGP	16,95	16,67

\*: Kaum auswertbare Schwingung vorhanden. Wert unverhältnismäßig hoch. Wird bei Betrachtung nicht berücksichtigt

Bei den ESG-Stützen mit einem 2-fach-Verbund werden im Zustand IV (gebrochener Querschnitt mit Last) im Schnitt 1,75 Hz höhere Frequenzen als bei Bruch erreicht. Im Vergleich zu den großen maximalen dynamischen Durchbiegungen während des Bruchereignisses bleiben die seitlichen Auslenkungen im gebrochenen Lastzustand kleiner. Je kleiner die Durchbiegung der Stütze ist, umso größer ist auch der Kontakt zwischen den einzelnen Bruchstücken der ESG-Scheibe. Daraus resultiert, dass die Kontaktfläche der einzelnen Bruchstücke im gebrochenen Lastzustand im Vergleich zum Bruch wieder zunimmt. Bei den Stützen mit einem 2-fach-Verbund liegen die Frequenzen von Stützen mit SGP-Folie 3,3 % über den Frequenzen von Stützen mit PVB-Folie. Da kein großflächiger Verbund mehr vorhanden ist, hat die Zwischenschicht nur einen geringen Einfluss. Bei 3-fach-ESG Scheiben ist der Einfluss der Zwischenschicht mit 26 % deutlich ausgeprägter (vgl. Abbildung 4.26).

![](_page_65_Figure_4.jpeg)

![](_page_65_Figure_5.jpeg)

Eigenfrequenzen im gebrochenen Zustand mit Last: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-Scheiben (rechts)

# Zustand V:

Durch die Entlastung der Scheibe nimmt die Durchbiegung deutlich ab, siehe Tabelle 4.9 Die einzelnen Bruchstücke der gebrochenen Glasschicht werden bei ESG weiter verdichtet. Die Frequenz der 2-fach-VSG-Stützen aus ESG steigt im Vergleich zum gebrochenen Zustand mit Last im Schnitt um 3,13 Hz an und bei 3-fach-ESG-Stützen um 2,70 Hz an. Es zeigt sich, dass bei geringerer Durchbiegung und damit verbunden enger angeordneten Bruchstücken die Steifigkeit der Stütze wieder zunimmt.

2-	fach-VSG aus ES	SG	2-fach-VSG aus TVG			
Aufbau	<b>f</b> Zustand IV	fzustand V	Aufbau	fzustand IV	fZustand V	
[-]	[Hz]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	
				8,85	8,8	
0/0 PVD			0/0 F V D	8,91	9,36	
		BRUCH		9,64	10,17	
0/0 3GF			0/0 3GF	9,71	9,87	
10/10 PVB	7,17	10,22	10/10 PVB	13,89	14,21	
10/10 SGP	7,58	10,66	10/10 SGP	14,88	15,19	
	9,15	11,02		17,45	16,95	
12/12 PVD	6,99	10,91	12/12 PVD	16,62	16,88	
12/12 800	8,35	11,46	12/12 800	18,05	17,85	
12/12 3GP	7,89	11,58	12/12 SGP	17,58	17,71	

 Tabelle 4.12:
 Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand V und Zustand IV-1

 Tabelle 4.13:
 Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand V und Zustand IV-2

3-1	fach-VSG aus ES	SG	3-fach-VSG aus TVG			
Aufbau	fzustand IV	fzustand V	Aufbau	fzustand IV	fZustand V	
[-]	[Hz]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	
4/6/4 PVB	5,43	9,09		10,39	11,45	
	5,74	9,27	4/0/4 FVD	10,6	11,3	
AIGIA SCD	7,17	11,04	1/6/4 SCD	9,6	12,08	
4/0/4 3GF	6,95	10,71	4/0/4 3GF	9,8	12,04	
6/8/6 D\/R	10,6	12,38	6/8/6 D\/R	14,59	15,53	
0/0/0 F V B	10,94	13,01	0/0/0 F VB	15,44	16,15	
6/9/6 500	13,38	13,64		16,26	16,79	
0/0/0 SGP	26,33*	13,86	0/0/0 SGP	16,67	16,79	

\* kaum auswertbare Schwingung vorhanden

Deutlich ist ebenfalls zu erkennen, dass in Zustand V die Eigenfrequenzen tendenziell größer werden, verglichen mit Zustand IV. Insgesamt ist bei allen Probekörpern aus TVG zu beobachten, dass es zu keinen deutlichen Querschnittsverlust kommt. Das Bruchbild gestaltet sich maximal mit einem horizontal verlaufenden Riss, der sich teilweise nicht bis zum Rand

weiter fortbildet. Für die Eigenfrequenzmessungen in Zustand V heißt dies folglich, dass im Vergleich zu den unbelasteten intakten Stützen die Frequenz bei den 2-fach-VSG Probekörpern aus TVG im Schnitt lediglich 7 % abnahmen. Bei den 3-fach-Stützen betrug die Differenz sogar nur 2 %.

![](_page_67_Figure_2.jpeg)

Abbildung 4.27: Eigenfrequenzen im gebrochenen Zustand ohne Last: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-Scheiben (rechts)

Beim Vergleich der Eigenfrequenz im gebrochenen Zustand ohne Last (Zustand V) mit dem intakten Zustand ohne Vorbelastung (Zustand I) zeigt sich sehr deutlich, dass sich die Frequenzen der 2-fach-VSG-Stützen aus ESG am stark verringert haben. Die Differenz beträgt hier im Schnitt ca. 40 % der ursprünglichen Eigenfrequenz. Die Eigenfrequenz der 3-fach-Stützen aus ESG verringerte sich im Vergleich hingegen nur um 19 %.

2-fach-VSG aus ESG			2-fach-VSG aus TVG			
Aufbau	<b>f</b> Zustand I	<b>f</b> Zustand V	Aufbau	<b>f</b> Zustand I	fZustand V	
[-]	[Hz]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	
				9,99	8,8	
0/0 F V D	DDI		0/0 F V D	10,07	9,36	
				10,23	10,17	
0/0 SGP			0/0 SGP	10,3	9,87	
10/10 PVB	15,9	10,22	10/10 PVB	15,94	14,21	
10/10 SGP	16,15	10,66	10/10 SGP	15,94	15,19	
12/12 D\/P	19,2	11,02	12/12 0\/0	18,75	16,95	
12/12 PVB	19,13	10,91	12/12 FVD	19,05	16,88	
12/12 800	19,25	11,46	12/12 800	18,95	17,85	
12/12 3GP	19,37	11,58	12/12 3GP	19,32	17,71	

Tabelle 4.14: Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand I und Zustan	and V
--	-------

3-fach-VSG aus ESG		3-fach-VSG aus TVG			
Aufbau	fzustand I	fzustand V	Aufbau	<b>f</b> Zustand I	fzustand V
[-]	[Hz]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]
	11,76	9,09	4/6/4 PVB	11,76	11,45
4/0/4 FVD	11,75	9,27		12,08	11,3
AIGIA SCP	12,23	11,04	4/6/4 SGP	12,2	12,08
4/0/4 3GF	12,15	10,71		12,09	12,04
	16,55	12,38	6/8/6 PVB	16,5	15,53
0/0/0 PVD	16,44	13,01		16,39	16,15
6/8/6 SGP	17,27	13,64	6/8/6 SGP	16,79	16,79
	17,14	13,86		16,79	16,79

Tabelle 4.15: Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand I und Zustand V

#### 4.4.3 Ansatz zur Bestimmung der Steifigkeit

Wie bereits mehrfach erwähnt, können Ersatzsteifigkeiten über die ermittelten Eigenfrequenzen berechnet werden. Dies bietet wiederum die Möglichkeit, mit bekannten Randbedingungen, das Verhalten der Zwischenschicht bei dynamischer Belastung zu erfassen. Zur Ermittlung der Ersatzsteifigkeit wird zunächst die bekannte analytische Lösung der Eigenfrequenz vorgestellt.

$$\omega = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

$$\rightarrow f = \frac{\pi^2}{2\pi l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$
(4-18)

Die allgemeine gültige Gleichung zur Ermittlung der Eigenfrequenzen ist allerdings nicht ohne weiteres auf primär tragende Bauteile aus Glas, wie z.B. Stützen mit aufgebrachter Masse, anwendbar. Daher wird auf einen von [Col2017] hergeleiteten Ansatz zurückgegriffen. Für die Frequenz unter Berücksichtigung der Kopfmasse nach [Col2017] gilt:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{\pi^4 \cdot EI}{4 \cdot L^3}}{\frac{\mu \cdot L}{4} + \frac{M_{Kopf} \cdot \pi^4}{8 \cdot L^3} \omega_0^2}}$$
(4-19)

In einem weiteren Schritt kann dann anhand der ermittelten Trägheitsmomente aus der Frequenz, durch den Ansatz von [Lan12] auf die Schubsteifigkeit der Folie für den jeweiligen betrachteten Zustand zurückgeschlossen werden.

![](_page_69_Figure_1.jpeg)

Abbildung 4.28: Vergleich der Trägheitsmomente für die Zustände I und V (ohne Last)

![](_page_69_Figure_3.jpeg)

![](_page_69_Figure_4.jpeg)

Trägheitsmomente für den Zustand III (mit Last)

![](_page_69_Figure_6.jpeg)

Abbildung 4.30: Vergleich der Trägheitsmomente für die Zustände II und IV (mit Last)

# 4.4.4 Dynamischer Lastfaktor

Der dynamische Lastfaktor (DLF) stellt für die dynamische Bemessung von tragenden Glasbauteilen ein wichtiges Maß dar, um die plötzliche Überhöhung der umlagernden Belastung auf die Stütze abzubilden. Dabei bedeutet ein höherer Lastfaktor auch eine größere Belastung der Glasstütze im Falle eines Bruchs. Die dynamischen Lastfaktoren der geprüften Stützen wurden wie bereits beschrieben sowohl über die ausgegebene Informationen des angebrachten Linearpotentiometers, sowie über die applizierten Dehnungsmessstreifen, welche Informationen über die Oberflächenspannung geben, ermittelt. In einem nächsten Schritt konnten die Stoßfaktoren ebenfalls über die bei den Kennwertuntersuchungen bereits erwähnte Methode über die Dämpfung ermittelt werden.

# ESG:

Die Tabelle 4.16 gibt eine Übersicht über die einzelnen Stoßfaktoren der untersuchten Stützen aus ESG. Die Stoßfaktoren DLF<sub>w</sub> wurden über die seitliche Verschiebung in Stützenmitte bestimmt. Es zeigt sich zudem sehr deutlich, dass die Werte für die 2-fach-Stützen über denen der 3-fach-Stützen liegen. Es lässt sich eine steigende Tendenz mit zunehmendem Querschnitt erkennen. Die maximalen dynamischen Durchbiegungen der 2-fach-ESG-Stützen waren deutlich größer, als die der 3-fach-Stützen (vgl. Tabelle 4.9). Die Gesamtsteifigkeit verringerte sich infolge des Bruchereignisses drastisch. Dementsprechend ist es schlüssig, dass ein verhältnismäßig größerer Schaden einem höheren Lastfaktor entspricht.

ESG			
Querschnitt	Querschnitt Folie		DLFş
2-fach			
0/0	PVB	- Bruch	
0/0	SGP		
10/10	PVB	1,85	1,73
10/10	SGP	1,96	1,73
	D)/P	1,94	1,77
12/12	FVD	1,94	1,80
12/12	SGP	1,93	1,78
		2,00	1,78
3-fach			
A/C/A	PVB	1,65	1,76
		1,64	1,74
4/0/4	SGP	1,58	1,72
		1,66	1,73

Tabelle 4.16:	Dynamische Lastfaktoren der ESG-Stützen über den Weg, über die Spannung und über
die Dämpfung	

6/8/6	PVB	1,65	1,88
		1,70	1,88
	SGP	1,69	1,83
		1,78	1,67

Die dynamischen Lastfaktoren  $DLF_{\sigma}$ , welche über die Spannung ermitteltet wurden, nehmen höhere Werte an, als die  $DLF_{w}$  (vgl. Abbildung 4.31), da das Verhältnis der maximalen dynamischen Amplitude und im abgeklungenen Zustand größer als bei den Schwingungskurven der Durchbiegung ist.

![](_page_71_Figure_3.jpeg)

![](_page_71_Figure_4.jpeg)

Tabelle 4.17:Abhängigkeit des dynamischen Lastfaktors der Dämpfung von der Dicke des<br/>Restquerschnitts

Glasquerschnitt	Glasquerschnitt ohne zerstörte Schicht	
[mm]	[mm]	[-]
10/10	-/10	1,73
4/6/4	-/10	1,74
12/12	-/12	1,78
6/8/6	-/8/6	1,86

Die Dämpfung der ESG-Stützen scheint demnach von der Dicke des intakten Glasquerschnitts abhängig zu sein. Fraglich ist, ob der DLF der Dämpfung die dynamischen Stoßeffekte der Verbundglasstützen hinreichend berücksichtigt, da keine deutlichen Unterschiede zwischen einem 2-fach-Verbund und einem 3-fach-Verbund zu erkennen ist.
## TVG:

Anders als bei den Probekörpern aus ESG, welche einen starken Querschnittsverlust gezeigt haben, äußert sich das Bruchereignis bei den TVG-Stützen nur in einem sehr geringen Ausmaß. Die Abbildung 4.32 (links) zeigt exemplarisch die Schwingung einer Glasstütze aus TVG bei Bruch. Die maximalen seitlichen Verschiebungen bei Querschnittsausfall bewegen sich hierbei im zehntel Millimeterbereich. Auf der rechten Seite der Abbildung ist dieselbe Schwingung im Verhältnis zu der Schwingung einer 2-fach-ESG-Stütze mit dem gleichen Aufbau dargestellt.



# Abbildung 4.32: Schwingung bei Bruch einer TVG-Stütze am Beispiel 2-11-a (links), Vergleich der Schwingungen bei Bruch einer ESG- und einer TVG-Stütze mit ansonsten selben Querschnitt (rechts)

Hierbei wird deutlich, dass die Schwingungen grundsätzlich einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Allerdings nimmt die Schwingung der ESG-Stütze deutlich größere Amplituden an. Trotz der großen Abweichungen der Schwingungsamplituden weisen die dynamischen Lastfaktoren der beiden Glasarten nur geringe Unterschiede auf. Die dynamischen Lastfaktoren über DLF<sub>w</sub>, für die untersuchten Stützen aus TVG, nehmen bei den TVG-Stützen allerdings vermehrt sehr hohe Werte an.

Tabelle 4.18:Dynamische Lastfaktoren der TVG-Stützen über den Weg, über die Spannung und über<br/>die Dämpfung

TVG						
Querschnitt	Folie	DLFw	DLF <sub>ξ</sub>			
2-fach						
	PVB	-	1,66			
c /c		-	1,62			
0/0		-	1,64			
	SGP	-	1,74			
10/10	PVB	1,76	1,75			
10/10	SGP	-	1,81			

		1,63	1,64
12/12	PVD	1,42	1,69
12/12	SCD.	1,85	1,66
	206	1,76	1,70
	3-fa	ach	
	PVB	-	1,67
A/G/A		-	1,76
4/0/4	SGP	-	1,63
		-	1,57
	ם/ נס	1,81	1,69
	PVD	1,49	1,49
0/8/0	SCD	-	1,42
	PDC	-	1,58

Die hohen Werte resultieren aus der Berechnung des DLF unter Berücksichtigung der Zunahme der statischen Durchbiegung nach Gleichung (4-20). Bei TVG nimmt die statische Durchbiegung infolge des Bruchs jedoch kaum zu. Die Abbildung 4.33 zeigt exemplarisch die Schwingung infolge des Querschnittsausfalls und des resultierenden Bruchs am Beispiel des Versuchskörpers 6/8/6 TVG-SGP.



Abbildung 4.33: Schwingung im Bruchzustand des Versuchskörpers 3-6-b

Es wird deutlich, dass der Ausschlag in Richtung der seitlichen Auslenkung der Stütze kleiner ist als der entgegengesetzte Ausschlag. Der Ausschlag entgegengesetzt der Durchbiegung liegt im zehntel Millimeter Bereich und resultiert aus dem kurzzeitigen Aufprall des Pendelkörpers. Dieses Verhalten konnte bei allen Versuchskörpern aus TVG festgestellt werden. Durch den Bruch wächst die seitliche Verschiebung jedoch anschließend weiter an. Bei allen Stützen, bei denen dieses Verhalten auftritt, handelt es sich um 3-fach-TVG-Stützen. Anhand der Bruchbilder ist festzustellen, dass sich der Riss in diesen Fällen nahezu gar nicht ausbreitet. Die Beschädigung der Stützen ist so gering, dass sie sich nahezu nicht in dem Schwingungsverlauf wiederspiegelt.

Die gemessenen Spannungen oszillieren hierbei auch ohne dynamische Belastung, weshalb ein Mittelwert der oberen und unteren Amplituden zur Berechnung der statischen Werte genommen wurde (vgl. Abbildung 4.34).



Abbildung 4.34: Spannungsverlauf bei Bruch des Versuchskörpers 2-7-a

Ist die Differenz der Durchbiegungen w<sub>nach Bruch</sub> und w<sub>vor Bruch</sub> stärker ausgeprägt nimmt der dynamische Lastfaktor auch für die TVG-Stützen schlüssige Werte an. In diesen Fällen lassen sich starke Parallelen zwischen den DLF des Weges (DLF<sub>w</sub>) zu den DLF der Dämpfung (DLF<sub>ξ</sub>) erkennen (vgl. Tabelle 4.18, grün hinterlegte Werte). Es zeigt sich, dass die Bestimmung des dynamischen Lastfaktors über die Dämpfung demnach die sinnvollste Methode ist, da die Bestimmung nach den beiden anderen Methoden deutlichen Schwankungen unterliegt.

# 4.4.5 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurden zunächst die Ergebnisse der Frequenzmessungen, anschließend die daraus resultierende Ersatzsteifigkeit des geprüften Systems und des stoßartigen dynamischen Querschnittverlustes der 70 Versuchskörper vorgestellt. Es wurde ein Zusammenhang der ermittelten Eigenfrequenzen und der Biegesteifigkeit hergestellt. Eine Verringerung der Frequenz ist demnach mit einer Verringerung der Steifigkeit verbunden. Betrachtet man im intakten Zustand I die Eigenfrequenzen für die Stützen aus ESG und TVG sind diese annähernd gleich. Insgesamt zeigt sich hier ein leichter Einfluss der Zwischenschicht. Die Stützen mit der weicheren PVB-Folie erreichen geringfügig kleinere Eigenfrequenzen. Die seitliche Auslenkung der Stützen nimmt infolge der Lastaufbringung bei den Probekörpern mit PVB zu. Generell ist der Einfluss der Zwischenschicht bei den 3-fach-VSG-Stützen etwas stärker ausgeprägt. Im Bruchzustand hingegen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den ESG- und den TVG-Stützen. Entscheidend hierfür ist das unterschiedliche Bruchverhalten der Glasarten. Aufgrund des weiterhin großflächigen Verbundes nimmt die Steifigkeit der TVG-Stützen im Gegensatz zu den ESG-Stützen somit kaum ab. Außerdem führt der verhältnismäßig größere Restquerschnitt der 3-fach-VSG-Stützen bei ESG zu einer höheren Steifigkeit im Vergleich zu den 2-fach-Stützen mit gleicher Glasart. Infolge der Entlastung steigen sowohl die Eigenfrequenzen der ESG-, als auch der TVG-Stützen wieder an. Insgesamt ist der Steifigkeitsverlust im Vergleich zum intakten Zustand bei den ESG-Stützen sehr deutlich, während die Biegesteifigkeit der TVG-Stützen eher konstant bleibt.

Die dynamische Reaktion im Bruchzustand wurde anhand von Stoßfaktoren beschrieben. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die jeweiligen Versuchskörper kleinmaßstäblich sowie großmaßstäblich miteinander, so kann gesagt werden, dass sich die Ergebnisse im Großen und Ganzen wenig unterscheiden. Hier sei allerdings erwähnt, dass bei den kleinmaßstäblichen Versuchskörpern der Grad der Streuung größer war als bei den großmaßstäblichen Versuchen.

Die Lastfaktoren konnten aus den seitlichen Verschiebungen, resultierend aus dem Querschnittsausfall und den Dämpfungen aus den Abklingkurven ermittelt werden. Drei grundsätzliche Abhängigkeiten konnten hier abgeleitet werden. Bei den Lastfaktoren aus DLFw ist eine Verhältnismäßigkeit des Schädigungsausmaßes zu erkennen. Die Stoßfaktoren der 2fach-ESG-Stützen nehmen höhere Werte als die der 3-fach-ESG-Stützen an. Bei den DLF<sub>E</sub> kann dieser Effekt nicht beobachtet werden, jedoch zeigt sich hierbei eine Abhängigkeit von der Dicke des Restquerschnitts. Mit zunehmender Dicke des Restquerschnitts nehmen auch die Stoßfaktoren höhere Werte an. Bei den TVG-Stützen werden die Stoßfaktoren DLFw größtenteils stark verfälscht, eine zuverlässige Aussage über resultierende Stoßfaktoren kann nicht getroffen werden. Hier spielt besonders der nach Querschnittsausfall immer noch zu einem großen Teil vorhandene Restquerschnitt eine wichtige Rolle der keinen richtigen Stoßfaktor hervorbringt. Die Stoßreaktion die hier zu beobachten ist, ist vergleichbar mit einem Impuls, welcher aufgebracht wird um Eigenfrequenzen zu ermitteln. Betrachtet man stattdessen die ermittelten DLF's infolge Dämpfung, können zunächst gute bzw. nachvollziehbare Werte ermittelt werden. In diesem Zusammenhang sei allerdings gesagt, dass aufgrund der geringen Dämpfungen des Systems keine z.B. Materialabhängigkeiten etc. hergeleitet werden können.

# 4.5 Knickversuche mit seitlichem Impuls

## 4.5.1 Beschreibung

Um das dynamische Tragverhalten einer Verbundglasstütze mit aufgebrachter Kopfmasse bei Querschnittsausfall, welcher durch einen seitlichen Impuls hervorgerufen wird zu untersuchen, wurde an insgesamt 17 Probenkörpern ein modifizierter Pendelschlagversuch in Anlehnung an DIN EN 12600 [EN12600] durchgeführt. Abweichend von dem in der Norm vorgeschriebene Versuch wurde der Stoßkörper (Zwillingsreifen) mit einem Körner versehen, der sicherstellen sollte, dass die angeschlagene Glasscheibe unmittelbar vor dem Aufprall des Pendels versagt.

Die Versuche wurden an 2-fach- und 3-fach-Scheiben aus den Glasarten ESG und TVG durchgeführt. Alle Testköper besaßen die gleiche Höhe und Breite von 1800 mm × 250 mm, während die Scheibendicke variiert wurde. Zusätzlich wurden unterschiedliche Querschnitte mit unterschiedlichen Scheibendicken und Folienarten untersucht. Eine Übersicht über die untersuchten Probenkörper ist in der Tabelle 4-18 gegeben. Ziel war es, jeweils zwei Scheiben für jede mögliche Kombination aus Glasart, Folienart und Aufbau zu untersuchen.

Querschnitt	Glasart	Folienart	Auflast	Anzahl Probenkörper
[mm]	[-]	[-]	[kg]	[-]
10/10		PVB	455	1
10/10		SGP	455	1
8/12/8	ESG	PVB	1842	2
10/12/10		PVB	2238	2
10/12/10		SGP	2238	1
10/10		PVB	455	1
10/10		SGP	455	1
0/10/0	TVC	PVB	1842	2
0/12/0	IVG	SGP	2238	2
10/12/10		PVB	2238	2
10/12/10		SGP	2238	2

Tabelle 4.19:Übersicht der Probekörper

Die Kopfmasse für die 2-fach VSG Scheiben wurde über die kritische Knicklast, unter Berücksichtigung der geometrischen Imperfektion sowie der Glasdicke und Folienart, des nach dem Versagen einer Außenscheibe verbleibenden Restquerschnitts, wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, bestimmt. Genauso wie bei den Knickversuchen ohne seitlichen Impuls wurde im Verlauf der Untersuchungen deutlich, dass die tatsächliche Tragfähigkeit der Scheiben mit dem Ansatz der berechneten Kopfmasse nicht ausgenutzt wurde. Dennoch wurde für die 3-fach VSG Querschnitte eine geringere Masse als die eigentlich errechnete kritische Knicklast aufgebracht. Da hier der seitlich wirkenden Impuls mit Querschnittsausfall zu einer erhöhten Belastung geführt hat und dieser Fall in Kombination mit einer statisch wirkenden Kopfmasse bislang noch nicht grundlegend untersucht wurde.

Zur Vorbereitung wurden die untersuchten Scheiben im Vorfeld wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben vermessen und die Ergebnisse für jede Scheibe in einem Versuchsprotokoll festgehalten. Zu den gemessenen Werten gehörte die tatsächliche Scheibendicke sowie die Höhe und Breite des Versuchskörper, welche an mehreren Stellen an der Scheibe gemessen wurde. Zudem wurde der Versatz der Einzelscheiben gegeneinander in der Mittelachse an beiden Enden vermessen.

Der Aufbau dieser Versuchsart wurde genauso gewählt wie der in Kapitel 4.4 beschrieben ist. Wesentlicher Unterschied hier, war das Anbringen eines Stoßkörpers zu Einleitung eines seitlichen Impulses der einen Querschnittsausfall zur Folge hat. Der zur Durchführung des Versuches benutzte Stoßkörper war ein in DIN EN 12600 beschriebener Doppelreifen-Pendel mit einer Masse von 50 kg. Dieses wurde durch die Befestigung eines über den Rand des Pendels hinausragenden Körners zwischen den beiden Reifen modifiziert, dessen Auftreffen unmittelbar vor der Hauptmasse des Stoßkörpers ein Versagen der äußeren Glasschicht sicherstellte. Das Pendel wurde aus einer Höhe von 1,3m bis 1,6m über dem Boden gegen den Versuchskörper gependelt, was eine Fallhöhe oberhalb der Auftreffstelle in Scheibenmitte von zwischen 450 und 700 mm ergibt, entsprechend den Grenzen der Kategorien B und C nach DIN 18008-4.



Abbildung 4-35: Pendelschlagversuch mit angebrachten Körner, links Prinzipskizze, mitte Versuchsstand

4.5.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessungen

Bei der Ermittlung wurde der dynamischen Kennwerte wurde wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben vorgegangen. Auch hier wurden die Eigenfrequenzen für die Zustände I – V ermittelt. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Ergebnisse der Wegmessungen an den 8/12/8 TVG-PVB und 8/12/8 ESG-PVB. Beide hier im Detail betrachteten Scheiben sind gleich aufgebaut und unterscheiden sich lediglich durch die verwendete Glasart und der gemessenen Imperfektion.



Abbildung 4-36: Ausschwingverhalten für die Zustände I (links) und II (rechts)



Abbildung 4-37: Ausschwingverhalten für den Zustände III mit seitlichem Impuls



#### Abbildung 4-38: Ausschwingverhalten für die Zustände IV (links) und V (rechts)

Die Zustände I und II (intakter Zustand) weisen für beide Scheiben weitgehend gleiche Reaktionen auf. Die Ergebnisse aus den vorherigen Versuchen werden hiermit also bestätigt. Im Bruchzustand (Zustand III) fällt zunächst die durch die Impulskraft hervorgerufene große, aber kurzzeitige Auslenkung auf, die anschließend abklingt. Auch hier wird deutlich, dass bei ESG eine am Ende der Schwingbewegung vorhandene Endauslenkung aufgrund der feineren Bruchstücke weshalb eine geringere Reststeifigkeit beobachtet werden konnte. Im letzten Zustand fällt schließlich auf, dass die durch den Pendelschlag in höherem Maße geschwächte ESG-Scheibe nach Ablassen der Kopflast weitaus kleinere Frequenzen aufweist.





## Abbildung 4-39. Bruchbilder, links ESG imd rechts TVG

Die bereits an den Diagrammen erkennbare unterschiedliche Reaktion der Glasarten nach dem Versagen einer Scheibe tritt bei der Betrachtung der auftretenden Bruchbilder noch deutlicher hervor. In dem beschädigten Querschnitt einer Stütze aus TVG ist durch den zusätzlich Aufprall des Pendelkörpers eine größere Bruchfläche zu erkennen, was auf die Aufprallenergie des Pendelkörper zurück zu führe ist. Im Gegensatz dazu zerspringt die abgebildete ESG-Scheibe infolge des Aufpralls auf voller Höhe in kleine Bruchstücke (wie für ESG typisch).

Im Folgenden sind in den Tabelle 4-20 und Tabelle 4-21 zunächst die aus den Versuchsergebnissen ermittelten Eigenfrequenzen der untersuchten Glasscheiben aufgeführt. Anschließend fassen die Tabelle 4-22 und Tabelle 4-23 die im Verlauf der Versuche beobachteten seitlichen Verschiebungen zusammen. Die Abbildung 4-40 und Abbildung 4-41 zeigen an drei Bespielen den Verlauf der Eigenfrequenzen für die einzelnen Zustände.



#### Abbildung 4-40. Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: ESG mit PVB

Aufbau	fZustand I	fzustand II	fzustand III	<b>f</b> Zustand IV	fzustand V
[mm]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
10/10 PVB	15,70	15,19	4,32	5,01	9,14
10/10 SGP	16,12	15,40	4,71	5,88	10,27
9/12/9 D\/R	21,83	20,71	14,90	13,58	16,50
8/12/8 PVB	21,63	21,24	15,07	14,35	16,79
	24,75	24,38	17,19	16,98	18,47
10/12/10 PVB	24,77	24,25	16,57	16,86	18,40
10/12/10 SGP	25,54	25,41	17,86	18,34	19,76

Tabelle 4-20: Ermittelte Eigenfrequenzen der ESG-Scheiben



Abbildung 4-41. Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: TVG mit PVB

Aufbau	fzstd I	fzstd II	fzstd III	fzstd IV	fzstd v
[mm]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
10/10 PVB	15,90	15,29	5,59	7,21	8,70
10/10 SGP	16,01	15,35	12,31	13,16	14,00
	22,24	21,15	18,33	18,40	18,83
0/12/0 FVD	21,43	21,17	18,61	19,00	19,92
	25,54	24,89	18,93	17,49	17,47
10/12/10 PVB	25,02	24,64	23,76	23,43	22,57
9/10/9 800	22,22	21,08	17,91	17,48	18,26
0/12/0 3GP	22,44	20,99	17,40	18,55	19,60
10/12/10 800	25,54	25,57	22,02	22,37	23,20
10/12/10 SGP	25,82	25,56	20,41	19,46	19,92

Tabelle 4-21: Ermittelte Eigenfrequenzen der TVG-Scheiben

#### Tabelle 4-22: Beobachtete Auslenkungen der ESG-Scheiben

Aufbau	Imperfektion e₀	WZustand II	WZustand III	WZustand IV	WZustand V
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10/10 PVB	-0,60	-0,09	39,84	-32,22	-18,35
10/10 SGP	-1,50	-0,46	46,84	-29,08	-17,92
9/12/9 D\/P	-0,40	-2,26	58,37	-14,25	-7,93
8/12/8 PVB	-0,60	-1,40	21,80	-12,18	-7,11
	-0,40	-0,22	21,93	-7,15	-5,89
10/12/10 PVB	-0,20	-0,62	27,40	-7,79	-6,92
10/12/10 SGP	-0,40	-0,53	48,55	-5,42	-4,80

#### Tabelle 4-23: Beobachtete Auslenkungen der TVG-Scheiben

Aufbau	Imperfektion e₀	WZustand II	WZustand III	WZustand IV	WZustand V
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
10/10 PVB	-0,80	-0,78	47,06	-29,94	-32,95
10/10 SGP	-0,20	-0,49	50,08	-2,54	-1,43
8/12/8 PVB	-0,60	-0,38	26,99	-1,62	-1,40
	-0,60	-0,95	18,00	-2,41	-1,70
10/12/10 DVP	-2,00	-1,82	37,83	-0,25	1,11
10/12/10 FVB	-0,80	-0,94	25,16	-1,53	-1,29
9/12/9 SCD	-0,05	-0,30	62,60	2,01	2,44
0/12/0 3GF	-0,60	-0,41	55,45	-1,98	-1,60
10/12/10 500	-1,90	-0,95	20,69	-1,48	-0,89
10/12/10 SGP	-2,70	-0,78	36,79	1,99	2,59

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu beachten, dass aufgrund der Einbaurichtung der Glasscheiben die vorhandene Imperfektion und die durch die Auflast verursachten Auslenkungen in die entgegengesetzte Richtung der Aufprallbewegung des Pendelkörpers weisen. Im Allgemeinen zeigen die beobachteten Auslenkungsverläufe jedoch das zu erwartende Verhalten: Das Aufbringen einer Kopfmasse erzeugt eine Auslenkung in Richtung der Vorimperfektion, und der Pendelstoß ruft eine kurzzeitige, hohe Auslenkung auf als die intakten, die sich nach dem Ablassen der Last wieder reduziert. Es hat sich zudem gezeigt, dass die angestoßene Scheibe zunächst, wie gewünscht, durch die Berührung des Körners beschädigt wurde und der Stoßkörper anschließend auf den beschädigten Querschnitt aufgetroffen ist. Aufgrund des Einsatzes einer Hochgeschwindigkeitskamera konnte dieses Phänomen beobachtet werden.

## 4.5.3 Bestimmung der Steifigkeit

Wie in den Untersuchungen zuvor vorgestellt wird auch hier die Kenntnis über die Eigenfrequenzen genutzt um auf die Ersatzsteifigkeit für die jeweiligen Zustände zurück zu schließen. Das effektive Trägheitsmoment kann über die Schlupfdifferentialgleichung nach [Lan12] und die Formel zur Bestimmung der Knicklänge einer Stütze auch aus den Vorimperfektionen und den beobachteten Verformungen bestimmt werden. Umgestellt auf das Flächenträgheitsmoment erhält man:

$$I_{eff,w} = \frac{L^2}{\pi^2 E} \cdot \frac{N}{1 - \frac{e_0}{w}}$$
(4-21)

Dadurch, dass dieses Verfahren maßgeblich von der seitlichen Verschiebung ist, kann das Flächenträgheitsmoment lediglich für die Zustände II – V berechnet werden. Die seitliche Verschiebung setzt nämlich dann ein, wenn die Kopfmasse aufgebracht wird. Natürlich ist in diesem Zusammenhang zu sagen, dass in Zustand V keine Kopfmasse aufgebracht ist, eine seitliche Verschiebung ist hier dennoch vorhanden, da aufgrund der Bruchstücke eine seitliche Verschiebung einprägt (siehe Kapitel 4.3.7).

Somit können auf der Grundlage des Scheibenaufbaus und der Versuchsergebnisse für jeden betrachteten Versuchskörper zwei effektive Werte  $I_{eff,f}$  und  $I_{eff,w}$  für das Trägheitsmoment ermittelt werden. Im Folgenden werden die Trägheitsmomente für die Zustände II und IV dargestellt. Die Werte sind nach  $I_{eff,f}$  der Größe aufsteigend geordnet.



Abbildung 4-42: Steifigkeiten im Zustand II ("mit Last")



## Abbildung 4-43: Steifigkeiten im Zustand IV ("mit Last, gebrochen")

Grundsätzlich ist bei der Berechnung der Trägheitsmomente deutlich zu erkennen, dass auch hier eine Querschnittsabhängigkeit vorhanden ist. Hier kommt noch ein allgemeiner Vergleich der Zustände von  $I_{eff,f}$  zu  $I_{eff,w}$ . Ordnet man die Werte nach den ermittelten  $I_{eff,w}$  Werten, so wird deutlich, dass sich kein genauer Verlauf in Abhängigkeit des Querschnitts ausbildet, eine grundsätzliche Abhängigkeit zu anderen Eigenschaften ist hier ebenfalls nicht zu erkennen. Besonders im gebrochenen Zustand IV, wäre eine Abhängigkeit in Folge des Querschnittsverlustes, somit eine Reduzierung der Steifigkeit, sichtbar.

#### 4.5.4 Analytische Beschreibung des aufgebrachten Impulses

Auf der Grundlage der in Kapitel 2 beschriebenen Gleichungen wurden die Ergebnisse der Versuche anschließend herangezogen, um das Schwingverhalten der Probenkörper analytisch zu beschreiben. Eine aus den angestellten Beobachtungen abgeleitete Bewegungsgleichung sollte es idealerweise ermöglichen, das Verhalten einer gegebenen Verbundglasstütze unter den Versuchsbedingungen exakt vorherzusagen. Grundsätzlich gibt es in der Baudynamik mehrere Ansätze einen plötzlich auftreffenden Stoß zu beschreiben und zu untersuchen. Im Folgenden werden fünf Ansätze untersucht, welche den auftreffenden seitlichen Impuls beschreiben.

Als erster Ansatz wurde die Anregung des idealisierten Systems durch eine plötzlich auftretende Stoßkraft untersucht. Nach [Pet96] ergibt sich die Einflussfunktion eines Einheitsimpulses I = 1 auf ein gedämpftes System aus der Dämpfung D, der Federkonstante k und der Eigenkreisfrequenz  $\omega$ . Der Einheitsimpuls ist ein Impuls der Dauer t = 0 und der Intensität unendlich, mit dem Produkt aus Dauer und Intensität gleich eins. Da der beim Pendelschlagversuch auftretende Impuls bekannt ist, kann die Einflussfunktion mit dem Betrag des Versuchswertes multipliziert werden, um die Funktion der Verformung zu erhalten.

Allerdings ist der reale Impuls nicht durch eine Anregung der Dauer t = 0 darstellbar, sondern weist eine Stoßdauer auf. Für eine zeitlich veränderliche Stoßkraft gibt [Pet96] den Verlauf der Auslenkung mit

$$y = \frac{\omega}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - D^2}} \cdot \int_{\tau=0}^{\tau=t} F(\tau) \cdot e^{-D\omega(t - \tau)} \cdot \sin\left(\sqrt{1 - D^2} \cdot \omega(t - \tau)\right) d\tau$$
(4-22)

an. Das Integral kann anschließend wie folgt numerisch ausgewertet werden:

$$\frac{y_i}{y_{st}} = \frac{2\pi\alpha\beta}{\sqrt{1-D^2}} \cdot \sum_{j=1}^{j=i} f_j \cdot e^{-D \cdot 2\pi\alpha\beta(i-j)} \cdot \sin\left(2\pi\alpha\beta\sqrt{(1-D^2(i-j))}\right)$$
(4-23)

$$(i=1, 2, \cdots n)$$

Die Auslenkung des Pendels zum betrachteten Zeitpunkt wird normiert auf die maximale statische Auslenkung. Zudem treten in der Gleichung die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  auf, die das Verhältnis des betrachteten Zeitschritts  $\Delta t$ , der Stoßdauer  $T_F$  und der Periode T des Einmassenschwingers beschreiben. Folglich sind ergänzend zum ersten Ansatz einer Anregung der Dauer t = 0 noch die Stoßdauer und der Kraftverlauf zu bestimmen sowie ein Zeitschritt festzulegen. Im Rahmen diese Forschungsvorhabens wurden vier verschiedene

Kraftverläufe betrachtet: Ein rechteckförmiger Verlauf, ein stetig abnehmender Dreiecksverlauf, ein zweiter Dreiecksverlauf mit einem Kraftmaximum in der Stoßmitte und ein sinusförmiger Verlauf. Zur Bestimmung dieser Verläufe soll vorausgesetzt werden, dass der eingebrachte Impuls bekannt ist. Bei konstanter Masse des Pendels (als bekannt vorausgesetzt) kann davon ausgegangen werden, dass die Änderung des Impulses über die Stoßdauer als das Integral der Kraft dargestellt werden kann.

$$\int_{t=0}^{t=T_F} F(t)dt = m(v_{T_F} - v_0)$$
(4-24)

Die Pendelgeschwindigkeit  $v_0$  zu Stoßbeginn ergibt sich aus dem Energiegleichgewicht am Pendel, während die Geschwindigkeit gegen Stoßende zu null angenommen wird. Somit ergeben sich die gesuchten Kraftverläufe und -werte aus der Geometrie der untersuchten Stoßarten.



#### Abbildung 4-44: Untersuchte Stoßverläufe [Pet96] [Mül78]

Die Stoßdauer T<sub>F</sub> wird zunächst aus den durchgeführten Versuchen als die Zeitdifferenz zwischen dem Stoßbeginn und dem Zeitpunkt der maximalen Auslenkung bestimmt.

$$T_F = t(y = y_{max}) - t(y = y_{stat})$$
(4-25)

Als Durchschnittswert für  $T_F$  ergibt sich bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse eine Stoßdauer von 0,04 s. Die beobachtete geringe Abweichung und die sehr kurze Stoßdauer legen den Schluss nahe, dass ein Wert von ungefähr 0,04 Sekunden für die Stoßdauer generell als gute Schätzung für die hier durchgeführten Pendelschlagversuche betrachtet werden kann. Um eine hinreichend genaue Darstellung auch des Stoßvorganges zu erlauben, wurde das Zeitintervall  $\Delta t$  bei den hier durchgeführten Betrachtungen zu  $T_F/40$  definiert. [Pet96] empfiehlt die Wahl des Zeitschritts so, dass  $\Delta t < T$  gilt. Diese Bedingung wird mit dem so definierten Intervall in allen untersuchten Fällen eingehalten.

Zu beachten ist hier, dass die ermittelten Formeln das Verhalten des Probenkörpers unter einer Anregung beschreiben. Da diese jedoch nicht fortbesteht, muss der gesamte Schwingvorgang notwendigerweise durch zwei unterschiedliche Ansätze beschrieben werden. Zunächst wird der Einfluss des Pendelschlags auf den idealisierten Einmassenschwinger durch die gerade ermittelten Gleichungen dargestellt und anschließend, nachdem der Stoßvorgang beendet ist, kombiniert mit der Bewegungsgleichung welche die einfache gedämpfte Schwingung beschreibt.

Beim Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Ansatzfunktion aus Rechteck- und Dreiecksverläufen zeigt, dass diese Ansätze nicht verwendet werden konnten, da diese den Impuls überschätz darstellen. Im Vergleich liefert der Ansatz des Sinusverlaufs einen theoretischen Wert für die maximale Auslenkung, der gut mit den Versuchsbeobachtungen übereinstimmt.

Auch der Ansatz der Sinusfunktion oder eines Einheitsimpulses sind jedoch zur Modellierung des Versuches nicht ohne weitere Modifizierungen anwendbar, wie bei der Betrachtung der folgenden Darstellungen deutlich wird.



Abbildung 4-45: Theoretische Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB bei Ansatz eines Einheitsimpulses



Abbildung 4-46: Theoretische Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB bei Ansatz eines Sinusstoßes



Abbildung 4-47: Beobachtete Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB

Es wird deutlich sichtbar, dass keiner der hier betrachteten Ansätze das Schwingverhalten der Glasstütze realitätsnah wiedergibt. Während der theoretische Einmassenschwinger in dem verfolgten Modell von der Stelle der maximalen Auslenkung aus die unbeeinflusste, gedämpfte Schwingung beginnt, fällt die Auslenkungskurve tatsächlich nach dem Stoß deutlich weiter ab und die Schwingungen weisen eine wesentlich geringere Amplitude auf. Dies ist durchaus sinnig, da der bisher verfolgte theoretische Ansatz davon ausgeht, dass die eingebrachte Impulsenergie vollständig in den Schwinger eingebracht wird. Tatsächlich bricht aber eine der Glasscheiben, die Energie wird also nicht komplett in die hier simulierte Bewegung umgesetzt. Der bisher verfolgte Ansatz ist daher unzureichend.

Als weiterer Ansatz bietet sich die Betrachtung eines Einmassenschwingers an, der nicht durch eine Kraft, sondern durch eine Basisauslenkung zur Schwingung angeregt wird. Die maximale während des Stoßvorgangs erreichte Auslenkung kann nicht nur im Versuch beobachtet, sondern wie bei der Kontrolle der Impulsenergie geschehen auch mittels der Steifigkeit der Scheibe über den Energieerhaltungssatz abgeschätzt werden. Da die Dauer des Stoßes oben bereits ermittelt wurde, ist es möglich, den Auslenkungsverlauf eines Probenkörpers während des Stoßvorgangs anzunähern. Zur Modellierung des etwa in Abbildung 2-11 erkennbaren Verlaufes bieten sich zwei Modelle an: Ein linearer Ansatz, der die Auslenkung als Dreieck ähnlich der dritten beim Ansatz über die Kraft genutzten Verlaufes

darstellt, und eine Modellierung als Sinuskurve. Nach Ende des so darzustellenden Stoßvorgangs dienen die Ergebnisse für Auslenkung und Geschwindigkeit wiederum als Eingangswerte für die Gleichung der gedämpften Schwingung, die das weitere Verhalten der Scheibe darstellt.

Für den ersten Ansatz ist eine weitere Gleichung aus [Pet96] anwendbar, die den Auslenkungsverlauf in Abhängigkeit des abschnittsweise linearen Verlaufs der Basisverschiebung stellt.



Abbildung 4-48: Ansatz einer abschnittsweise linearen Fußpunktverschiebung

$$y = e^{-D\omega t} \left( A \sin\left(\sqrt{1 - D^2}\omega t\right) + B \cos\left(\sqrt{1 - D^2}\omega t\right) \right) + y_{F,i-1} + pt$$
(4-26)

Dabei ist  $y_{F,i-1}$  der Wert zu Beginn des jeweils betrachteten Abschnitts und p der abschnittsweise Wert der Geradensteigung. In diesem Fall sind zur Beschreibung des Anregungsverlaufes lediglich zwei Abschnitte vonnöten, ein ansteigender und ein absteigender. Im Anschluss ändert sich die vorgegebene Auslenkung nicht mehr und es kommt zu einem freien Abklingverhalten des Probekörpers. Die benötigten Kennwerte können zunächst aus den durchgeführten Versuchen abgelesen werden. Benötigt werden die Auslenkung zu Beginn des Stoßvorgangs, die maximale Auslenkung und die Auslenkung zu Ende des Stoßes sowie die zugehörigen Zeiten. Mit diesen Werten ist es möglich, eine lineare Annäherung des Pendelschlages zu erstellen und die obige Formel darauf anzuwenden. Es ergibt sich

$$p_1 = \frac{y_{max} - y_0}{t(y_{max}) - t(y_0)} \tag{4-27}$$

$$p_2 = \frac{y_{End} - y_{max}}{t(y_{End}) - t(y_{max})}$$
(4-28)

Als Alternative wird eine sinusförmige Fußpunktverschiebung vorgegeben, die nach dem gleichen Prinzip wie () in Abhängigkeit von der Auslenkung gesetzt werden kann.

$$y = \omega \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - D^2}} \cdot \int_{\tau=0}^{\tau=t} y_F(\tau) \cdot e^{-D\omega(t - \tau)} \cdot \sin\left(\sqrt{1 - D^2} \cdot \omega(t - \tau)\right) d\tau$$
(4-29)

Auch diese Formel kann numerisch ausgewertet werden:

$$y_{i} = \frac{2\pi\alpha\beta}{\sqrt{1-D^{2}}} \cdot \sum_{j=1}^{j=i} y_{Fj} \cdot e^{-D \cdot 2\pi\alpha\beta(i-j)} \cdot \sin\left(2\pi\alpha\beta\sqrt{(1-D^{2}(i-j))}\right)$$

$$(i = 1, 2, \dots n)$$
(4-30)

Auch die Formel für diesen Verlauf ergibt sich aus den begrenzenden Werten des Stoßverlaufes, sodass das Maximum der Fußpunktauslenkung der maximalen beobachteten Verschiebung im Zuge des Stoßvorgangs entspricht. Dementsprechend ist

$$y_F(t) = sin\left(\frac{\pi t}{2T_F}\right) \cdot (y_{max} - y_0) + y_0$$
 (4-31)

Zur Bestimmung des Endes des Stoßvorgangs greifen wir hier auf die Tatsache zurück, dass der freie Ausschwingvorgang der Scheibe um die Endauslenkung herum erfolgt. Die Sinuskurve wird also soweit weitergedacht, bis sie den Wert der endgültigen beobachteten Scheibenauslenkung erreicht, und von diesem Augenblick wird die aktuelle Geschwindigkeit wieder in die Formel der gedämpften Schwingung eingesetzt. Über die Bedingung

$$y_{End} = \sin\left(\frac{\pi t_{End}}{2T_F}\right) \cdot (y_{Stoß} - y_0) + y_0 \tag{4-32}$$

Ergibt sich

$$t_{End} = \left(\cos^{-1}\left(\frac{y_{End} - y_0}{y_{max} - y_0}\right) + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{2T_F}{\pi}$$
(4-33)



Abbildung 4-49: Theoretische Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB bei Ansatz einer sinusförmigen Fußpunktverschiebung

Der aus dem Ansatz einer sinusförmigen Verschiebung resultierende theoretische Verlauf gibt die im Versuch beobachtete Kurve dem grundlegenden Verhalten nach gut wieder, allerdings weist auch diese Vorgehensweise eine Schwäche auf. Das verwendete Verfahren simuliert die Anregung eines Einmassenschwingers durch eine Verschiebung des Fußpunktes. Aufgrund dieser Verschiebung erfährt die Masse jedoch eine gerichtete Beschleunigung, sodass die Formel auch die weitere in diese Richtung gerichtete Auslenkung darstellt, die auf die Dehnung der Feder zurückzuführen ist. Da jedoch die Auslenkung aus den im Versuch angestellten Beobachtungen beziehungsweise die aus der Energieerhaltung geschätzte theoretische Auslenkung als Erregung angesetzt wird, führt dieser Einfluss der Feder zu einer Überschätzung der Bruchverschiebung. Somit kann auch der Ansatz einer Fußpunkterregung keine zuverlässige Abschätzung des Auslenkungsverlaufs liefern.

Ein einfacherer Ansatz ist es, die durch den Pendelschlag verursachte Verschiebung, welche als bekannt vorausgesetzt werden können, vorzugeben und das eigene Schwingverhalten der Scheibe erst für den folgenden Zeitraum in Betracht zu ziehen. Wie bereits oben erwähnt kann eine sinusförmige Auslenkung bei Kenntnis dreier Punkte – Des Startpunktes, des Punktes der maximalen Auslenkung sowie des Endpunkts – beschrieben werden. Im Interesse des Ziels, das Verhalten einer gegebenen Scheibe möglichst unabhängig von der Durchführung von Versuchen beschreiben zu können, sollen diese Parameter idealerweise aus den Eigenschaften der Scheibe und des Pendels abgeleitet werden. Auch die Herleitung der maximal erreichten Auslenkung ist bereits demonstriert worden. Unter Ausnutzung des Energieerhaltungssatzes kann ein theoretischer Wert aus der Fallhöhe des Pendels und aus der wiederum von der Steifigkeit der Glasscheibe abhängigen Ersatzfedersteifigkeit bestimmt werden.

## 4.5.5 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Abschnitt wurde an großmaßstäblichen Probekörpern anhand von pendelschlagähnlichen Versuchen in Anlehnung an DIN 18008-4 [DIN18008a] ein plötzlich auftretender Querschnittsausfall simuliert. Der Pendelkörper wurde in diesem Zusammenhang so modifiziert, dass ein Querschnittsausfall, durch einem am Pendelkörper angebrachten Körner, garantiert wurde. DIN 18008-4 [DIN18008a] enthält explizite Regeln für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei stoßartigen Einwirkungen, diese werden allerdings lediglich auf sekundär tragende Glasbauteile angewendet. Besonders darin unterscheiden sich die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Versuche von denen aus dem Regelwerk, denn diese wurden hier an primär tragenden Bauteilen aus Glas durchgeführt. Insgesamt wurde an 17 Probekörpern Versuche durchgeführt. Diese unterschieden sich jeweils in der Glas- und Folienart sowie im Querschnitt.

Bei den Versuchen wurden die Stoßreaktionen für den Moment des Bruchs ermittelt und die hierfür relevanten dynamischen Parameter hergeleitet. Aus diesen konnten in einem nächsten Schritt Reststeifigkeiten, sowie Spannungen im Restquerschnitt bestimmt werden.

Insgesamt konnte gute Ergebnisse abgeleitet werden, hier fehlt lediglich die Masse an Probekörpern um auch eine statistisch fundierte Aussage treffen zu können. Hier könnten in einem nächsten Schritt weitere Parameter untersucht werden, wie z.B. die Höhe für den Aufprall des Pendels, weitere Scheibengeometrien und –aufbauten. Darüber hinaus würde auch eine Erhöhung der Kopfmasse zu weiteren interessanten Ergebnissen führen.

# 4.6 Schubfeldversuche mit Querschnittsausfall

# 4.6.1 Planung und Beschreibung des Versuchsaufbaus

Im Rahmen der Untersuchungen wurden insgesamt acht Glasprobekörper in großmaßstäblichen Schubfeldversuchen auf Ihr dynamisches Tragverhalten untersucht. Die Abmessungen der VSG-Scheiben betrugen 1200mm x 1200mm. Bei den Probekörpern kamen unterschiedliche Parameter zu tragen. Es wurde sowohl die Glasart als auch der Scheibenaufbau variiert. Als Zwischenmaterial wurde hier wie im Vorfeld bereits erwähnt, ebenfalls eine PVB-Folie mit einer Dicke  $d_{PVB} = 1,52mm$  pro Schicht gewählt. Untersuchungen mit einer weiteren Zwischenschicht wurde bei dieser Versuchsart nicht durchgeführt. In der folgenden Tabelle ist die Versuchsmatrix als Übersicht der durchgeführten Schubfeldversuche zu sehen.

Querschnitt	Glasart	Folienart	Auflast	Anzahl Probekörper			
[mm]	[-]	[mm]	[kg]	[-]			
		2-fach \	VSG				
6/6	TVG		383	2			
6/6	ESG	PVD		2			
	3-fach VSG						
4/6/4	TVG		550	2			
4/6/4	ESG	PVD	550	2			

Tabelle 4-24: Übersicht verwendeter Probekörper

Die in der Tabelle aufgeführte Auflast wurde auch hier unter Annahme eines Restquerschnitts einer Mono- (für das ursprüngliche 2-fach Laminat) und Zweifachverglasung (für das ursprüngliche 3-fach Laminat) berechnet.

In Abhängigkeit der Plattensteifigkeit unter Ansatz der Nenndicke konnte somit die kritische Verzweigungslast  $D_{crit}$  ermittelt werden. Hieraus ließ sich dann über die Geometrie der Lager und des Kragarms die statische aufzubringende Masse  $F_{stat}$ 

$$F_{stat} = D_{crit} * \frac{b}{a * \sqrt{2}}$$
(4-34)

bestimmt werden.

Als Vorbereitung der Versuche wurden im Vorfeld die Probekörper vermessen und zur besseren Übersicht in ein Versuchsprotokoll eingetragen. Die notwendigen Informationen waren mit denen aus den vorherigen Versuchsarten vergleichbar. Es wurde überprüft ober eine Vorimperfektion aufgrund der Herstellung der Scheiben und ob auch ein möglicher Versatz (hier beobachtet ein max. Versatz v = 2mm) an den Kanten vorhanden war. Darüber hinaus wurde auch von jeder Scheibenfläche die Oberflächenvorspannung optisch gemessen und zusätzlich die Scheibendicke sowie Scheibenlänge –und breite vermessen. Eine Zusammenfassung ist in Tabelle XY dargestellt. Einen Überblick der aufgenommene Daten ist in der Abbildung XY zu sehen.



Abbildung 4-50: Geometrie und beispielhafter Aufbau der Probekörper [21]

Aufbau	Imperfektion $e_0$	Oberflächen- vorspannung 1	Oberflächen- vorspannung 2
[mm]	[mm]	[N/mm²]	[N/mm²]
	2-fac	h VSG	
6/6 TVG - PVB	0,9	45,03	37,07
6/6 TVG - PVB	1,7	42,28	33,93
6/6 ESG - PVB	0,8	88,63	97,60
6/6 ESG - PVB	1,2	87,62	103,49
	3-fac	h-VSG	
4/6/4 TVG - PVB	1,7	33,94	38,09
4/6/4 TVG - PVB	0,7	42,06	36,87
4/6/4 ESG - PVB	1,3	113,48	114,43
4/6/4 ESG - PVB	1,2	117,58	115,4

#### Tabelle 4-25: Erweiterte Eigenschaften der Probekörper

Bei Scheiben welche auf Schub belastet werden, muss zunächst die Wahl der Lasteinleitung geklärt werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Lasteinleitung in Anlehnung an [Wel06] über die vier Ecken gewählt. Damit die Last in den Ecken eingeleitet werden konnte, mussten die Ecken der Scheiben abgeflacht und eine Konstruktion entwickelt werden, die es ermöglicht die Last von der Rahmenkonstruktion in die Scheibe einzuleiten.

Hierbei wurde ebenfalls in Anlehnung an den Vorarbeiten von [Wel06] ein sogenannter Stahlschuh hergestellt, welcher in die Rahmenkonstruktion eingebracht wurde und die Last flächig über die abgeflachte Ecke in die Scheibe einleitet. Ein Abplatzen des spröden Materials durch Stahl/ Glaskontakt 0bzw. ungleichmäßiger Belastung infolge des Versatzes an den Ecken, sollte unbedingt vermieden werden. Um dies zu ermöglichen wurde eine Zwischenschicht eingebracht, welche eine ausreichende Festigkeit hat um die Last gleichmäßig einzuleiten. Hierfür wurde wie in [Wel06] beschrieben zunächst auf ein Mörtel [in den mechanischen Eigenschaften zu den verwendeten Mörtel bei [Wel06], Hilti Hit HY 270 zurückgegriffen und allerdings aufgrund der Praktikabilität durch ein Zweikomponenten Klebstoff DP490 (3M) ersetzt. Um eine nahezu zentrische Klebung zu ermöglichen, wurde eine Schalung hergestellt auf die sowohl die Scheibe als auch der Stahlschuh passgenau eingelegt werden konnten. Moosgummi wurde zudem benutzt um einen symmetrischen Abstand zwischen den seitlichen Wänden des Stahlschuhs und der Glasecke zu gewährleisten und um ein Überlaufen der Klebung zu verhindern. Durch eine speziell in den Wänden des Stahlschuhs eingebrachte Einspritzöffnung konnte der Klebstoff in den gewünschten Bereiche eingebracht werden. Die nachfolgende Abbildung illustriert den Aufbau des verwendeten Stahlschuhs.





## Abbildung 4-51: Geometrie des Stahlschuhs an der Kontaktstelle

Bei der Planung und Erstellung des Versuchstands wurden ebenfalls die Vorarbeiten von [Wel06] herangezogen. Der Versuchsstand konnte allerdings nicht identisch mit dem von [Wel06] konzipiert werden, da alle wichtigen Informationen gefehlt haben, lediglich das zu Grunde gelegte Prinzip wurde adaptiert.

Das Ziel beim Konzept des Versuchsstandes war es, die an einem Kragarm angeordnete Masse zentrisch in das eingebaute Scheibenpaket über die vier Ecken einzuleiten, ohne das zusätzliche Exzentrizitäten aus dem Versuchsstand die bereits vorhandenen geometrischen Imperfektionen verstärken. Durch die gelenkige Anordnung der verbundenen Rahmenprofile an den Ecken, wurde ein kinematisches ebenes Fachwerk erzeugt.

Die Stahlrahmen bestehen aus quadratischen Hohlprofilen mit ca. 130 cm Länge. An den unteren beiden Gelenken des Rahmens wurde zusätzlich von jeder Seite jeweils ein U-profil mit ca. 237 cm Länge in horizontaler Ausrichtung angehängt. Über eine Kopfplatte, welche die beiden U-Profile fest verbindet, wurde die statisch wirkende Masse in das Schubfeld eingeleitet.

Im folgendem ist der Versuchsstand skizziert und zeigt sowohl die Verbindung an die tragende Stahlstütze (festes Element), als auch beispielhaft die Anordnung der Masse am Kragarmende. Darüber hinaus sind die Details der jeweiligen Verbindungen zu sehen.



Abbildung 4-52: Ansicht des Versuchsstandes (links), Detailanschlüsse (rechts)

Die linke obere Ecke ist so konzipiert, dass eine vertikale Verschiebung infolge der Bewegung des ganzen Systems ermöglicht werden kann. Hierfür wurde eine Führungsschiene an der Stahlstütze befestigt und der passende Laufwagen am Knotenpunkt des Rahmens angebracht. Die Prinzipskizze sowie die Ausführung sind in Abbildung 4-53: Detail Rahmenecke links oben sehen. Dieser Kontenpunkt war besonders aufwendig, da an diesem, anders als bei den anderen Ecken, vier Verbindungselemente zusammentreffen. Hier befindet sich der Anschluss des Fahrwagens, das horizontale sowie vertikale Rahmenprofil und die Lasteinleitung über die Diagonale an welche der Stahlschuh angebracht wurde.





Abbildung 4-53: Detail Rahmenecke links oben





#### Abbildung 4-54: Detail Rahmenecke links unten

Die Aussteifung des Rahmens durch die Verglasung erfolgt hier durch eine Eckklotzung, sodass der Abtrag der Schubkraft über Druck in der Diagonale erfolgt. Damit keine planmäßigen Momente in die Scheibenebene über die Klotzungen eingeleitet werden, sind die Halterungen für die Eckklotzungen gelenkig mit dem Rahmen verbunden.

#### 4.6.2 Ergebnisse der Eigenfrequenzmessung

Die Ermittlung der Eigenfrequenzen erfolgte auch bei dieser Versuchsart wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben für die fünf Zustände. Aus den hier Ermittelten Eigenfrequenzen wurden in einem nächsten Schritt die Ersatzsteifigkeiten ermittelt. In der Abbildung 4.55 ist eine Tendenz im Verhalten der Eigenfrequenzen und damit der Steifigkeit zu erkennen. Hier findet, vermeintlich unabhängig von der Glasart, ein deutlicher Abfall der Eigenfrequenz in Zustand III statt. Aufgrund der geringen Versuchsanzahl sind Ausreißer nicht zu vermeiden, weshalb in Abbildung 4.55 das Verhalten nicht bei allen eindeutig ist.



#### Abbildung 4.55: Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände

Querschnitt	Aufbau	fZustand I	<b>f</b> Zustand II	fZustand III	fZustand IV	<b>f</b> Zustand V		
[mm]	[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]		
		2-f	ach VSG					
6/6		14,34	18,58	17,24	18,20	10,94		
0/0	IVG-FVD	19,53	19,86	8,30	18,18	14,54		
6/6	6/6 ESG - PVB	12,69	12,50	7,05	12,34	7,52		
0/0		13,50	17,98	8,17	11,49	7,40		
	3-fach VSG							
A/6/A		18,12	Bruch					
4/0/4	IVG-FVD	15,70	14,57	14,65	15,20	16,36		
4/6/4		15,55	11,99	6,94	9,26	13,27		
4/6/4	ESG - PVB	16,74	9,82	7,19	8,74	9,70		

Tabelle 4-26: Eigenfrequenzverlauf für die Zustände I bis V

# 4.6.3 Bestimmung der Steifigkeit

Die Bestimmung der Ersatzsteifigkeit kann hier, wie in Kapitel 3.3 beschrieben über das Verhältnis der intakten (Zustand I) zur gebrochenen (Zustand V) Scheibe jeweils ohne aufgebrachter Masse, sowie über das Verhältnis intakten Scheibe mit Last (Zustand II) zur gebrochenen Scheibe mit Last (Zustand IV), errechnet werden:

$$I_{ers,Zstd} = \frac{I_{intakt}}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2}$$
(4-35)

Nachfolgende Übersicht verdeutlicht diese unterschiedlichen Ausprägungen getrennt

Tabelle 4-27: Ersatzsteifigkeiten aus Eigenfrequenzen

Aufbau	Glasart	I <sub>max</sub>	lers, Zustand I - V	l <sub>ers,</sub> Zustand.II - IV
[mm]	[-]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]
		2-fach VSG		
	TVC	247132,62	143906,97	237392,77
	IVG	247132,62	137133,06	207267,19
0/0-PVB	ESG	247132,62	86825,07	240610,40
		247132,62	74367,74	100902,70
		3-fach VSG		
	TVG	494776,17	Bruch	
1/6/1 D\/R	100	494776,17	536856,78	538698,48
4/0/4-FVD	ESC	494776,17	360268,64	294881,45
	ESG	494776,17	165979,75	392188,70

Die Ergebnisse zeigen deutlich einen Unterschied zwischen der Ersatzsteifigkeit im belasteten und unbelasteten Zustand. Nach dem Bruch einer der Glasscheiben werden die Bruchstücke

aufgrund der immer noch wirkenden Belastung auseinandergezogen, sodass keine Druckkräfte über den zerstörten Querschnitt übertragen werden und die Last ausschließlich von der intakten Scheibe übernommen wird. Betrachtet man in diesem Zusammenhang unter anderem das Bruchbild, erkennt man nur bei den ESG - Probekörpern die Schubdiagonale, Abbildung 4.56, die von der Lasteinleitung ausgeht sehr gut. Bei den Versuchskörpern aus TVG, wurde auch hier lediglich ein Riss, welcher sich z.T. nur im Bereich des Aufpralls ausbildet. Ein Rissfortschritt konnte aufgrund des hohen Restquerschnitts im Vergleich zur niedrigen Last nicht beobachtet werden. Wird die Auflast in einem nächsten Schritt entfernt, kommt es wieder zum Kontakt zwischen den Bruchstücken, weshalb hierbei auch Druckkräfte wieder zwischen den Bruchstücken übertragen werden können. Das Flächenträgheitsmoment wird durch diese Übertragung vergrößert.



Abbildung 4.56: Bruchbilder nach Zustand III, ESG mit Schubdiagonalen (links), TVG mit nicht fortschreitenden Riss (rechts)

# 4.6.4 Dynamischer Lastfaktor

Die Bestimmung des dynamischen Lastfaktors kann hier ebenfalls wie zuvor beschrieben ermittelt werden, und wird hier nicht mehr erläutert. Die DLF's welche mittels der beiden bekannten Verfahren ermittelten wurden, sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Zur besseren Übersicht sind hier ebenfalls die seitlichen Auslenkungen und die Dämpfungen wiederzufinden.

Querschnitt	Glasart	Wstat	W <sub>dyn,max</sub>	Wstat,Ende	DLFw	Dämpfung	DLFξ
[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[%]	[-]
			2-fach VSG	i - PVB			
6/6	TVG	2,04	2,55	2,37	1,55	0,031	1,99
0/0	100	1,95	2,53	2,31	1,61	0,062	1,99
6/6	ESC	0,52	24,5	18,62	1,32	2,47	1,93
0/0	230	1,5	19,09	14,91	1,31	1,978	1,94
			3-fach VSG	i - PVB			
A 16 / A	TVC	Bruch					
4/0/4	100	1,95	2,82	2,53	1,50	0,08	1,99
1/6/4	ESC	4,73	13,15	11,56	1,23	0,34	1,98
4/6/4	ESG	5,1	12,76	11,92	1,12	0,9	1,97

Tabelle 4-28: Durchbiegungen und Dämpfungen für den DLF

Die Ermittlung der DLF's infolge Verformung des Bauteils oder durch Dämpfung der zugehörigen Frequenz zeigen auch bei dieser Versuchsart jeweils deutliche Unterschiede in der Ausprägung. Grundsätzlich bedeutet ein höherer Lastfaktor auch eine höhere Belastung des Restquerschnitts im Falle eines Querschnittsausfalls. Grundsätzlich lässt sich ein Unterschied in der Glasart und dem Querschnittsaufbau feststellen. Es zeigt sich, dass sowohl bei TVG als auch bei ESG die ermittelten Stoßfaktoren bei 2-fach Aufbauten über denen der 3-fach VSG-Scheiben liegen. Abhängig von Material ist zu erkennen, dass die seitlichen Auslenkungen im Moment des Bruchs bei ESG um ein vielfaches höher sind als bei TVG. Das liegt daran, dass im Bruchmoment der gebrochene Teilguerschnitt bei VSG noch erheblich zum Lastabtrag beiträgt, wohingegen ESG in dem Szenario beinahe komplett versagt. Auch die statische Enddurchbiegung ist dementsprechend bei allen Probekörpern aus ESG höher als bei TVG. Insgesamt ist auch zu beobachten, dass die infolge Dämpfung ermittelten dynamischen Lastfaktoren deutlich höher sind als diejenigen aus der Verformungsermittlung. Bei allen TVG-Probekörpern waren hierbei kaum Dämpfungen ablesbar. Bei VSG aus ESG kann zumindest eine einstellige prozentuale Dämpfung über die abnehmenden Amplituden der Schwingungen abgelesen werden, was immerhin zu einer Variation des DLF's in der Höhe der Ausprägung bedeutet.

# 4.6.5 Fazit

Die hier durchgeführten Versuche dienten in erster Linie dazu zu untersuchen, ob die zuvor beobachteten Phänomene auch bei einem Querschnittsausfall an Schubfeldern aus Glas auftreten. Tendenziell kann zusammenfasst gesagt werden, dass trotz des relativ komplizierten Aufbaus, zur gewährleisten der Lasteinleitung, sehr gute und zu den anderen Versuchsarten vergleichbare Werte erzielt werden konnten. Sowie die Ermittlung der Stoßfaktoren, die bei dieser Versuchsart Werte aufgezeigt haben, die im Bereich der anderen Versuchsarten lagen. Insgesamt lässt sich jedoch auch sagen, dass die hier untersuchte Anzahl an Probekörpern zu gering ist um validierte Aussagen treffen zu können. Darüber hinaus, sollten in weiteren Untersuchungen mehrere Aufprallhöhen, eine größere Variation der Kopfmassen sowie mehrere Probekörper pro Aufbau untersucht werden.

## 5 Numerische Untersuchungen

## 5.1 Entwicklung des FE-Modells

Das im Laufe dieses Forschungsvorhabens entwickelte FE-Modell wurde mit Hilfe der Software Abaqus 6.14 [Aba14] erstellt. Abaqus ist eine, von Simulia entwickelte, Finite Elemente Software zur Lösung linearer und nichtlinearer Probleme der Strukturanalyse, Wärmeleitung, Dynamik und Akustik. Es enthält einen programminternen Prä- und Postprozessor, sowie unterschiedliche Solver. Zudem existiert eine Scripting-Schnittstelle zwischen Abaqus und Python, die den Modellaufbau skriptgesteuert erlaubt und eine einfache Parametrisierung ermöglicht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde abgesehen vom Postprozessing ausschließlich auf das Scripting Interface zurückgegriffen.

In diesem Kapitel wird auf die Erstellung der Finite-Elemente-Modelle für die im Vorfeld beschriebenen Belastungsszenarien eingegangen. In Anlehnung an die experimentellen Untersuchungen soll der Querschnittsausfall und die daraus entstehende dynamische Zusatzbelastung auch mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) dargestellt werden. Um das Modell zu validieren und zu kalibrieren erfolgen zunächst eine statische Traglastanalyse sowie die Ermittlung der Eigenfrequenzen in den beiden ungebrochenen Zuständen I und II. Anschließend wird Zustand III, d.h. der Moment des Querschnittsausfalls, sowie das Nachbruchverhalten in den Zuständen IV und V modelliert und kalibriert.

## 5.1.1 Modellierung und Eigenschaften des numerischen Modells

Bei der Modellierung wurde ausschließlich über das Scripting Interface gearbeitet. Es wurde besonders Wert darauf gelegt ohne die von Abaqus intern genutzten *integer ids* zu arbeiten. Abaqus speichert jegliche erstellte Geometrien wie Kanten, Ecken, Flächen in virtuelle Listen auf die, über intern zugewiesene Nummern, die *integer ids*, zugegriffen wird. Der Benutzer hat jedoch keinen Einblick in diese Listen oder die Systematik der Nummerierung. Zudem kann sich die zugewiesene Nummer verändern, sollten Teile gelöscht, hinzugefügt oder eine andere Version von Abaqus genutzt werden. Anstatt der *integer ids* wird beispielsweise auf die *findAt()*-Funktion und Koordinaten zurückgegriffen, die es ermöglichen ohne integer ids Komponenten eindeutig zu adressieren [Aba14].

Am Anfang der Modellerstellung steht die geometrische Formulierung. Dafür werden die Glasscheiben, sowie die Folie als einfache Rechtecke konstruiert. Die Parameter der Rechtecke, also Breite B, Höhe H und Dicke ds<sub>i</sub> bzw df, werden oberhalb des eigentlichen Skriptes eingeführt und können so je nach Scheibe einfach verändert werden.

Zur Modellierung des Glases und der Folie werden, in Anlehnung an [Lan12] C3D8I beziehungsweise C3D8IH Elemente benutzt.

C3D8 Elemente sind einfache, 8 Knoten Kontinuums Volumenelemente (siehe Abbildung 4.1) mit linearer Interpolation und vollständiger Integration. Darauf aufbauend sind C3D8I Elemente, mit einer zusätzlichen inkompatiblen Moden-Formulierung versehen, die den Effekt

des Lockings (s.u.)reduzieren soll und es so ermöglicht bereits mit einem Element über die Dicke gute Ergebnisse zu erzielen [Aba14].



Linear element (8-node brick, C3D8)

Abbildung 5-1: 8 Knoten Volumenelement

Der Effekt des Lockings wird hier folgend der Übersichtlichkeit geschuldet für den zwei dimensionalen Fall erklärt.

Bei linearen (,low-order') Rechteckelementen werden bilineare Ansatzfunktionen angewandt. Anhand Abbildung ... wird verdeutlicht, dass diese Elemente nicht in der Lage sind Biegung adäquat abzubilden, da sich die Kanten des Elements nicht durchbiegen. Anders ist dies bei quadratischen Elementen. Entsprechend des Namens kommen hier quadratische Ansatzfunktionen zum Tragen, die somit unter Biegung gekrümmte Kanten darstellen können. Zum Vergleich sind auch diese Elemente abgebildet [Aba14].



Abbildung 5-2: low order und quadratisches Element unter reiner Biegebelastung

Betrachtet man nun diese Verformungsfigur und interpretiert das Verformungsverhalten hinsichtlich der Spannungen, zeigt sich, dass sich der Winkel der gepunkteten Linien von vorherigen 90° verändert hat. Damit wird angedeutet, dass an diesen Punkten Schubspannungen existieren. Das Vorhandensein von Schubspannungen unter reiner Biegebelastung ist physikalisch nicht korrekt [Aba14], was auf ist auf das fehlende Verformungsvermögen zurückzuführen ist. Die Verformungen sind also insgesamt geringer, während die Spannungen überschätz werden. Das Element verhält sich somit zu steif.

Mathematisch wird dies ersichtlich, wenn die Eigenmoden der globalen Elementsteifigkeitsmatrix eines 2D Elements mit bilinearer Ansatzfunktion betrachtet werden. Zwei der acht Moden zeigen dabei ein physikalisch nicht sinnvolles Verhalten. Diese Eigenmoden werden *hourglass Moden* genannt und ihre Eigenwerte ergeben sich mit Hilfe einiger Vereinfachungen zu (die folgende Herleitung ist aus [Ree18]:



Abbildung 5-3: hourglass Moden für 2 dimensionale Rechteckelemente

$$w_{hgx} = \frac{4\mu t}{3} \left(\frac{1}{s}(r+2) + s\right)$$
(5.1)

$$w_{hgy} = \frac{4\mu t}{3} \left( s(r+2) + \frac{1}{2} \right)$$
(5.2)

Hierbei ist  $\mu$  eine Lamé Konstante,  $s = \frac{b}{a}$  stellt das Verhältnis der Seitenlängen dar und  $r = \frac{\lambda}{\mu}$  das Verhältnis der Lamé Konstanten. Die Lamé Konstanten können wie folgt aus den Elastizitätskonstanten Elastizitätsmodul *E* und Querkontraktionszahl *v* berechnet werden:

$$\lambda = \frac{v}{1 - 2v} * \frac{1}{1 + v} * E$$
(5.3)

$$\mu = G = \frac{1}{2} * \frac{1}{1+\nu} * E \tag{5.4}$$

Es sind nun zwei Arten des Locking/Sperren zu unterscheiden.

Shear locking oder auch Schubsperren beschreibt das entstehen rechnerischer Schubspannungen, die eigentlich nicht existieren sollten. Somit nimmt die Bedeutung(Magnitude) dieses Eigenwertes zu und wird damit übermäßig steif. Dies ist ein eindeutig nichtpysikalisches Verhalten.

Volumetrisches Locking tritt ein, wenn das Material nahezu inkompressibel ist. Nahezu oder inkompressibles Verhalten liegt vor, wenn  $v \approx 0.5$ . Damit wird  $\lambda \to \infty$ ,  $r \to \infty$  und letztlich auch  $w_{hg} \to \infty$ . Somit kommt es auch hier zu einer Überschätzung der Spannungen und einer Unterschätzung der Verformungen. Erneut reagiert das Element zu steif.

Da ebenjenes Verhalten nicht erwünscht ist, wurde statt der normalen Elemente die Methode der inkompatiblen Moden angewandt. Hier werden die problematischen Terme um quadratische Verschiebungsfunktionen ergänzt, die so konstruiert werden, dass die zusätzliche Verschiebung an den Knoten null beträgt, aber zwischen den Knoten nicht null ist. Somit kann das lineare Element nun gekrümmte Kanten darstellen.



Abbildung 5-4: Bubble Mode

Abaqus benutzt hier eine Formulierung, die nicht die Verschiebungen direkt beeinflusst, sondern den Verschiebungsgradienten variabel macht. So kann shear locking ohne fehlende kinematische Kompatibilität verbessert werden. Allerdings reagieren inkompatible Moden Elemente sehr negativ auf Netzverzerrungen [Aba14], die aufgrund der einfachen Geometrien der Glasscheiben im hier betrachteten Fall ausgeschlossen werden können. Die Gefahr, keine annehmbaren Ergebnisse zu erhalten besteht dementsprechend nicht.

Die Folie wird mit einer zusätzlichen hybriden Formulierung gemesht, sodass sie als inkompressibel simuliert wird. Ursprünglich wird diese Formulierung für Materialien benutzt, deren Querkontraktionszahl v = 0,475 übersteigt und die aufgrund des oben beschriebenen volumetrischen Lockings nicht mehr berechnet werden können [Aba14]. Hier werden die Elemente benutzt um in der Simulation eine Kompression der Folie zu verhindern, welche aufgrund des Verbundes im Versuch physikalisch nicht stattfindet, zudem ist auch eine Modellierung der PVB Folie mit einer Querkontraktionszahl von v = 0,475 oder höher denkbar. Aufgrund des in Kapitel 2.2.2 beschriebenen ausgeprägten temperaturund belastungsgeschwindigkeitsabhängigen Materialverhalten der Folie ist eine einfache Festlegung der Materialparameter nicht möglich.

Bei der Modellierung der jeweiligen Versuche muss auf die einzelnen Besonderheiten eingegangen werden. Während bei den Biegeträgern die statisch wirkende Masse flächig als Querbelastung aufgebracht wird, muss bei den Knickversuchen die statisch wirkende Masse in Längsrichtung als Kopfmasse aufgebracht werden. Eine Besonderheit, die bei in Längsrichtung belasteten Scheiben zu tragen kommt, ist die Modellierung einer Vorimperfektion. Diese wird sowohl bei Knickversuchen mit und ohne Seitenimpuls als auch bei Schubfeldversuchen berücksichtigt.

# 5.1.2 Grundlage der dynamischen Berechnung im FE-Modell

Der wesentliche Unterschied zwischen einer dynamisch modalen und einer dynamisch impliziten Analyse besteht darin, dass bei einer dynamisch modalen Analyse keine Parameter (z.B. Temperatur) während der Berechnung geändert werden können. Die Lasten sowie alle Parameteränderungen werden bei dieser Berechnungsmethode in einem vorangestellten, statischen Schritt aufgebracht. Der Impuls beim Bruchmoment wird durch ein erneutes Aufbringen der Last hervorgerufen. Dazu muss zunächst eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt werden. Das Programm überführt dabei die bekannte DGL für eine ungedämpfte Schwingung [Nas15]

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \tag{5-1}$$

mit dem Ansatz

$$u = \Phi e^{i\omega t} \tag{5-2}$$

mit  $i = \sqrt{-1}$ 

in das reelle Eigenwertproblem:

$$(-\lambda M + K)\Phi = 0 \tag{5-3}$$

mit  $\lambda = \omega^2$ 

Die charakteristische Gleichung lautet nach [Nas15]:

$$det(K - \lambda M) = 0 \tag{5-4}$$

Sie liefern die folgenden, nichttrivialen Lösungen:

$\lambda_i$	Eigenwerte
$\omega_i = \sqrt{\lambda_i}$	Eigenkreisfrequenzen
$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$	Eigenfrequenzen
$\Phi_{i}$	Eigenvektoren/Eigenmoden/Eigenform

Bei den Schwingungen der Probekörper handelt es sich um freie, gedämpfte Schwingungen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Dämpfungen in einem FE-Programm zu verwenden. Die verschiedenen Dämpfungsarten sind in Abbildung 5-5 dargestellt.



Abbildung 5-5: Übersicht über verschiedene Dämpfungsarten [Nas15]

Die drei wichtigsten Dämpfungsarten sind die Lehr'sche Dämpfung, die Rayleigh-Dämpfung und die Strukturdämpfung.

Das Lehr'sche Dämpfungsmaß kann für jedes Material einzeln als Komposit-Dämpfung definiert oder als modale Dämpfung bestimmten Moden zugeordnet werden [Nas15].

Bei der viskosen Rayleigh-Dämpfung, welche bei der dynamisch impliziten Berechnungsmethode verwendet wird, wird dagegen die Dämpfungsmatrix

$$D = \alpha_R M + \beta_R K \tag{5-5}$$

erzeugt, was auf allen Berechnungsebenen erfolgen kann [Nas15]. Dabei beschreibt der Parameter  $\alpha_R$  den massenproportionalen Anteil und dämpft niedrige Moden. Der Parameter  $\beta_R$  ist der steifigkeitsproportionale Anteil, der hohe Moden dämpft. Das Lehr'sche Dämpfungsmaß kann für alle Moden *i* wie folgt berechnet werden:

$$\xi_i = \frac{\alpha_R}{2\omega_i} + \frac{\beta_R \omega_i}{2} \tag{5-6}$$

Zur Berechnung der beiden Faktoren  $\alpha_R$  und  $\beta_R$  müssen zwei Eigenfrequenzen, für die das Lehr'sche Dämpfungsverhalten vorgegeben werden soll und das dazugehörige Lehr'sche Dämpfungsmaß definiert sein. Wenn  $\xi$  als konstant angenommen wird, ergeben sich nach [Nas15] die Faktoren zu:

$$\alpha_R = \omega_1 \omega_2 \beta = 4\pi^2 f_1 f_2 \beta \tag{5-7}$$

$$\beta_R = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{\xi}{\pi (f_1 + f_2)}$$
(5-8)

Aus den beiden Gleichungen geht hervor, dass die Rayleigh-Dämpfung frequenzabhängig ist. Bei der Nutzung der Rayleigh-Dämpfung wird deutlich, dass niedrige und hohe Frequenzen zu stark und der mittlere Bereich zu schwach gedämpft wird. Dieser Fehler steigt mit der Höhe des Frequenzbereichs.

Die letzte hier vorgestellte Dämpfungsart ist die Strukturdämpfung. Sie repräsentiert die innere Reibung eines Materials oder einer Struktur. Dabei wird anstelle einer Dämpfungsmatrix eine komplexe Steifigkeitsmatrix erzeugt. Die Bewegungsgleichung auf globaler Ebene lautet [Nas15]:

$$M\ddot{u} + (K^{Re} + iK^{Im})u = P \tag{5-9}$$

mit  $K^{Im} = sK^{Re}$ 

Dabei ist *s* der Strukturdämpfungsparameter, der durch den Benutzer festgelegt wird. Die Dämpfungskräfte sind, anders als bei der Rayleigh-Dämpfung oder der Lehr'schen Dämpfung, proportional zu den Verschiebungen. Deshalb kann die Strukturdämpfung nur für harmonisch erzwungene Schwingungen, bei denen die Verschiebungs- und Geschwindigkeitsantwort eine Phasenverschiebung von 90° aufweist, verwendet werden.

Daher wird in [Nas15] empfohlen, für eine freie Schwingung auf modaler Ebene die Lehr'sche Dämpfung zu verwenden. Die Rayleigh-Dämpfung sollte aufgrund ihrer ungleichförmigen Dämpfungscharakteristik nur dann angewendet werden, wenn weder Lehr'sche noch Strukturdämpfung zur Verfügung stehen.
Für eine dynamisch implizite Analyse kann jedoch nur eine Rayleigh-Dämpfung verwendet werden. Die Rayleigh-Dämpfung ist materialabhängig und muss für jedes Material einzeln definiert werden.

Im Gegensatz zur dynamisch modalen Analyse bietet die dynamisch implizite Analyse allerdings den Vorteil, dass während der Berechnung die Materialparameter verändert werden können. Der Impuls wird somit nur infolge des Steifigkeitsverlustes erzeugt, nicht jedoch wie bei der Modalanalyse durch ein erneutes Aufbringen der Lasten. Dadurch wird die statische Anfangsdurchbiegung berücksichtigt. Die dynamisch implizite Berechnung benötigt jedoch wesentlich mehr Rechenkapazität als eine dynamisch Modale Berechnung.

Die bis hierher beschriebenen, allgemeinen Informationen werden in ABAQUS entsprechend implementiert und die numerischen Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen verglichen.

### 5.1.3 Biegeträger

Wie zuvor bereits beschrieben, handelt es sich bei den Versuchen an Biegeträgern um sogenannte Kennwertuntersuchungen. Mittels der erzielten Ergebnisse wurde in einem nächsten Schritt das FEM kalibriert. In diesem Abschnitt werden zunächst die Schritte sowie die Besonderheiten bei der Modellierung erläutert.

Nachdem das Modell nach der oben beschriebenen Methode erstellt wurde, konnte in einem nächsten Schritt für die Zustände II-IV die statisch wirkende Masse aufgebracht werden. Bei der Ermittlung der dynamischen Parameter (Ermittlung der Eigenfrequenz, etc.) hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Versuchslast über eine statisch wirkende Masse aufzubringen. Durch dieses Verfahren wurde die Masse in der Eigenfrequenzberechnung berücksichtigt. Der Aufbau ist in Abbildung 5-6 dargestellt.



Abbildung 5-6: Biegeträger mit gleichverteilten Massesteinen

Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein Querschnittsausfall durch Anschlagen der biegezugbeanspruchten Glasscheibe erzeugt. Der Querschnittsverlust führte in der Folge zu einer dynamischen Überbeanspruchung des Restquerschnitts.

Der Bruch der unteren Glasscheibe und der damit verbundene schlagartige Steifigkeitsverlust wurde mit den in Kapitel 4.3 berechneten Ersatzhöhen simuliert. Dazu wurde die untere Scheibe in zwei Abschnitte aufgeteilt und im Bruchmoment der untere Abschnitt entfernt. Dies geschieht mithilfe einer "REMOVE"-Funktion in ABAQUS, welche es einem erlaubt, einen Teil

des Trägers (hier die unterste Scheibe) während eines Berechnungsschritts zu entfernen ("REMOVE"). Die Höhe der zu entfernenden Scheibe kann mit folgender Formel ermittelt werden:

$$d_{\text{remove}} = d_{\text{gesamt}} - h_{\text{ers}}$$
(5-10)

Für die Ermittlung der dynamischen Maximalwerte kann man wie oben beschrieben zwei verschiedene Berechnungsverfahren anwenden: Zum einen kann eine dynamische Modalanalyse und zum anderen eine dynamisch implizite Analyse durchgeführt werden.

### 5.1.4 Knickversuche

Bei der Simulation der Knickversuche sind die Parameter für die Implementierung in das FE-Programm wie oben beschrieben erfolgt. In Anlehnung an [Lan12], wird beim Erstellen des Models darauf geachtet, dass die äußeren Randbedingungen hierbei gleich bleiben. Eine Besonderheit bei der Erstellung des Models ist die Lasteinleitung durch eine Zusatzkonstruktion welche ebenfalls am Fußpunkt der Stütze als Lagerung wiederzufinden ist. Diese Zusatzkonstruktion gewährleistet zum einen die zentrische Lasteinleitung sowie eine freie Verschiebbarkeit der Glasscheiben zueinander. Freie Verschiebbarkeit bedeutet somit keine Schlupfendbehinderung.



Abbildung 5-7: Abbildung Zusatzkonstruktion

Auf eine Betrachtung mit teilweiser Schlupfendbehinderung wird in Bezug auf [Lan12] verzichtet. Zurückzuführen auf den bei Verbundsicherheitsglas meist vorhandenen Kantenversatz ist davon auszugehen, dass konstruktiv eine mindestens teilweise Schlupfendbehinderung vorliegt. In [Lan12] wurde der Einfluss dieser anhand unterschiedlicher Parameter untersucht. Es hat sich dabei ergeben, dass der Einfluss der Schlupfendbehinderung umso ausgeprägter ist, je:

- kleiner der Schubmodul der Zwischenschicht
- geringer die Belastungsgeschwindigkeit
- kleiner die Knicklänge
- stärker die Scheibendicke.



#### Abbildung 5-8: Abbildung ohne (links) und mit (rechts) Schlupfendbehinderung

Wie aus Abbildung 4-9 zu entnehmen ist, entspricht der Extremfall einer vollständigen Schlupfendbehinderung (rechts) einer Fixierung der Scheiben an deren Enden, aus der sich höhere Traglasten im Vergleich zu ohne Schlupfendbehinderung ergeben.

Mit teilweiser Schlupfendbehinderung ergeben sich dementsprechend ebenfalls höhere Traglasten als unter Vernachlässigung dieser. Der Verzicht darauf wird mit dem Vorhandensein großer Schlankheit der Versuchskörper und dem Fakt begründet, dass die Ergebnisse ohne Schlupfendbehinderung auf der sicheren Seite liegen.

Die Zusatzkonstruktion wird dabei ohne spezifische Materialzuordnung als möglichst steif modelliert, sodass keine Beeinflussung des Modells durch Verformung der Zusatzkonstruktion zustande kommt.

Die Folie ist mit den beiden Glasscheiben über *tie constraints* verbunden. Es wird somit ein idealisierter vollständiger Verbund simuliert. (siehe Kapitel 1 VSG, Verbund) Bei *tie constraints* müssen jeweils eine Master- und eine Slave-Oberfläche bestimmt werden. Verbundene Knoten haben dabei dieselben Verschiebungen und Spannungen, wobei sich die Slave ,zu' den Masterknoten bewegen. Die passende Zuweisung von Master und Slave beeinflusst das Ergebnis der Berechnung. Man kann sich an dem Grundsatz orientieren, dass die Masteroberfläche die steifere Oberfläche sein sollte. Dies impliziert auch, dass die Fläche mit dem weiteren Elementnetz die Masteroberfläche sein sollte, da sich numerisch bedingt Objekte mit steigender Elementgröße steifer verhalten. Für einen optimalen Verbund sollten die Master- und Slaveknoten zusammenfallen. [24]

Auch die Zusatzkonstruktion ist mit den Glasscheiben über tie constraints verbunden. Obgleich die Zusatzkonstruktion steifer als die Glasscheiben ist, wird auch hier die Glasscheibe als Master-Oberfläche gewählt. Dies soll verhindern, dass die Zusatzkonstruktion in die Glasscheibe ,eindringt', da die Bewegung der Slave-Knoten denen der Master-Knoten folgt.

Die Lagerung der Verbundscheiben erfolgte im Versuch gelenkig und entspricht somit Euler Knickfall II. An der oberen Zusatzkonstruktion wird diese entlang der Mittellinie in horizontaler x- und z-Richtung gehalten. An der Lager-Zusatzkonstruktion ist zusätzliche die Verschiebung in y-Richtung behindert. Die Lagerung entlang der Mittellinie der Zusatzkonstruktion ist hier in besonderem Maße bedeutend, da eine Lagerung in x-Richtung über die untere Fläche der Zusatzkonstruktion einer Einspannung gleich käme, eine Behinderung der Verschiebung also gleichzeitig ein blockieren der Drehung um die x-Achse verursachen würde.



#### Abbildung 5-9: Abbildung gesamte Assembly, Nahaufnahme Lagerung und Eulerstab

Da es sich bei den Glasstützen um stabilitätsgefährdete Bauteile handelt, müssen Imperfektionen bei der Berechnung beachtet werden. Zur Implementierung der Imperfektionen ist zunächst ein buckling step erforderlich.

Der Buckling step bestimmt über die Lösung des charakteristischen Eigenwertproblems der finiten Grundgleichung die kritische Knicklast und die zugehörigen Eigenformen. [24]

Das Input File wird durch das key word \*NODE FILE U, ergänzt. Dies stellt sicher, dass die Eigenform gespeichert wird und in späteren Berechnungen aufgerufen werden kann [28]. Über eine im Python eingearbeitete Funktion ist die Ergänzung des Input Files automatisiert möglich, sodass das Input File vor der Berechnung nicht separat bearbeitet werden muss. Das keyword wird in diesem Fall am Ende des Input Files innerhalb des \*\*FIELD OUTPUT Bereichs eingefügt.

Die Imperfektion wird dann implementiert, indem das Input File für die folgenden Berechnungen durch das keyword \*Imperfection ergänzt wird. Der Befehl wird erneut automatisiert in das Input File am Anfang des Gravitations-Steps eingefügt. Mit angegeben werden der Dateiname des vorangegangenen buckle steps, und der Step in dem die Imperfektion implementiert wird. Darunter kann des Weiteren ergänzt werden mit welcher Gewichtung die zuvor ermittelten Eigenmoden eingehen sollen. Hier wird allein die bekannte Knickform des Eulerstabs 2, also die erste Eigenmode gewichtet. [28] Die Gewichtung erfolgt in Höhe der gemessenen Imperfektion eo. Im unten aufgeführten Beispiel Betrug die gemessene Imperfektion z.B. 0,1mm.

Wie bereits erwähnt handelt es sich bei dem step *Natural frequency extraction* um einen *linear perturbation step*. Dies ermöglicht es die Eigenfrequenzanalysen in allen im Versuchsaufbau beschriebenen Zuständen zu extrahieren ohne gesonderte Berechnungen zu starten. Die Berechnung der Eigenfrequenzen zwischen anderen Berechnungsschritten hat dabei keinen Einfluss auf den Zusatnd des Modells.

Der Berechnungsschritt gleicht dem Buckling step mit dem Zusatz, dass die Eigenfrequenzen über die Eigenwerte berechnet werden [Aba14].

Analog zur Versuchsdurchführung wird die Eigenfrequenz im unbelasteten Zustand (Zustand I), im belasteten Zustand (Zustand II), bei Bruch (Zustand III), im gebrochenen belasteten (Zustand IV) und im gebrochenen unbelasteten Zustand ermittelt (Zustand V).

# 5.2 Ergebnisse und Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen vorgestellt. Es werden sowohl die Ergebnisse der statischen sowie der dynamischen Berechnung beschrieben.

Für die statischen Berechnungen wurden die im Vorfeld ermittelten Ansätze über die Ersatzhöhen und Ersatzsteifigkeiten verwendet. Die graphische Darstellung in ABAQUS ist in Abbildung 5-10 zu sehen.





### Abbildung 5-10: Durchbiegung eines Biegeträgers (links) und Stütze (rechts)

In der folgenden Tabelle ist der Vergleich der statischen Berechnung aus FE und die korrespondierenden Ergebnissen aus dem Versuch zu sehen.

Scheibenaufbau	Auflast	W <sub>stat</sub> (ABAQUS)	W <sub>stat</sub> (Versuch)	W <sub>stat,Ende</sub> (ABAQUS)	W <sub>stat,Ende</sub> (Versuch)
[mm]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
		2-fac	ch VSG		
2/6 TVG-PVB	119	-9,12	-9,40	-35,15	-36,32
2/6 TVG-SGP	119	-3,27	-3,51	-34,71	34,01
2/10 ESG-SGP	332	-2,21	-2,83	-19,68	-20,50
		3-fac	ch VSG		
4/6/4 TVG-SGP	332	-4,79	-5,65	-13,86	-13,12
4/6/4 ESG-SGP	332	-4,79	-4,86	-13,86	-13,80
4/6/4 ESG-SGP	450	-6,51	-7,69	-18,63	-19,60

Taballa 5 1, Statianha	Baraabaungan		und im Vorough
Tabelle 5-1. Statische	Derechnungen	III ADAQUS	und im versuch

In Abbildung 5-11 ist der Vergleich der Durchbiegungen vor bzw. nach dem Bruch graphisch dargestellt.





Aus der Tabelle geht hervor, dass die Ergebnisse insgesamt gut übereinstimmen. In der Regel sind die in ABAQUS ermittelten Durchbiegungen etwas kleiner als die im Versuch bestimmten. Dieser Unterschied kann auf mehrere Parameter zurückgeführt werden, unter anderem auf die Differenz zwischen Soll-Dicke und Ist-Dicke. Wird die Ersatzsteifigkeit aus den Versuchen zur Ermittlung der Durchbiegung bzw. der seitlich Verschiebung herangezogen, so ist auch hier ein leichter Unterschied zu erkennen.

	WZustand I	WZustand II	WZustand III	WZustand IV	Wzustand V
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Versuch	0,2	0,07	39,91	20,6	11,80
FE-Modell	0,2	0,06	38,8	19,7	10,9

Tabelle 5-2: Zustände I-V numerisch berechnet im Vergleich zu den Versuchsergebnissen

Bei den dynamischen Berechnungen wurden zunächst die Eigenfrequenzen ermittelt und mit den Eigenfrequenzen aus dem Versuch abgeglichen. Für die PVB-Folie wurde hier die gleiche Steifigkeit gewählt wie für die SGP-Folie, da sich die PVB-Folie nach Abschnitt 2.2.2 bei einer dynamischen Belastung versteift und der Schubmodul deutlich größer ist als im statischen Zustand. Abbildung 5-12 zeigt die Darstellung von ABAQUS bei der Ermittlung der Eigenfrequenz.





Abbildung 5-12: Zustand I= 46,06 Hz (oben, links), Zustand II= 11,73 Hz (oben, rechts), Zustand IV= 4,23 Hz (unten, links), Zustand V= 33,49 Hz (unten, rechts)

Der Vergleich zwischen numerisch und experimentell ermittelten Ergebnissen ist in Tabelle 5-3 für den intakten Querschnitt und in

Tabelle 5-4 für den gebrochenen Querschnitt dargestellt.

Scheibenaufbau	Auflast	fzstd I (FE)	fz <sub>std I</sub> (Test)	fzstd II (FE)	fzstd II (Test)
[mm]	[kg]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
		2-fac	ch VSG		
2/6 TVG/PVB	119	30,08	30,47	9,73	9,20
2/6 TVG/SGP	119	30,08	27,79	9,73	9,44
2/10 ESG/SGP	332	46,06	45,45	11,73	10,96
3-fach VSG					
4/6/4 TVG-SGP	332	38,49	35,64	7,94	7,58
4/6/4 ESG-SGP	332	38,49	36,49	7,94	7,55
4/6/4 ESG-SGP	450	38,49	34,12	6,86	6,39

|--|

#### Tabelle 5-4: Eigenfrequenzen Zustand IV und Zustand V beim gebrochenen Querschnitt

Scheibenaufbau	Auflast	EF zstd IV (FE)	EF zstd IV (Test)	EFzstd v (FE)	EF zstd v (Test)
[mm]	[kg]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
		2-fac	ch VSG		
2/6 TVG/PVB	119	3,10	3,16	15,58	15,94
2/6 TVG/SGP	119	3,10	3,17	17,15	16,46
2/10 ESG/SGP	332	3,93	4,12	29,96	28,90
3-fach VSG					
4/6/4 TVG-SGP	332	4,74	4,94	33,30	30,04
4/6/4 ESG-SGP	332	4,74	5,05	33,43	30,86
4/6/4 ESG-SGP	450	4,09	3,90	34,95	30,30

Insgesamt ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den numerisch und den experimentell ermittelten Versuchsergebnissen zu erkennen. Lediglich bei den 3-fach-VSG-Scheiben sind die Werte für Zustand V im numerischen Modell konstant größer als im Versuch. ine graphische Darstellung des Vergleichs für alle Probekörper ist in Abbildung 5-13 zu sehen. Befindet sich ein Punkt über der Ideallinie, so war die in ABAQUS ermittelte Eigenfrequenz größer als im Versuch, befindet sich ein Punkt unter der Ideallinie, so war die in ABAQUS ermittelte Eigenfrequenz kleiner als im Versuch.



Abbildung 5-13: Graphische Darstellung des Eigenfrequenzvergleichs

Über die Biegeträger- und Knickuntersuchungen hinaus, wurden zudem Untersuchungen an 2fach und 3fach Laminaten mit seitlichem Impuls simuliert. Auch an diesen wurde entsprechend des statisch bemessenen Querschnitts die Kopfmasse angebracht sowie eine Vorimperfektion eingestellt und mit unterschiedlichen Impulsen seitlich ausgelenkt. Die Anfangsdurchbiegung die durch die Aufgebrachte Kopfmasse vorhanden ist, ist aufgrund der Höhe des resultierenden Impulses, besonders bei dem 2fach Laminat, nicht gut erkennbar, dennoch sei gesagt, dass eine seitliche statische Verschiebung infolge der Kopfmasse berücksichtigt wurde. Sowohl die Ersatzsteifigkeit als auch die ermittelten Dämpfungen aus dem Versuch bei entsprechendem Scheibenaufbau wurden zur Erzeugung der Kurven angesetzt.

Besonders ist darauf hinzuweisen, dass bei dem 2fach Laminat keine deutliche Ausprägung des Impulses zu sehen ist, was auf eine viel zu Auslenkung des Systems zurückzuführen ist, was somit auf ein weicheres System hindeutet als im Vergleich zu dem Abklingverlauf des 3fach Laminats, bei dem der aufgebrachte Impuls deutlicher zu sehen ist.



Abbildung 5-14: Schwingungsverläufe mit variierendem Impuls, 2fach Querschnitt



Abbildung 5-15: Schwingungsverläufe mit variierendem Impuls, 3fach Querschnitt

Ein weiteres Phänomen was zumindest bei den Versuchen beobachtet werden konnte ist ein entstehender Versatz bei Bruch des Querschnitts. Im Folgenden wird ein Ansatz zur Simulation des Bruch und ein sich dabei einstellender Versatz der Schwingung vorgestellt.

Die maximale dynamische Durchbiegung ist aufgrund des während des Bruchmomentes entstehenden Versatzes nach Kapitel 4.3.5 geringer, als es das Modell bei einer normalen Simulation berechnen würde. In Kapitel 4.3.5 wird davon ausgegangen, dass der Schwingungsprozess nicht bei  $x_{stat}$  beginnt, sondern bei  $x_{stat} + S_{abs}$ . Um den Versatz bestimmen zu können, wird Gleichung ((5-11) herangezogen:

$$S_{rel} = 1 - \frac{DLF_W - 1}{e^{-\frac{\pi D}{\sqrt{1 - D^2}}}}$$
(5-11)

Der relative Versatz bildet das Verhältnis vom absoluten zum maximal möglichen Versatz.

$$S_{rel} = \frac{S_{abs}}{x_{stat,End} - x_{stat}}$$
(5-12)

Durch Umstellen der Gleichung nach Sabs kann der absolute Versatz ermittelt werden:

$$S_{abs} = S_{rel} \cdot (x_{stat,End} - x_{stat}) \tag{5-13}$$

Als Beispiel wird im Folgenden eine 2x6 mm TVG Scheibe mit SGP-Folie betrachtet. Abbildung 5-16 zeigt den Schwingungsverlauf nach dem Bruch.



Abbildung 5-16: Gedämpfte Schwingung mit Versatz für eine 2x6 mm TVG-Scheibe mit SGP-Folie

Nach Kapitel 4.3 beträgt der Versatz für 2x6 mm TVG mit SGP-Folie  $S_{rel} = 0,27$ . Der absolute Versatz beträgt somit:

$$S_{abs} = 0.27 \cdot (34.01 - 3.51) = 8.24 \, mm \tag{5-14}$$

Um den Versatz zu simulieren, wird in ABAQUS ein Step "Versatz" eingefügt. Bei diesem Step wird in der Mitte der Scheibe ein zusätzliches Linienlager angebracht, welches um den Versatz nach unten verschoben und der Querschnitt der Scheibe verringert wird. Im nächsten Step

"Bruch" wird das Linienlager deaktiviert, sodass die Schwingung vom Punkt  $x_{stat} + S_{abs}$  beginnt. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 5-17 dargestellt.



#### Abbildung 5-17: Einzelne "Steps" in ABAQUS zur Simulation des Bruchs

Da es sich um eine dynamisch implizite Rechnung handelt, müssen die Dämpfungsparameter  $\alpha$  und  $\beta$  nach Gleichung (5-7) und (5-8) bestimmt werden. Das Dämpfungsmaß  $\xi$  beträgt in dem Beispiel  $\xi = 0,0082$ . Zur Berechnung des Parameters  $\beta$  werden außerdem die ersten beiden Eigenfrequenzen benötigt, welche zuvor mit ABAQUS bestimmt wurden:

$$f_1 = 3,02 Hz$$
 und  $f_2 = 11,51 Hz$  (5-15)

$$\rightarrow \qquad \beta = \frac{\xi}{\pi \cdot (f_1 + f_2)} = \frac{0,0082}{\pi \cdot (3,02 + 11,51)} = 0,000180 \tag{5-16}$$

$$\rightarrow \qquad \alpha = 4\pi^2 f_1 f_2 \beta = 4\pi^2 \cdot 3,02 \cdot 11,51 * 0,000180 = 0,2470 \tag{5-17}$$

Die beiden Parameter sind materialspezifisch und werden für alle Bestandteile des Biegeträgers definiert. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 5-18 dargestellt. Abbildung 5-19 zeigt die Überlagerung der Verläufe aus Versuch und FE-Modell.



Abbildung 5-18: Ergebnis der Bruchsimulation in ABAQUS



Abbildung 5-19: Überlagerung der Verläufe aus Versuch und ABAQUS

Scheibenaufbau	W <sub>stat</sub>	W <sub>dyn</sub>	W <sub>stat,End</sub>
2x6 mm TVG-SGP	[mm]	[mm]	[mm]
Versuch	-3,39	-54,86	-33,49
ABAQUS	-3,25	-53,82	-33,67

Tabelle 5-5: Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse von Versuch und ABAQUS

Die drei zur Berechnung des DLF notwendigen Durchbiegungen  $x_{stat}$ ,  $x_{dyn}$  und  $x_{stat,End}$  werden bei der Simulation korrekt ermittelt. Damit ist es möglich, die Versuche im FE-Modell realitätsnah abzubilden.

# 5.3 Bemessungsrelevante Einflussparameter auf den Stoßfaktor

Anhand der durchgeführten Untersuchungen lassen sich Parameter ableiten die einen Maßgeblichen Einfluss auf den Stoßfaktor infolge Querschnittsausfall haben. Zunächst wird der lineare Ansatz verfolgt und mit diesem in Abhängigkeit des Dämpfungmaßes, einer definierten Vorimperfektion und dem Verhältnis der aufgebrachten Kopfmasse ein Zusammenhang hergestellt. In Fall 1 wird der Stoßfaktor über das Verhältnis der Kopfmasse für verschiedene Dämpfungsmaße aufgetragen. Hier zeigt sich ein, wie zu erwartender, deutlicher Einfluss des Dämpfungmaßes und eine Unabhängigkeit der Kopfmasse. In einem zweiten Fall wird der Stoßfaktor unter Berücksichtigung einer Variation von Kopfmassenverhältnissen aufgetragen. Auch hier zeigt sich, dass der Stoßfaktor im Wesentlichen von der Dämpfung abhängig ist. Wie bereits bei den Biegeträgern beobachtet, ist auch hier, unter Berücksichtigung eines linearen Systemverhaltens eine klare Abhängigkeit des Stoßfaktors von der Dämpfung vorhanden. Wendet man nun diesen Ansatz, auf die durchgeführten Versuche an und vergleicht diese miteinander zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.







Abbildung 5-21: Stoßfaktor bei Variation des Kopfmassenverhältnisses, linearer Ansatz

Erweitert man nun diesen Ansatz und betrachtet die Nichtlinearität des Systems und wendet anschließend die oben beschriebenen Eingangsparamater an, so ist zu beobachten, dass bis zu einem Verhältnis der Kopfmasse von 0,5 nur ein Einfluss der Dämpfung zu beobachten ist. Ab einem Kopfmassenverhältnis von 0,6 stellt sich dieser zusätzliche Einfluss ein (siehe Abbildung 5-22). Es wird somit deutlich, dass das Kopfmassenverhältnis als weiterer Einfluss auf den Stoßfaktor festzustellen ist. Dasselbe Verhalten ist somit auch beim Vergleich mit der Variation der Kopfmassenverhältnisse zu beobachten (siehe Abbildung 5-23).



Abbildung 5-22: Stoßfaktor bei Variation des Dämpfungsmaßes, nichtlinearer Ansatz





### 5.4 Zusammenfassung und Fazit der numerischen Untersuchungen

Die Durchgeführten Berechnungen konnten die Versergebnisse sehr gut wiedergeben. Besonders die zur Kalibrierung herangezogenen Eigenfrequenzen für die Zustände I-V haben eine gute Übereinstimmung gefunden. Im weiteren Verlauf konnten anhand der am Institut entwickelten Berechnungssoftware numerische Berechnungen durchgeführt werden und die besonders dir für das Gesamtergebnis notwendigen Stoßfaktoren in Abhängigkeit der Dämpfung sowie Kopfmasse ermittelt werden.

### 6 Robustheitskonzept und Bemessungsregeln

Die Bemessung und Konstruktion von Bauteilen aus Glas für den Einsatz als sekundär tragendes Bauteil ist zurzeit auf nationaler Ebene in DIN 18008 [DIN18008a] Teile 1 – 6 geregelt. Über die Bemessung hinaus werden hier auch Regeln für die Resttragfähigkeit von zerstörten Querschnitten unter Betrachtung von statischen Gegebenheiten gegeben. Primär tragende Bauteile aus Glas werden in den nationalen Normen bislang noch nicht berücksichtigt. Dies aus darauf zurück zu führen, dass genau hier Regeln für die Ausbildung von "robusten" bzw. "schadenstoleranten" Querschnitten und Bauteilen fehlen, besonders bei Berücksichtigung eines Querschnittsausfalls und der dynamischen Zusatzbelastung auf den Restquerschnitt. Genau hier setzt das Bemessungskonzept an, nämlich zunächst Robustheitskonzepte zu erstellen und zum anderen Regeln zur Bemessung vorzustellen.

# 6.1 Robustheit für primär tragende Bauteile aus Glas

Regeln für die Robustheit und Schadenstoleranz für primärtragende Bauteile aus Glas müssen so konzipiert werden das eine ganzheitliche Betrachtung gewährleistet werden kann. Zum einem sollte über die Betrachtung des zu bemessenden Querschnitts hinaus auch die Betrachtung des Gesamttragwerks Berücksichtigung finden. Robuste und schadenstolerante primär tragenden Bauteile aus Glas können durch die folgenden Merkmale definiert sein:

**Tragwerksredundanzen.** Schaffung von Tragmechanismen, die bei Ausfall eines Bauteils aktiviert werden und Gesamtversagen verhindern. (Bereitstellung alternativer Lastpfade oder Isolierung kollabierender Bereiche)

**Querschnittsredundanzen.** Wahl von VSG mit einem geeigneten Querschnittsaufbau (Glas und duktile Zwischenschichten), so dass bei Ausfall einer Glasschicht die restlichen Schichten Lasten übernehmen können. Dazu gehört auch die Wahl einer Vorspannung der Scheiben so, dass ausreichend große Bruchstücke nach Bruch verzahnt und im Folienverbund resttragfähig bleiben. Dieses Redundanzmerkmal geht hier über das für sekundäre Bauteile hinaus. Denn bei primären Bauteilen muss sich die Resttragfähigkeit auch auf die zu tragenden Bauteile und ihre Belastung erstrecken, nicht nur auf das betrachtete Bauteil selbst.

Das Sicherheitsniveau kann beim Einsatz von TVG und Betrachtung des Nachbruchverhaltens sehr hoch eingestuft werden. Hier spielt besonders die Betrachtung der Bemessungslast auf den Restquerschnitt eine wichtige Rolle. Denn diese führt zwar zu einer schlagartigen Erhöhung der Spannung allerdings nicht zu einer Verringerung der Ersatzsteifigkeit des Gesamtquerschnitts nach Bruch, anders als bei ESG bei dem ein vollständiges Versagen des zerstörten Querschnitts führt. Hier ist zwar zu bedenken, dass ESG eine höhere Bruchspannung hat, allerdings im Versagensfall zu einer Erhöhung der Spannungen wie oben beschrieben.

Bei diesen zuvor genannten Ansätzen ist zudem Zustand vor und nach Bruch zu untersuchen und entsprechende Redundanzen geschaffen werden.



Abbildung 6-1: Stoßfaktor bei Variation des Dämpfungsmaßes, nichtlinearer Ansatz

Schutz der tragenden Querschnittsteile vor hartem Stoß oder Schlag. Die tragenden Kernscheiben des VSG-Verbunds sind vor dem Einschlag eines harten Gegenstands zu schützen. Wie bei sekundären Bauteilen geschieht dies in der Fläche durch Anordnung von geeigneten Deckschichten. Die Kante der tragenden Schichten sollte – je nach Einsatz – ebenfalls vor Einschlag geschützt werden. Im Gegensatz zu sekundären Bauelementen sind hier die Anforderungen an diese Schutzmaßnahmen i.d.R. höher.

Verhinderung von Glas-Stahl-Kontakt. Es ist nicht nur ein unplanmäßiger Kontakt von Glas mit harten Materialien zu verhindern, sondern auch die Einleitung von Lasten muss über lastverteilende und Spannungsspitzen abbauende dauerhafte Mörtel- und Kunststoffschichten erfolgen.

Schutz von Personen vor Splitterwirkung. Im Falle eines Bauteilversagens dürfen keine gefährlichen Glasscherben oder Bruchstücke zu Boden fallen oder Personen gefährden, analog zu sekundären Bauteilen.

# 6.2 Ansätze für die Beurteilung der Schichten

Eine weitere Betrachtung kann auf Querschnittsebene stattfinden, hier wurden bereits im Rahmen der durchgeführten Versuche und anschließend über die Analytik und Numerik Stoßfaktoren bestimmt, die eine Spannungserhöhung im Restquerschnitt bei Querschnittsausfall verursachen. Diese können in Abhängigkeit des Querschnittsaufbaus und der daraus resultierenden Dämpfung bei Ausfall, sowie der Querschnittsabhängigen Belastung bestimmt werden.

$$y_{0,stat} = \frac{Y}{n} \tag{6-1}$$

$$y_{I,stat} = \frac{Y}{(n-1)} \tag{6-2}$$

$$y_{I,dyn} = 2 \cdot y_{I,stat} - y_{0,stat} = \frac{n+1}{n \cdot (n-1)} \cdot Y$$
 (6-3)

$$y_{0,stat} / y_{0,stat}$$
 (6-4)

n	Y <sub>l,dyn</sub> / Y	Yl,dyn / Y0,sta
1	Einsturz	unendlich
2	1,50	3,00
3	0,667	2,00
4	0,417	1,667
5	0,300	1,50
6	0,233	1,40
7	0,191	1,33
8	0,161	1,285
9	0,139	1,250
10	0,122	1,222

#### Tabelle 6-1: Beurteilung der Sicherheit über n-Queschnitte

Unter der Voraussetzung, dass das System vor Bruch (Zustand II) und nach Bruch (Zustand III) ähnlich ist und z.B. eine affine Verformung aufweist, können die Schnittgrößen für das dynamische Maximum wie folgt berechnet werden:

$$w_{I,dyn} = \phi \cdot w_{I,stat} - w_{I,stat} \tag{6-5}$$

Dies setzt zudem voraus, dass die Eingangsparameter wie die Vorimperfektion, sowie die kritische Kopfmasse und die Dämpfung des Systems bekannt sind.

Möchte man stattdessen einen Parameter unabhängigen Stoßfaktor bei der Bemessung ansetzen und dies auf der Grundlage von linearen Berechnungen durchführen, so können die Stoßfaktoren mit einem 95% Quantilwert von  $\phi$ =1,9 angesetzt werden. Robustheit nach verschiedenen Ansätzen

Bei der Charakterisierung der Robustheit sind Materialunabhängige Ansätze bereits vorhanden. Diese müssen allerdings in die glasbauspezifischen Fragestellungen überführt werden. Durch die im Vorfeld vorgestellten Energiebetrachtungen können zum Beispiel Robustheitsindizes für die Bemessung hinzugezogen werden. Betrachtet man die Robustheit über einen materialspezifischen Ansatz kann dieser über die Materialzähigkeit definiert werden. So dass der entsprechende Robustheitsindex die folgende Abhängigkeit aufweist:

$$i_R = \frac{K_{ic,mat}}{K_{appl}} \tag{6-6}$$

Über die Materialzähigkeit hinaus kann ein Robustheitsindex ebenfalls über den Ansatz unendlicher Schichten und Zwischenschicht, erstellt werden.

$$i_R = \frac{K_{ic,n}}{K_{ic,mat}}, \quad 1 \le n \le \infty.$$
(6-7)

Hier spielt zusätzlich zum materialspezifischen Spannungsintensitätsfaktor  $K_{ic,mat}$  ein Schichten abhängiger Spannungsintensitätsfaktor  $K_{ic,n}$  eine wichtige Rolle.

#### 6.3 Fazit

Bei der Erzeugung der Robustheit können einige Methoden herangezogen werden, während mit der einen Methode die Robustheit gewährleistet wird, können mit weiteren Methoden die Robustheit definiert und bei der Bemessung angesetzt werden. Grundsätzlich kann aber festgehalten werden, dass für die Robustheit im Konstruktiven Glasbau eine ganzheitliche Betrachtung notwendig ist.

### 7 Zusammenfassung und Fazit

Die Bemessung von primär tragenden Bauteilen aus Glas ist sowohl in nationalen als auch in europäischen Normen bislang noch nicht geregelt. Aufgrund der immer größer werdenden Nachfrage nach mehr Transparenz im Konstruktiven Glasbau, stellt sich zudem die Frage nach der Möglichkeit Glas als primär tragendes Element zu verwenden. Hierzu fehlen Regeln für die Ausbildung allerdings bislang von robusten beziehungsweise schadenstoleranten Querschnitten und Bauteilen in primär tragenden Einsätzen, obwohl deutliche Fortschritte im Rahmen von bereits durchgeführten Untersuchungen, in Hinblick auf die Berechnung und Bemessung von insbesondere stabilitätsgefährdeten Bauteilen erzielt wurden. Jedoch haben die bislang durchgeführten Untersuchungen eins gemeinsam: zum einen wurden diese nur auf der Grundlage von statischen Betrachtungen durchgeführt, zum anderen wurde der plötzliche Ausfall einer oder mehrerer Glasschichten eines Verbundquerschnitts nicht berücksichtigt. Es ist besonders festzuhalten, dass die Robustheit und Schadenstoleranz besonders für den Konstruktiven Glasbau aufgrund der Sprödheit des Baustoffs ein wichtiger Baustein bei der Bemessung ist. Deshalb sollten Ansätze, welche die Robustheit im Konstruktiven Glasbau beschreiben, in allen Bemessungssituationen (vor, während und nach einem lokalen Schadens- bzw. Versagensereignis) Berücksichtigung finden.

Das Ziel der vorgestellten Forschungsarbeiten war es deshalb, zunächst das Verhalten des Querschnittsausfalls bei primär tragenden Bauteilen aus Glas zu untersuchen und zu beschreiben, um anschließend Regeln für robuste und schadenstolerante abzuleiten, sodass die Stoßreaktion in der Folge von ausfallenden (Schutz-) Glasschichten nicht zu einer Überbelastung der tragenden Glasschichten und somit zu einem Versagen der Gesamtstruktur führt. Anhand der durchgeführten Versuchsreihen in diesem Forschungsvorhaben, wurde der plötzliche Querschnittsausfall simuliert und die notwendigen statischen sowie dynamischen Parameter zur Charakterisierung des Ausfalls ermittelt. Die hierfür entwickelten Dämpfungsexperimente wurden an quer- und längsbelasteten Probekörpern durchgeführt. Die Versuche an den Tragelementen Biegeträger, Stützen und Schubfeld wurden zudem unter Variation der Abmessungen, der Glasaufbauten sowie der Glas- und Folienart durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren wurde eine umfangreiche Versuchsmatrix mit unterschiedlichen Kombinationen aufgestellt, was den Rückschluss der Stoßfaktoren auf die verschiedenen Einflussparameter geben kann. Aus den durchgeführten Versuchen konnte somit die effektiven Stoß-, Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte ermittelt werden. Der besonders für die Bemessung relevante Stoßfaktor konnte bei den Versuchen aufgrund der unterschiedlichen Versuchsparameter in einem Bereich von  $\phi = 1,4 - 2,0$  bestimmt werden. Hier ist eine klare Abhängigkeit in Bezug auf die Glasart zu erkennen. Während bei der Glasart ESG die Auslenkungen sowie die Spannungen auf den Restquerschnitt übertragen wurden, war bei der Glasart TVG ein solches Verhalten nur geringfügig zu beobachten. Dies lässt sich auf einen guasiintakten Restguerschnitt, nach eigentlichem Bruch einer Schicht, i.d.R. in Form eines horizontal verlaufenden Risses, zurückführen. Der Ausfall des Querschnitts wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens mit und ohne Queranprall untersucht. In einem nächsten Schritt wurde an den großmaßstäblichen Probekörpern ein definierter seitlicher Impuls aufgebracht welcher gleichzeitig, aufgrund eines angebrachten Körners, zu einem Querschnittsausfall der angeschlagenen Schicht führt. Auch hier hat sich gezeigt, dass eine zusätzliche Spannungserhöhung im Restquerschnitt aufgetreten ist. Trotz der in allen Fällen beobachteten Spannungserhöhung durch den schlagartigen Ausfall des Querschnitts und somit eine Lastumlagerung auf den verbleibenden Querschnitt, kam es lediglich bei einer geringen Anzahl an Versuchskörpern zu einem Gesamtversagen. Insgesamt konnte festgehalten werden, dass dir Durchführung der Versuche zu sehr guten Ergebnissen geführt hat.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein numerisches Modell entwickelt, was den plötzlichen Ausfall eines Querschnitts simuliert. Durch die Implementierung der im Versuch ermittelten Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte sowie der Eigenfrequenzen in den Zuständen I-V konnte das Modell kalibriert werden. Es konnte zudem der bei den Biegeträgern beobachtete Versatz nachgebildet und für die Herleitung von einem, zusätzlich zur Dämpfung, versatzabhängigen Stoßfaktor bestimmt werden. Durch die anschließenden analytischen sowie numerischen Parameterstudien konnte die Abhängigkeit des Stoßfaktors ermittelt werden. Der für die Bemessung relevante Stoßfaktor ist demzufolge in erster Linie von der Dämpfung des Systems, und somit vom Restquerschnitt und Bruchbild abhängig. Zudem ist eine Abhängigkeit des Verhältnisses der aufgebrachten Masse in Verbindung der angesetzten Vorimperfektion vorhanden. Abschließend kann zusammengefasst werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchen und Numerik erzielt wurde.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Grundlage zur Schaffung robuster bzw. schadenstoleranter primärer Glasbauteile geschaffen werden konnte. Hierzu wurden die relevanten Parameter wie der Stoßfaktor in Abhängigkeit von Querschnittseigenschaften ermittelt. Neben konstruktiver Schutzanordnungen zielt die Robustheitsmachung auf die rechnerische Vorhersage und Absicherung der Vorgänge bei Bruch einer oder mehrere Glasschichten. Dabei sind Schadens- oder Versagensereignisse mit oder ohne Querstoßbeanspruchungen zu betrachten.

### Literaturverzeichnis

[Aba14]	Abaqus 6.14: Finite Elemente Software zur Lösung linearer und nichtlinearer Probleme der Strukturanalyse, Wärmeleitung, Dynamik und Akustik, 3DS Simulia, 2014.
[Big64]	Biggs, J. M., Introduction to structural dynamics, McGraw-Hill, New York, 1964
[Boh99]	Bohmann, D.: Ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verbundglasscheiben. Dissertation, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, Shaker- Verlag, Heft 43, Aachen, 1999
[Bre01]	Breckner, W.: Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas unter Stoßbelastung nach DIN EN 12600, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen. Diplomarbeit 2001
[Bre07]	Brendler, S.: Rechnerisches Bemessungskonzept für absturzsichernde Glastafeln. Dissertation, Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk – Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2007
[BS5950]	BS5950: Structural use of steelwork in building; Part 1: Code of practice for design - Rolled and welded sections, 2001
[Col17]	Colomer Segura, C.: Reduced order Modelling of steel beams and columns for analysis against accidental actions. Dissertation, Schriftenreihe Stahlbau RWTH Aachen, Heft 80, Shaker Verlag 2017
[Del08]	Delincé, D., et. al.: "Post-breakage behaviour of laminated glass in structural applications". Challenging Glass 2008
[Dib19]	Di Biase, P.: "Robustheit und Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas", unveröffentlichte Dissertation, Institut für Stahlbau, RWTH Aachen
[Dibt10]	Anforderungen an begehbare Verglasungen: Empfehlungen für das Zustimmungsverfahren (Fassung März 2009). DIBt Mitteilungen 1/2010
[DIN1055a]	DIN 1055-9:2006: Einwirkungen auf Tragwerke – Außergewöhnliche Einwirkungen
[DIN1055b]	DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln
[DIN12600]	DIN EN 12600:2003-04: Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas; Deutsche Fassung EN 12600:2002
[DIN18008a]	DIN 18008: Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregelungen, T-1 bis 6

[DIN18008b]	DIN 18008: Glas im Bauwesen-Bemessungs- und Konstruktionsregeln, T-7: Sonderkonstruktionen
[EN12600]	DIN EN 12600:2003-04: Glas im Bauwesen – Pendelschlagversuch – Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas, 2003
[EN16612]	DIN EN 16612:2017-05 – Glas im Bauwesen - Bestimmung des Belastungswiderstandes von Glasscheiben durch Berechnung und Prüfung; Deutsche und Englische Fassung prEN 16612:2017, 2017, Entwurf
[EN16613]	Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbundsicherheitsglas - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Zwischenschichten; Deutsche und Englische Fassung prEN 16613:2017, 2017, Entwurf
[EN1863]	DIN EN 1863-1:2012-02-00: Glas im Bauwesen - Teilvorgespanntes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung
[EN1990]	DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung EN 1990:2002, 2002
[EN1991]	EN 1991-1-7: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen. Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006, 2006
[Ens05]	Ensslen, F.: "Zum Tragverhalten von Verbund-Sicherheitsglas unter Berücksichtigung der Alterung der Polyvinylbutyral-Folie", Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2005
[ETB85]	ETB-Richtlinie: Bauteile, die gegen Absturz sichern. Beuth 1985 Berlin
[FEM03]	FEMA 427: Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terroristic Attacks. Risk Manage-ment Series, Federal Emergency Management Agency, 2003
[GSB18]	GS-BAU-18:2004-06: Grundsätze für die Prüfung und Zertifizierung der bedingten Betretbarkeit oder Durchsturzsicherheit von Bauteilen bei Bau und Instandhaltungsarbeiten
[Gün12]	Gündel, M.; Hoffmeister, B.; Feldmann, M.; Hauke, B.: Design of High Rise Steel Buildings against Terrorist Attacks. Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering 27, 2012, S. 369-383
[Hab07]	Haberland, M.: "Progressiver Kollaps und Robustheit", Diplomarbeit, Institut für Baustatik und Stahlbau, TU Hamburg-Harburg, 2007
[Kol12]	Kolling, S., Schneider, J., et al.: Deformations- und Bruchverhalten von Verbundsicherheitsglas unter dynamischer Beanspruchung. Stahlbau 81 (2012), Heft 3, S. 219-225

[Kot06]	Kott, A.: "Zum Trag- und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas". Dissertation ETH Zürich, 2006
[Lan12]	Langosch, K.: "Das Tragverhalten von Glasstützen mit Mono- und Verbundquerschnitten", Dissertation, Institut für Stahlbau, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2012
[Lie01]	Liess, J.: Bemessung druckbelasteter Bauteile aus Glas. Dissertation, Universität Kassel, 2001
[Lui04]	Luible, A.: Stabilität von Tragelementen aus Glas. Dissertation, EPFL Lausanne, 2004
[Mül78]	Müller, F. P.: Baudynamik, Betonkalender 1978, Ernst & Sohn, Berlin
[Nas15]	Nasdala, L.: "Formelsammlung Statik und Dynamik", Springer Vieweg, Munchen, 2015
[Pet96]	Petersen, C.: Dynamik der Baukonstruktionen, Vieweg Verlagsgesellschaft, März 1996, S. 901 - 903
[Ree18]	Stefanie Reese: Finite Element Technology. Lecture Notes: SS 2018. Aachen 2018
[Sac08]	Sackmann, V.: "Untersuchung zur Dauerhaftigkeit des Schubverbunds in Verbundsicherheitsglas mit unterschiedlichen Folien aus Polyvinylbutyral", Dissertation, Lehrstuhl für Metallbau, TU München, 2008
[Sch01]	Schneider, J.: Festigkeit und Bemessung punktgelagerter Gläser und stoßbeanspruchter Gläser. Dissertation, Institut für Statik – Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2001
[Sch02]	Schneider, J.; Bohmann, D.: Glasscheiben unter Stoßbelastung – Experimentelle und theoretische Untersuchungen für absturzsichernde Verglasungen bei weichem Stoß. Bauingenieur 77 (2002), S. 581–592
[Sch03]	Schneider, J., Burmeister, A., Schula, S.: Zwei Verfahren zum rechnerischen Nachweis der dynamischen Beanspruchung von Verglasungen durch weichen Stoß. Stahlbau-Spezial 2011 – Glasbau (2011), S. 81–92
[SIA260]	SIA 260SN 505260: Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, 2013
[Sie99]	Siebert, G.: "Beitrag zum Einsatz von Glas als tragendes Bauteil im konstruktiven Ingenieurbau". Dissertation Technische Universität München 1999
[Sta05]	Starossek, U.: Progressiver Kollaps von Bauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 4, 2005, S. 305-317

[Wei00]	Weiler, HU.: Versuchsergebnisse und Stand der Entwicklung eines Bemessungskonzepts für druckbeanspruchte Glasbauteile. VDI Berichte Nr. 1527. Bauen mit Glas. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2000
[Wel06]	Wellershoff, F.: Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen. Dissertation, Schriftenreihe Stahlbau RWTH Aachen, Heft 57, Shaker Verlag 2006
[Wöl06]	Wölfel, H.: "Umdruck zur Vorlesung Maschinendynamik", Skript, TU Darmstadt, 2006
[Wör00]	Wörner, J.; Schneider, J.: Abschlussbericht zur experimentellen und rechnerischen Bestimmung der dynamischen Belastung von Verglasungen durch weichen Stoß. Forschungsbericht, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Darmstadt, 2000
[Yan12]	Yang, J., et al: "Post-breakage strength of glass used as a structural material". Glass Performance Days 2012

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Zu Schubmodul (obe schematische Da DMA-Analyse (re	usammenhang zwischen Speichermodul, Verlustmodul und komplexem en, links); Phasenverschiebung einer DMA-Analyse (unten, links) und Irstellung eines Zustandsdiagramms amorpher Thermoplaste gemäß der chts) [Lan12]	12
Abbildung 2-2	Nachweise von Sekundärbauteilen während und nach Stoß (Beispiele)	18
Abbildung 3-1: Ve	ereinfachtes Federsystem	23
Abbildung 3-2: Ve Rechteckstoß (re	ergleich zwischen Sprungfunktion (links) bzw. Rampenfunktion (Mitte) und chts)	24
Abbildung 3-3: In	nere und äußere Kräfte am ausgelenkten Einmassenschwinger	24
Abbildung 3-4: ge Versatz	edämpfte Schwingung unmittelbar nach Lastaufbringung (bzw. Bruch) ohne	∍ 25
Abbildung 4-1	Anordnung der Messtechnik für querbelastete Träger	27
Abbildung 4-2	Anordnung der Messtechnik für Stützen mit seitlichen Impuls	28
Abbildung 4-3	Anordnung der Messtechnik für Schubfeldversuche	28
Abbildung 4-4: Vo Biegeträger	orgehensweise bei der Berechnung der Ersatzhöhen für den gebrochenen	34
Abbildung 4-5: Ei	satzhöhen 2x6 mm Scheiben	35
Abbildung 4-6: Er	satzhöhen 2x10 mm Scheiben	36
Abbildung 4-7: Er	satzhöhen 4/6/4 mm Scheiben	36
Abbildung 4-8: Ve	ergleich zwischen Zustand II und III bei 2x6 mm ESG	37
Abbildung 4-9: So	chwingungsverlauf am Beispiel einer 4/6/4 mm TVG-Scheibe mit PVB-Folio	э 38
Abbildung 4-10: N	Aittelwert aus den ersten beiden dynamischen Werten	39
Abbildung 4-11: A	Abklingkurve einer gedäpften Schwingung mit Versatz	39
Abbildung 4-12: \ Dämpfungen	/ergleich der dynamischen Lastfaktoren aus Durchbiegungen und	10
Abbildung 4-13: ( Versatz	Gedämpfte Schwingung unmittelbar nach Lastaufbringung (bzw. Bruch) mi	t 10
Abbildung 4-14: [	Oynamischer Lastfaktor infolge Dämpfung ohne Versatz Srel=0	12
Abbildung 4-15: [	Dynamischer Lastfaktor infolge Dämpfung mit verschiedenen Versatzwerte	n 12
Abbildung 4-16: E	Eingeprägte Durchbiegung nach dem Bruch einer Scheibe	14

Abbildung 4-17: Bruchbild von 2x6 mm ESG (oben, links), 2x6 mm TVG (oben, rechts), 2x10 mm ESG (unten, links), 2x10 mm TVG (unten, rechts)			
Abbildung 4-18: S Bruch [Kot06]	Schematische Darstellung der eingeprägten Durchbiegung infolge des		
Abbildung 4.19	Seitenansicht des Versuchsstands mit qualitativer Darstellung der		
seitlichen Auslenl	kung für den Zustand I (links ohne Wirkung der Kopfmasse), Zustand II		
(mitte, mit aufgeb	rachter Kopfmasse), Zustand III (rechts, nach Querschnittsausfall)49		
Abbildung 4.20:	Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: ESG 2-fach-		
Verbund (links), T	VG 2-fach-Verbund (rechts)50		
Abbildung 4.21:	Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: ESG 3-fach-		
Verbund (links), T	VG 3-fach-Verbund (rechts)50		
Abbildung 4.22:	Eigenfrequenzen ohne Last: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-		
VSG-Scheiben (r	echts)		
Abbildung 4.23:	Eigenfrequenzen mit Last: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-		
Scheiben (rechts)	53		
Abbildung 4.24:	Bruchbild ESG aus Versuch (links), Bruchbild TVG aus Versuch (rechts) 54		
Abbildung 4.25:	Eigenfrequenzen bei Bruch: 2-fach-VSG-Scheiben (links) und 3-fach-VSG-		
Scheiben (rechts)	55		
Abbildung 4.26:	Eigenfrequenzen im gebrochenen Zustand mit Last: 2-fach-VSG-Scheiben		
(links) und 3-fach	-VSG-Scheiben (rechts)57		
Abbildung 4.27:	Eigenfrequenzen im gebrochenen Zustand ohne Last: 2-fach-VSG-		
Scheiben (links) u	und 3-fach-VSG-Scheiben (rechts)59		
Abbildung 4.28:	Vergleich der Trägheitsmomente für die Zustände I und V (ohne Last)61		
Abbildung 4.29:	Trägheitsmomente für den Zustand III (mit Last)61		
Abbildung 4.30:	Vergleich der Trägheitsmomente für die Zustände II und IV (mit Last)61		
Abbildung 4.31:	Dynamische Lastfaktoren der ESG-Stützen63		
Abbildung 4.32:	Schwingung bei Bruch einer TVG-Stütze am Beispiel 2-11-a (links),		
Vergleich der Sch	nwingungen bei Bruch einer ESG- und einer TVG-Stütze mit ansonsten		
selben Querschni	itt (rechts)		
Abbildung 4.33:	Schwingung im Bruchzustand des Versuchskörpers 3-6-b		
Abbildung 4.34:	Spannungsverlauf bei Bruch des Versuchskörpers 2-7-a		
Abbildung 4-35: F	Pendelschlagversuch mit angebrachten Körner, links Prinzipskizze, mitte		
Versuchsstand	69		
Abbildung 4-36: A	Ausschwingverhalten für die Zustände I (links) und II (rechts)69		

Abbildung 4-37: A	Ausschwingverhalten für den Zustände III mit seitlichem Impuls70	)	
Abbildung 4-38: Ausschwingverhalten für die Zustände IV (links) und V (rechts)70			
Abbildung 4-39. E	Bruchbilder, links ESG imd rechts TVG71		
Abbildung 4-40.	Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: ESG mit PVB72		
Abbildung 4-41.	Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände: TVG mit PVB72		
Abbildung 4-42: S	Steifigkeiten im Zustand II ("mit Last")75	,	
Abbildung 4-43: S	Steifigkeiten im Zustand IV ("mit Last, gebrochen")75	)	
Abbildung 4-44: L	Intersuchte Stoßverläufe [Pet96] [Mül78]77	,	
Abbildung 4-45: 1 eines Einheitsimp	Theoretische Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB bei Ansatz oulses		
Abbildung 4-46: 1 eines Sinusstoße	Theoretische Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB bei Ansatz s79	,	
Abbildung 4-47: E	Beobachtete Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB79	)	
Abbildung 4-48: A	Ansatz einer abschnittsweise linearen Fußpunktverschiebung80	)	
Abbildung 4-49: 7 einer sinusförmig	Theoretische Auslenkung des Versuchskörpers 8/12/8 TVG-PVB bei Ansatz en Fußpunktverschiebung82		
Abbildung 4-50: 0	Geometrie und beispielhafter Aufbau der Probekörper [21]85	,	
Abbildung 4-51: 0	Geometrie des Stahlschuhs an der Kontaktstelle	;	
Abbildung 4-52: A	Ansicht des Versuchsstandes (links), Detailanschlüsse (rechts)87	,	
Abbildung 4-53: [	Detail Rahmenecke links oben87	,	
Abbildung 4-54: [	Detail Rahmenecke links unten88		
Abbildung 4.55:	Entwicklung der Eigenfrequenz über die fünf Zustände	,	
Abbildung 4.56: nicht fortschreiter	Bruchbilder nach Zustand III, ESG mit Schubdiagonalen (links), TVG mit nden Riss (rechts)90	,	
Abbildung 5-1:	8 Knoten Volumenelement		
Abbildung 5-2:	low order und quadratisches Element unter reiner Biegebelastung94		
Abbildung 5-3:	hourglass Moden für 2 dimensionale Rechteckelemente95	,	
Abbildung 5-4:	Bubble Mode96	i	
Abbildung 5-5: Übersicht über verschiedene Dämpfungsarten [Nas15]			
Abbildung 5-6: Biegeträger mit gleichverteilten Massesteinen			
Abbildung 5-7:	Abbildung Zusatzkonstruktion101		
Abbildung 5-8:	Abbildung ohne (links) und mit (rechts) Schlupfendbehinderung		

Abbildung 5-9:	Abbildung gesamte Assembly, Nahaufnahme Lagerung und Eulerstab .103
Abbildung 5-10: [	Durchbiegung eines Biegeträgers (links) und Stütze (rechts)104
Abbildung 5-11: \ (rechts)	/ergleich der Anfangsdurchbiegung (links) und der Enddurchbiegung 
Abbildung 5-12: 2 Zustand IV= 4,23	Zustand I= 46,06 Hz (oben, links), Zustand II= 11,73 Hz (oben, rechts), Hz (unten, links), Zustand V= 33,49 Hz (unten, rechts)106
Abbildung 5-13: (	Graphische Darstellung des Eigenfrequenzvergleichs107
Abbildung 5-14: S	Schwingungsverläufe mit variierendem Impuls, 2fach Querschnitt108
Abbildung 5-15: S	Schwingungsverläufe mit variierendem Impuls, 3fach Querschnitt108
Abbildung 5-16: ( SGP-Folie	Gedämpfte Schwingung mit Versatz für eine 2x6 mm TVG-Scheibe mit 
Abbildung 5-17: E	Einzelne "Steps" in ABAQUS zur Simulation des Bruchs
Abbildung 5-18: E	Ergebnis der Bruchsimulation in ABAQUS110
Abbildung 5-19: Ü	Überlagerung der Verläufe aus Versuch und ABAQUS111
Abbildung 5-20: S	Stoßfaktor bei Variation des Dämpfungsmaßes, linearer Ansatz112
Abbildung 5-21: S	Stoßfaktor bei Variation des Kopfmassenverhältnisses, linearer Ansatz112
Abbildung 5-22: S	Stoßfaktor bei Variation des Dämpfungsmaßes, nichtlinearer Ansatz 113
Abbildung 5-23: S	Stoßfaktor bei Variation des Dämpfungsmaßes, nichtlinearer Ansatz 113
Abbildung 6-1: St	oßfaktor bei Variation des Dämpfungsmaßes, nichtlinearer Ansatz 115

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Versuchsmatrix		
Tabelle 4-2: Übersicht der Probekörper		
Tabelle 4-3: D	urchschnittliche Eigenfrequenzen der Probekörper	.32
Tabelle 4-4: Er	rsatzhöhen aus den Eigenfrequenzen	.34
Tabelle 4-5: D	urchbiegungen und Dämpfungen sowie Stoßfaktoren	.37
Tabelle 4-6: Ve	ergleich zwischen PVB und SGP im statischen und im schwingenden Zusta	nd .43
Tabelle 4.7:	Übersicht der Probekörper	.47
Tabelle 4.8:	Durchbiegungen der Versuchskörper infolge Lastaufbringung	.52
Tabelle 4.9:	Ermittelte Durchbiegungen der VSG-Stützen	.54
Tabelle 4.10:	Prozentuale Verringerung der Eigenfrequenz bei Bruch für ESG-Scheiben	.56
Tabelle 4.11:	Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand IV und Zustand III	.56
Tabelle 4.12:	Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand V und Zustand IV-1	.58
Tabelle 4.13:	Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand V und Zustand IV-2	.58
Tabelle 4.14:	Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand I und Zustand V	.59
Tabelle 4.15:	Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand I und Zustand V	.60
Tabelle 4.16: Spannung und	Dynamische Lastfaktoren der ESG-Stützen über den Weg, über die I über die Dämpfung	.62
Tabelle 4.17: Restquerschni	Abhängigkeit des dynamischen Lastfaktors der Dämpfung von der Dicke d tts	es .63
Tabelle 4.18: Spannung und	Dynamische Lastfaktoren der TVG-Stützen über den Weg, über die I über die Dämpfung	.64
Tabelle 4.19:	Übersicht der Probekörper	.68
Tabelle 4-20: E	Ermittelte Eigenfrequenzen der ESG-Scheiben	.72
Tabelle 4-21: Ermittelte Eigenfrequenzen der TVG-Scheiben		
Tabelle 4-22: Beobachtete Auslenkungen der ESG-Scheiben		
Tabelle 4-23: Beobachtete Auslenkungen der TVG-Scheiben73		
Tabelle 4-24: Übersicht verwendeter Probekörper84		
Tabelle 4-25: Erweiterte Eigenschaften der Probekörper		
Tabelle 4-26: Eigenfrequenzverlauf für die Zustände I bis V		
Tabelle 4-27: E	Ersatzsteifigkeiten aus Eigenfrequenzen	.89

Tabelle 4-28: Durchbiegungen und Dämpfungen für den DLF9	1
Tabelle 5-1: Statische Berechnungen in ABAQUS und im Versuch         10	4
Tabelle 5-2: Zustände I-V numerisch berechnet im Vergleich zu den Versuchsergebnissen	
	5
Tabelle 5-3: Eigenfrequenzen Zustand I und Zustand II beim intakten Querschnitt10	6
Tabelle 5-4: Eigenfrequenzen Zustand IV und Zustand V beim gebrochenen Querschnitt .10	6
Tabelle 5-5: Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse von Versuch und ABAQUS11	1
Tabelle 6-1: Beurteilung der Sicherheit über n-Queschnitte	6

# Anhang A Übersicht Schlussbericht

# 1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Arbeitsschritt 1: Bestimmung von Lastszenarien

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Zusammenstellung der Last- und Ereignisphänomene	Wichtige Last- und Ereignisphänomene, die zu einem Glasschichtausfall oder Ausfall eines Glasbauteils führen, wurden ermittelt und zusammengestellt.
Ableitung von Auftretenswahrscheinlichkeiten von Schichtbruch mit und ohne Queranprall	Auftretenswahrscheinlichkeiten eines Schichtbruches mit und ohne Queranprall wurden abgeleitet. Schadensfolgeklassen dienen hier besonders zur Charakterisierung und Ableitung der Auftretenswahrscheinlichkeit.
Vorbereitung der Festlegung der anzusetzenden Lasten, Sicherheitskoeffizienten und Kombinationsbeiwerte	Anforderungen an Sicherheitsnachweise in Anlehnung an EN 1990 wurden aufbereitet und den jeweiligen Grenzzuständen zugeordnet.

Arbeitsschritt 2: Kennwertuntersuchungen

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Versuchsplanung, Festlegung der Versuchsführung, der Messtechnik und der Vorbelastung.	Die Versuchsplanung sowie die Wahl der Messtechnik sind abgeschlossen. Die Mittels der hier applizierten Messtechnik ermittelten Informationen sind elementar für die Bestimmung von Stoßfaktoren und der Analyse weiterer dynamischer Prozesse beim Glasschichtausfall.
Versuche an intakten Mono – und VSG Probekörpern zur Ermittlung des Eigenschwingverhaltens	Versuche an intakten Mono- sowie VSG-Probekörpern zur Ermittlung des Schwingverhaltens wurden durchgeführt und sind abgeschlossen.
Versuche an querbelasteten VSG- Querschnitten zur Ermittlung der Stoß- Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte	Für die Ermittlung der Stoß-, Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte wurden Versuche an querbelasteten VSG-Probekörpern durchgeführt. Diese sind abgeschlossen.
Auswertung der experimentellen Untersuchungen aus Arbeitspaket 2 (AP 2)	Die durchgeführten Untersuchungen wurden in Hinblick auf Stoß-, Dämpfungs- und Reststeifigkeitswerte ausgewertet und dienen als Voruntersuchungen für die in

AP 3 durchzuführenden Versuche. Die Auswertung der
querbelasteten Träger ist abgeschlossen.

### Arbeitsschritt 3: Bauteilversuche

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Versuchsplanung, Festlegung der Versuchsführung, der Messtechnik und der Vorbelastung. Berücksichtigung von Ergebnissen aus AP 2	Wie die Voruntersuchungen von AP 2 gezeigt haben, liefert die in AP 2 ausgewählte Messtechnik sehr gute Ergebnisse zur Bestimmung der maßgebenden Faktoren für die resultierenden dynamischen Prozesse, sodass ebenfalls in AP 3 DMS, Linearpotentiometer und Laser- Wegaufnehmer verwendet wurden.
Versuche an kleinmaßstäblichen VSG-Stützen ohne Seitenanprall unter Variation der Parameter gemäß Tabelle 3, Untersuchung der Übertragung der Ergebnisse hier mit denen aus AP 2 bzw. Kalibration	Anhand des neu entwickelten Prüfstandes, konnten an den kleinmaßstäblichen Probekörpern, sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Sowohl Stoßfaktoren als auch die gewünschten dynamischen Parameter konnten ermittelt werden. Diese Arbeiten waren die Grundlage für die großmaßstäblichen Knickversuche mit ausfallendem Querschnitt. Die Arbeiten sind abgeschlossen.
Versuche an großformatigen VSG- Stützen ohne Seitenanprall unter Variation der Parameter	Auch bei den großformatigen Probekörpern konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Voraussetzung war die Reduzierung der Lasten durch Änderung der zuvor geplanten Geometrie. Die untersuchten Probekörper sind als schlanke Stütze getestet worden. Die Arbeiten sind abgeschlossen.
Versuche an großformatigen VSG- Stützen mit Seitenanprall unter Variation der Parameter	Der hier zu untersuchende Gegenstand wurde in Anlehnung an die derzeit geltende Norm DIN 18008-4 durchgeführt. Hier wird mittels eines Zwillingsreifens der Probekörper einem kurzzeitigen seitlichen Impuls ausgesetzt, welcher nicht unbedingt zum Ausfall des Querschnitts führen muss. Um hier allerdings zu gewährleisten, dass es zum Ausfall des Querschnitts kommt, wurde am Zwillingsreifen ein Körner appliziert, welcher den Querschnitt, bei Berührung beschädigt. Die Arbeiten sind abgeschlossen.
Versuche an Schubfeldern aus Glas unter Variation der Parameter	Bei den Schubfeldversuchen wurde auf der sicheren Seite eine Eckklotzung gewählt, da eine kontinuierliche Schubeinleitung längs der Ränder kleinere Stoßfaktoren ergeben würde. Bei den Schubfeldversuchen, kam es aufgrund der speziellen Lasteinleitung durch Glasmörtel,

	welcher eine definierte Aushärtezeit besitzt, zu
	Verzögerungen in der Versuchsdurchführung. Die
	Arbeiten können bald fortgesetzt und beendet werden.
Auswertung der Versuchsreihen aus	Die durchgeführten dynamischen Untersuchungen
AP 3	wurden ausgewertet und dienen als Grundlage für die in
	AP 5 notwendige Ermittlung der Stoßfaktoren. Die
	Auswertung der VSG-Stützen ist abgeschlossen. Die
	Auswertung der Schubfeldversuche mit
	Querschnittsausfall wird im nächsten Schritt erfolgen.

Arbeitsschritt 4: Numerische Untersuchungen

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Numerische Nachrechnung der querbelasteten VSG-Scheiben aus AP 2, Übertragung, Kalibration	Die numerischen Untersuchungen für die in AP 2 durchgeführten Versuche sind abgeschlossen. Das Eigenschwingverhalten konnte gut abgebildet werden.
Numerische Nachrechnung der Knickversuche an VSG-Scheiben mit und ohne Seitenanprall aus AP 3	Die numerischen Untersuchungen an VSG-Scheiben ohne Seitenanprall auch in Hinblick auf das Eigenschwingverhalten wurden durchgeführt. Zur Kalibrierung des Models werden hier, alle durchgeführten Versuche herangezogen. Das numerische Model für VSG-Scheiben mit Seitenanprall ist konzipiert.

Arbeitsschritt 5: Ableitung von Stoßfaktoren

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Ermittlung von Stoßfaktoren anhand der Versuche und FEM	Stoßfaktoren konnten sowohl für die querbelasteten als auch für den in Scheibenrichtung belasteten Probekörper abgeleitet werden. Im nächsten Schritt werden anhand der durchgeführten Versuche an längsbelasteten Probekörpern und der FEM-Untersuchungen Stoßfaktoren abgeleitet.
Vorschläge für eine maßgebende Parameterkonstellation	Auf der Grundlage der ermittelten Ergebnisse konnte bereits Vorschläge für die maßgebenden Parameterkonstellationen ausgearbeitet werden. Die Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

Arbeitsschritt 6: Ableitung von Bemessungsregeln robuster primärer Glasbauteile

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Überführung der Ergebnisse in ein	Ansätze für die Überführung in ein geeignetes
geeignetes Bemessungsformat	Bemessungsformat konnten entwickelt werden.
Ableitung von wichtigen konstruktiven	Einen Zusammenhang zu den für die Robustheit
Regeln des erforderlichen	wichtigen Parameter konnten abgeleitet werden. Sowohl
Glasaufbaus, Zwischenfolie und	die Zwischenfolie (welche einen Beitrag zur Dämpfung
Lagerung/ (Redundanz- und	leistet) als auch die entsprechende Anwendung von
Robustheitsregeln auf	bestimmten Glasarten konnten herausgestellt werden.
Bauwerksebene)	
Ableitung von wichtigen konstruktiven	Ein Konzept zur Beschreibung der möglichen
Regeln der Gesamtstruktur	Robustheitsregeln bezogen auf den Konstruktiven
(Redundanz- und Robustheitsregeln	Glasbau konnte erstellt werden.
auf Bauwerksebene)	
Übertragung der Ergebnisse auf den	Die Ergebnisse aus allen Versuchsarten haben gezeigt,
Belastungsfall des Biegedrillknicken	dass im Belastungsfall Biegedrillknicken ebenfalls
	anwendbar sind.

Arbeitsschritt 7: Integration der Robustheitsregeln

Durchgeführte Arbeiten	Erzielte Ergebnisse
Zusammenführung der	In erster Linie wurden die vorhandenen Tragfähigkeits-
Tragfähigkeits- und Robustheitsregeln	und Robustheitsregeln zusammengeführt. Darüber
	hinaus, wurden die aktuellen Ergebnisse aus dem
	europäischen Normungsgremium TC250 / WG6
	implementiert.
Aufstellung eines geeigneten	Ansätze zur Aufstellung eines
Gesamtsicherheitskonzeptes	Gesamtsicherheitskonzeptes sind erarbeitet worden.
Festlegung von	Im Verlauf der Erarbeitung haben sich
Sicherheitskoeffizienten und	sicherheitsrelevante Faktoren herausgestellt die im
Kombinationsfaktoren	Anschluss festgelegt wurden.
Berücksichtigung der Relevanz in	In Abhängig von der Relevanz des primär tragenden
Abhängigkeit von der Anwendung	Elementes sind unterschiedliche Konzepte anzuwenden,
über Vorschlag von	welche vorgestellt wurden.
Bedeutungsfaktoren	
Kombinationslaktoren Berücksichtigung der Relevanz in Abhängigkeit von der Anwendung über Vorschlag von Bedeutungsfaktoren	In Abhängig von der Relevanz des primär tragenden Elementes sind unterschiedliche Konzepte anzuwenden, welche vorgestellt wurden.

# Anhang B Verwendung der Zuwendung

Die von der Forschungsstelle zur Durchführung der obengenannten Arbeiten im gesamten Bewilligungszeitraum eingesetzten Mittel für Personalausgaben, Geräte und Leistungen Dritter sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Personalausgaben (A.1)	Geräteausgaben	Leistungen Dritter
[Mannmonate]	[€]	[€]
34	0,00	0,00

### 2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden am Institut für Stahlbau 30 Monate für wissenschaftlichtechnisches Personal (A1) eingesetzt. Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag durchgeführt. Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Versuchseinrichtung zur Durchführung von Versuchen zur Simulation eines Querschnittsausfalls entwickelt. Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

# 3. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

# 4.1 Durchgeführte spezifische Maßnahmen

Die erzielten Forschungsergebnisse wurden während der gesamten Projektlaufzeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PbA) diskutiert.

Im Berichtszeitraum wurde der folgende Ergebnistransfer durchgeführt:

Transfermaßnahme	Ziel	Wann
Projektbeschreibung im Internetauftritt der Forschungsstelle	Information zum Projekt mit Kurzbeschreibung und Ansprechpartner	01.12.2014
1. PbA Sitzung (Aachen)	Information des PbA über den Projektfortschritt (Diskussion, Festlegungen, Abstimmungen)	22.04.2015
2. PbA Sitzung (München)	Information des PbA über den Projektfortschritt (Diskussion, Festlegungen, Abstimmungen)	28.10.2015
3. PbA Sitzung (Düsseldorf)	Information des PbA über den Projektfortschritt (Diskussion, Festlegungen, Abstimmungen)	04.05.2016
Zwischenbericht HhJ2015	Information des PbA über den Projektfortschritt	24.03.2016

Bildungsmaßnahme	Vorlesung im Konstruktiven Glasbau Sommersemester, Vorstellung des Robustheitskonzept bei Glasbauteilen	Ab 01.04.2016
Vorstellung bei CEN/TC250 SC11	Vorstellung des Robustheitskonzeptes als Hintergrundbericht für CEN/TC250 SC11	15.04.2016
Vortrag beim CEN TC 250 WG6 "Robustness	Vorstellung der Forschungsergebnisse auf europäischer Ebene zwecks Implementierung der Ergebnisse in Materialspezifischen Teil	26.04.2016
4. PbA Sitzung (München)	Information des PbA über den Projektfortschritt (Diskussion, Festlegungen, Abstimmungen)	15.12.2016
Zwischenbericht HhJ2016	Information des PbA über den Projektfortschritt	15.03.2017
Bildungsmaßnahme	Vorlesung im Konstruktiven Glasbau Sommersemester, Vorstellung des Robustheitskonzept bei Glasbauteilen	Ab 01.05.2017
Masterarbeit zu Fragestellungen des Forschungsvorhabens	Vermittlung von Kenntnissen und Methoden zum selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten	08.05.2017
5. PbA Sitzung (Hamburg)	Information des PbA über den Projektfortschritt (Diskussion, Festlegungen, Abstimmungen)	22.05.2017
6. PbA Sitzung (Düsseldorf)	Information des PbA über die letzten Arbeiten im Projekt	24.10.2017
Zwischenbericht HhJ2017	Information des PbA über den Projektfortschritt	08.02.2018
Vortrag beim Glas im Konstruktiven Ingenieurbau	Vorstellung der Forschungsergebnisse	08.03.2018
7. PbA Sitzung (Düsseldorf)	Information des PbA über den finalen Stand	03.05.2018
Schlussbericht	Vorstellung bzw. Zusammenfassung der erzielten Forschungsergebnisse	01.10.2018

# 4.2 Geplante spezifische Maßnahmen

Die erzielten Forschungsergebnisse sollen auch nach der Projektlaufzeit bzw. Nach Abschluss des Forschungsvorhabens weiter vorgestellt werden.

Der geplante Ergebnistransfer ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:
Transfermaßnahme	Ziel	Wann
Vortrag beim CEN/TC250 SC 11	Vorstellung der Forschungsergebnisse auf europäischer Ebene zwecks Implementierung der Ergebnisse in CEN/TC250 EC10	Dezember 2018
Veröffentlichung in der Glasbau 2019	Veröffentlichung der Forschungsergebnisse mit Beschreibung des Bemessungskonzeptes sowie des entwickelten Leitfadens	März 2019
Dissertation	Robustheit und Schadenstoleranz von primär tragenden Bauteilen aus Glas	April 2019
Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung	Wissensvermittlung im Rahmen von Lehrveranstaltungen und Seminaren zur Stabilitätsbemessung im Stahlbau	fortlaufend

### 4.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt. Außerdem wird angestrebt, die Forschungsergebnisse in einen Normungsvorschlag zu überführen und für die spätere Implementierung in CEN/TC 250 sowie DIN 18008-7, in dem die Forschungsstelle Mitglied ist, zur Verfügung zu stellen. Durch die Mitgliedschaft der Forschungsstelle in weiteren relevanten, Robustheits- und Glasbauspezifischen Gremien, auf sowohl nationaler als auch internationaler Ebene, kann der Ergebnistransfer in die entsprechenden Arbeitsgruppen auf direktem Weg erfolgen.

# 4.4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Das Forschungsvorhaben wird für die mittelständische Wirtschaft einen entscheidenden Beitrag zur Weiterentwicklung der gegenwertigen Normungssituation im Bereich des Konstruktiven Glasbaus leisten. Dadurch wird die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Mittelstandes gestärkt. Hiervon profitieren in erster Linie Ingenieurbüros und Stahlbaufirmen, die im Hochbau tätig sind, sowie stahlverarbeitende Betriebe in Verbindung mit dem Konstruktiven Glasbau. Gerade im Bereich des konstruktiven Glasbaus sind vorwiegend kleine und mittelständische Unternehmen tätig. Durch das bauordnungsrechtliche System in Deutschland sind diese fast ausschließlich auf die gültige Normung angewiesen, um die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere auch gegenüber großen Unternehmen aufrechtzuerhalten. Die hier entwickelten Konzepte zur Charakterisierung von robusten längs- und querbelasteten primär tragende Bauteile aus Glas vervollständigen die bereits erzielten Forschungsergebnisse und liefern so einen wesentlichen Beitrag zu der noch

ausstehenden DIN 18008, Teil 7 der Sonderkonstruktionen, deren Umsetzung dadurch beschleunigt werden kann. Nach Einführung der DIN 18008, T.7 oder des entsprechenden Eurocodes, deren Grundlage u.a. die vorliegenden Forschungsergebnisse bilden, würde sich eine direkte Anwendung ergeben und zu einer erheblichen Erleichterung für die KMUs bedeuten.

Die Forschungsergebnisse, die das Ziel haben, primär tragende Glasbauteile bauaufsichtlich zu regeln, tragen zu einer wesentlichen Vereinfachung der Bemessung und somit zu einer stärkeren Verbreitung solcher Konstruktionen bei. Hier eröffnen sich nicht nur neue Betätigungsfelder für kleine u. mittlere Betriebe, sondern sie gewinnen durch den Innovationsgewinn an Wettbewerbskraft nicht nur gegenüber herkömmlichen Fassadenlösungen, sondern es wird ein neues Marktsegment eröffnet.

Durch die Aufbereitung der erzielten Ergebnisse in Normenteile zur Bemessung tragender Glasbauten wird die industrielle Umsetzung sofort vorhanden sein. Denn der Wunsch nach einfachen und konsistenten Regeln zur Bemessung von Primärtragwerken aus Glas, ist bei allen klein- und mittelständischen Unternehmen, ohne Ausnahme, vorhanden. Die Besonderheit beim Umgang mit dem Werkstoff Glas ist, dass neben der Tragfähigkeit ebenfalls die Aspekte der Robustheit zu berücksichtigen sind, um eine Glaskonstruktion wirtschaftlich und vor allem sicher realisieren zu können. Durch die hier erzielten Forschungsergebnisse sind die KMUs in der Lage, für primäre Tragstrukturen aus Glas sowohl auf der Querschnittsebene als auch auf der Bauteilebene den theoretischen Nachweis der Robustheit durch zuverlässige Regeln zu führen.



## Anhang C Übersicht Steifigkeiten Biegeträger





# Anhang D Übersicht Probekörper kleinmaßstäblicher Versuche

Querschnitt	Folienart	Kritische Last*	Auflast	Abweichung
[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[%]
		2-fach-VSG aus E	SG	
		315,6	317,50	0,61
		314,2	329,50	4,63
	PVB	316,4	345,00	8,29
		315,3	357,00	11,68
6/6		313,2	374,50	16,37
		315,8	362,50	12,87
	SGP	316,4	404,50	21,78
		315.3	380.50	17.14
		1451,20	1458,70	0,51
	PVB	1459,2	1494,70	2,38
10/10		1403,0		7,62
	SGP	1455,2	1518,70	4,18
	I	3-fach-VSG aus E	ESG	
		701,0		4,61
11014	PVB	695,0	734,90	5,43
4/6/4	0.05	2101,0	0444.00	0,62
	SGP	2089,0	2114,20	1,19
		1596,0	1660.00	4,43
6/9/6	PVB	1602,0	1009,90	4,07
0/0/0	SCP	5116,0	2228.00	-128,60
	SGF	4962,0	2236,00	-121,72
	1	2-fach-VSG aus 1	rvg	
		304,6	374,50	18,66
		307,2	568,10	45,93
	PVB	306,3	600,90	49,03
6/6		307,0	900,90	65,92
		309,3	619,50	50,07
	SGP	308,9	295,50	-4,52
		1461,0	1561,10	6,41
10/10	PVB	1415,0		18,77
10/10	0.05	1434,0	1741,90	17,68
	SGP	1454,0		16,53
		3-fach-VSG aus 1	ſVG	
		692,0	1187,90	41,75
4/6/4	PVB	687,0	830,90	17,32
	SGP	2070,40	2124,20	1,90

# Übersicht Probekörper kleinmaßstäblicher Versuche

		1943,0		8,10
		1546,0	4744.00	11,25
	PVB	1571,0	1741,90	9,81
6/8/6	0.05	4911,0	2238,0	-119,4
	SGP	-	-	-

## Versuchsauswertung kKV

	ESG			TVG	
Aufbau	Imperfektion e₀	W Zustand II	Aufbau	Imperfektion e	W Zustand II
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]
	0,25	0,10		1,40	0,20
	0,50	0,71		1,10	2,26
0/0 PVB	0,10	0,85	0/0 PVB	1,20	2,19
	0,30	1,66		1,10	3,50
	0,70	0,80		0,85	0,04
	0,20	0,64	0/0 SGP	0,90	0,16
0/0 SGP	0,10	0,49			
	0,30	0,37			
	0,40	0,40 0,19	0,10	2,15	
10/10 PVB	0,20	0,40	10/10 PVB	0,80	1,54
10/10 500	1,00	0,29	10/10 000	0,50	0,76
10/10 SGP	0,30	0,19	10/10 SGP	0,20	0,65
	0,50	1,26		0,90	3,96
4/0/4 PVB	1,00	1,80	4/6/4 PVB	1,60	3,74
4/6/4 6 6 5	0,30	0,69		0,45	0,97
4/6/4 SGP	0,50	0,85	4/6/4 SGP	1,80	2,48
6/8/6 P\/B	0,20	0,74	6/8/6 P\/B	1,10	1,59
0,0,01 VB	0,00	1,49	0,0,01 VB	0,60	2,05
6/8/6 SGP	0,20	0,07	6/8/6 SGP	0,80	0,59
0,0,0 001	0,10	0,60	0,0,000		

	ESG			TVG			
Aufbau	W Zustand II	W Zustand III	W Zustand V	Aufbau	W Zustand II	W Zustand III	W Zustand V
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
			2-fach	n-VSG			
	0,10	0,06	7,8		0,20	0,30	0,2
6/6 D\/B	0,71	1,13	8,2	6/6 D\/B	2,26	0,27	1,0
0/0 F V D	0,85	1,04	8,2	0/0 F V D	2,19	2,62	-
	1,66	1,90	-		3,50	4,20	-
	0,80	0,81	10,5	6/6 SCP	0,04	Mehrfachb	0,0
6/6 SCP	0,64	0,65	9,3	0/0 3GF	0,16	ruch	0,2
0/0 38F	0,49	De	Joh				
	0,37	BU	ucn				
10/10 D\/B	0,19	0,25	3,2	10/10 D\/B	2,15	2,44	0,2
10/10 - 48	0,40	0,44	3,8	10/10 PVB	1,54	1,66	0,2
10/10 SCP	0,29	0,34	4,9	10/10 SCP	0,76	0,76	0,1
10/10 30P	0,19	0,29	4,473	10/10/30	0,65	0,68	0,2
			3-fach	n-VSG			
	1,26	1,59	3,5		3,96	2,44	1,6
4/0/4 F V D	1,80	2,22	11,4	4/0/4 FVD	3,74	1,66	1,6
AIGIA SCP	0,69	0,72	2,0		0,97	0,76	0,4
4/0/4 3GF	0,85	0,87	2,1	4/0/4 3GF	2,48	0,68	1,0
6/8/6 D\/B	0,74	0,80	2,7	6/8/6 D\/B	1,59	1,85	0,2
	1,49	1,63	2,9		2,05	2,16	0,1
6/8/6 SCP	0,07	0,08	2,2	6/8/6 SCP	0,59	0,60	77,3
0/0/0 3GF	0,60	0,63	2,3	0/0/0 3GF			

## Ermittelte Durchbiegungen der VSG-Stützen

### Stoßfaktoren für kKV

ESG	ESG				TVG			
Aufbau	DLF <sub>weg</sub>	DLF <sub>Spannun</sub> g	DLF <sub>Dämpfun</sub> g	Aufbau		DLF <sub>Spannung</sub>	<b>DLF</b> Dämpfung	
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	
2-fach-VSG								
	1,69	-	1,70	6/6 PVB	-	-	-	
6/6 D\/B	1,75	1,99	1,52		1,64	-	-	
0/0 F V B	1,68	1,83	1,96		1,21	2,21	-	
	1,66	1,78	1,37		1,15	1,22	-	
	1,76	1,74	1,54	6/6 SCP		Achrfachbruc	h	
6/6 SCP	1,98	-	1,69	0/0 3GF	Menttachbruch			
0/0 001		Bruch						

	1,80	-	1,82	10/10 PVB	-	-	1,69		
10/10 PVB	1,75	-	1,79	10/10 200	-	-	1,76		
10/10 SCP	1,45	-	1,58	10/10 SCP	-	1,88	1,79		
10/10 3GF	1,41	-	1,78	10/10 3GF	-	-	1,82		
3-fach-VSG									
	1,43	1,95	1,57	4/6/4 PVB	1,73	1,37	-		
4/0/4 FVD	1,35	1,76	1,66		1,52	1,73	-		
AIGIA SCP	1,36	1,97	1,76		-	-	1,71		
4/0/4 3GF	1,62	-	1,82	4/0/4 3GF	1,31	-	1,75		
6/8/6 D\/R	1,44	1,57	1,76	6/8/6 D\/R	-	-	-		
0/0/0 F VB	1,63	1,46	1,77	0/0/0 F V B	-	-	1,60		
	1,49	-	1,87		1,26	2,04	1,83		
0/0/0 3GP	1,60	-	1,84	0/0/0 3GP					

### Abweichung der Eigenfrequenz zwischen Zustand IV und Zustand III

	ESG		TVG			
Aufbau	EF Zustand III	EF Zustand IV	Aufbau	EF Zustand III	EF Zustand IV	
[-]	[Hz]	[Hz]	[-]	[Hz]	[Hz]	
	11,50	18,75		-	30,40	
6/6 P\/B	9,38	18,75	6/6 PVB	27.43	28,13	
0/01/00	9,56	-		-	-	
	9,90	18,75		-	23,44	
	9,38	26.09		30.47	32.81	
	11,72	-	6/6 SGP	-	30.47	
0/0 SGP	Bruch	Bruch				
	Bruch	Bruch				
10/10 P\/B	26,51	31,31	10/10 P\/B	38,70	-	
10/101 VD	26,51	32,81	10/101 00	46,88	49,22	
10/10 SCP	19,61	32,18	10/10 SCP	50,00	49,22	
10/10/30F	27,92	35,16	10/10 3GF	50,00	51,56	
1/6/1 DVB	25,78	28,13	1/6/1 D\/B	-	28,35	
4/0/4 P VD	22,26	32,54	4/0/4 F V D	25,00	38,67	
AIGIA SCD	18,75	35,16	AIGIA SCD	37,50	42,19	
4/0/4 30F	18,75	35,16	4/0/4 33F	37,50	37,50	
6/8/6 D\/R	37,54	42,19	6/8/6 D\/R	18,75	51,56	
0/0/0 F V D	38,67	43,36	0/0/0 F V D	51,56	51,56	
6/8/6 SCP	37,54	42,19	6/8/6 SCP	38,67	42,19	
0/0/0 30F	38,67	42,19	0/0/0 30P	-	-	

## Anhang E Tabellarische Übersicht der Eigenfrequenzen und Dämpfungen gKV

#### Zustand I ESG TVG Scheiben-Scheiben-Bezeichnung Folie f Bezeichnung Folie f aufbau aufbau [-] [mm] [-] [Hz] [-] [mm] [-] [Hz] 2-fach-VSG 2-6-a 10,00 2-5-a 9,99 PVB PVB 2-6-b 10,12 2-5-b 10,07 6/6 6/6 2-8-a 10,17 2-7-a 10,23 SGP SGP 2-8-b 10,11 2-7-b 10,30 PVB 2-9-a PVB 15,94 2-10-a 15,90 10/10 10/10 SGP 16,15 SGP 2-12-a 2-11-a 15,94 2-2-a 19,20 2-1-a 18,75 PVB PVB 2-2-b 19,13 2-1-b 19,05 12/12 12/12 2-4-a 19,25 2-3-a 18,95 SGP SGP 2-4-b 19,37 2-3-b 19,32 3-fach-VSG 3-3-a 11,76 3-1-a 11,76 PVB PVB 11,75 3-3-b 3-1-b 12,08 4/6/4 4/6/4 3-7-a 12,23 3-5-a 12,20 SGP SGP 3-7-b 12,15 3-5-b 12,09 3-4-a 3-2-a 16,50 16,55 PVB PVB 3-4-b 16,44 3-2-b 16,39 6/8/6 6/8/6 3-8-a 17,27 3-6-a 16,79 SGP SGP 17,14 3-8-b 3-6-b 16,79

### Eigenfrequenzen der VSG-Stützen ohne Last

			Zust	and II			
	ES	G		TVG			
Bezeichnung	Scheiben - aufbau	Folie	f	Bezeichnung	Scheiben - aufbau	Folie	f
[-]	[mm]	[-]	[Hz]	[-]	[mm]	[-]	[Hz]
			2-fac	h-VSG			
2-6-a			9,54	2-5-a		D\/D	9,52
2-6-b	c lc	PVD	9,45	2-5-b	c lc	PVD	9,59
2-8-a	0/0	SCD	9,94	2-7-a	0/0	SCD	9,80
2-8-b		304	9,69	2-7-b		305	9,87
2-10-a	10/10	PVB	16,37	2-9-a	10/10	PVB	16,76
2-12-a		SGP	16,38	2-11-a	10/10	SGP	16,09
2-2-a	12/12		18,21	2-1-a			18,36
2-2-b		PVD	18,54	2-1-b	12/12	PVD	18,56
2-4-a		12/12	SCD	18,96	2-3-a	12/12	SCD
2-4-b		305	18,92	2-3-b		305	18,62
			3-fac	h-VSG			
3-3-a		D\/R	10,91	3-1-a		D\/R	10,98
3-3-b	1/6/1	FVD	11,13	3-1-b	1/6/1	FVD	11,33
3-7-a	4/0/4	SCD	10,51	3-5-a	4/0/4	SCD	10,32
3-7-b		305	10,17	3-5-b		305	10,19
3-4-a		D\/R	16,64	3-2-a		D\/R	16,31
3-4-b	6/8/6		15,72	3-2-b	6/8/6		16,47
3-8-a	0, 0, 0	SCP	16,15	3-6-a	0,0,0	SCP	17,29
3-8-b		201	15,81	3-6-b		SGP 17,3	17,30

# Eigenfrequenzen der VSG-Stützen mit Last

	Zustand III									
	ESG			TVG						
Bezeichnung	Querschnitt	Folie	f	Bezeichnung	Querschnitt	Folie	f			
[-]	[mm]	[-]	[Hz]	[-]	[mm]	[-]	[Hz]			
	2-fach-VSG									
2-6-a		D\/R		2-5-a		D\/R	8,64			
2-6-b	6/6	FVD	_*	2-5-b	6/6	FVD	8,74			
2-8-a	0/0	SCD	-	2-7-a	0/0	SGP	9,58			
2-8-b		305		2-7-b		305	10,09			
2-10-a	10/10	PVB	5,91	2-9-a	- 10/10	PVB	14,26			
2-12-a	10/10	SGP	5,54	2-11-a		SGP	14,99			
2-2-a	12/12	12/12		6,25	2-1-a	l	ם/ נו	17,03		
2-2-b			PVD	5,84	2-1-b	12/12	PVD	15,52		
2-4-a			SCD	6,52	6,52 2-3-a	12/12	SCD	17,72		
2-4-b		SGP	6,49	2-3-b		SGP	17,46			
			3-fac	h-VSG						
3-3-a			7,48	3-1-a			11,11			
3-3-b	1/6/1	FVD	7,59	3-1-b	1/6/1	FVD	11,19			
3-7-a	4/0/4	SCD	6,76	3-5-a	4/0/4	SCD	10,37			
3-7-b		30P	6,56	3-5-b		30P	10,05			
3-4-a			10,37	3-2-a			14,36			
3-4-b	6/8/6	6/8/6	11,26	3-2-b	6/8/6	PVB	14,53			
3-8-a	-a	SCD	8,72	3-6-a	0,0,0	SCD	16,25			
3-8-b		307	7,52	3-6-b		205	16,95			

## Eigenfrequenzen der VSG-Stützen bei Bruch

	Zustand IV									
	ESG			TVG						
Bezeichnung	Querschnitt	Folie	f	Bezeichnung	Querschnitt	Folie	f			
[-]	[mm]	[-]	[Hz]	[-]	[mm]	[-]	[Hz]			
	2-fach-VSG									
2-6-a				2-5-a			8,85			
2-6-b	6/6	FVD	_*	2-5-b	6/6	FVD	8,91			
2-8-a	0/0	SCD	-	2-7-a	0/0	SCD	9,64			
2-8-b		30P		2-7-b		30P	9,71			
2-10-a	10/10	PVB	7,17	2-9-a	- 10/10	PVB	13,89			
2-12-a	10/10	SGP	7,58	2-11-a		SGP	14,88			
2-2-a	12/12			9,15	2-1-a			17,45		
2-2-b			6,99	2-1-b	12/12	FVD	16,62			
2-4-a	12/12		8,35	2-3-a	12/12	SGP	18,05			
2-4-b		305	7,89	2-3-b			17,58			
		-	3-fac	h-VSG		-				
3-3-a		D\/D	5,43	3-1-a		D\/P	10,39			
3-3-b	1/6/1	FVD	5,74	3-1-b	1/6/1	FVD	10,60			
3-7-a	4/0/4	SCD	7,17	3-5-a	4/0/4	SCD	9,60			
3-7-b		305	6,95	3-5-b		305	9,80			
3-4-a			10,60	3-2-a			14,59			
3-4-b	6/8/6	FVD	10,94	3-2-b	6/8/6	FVD	15,44			
3-8-a	0,8,0	SCD.	13,38	3-6-a	0,0,0	SCD.	16,26			
3-8-b		307	26,33*	3-6-b		JUP	16,67			

## Eigenfrequenzen der VSG-Stützen im gebrochenen Zustand mit Last

	Zustand V									
	ESG			TVG						
Bezeichnung	Querschnitt	Folie	f	Bezeichnung	Querschnitt	Folie	f			
[-]	[mm]	[-]	[Hz]	[-]	[mm]	[-]	[Hz]			
			2-fac	h-VSG						
2-6-a				2-5-a			8,80			
2-6-b	c lc	FVD	*	2-5-b	c lc	FVD	9,36			
2-8-a	0/0	SCD		2-7-a	0/0	SCD	10,17			
2-8-b		SGP		2-7-b		SGP	9,87			
2-10-a	10/10	PVB	10,22	2-9-a	10/10	PVB	14,21			
2-12-a	10/10	SGP	10,66	2-11-a	10/10	SGP	15,19			
2-2-a	12/12		11,02	2-1-a			16,95			
2-2-b		17/17	РУВ	10,91	2-1-b	12/12	PVB	16,88		
2-4-a		SCD	11,46	2-3-a	12/12	SCD	17,85			
2-4-b		SGP	11,58	2-3-b		305	17,71			
			3-fac	h-VSG						
3-3-a			9,09	3-1-a			11,45			
3-3-b	A/C/A	PVD	9,27	3-1-b	A/C/A	PVB	11,30			
3-7-a	4/0/4	SCD	11,04	3-5-a	4/0/4	SCD	12,08			
3-7-b		SGP	10,71	3-5-b		SGP	12,04			
3-4-a			12,38	3-2-a			15,53			
3-4-b	c /o /c	PVB	13,01	3-2-b	c /o /c	PVB	16,15			
3-8-a	0/0/0	SCD	13,64	3-6-a	0/0/0	SCD	16,79			
3-8-b		205	13,86	3-6-b		204	16,79			

### Eigenfrequenzen der VSG-Stützen im gebrochenen Zustand ohne Last

Dämpfungen							
ESG			TVG				
Bezeichnung	oben	unten	Bezeichnung	oben	unten		
2-fach							
2-6-a			2-5-a	0,1314	0,1253		
2-6-b	Der	uch	2-5-b	0,1484	0,1291		
2-8-a	ВП	uch	2-7-a	0,1416	0,1384		
2-8-b				0,0968	0,1239		
2-10-a	0,0978	0,1073	2-9-a	0,0912	0,1009		
2-12-a	0,0980	0,1056	2-11-a	0,0677	0,0671		
2-2-a	0,0837	0,0804	2-1-a	0,1402	0,1800		
2-2-b	0,0709	0,0668	2-1-b	0,1161	0,1089		
2-4-a	0,0799	0,0868	2-3-a	0,1316	0,1224		
2-4-b	0,0791	0,0789	2-3-b	0,1116	0,1267		
3-fach							
3-3-a	0,0883	0,0920	3-1-a	0,1263	0,1246		
3-3-b	0,0938	0,0900	3-1-b	0,0879	0,0921		
3-7-a	0,1035	0,1103	3-5-a	0,14301	0,1441		
3-7-b	0,0983	0,1036	3-5-b	0,1745	0,1584		
3-4-a	0,0400	0,0364	3-2-a	0,1174	0,0819		
3-4-b	0,0407	0,0480	3-2-b	0,2210	0,2174		
3-8-a	0,0597	0,0534	3-6-a	0,2674	-		
3-8-b	0,1252	0,1236	3-6-b	0,1686	0,2289		

### Dämpfungen der VSG-Stützen im Zustand III (Bruchzustand)

## Tabellen aus Knickversuchen mit seitlichem Impuls

### Steifigkeiten im Zustand II ("mit Last")

Aufbau	l <sub>eff,f</sub>	leff,w	
[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
10/10 PVB	175351,6	166117,86	
10/10 SGP	180254,2	88480,78	
9/10/9 DV/D	456320,5	99745,91	
0/12/0 PVB	480101,0	120971,86	
10/12/10 DV/P	722796,6	286145,85	
10/12/10 PVB	714861,2	135932,29	
10/12/10 SGP	784732,3	180000,48	
10/10 PVB	177581,6	42515,71	
10/10 SGP	178976,3	29525,52	
9/12/9 DV/P	475857,8	220295,07	
0/12/0 F VB	476783,1	138398,67	
10/12/10 DV/B	753050,3	216110,41	
10/12/10 PVB	737826,9	190405,62	
8/12/9 500	472510,8	119965,19	
0/12/0 3GF	468439,8	252342,54	
10/12/10 SCD	794728,4	309616,48	
10/12/10 SGP	793939,4	458354,48	

### Steifigkeiten im Zustand IV ("mit Last, gebrochen")

Aufbau	l <sub>eff,f</sub>	l <sub>eff,w</sub>	
[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	
10/10 PVB	19693	21317	
10/10 SGP	26971	22007	
9/12/9 DV/D	199555	87140	
0/12/0 PVD	221848	88916	
10/12/10 DV/P	352057	108708	
10/12/10 PVB	347580	105595	
10/12/10 SGP	409824	110555	
10/10 PVB	40554	21487	
10/10 SGP	131649	22576	
8/12/9 01/0	360150	116109	
8/12/8 PVB	384179	105807	
10/12/10 0\/D	371956	936848	
10/12/10 PVB	667549	156801	
8/12/9 CCD	325157	105511	
0/12/0 30P	365983	134117	
10/12/10 500	608277	234850	
10/12/10 3GP	460535	242883	

DASt-Richtlinien (deutscherstahlbau.de)

Forschungsberichte (deutscherstahlbau.de)