

## *Schlussbericht*

Adhäsive Verbindungen für  
punktuelle Befestigungssysteme  
in Fassaden und Glastragwerken

Teilvorhaben 1  
Strukturanalyse und Nachweis der adhäsiven Verbindung

Förderkennzeichen 03IPT603C  
Berichtszeitraum 01.04.13 bis 31.01.16

© 2016

glasfaktor Ingenieure GmbH

Robert-Blum-Straße 3

01097 Dresden

[www.glasfaktor.de](http://www.glasfaktor.de)

# I Kurzdarstellung

## I.1 Aufgabenstellung

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens bildet die Entwicklung von prinzipiellen Lösungen und Verfahren zur Anwendung der Klebetechnik für Glasfassaden und Glastragwerke. Dabei soll der Schwerpunkt der theoretischen und experimentellen Untersuchungen auf punktuellen Klebungen von Glas und metallischen Befestigungsmitteln liegen. Durch die Bündelung der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Kompetenzen auf dem Gebiet des Glas- und Fassadenbaus in der Region, soll ein Wettbewerbsvorteil für die beteiligten Unternehmen generiert und die wesentlichen strukturbildenden Maßnahmen aus dem vorangegangenen InnoProfile-Vorhaben GLASKONNEX nachhaltig weitergeführt werden.

Geklebte Punkthalterssysteme und Beschläge stellen eine vorteilhafte Alternative zu bisher üblichen Lochleibungsverbindungen dar. Der Wegfall von Bohrungen führt neben einer Kostenersparnis beim Glas vor allem zu konstruktiven Erleichterungen. Generell entstehen bei geklebten Punkthaltern homogenere Spannungsverteilungen im Lasteinleitungsbereich. Weitere Vorteile geklebter punktueller Befestigungselemente bilden die Reduzierung von Verbindungselementen, die damit verbundene höherwertige Ästhetik und die Zunahme an gestalterischer Freiheit bei der Fassadenkonstruktion.

Das Verbundvorhaben verfolgt das Ziel durch konsequente Umsetzung der Grundlagenergebnisse eine neue Qualität beim Einsatz adhäsiver Verbindungen in der Fassade und in Glastragwerken zu erreichen. Mit Bezug auf die punktuellen Befestigungssysteme sollen konstruktive Lösungen bzw. Verfahren erprobt und angepasst werden.

Die glasfaktor Ingenieure GmbH bearbeitet im Teilvorhaben 1 Forschungsfragen zur numerischen Strukturanalyse sowie zur Nachweisführung der adhäsiven Verbindungen. Grundlage aller weiteren Tätigkeiten des Teilvorhabens stellen die auf der Basis der gemeinsam zu bestimmenden Anforderungslisten zu erarbeitenden Materialbeschreibungen der Klebstoffe dar. Der Schwerpunkt liegt auf der Formulierung effizienter und realistischer konstitutiver Gleichungen für das Materialverhalten hochfester Klebstoffe in Verbindung mit robusten Lösungsalgorithmen. Anfänglich werden für die Formulierungen das nichtlineare Materialverhalten, große Verformungen sowie komplexe Lastpfade berücksichtigt. Mit zunehmender Laufzeit des Vorhabens sollen zeitabhängige Formulierungen entwickelt und untersucht werden, die auch numerische Studien zum langfristigen Verhalten der Klebeverbindung zulassen. Diese müssen das anfängliche Materialverhalten und die infolge verschiedener Umwelteinwirkungen und Belastungen auftretenden Veränderungen sicher wiedergeben. Sowohl die Effizienz als auch die Vorhersagegenauigkeit sollen mithilfe numerischer Fallstudien sowie mithilfe experimenteller und numerischer Benchmark-Tests belegt werden.

Um die Güte der Formulierung hinsichtlich der mathematisch-physikalischen Stabilität aber auch die Güte der beschreibenden Parameter sicher bewerten zu können, sollen gemeinsam mit der Technischen Universität Dresden neuartige Benchmark-Experimente erforscht werden. In diesem Teilvorhaben werden die hierfür notwendigen theoretischen Grundlagen erarbeitet. Des Weiteren planen wir, verschiedene numerische Studien zur Identifikation der Anwendungsgrenzen durchzuführen.

Ein Arbeitsziel stellt neben der reinen Funktionalität auch die bauaufsichtliche Akzeptanz der numerischen Berechnungsverfahren dar. Daher wird ein besonderes Augenmerk auf nachvollziehbare Handlungsabläufe sowie anerkannte Verifizierungsverfahren gelegt. Grundlage

dazu bilden international standardisierte Verfahren zur Entwicklung, Validierung und Verifizierung numerischer Methoden.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des Teilvorhabens liegt auf den strukturellen Analysen zur Unterstützung und Absicherung der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten des Gesamtvorhabens. Hierfür werden mit digitalen Prototypen unterschiedlichste Studien zu prozesstechnischen, konstruktiven oder funktionalen Fragestellungen durchgeführt. Die geplante Überprüfung der Berechnungsergebnisse durch experimentelle Studien im Bauteilmaßstab stellt eine weitere Qualitätsverbesserung dar. Basierend auf den Forschungsergebnissen sind abstrahierte Handlungsanweisungen zur Erstellung und Verifizierung digitaler Prototypen zu erarbeiten, die zukünftig eine sichere Vorhersage von Belastungs- und Beanspruchungszuständen im praktischen Einsatz im Bauwesen ermöglichen.

Abschließend sollen Erkenntnisse des Gesamtvorhabens aus den numerischen Simulationen und experimentellen Untersuchungen in Verknüpfung mit dem bauaufsichtlichen Rahmen in ein Nachweiskonzept für die punktuellen Befestigungssysteme überführt werden. Hierfür werden wir Berechnungs- und Bemessungsansätze überprüfen und anwendungsbezogen anpassen. Daneben ergibt sich aus der Erfahrung herkömmlicher Genehmigungsverfahren die Notwendigkeit die Vorgehensweisen für die Übereinstimmungsnachweise der werksseitigen Fertigung sowie geeignete Maßnahmen zur Einbauüberwachung und zum Monitoring in der Nutzungsphase vorzuschlagen. Auf den Ergebnissen aufbauend sollen diese Empfehlungen auch auf die anderen Anwendungsgebiete im Bauwesen übertragen werden.

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Glasfaktor Ingenieure GmbH versteht sich als spezialisiertes Ingenieurbüro für die Bereiche konstruktiver Glasbau und Fassadenbau. Das Unternehmen ging im Januar 2012 aus dem Dresdner Büro der GSK – Glas Statik Konstruktion GmbH hervor. Unser Schwerpunkt liegt in der statisch-konstruktiven Planung und der ingenieurtechnischen Betreuung bei der Umsetzung von Fassaden- und Glasbauprojekten. Das Leistungsspektrum erstreckt sich dabei von der Glasstatik oder kompletten Fassadenstatik über die Betreuung der bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren sowie der Koordination und Durchführung von Bauteilprüfungen bis hin zur kompletten Fachplanung von Glasfassaden und Ganzglaskonstruktionen. Unser Kundenstamm reicht vom Handwerksbetrieb des Glaser- oder Schlossereigewerkes über Glas- und Fassadenbauunternehmen bis zu Architekten, Planern und Bauherren. Unser Ziel ist eine ergebnisorientierte Unterstützung unserer Kunden bei der Planung und Ausführung von Glasbau- und Fassadenprojekten. Dabei gilt es die komplexen und zum Teil gegensätzlichen Anforderungen aus den Bereichen Ästhetik und Gestaltung, Statik, Bauphysik und Konstruktion sowie Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bei der Entwicklung von Lösungen in Einklang zu bringen.

Im Rahmen unserer Planungs- und Gutachtertätigkeiten setzen wir verstärkt numerische Methoden ein. Die Bedeutung der numerischen Methoden für den konstruktiven Glasbau ergibt sich aus den Materialeigenschaften des Glases, den Auflagerbedingungen (z.B. bei Punkthaltern) sowie verschiedenen Sonderbeanspruchungen (z.B. Personenanprall). Die Strukturanalyse mithilfe der FEM bietet uns die Möglichkeit diese innovativen Tragsysteme sicher auszulegen und nachzuweisen.

Im Rahmen der IP-Initiative GLASKONNEX brachte sich die glasfaktor Ingenieure GmbH (damals als Dresdner Büro der GSK) durch verschiedene Machbarkeitsstudien ein. So wurden etwa erste Erfahrungen zur Herstellung flächiger Verklebungen und damit verbundener prozess-technischer

Abläufe erlangt. Mithilfe der wissenschaftlichen Untersuchungen konnten Fragestellungen identifiziert und beschrieben werden, die anschließend in einem Kooperationsprojekt gemeinschaftlich bearbeitet wurden. Darüber hinaus wurden die Weiterbildungsangebote (z.B. Klebpraktikum) durch uns genutzt.

Die FuE-Tätigkeit der glasfaktor Ingenieure GmbH (als Dresdner Büro der GSK) wurde im Rahmen des ZIM-Kooperationsprojektes „Transparent geklebte Glas-Rahmenecken“ für zwei Jahre durch das BMWi gefördert. Im betreuten Teilprojekt wurde die Entwicklung einer numerischen Methode zur Berechnung der geklebten Glas-Rahmenecke unter Beachtung des temperaturabhängigen und rheologischen Verhaltens vorangetrieben. Das Projekt wurde im September 2011 erfolgreich abgeschlossen. Durch das Kooperationsprojekt wurde der technologische Kenntnisstand des Ingenieurbüros entscheidend erweitert. Im Laufe und im Anschluss an das Projekt konnten drei Pilotprojekte umgesetzt werden.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Laufzeit der InnoProfile Initiative GLASKONNEX betrug 36 Monate. Der Bearbeitungszeitraum lag zwischen dem 01.02.2013 und dem 31.01.2016. Das Verbundvorhaben war organisatorisch in fünf Teilvorhaben gegliedert. In acht Arbeitspaketen wurden die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele der Teilvorhaben bearbeitet:

- AP1: Klebstoffsysteme
- AP2: Oberflächentechnik
- AP3: Punkthalterkonzeption
- AP4: Fassadenkonstruktion
- AP5: Maschinelles Fügen
- AP6: Eigenschaften und Beanspruchbarkeit
- AP7: Numerische Modellierung und Nachweisführung
- AP8: Bauteilmuster / Demonstratoren

In den Arbeitspaketen 1 bis 3 wurden die Lösungen für eine effiziente Ausführung und Gestaltung der punktförmigen adhäsiven Verbindungen erarbeitet. Dazu gehörte, neben der Beschreibung eines geeigneten Klebstoffsystems, die Untersuchung des Einflusses einer Oberflächenvorbehandlung auf die Hafteigenschaften und die Dauerhaftigkeit sowie die Entwicklung und Gestaltung eines funktionalen und optisch ansprechenden Punkthalters. Das Arbeitspaket 6 diente während des gesamten Entwicklungsprozesses als Instrument der Erfolgskontrolle hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften der Klebstoffe, der Wirksamkeit der Oberflächenbehandlung und der Eignung der Punkthalter bezüglich des Lastabtrags, sowie der Beanspruchbarkeit und Dauerhaftigkeit der erarbeiteten Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 bis 3.

Die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 3 dienten als Voraussetzung für das Arbeitspaket 5, in dem ein Lösungsweg zum Übergang von manueller, händischer Fertigung hin zu einem automatisierten, maschinellen Fügen aufgezeigt werden sollte. Die Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket flossen in Arbeitspaket 4 zur Entwicklung einer geeigneten Fassadenkonstruktion und in Arbeitspaket 8 zur Herstellung und experimentellen Untersuchung von Bauteilmustern und Demonstratoren ein.

Die Arbeitspakete wurden nicht von allen beteiligten Projektpartnern zu gleichen Teilen bearbeitet. Es gab für jedes Arbeitspaket eine Unterteilung in einen Projektpartner als „Leitung“

und weitere Projektpartner „Mitarbeit“. Auf diese Weise konnten die Kompetenzen der eingebundenen Unternehmen optimal genutzt werden.

Durch einen über den gesamten Projektzeitraum stattfindenden Austausch unter allen Projektpartnern konnten anwendungsspezifische Planungsempfehlungen ausgesprochen werden und der Wissenstransfer von Wissenschaft und Wirtschaft gefördert und intensiviert werden.

#### **I.4 Wissenschaftlich-technische Ausgangssituation**

Im Bauwesen werden im Konstruktiven Glasbau sowie im Beton-, Stahl-, Holz-, Kunststoff- und Gleisbau lastabtragende Klebeverbindungen teilweise erfolgreich eingesetzt. So steigt die Bedeutung des Klebens im Beton- und Stahlbetonbau besonders in der Bauwerkserhaltung sowie im Bereich des Brückenbaus an. Im gesamten industriellen Bereich weisen die Epoxidharzklebstoffe eine große Anwendungsbreite auf. Besondere Vorteile sind in der hohen mechanischen Festigkeit und der geringen Schrumpfung während der Aushärtung zu sehen. Daneben eignen sich auch Polyurethanklebstoffe aufgrund ihres Eigenschaftsspektrums für strukturelle Klebungen. So umfassen die mechanischen Eigenschaften der Polyurethanklebstoffe einen Bereich von sehr flexibel bis zäh elastisch und Belastungen durch Stoß und Temperaturschwankungen können durch die Klebung sehr gut aufgenommen werden.

Stand der Technik für geklebte Glasanwendungen sind momentan Structural-Sealant-Glazing (SSG) Systeme. Die Verglasung wird bei diesen Systemen über eine linienförmige Klebung mit einem Tragrahmen oder einem Adapterprofil aus Metall verbunden. Im Sinne der europäischen Leitlinie beschränkt sich die Auswahl möglicher Klebstoffe auf Silikone. Diese weisen eine sehr gute Haftung auf der Glasoberfläche und eine hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen auf. Aufgrund seiner hervorragenden Dauerhaftigkeit wurde bereits die Eignung von Silikonklebstoffen aus Structural-Glazing-Anwendungen für geklebte Punkthalter überprüft. Die hohe Flexibilität und gleichzeitig geringe Bruchspannung dieser Klebstoffe wirkt sich jedoch nachteilig auf die Verwendung für Punkthalter aus. Entweder sind die übertragbaren Kräfte baupraktisch zu gering oder es werden sehr große Tellerflächen erforderlich, die aus gestalterischen Gründen nicht akzeptabel sind.

Neben den Silikonen rücken höherfeste Klebstoffformulierungen auf Basis von Epoxidharzen, Polyurethanen oder Acrylaten in den Fokus aktueller Forschung im Fassaden- und Glasbau. Hierbei zeigt sich, dass viele dieser Industrieklebstoffe sensible auf atmosphärische Einwirkungen reagieren. Experimentelle Untersuchungen zur Eignung und Anwendbarkeit für Klebungen im Konstruktiven Glasbau werde aus diesem Grund stark vorangetrieben.

Verglasungen können auf vielfältige Art und Weise miteinander oder mit einer tragenden Unterkonstruktion verbunden werden. Gebohrte oder geklemmte Punkthalter zählen zum Stand der Befestigungstechnik im Glas- und Fassadenbau. Diese Verbindungen haben sich auch im konstruktiven Glasbau bewährt, da die Endmontage auf der Baustelle sehr einfach ist. Als mechanisches Verbindungsmittel sind Tellerhalter am Markt weit verbreitet. Als Tellerhalter werden punktuelle Befestigungsmittel für Verglasungen bezeichnet, die aus zwei Tellern und einem Verbindungsbolzen aus Metall bestehen, der durch ein Bohrloch in der Glasscheibe geführt wird. Die Halter werden im Allgemeinen in der Eck- bzw. Randzone einer Verglasung angebracht. Die Teller, die jeweils auf der Innen- und Außenseite der Verglasung sitzen, weisen einen größeren Durchmesser als das Bohrloch auf. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es kein geklebtes, am Markt verfügbares Beschlagsystem für die biegemomentenfreie Lagerung von Fassaden- und Dachelementen im Außenbereich, das alle Anforderungen hinsichtlich

Lastabtrag, Toleranzausgleich und Witterungsschutz der Klebefuge erfüllt. Vereinzelt wurden Glaskonstruktionen und Fassaden mit geklebten Punkthaltern ausgeführt. Dabei handelt es sich um Einzelanfertigungen der Punkthalter, die die Möglichkeiten dieser Konstruktionsvariante nicht ausschöpfen.

Die Technologie des adhäsiven Verbindens mittels geklebter Punkthalter im Konstruktiven Glasbau und in der Fassadentechnik ist auch aufgrund des erheblichen administrativen Aufwands sowie der meist notwendigen umfangreichen experimentellen Untersuchungen wenig verbreitet. Die Anforderungen im Rahmen des bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahrens ergeben sich in der Regel aus der Notwendigkeit einer Zustimmung im Einzelfall.

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Ausführung der geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfolgte in Kooperation mit einer Forschungseinrichtung und klein- und mittelständischen Unternehmen der Region Dresden. Während der Projektlaufzeit wurde intensiv mit folgenden Partnern zusammengearbeitet:

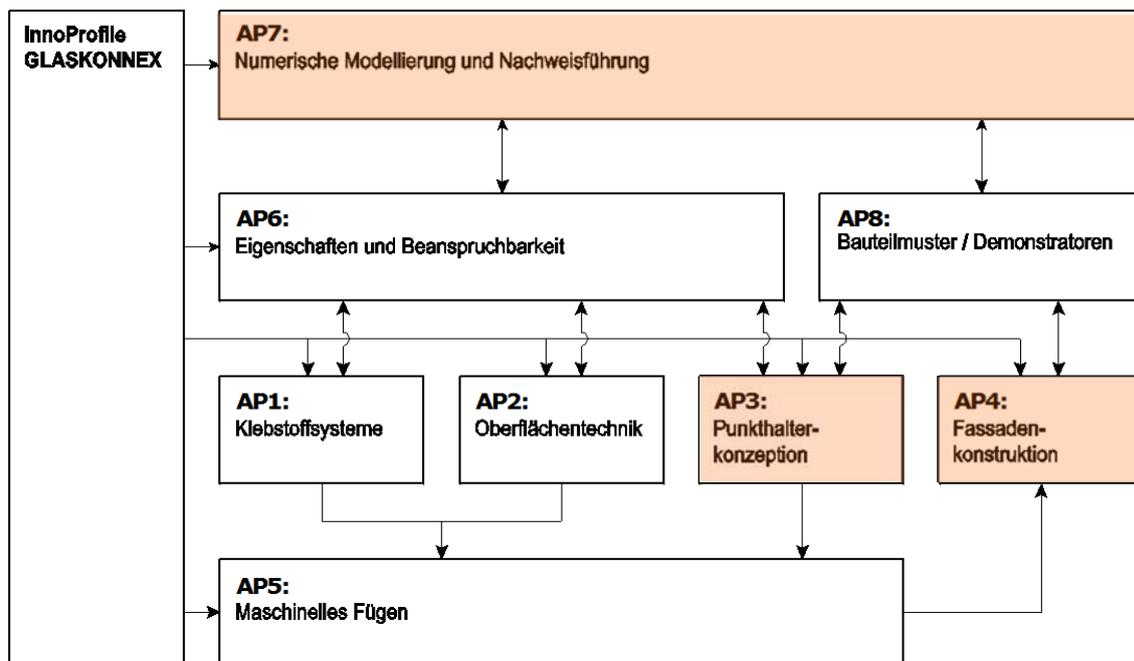
- Technische Universität Dresden (TUD)
- GWT-TUD GmbH (GWT)
- MBM Metallbau Dresden GmbH (MBM)
- Thiele Glas Werk GmbH (TGW)

## II Detaildarstellung

### II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

#### II.1.1 Allgemeines

Die glasfaktor Ingenieure GmbH war an den Arbeitspaketen 3 – Punkthalterkonzeption und 4 – Fassadenkonstruktion beteiligt. Für das Arbeitspaket 7 – Numerische Modellierung und Nachweisführung übernahm die glasfaktor Ingenieure GmbH leitende Aufgaben.



#### II.1.2 Arbeitspaket 3.1 – Gestaltung und Auslegung

##### **Ziele**

Teil des Arbeitspaketes war es die Gestaltung und Auslegung punktuell geklebter Beschläge durch Strukturanalysen zu unterstützen. Hierfür sollten in die numerischen Prototypen mit zunehmender Projektdauer die verbesserten Materialmodelle der Klebstoffe einfließen. Die numerischen Studien sollten Aussagen zur realitätsnahen Beanspruchung der Klebstoffe für unterschiedliche globale Tragsysteme und Einwirkungskombinationen über die geplante Nutzungsdauer ermöglichen.

Ziel ist die Absicherung der funktionellen und konstruktiven Auslegung mittels Finite-Elemente-Methode basierend auf projektinternen Datenmanagement und Strukturanalysen zur Dimensionierung der Klebeschicht für unterschiedliche Nutzungsdauern unter Berücksichtigung der in AP7 entwickelten zeitabhängigen Klebstoffmodelle.

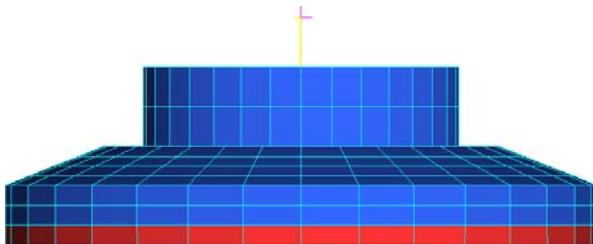
##### **Ergebnisse**

Nach ersten Arbeitstreffen wurden verschiedene Geometrien für die Punkthalter diskutiert. Grundlage waren die allgemeinen Leistungsparameter und die Ergebnisse der Patentrecherche. Aus der daraus resultierenden Basis-Vorzugsvariante wurde ein Geometriemodell im FEM

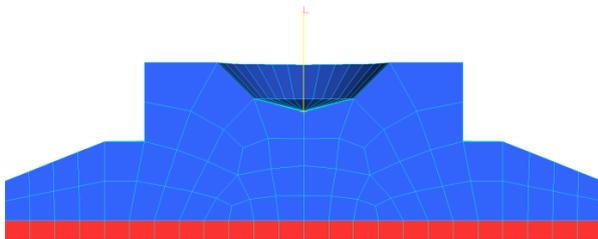
entwickelt. Es wurde darauf geachtet ein Modell zu erzeugen, dass möglichst ressourcenschonend für spätere Simulationen genutzt werden kann.

Im ersten Schritt wurde dazu ein rotationssymmetrischer Volumenkörper erzeugt. Dieser bildete nur den Teller mit einem Durchmesser von 60mm und die Klebefuge ab. Auf eine Abbildung der Kugel und des Deckels wurde verzichtet. An den Teller wurde ein steifer Balken angeschlossen, welcher bis zum theoretischen Mittelpunkt der Kugel reichte. In diesem Punkt wurde ein Gelenkt eingefügt. Ab diesem Punkt erfolgte die Modellierung der Anbindung an die Unterkonstruktion.

Das Modell führte zu brauchbaren Ergebnissen für reine Druckbeanspruchungen. Aufgrund der reduzierten Modellierung von Kugel und Deckel ergaben sich jedoch Probleme unter Zugbeanspruchung.

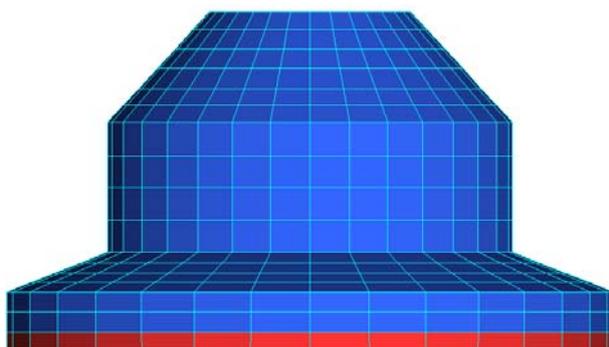


Modellierung 1. Schritt - Ansicht

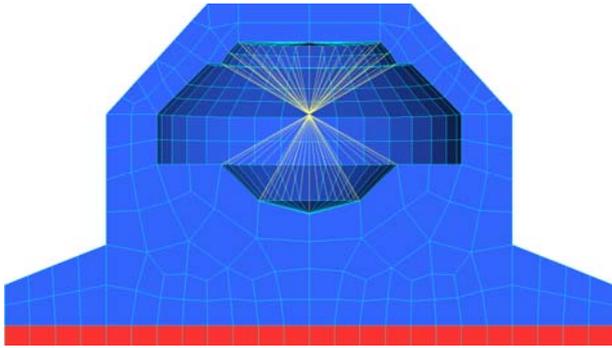


Modellierung 1. Schritt – Querschnitt

Im zweiten Schritt wurde das Modell durch einen Deckel ergänzt. Für die Modellierung der Kugel wurde eine detailliertere Lösung gefunden. Anstelle eines steifen Balkenelementes mit einem Gelenk in Kugelmittle wurde eine Vielzahl von Druckstäben eingefügt. Diese verbinden die Kontaktpunkte von Kugel und Deckel bzw. Kugel und Teller. Die Lagerung erfolgte im Zentrum der Kugel. Somit können die Auflagerkräfte direkt im Gelenk ausgelesen werden und die Unterkonstruktion entsprechend bemessen werden. Die gewählte Netzdichte führte jedoch zu unrealistischen Spannungsspitzen. Eine Verfeinerung des Netzes wurde daraufhin angestrebt. Im Zuge dieser Änderung sollte die leicht vereinfachte Geometrie des Halters realitätsnäher abgebildet werden.

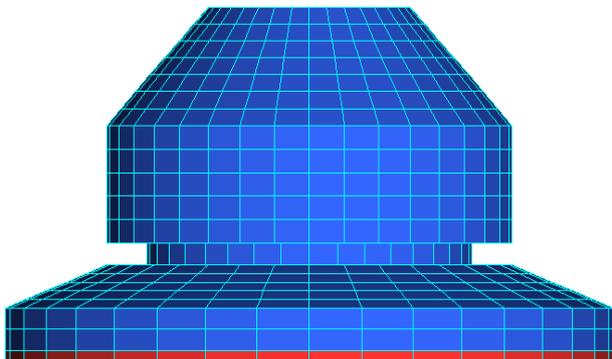


Modellierung 2. Schritt - Ansicht

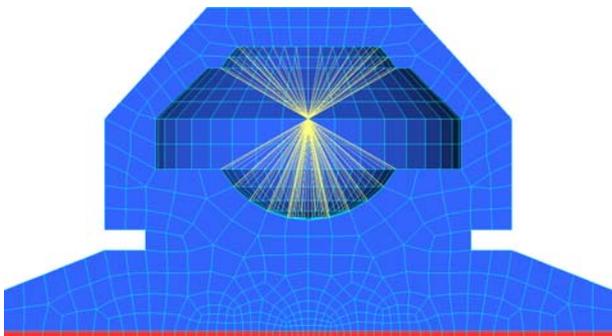


Modellierung 2. Schritt - Querschnitt

Im dritten Schritt wurde die Netzdichte erhöht und die Geometrie weiter verfeinert. Das Modell lässt die Abbildung von Spannungen infolge von Druck- und Zugeinwirkungen realitätsnah bzw. plausibel zu.



Modellierung 3. Schritt - Ansicht

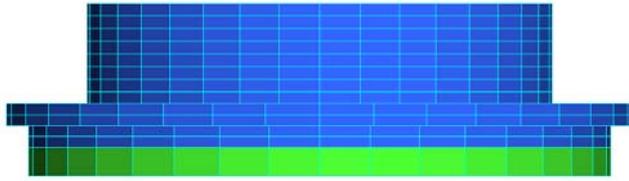


Modellierung 3. Schritt - Querschnitt

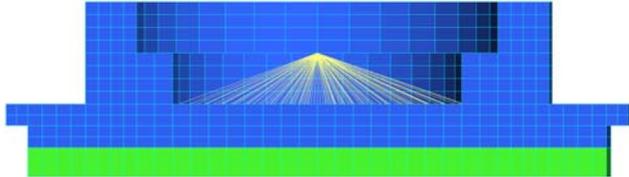
Das Modell aus dem 3. Schritt wird für alle weiteren Simulationen herangezogen. Einzige Änderung, die sich im Laufe der Zeit ergeben hat war das Einfügen einer Öffnung im Deckel, durch die der Befestigungsbolzen direkt an die Kugel angreift. Dies wurde für die Modellierung von Gesamtmodellen von Glasscheibe – Punkthalter – Befestigung notwendig.

Bei dem entwickelten Modell handelt es sich um ein universell einsetzbares Punkthaltermodell als Submodell. Der Punkthalter befindet sich zentrisch auf einer 100mm x 100mm großen Platte. zwischen Punkthalter und Platte wird eine Schicht aus Volumenelementen modelliert, die den Klebstoff darstellt. Die Materialparameter sowie die Stärke der Platte können je nach Randbedingung angepasst werden.

Im späteren Verlauf des Projektes wurde der Durchmesser des Tellers auf 40mm reduziert. Im Zuge dieser Änderung wurde erneut versucht das Finite-Elemente-Modell zu vereinfachen, um den Rechenaufwand zu reduzieren und die Effizienz zu erhöhen.



Modellierung 4. Schritt - Ansicht



Modellierung 4. Schritt - Querschnitt

Jede Vereinfachung ohne Abbildung des Deckels führte jedoch zu Problem, entweder wurden die Freiheitsgrade der Scheiben durch das Verformungsverhalten der Punkthalter auf nicht realitätsnahe Weise beeinflusst oder es ergaben sich Spannungsspitzen. Es wurde deshalb das grundlegende Modell mit 60mm Tellerdurchmesser beibehalten und ausschließlich die Geometrie geändert.

Mit dem Abschluss der grundlegenden Modellentwicklung konnten in die Parameteruntersuchung gegangen werden. Hierzu wurde vor allem auf die Schichtdicke der Klebefuge, das Elastizitätsmodul des Klebstoffes, sowie die Glasstärke eingegangen. Grundsätzlich wurde für die Verglasungen von einen ESG ausgegangen, da ein VSG durch die PVB-Schicht zu numerischen Herausforderungen führen, die unabhängig vom Punkthalter und den Klebstoffen bestehen.

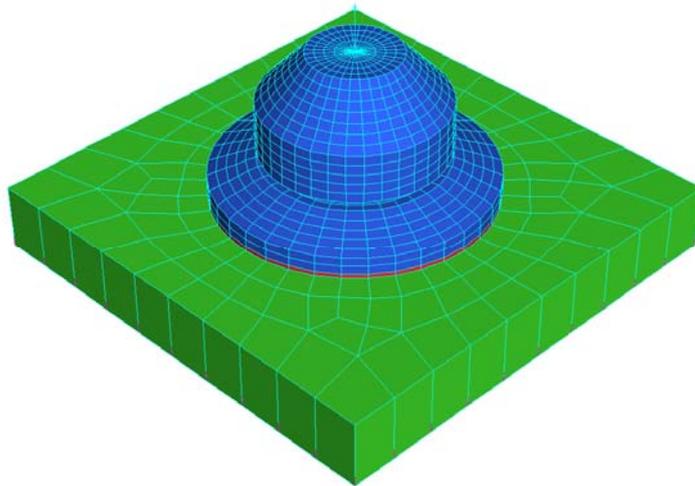
Es wurden die folgenden Versuche mit den angegebenen Parametern numerisch simuliert:

### Zugversuch:

Beschreibung: - Punkthaltermodell auf Glasscheibe 100mm x 100mm

- Glasscheibe ist auf Zug außerhalb der Klebefläche vollflächig gehalten
- Belastung durch Zugkraft direkt am Halterdeckel
- Glasscheibe als Volumen

Isometrie:



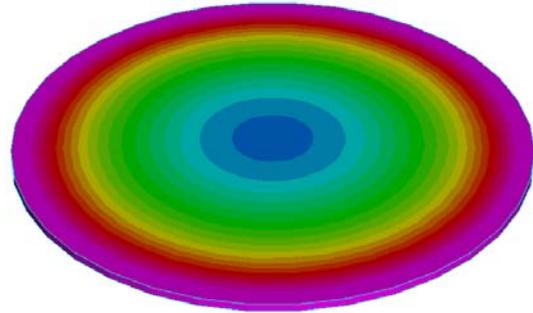
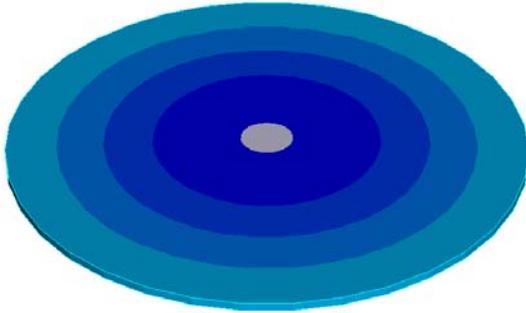
- Parameter:
- Zuglasten: 1 kN, 5 kN
  - Scheibenstärken: 5mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 15mm
  - E-Modul Kleberstoff: 1000 N/mm<sup>2</sup>, 1500 N/mm<sup>2</sup>, 2000 N/mm<sup>2</sup>
  - Fugendicken: 1mm, 2mm

Auszug Ergebnisse:

*Glasstärke 5mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

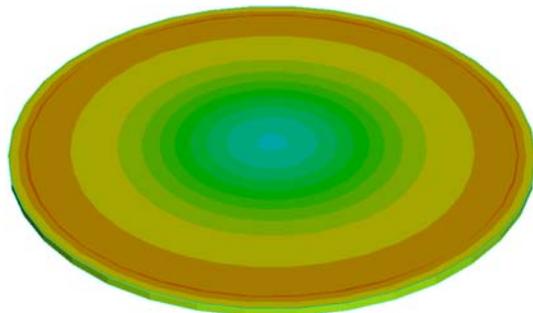
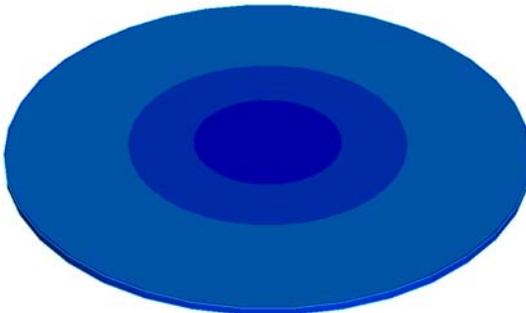
*Spannung:*



*Glasstärke 10mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

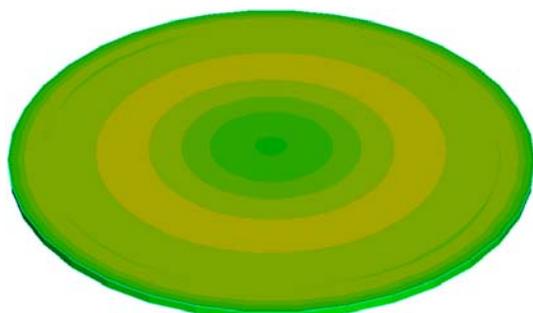
*Spannung:*



*Glasstärke 15mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

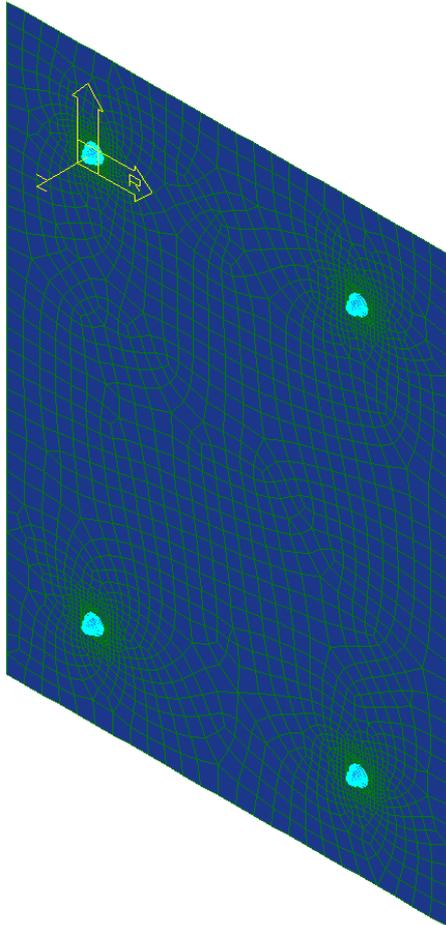
*Spannung:*



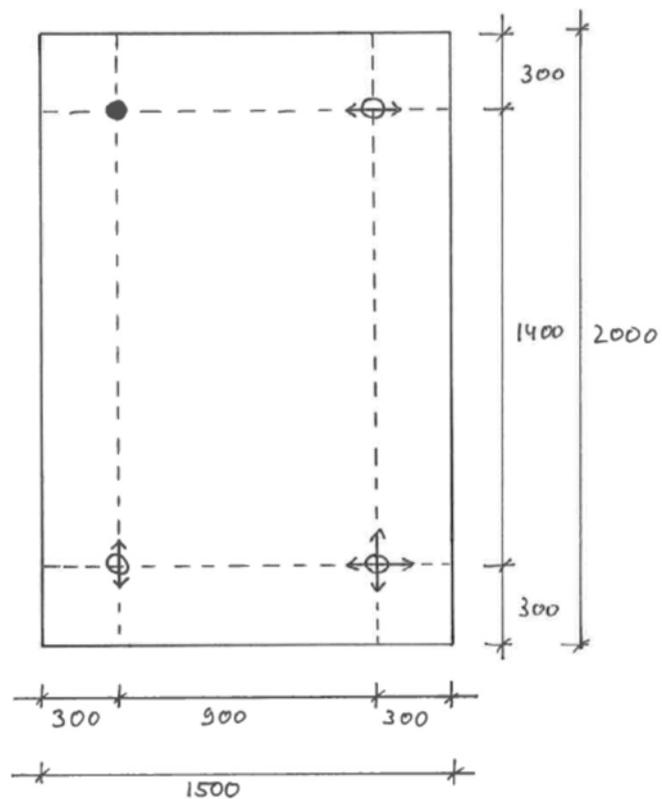
### Scheibe mit 4 Haltern:

- Beschreibung:
- 4 Punkthalter auf einer Glasscheibe 1500mm x 2000mm
  - Randabstände nach TRPV
  - Glasscheibe als Platten
  - Belastung durch Windeinwirkung und Eigengewicht

Isometrie:



Lagerung:



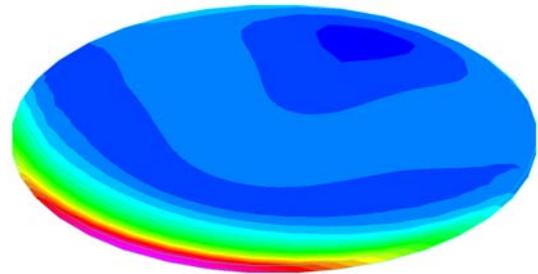
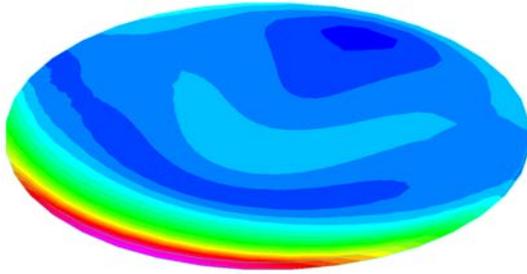
- Parameter:
- Einwirkungen: 1 kN/m<sup>2</sup> Windsog, 1 kN/m<sup>2</sup> Winddruck, Eigengewicht
  - Scheibenstärken: 5mm, 10mm, 15mm
  - E-Modul Klebstoff: 1000 N/mm<sup>2</sup>, 1500 N/mm<sup>2</sup>, 2000 N/mm<sup>2</sup>
  - Randabstände: 100mm, 200mm, 300mm
  - Fugendicken: 1mm

Auszug Ergebnisse:

*Glasstärke 5mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

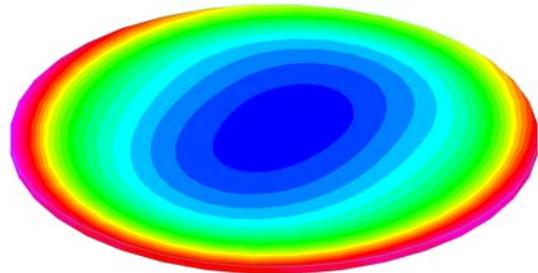
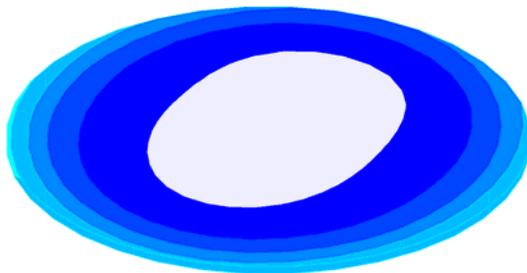
*Spannung:*



*Glasstärke 10mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

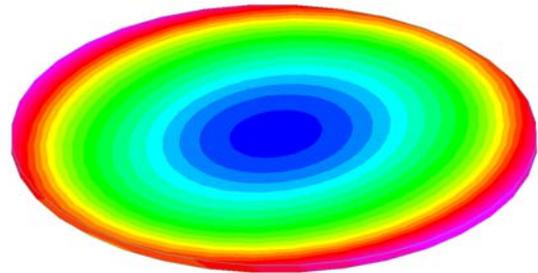
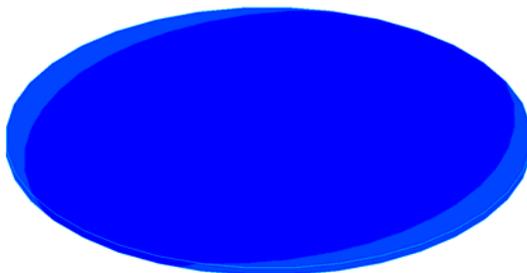
*Spannung:*



*Glasstärke 15mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

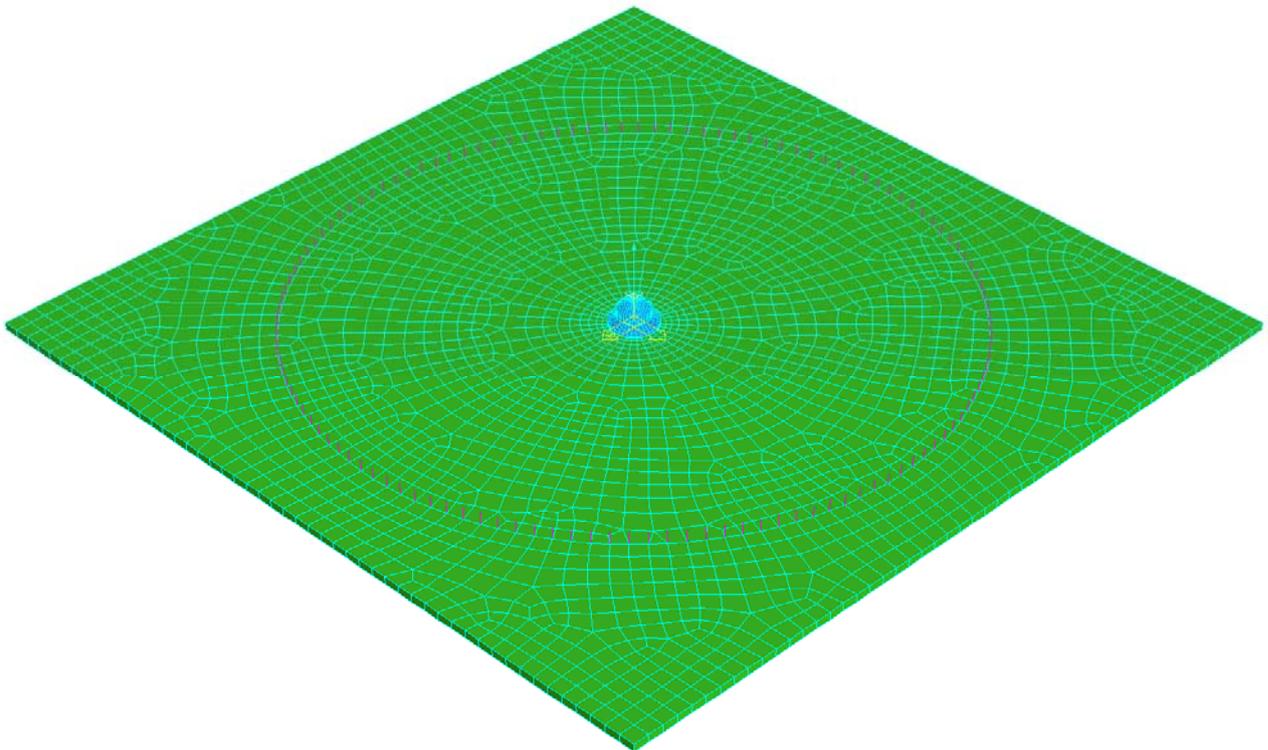
*Spannung:*



### Abgewandelter Doppelring-Biegeversuch:

- Beschreibung:
- Punkthalter auf Glasscheibe 1000mm x 1000mm
  - Lagerung auf Zug / Druck im Radius von 400mm um den Halter
  - Belastung auf Zug direkt am Halterdeckel
  - Glasscheibe als Volumen

Isometrie:



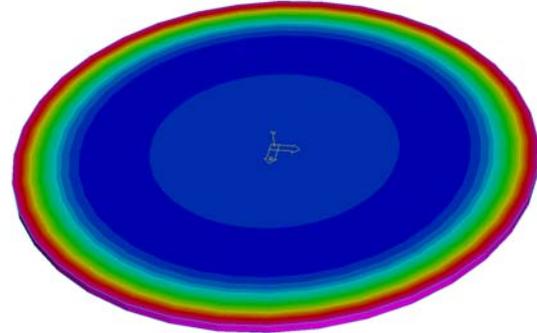
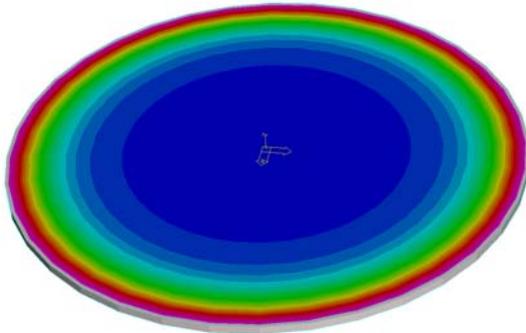
- Parameter:
- Zuglasten: 1 kN, 5 kN
  - Scheibenstärken: 5mm, 10mm, 15mm
  - E-Modul Klebstoff: 1000 N/mm<sup>2</sup>, 1500 N/mm<sup>2</sup>, 2000 N/mm<sup>2</sup>
  - Fugendicken: 1mm

Auszug Ergebnisse:

*Glasstärke 5mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

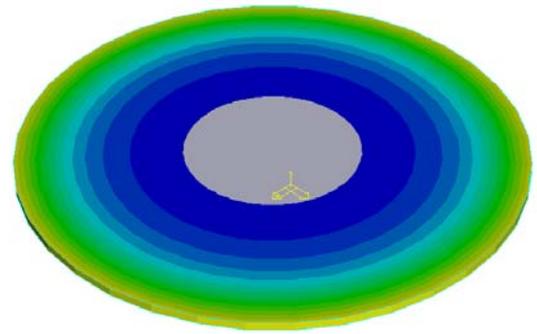
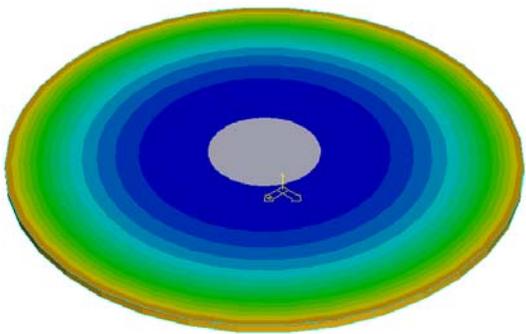
*Spannung:*



*Glasstärke 10mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

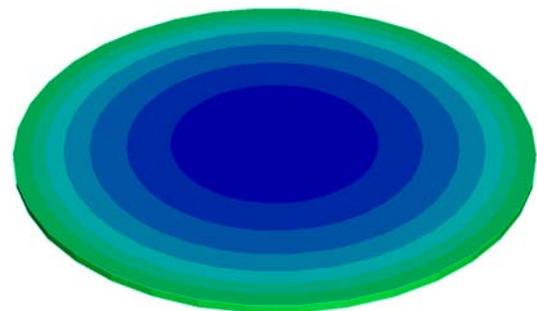
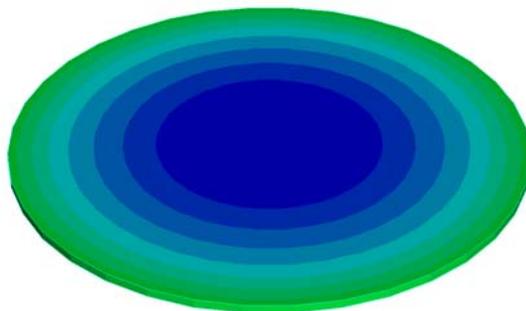
*Spannung:*



*Glasstärke 15mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm*

*Dehnung:*

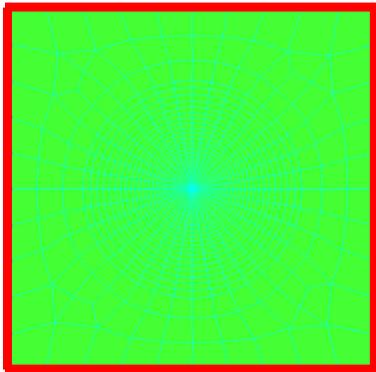
*Spannung:*



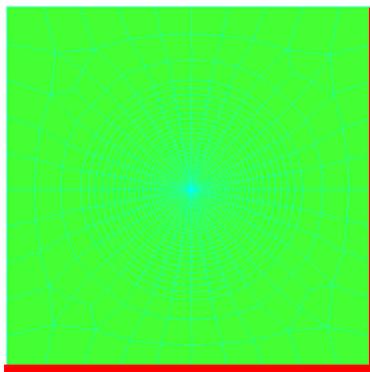
### Abgewandelte Zugversuche:

- Beschreibung:
- Zur Abbildung realitätsnaher Belastungszustände
  - Modelle identisch zu Zugversuch jedoch mit geänderten Lagerungen

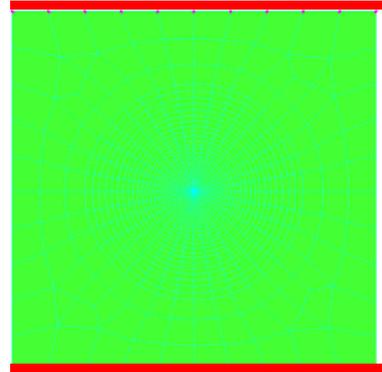
Lagerung Modell 1:



Lagerung Modell 2:



Lagerung Modell 3:



- Parameter:
- Zuglasten: 1 kN, 5 kN
  - Scheibenstärken: 5mm, 10mm, 15mm
  - E-Modul Klebstoff: 2000 N/mm<sup>2</sup>
  - Fugendicken: 1mm

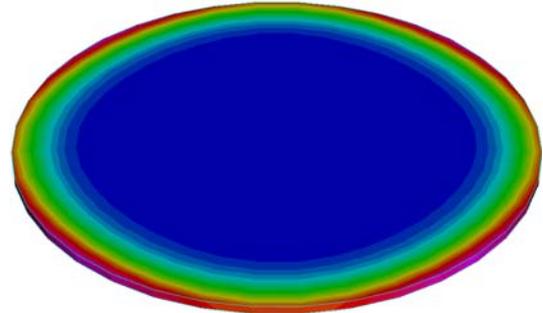
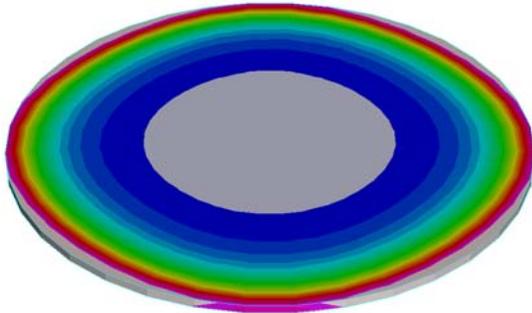
Auszug Ergebnisse:

Modell 1:

Glasstärke 5mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

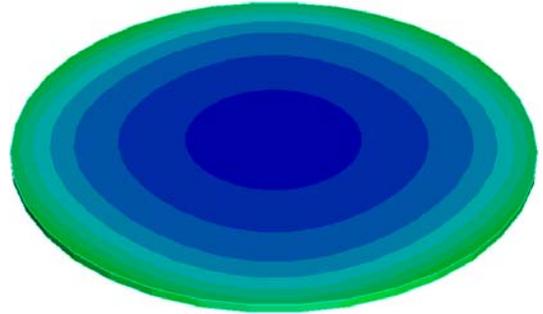
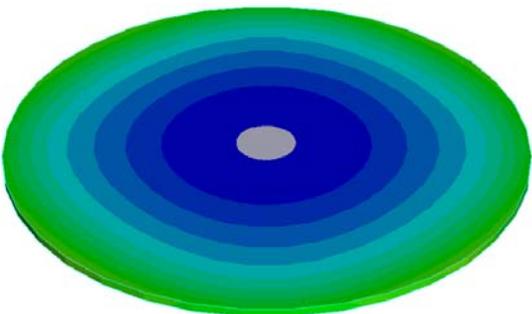
Spannung:



Glasstärke 10mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

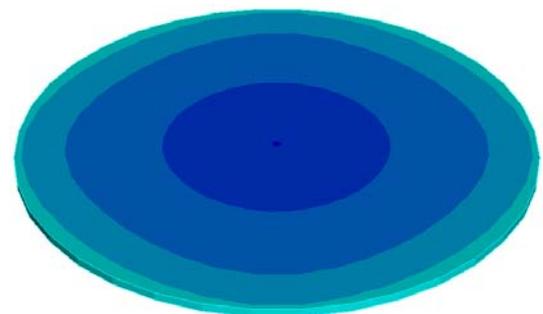
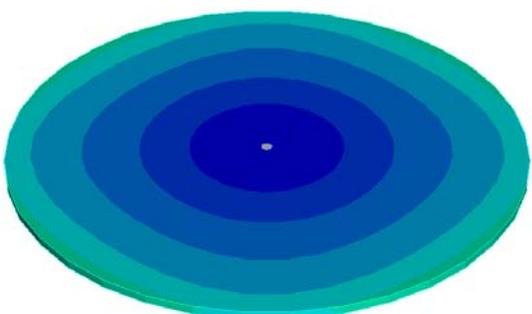
Spannung:



Glasstärke 15mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

Spannung:

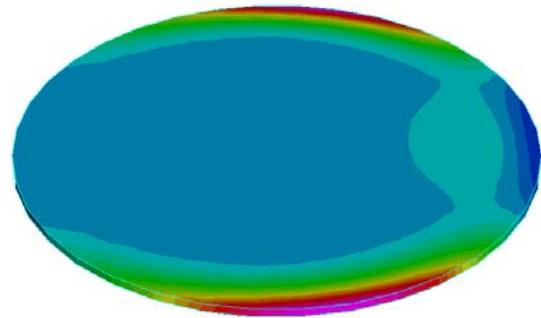
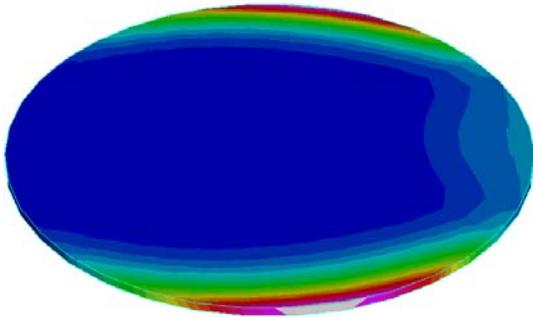


Modell 2:

Glasstärke 5mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

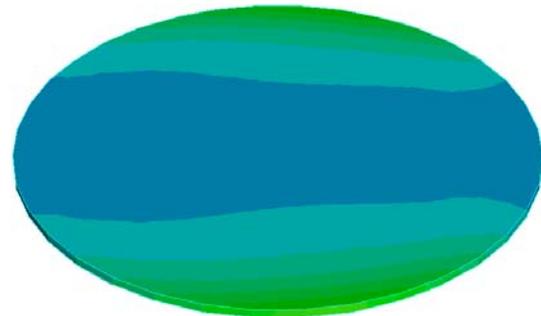
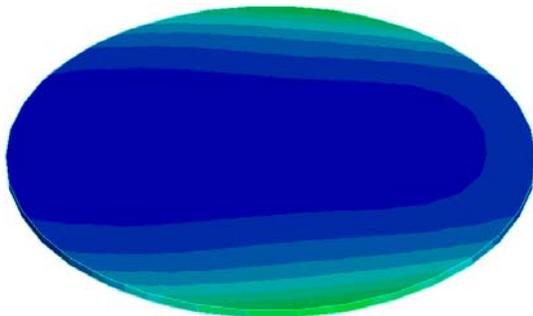
Spannung:



Glasstärke 10mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

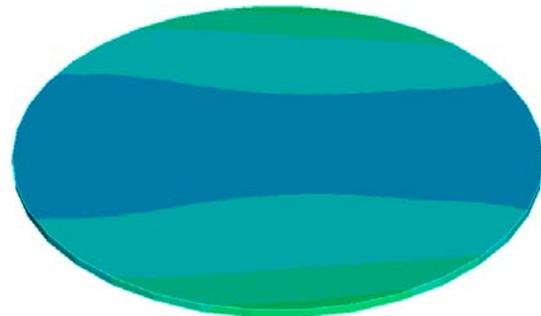
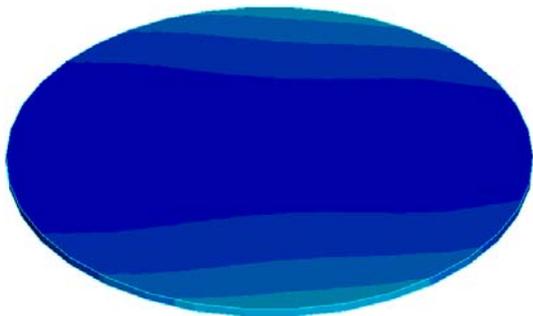
Spannung:



Glasstärke 15mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

Spannung:

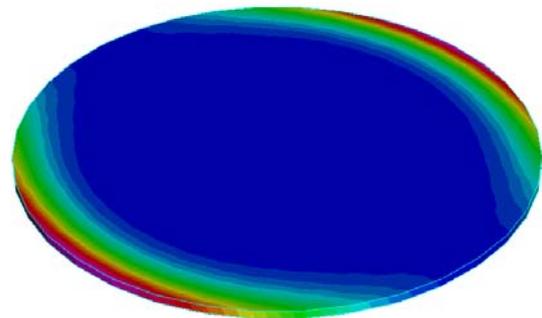
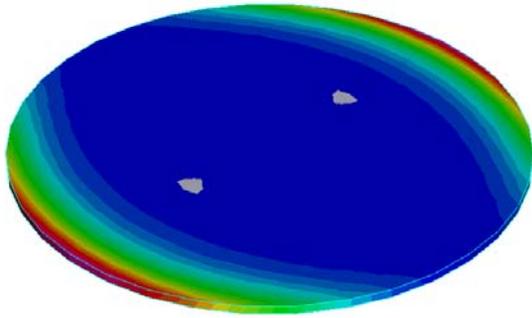


Modell 3:

Glasstärke 5mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

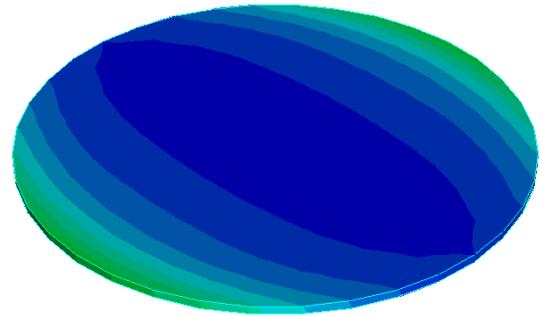
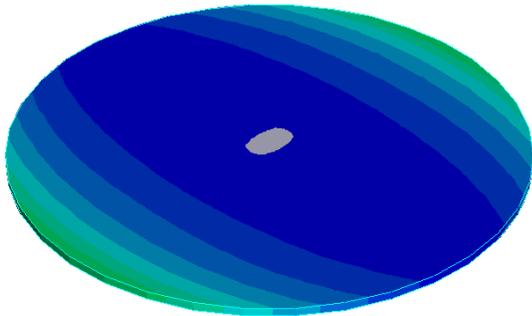
Spannung:



Glasstärke 10mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

Dehnung:

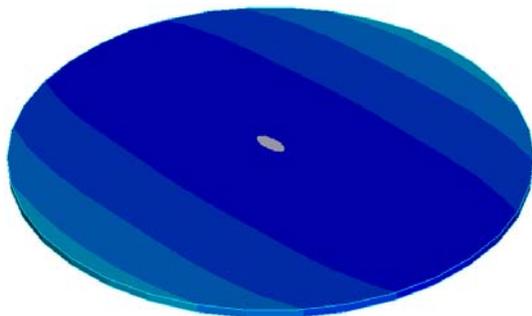
Spannung:



Glasstärke 15mm – E-Modul 2000 N/mm<sup>2</sup> - Fugenstärke 1mm

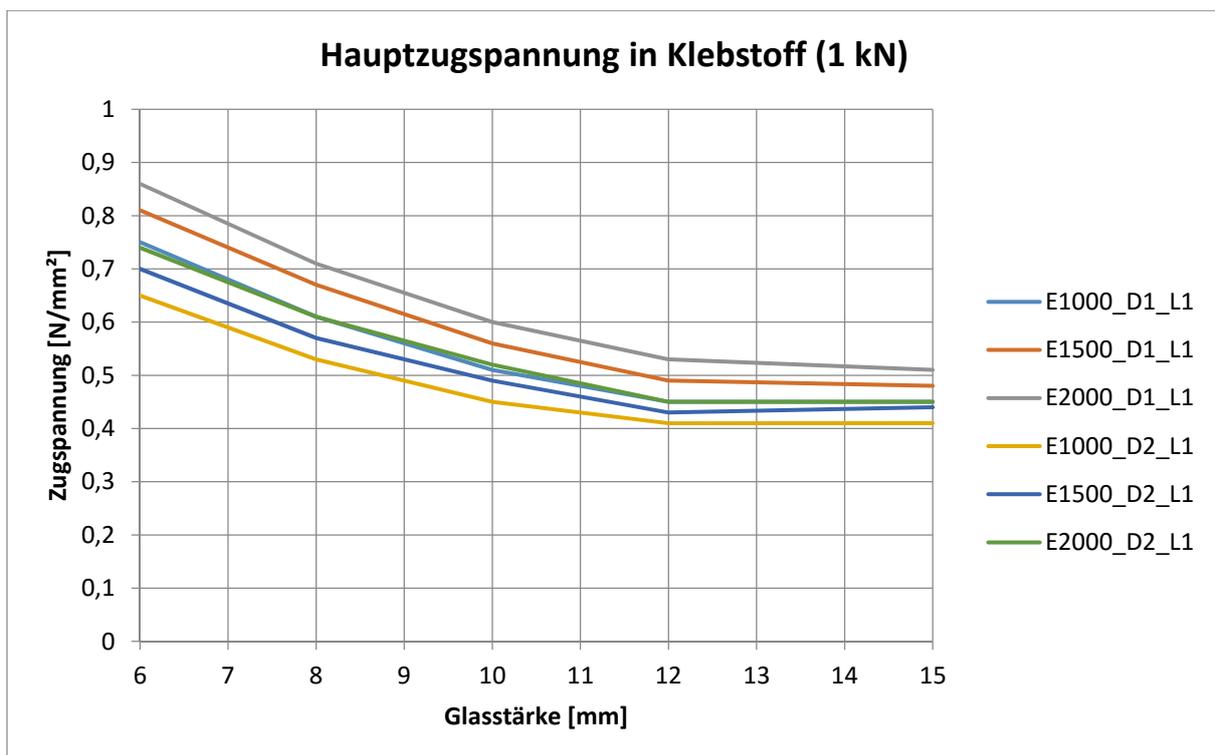
Dehnung:

Spannung:



Aus den zunächst durchgeführten Simulationen des Zugversuchs und der Scheibe mit 4 Punkthaltern ergab sich, dass die Spannungsverteilung dieser beiden Versuche nicht übereinstimmte. Das rotationssymmetrische Spannungsbild des Zugversuchs entspricht einer idealen Vorstellung, die in einer Scheibe mit 4 Haltern aber nicht entsteht, da die Verformung der Scheibe selbst in diesem idealen Modell nicht berücksichtigt wird. Um diese Effekte zu berücksichtigen wurde der abgewandelte Zugversuch entwickelt. Besonders nah am Verhalten der Halter bei einer Scheibe mit 4 Punkthaltern ist dabei das Modell 2. Dieser Versuch war mit einer seiner realitätsnahen Beanspruchung der Klebefuge von Interesse als experimenteller Versuch.

Im nachfolgenden Diagramm sind beispielhaft die Ergebnisse des allgemeinen Zugversuchs für verschiedene Elastizitätsmodule, Klebeschichtdicken und Glasstärken abgebildet.



E1000 / E1500 / E2000 = E-Modul 1000 MPa / 1500 MPa / 2000 MPa  
D1 / D2 = Schichtdicke Klebefuge 1mm / 2mm  
L1 = Zuglast 1 kN

Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Spannungen mit in der Klebefuge mit sinkendem Elastizitätsmodul, steigender Klebeschichtdicke und steigender Glasstärke abnehmen. Dies lässt jedoch herstellungstechnische Gesichtspunkte, Eigenlast bei Vertikalverglasungen, Erscheinungsbild und Kosten außen vor.

Für die grundlegenden Materialparameter waren vor allem Zug-, Druck- und Scherversuche an Substratprüfkörpern von Interesse. Die Ergebnisse wurden dann im Rahmen von Kleinteilsimulationen und Ein-Element-Körpern kalibriert und somit das Materialmodell entsprechend AP7 entwickelt.

Alle Fortschritte die in Bezug auf das Materialmodell in AP7 erreicht wurden, konnten mit dem Haltermodell direkt am Zugversuch des Punkthalters bzw. an der Scheibe mit 4 Punkthaltern getestet werden. Ebenso konnten konstruktive Änderungen bzw. Ergänzungen direkt übernommen werden.

## II.1.3 Arbeitspaket 3.3 – Verbindungselemente

### **Ziele**

Verbindungselemente sind wesentliches Bindeglied zwischen Unterkonstruktion und dem geklebten Glaselement. Dabei muss ihre Funktionalität an Kriterien wie Lasteinleitung, Gewährleistung der Zwängungsfreiheit und Toleranzaufnahme ausgerichtet werden. Die Verbindungselemente variieren innerhalb der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten (horizontaler oder vertikaler Einbau, ausfachende Brüstungsverglasung). Die grundlegende Auslegung, die konstruktive Detailausbildung und der Nachweis der Funktionalität sollten durch numerische Strukturanalysen gestützt werden. Dabei waren verschiedene Randbedingungen wie äußere Lasten, Temperaturdifferenzen und Auflagerverschiebungen zu berücksichtigen.

Ziel ist die Unterstützung der konstruktiven Detailausbildung der Verbindungselemente durch numerische Strukturanalyse verschiedener Konzeptstufen und statischer Dimensionierung sowie die Dimensionierung der Verbindungselemente für experimentelle Untersuchungen.

### **Ergebnisse**

Für die Ausführung einer Verglasung mit Punkthaltern muss eine statisch bestimmte Lagerung sichergestellt werden, da ohne diese zusätzliche Zwängungen infolge Temperatureinwirkung entstehen. Durch eine statisch bestimmte Lagerung können sich die Scheiben allseitig ausdehnen. Im Modell wird die Lagerung durch die Freiheitsgrade der Punkthalter bestimmt und ist frei an das reale Modell anpassbar.

Ob es sich bei der Auflagerkonstruktion um eine herkömmliche Ausführung mit Festlager, Loslager und Langloch in Spider bzw. Lasche oder um eine spezielle Lösung mit Pendelstäben handelt, spielt dabei für das Punkthaltermodell keine relevante Rolle.

Grundsätzlich werden immer die Varianten einer ideal funktionstüchtigen Lagerung und einer blockierenden Lagerung untersucht. Somit können die maximalen Spannungen im Bereich der Halter und der Klebefuge ermittelt werden. Anhand der Auflagerkräfte kann dann die Unterkonstruktion bzw. das Verbindungselement bemessen werden.

Dieses Vorgehen wurde für Simulation der Bauteilversuche und der Demonstratoren umgesetzt.

## II.1.4 Arbeitspaket 3.4 – Dämpfungssystem

### **Ziele**

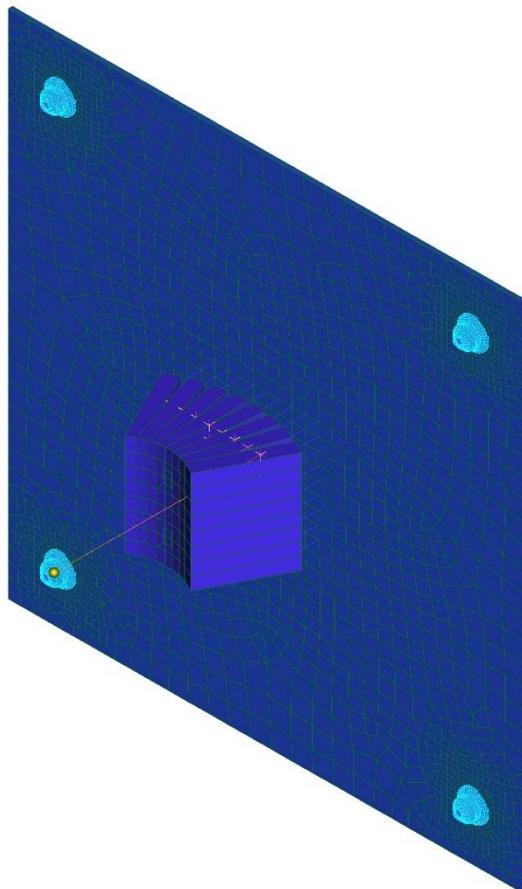
Ziel der volldynamisch-transienten Pendelschlagsimulation ist die Abbildung des physikalisch-mechanischen Strukturverhaltens mit Hilfe einer FE-Simulation. Dabei soll der elastische Kontakt zwischen Pendelkörper und Verglasung in zeitlicher und flächiger Entwicklung wiedergegeben werden. Basierend auf numerischen Berechnungen können maßgebende Kenngrößen für die Entwicklung der Dämpferelemente (Dämpfungsmaß etc.) so definiert werden, dass kritische Hauptspannungszustände im Glas und kritische Vergleichsspannungszustände im Klebstoff ausgeschlossen sind. Abschließend sollte die Umsetzung des Dämpferkonzepts durch numerische Berechnungen bei dynamischer beziehungsweise stoßartiger Beanspruchung überprüft werden.

Ziel ist es mit Hilfe volldynamisch-transienter Berechnung im Zeitschrittverfahren die kennzeichnenden Parameter (Materialeigenschaften, Dimensionierung der Querschnitte) für das Dämpfungssystem festzulegen und mit Hilfe von numerischen Berechnungen das endgültige Dämpfungskonzept zu überprüfen.

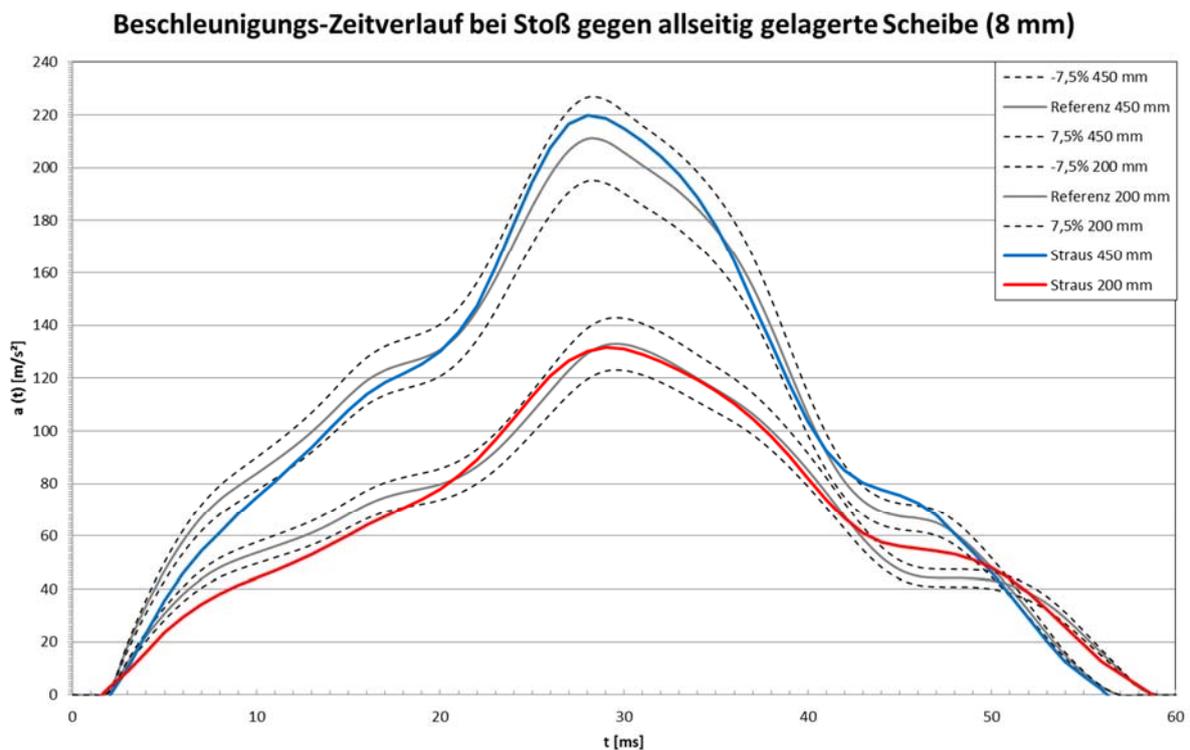
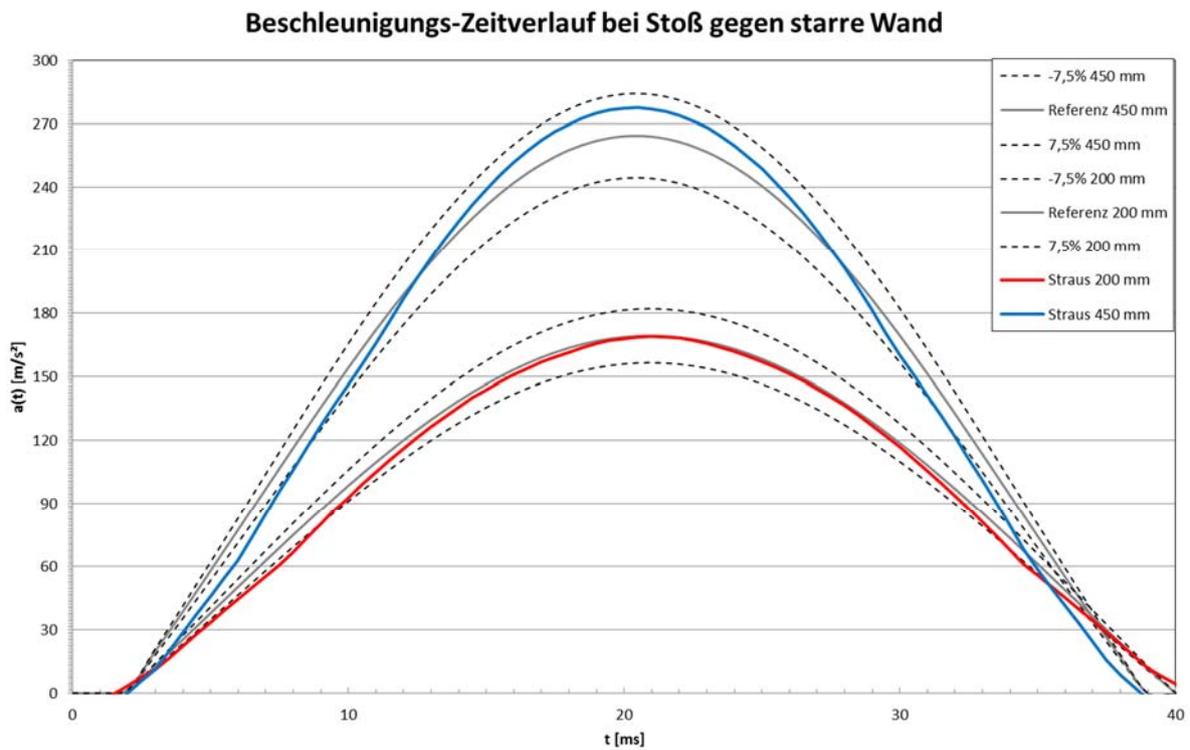
### **Ergebnisse**

Um Simulationen zum Dämpfungssystem durchführen zu können wurde ein Modell für nichtlineare volldynamisch-transiente Berechnungen entwickelt. Das Ziel war dabei die Möglichkeit einer Verifizierung entsprechend DIN 18008-4 Anhang C. Aus diesem Grund wurde ein universelles Pendelschlag-Sub-Modell entwickelt und anhand der Berechnungsvorgaben und Verifizierungsdiagramme nach DIN 18008-4 verifiziert.

Modell:



Verifizierung:



Mit dem entwickelten Modell für die nichtlineare volldynamisch-transiente Pendelschlagsimulation konnten im Anschluss Vergleichsrechnungen für Modelle ohne Dämpfungssystem, mit Tellerfedern oder mit Aluminiumschaum durchgeführt werden.

Probleme bei der Modellierung bildete jedoch die Interaktion der geschichteten Tellerfedern bzw. der Ausfall des Aluminiums nach der Kompression. Die theoretische Kennlinie der

Federelemente konnte durch Federelemente in das FE-Modell implementiert werden. Anhand der experimentellen Bauteilversuche konnten die Interaktion der Tellerfedern in der Federsteifigkeit der kombinierten Federelemente im FE-Modell berücksichtigt und kalibriert werden.

## II.1.5 Arbeitspaket 4.1 – Gestaltung und Auslegung

### **Ziele**

Es soll die Dimensionierung der Unterkonstruktion und die Klärung der baurechtlichen Rahmenbedingungen für die Anwendbarkeit der Konstruktionsvarianten erfolgen. Der Einsatz virtueller Untersuchungsmethoden im Forschungs- und Entwicklungsprozess zur Vernetzung der Projektpartner ist Ziel dieses Arbeitspaketes.

Ziele sind ein Katalog mit baurechtlichen Anforderungen an die Konstruktionsbestandteile für drei Varianten sowie die statisch erforderlichen Bauteildimensionen für die Bestandteile der Unterkonstruktion und Auflagerkräfte an der Schnittstelle zum Haupttragwerk und am Anschlusspunkt des Punkthalters.

### **Ergebnisse**

Die Konstruktionsbestandteile von punktgehaltenen Verglasungselemente lassen sich wie folgt entsprechenden ihrer baurechtlichen Verwendbarkeitsnachweise bzw. Anwendbarkeitsnachweise unterteilen:

- Bauprodukte nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung bzw. europäisch technischer Zulassung
  - o Edelstahlbauteile nach Z-30.3-6
- Bauprodukte nach gültigen technischen Baubestimmungen
  - o Stahlbauteile nach DIN EN 1993
  - o Verglasungen nach DIN 18008
- Bauprodukte für die eine Zustimmung im Einzelfall notwendig wird
  - o Klebstoffe / Kunststoffe
- Bauarten für die eine Zustimmung im Einzelfall notwendig wird
  - o geklebte Punkthalter mit Gelenk

Grundsätzlich sind punktgehaltene Verglasungen nach DIN 18008-3 geregelt. Dabei handelt es sich jedoch ausschließlich um starre Punkthalter mit Tellerhaltern auf beiden Seiten der Verglasung die durch einen Bolzen durch eine Bohrung im Glas verbunden werden.

Aufgrund der hier geplanten Lagerung weicht die Bauart in folgenden Punkten von der DIN 18008-3 ab:

- kein mechanischer Lastabtrag des Eigengewichts durch Bohrung
- Lastabtrag über Verklebung
- gelenkiger Punkthalter

Neben den Abweichungen von der DIN 18008-3 gibt es zusätzlich unregelmäßige Bauprodukte:

- Verklebung mit unregelmäßigem Bauprodukt

Aufgrund der abweichenden Bauprodukte und Bauarten wird beim Einsatz der Punkthalter eine Zustimmung im Einzelfall notwendig oder die Erwirkung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Im Rahmen eines der beiden Verfahren wird das Nachweiskonzept aus AP 7 sowie die Ausbildung einer Nothalterung aus AP 3 notwendig werden.

Für die drei Konstruktionsvarianten:

- Brüstungsverglasung
- Gebäudehülle mit starrer Unterkonstruktion (Stabtragwerk)
- Gebäudehülle mit weicher Unterkonstruktion (Seiltragwerk)

ergeben sich grundlegend identische baurechtliche Anforderungen. Die Verglasungen und ihre Befestigungen müssen den Einwirkungen nach DIN EN 1991 und DIN 18008 standhalten. Für die Brüstungsverglasung würde sich lediglich zusätzlich die Anforderung der Stoßsicherheit nach DIN 18008-4 bzw. der ETB-Richtlinie ergeben.

Horizontal verbaute Elemente müssen zusätzlich Resttragfähigkeitseigenschaften besitzen. Aufgrund der konstruktiven Ausbildung von Vertikalverglasungen wären Fragen zur Resttragfähigkeit ebenfalls im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens zu klären.

## II.1.6 Arbeitspaket 4.2 – Detailplanung

### **Ziele**

Gegenstand des Arbeitspaketes sind die statische Bemessung der drei Demonstrationsobjekte sowie die Steigerung der Materialeffizienz.

Ziele ist die materialeffiziente Ausnutzung der Verglasung und der Unterkonstruktion durch Festlegung einer Zielvorgabe für Steifigkeit und Freiheitsgrade des Punkthalters.

### **Ergebnisse**

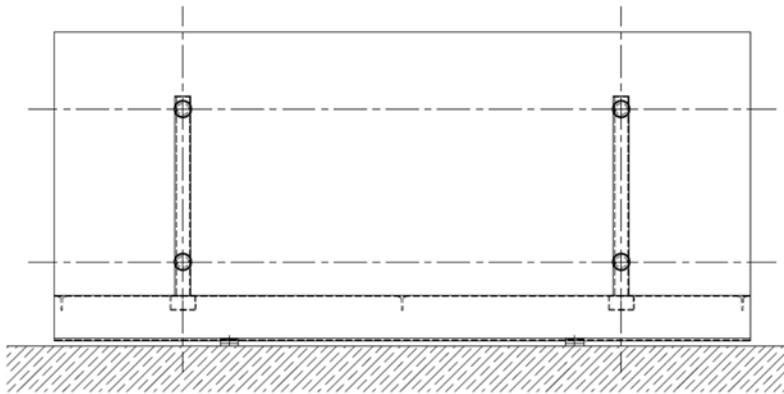
Im ersten Projektjahr wurde eine „Brücke“ mit beidseitiger Brüstungsverglasung als Messestand statisch dimensioniert. Die Verglasungen wurden an einer Stahlunterkonstruktion montiert die direkt auf dem Boden der Messehalle aufliegt. Es wurden demnach keine absturzsichernden Funktionen übernommen. Da es sich um ein Ausstellungsstück das begehbar war handelte wurde eine horizontale Verkehrslast von 0,5kN/m angesetzt. Von einem Menschengedränge auf der „Brücke“ war bei einer Länge von 2,7m und einer Breite von 1m nicht auszugehen.

Bei den Verglasungen handelte es sich um 10mm ESG mit einem Format 2700mm x 1200mm. Sie wurden mit jeweils 4 geklebten Punkthaltern an der Stahlunterkonstruktion befestigt.

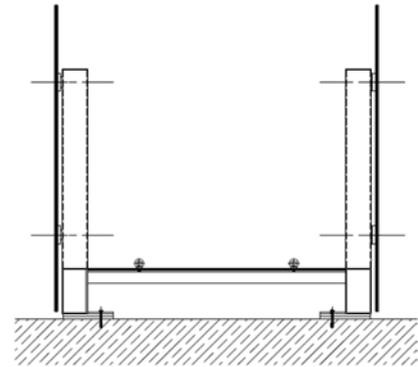
Bei der Unterkonstruktion handelte es sich um einen geschweißten Rahmen aus Pfosten und Querriegeln RR100x60x4, Längsriegeln RR180x100x5 und zusätzlichen Querriegeln T60. Die einzelnen Elemente wurden mit umlaufenden 3mm Kehlnähten aneinander befestigt.

Ansichten und Schnitte:

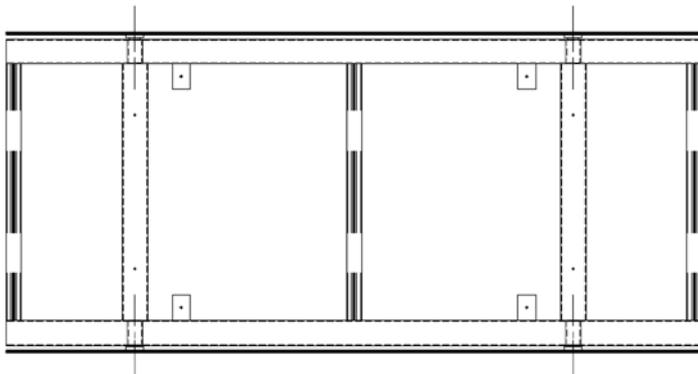
Ansicht M 1:10



Seltenansicht M 1:10

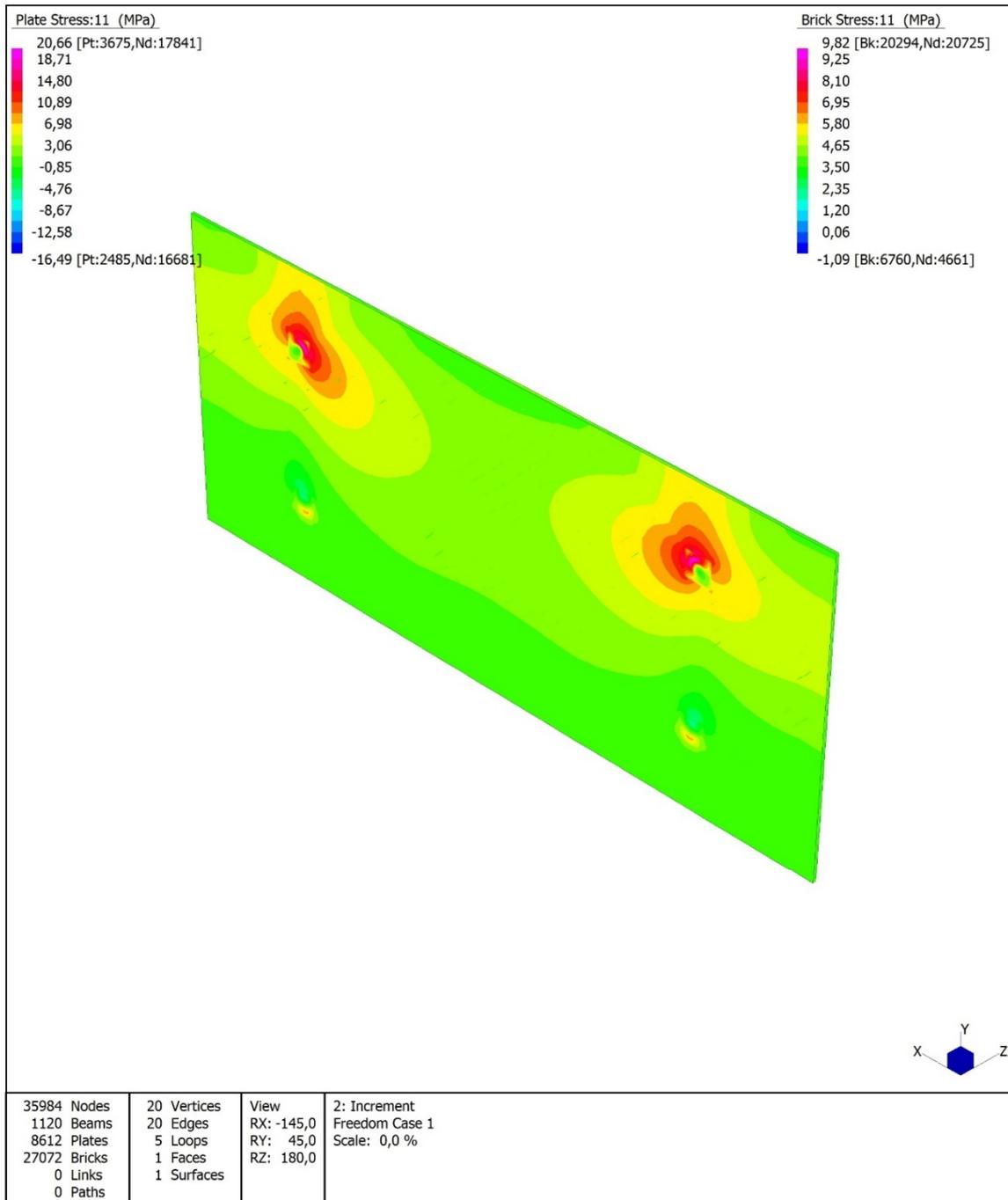


Draufsicht M 1:10



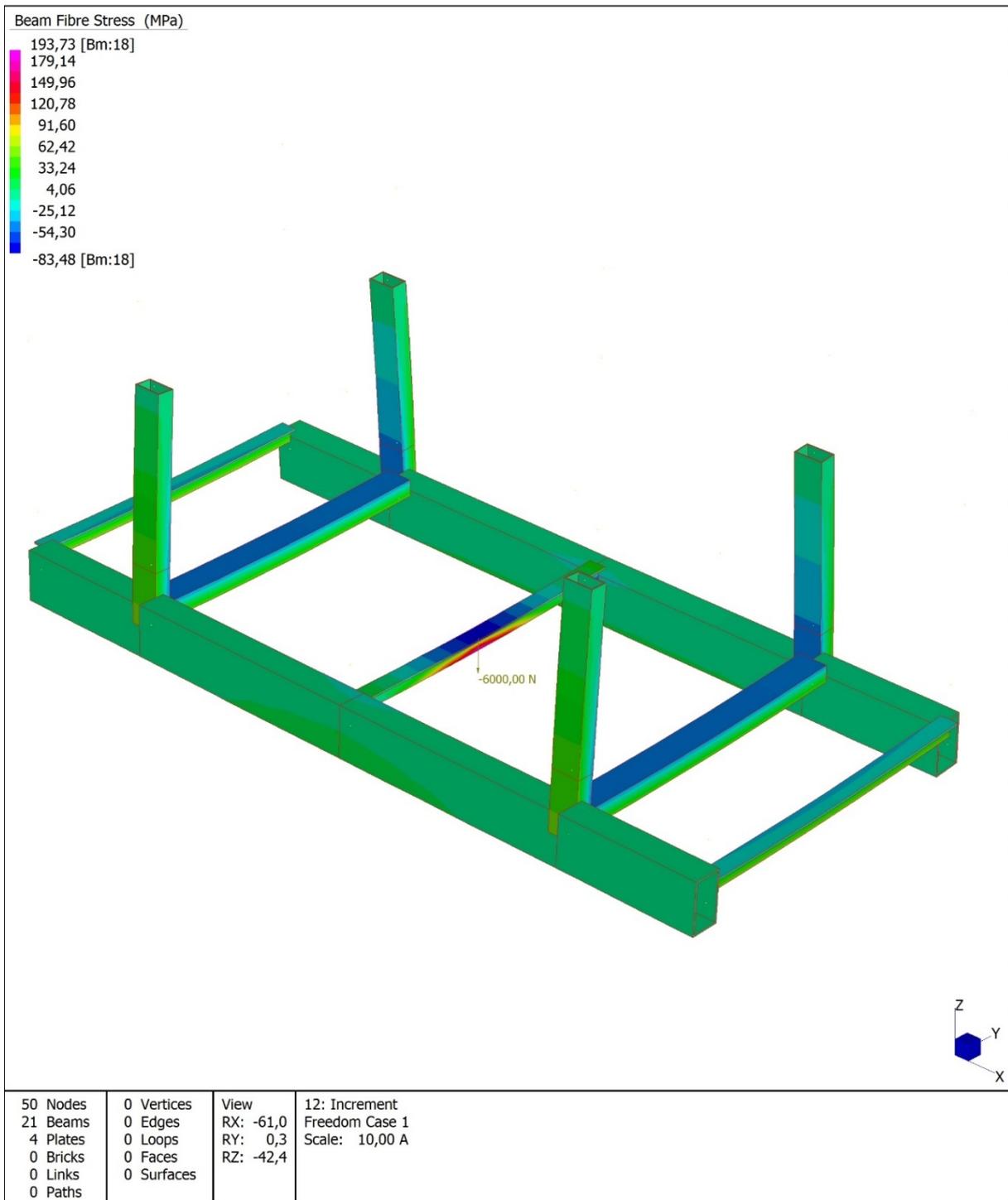
Der Nachweis der Verglasungen und der Unterkonstruktion wurde für verschiedene Einwirkungen und Einwirkungskombinationen durchgeführt. Dabei wurde die Unterkonstruktion bis zu einer Spannung von  $194 \text{ N/mm}^2$  bei zulässigen  $214 \text{ N/mm}^2$  optimiert.

# Spannung Verglasung (Plate) und Klebstoff (Brick):



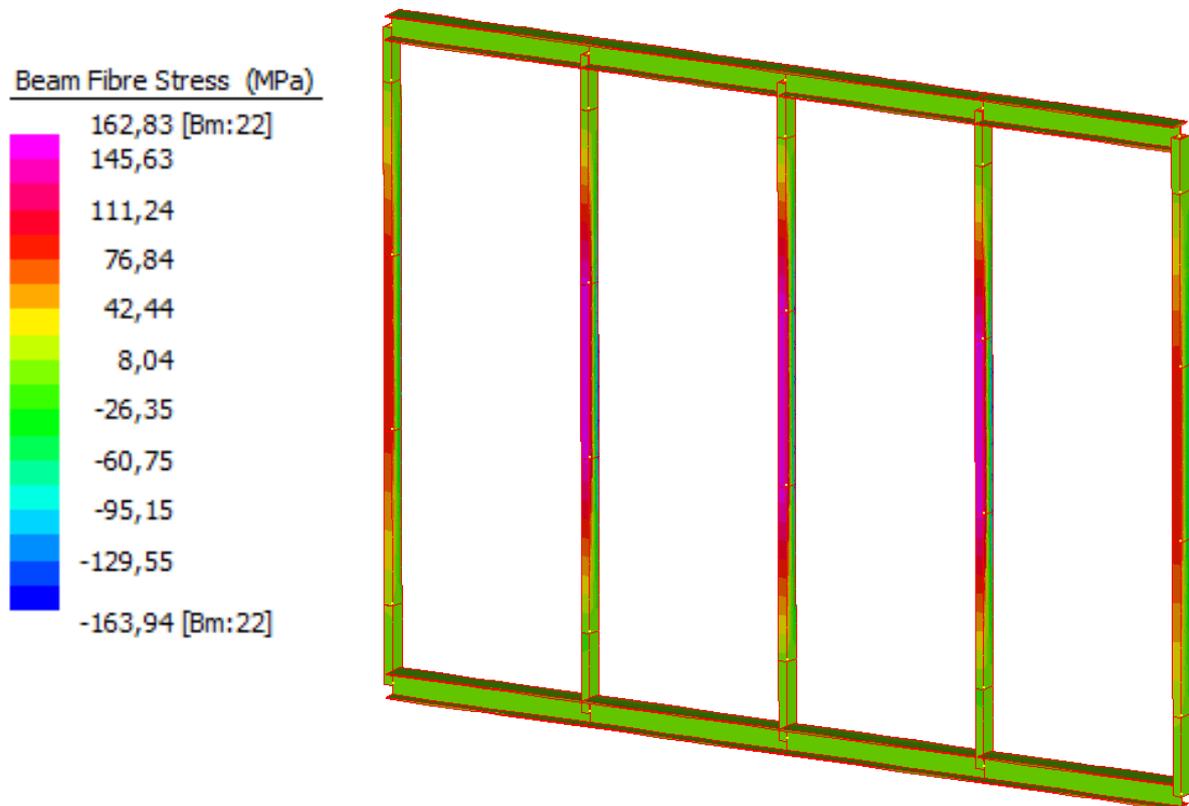
Straus7 R2.4.6 [Licenced to:GLASFAKTOR Ingenieure GmbH]  
 Model file: P:\OGLASKONNEX\IPT AP3\Punkthaltermodell\06.08.14\Messe.st7  
 Result file: P:\OGLASKONNEX\IPT AP3\Punkthaltermodell\06.08.14\Messe.NLA  
 2 September 2014 11:42 am

# Spannung Stahl:

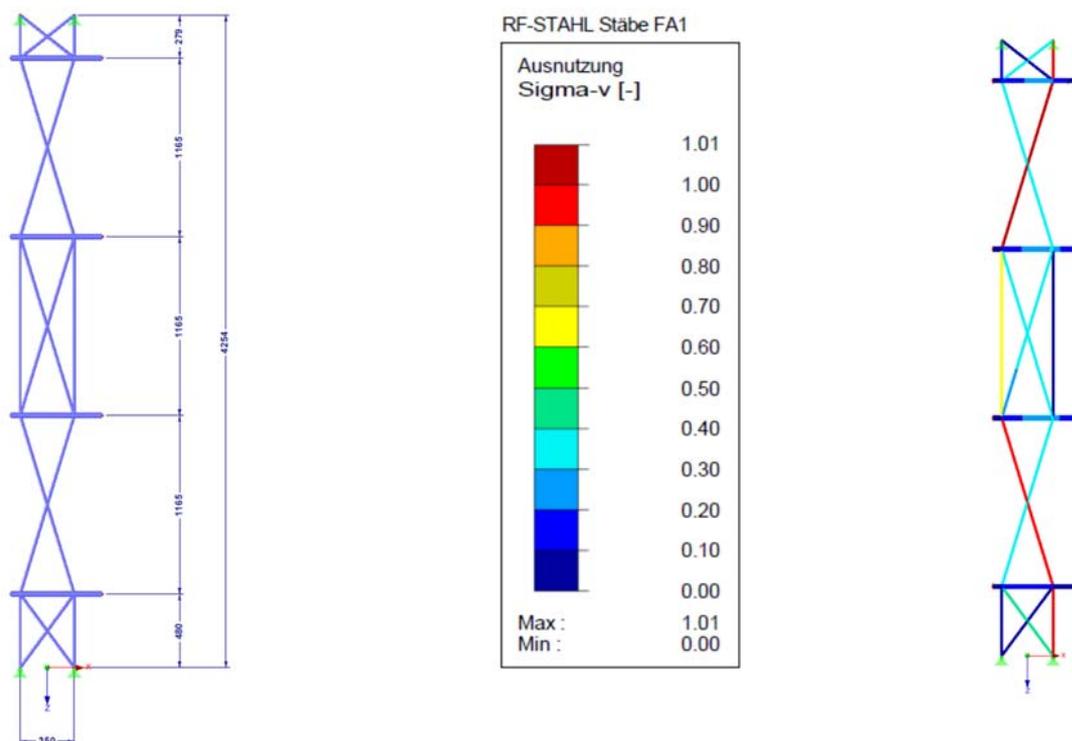


Straus7 R2.4.6 [Licenced to:GLASFAKTOR Ingenieure GmbH]  
 Model file: P:\0GLASKONNEX\IPT AP3\Punkthaltermodell\06.08.14\Unterkonstruktion.st7  
 Result file: P:\0GLASKONNEX\IPT AP3\Punkthaltermodell\06.08.14\Unterkonstruktion.NLA  
 2 September 2014 4:22 pm

Im zweiten bzw. dritten Projektjahr wurden zwei Fassadenmodelle als Demonstratoren eingesetzt. Dafür mussten die beiden Fassaden für eine Prüflast von 5 kN/m<sup>2</sup> im Fassadenprüfstand ausgelegt werden. Beim ersten Modell handelte es um eine Pfostenriegelkonstruktion an die Fassadenscheiben mittels Spidern montiert wurden.



Das zweite Modell war ein Seiltragwerk mit Spidern zur Aufnahme der Fassadenscheiben. Die Fassadenscheiben selbst wurden als Einzelmodell mit Punkthaltern wie in AP 3 beschrieben simuliert.



## II.1.7 Arbeitspaket 4.4 – Montage

### **Ziele**

Durch eine bauaufsichtlich belastbare Monitoringlösung ist der Materialsicherheitsbeiwert um 50% zu reduzieren.

### **Ergebnisse**

Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche Monitoringlösungen in Betracht gezogen und in Theorie durchgespielt.

Es können zwei Varianten von Monitoringlösungen in Betracht gezogen werden:

- In Form eines Mock-Up bzw. zusätzlichen Elementes, dass im Rahmen eines Bauvorhabens z.B. auf dem Dach montiert wird und in regelmäßigen Abständen überwacht wird
- In Form einer Ankündigung des Versagens des Bauteils selbst.

Die erste Variante ist grundsätzlich immer denkbar, außer es sprechen gestalterische Gründe dagegen.

Die zweite Variante würde für das Monitoring einen sehr guten Lösungsansatz bringen, jedoch wäre dafür eine chemische Veränderung des Klebstoffs notwendig, die dessen Materialeigenschaften weiterhin verändert. Eine Farbveränderung im Falle einer Überbeanspruchung wäre denkbar.

Zu klären ist jedoch die Konsequenz eines negativen Ergebnisses beim Monitoring einer einzelnen Scheibe für eine ganze Fassade.

## II.1.8 Arbeitspaket 7.1 – Konstitutive Beziehungen

### **Ziele**

Für die Analyse des Tragverhaltens stehen numerische Modelle auf Basis des Standes der Technik (kommerzielle Softwarelösungen) zur Verfügung. Derzeit fehlen für die Klebstoffe effiziente und realistische Materialgesetze, die die Bandbreite des komplexen, nichtlinearen Materialverhaltens hochmoduliger Klebstoffe ausreichend beschreiben. In Verbindung mit robusten Lösungsalgorithmen sollte die geplante Modellgenerierung auch wissenschaftliche Untersuchungen mittels numerischer Strukturanalysen ermöglichen. Eine hohe Vorhersagegenauigkeit und gute Effizienz können nur durch einen definierten Modellierungs- und Verifizierungsprozess gesichert werden und sind durch umfangreiche numerische Fallstudien zu ergänzen.

Ziel ist die Bereitstellung verifizierter Materialmodell für numerische Simulationen in den Arbeitspaketen AP3, AP4, AP8 und die Definition von Modellgrenzen.

### **Ergebnisse**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war die Definition eines realitätsnahen, verlässlichen Materialmodells eine Kernaufgabe. Für die ersten Simulationen zum Punkthalter wurden vereinfachte lineare Materialmodelle mit unterschiedlichen Elastizitätsmodulen eingesetzt.

Nach ersten Ergebnissen aus experimentellen Substratversuchen wurden mit Hilfe der Finte Elemente Software Straus 7 verschiedene nichtlineare bzw. hyperelastische Materialmodelle untersucht.

Als möglichen Ansatz wurde zunächst das Mooney-Rivlin-Modell untersucht und die dafür notwendigen Konstanten bestimmt. Anhand von numerischen Versuchen an Ein-Element-Körpern zeigte sich jedoch gerade bei großen Dehnungen eine erhebliche Abweichung zur experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurve. Dieses Problem lässt sich auf den lang anhaltenden, nahezu linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf zu Beginn der Belastung bis ca. 2% Dehnung zurückführen.

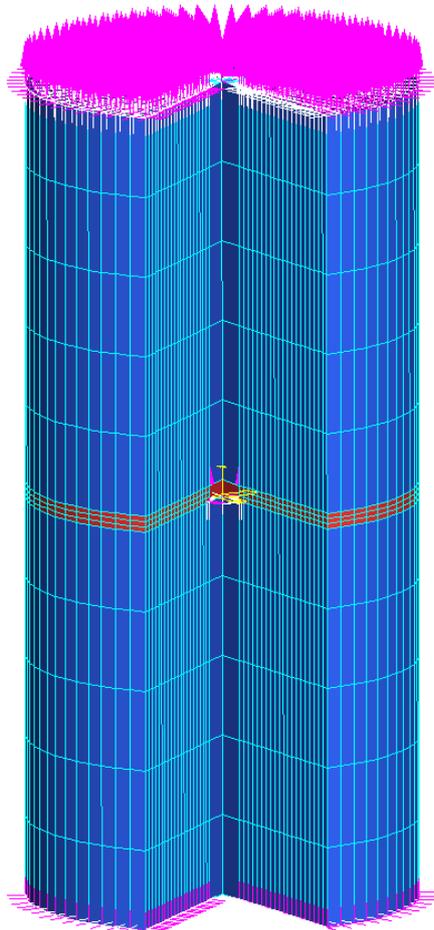
Diese Folge dieser Problematik war jedoch, dass zunächst mit einem linearen Materialmodell mit dem zugehörigen Elastizitätsmodul gerechnet werden konnte. In Versuchen an einer Scheibe mit 4 Punkthaltern konnte bestätigt werden, dass die Dehnungen unterhalb der Grenze von 2% liegen.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TUD wurde mit dem Programm ANSYS die Nutzung weiterer hyperelastischer, viskoelastischer und elastisch-plastischer Stoffgesetze untersucht. Hierbei trat vor allem eine elastisch-plastische Betrachtung in den Vordergrund. Mit einem derartigen Materialmodell können sowohl elastische Bereiche mit reversiblen Formänderungen als auch plastische Bereiche mit irreversiblen Formänderungen abgebildet werden. Die Unterscheidung erfolgt anhand der Fließgrenze.

Es wurden daraufhin das „Extended Drucker Prager“-Modell und das „Multilinear Isotropic Hardening“-Modell untersucht. Erstes kann als Grundlage der Beschreibung des Klebstoffs genutzt werden, jedoch verhält sich der Werkstoff in Realität oberhalb der Fließgrenze nicht ideal plastisch, wie vom Modell unterstellt. Zweites bietet hier Vorteile, allerdings unterliegt die gewählte Verfestigungsregel gewissen Einschränkungen zum Beispiel in Bezug auf die Entfestigung.

Es war zu untersuchen, ob eine Belastung im baurechtlich relevanten Bereich zu einer plastischen Verformung führen kann. Diese Frage war für die Erstellung eines effizienten numerischen Modells maßgebend.

Für diese Untersuchung wurde eine Zylinderzugprüfung simuliert. Dazu wurden zwei Edelstahlzylinder mit einem Durchmesser von 24mm mit einer Klebstoffschicht von 1mm als Fuge simuliert.



Geschnittene Isometrie des Zylinderzugprüfkörpers

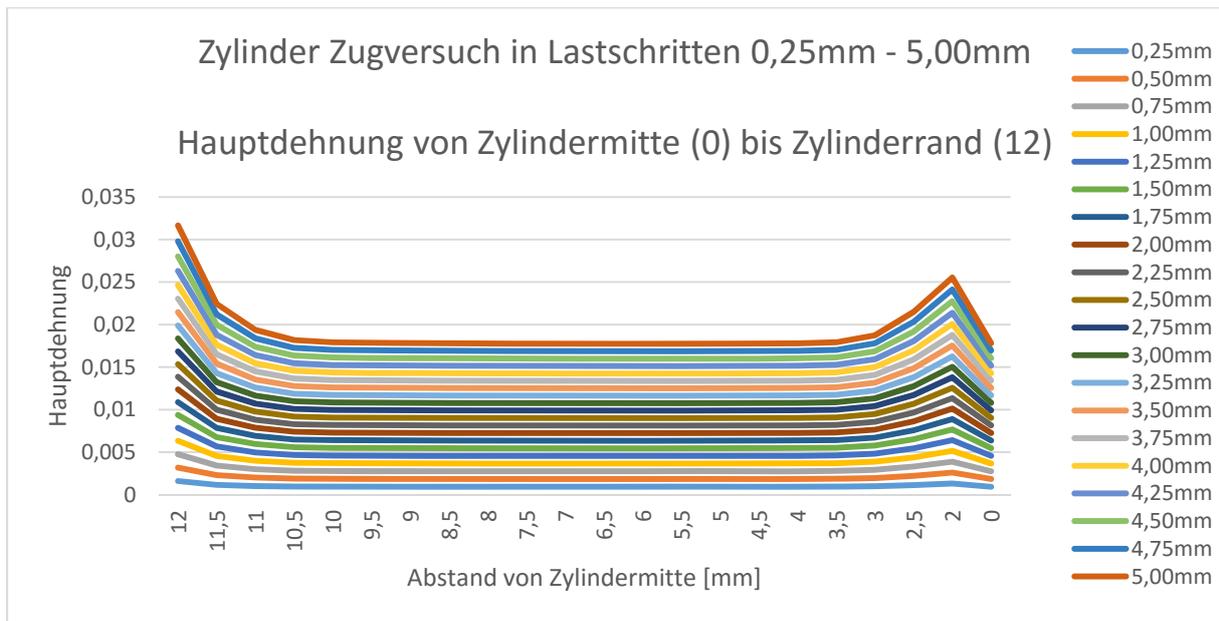
Als Grundlage der Simulation wurden zwei vereinfachte Materialmodelle herangezogen. Einerseits eine Multilineares Materialmodell, das der Spannungs-Dehnungs-Kurve des Zug- bzw. Druckversuchs am Zylinderzugprüfkörper entsprach und andererseits ein lineares Materialmodell, das den gleichen Anstieg wie das erste Modell besitzt, jedoch im Fließpunkt nicht der experimentell ermittelten Kurve folgt, sondern den ursprünglichen Anstieg beibehält.

Anhand dieser beiden Materialmodelle sollte ermittelt werden, ob und wann ein Unterschied im Spannungs-Dehnungs-Verhalten der simulierten Prüfkörper auftritt.

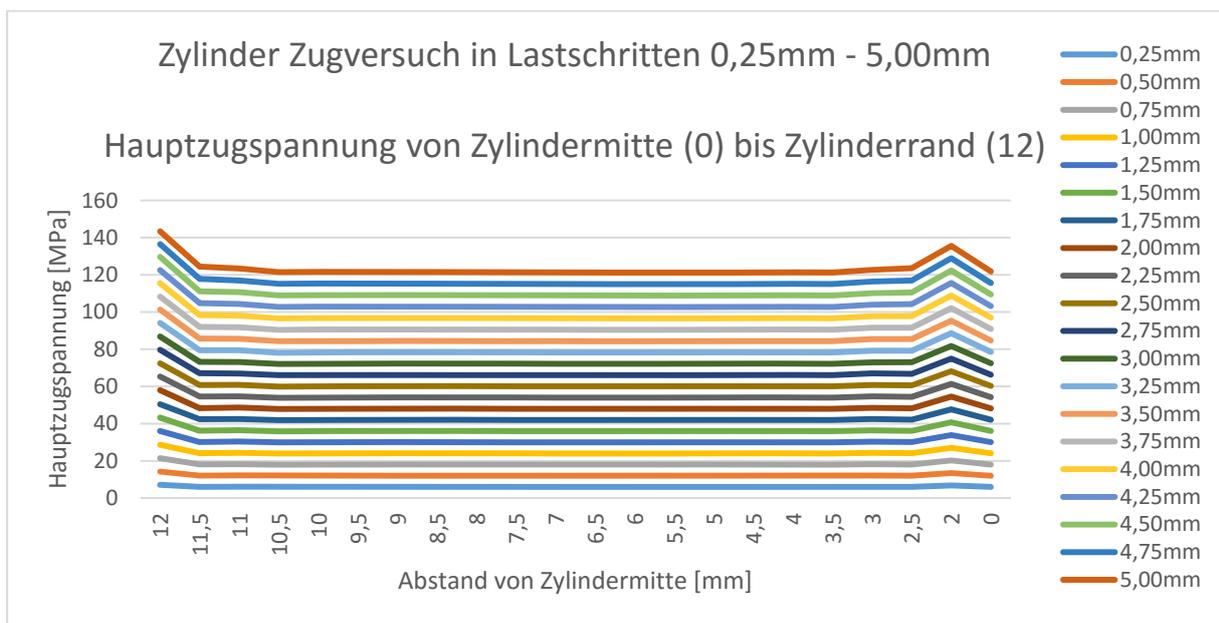
Die nachfolgenden Diagramme zeigen Unterschiede in Spannungs- und Dehnungsergebnissen die auf einen deutlichen Einfluss des plastischen Materialverhaltens. Betrachtet man jedoch die das Spannungsniveau bei ab welchem diese Unterschiede auftreten, dann kann festgestellt werden, dass es sich um einen Bereich handelt der weder im baurechtlichen Bereich noch im Bereich der Tragfähigkeit der Klebstoffe liegt.

Ein Spannungsniveau von über 60 N/mm<sup>2</sup> ist für die betrachteten Klebstoffe nicht relevant, da es ihre Zugfestigkeit überschreitet.

Hauptdehnung mit multilinearer Spannungs-Dehnungs-Kurve nach experimentellen Daten:

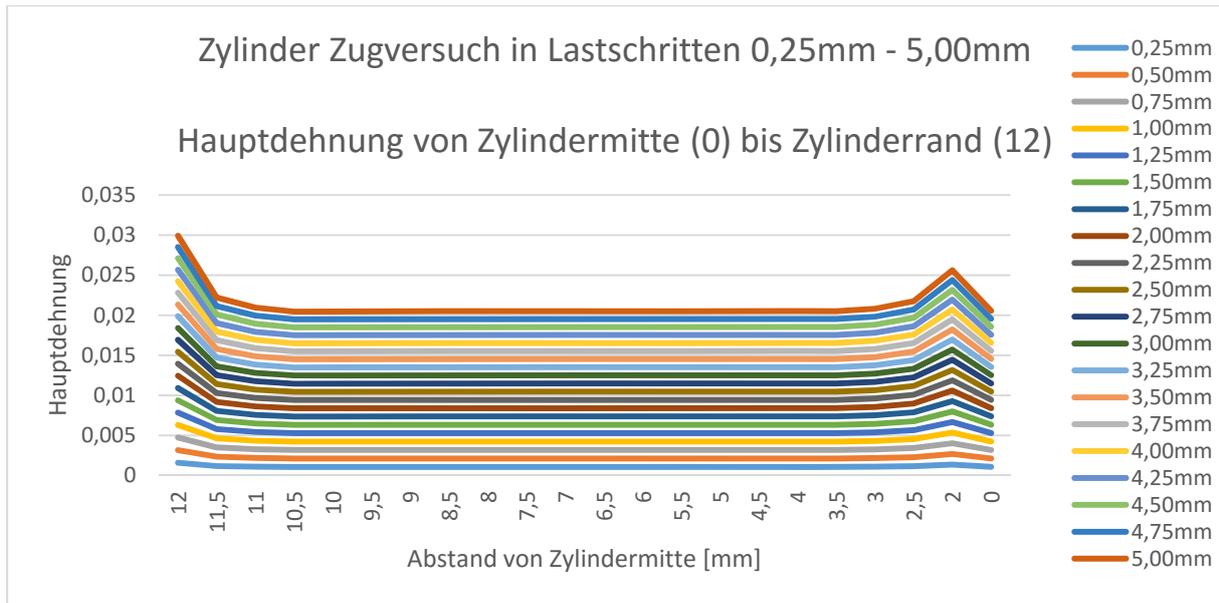


Hauptzugspannung mit multilinearer Spannungs-Dehnungs-Kurve nach experimentellen Daten:

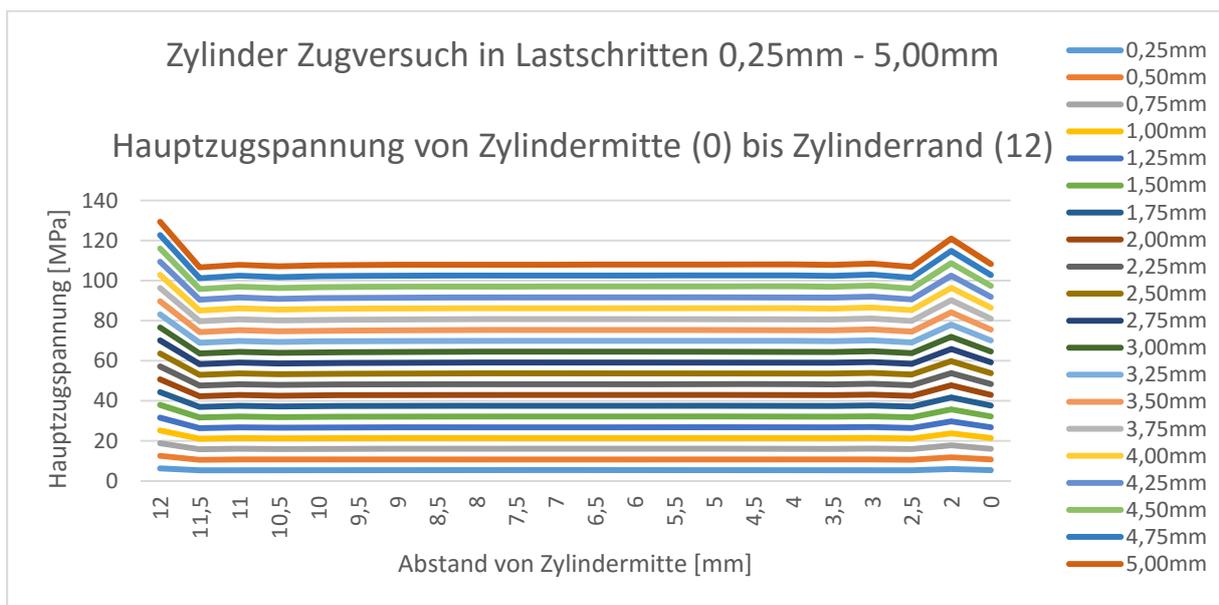


Die Betrachtung der Spannungen und Dehnungen über den Querschnitt weist zwei Spannungsbzw. Dehnungsspitzen aus. Bei der Spitze im Zentrum des Zylinders handelt es sich um eine numerische Singularität die Modellbedingt auftritt und für die Auswertung nicht von Relevanz ist. Die Spitze im Bereich der der Außenkante entsteht durch die nicht vorhandene Querdehnungsbehinderung in diesem Bereich. Die Klebefläche ist nahezu komplett querdehnungsbehindert, abgesehen von dem freien Bereich der Klebefuge am Rand des Zylinders. Durch vorhandene Einschnüreffekte und mangelnde Querdehnungsbehinderung steigen Spannungen und Dehnungen in diesem Bereich an.

Hauptdehnung mit linearer Spannungs-Dehnungs-Kurve:



Hauptzugspannung mit linearer Spannungs-Dehnungs-Kurve:



Die grundsätzlichen Verläufe der Spannungs- und Dehnungskurven über den Querschnitt des Zylinders waren identisch. Deutlich erkennbar war, dass wir uns im relevanten Spannungsbereich von ca. 60 N/mm<sup>2</sup> im Bereich von maximal 1,5% Dehnung befinden.

Die Differenz der beiden Materialmodelle führt erst im Bereich von über 2% zu signifikanten unterschieden. Durch weitere Kalibrierungen des linearen Modells konnte die Übereinstimmung der beiden Modelle bis zu diesem Punkt weiter verbessert werden.

Durch die Simulation von kleinteiligen Bauteilen und Fassadendemonstratoren konnte gezeigt werden, dass bis zur Ausnutzung der Beanspruchbarkeit des Glases keine inelastischen Dehnungen des Klebstoffes auftraten.

Die Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass die Reduktion auf ein vereinfachtes Materialmodell für den rechnerischen Nachweis mit Finite-Element-Methoden möglich ist. Dadurch ergibt sich eine erhebliche Steigerung der Effizienz im Bereich der numerischen Simulation.

## II.1.9 Arbeitspaket 7.2 – Benchmark-Experimente

### Ziele

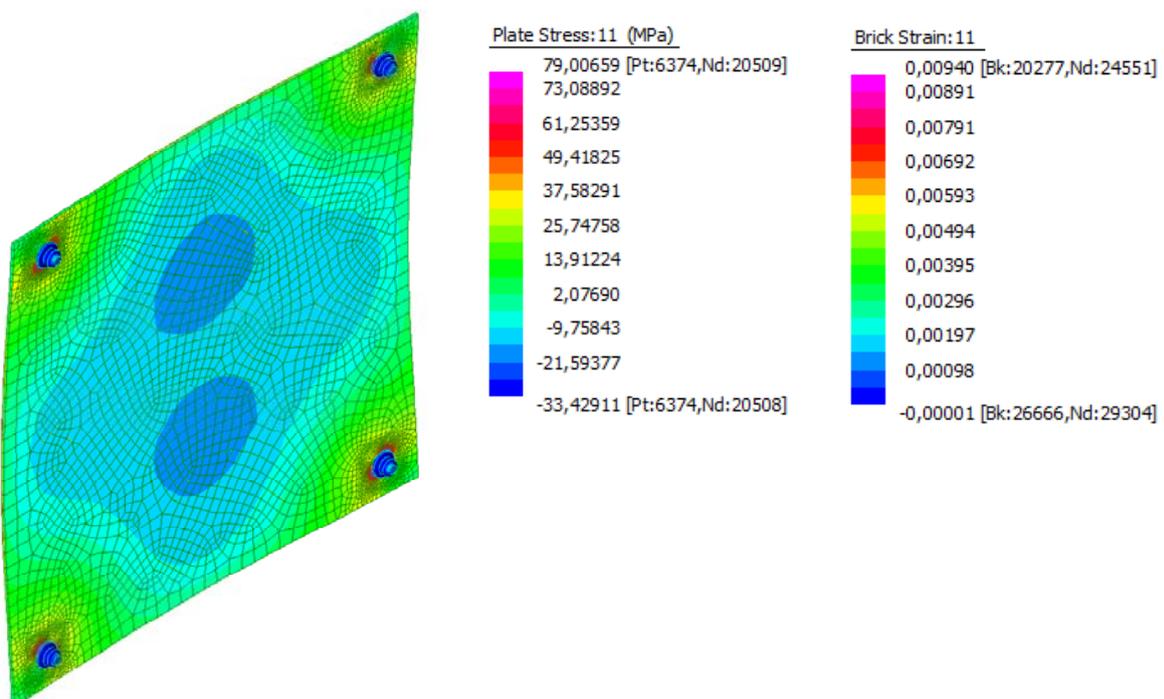
Mit zunehmender Komplexität der Formulierung wächst in der Regel auch die Anzahl an Parametern, die zur Beschreibung des Materialverhaltens benötigt werden. Dies kann bei der Parameterbestimmung zu inversen Problemen führen. Daher stellt die Entwicklung und Untersuchung von Benchmark-Experimenten ein wichtiges Forschungsziel dar, um die mathematisch-physikalische Stabilität der Modellierung zu garantieren und die Vorhersagegenauigkeit der Modellierung nachzuweisen. Dabei steht die numerische Analyse verschiedener Versuchsaufbauten mithilfe der FEM zur Auswahl geeigneter Benchmark-Experimente im Vordergrund.

Ziel ist die Bewertung der Versuchsaufbauten hinsichtlich des Modellierungsaufwandes und Qualität der erzielten Ergebnisse.

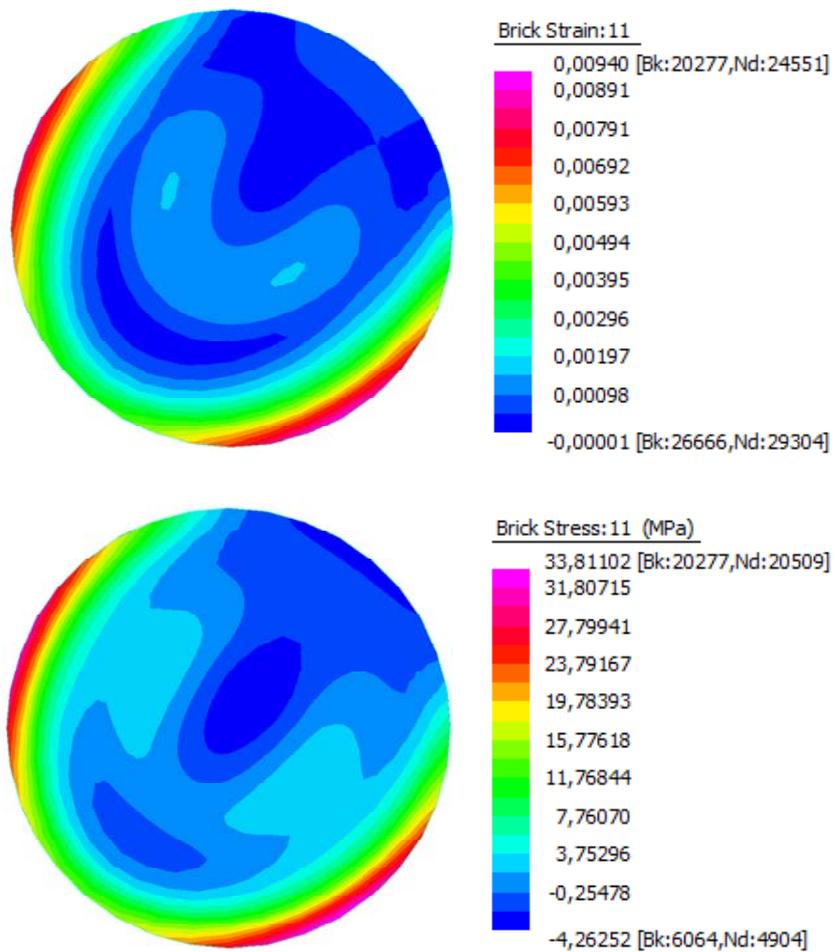
### Ergebnisse

Bereits in Arbeitspaket 3.1 wurde eine Vielzahl von numerischen Versuchen beschrieben. Dabei hatte sich besonders zwei Versuchsaufbauten für eine realitätsnahe Beanspruchung und somit Verifizierung von Geometrie- und Materialmodellen herausgestellt. Dabei handelt es sich einerseits um den Bauteilversuch einer Scheibe mit 4 Punkthaltern und andererseits um den Zugversuch eines Punkthalters mit einer eckgelagerten Scheibe.

Scheibe mit 4 Punkthaltern:



## Detail Spannung / Dehnung Klebefuge



Die Spannungsverteilung entspricht der Verteilung des Modells 2 des abgewandelten Zugversuchs, wie in Arbeitspaket 3.1 beschrieben.

## II.1.10 Arbeitspaket 7.3 – Zeitabhängige Formulierung

### **Ziele**

Mithilfe einer zeitabhängigen Formulierung lassen sich auch numerische Studien zum langfristigen Verhalten der Klebeverbindungen für versuchstechnisch nicht abbildbare Nutzungszeiträume durchführen. Die Formulierungen müssen hierfür Veränderungen des Klebstoffverhaltens infolge des Einflusses verschiedener Umwelteinwirkungen und Belastungen erfassen. Daher soll die Formulierung um das geschichtsabhängige Materialverhalten erweitert werden.

Ziel ist die Erweiterung der konstitutiven Beziehungen des AP7.1 um eine zeitabhängige Formulierung zur Abbildung von Materialveränderungen.

### **Ergebnisse**

Für die zeitabhängige Formulierung des Materialmodells ist der Einfluss der unterschiedlichen Alterungs- und Umwelteinflüsse auf den Klebstoff maßgebend. Anhand der bisher geführten Simulationen und Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass eine Verfestigung infolge erhöhter Belastungen nicht eintreten wird, da das dazu notwendige Spannungsniveau nicht erreicht werden kann ohne ein Versagen der Verglasung oder Klebstoffs herbeizuführen.

Die Betrachtung der Materialeigenschaften nach Alterungs- bzw. Umwelteinflüssen war im Rahmen des Forschungsvorhabens ein langfristiger Teilbereich, dessen Ergebnisse zunächst ausgewertet werden mussten. Es konnte dabei eine deutliche Reduzierung der erreichten Festigkeiten nach Umweltsituationen festgestellt werden. Aus diesem Grund wurde versucht diese Einflüsse zunächst konstruktiv durch Dichtebenen oder den Einsatz von VSG zum Schutz vor Strahlung zu minimieren.

Aufgrund der konstruktiven Untersuchungen und der Dauer der Alterung konnte im Rahmen des Bearbeitungszeitraums kein zeitabhängiges Materialmodell formuliert werden. Der Widerstand gegenüber Alterung und Umwelteinflüssen ist im Nachweiskonzept durch entsprechende Sicherheitsfaktoren zu berücksichtigen und ihr Einfluss durch geeignete konstruktive Maßnahmen zu minimieren.

## II.1.11 Arbeitspaket 7.4 – Nachweisführung

### **Ziele**

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten der AP7.1, AP7.2 und AP7.3 sollen in ein standardisiertes, verallgemeinertes Vorgehen überführt werden. Die Basis hierfür bilden die eigenen Erkenntnisse sowie publizierte Vorschläge zur Verifikation in der numerischen Strukturanalyse. Dabei sollen die einzelnen Schritte zur Modellgenerierung und Implementierung sowie zur Verifikation für den planenden Ingenieur systematisch dargestellt werden. Besonderes Augenmerk wird auf die Sicherstellung der Vorhersagegenauigkeit und Effizienz der numerischen Prototypen gelegt.

Derzeit fehlt ein gültiger semi-probabilistischer Bemessungsvorschlag für geklebte Verbindungen im Bauwesen. Daher sollen Erkenntnisse aus den numerischen Simulationen und experimentellen Untersuchungen in Verknüpfung mit dem bauaufsichtlichen Rahmen in ein Nachweiskonzept für die punktuellen Befestigungssysteme überführt werden. Die Betrachtung wird sich in erster Linie an der im Bauwesen üblichen Annahme von Extremwerten für die ungünstigste Einwirkungskombination anlehnen. Um Zeitabhängigkeiten, dynamische Belastungen und Temperatureinwirkungen angemessen zu behandeln, sollen die Ergebnisse des Teilvorhabens 5 zu einer kumulierten Betrachtung von Einwirkungen herangezogen werden.

Ziel ist die Definition eines standardisierten Vorgehens zur Modellierung und Implementierung von Stoffgesetzen und Verifizierung numerischer Prototypen sowie die Entwicklung eines Vorschlags für ein geeignetes Nachweiskonzept für die Auslegung der adhäsiven Verbindungen in relevanten Grenzzuständen unter Berücksichtigung der bauaufsichtlichen Rahmenbedingungen.

### **Ergebnisse**

Das Nachweiskonzept für Verglasungen mit adhäsiv befestigten Punkthaltern muss derart gestaltet sein, dass es im Rahmen eines Zustimmungsverfahrens im Einzelfall Akzeptanz findet.

Grundlegend ist ein vorgehen analog zum Nachweis von tragenden Silikonem im Fassadenbau nach ETAG 002 denkbar. Dabei handelt es sich in erster Linie um ein globales Bemessungsverfahren.

Die Widerstandsseite dieses Bemessungsverfahrens bildet sich aus  $R_{U,5}$  als charakteristische Bruchspannung mit 75%iger Wahrscheinlichkeit, dass 95% der Versuchsergebnisse über diesem Wert liegen. Für den Nachweis gegenüber veränderlichen Einwirkungen wird dieser Wert mit einer Sicherheit von 6 dividiert  $\sigma_{des} = R_{U,5} / 6$ . Gegenüber ständigen Einwirkungen wird dieser Wert mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor von 10 beaufschlagt  $\sigma_{\infty} = \sigma_{des} / 10$ .

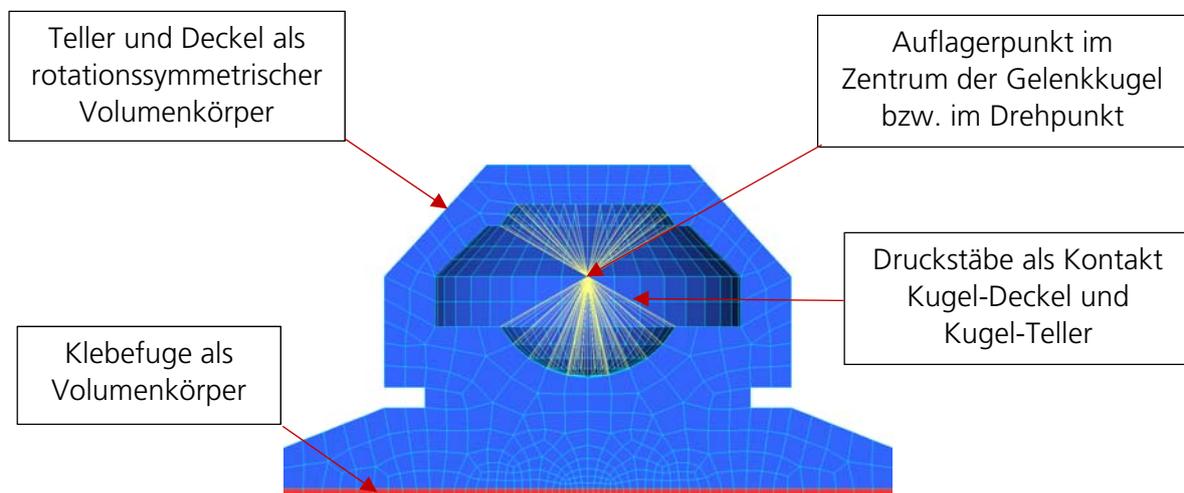
Die Einwirkungen werden kombiniert, aber nicht mit zusätzlichen Sicherheitsfaktoren auf der Einwirkungsseite beaufschlagt.

Der Nachweis mit globalen Sicherheitsbeiwerten anstelle von Teilsicherheitsbeiwerten entspricht nicht dem spätestens durch den EUROCODE und die DIN 18008 eingeführten Stand der Technik. Da es sich bei den Klebstoffen um ein unregelmäßiges Bauprodukt und die Anwendung des geklebten Punkthalters um eine unregelmäßige Bauart handelt, wird die Orientierung am Verfahren des Nachweises von Silikonklebstoffen nach ETAG 002 als sinnvoll erachtet.

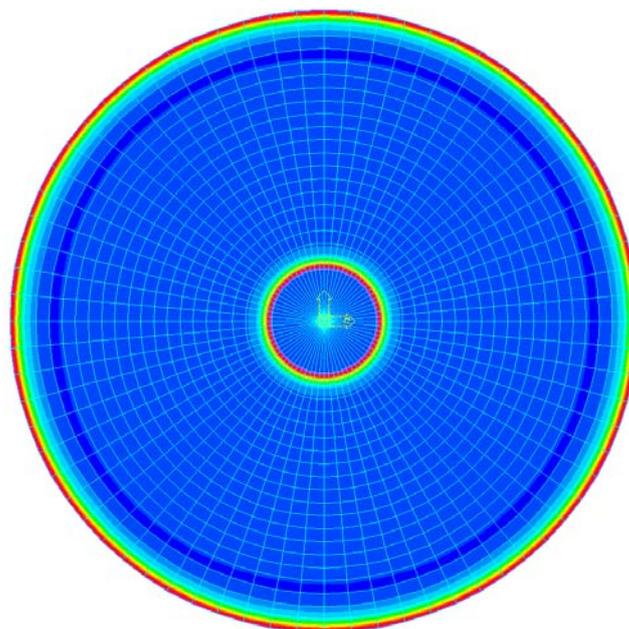
Maßgebend für das Nachweiskonzept ist die Bestimmung der globalen Sicherheitsfaktoren für ständige und veränderliche Einwirkungen und unter Umständen die Differenzierung zwischen Scher- und Zugbeanspruchung.

Anhand der geführten Alterungs- und Belastungsversuche die durch den Projektpartner geführt wurden und die Simulation von Kleinteil- und Bauteilmodellen mit entsprechenden Materialmodellen ist der Grundstein für ein derartiges Nachweismodell gelegt. Für die Etablierung eines Nachweiskonzeptes sind in Zukunft Kennwerte zur Alterung, Versagensmechanismen und Erfahrungswerte zu sammeln und als globale Betrachtung in den Sicherheitsbeiwert zu übertragen.

Mit der Entwicklung eines Nachweiskonzeptes wird ein Rechenmodell notwendig. Dazu wird auf die Beschreibung des Arbeitspakets 3.1 verwiesen. Das darin als endgültige Lösung definierte FE-Modell eines Punkthalers spiegelt die grundlegenden Mindestanforderungen dar.



Die Netzdichte ist dabei soweit zu erhöhen, dass bei einem idealen Zugversich die Spannungen an der Außenkante des Tellers einen homogenen Kreis bilden.



Zur Kontrolle der Geometriemodelle werden folgende numerischen Versuche empfohlen:

- Idealer zentrischer Zugversuch (siehe Abschnitt II.1.2)
  - o Kontrolle der Netzdichte auf Singularitäten
  - o Kontrolle der Kraftübertragung in Zugrichtung
- Scheibe mit 4 Punkthaltern und statisch bestimmter Lagerung (siehe Abschnitt II.1.2)
  - o Belastung auf Zug und Druck zur Kontrolle der Kraftübertragung in beide Richtungen
  - o Kontrolle der Verformung → Symmetrisches System = Symmetrische Verformung
  - o Kontrolle der Spannung → im Bereich des Halters wie in Abschnitt II.1.2

Um den Rechenaufwand zu reduzieren bzw. ein weiteres Kontrollmodell zu haben, ist der abgewandelte Zugversuch nach Modell 2, Abschnitt II.1.2 zu empfehlen.

Zur Verifizierung der Modelle wird der abgewandelte Zugversuch bzw. eckgehaltene Zugversuch empfohlen. Die Verifizierung des Materialmodells sollte mit dem Zylinderzugversuch numerisch und experimentell erfolgen.

## II.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Förderantrag getroffenen Angaben wurden in den Einzelpositionen Personalkosten und Reisekosten weitestgehend bestätigt.

Da die glasfaktor Ingenieure GmbH ausschließlich statische Berechnungen durchführte, wurden keine weiteren Ausgaben das Projekt betreffend getätigt.

In der Durchführung verteilten sich 99% der Gesamtkosten auf die Personalkosten.

Im Projektverlauf wurden die einzelnen Forschungsergebnisse auf verschiedenen Fachtagungen und Messen vorgetragen.

Die IPT-Initiative stellte 2014 in Zusammenarbeit der beteiligten Unternehmen ein Exponat auf der Fachmesse glasstec Düsseldorf aus.

Die Dienstreisen umfassen 1% der Gesamtkosten.

### **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Die detailliert im Forschungsantrag dargelegten Planungen bildeten die Grundlage der erfolgreich durchgeführten Arbeiten. Die Projektdurchführung folgte der gesteckten Arbeits-, Zeit- und Meilensteinplanung. Die aufgewendeten Ressourcen waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig und der geleisteten Arbeiten angemessen. Der gesteckte Kostenrahmen wurde eingehalten. Die zur Verfügung stehenden Mittel wurden sparsam und zielorientiert aufgewendet.

### **II.4 Voraussichtliche Nutzung und Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Durch das abgeschlossene Forschungsprojekt hat die glasfaktor Ingenieure GmbH einen erheblichen Erfahrungszuwachs auf dem Gebiet numerischen Simulation von Beschlägen mit adhäsiven Verbindungen und der Entwicklung von Materialmodellen erlangt. Damit besteht ein solides Potential für zukünftige Projekte und die Betreuung von Genehmigungsverfahren auf diesem Gebiet. Das Netzwerk mit regionalen Kooperationspartnern konnte etabliert werden. Die Zusammenarbeit hat sich über die Projektzeit intensiviert. Die gewonnenen Erfahrungen können von den Verbundpartnern auf zukünftige innovative Projekte sowie für eigenständige Prozess- und Produktentwicklungen übertragen werden.

Mit Abschluss des Projektes bestehen die im Antrag benannten Verwertungsziele fort.

Eine detaillierte Fortschreibung des Verwertungsplanes ist dem Erfolgskontrollbericht zu entnehmen.

### **II.5 Fortschritte bei anderen Stellen**

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden in den durch die glasfaktor Ingenieure GmbH bearbeiteten Arbeitspaketen 3, 4 und 7 keine neuen Erkenntnisse durch andere Stellen im Rahmen von Publikationen oder Vorträgen bekannt.

### **II.6 Veröffentlichungen**

Durch die glasfaktor Ingenieure GmbH als Firmenpartner wurden keine Veröffentlichungen publiziert. Der wissenschaftliche Partner TUD hat während der Projektlaufzeit eine Vielzahl von Veröffentlichungen zum Forschungsthema platziert.