Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

Doctoral Thesis

STABILITY OF FOLDED PLATE STRUCTURES MADE OF GLASS

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

---

Dissertation

STABILITÄTSPROBLEME BEI FALTWERKEN AUS GLAS

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaft
eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. Stefan Marinitsch
Matrikelnummer e9926013
Nibelungenstraße 8 - 85221 Dachau

Gutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch
Institut für Hochbau und Technologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/206
A-1040 Wien

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Institut für Baukonstruktionen
Technische Universität Dresden
Georg-Bähr-Straße 1
D-01069 Dresden

Dachau, Oktober 2015 _____

Kurzfassung

Schlagwörter: Glas, Faltwerke, linienförmiges Fügen, Verbandsauflösung, Beulen

Während sich für die Baustoffe Beton oder Stahl eine eigene Konstruktions- und Formensprache etablieren konnte, fehlt es im konstruktiven Glasbau an Vergleichbarem. Für den flächigen Baustoff Glas sind hier Faltwerke von besonderem Interesse, die zur Verbindung benachbarter Elemente notwendige kontinuierliche Fügung stellt eine entsprechende Herausforderung dar. Aufbauend auf der Diskussion vorhandener Lösungen, wird in vorliegender Arbeit ein neuartiges Fugendetail entwickelt, das über kontinuierliche metallische Einlaminierteile die Vorzüge einer mechanischen Anbindung mit denen einer geklebten vereint. Die Tragfähigkeit wird über Versuche, getrennt nach den Hauptbelastungsrichtungen, untersucht. In der Ebene werden die Schub-, Zug- und Drucktragfähigkeit, aus der Ebene die Momenten und Querkrafttragfähigkeit ermittelt. Die Versagenscharakteristik der Anbindung ist durch eine Verformungszunahme im Bereich der Fügung und nicht durch spröden Glasbruch gekennzeichnet. Für die untersuchten Belastungszustände stellen die Einlaminierteile die kritische Komponente dar. Mithilfe der Versuche validierte FEM-Modelle bilden die Grundlage für eine numerische Interaktionsbetrachtung und für Berechnungen zum Einfluss des Anstellwinkels auf die Fugenauslastung. Die so gefundene Interaktionsbeziehung ist mit Einschränkungen versehen, erlaubt aber eine erste Bewertung der Anbindung unter kombinierter Last. Durch Verwendung von Verbindungssteifigkeiten wird an vereinfachten Tragwerksmodellen untersucht, ob es mit steigender Belastung unter Beachtung der Interaktionsbeziehung zu einem Stabilitätsversagen oder einer Verbandsauflösung kommt. Für die untersuchten Systeme kann die Verbandsauflösung als kritische Versagensart identifiziert werden.

Abstract

Keywords: glass, folded-plate-structure, linear connection, joint-decay, plate-buckling

Whilst the materials concrete and steel have been able to develop their own design language, a similar tool-set seems missing for the material glass. For planar float glass folded plate structures are of particular interest, with the load bearing linear connection between adjacent plates being a core challenge. Following a detailed discussion of available assemblies, an experimental connection is presented combining the benefits of a mechanical and a bonded solution by utilizing continuous metallic inserts. The loading capacity is obtained by testing for the individual loading modes. In plane shear, tension and compression, out of plane the moment and shear capacity are reviewed. The failure-behaviour of the assembly is characterized by a ductile behaviour along the connection and not by glass-breakage. For the selected loading-modes the metallic insert represents the critical component. Validated FEM-models are the basis for a numerical load interaction as well as an investigation on the influence of the kink-angle on the joint utilization. The described interaction-scheme allows, despite limitations, a first assessment of the assemblies utilization when subject to combined loadings. Using connection-stiffness parameters, simplified structural models are evaluated to determine if plate-buckling or load-induced joint decay is the prevailing failure mode. For the assessed structures the joint-decay is identified as governing.

Danksagung

Ich danke den Firmen Unterfurtner, SaintGobain, Kuraray, HILTI und sedak für ihre Unterstützung bei der Herstellung der Probekörper und der Versuchsdurchführung. Meiner Alma Mater, allen voran Professor Kolbitsch und Dr. Schranz, danke ich für die zahlreichen Anregungen und ihre fachliche Unterstützung, mit der sie mich über die Jahre begleitet haben. Mein Dank gilt außerdem Professor Weller von der TU-Dresden für seine Bereitschaft als Gutachter zur Verfügung zu stehen. Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Ursula, die über die letzten Jahre ein weiteres Mal auf Vieles verzichten musste.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **3**

Abstract **5**

Danksagung **7**

Inhaltsverzeichnis **9**

Abkürzungsverzeichnis **12**

Formelzeichen **13**

1 Einleitung **15**

1.1 Motivation 15

1.2 Zielsetzung 19

1.3 Vorgehensweise 19

2 Faltwerke aus Glas **21**

2.1 Prolog 21

2.1.1 Definition 21

2.1.2 Bestandsaufnahme 22

2.2 Geometrie 25

2.3 Geometrieauswertung 28

3 Konstruktion **33**

3.1 Diskussion Konstruktionsdetails 34

3.1.1 Einschränkungen 34

3.1.2 Gesammelte Konstruktionsdetails 36

3.1.3 Konstruktionsdetail Faltwerk TU-WIEN 44

3.1.4 Gegenüberstellung der Konstruktionsdetails 47

3.2 Materialien 49

3.2.1 Glas 49

3.2.2 Verbundfolie 51

3.2.3 Einlaminierteile 54

3.2.4 Injektionsmörtel 57

3.2.5 Dichtfuge 58

4 Versuche **59**

4.1 Aufgaben 59

4.2 Probekörper 60

4.3 Versuchsdurchführung 63
4.3.1 Versuchsanordnung M 64
4.3.2 Versuchsanordnung T 65
4.3.3 Versuchsanordnung Z 67
4.3.4 Versuchsanordnung D 68
4.3.5 Versuchsanordnung V 69
4.3.6 Versuchsanordnung Kontrollversuche Z und D 70
4.3.7 Versuche Anzugskraft Nieten 70
4.4 Versuchsauswertung 71
4.4.1 Auswertung M 71
4.4.2 Auswertung T 75
4.4.3 Auswertung Z 79
4.4.4 Auswertung D 82
4.4.5 Auswertung V 86
4.4.6 Auswertung Anzugskraft Nieten 87
4.4.7 Auswertung Kontrollversuch Z und D 88

5 Berechnung 90

5.1 Numerische Untersuchung der Probekörper 90
5.1.1 Modellbildung 90
5.1.2 Modell Versuch M 95
5.1.3 Modell Versuch T 96
5.1.4 Modell Versuch Z 97
5.1.5 Modell Versuch D 98
5.1.6 Modell Versuch V 99
5.1.7 Gegenüberstellung Versuch und Numerik 100
5.1.8 Auswertung der Spannungen 102
5.2 Numerische Interaktionsbetrachtungen 103
5.2.1 Modellbildung 104
5.2.2 Numerische Interaktion 180° 104
5.2.3 Zusammenfassung der Auswertung 109
5.3 Numerik zum Einfluss des Knickwinkels 110
5.3.1 Modellbildung 110
5.3.2 Numerische Untersuchung der Knickwinkel 150° / 120° / 90° / 60° 111
5.3.3 Zusammenfassung der Auswertung 112
5.4 Grenzen der Modelle 113
5.5 Berechnungen am Globalsystem 113
5.5.1 Modellbildung 114
5.5.2 Modellkontrolle 116
5.5.3 Stabilität und Verbandsauflösung 117
5.5.4 Zusammenfassung der Auswertung 121

6 Zusammenfassung und Ausblick 122
6.1 Zusammenfassung 122
6.2 Weiterführende Forschung 124
6.3 Ausblick 124
Anhang A – Technische Zeichnungen 127
Anhang B – Versuchsergebnisse 147
Anhang C – Modellvalidierung 159
Anhang D – Referenzzustände 167
Anhang E – Schnittgrößen Tragwerke 205
Literaturverzeichnis 245
Abbildungsverzeichnis 254
Tafeln 258
Tabellenverzeichnis 259

Abkürzungsverzeichnis

CAD	computer-aided design
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FEM	Finite Elemente Methode
ILEK	Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
SGP	SentryGlas
SL	Scher-Lochleibung
SLP	Scher-Lochleibung-Pass
TVG	Teilvorgespanntes Glas
PBV	(Vier)-Punkt-Biegezug-Versuch
PUB	Von Knaack nicht näher spezifizierte Segelfolie
PUR	Polyurethan
PVB	Polyvinylbutyral
UV	Ultraviolett
VSG	Verbundsicherheitsglas
VLF	Verzweigungslastfaktor

Formelzeichen

α_T	[1/°C]	Wärmeausdehnungskoeffizient	
ρ	[kg/m³]	Dichte	
E	[N/mm²]	Elastizitätsmodul	
G	[N/mm²]	Schubmodul	
G_{ZTV}	[N/mm²]	Schubmodul	
ν	[-]	Poissonzahl	
c	[J/kgK]	Spezifische Wärmekapazität	
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit	
R_m	[N/mm²]	Zugfestigkeit	
$R_{p0,2}$	[N/mm²]	Dehngrenze 0,2%	
$R_{p1,0}$	[N/mm²]	Dehngrenze 1,0%	
f_k	[N/mm²]	Charakteristische Biegezugfestigkeit	
f_u	[N/mm²]	Zugfestigkeit	
ε_u	[%]	Reißdehnung	
F_i	[kN]	Anbindungskräfte	i...Z, D, T, V
k_i	[kN/m²]	Anbindungssteifigkeiten	i...Z, D, T, V
$k\varphi$	[kN/RAD/m]	Drehsteifigkeit	
φ	[RAD]	Verdrehung	
Z (Z_y)	[kN]	Kantenzug	
D (D_y)	[kN]	Kantendruck	
T (T_y)	[kN]	Kantenschub	
M (M_y)	[kNm]	Anbindungsbiegung	
d_i	[m]	Dicke der Einzelgläser	
d*	[m]	Ersatzdicke	

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wer nach den Anfängen des konstruktiven Glasbaus sucht, der stößt schnell auf den Namen Claudius Loudon (1783-1843)[1] und die von ihm entworfenen Gewächshauskonstruktionen (Abb. 1). Der Wunsch nach verbesserter Nutzung der einfallenden Sonnenstrahlung und die daraus entstehende Notwendigkeit der Reduzierung von Tragelementen waren Geburtshelfer für ein Forschungsfeld rund um die Materialien Eisen und Glas.

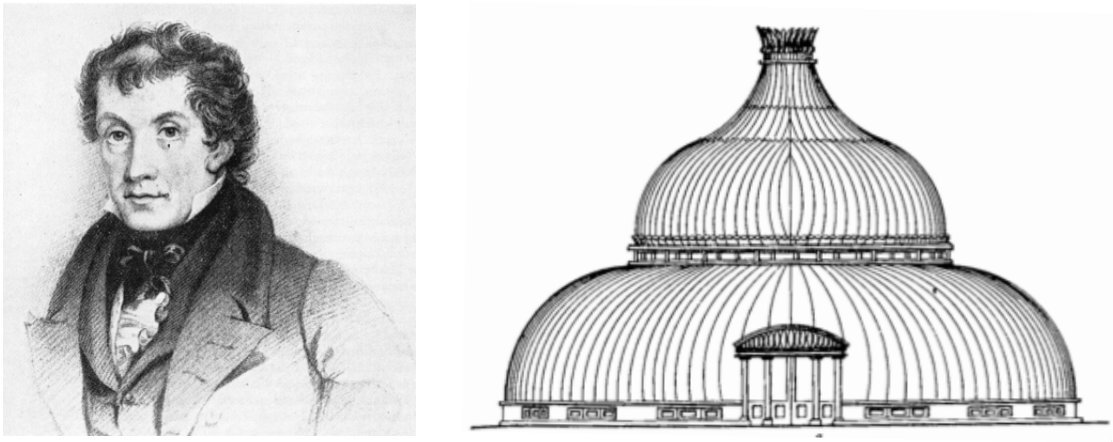


Abb. 1 John Claudius Loudon [55] und Bretton Hall [56]

Schlanke, gekrümmte oder gefaltete Konstruktionen aus Guss-, Walz- und Schmiedeeisen verdankten ihre Stabilität maßgeblich aussteifenden Glasschindeln, die bewusst als tragendes Element herangezogen wurden [1]. In der *„Encyclopaedia of Cottage, Farm and Villa Architecture“* dokumentierte Loudon selbst wie folgt [2]:

> *„...da waren keine Träger und Hauptrinnen zur Verstärkung des Daches, sieht man von den gusseisernen Schiebefensterrahmen ab. Es verursachte einige Angst, dass, als das Eisengerüst aufgestellt war und ehe es verglast wurde, der leichteste Wind das Gewölbe vom Boden bis zur Spitze in Bewegung setzte... Sobald das Glas eingesetzt war, stand es, wie auch immer, völlig fest und stark gegründet..."*

[1] Schottischer Botaniker und Landschaftsarchitekt

Die zu dieser Zeit entstandenen Gewächshäuser waren Sonderbauten und blieben somit von den sonst üblichen technischen und rechtlichen Bestimmungen weitestgehend unberührt. Auch bei den Planern handelte es sich meist nicht um Ingenieure oder Architekten, sondern um Gärtner und Unternehmer [3]. Es ist wahrscheinlich diesen Umständen zuzuschreiben, dass sich hier eine von der Fachwelt nahezu unbeachtete technische Innovation vollziehen konnte [4].

Die zum Funktionieren solcher Konstruktionen notwendige zugspannungsarme Lagerung der Gläser in Kitt [1] (Abb. 2) ist sicherlich mehr den gängigen Baumaterialien und Konstruktionsdetails der Epoche zuzuschreiben und nicht in einem tieferen Verständnis der bruchmechanischen Eigenschaften des Werkstoffs Glas begründet. So befand sich die Disziplin der Baustatik zu dieser Zeit gerade am Übergang von der Konstituierungsphase (Schaffung des baumechanischen Erkenntnissystems 1825-1850) in die Etablierungsphase (Entwicklung von Fachwerkstheorien und der grafischen Statik, 1850-1875) [5].

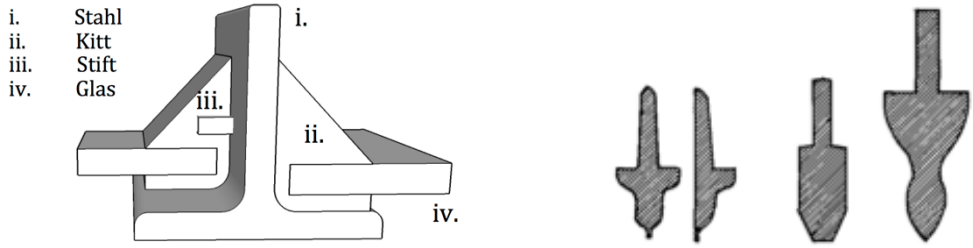


Abb. 2 Glaslagerung im Kittbett [57] und typische Sprossenausführungen [58]

Auch Sir Joseph Paxton (1803-1865) [6] gehörte zweifelsohne zu den Pionieren dieser Zeit. Erfahrungen, die er bei den Gewächshäusern Chatsworth Gardens (1840) und mehr noch dem Victoria Regia-Haus (1849) sammeln konnte, fanden konsequente Anwendung bei der Planung und Ausführung des Londoner Kristallpalastes (1850/1851) [7]. Es war auch der Kristallpalast, der endgültig die Leistungsfähigkeit einer industriellen Vorfertigung und ihrer Bauweisen einer Weltöffentlichkeit unter Beweis stellen konnte [8]. So schrieb Theóphile Gautier[2] 1850 [9]:

> *„Die Menschheit wird eine völlig neue Art von Architektur hervorbringen, sobald die von der Industrie neu geschaffenen Methoden angewandt werden. Die Verwendung von Eisen erlaubt, ja erzwingt, viele neue Formen, die man bei Bahnhöfen, Hängebrücken und den Wölbungen von Treibhäusern sehen kann.“*

[2] 1811-1872, französischer Schriftsteller und Journalist

Mit dem Fortschritt der grafischen Statik folgte die Strukturfindung der Eisenkonstruktionen vermehrt dem Regelwerk der Skelettbauweise. Diese Entwicklung führte zu einer Entkoppelung von Tragwerk und Hülle. Glas verlor seine Bedeutung als tragendes Element und wurde nur mehr als eindeckendes Material verstanden [8] [10].

Während es für den Eisenbau sinnvoll war, diese Tragwerkstypologie zu übernehmen, erkennt Wurm hier eine bis heute anhaltende, für die Emanzipation des Glasbaus schädliche Einflussnahme durch den Stahlbau [10].

Um das stetig wachsende Verlangen nach gesteigerter Transparenz bedienen zu können, wurde es bald notwendig den Baustoff Glas wieder als tragendes Element einzusetzen. Die hierfür notwendigen Forschungsaufgaben zu Material und Tragverhalten wurden ursprünglich gerade von Stahlbauinstituten in Union mit der Privatwirtschaft wieder aufgenommen [10]. Verständlicherweise versuchte man das Neue vom Bekannten her zu erschließen und so wurde oftmals Entmaterialisieren mit Materialsubstitution gleichgesetzt. Unter rigoroser Anwendung der Formensprache des Stahl- bzw. Skelettbaus kamen so Glasträger, Stützen oder Druckspreizen als stabförmige Tragelemente zum Einsatz [10].

Ein Blick in die Fachliteratur der letzten Jahre bestätigt diese andauernde Entwicklung. So liest man 1999 von Glasbalken und Glasstützen [11] [12]. Mehr als 10 Jahre später findet man detaillierte Beiträge über das Knicken unter Normalkraft, SL-Verbindungen [13] oder das Biegedrillknicken [14]. Auch in der jüngeren Forschung beschäftigt man sich vornehmlich mit Fragestellungen, deren Ursprung im Skelettbau begründet scheint. Untersucht werden Stahl-Glas-Verbundträger [15], die Verwendung von Glas zur Aussteifung von Gebäuden [16] oder die Knickfestigkeit von Glasstützen [17].

Die Eignung von Glas zur Abtragung von Lasten steht heute natürlich außer Frage und wurde in einigen Bauwerken bereits eindrucksvoll unter Beweis gestellt. Beispielhaft seien hier das Maximilianmuseum in Augsburg (Abb. 3) [20] und das Reichstagpräsidentenpalais in Berlin (Abb. 4) [19] genannt, die sich der im Obergurt liegenden Eindeckung als Tragelement bedienen. Die Lasteinleitung erfolgt bei beiden Projekten über punktförmige Knotenelemente an den Glasecken. Mit dem Einzug gläserner Tragelemente in die gebaute Praxis scheint es wenig verwunderlich, dass druckbeanspruchte und somit stabilitätsgefährdete Elemente in den letzten Jahren intensiv beforscht wurden. Hierzu sind die Arbeiten von Englhardt [21] und Luible [22] hervorzuheben.

Die Entwicklung einer eigenen, dem Baustoff Glas besser entsprechenden Bauweise blieb jedoch bis auf wenige Ausnahmen weitestgehend auf der Strecke.

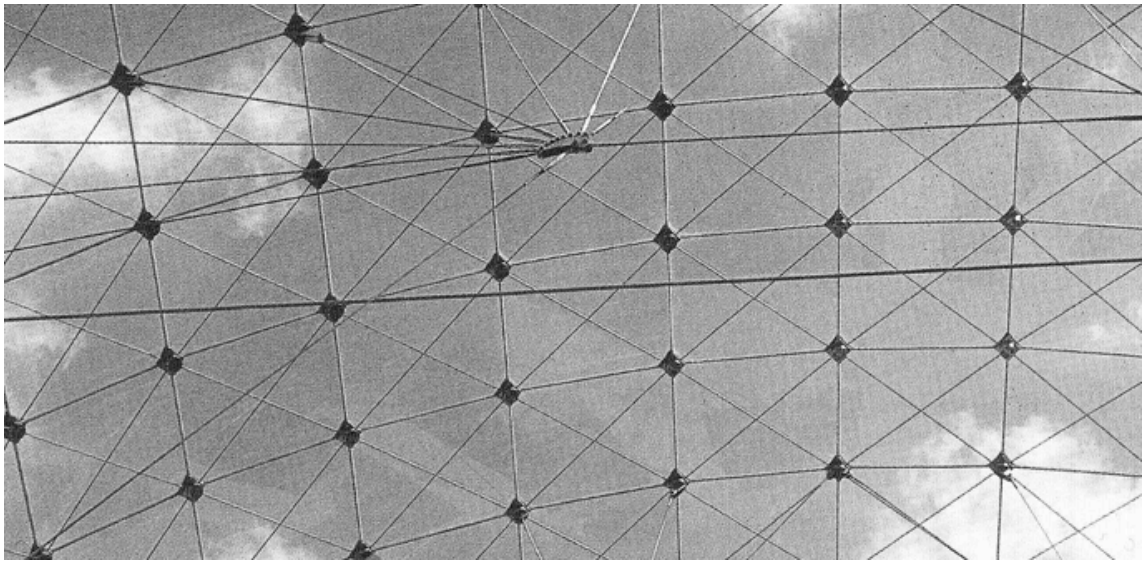


Abb. 3 Maximilianmuseum Augsburg [20]

Abb. 4 Belastungsversuch und Knoten-Prototyp Reichstagpräsidentenpalais [59]

Erfreulich sind hier beispielhaft die Beiträge in [62] zum Thema Kleben im konstruktiven Glasbau. Ganzglaskonstruktionen wie jene des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung [42] sind aber noch Einzelfälle. Kreative Ideen wie die Entwürfe für Flächentragwerke aus Glas, die Jan Wurm in der Form von Studentenprojekten in [23] gesammelt hat, bleiben meist unbeachtet. Während sich für den Stahl- und Betonbau eine eigene Formen- und Konstruktionssprache entwickeln und etablieren konnte, fehlt es im konstruktiven Glasbau an Gleichwertigem.

Bereits im vergangenen Jahrhundert beschrieb Girkmann die immer wichtiger werdende Rolle der Flächentragwerke als neue baustoffsparende und dünnwandige Bauform [135]. Für den ebenen Werkstoff Glas sind Faltwerke von speziellem

Interesse. Hier will die vorliegende Abhandlung anknüpfen und dem Baustoff Glas auf seiner Suche nach konstruktiver Identität zur Seite stehen.

1.2 Zielsetzung

„Doing the most with the least"[3]

Ziel ist die Entwicklung und Untersuchung einer Verbindungstechnologie zur linienförmigen Fügung von Einzelscheiben zu Faltwerken aus Glas und deren Bewertung betreffend Tragfähigkeit sowohl im Detail als auch im übergeordneten Konstruktionsverbund.

Um das übergeordnete Tragverhalten bewerten zu können, ist ein genaues Verständnis der Fügetechnologie und ihrer Tragfähigkeitsgrenzen unumgänglich. Eine Bewertung solcher Strukturen auf ihre Redundanz, zulässiges Lastniveau und zugeordnete Versagensmodi ist von baupraktischer Relevanz. Die folgende Arbeit wird hier nur einen ersten Beitrag leisten können. So stellt sich unter anderem die Frage, ob es nicht bereits vor einem Stabilitätsversagens der Struktur oder einzelner Elemente zu einer Verbandsauflösung im Bereich der Verbindungskanten kommt. Zur Beantwortung dieses Punktes wird der Verfasser einen möglichen Lösungsweg skizzieren und die gefundenen Ergebnisse anhand eines ausgewählten Anbindungsdetails sowie Tragwerkstyps diskutieren.

1.3 Vorgehensweise

Nachstehend findet sich eine Zusammenfassung der gewählten Vorgehensweise in chronologisch korrekter Reihung. Detaillierte Ausführungen und Erläuterungen zu den einzelnen Schritten finden sich in den entsprechenden Abschnitten.

- Diskussion der Motivation und Formulierung der Zielsetzung. Konkretisierung der Forschungsfrage.
- Einführung zum Thema Faltwerke aus Glas.
- Überblick geeigneter bzw. möglicher Geometrien.
- Untersuchung der geometrischen Randbedingungen (Winkelabhängigkeiten) mittels parametrischer Konstruktionsprogramme[4].
- Überblick über vorhandene Fügedetails.
- Entwicklung eines Konstruktionsdetails.

[3] Buckminster Fuller, Zitat aus [18]

[4] Creo 1.0, Autocad Inventor Professional 2013

- Überblick der verwendeten Konstruktionsmaterialien für die vorliegende Forschungsaufgabe.
- Modellierung der Probekörper mittels FEM (ANSYS). Berechnung von Erwartungswerten.
- Versuchstechnische Untersuchung des Konstruktionsdetails. Gegenüberstellung der numerischen Erwartungswerte mit den versuchstechnisch ermittelten Messgrößen zur Modellvalidierung.
- Entwicklung eines Interaktionsdiagramms für das Anschlussdetail mittels FEM (ANSYS). Untersuchung des Einflusses des Anstellwinkels (Knickwinkel) auf die Hauptbelastungen.
- Überführung des ANSYS-Modells in ein vereinfachtes RFEM-Modell zur Einbindung in ein globales Berechnungsmodell.
- Berechnung und Untersuchung von Globalmodellen auf Stabilität und Tragfähigkeit.
- Gegenüberstellung der Auslastung des Verbindungsdetails mit den numerisch ermittelten Beullasten der angeschlossenen Scheiben.
- Zusammenfassung und Ausblick.

2 Faltwerke aus Glas

2.1 Prolog

Sensibilisiert durch Fragestellungen zur Nachhaltigkeit im Bauwesen war man vermehrt auf der Suche nach intelligenten und ressourcenschonenden Technologien. Die Entwicklung leistungsfähiger, plattenförmiger Halbzeuge aus Holz oder Kunststoff verhalf Faltwerken in den letzten Jahren zu einer wahren Renaissance. Hier sei auf die Forschungstätigkeit der EPFL zu Tragwerken aus Brettsperrholz [24] oder die experimentellen Strukturen aus Kunststoff der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart verwiesen [25]. Wie bereits unter Kapitel 1.2 ausgeführt möchte sich vorliegende Arbeit vornehmlich den Faltwerken aus Glas widmen.

2.1.1 Definition

Obwohl die Verwendung von Begrifflichkeiten wie Origami [26] die Leistungsfähigkeit von Faltwerken bildlich zu umschreiben vermag, scheint es an dieser Stelle sinnvoll sich auf eine klare Definition über diesen Typus der Flächentragwerke zu einigen. Faltwerke können gemäß Born [131] wie folgt definiert werden:

> *„Unter einem Faltwerk verstehen wir ein räumliches Gebilde, welches aus ebenen Scheiben zusammengesetzt ist und hierdurch eine räumliche Tragfähigkeit erhält."*

Wir erweitern diese Forderung noch gemäß Girkmann mit folgender Einschränkung [27]: *„Die einzelnen Platten, die [...] monolithisch miteinander verbunden sind [...]"* und wollen hier monolithisch im Sinne von durchlaufend bzw. linear verstehen (vgl. Abb. 5).

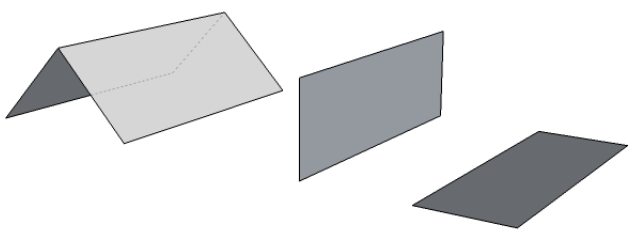


Abb. 5 Beim Faltwerk verbindet sich die Tragwirkung der Scheibe und Platte [60]

2.1.2 Bestandsaufnahme

In diesem Abschnitt wird auf einen historischen Rückblick weitestgehend verzichtet und der Versuch unternommen, sich hauptsächlich auf die Entwicklungen der letzten Jahre zu beschränken. Der eingangs beschriebene Pioniergeist und Schaffenswille des 19. Jahrhunderts soll uns an dieser Stelle als Inspiration genügen. Der architekturgeschichtlich interessierte Leser sei auf die Werke von Kohlmaier [28] und Geist [29] verwiesen, welche das Glashaus einerseits und die Passagen andererseits in größtmöglichem Detail behandeln. Der Vollständigkeit halber scheint es notwendig zu erwähnen, dass Bauwerke wie Loudon's Bretton Hall (1827) (Abb. 1) [30] der Eisen-Glas-Bauweise zuzuordnen sind. Kohlmaier beschreibt diese als *„[...] diskontinuierliche schalenartige Konstruktionen aus Schmiedeeisen und Glas [...]"* [31]. Bei ihnen wird die aus Eisen bestehende Primärkonstruktion durch eine gläserne Sekundärkonstruktion stabilisiert.

Knaack stellt 1998 in [32] ernüchternd fest, dass die Anzahl der Faltwerkskonstruktionen aus Glas überschaubar ist, und verweist aufgrund der grundsätzlichen Eignung des flächigen Baustoffes auf die zu erwartenden Entwicklungen in der Zukunft. Ähnliches liest man an gleicher Stelle zu Glaskuppeln. Das von ihm vorgestellte Beispiel der Stadtbahnhaltestelle in Bretten (1992) (Abb. 6), das an Paxtons *„ridge-and-furrow-Dach"* angelehnt ist, genügt der unter Kapitel 2.1.1 aufgestellten Definition nicht. Sowohl die punktförmigen Verbindungsmittel im Firstbereich als auch die stählerne Struktur stehen im Widerspruch zu dem angestrebten Flächentragwerk aus Glas. In seinem weiterführenden Werk (2000) [34] werden zwei Projekte von besonderem Interesse angeführt, welche wir kurz vorstellen wollen: ein Vordach für die Freie Evangelische Gemeinde in Aachen (Abb. 7) und der Entwurf einer Informationsstele für das Stadt-Theater (Abb. 15).

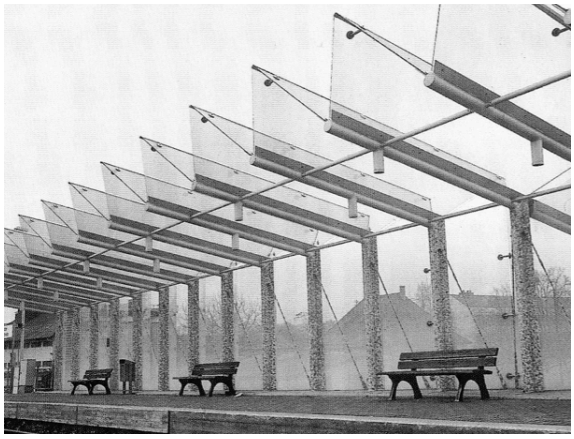


Abb. 6 Stadtbahnhaltestelle [33]

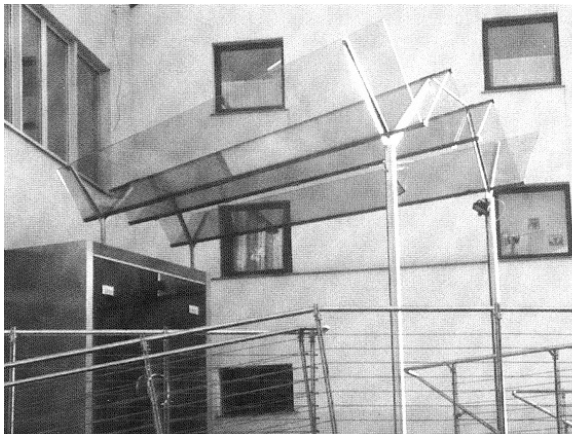


Abb. 7 Vordach in Aachen [36]

Die Studie der Stele besteht aus einem parallel gefalteten, vertikalen Grat-Kehlen-Faltwerk, dessen drei Meter lange Scheiben im Fußpunkt eingespannt sind. Die fünf Meter lange Struktur des Vordaches besteht aus gegeneinander geneigten, horizontalen Glasscheiben, die auf Endportalen gelagert sind. Während die Stele nur kurzzeitige Lasten über die Verbindungskante abtragen muss, wird das Fugendetail des Vordaches zusätzlich durch ständig wirkende Lasten beansprucht.

Mit der Stuttgarter Glasschale (2002) (Abb. 8) und der Delfter Glaskuppel (2002) (Abb. 9) dokumentiert Wurm zwei gebaute Prototypen, die sich einer linearen Fügung bedienen. Die Ganzglaskuppel des ILEK in Stuttgart besteht zwar nicht aus ebenen Scheiben und zählt somit nicht zu den in dieser Arbeit behandelten Faltwerken, sie soll aber aufgrund der verwendeten linearen Klebung nicht unerwähnt bleiben. Ursprünglich als temporäre Struktur geplant, konnte an ihr über einen Zeitraum von zehn Jahren das Verhalten eines Strukturklebstoffes unter Belastung dokumentiert werden [117]. Der *glass dome* der TU DELFT ist aus ebenen Gläsern aufgebaut (vgl. auch Bagger [43]) und vereint Klebetechnologie und mechanische Fügung in einem Detail (Abb. 28).

Abb. 8 Ganzglaskuppel des ILEK [38]

Abb. 9 DELFT glass dome [39]

Konstruktionen, wie die selbsttragende Glaskugelkalotte von Gerhard Seele (1998) (Abb. 10) oder die Kuppel für die Selimiye Mosque in Harlem (NL) (2006) (Abb. 11), sind ohne Frage technisch höchst anspruchsvolle Tragwerke, sie bedienen sich aber einer punktförmigen Lasteinleitung und genügen somit nicht der vereinbarten Konvention. Auch die Ganzglaskonstruktion für das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden (2009) [42] wollen wir nicht zu den Faltwerken zählen. Die Lasten der Eindeckung werden von Querrahmen abgetragen, welche in Längsrichtung durch die angeschlossenen Fassadenelemente stabi-

lisiert sind (Abb. 12). Aufgrund des gänzlichen Verzichts von mechanischen Verbindungsmitteln wollen wir es dennoch als Beispiel konsequenter Anwendung der Klebetechnologie anführen.

Eine relativ junge Entwicklung ist das Faltwerk der Universität Minho (2013) (Abb. 13). Aufbauend auf Feirabends Forschung zu bewehrtem Glas [114] wurde ein Verbindungsdetail entwickelt und in einem ersten Prototyp umgesetzt. In Analogie zur Informationsstele (Abb. 15) werden die Verbindungskanten nur auf kurzzeitige Lasten beansprucht. Unter Verwendung des gleichen konstruktiven Ansatzes (Abb. 31) wurde für das historische Schwimmbad von Zürich (2012) eine Lichtdecke (Abb. 14) verwirklicht. Entlang der Glaskanten einlaminierte Lochbleche verbinden zwei benachbarte Gläser im Firstbereich. Die so geformten, gläsernen Winkelprofile lagern ihrerseits auf abgehängten Stahlträgern und belasten diese nur durch ihr Eigengewicht.

Auf die unter Kapitel 1.1 angepriesenen Studentenentwürfe für Faltwerke [23] wollen wir an dieser Stelle nicht weiter eingehen. Grund hierfür ist ihr konzeptioneller, auf die Tragstruktur begrenzter Charakter, welcher mit den Darstellungen in Kapitel 2.2 weitgehend abgedeckt wird.

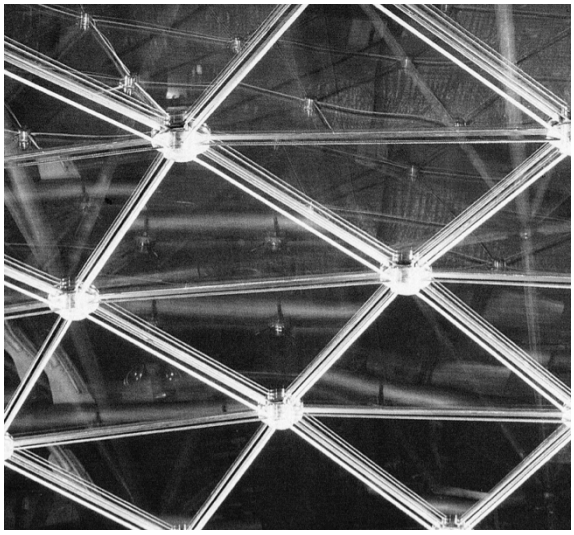


Abb. 10 Glaskugelkalotte G. Seele [40]

Abb. 11 Selimiye Mosque (NL) [115]

Bei Wurm finden wir auch den hilfreichen Hinweis auf die eigentliche Schwierigkeit bei der Entwicklung gläserner Faltwerke, nämlich *„das Detail dem Ideal einer linienförmigen Verbindung zwischen den Scheiben nahezubringen“* [37]. Aus diesem Grund wollen wir den linienförmigen, teilweise experimentellen Fugendetails einen eigenen Abschnitt widmen. Der Aufbau der gefundenen Anbindungen sowie Baggers Beiträge zur tragenden Fügung von *plate shell structures* [75][80][81]

werden unter Kapitel 3.1.2 dokumentiert und diskutiert. Für weiterführende Information zu Projekten sei auf die angeführten Publikationen verwiesen.

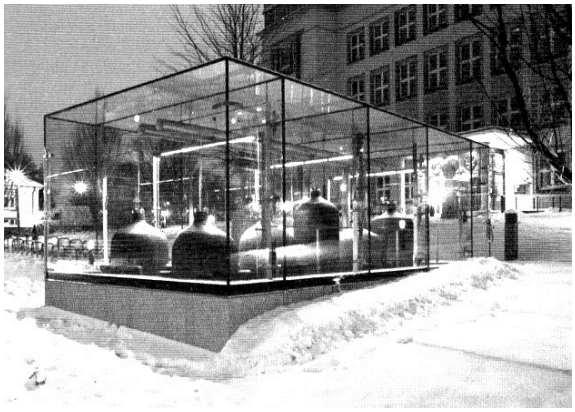


Abb. 12 Leibniz-Institut Dresden [42]

Abb. 13 Glas-Faltwerk der Universität Minho [113]

Abb. 14 Schwimmbad Zürich [116]

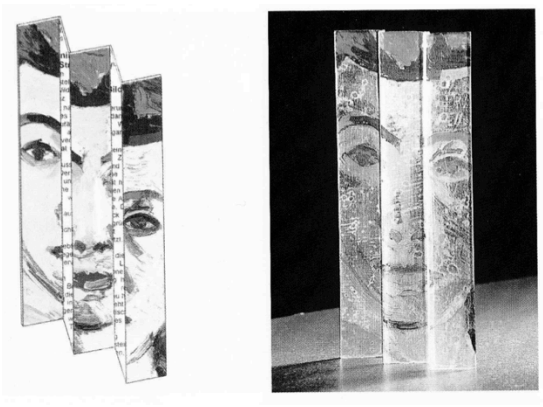


Abb. 15 Informationsstele Aachen [35]

2.2 Geometrie

Je nach vorliegender Planungsaufgabe bzw. Grundrissform (Abb. 16) gilt es, die passende Faltwerksgeometrie zu wählen.

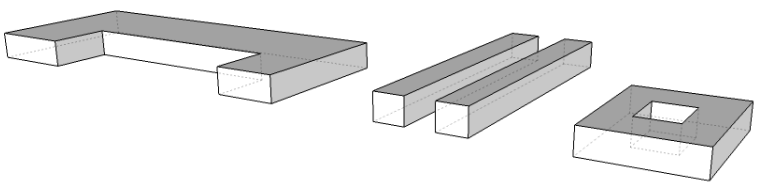


Abb. 16 Grundrissformen (v.l.n.r.) Glashof, -band und –mitte nach [61]

Auf der Suche nach geeigneten Grundformen finden wir bei Knaack [44] das Pyramiden- (Abb. 17) und das Grat-Kehlen-Faltwerk (Abb. 19 und Abb. 20). Letzteres wird mit bzw. ohne Gegenfaltung (Abb. 21, vgl. Buri [45] *„reverse fold“*) vorgestellt. In [46] ergänzt Wurm den Typus der Glasmitten um Kuppelkonstruktionen, die aus ebenen Trapezen aufgebaut sind (Abb. 18). Die in [47] von Bagger untersuchten Kuppelkonstruktionen (plate shell structures) aus ebenen Sechsecken stellen wir ebendiesen an die Seite. Faltwerksgeometrien aus „*kurzen Elementen*“ [48] wollen wir den Grat-Kehlen-Faltwerken mit Gegenfaltung zuordnen. Dem Nachteil der Kleinteiligkeit, der mit einer Erhöhung der Stoßanzahl einhergeht [49], steht eine maximale Flexibilität bei der Strukturfindung gegenüber. So ist beispielsweise mit *„orihnogami“* ein RhinoCeros® Script verfügbar [50], welches nach Auswahl der Randkurven ein regelmäßiges Faltwerk und dessen Abwicklung erstellt. Zusätzlich zu Glashof, Glasband und Glasmitte können Freiformflächen bequem mit diesem Werkzeug abgebildet werden. Im Hinblick auf ihr Potential muss die von Wurm [48] vorgeschlagene Limitierung der Knickwinkel auf Werte $\geq 120°$ genau geprüft werden. Ein weiteres konzeptionelles Beispiel für das Material Glas finden wir bei Bucak [51] (Abb. 22).

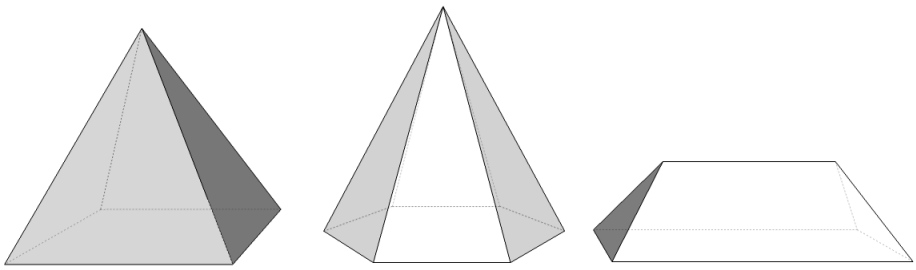


Abb. 17 Pyramidisch (li. u. mi.) und halbprismatisches Faltwerk (re.) [53]

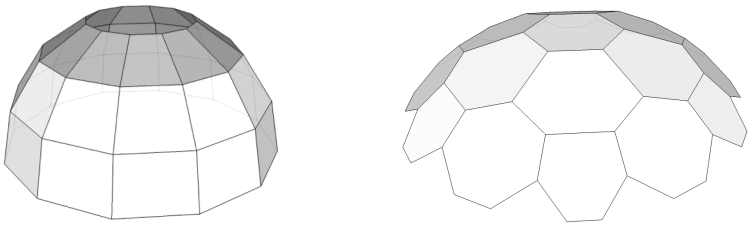


Abb. 18 Aus Trapezen [46] und aus Sechsecken zusammengesetzte Kuppel [47]

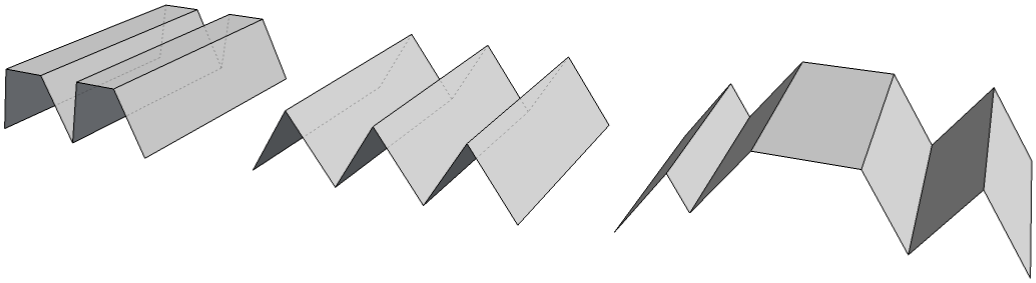


Abb. 19 Prismatische bzw. parallele Faltung [54] (vgl. Grat-Kehlen Faltwerk)

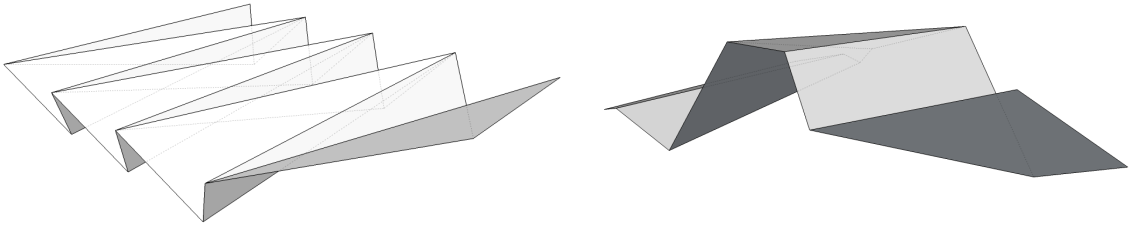


Abb. 20 Schräge (li.) und beliebige Faltung (re.) [54]

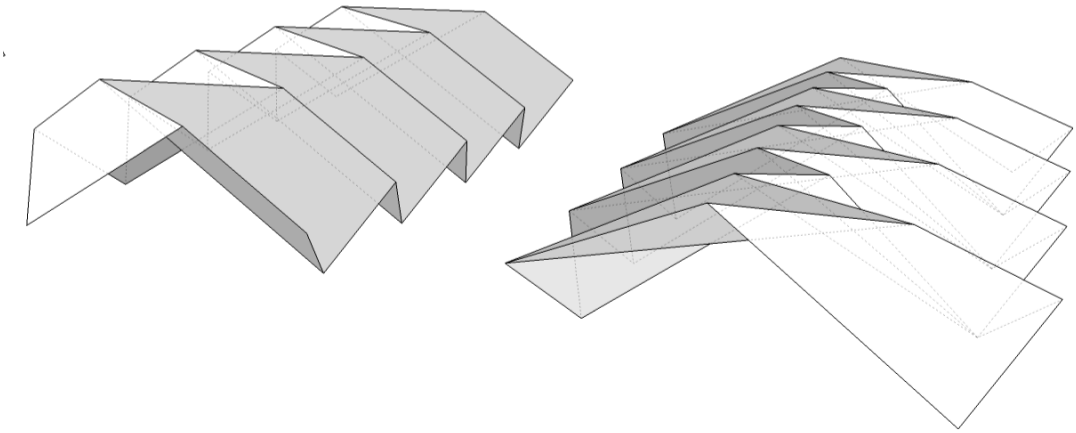


Abb. 21 Gegenfaltung bei paralleler (li.) und schräger Faltung (re.) [54]

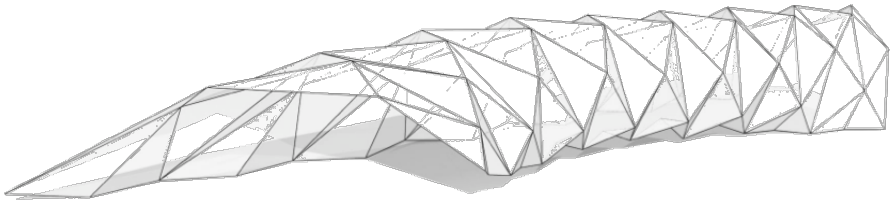


Abb. 22 Studentenentwurf – Gewinner des Trösch-Innovationspreises 2006 [51]

Generell lohnt es, in der Literatur gängige Einschränkungen vor dem Hintergrund neuer, fertigungstechnischer Möglichkeiten zu bewerten. So kann heute die Begrenzung der verfügbaren Scheibenlängen von 6 bis 7,5m [48] auf 15 bis 18m angehoben werden [52]. Dies ist beispielsweise für das Grat-Kehlen-Faltwerk mit Gegenfaltung von Bedeutung (vgl. Abb. 21), welches mit diesen Scheibenformaten Spannweiten bis zu 30m überbrücken könnte.

2.3 Geometrieauswertung

Zur Bewertung der geometrischen Abhängigkeiten wurde auf ein parameterbasiertes Konstruktionsprogramm[5] zurückgegriffen. Durch Variation von definierten Stellgrößen können Modellvarianten generiert und ihre Wechselwirkungen untersucht werden (vgl. Abb. 23). Die so gefundenen geometrischen Zusammenhänge wurden in grafischer Form aufbereitet, um die Winkelbeziehungen innerhalb des Flächenverbundes anschaulich darstellen zu können (Tafel 1 bis 4).

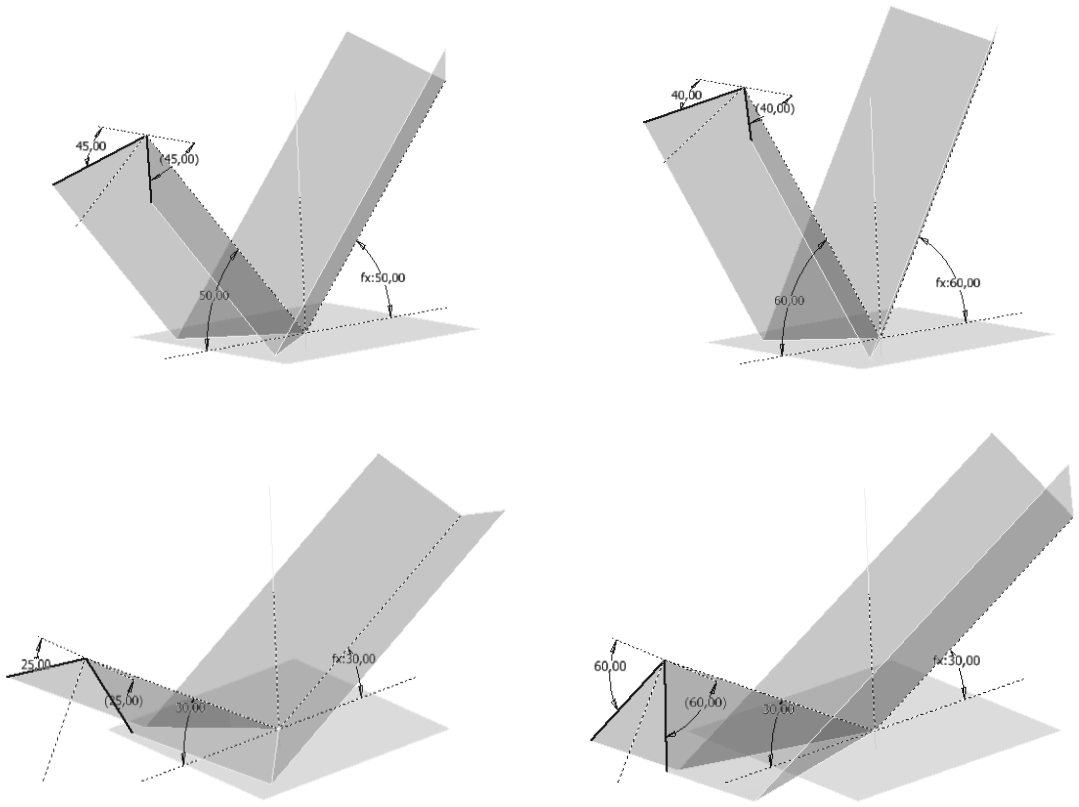
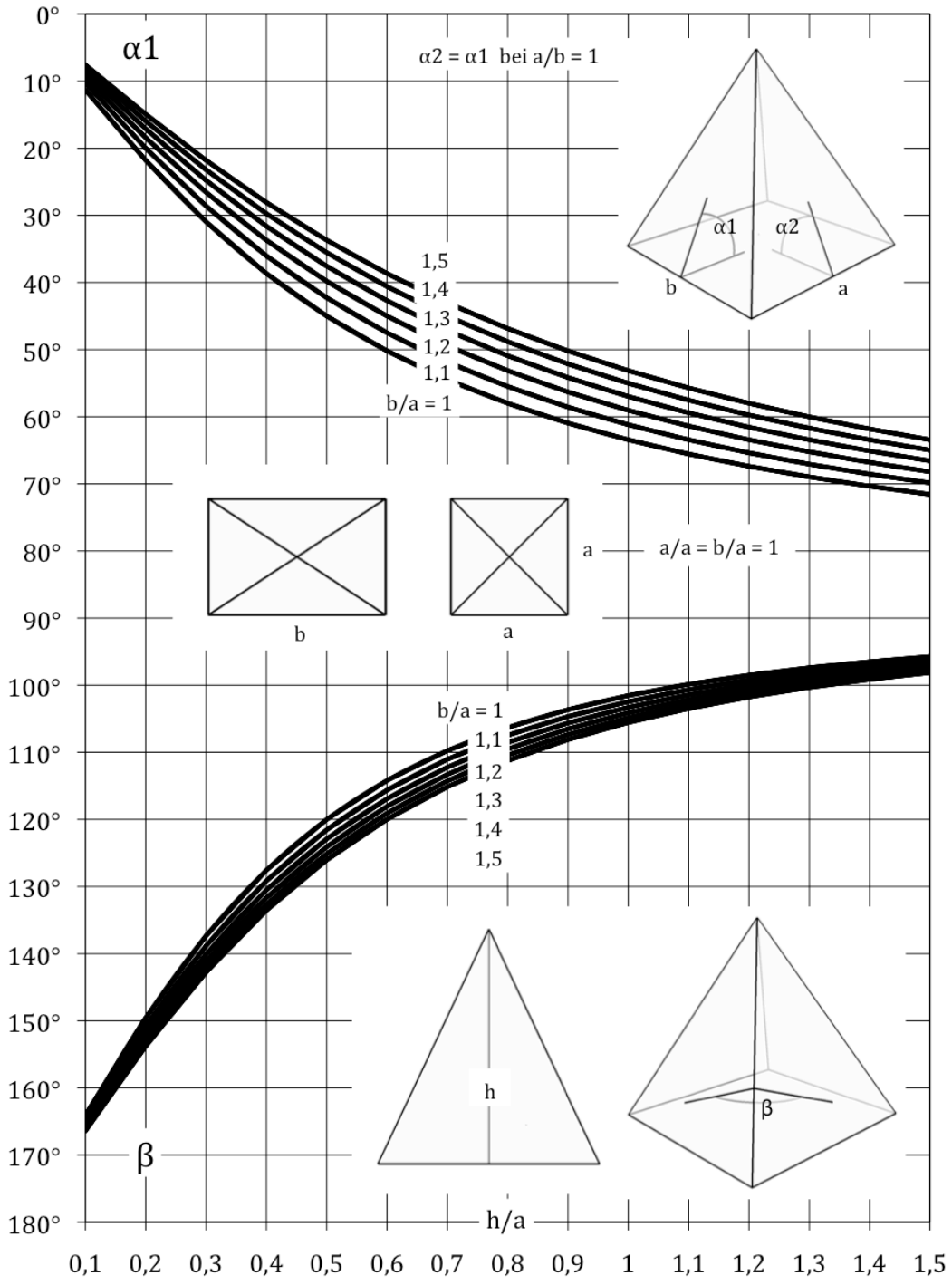


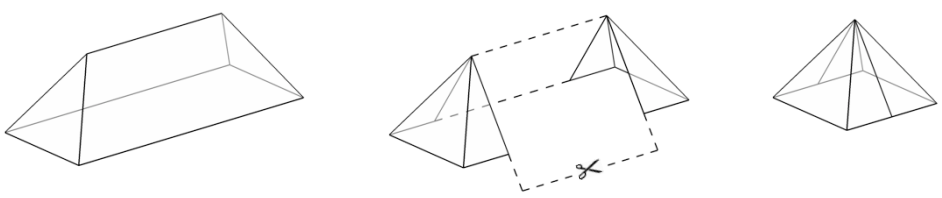
Abb. 23 Parametrisches CAD-Modell am Beispiel der parallelen Faltung mit Gegenfaltung (Tafel 3).

[5] Autodesk Inventor Professional 2013

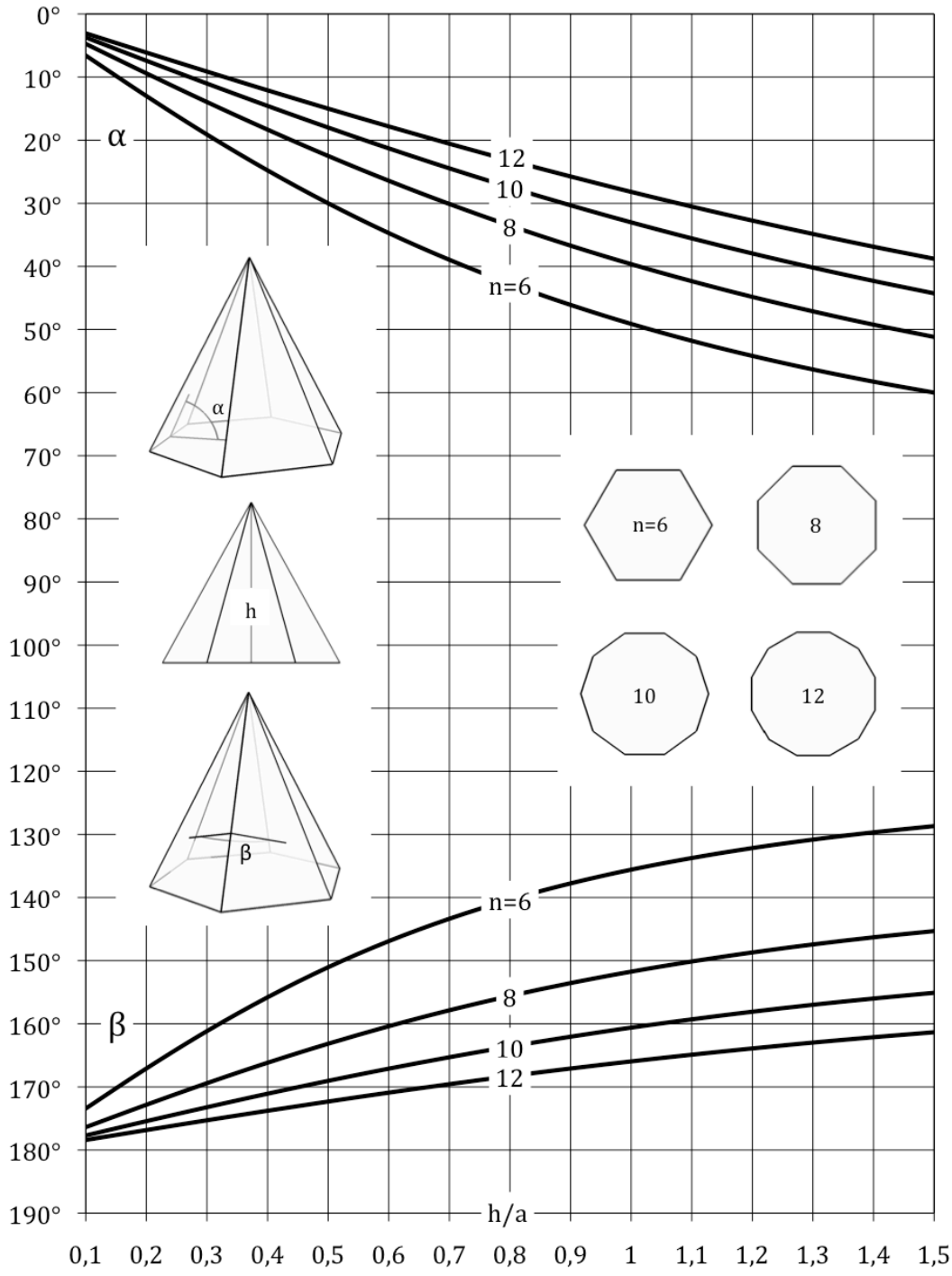
Tafel 1 Geometrische Abhängigkeiten beim Pyramidischen Faltwerk I



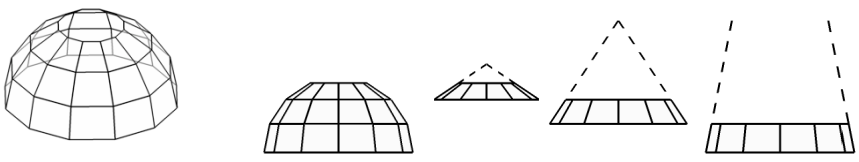
Ergänzung zu Tafel 1: Reduktion Satteldach auf Pyramide



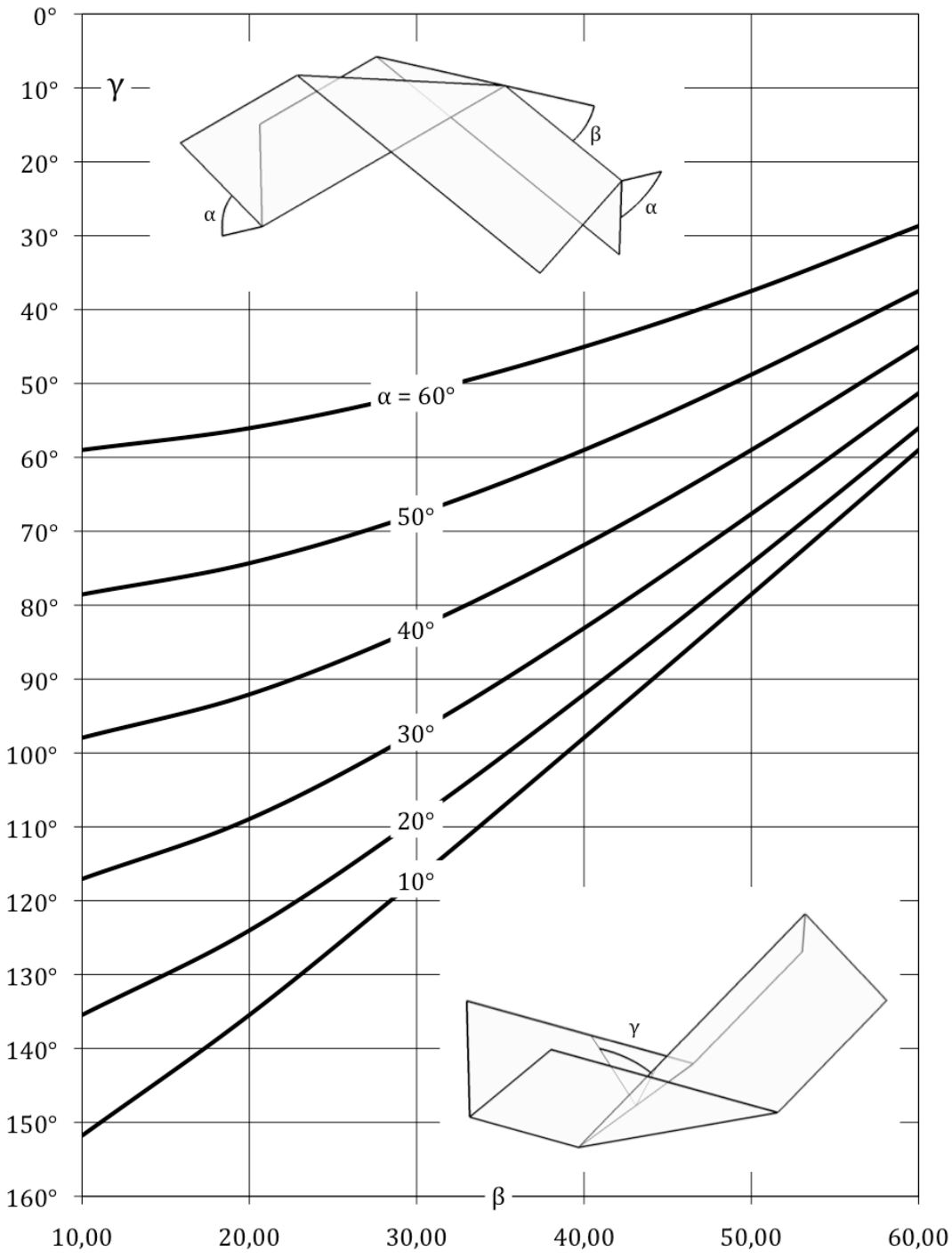
Tafel 2 Geometrische Abhängigkeiten beim Pyramidischen Faltwerk II



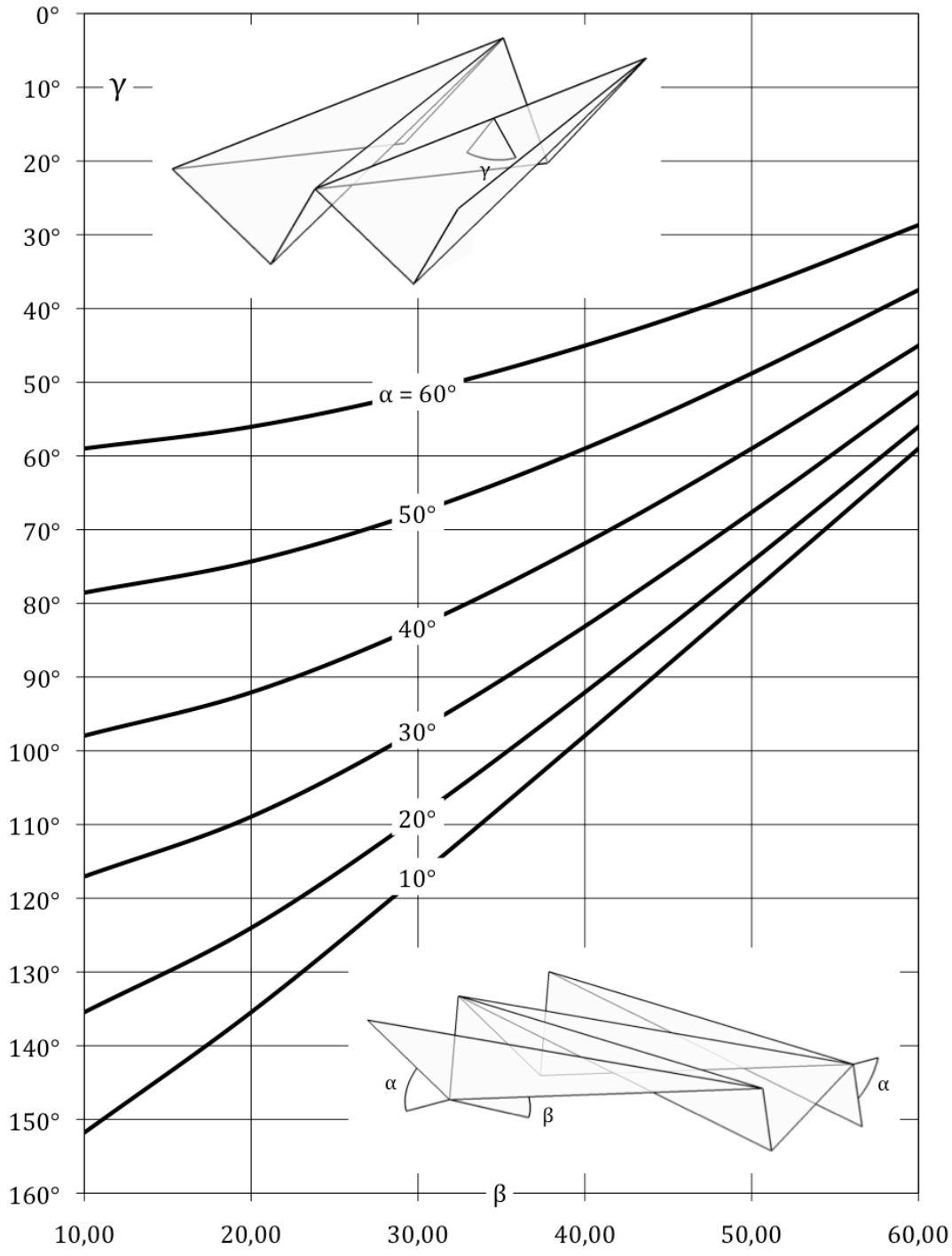
Ergänzung zu Tafel 2: Bewertung einer Kuppel durch Pyramiden



Tafel 3 Abhängigkeiten beim parallelen Faltwerk mit Gegenfaltung



Tafel 4 Abhängigkeiten beim gegenläufigen Faltwerk



3 Konstruktion

Dem Fugendetail kommt in der Konstruktion eine zentrale Bedeutung zu (siehe auch Kapitel 2.1.2). Zusätzlich zur Funktion als Dichtfuge müssen bei dem angestrebten Faltwerk aus Glas dauerhaft Lasten übertragen werden. Bevor man mit der Konzeptionierung einer Verbindungstechnologie beginnt, lohnt es, die zum Thema vorhandenen, teils experimentellen Konstruktionsdetails zu diskutieren. Um die Lösungen typologisch besser einordnen und bewerten zu können, seien an dieser Stelle die grundsätzlichen Verbindungsformen im Glasbau kurz wiederholt.

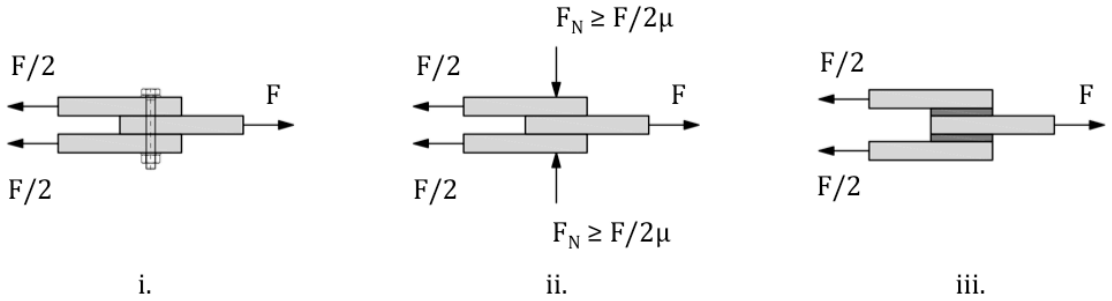


Abb. 24 i. Formschluss, ii. Kraftschluss, iii. Stoffschluss [62]

In Abb. 24 finden wir unter i. die klassische SL-Verbindung, wie wir sie auch aus dem Skelettbau kennen. Mit der lokalen Lasteinleitung geht eine für den Werkstoff Glas eigentlich ungewollte Spannungskonzentration einher [62]. Die Kraftweiterleitung über Reibung, wie in ii. dargestellt, umgeht lokale Spannungsspitzen, steht aber grundsätzlich vor dem Problem, die nötige Presskraft dauerhaft aufzubringen (Abb. 29). Das größte Entwicklungspotential für den konstruktiven Glasbau wird dem Kleben zugeschrieben (iii.).

In Tabelle 1 [66] werden die grundsätzliche Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Fügemethoden in kompakter Weise zusammengefasst. Qualitative Aussagen über die Beanspruchbarkeit unterschiedlicher Klebefugengeometrien finden sich in Tabelle 2, wobei ergänzend erwähnt sei, dass Spalt- oder Schälkräfte möglichst vermieden werden sollen [62].

3.1 Diskussion Konstruktionsdetails

3.1.1 Einschränkungen

Durch Betrachtung konstruktionsspezifischer Punkte und qualitative Gegenüberstellung ausgewählter Kriterien soll ein Gefühl für erstrebenswerte bzw. zu vermeidende Konstruktionsansätze gewonnen werden. Eine quantitative Bewertung der Anbindungsdetails betreffend Tragfähigkeit oder Nachbruchverhalten, um beispielhaft zwei Kriterien zu nennen, ist in Ermangelung der hierfür notwendigen Eingangsdaten in dieser Arbeit nicht möglich. So sind für eine abschließende, von Interpretation weitestgehend freie Beurteilung dieser Eigenschaften vergleichende Versuchsreihen einer theoretischen Betrachtung vorzuziehen. Es wird hier bewusst ein „Konstrukteursvergleich“ angestrebt, der als Verschriftlichung einer Meinung und nicht als wissenschaftlich fundierte Reihung bzw. Wertung verstanden werden soll.

Da Erfahrungen mannigfaltig sind, werden naturgemäß auch die Einschätzungen des Lesers zu manchen Punkten gemischt ausfallen.

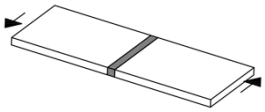
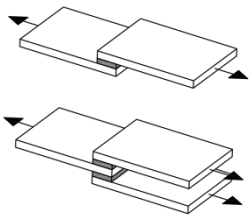
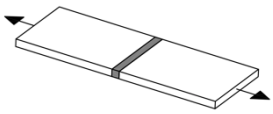
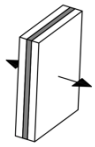
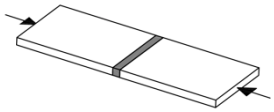
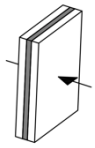
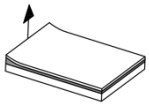
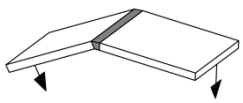
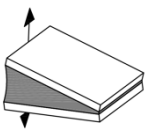
Tabelle 1 Qualitative Gegenüberstellung der Verbindungsformen aus [66]

Anwendungskriterium	Formschluss	Kraftschluss	Stoffschluss
Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe	+	++	++
Berechenbarkeit der Verbindung, Kriechen unter statischer Last, Abhängigkeit der Verbindungsstärke von Temperatur	++	0	+/0
Thermischer Verzug	++	++	++
Arbeitsphysiologie, z.B. Chemikalienemission	+	++	+/-
Abdichtung der Verbindung	-	0	++/+
Korrosionsanfälligkeit	0	0	+
Zeitbedarf zwischen Fügevorgang und gewünschter Verbindungsfestigkeit	++	++	+/0
Temperaturbeständigkeit der Verbindung	++	+/0	+
Lösbarkeit der Verbindung	++	+	0

++ sehr gut / + geeignet / 0 teilweise geeignet / - ungeeignet

Dennoch können auf diese Weise die Denkprozesse festgehalten werden, die dem Kreativprozess des technischen Entwerfens dieser Arbeit vorausgingen. Im Sinne einer Evolution wird versucht ein Fügedetail für Faltwerke zu entwickeln, das weitestgehend geometrie- und strukturflexibel ist und dabei ein Maximum positiver Attribute in sich vereint. Der Entwurf soll die Grundlage der folgenden versuchstechnischen und numerischen Untersuchungen bilden und erste Fragen über die Tragfähigkeit der vorgestellten Anbindung beantworten. Auf den Seiten 36 bis 43 werden die gesammelten Fugenlösungen im Detail vorgestellt und einleitend diskutiert. Weiterführende Betrachtungen finden sich in Tabelle 3 kompakt aufbereitet.

Tabelle 2 Beanspruchbarkeit einer Klebefuge nach Fugenkonfiguration aus [65]

Beanspruchungsart	Aufnahme geringer Kräfte	Aufnahme großer Kräfte
Scherkräfte		
Zugkräfte		
Druckkräfte		
Schälkräfte		
Spaltkräfte		

3.1.2 Gesammelte Konstruktionsdetails

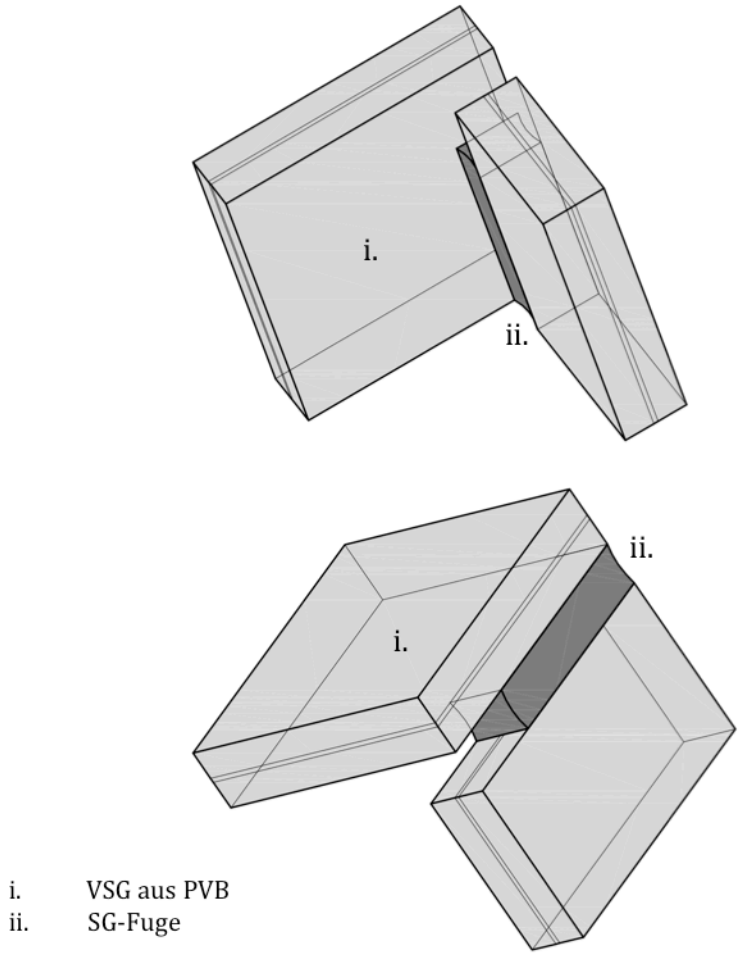


Abb. 25 Fugendetail für eine Informationsstele vor dem Stadt-Theater Aachen 1999 [67] (Projektstudie)

Die VSG-Elemente der Stele (Abb. 15) bestehen aus TVG (2x12mm) und werden über eine bauseitig eingebrachte Silikonfuge gefügt (Abb. 25). Die Konstruktion bedient sich sinngemäß einer klassischen „Structural Glazing"-Lösung. In den Verarbeitungsrichtlinien namhafter Hersteller [119] wird bei einer Baustellenverklebung in der Regel auf zusätzliche Maßnahmen zur Qualitätskontrolle verwiesen. Da die Fuge mit den Stirnseiten des Laminats in Kontakt kommt, sollte die Verträglichkeit der Verbundfolie mit dem Silikon geprüft werden. Delaminationen im Randbereich der Gläser können so minimiert bzw. vermieden werden. Lasten, wie beispielsweise Wind, wirken nur kurzzeitig und beanspruchen die Verklebung nicht dauerhaft. Das Eigengewicht der Konstruktion wird über Pressung an der unteren Glaskante abgetragen [67]. Montage und Glastausch sind einfach zu bewerkstelligen und daher unkritisch.

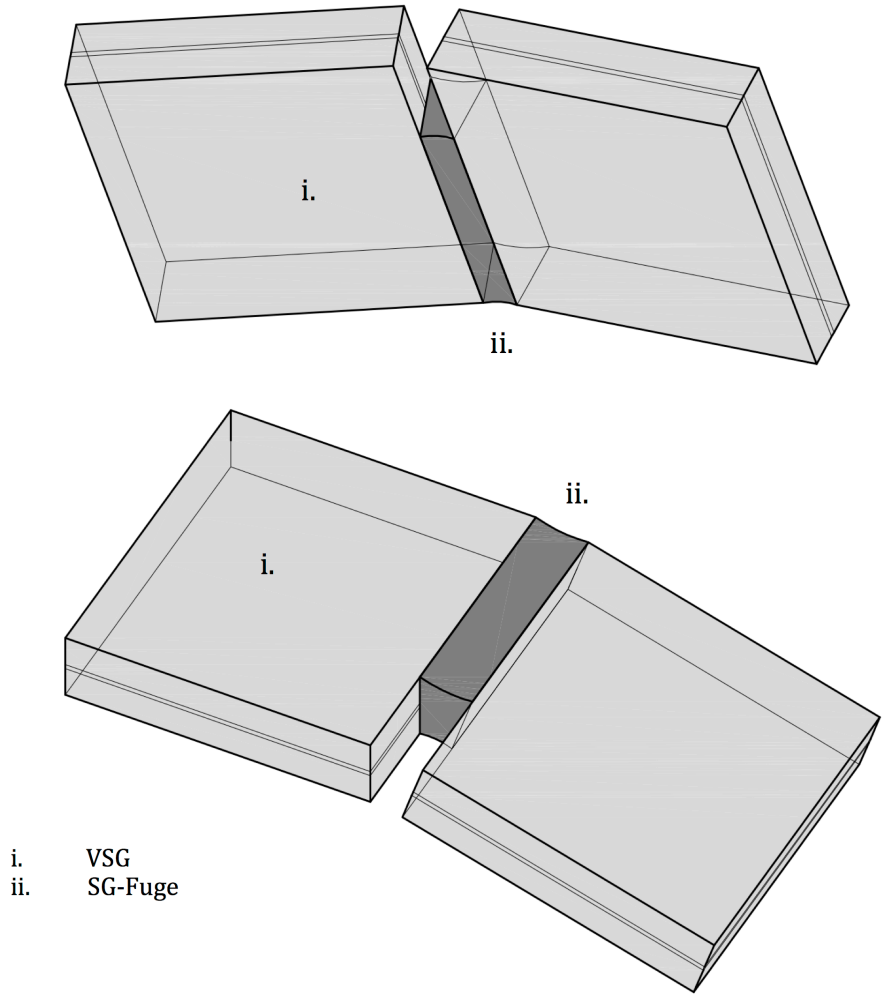
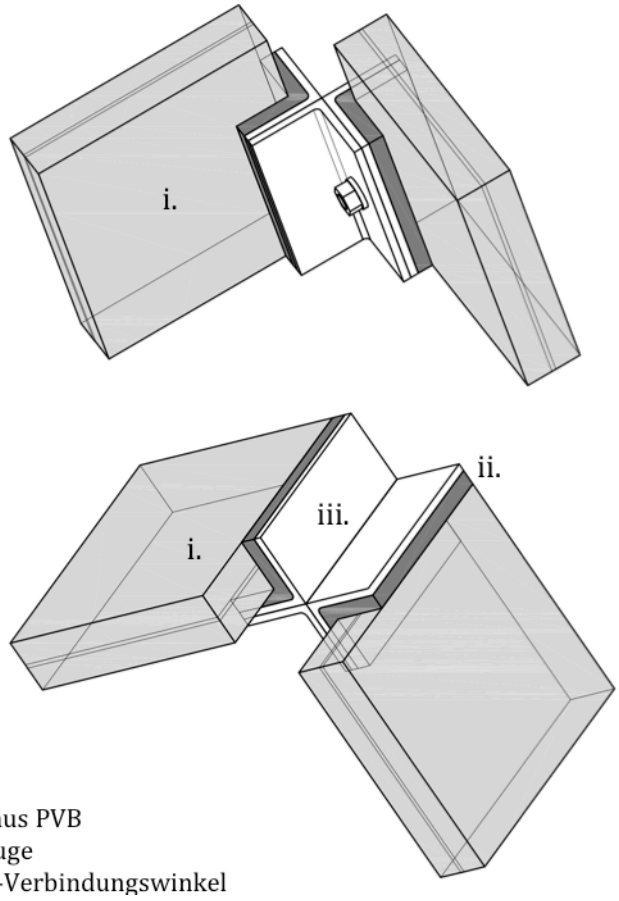


Abb. 26 Klebefuge zur Verbindung von Elementen gemäß Bagger [75]

Entgegen der Stele (Abb. 25) müssen die Fugen einer Kuppelkonstruktion (Abb. 8) dauerhaft Lasten übertragen. Bei entsprechender Wahl der Geometrie (Lage der Bruchfuge) treten unter Eigengewicht in den Klebefugen vorwiegend Druckkräfte auf [77]. Bei der Ganzglaskuppel des ILEK hat man sich für die Verwendung von Epoxidharz entschieden [38]. Laut Bagger kommt es bei Kuppeln aus ebenen Scheiben (Abb. 26) bei harter Anbindung im Bereich der Ecken zu Spannungskonzentration (Plattenschüsseln). Das von ihr vorgeschlagene Aussparen der Knoten von der Anbindung [78] erscheint vom Standpunkt der Dichtheit aus ungünstig. Für die Glaskuppel des ILEK gibt es mit [117] einen Erfahrungsbericht über das Langzeitverhalten der Verklebung. Die Autoren schließen mit einer durchgängig positiven Bilanz und legen nahe, dass Sicherheitsfaktoren für zukünftige Planungsaufgaben reduziert werden können. Im Sinne einer ganzheitlichen Entwicklung geklebter Anwendungen wird auch auf die Wichtigkeit geeigneter Ablöseverfahren verwiesen.



i. VSG aus PVB
ii. SG-Fuge
iii. Stahl-Verbindungswinkel

Abb. 27 Faltwerk der Eingangsüberdachung der Freien Evangelischen Gemeinde Aachen 1999 [68].

Die Elemente des Vordaches (Abb. 7) bestehen einer Überkopfverglasung entsprechend aus Verbundsicherheitsglas (2x10mm Float). Entlang der Längskanten der Einzelscheiben werden werkseitig Profile aus Edelstahl befestigt (Abb. 27). Die statisch tragende Verklebung kann so unter kontrollierten Bedingungen im witterungsgeschützten Fertigungsbetrieb ausgeführt werden. Unterschiede in der thermischen Ausdehnung müssen über eine entsprechende Klebefugendicke berücksichtigt werden. Da die Verklebung durch ständige Lasten beansprucht wird, findet ein Hochleistungssilikon aus der Computerindustrie Anwendung. Die Aussagen zur Verträglichkeit (vgl. Seite 36) gelten sinngemäß. Die Konstruktion vereint die Vorteile einer Verklebung bezüglich Lasteinleitung mit denen einer mechanischen Lösung und ihrer sofortigen Belastbarkeit für die Montage. Eine korrekte Positionierung der Einzelteile vor dem Verschrauben ist zu gewährleisten, um Schälkräfte in der Klebefuge zu vermeiden. Strukturtoleranzen wie Winkelabweichungen können nicht in der Klebefuge aufgenommen werden. Für alternative Anwendungen scheint die Dichtebene nicht ausreichend gelöst. Es besteht die Gefahr eines Wassereintritts über die Pressflächen der Anbindungselemente.

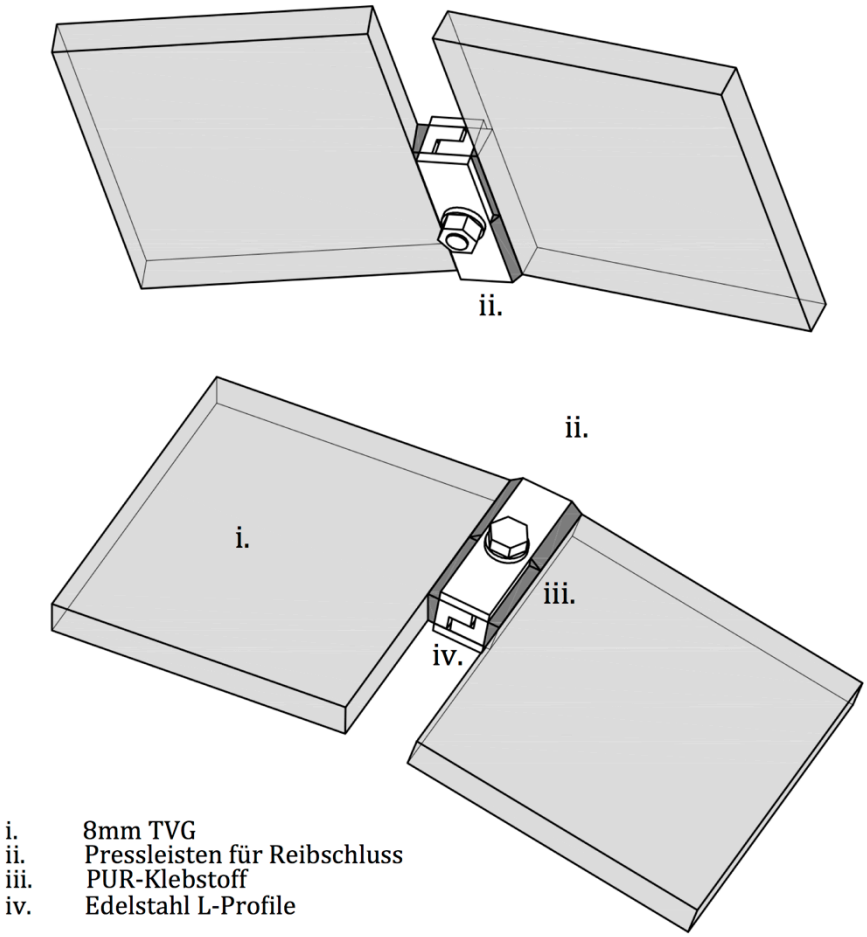


Abb. 28 Delfter Glaskuppel [69]

Einen ähnlichen Ansatz finden wir bei der „Delfter Glaskuppel“ (Abb. 9). Gefräste Edelstahlprofile werden über einen leistungsfähigen PUR-Klebstoff an die Kanten von 8mm dicken Einscheibensicherheitsgläsern gefügt (Abb. 28). Die notwendige Kraftübertragung zwischen zwei benachbarten Gläsern erfolgt über Reibschluss. Der notwendige Anpressdruck wird über verschraubte Leisten aufgebracht. Das Aufbringen der Vorspannkraft steht im Konflikt zur Abdichtung der Durchdringung. Dichtscheiben können durch Ausquetschen oder Kriechen zu einem Verlust der Vorspannkraft führen. Um das Eindringen von Wasser zwischen Verbindungsprofil und Pressleiste zu verhindern, muss eine Dichtfuge auf der Baustelle hergestellt werden (dargestellt durch eine beidseitige Kehlnaht). Bei Verlust des Reibschlusses wird die Dichtnaht auf Abscheren beansprucht, was zu einer Beschädigung der Dichtebene führen kann. Zur Vermeidung von montagebedingten Spaltkräften in der Klebefuge ist auf eine exakte Positionierung der L-Profile zu achten. Eine Stauchung oder Dehnung der Klebefuge durch Toleranzaufnahme, wie von Wurm in [69] beschrieben, muss bei der statischen Auslegung der Fuge entspre-

chend berücksichtigt werden. Die chemische Verträglichkeit zwischen Strukturklebstoff und Dichtmaterial ist zu gewährleisten. Bei exponierter PUR-Fuge ist eine erforderliche UV-Stabilität des Klebstoffes bei der Industrie explizit abzufragen.

In Abb. 29 finden wir Baggers Beitrag zu einer reibschlüssigen Verbindung. Während bei der vorangegangen Lösung die Verschraubung in Löchern geführt wird, besteht bei vorliegender Anbindung die Gefahr eines Kontakts zwischen Schraubenschaft und Glas. Das Material der Pressleisten wird nicht näher spezifiziert, für die Kontaktbeilagen wird EPDM oder Klingersil vorgeschlagen. Die Höhe der übertragbaren Kräfte ist durch die aufbringbaren Vorspannkräfte [83] und den daraus resultierenden Reibkräften limitiert. Ein eventueller Verlust der Vorspannkraft durch zeit- und kraftabhängiges Verhalten der Beilagen ist zu prüfen [82]. Die Anbindung an nur eine Scheibe der Verbundglaseinheit bzw. das Fehlen einer Einbindung der Verbundfolie in das Anbindungsdetail ist mit Blick auf das Nachbruchverhalten als kritisch zu bewerten. Auch werden unter Last Biegemomente an geschwächter Stelle ins Glas eingebracht [76]. Die Abdichtung der Anbindung ist klar gelöst.

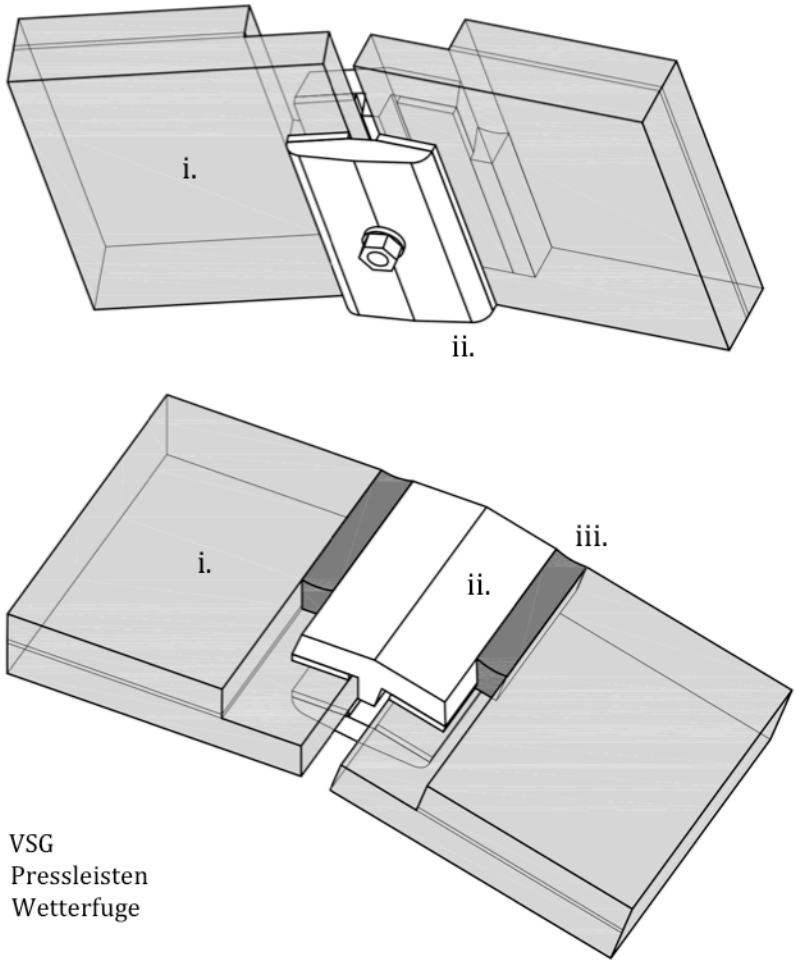


Abb. 29 Reibschluss zur Verbindung von Elementen gemäß Bagger [81]

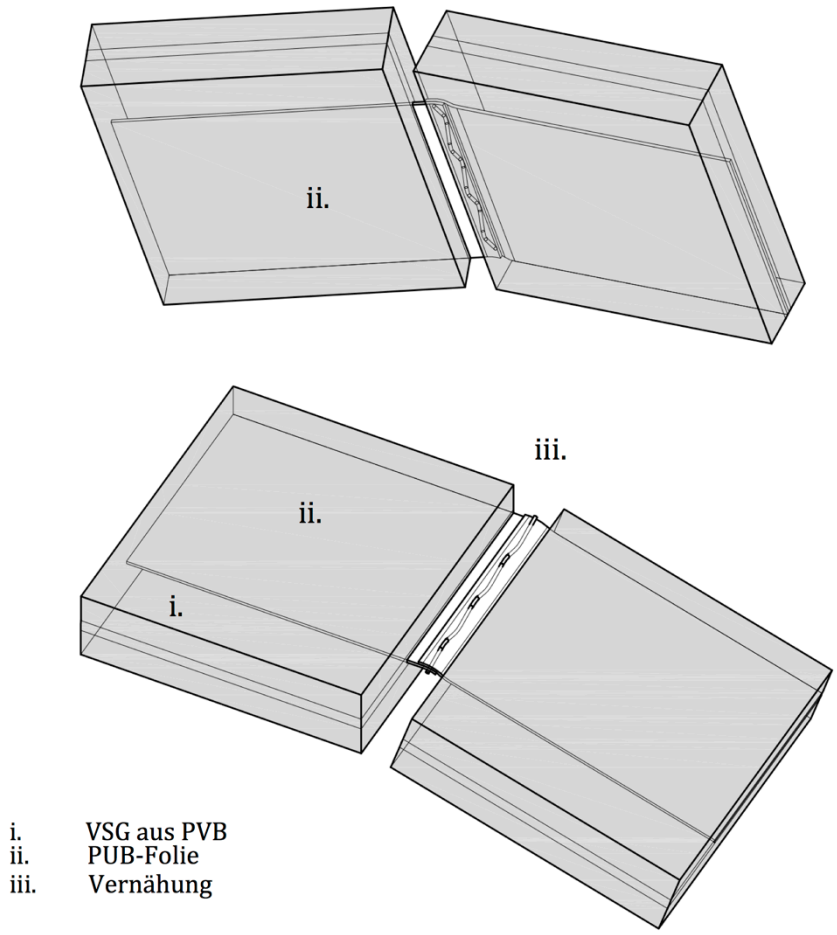


Abb. 30 Verbindung von Glasscheiben durch vernähen eines PUB-Films nach Knaack [70] (Konzeptstudie)

Bei Knaack finden wir einen Vorschlag zur Integration von PUB-Folien in die PVB-Zwischenschicht (Abb. 30). Sie soll die Einleitung hoher Punktlasten erlauben und wird als Alternative zu den SL-Verbindungen vorgestellt. Für die vorliegende Arbeit ist hauptsächlich das Vernähen oder Verschweißen [70] der Folie von Interesse, welches eine kontinuierliche Verbindung ermöglichen würde. Während Zugkräfte gut übertragen werden können, ist dieses Detail ohne weitere konstruktive Maßnahmen für Druck und Schubkräfte wenig bis nicht geeignet. Auch die chemische Verträglichkeit der verschiedenen Materialien ist zu prüfen. Das Nachbruchverhalten dieser Verbundgläser sollte über Versuche evaluiert werden. Für den Fall einer opaken Zwischenschicht ist ein erhöhter Energieeintrag zu erwarten. Bei Bauteiltemperaturen jenseits der Glasübergangstemperatur fällt der Schubmodul von PVB-Folien signifikant ab [71].

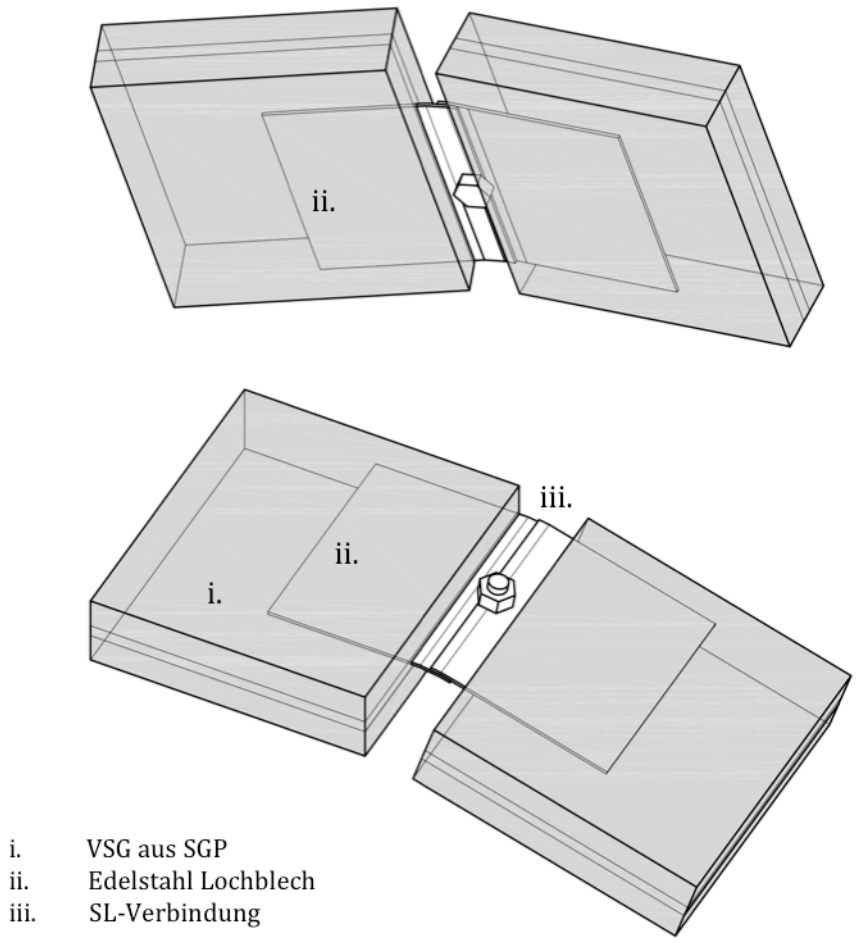


Abb. 31 Verbindung zweier Gläser durch „Randbewehrung“ [72]

Der in Abb. 31 dargestellte Ansatz integriert das Fugendetail in die Verbundfolie. Die Eigenschaften von Verbundfolien in Kombination mit „Bewehrungselementen“ wurden von Feirabend in [73] beforscht und lässt auf ein verbessertes Nachbruchverhalten der Konstruktion schließen. Von Carvalho [72] wurde dieser Konstruktionsgedanke aufgegriffen und um die Verbindungskomponente erweitert. Um auch Druckkräfte abtragen zu können, werden in der jüngsten Entwicklungsstufe (Abb. 13) beidseitig Polycarbonat-Pressleisten in die Fuge eingelegt und gemeinsam mit den Blechen verschraubt. Störender Verbindungsschlupf kann über bauseitiges Bohren vermieden werden. Auch bei der historischen Stadt-Schwimmhalle in Zürich (Abb. 14) werden überstehende Bleche zur Kopplung von Gläsern verwendet [74]. Beide Entwicklungen bedienen Projekte, bei denen die Frage der Dichtebene unbeantwortet bleiben darf und sie ist somit konstruktiv nicht gelöst. Bei Carvalho handelt es sich um eine vertikale Stele und die Lichtdecke in Zürich befindet sich im geschützten Gebäudeinneren (vgl. Abb. 37).

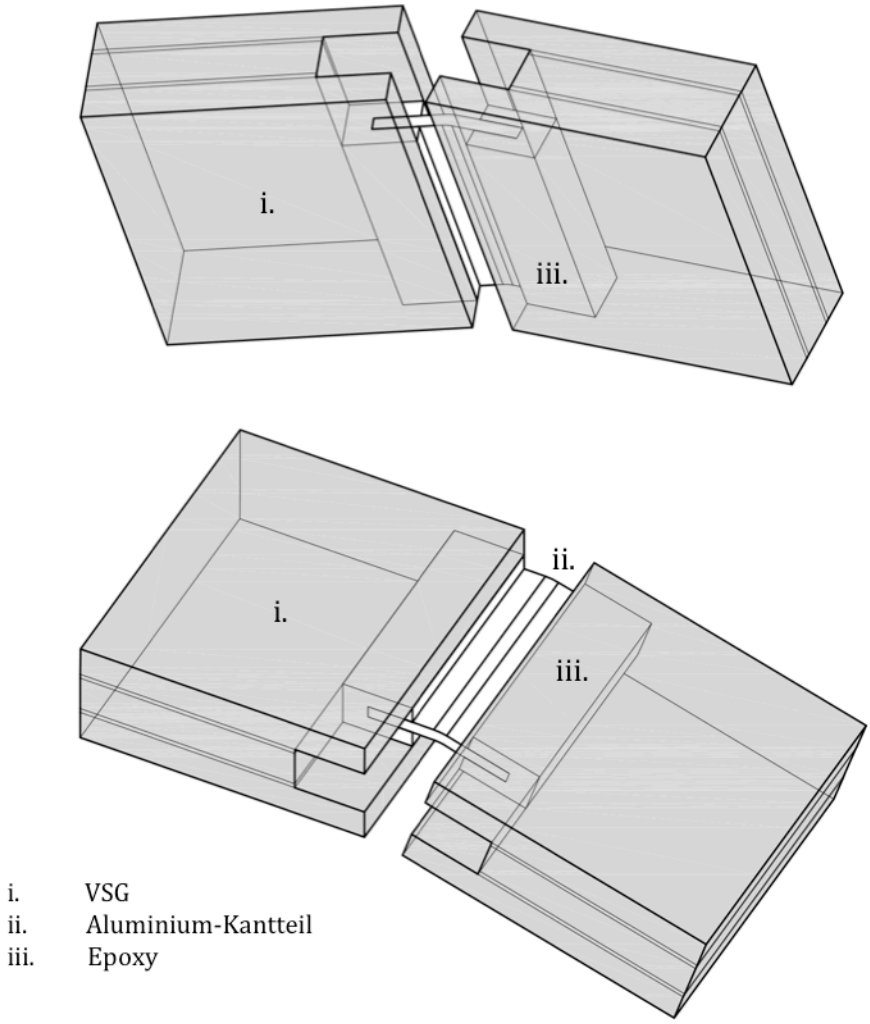


Abb. 32 Formschluss zur Verbindung von Elementen gemäß Bagger [80]

Der Formschluss in Abb. 32 wird durch eine Epoxid-Harz-Verklebung hergestellt. Die Scheiben müssen entsprechend einem Nut- und Federprinzip ineinander geschoben werden. Für einen Scheibentausch müssen geeignete Methoden entwickelt werden (Auslösen des Klebstoffes an den intakten Scheiben, Einbringen des Federbleches und Positionierung für die Verklebung). Die Anbindungszone ist auf ihre Eigenschaften im Nachbruchverhalten und auf den Einfluss der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Glas und Aluminium im Verbund zu untersuchen. Eine Verklebung bzw. Verzahnung mit Hilti-HIT HY70 war alternativ angedacht, wurde jedoch aufgrund der kurzen Topfzeiten und der wenig ansprechenden Optik (Eigenfarbe des Mörtels) verworfen [81].

3.1.3 Konstruktionsdetail Faltwerk TU-WIEN

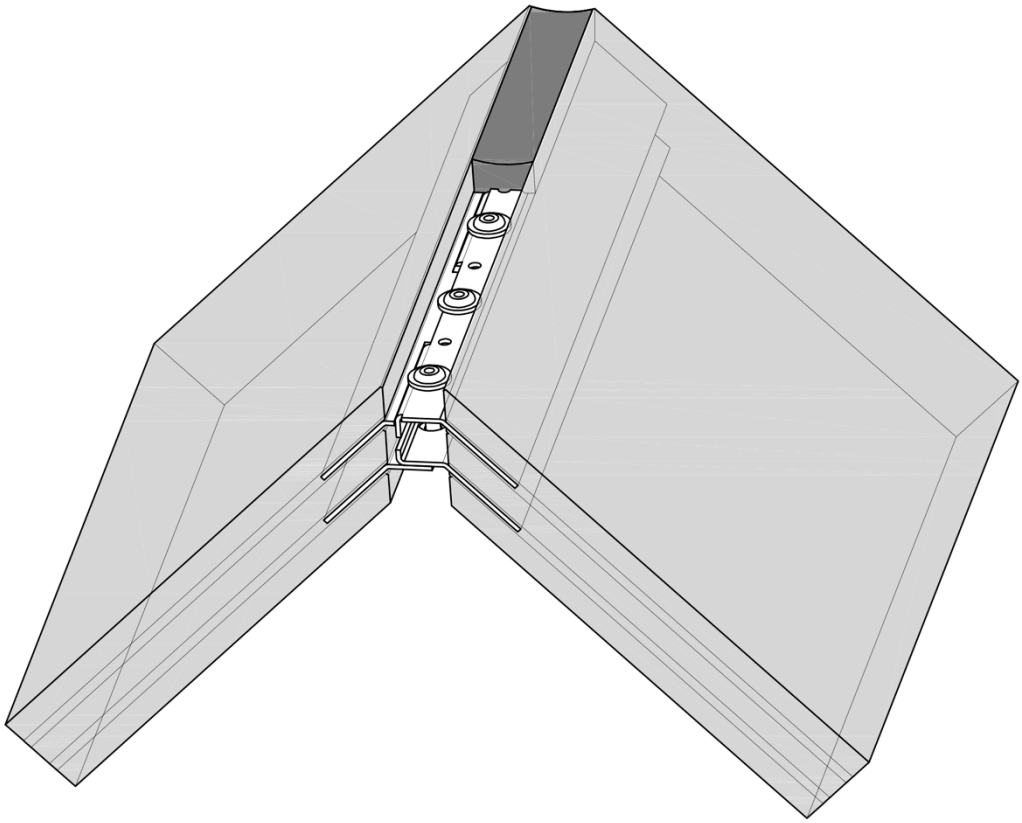


Abb. 33 Fügedetail TU-Wien am Beispiel einer 90° Faltung

Diese Entwicklung (Abb. 33) ist eine Weiterführung des Ansatzes der metallischen Bewehrung (vgl. Abb. 31). Kaltverformte Bleche werden in die Zwischenschicht des Sicherheitsglases im Laminationsprozess eingebunden. Die Komponenten entlang einer Glaskante werden zweiteilig ausgeführt (Abb. 34). Sowohl die Fertigung der Einlegeteile als auch ihr Einbringen für die Lamination werden dadurch erheblich erleichtert. Darüber hinaus erlaubt die Trennung in zwei Schalen die Aufnahme vorhandener Glasdickentoleranzen. Die Herstellung der Elemente erfolgt im Sackvorverbund [84]. Ein Verschwimmen der Blechteile während des Laminierens wird über entsprechende Betriebsmittel verhindert. Beim Glas handelt es sich um ein Mehrschichtlaminat (vgl. Abb. 32) aus SentryGlas® (glasscopond [85]). Wie aus Abb. 34 ersichtlich, bedingt die versetzte Verzahnung der Blechteile eine festgelegte Montagefolge. Zur Beschreibung der einzelnen Komponenten und ihrer Aufgaben im dargestelltem Konzept wollen wir gedanklich den Fügeprozess durchlaufen. Nach dem Austeilen der im Verband unten liegenden Komponenten (Abb. 34 i,a) folgen die oberen Bauteile (i,b) (ii. steht auf iv. auf).

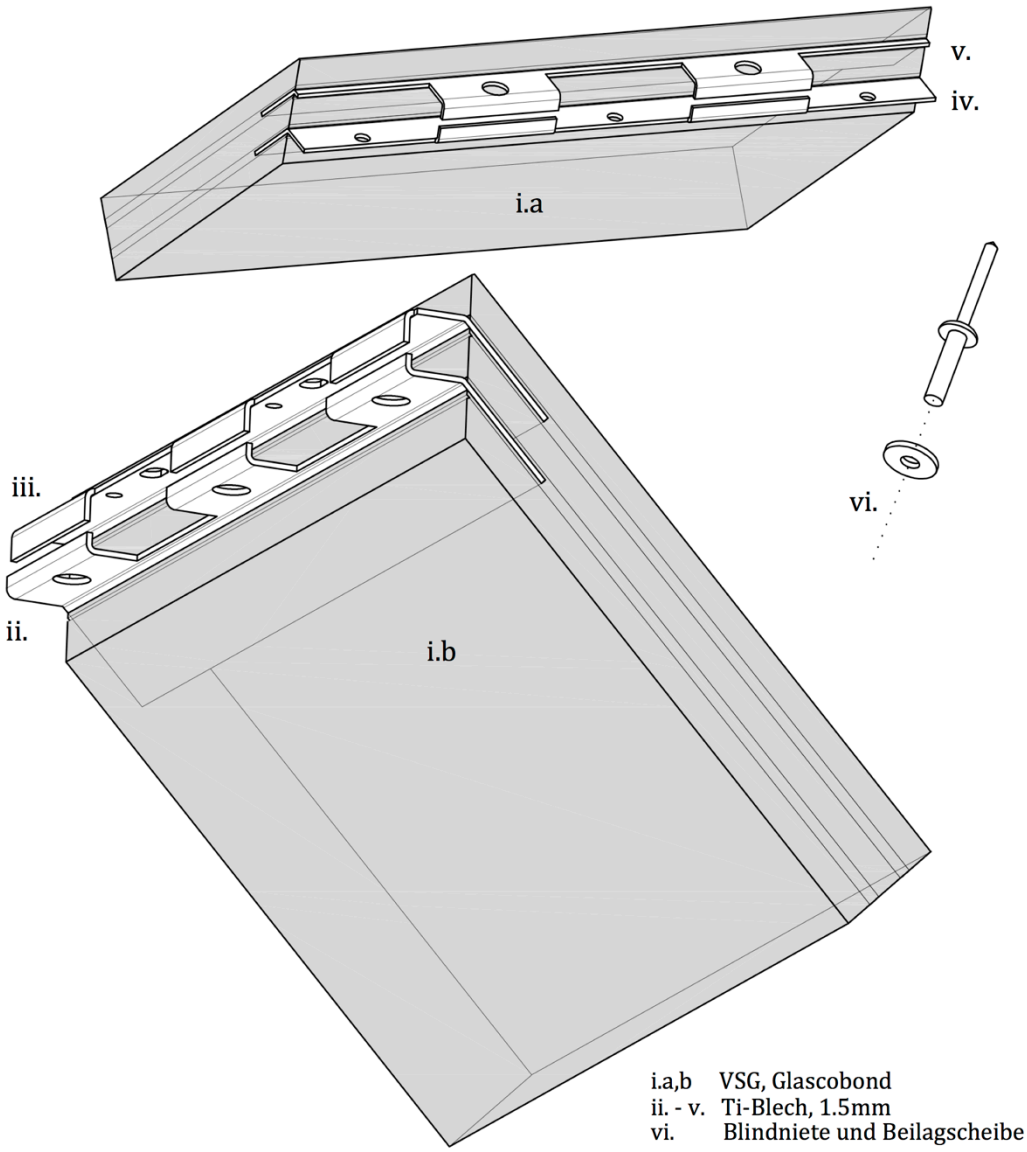


Abb. 34 Lieferteile Glas

Die überstehenden Bleche benachbarter Laminate haben in Fugenlängsrichtung ein planmäßiges Spaltmaß von 2mm. Elementübergreifende Bohrungen werden nur in einem Blech (Abb. 34, iv.) im Nenndurchmesser des Verbindungsmittels hergestellt. Alle weiteren Bohrungen entlang einer Verbindungsmittelachse sind im Übermaß gefertigt. Mittels Nieten (Abb. 34, vi.) werden zwei Laminate miteinander verbunden. Durch den Setzvorgang entsteht in einem ersten Schritt Reibschluss zwischen den Blechen. Der Formschluss der Verbindung wird durch Verguss mit Injektionsmörtel hergestellt (Abb. 35, iii.). Durch geschickte Anordnung der Bohrlochdurchmesser ist es möglich, in einem Arbeitsschritt alle Nietverbindungen in SLP-Verbindungen zu verwandeln. Dieses Vorgehen erlaubt einen Formschluss bei vorangegangener Toleranzaufnahme.

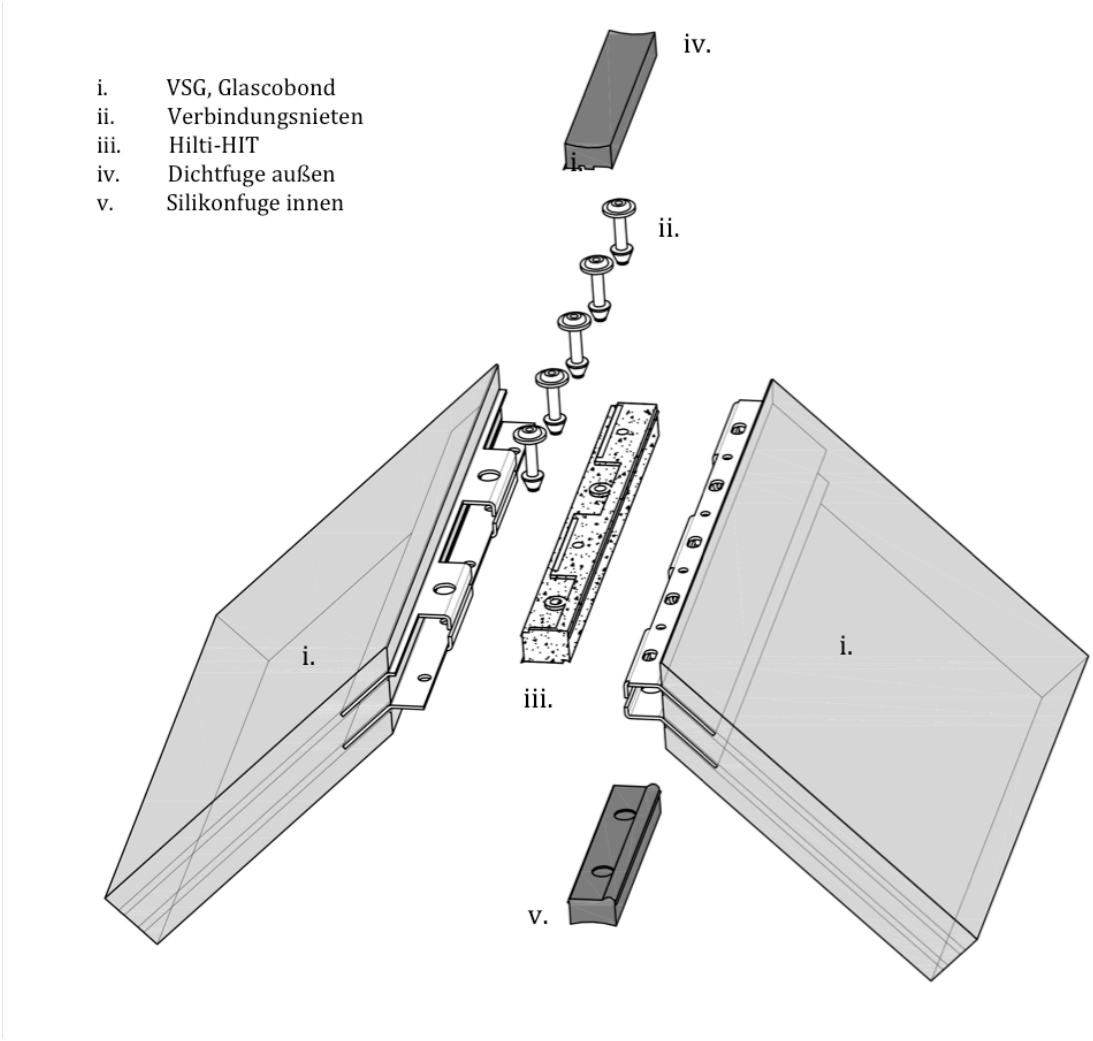


Abb. 35 Explosionszeichnung des Fugendetails

Vor dem Einbringen der Nieten ist es wichtig ein Trenn- bzw. Dichtband entlang der Fuge anzubringen, um die Anbindung für den Verguss vorzubereiten. Dieses Band dient als „verlorene Schalung“ für den Injektionsmörtel und als Trennband zur Vermeidung einer Dreiflankenhaftung der folgenden Silikonfuge. Die Problematik der Materialeigenfarbe stellt sich bei vorliegender Konstruktion nicht, da der Verguss zwischen den Blechen verborgen angeordnet ist. Der Injektionsmörtel ist allseitig umschlossen, was sich günstig auf die Traglast auswirken sollte.

Die Knaggen der Verzahnung dienen einer zusätzlichen Schubverdübelung in Fugenlängsrichtung. Unter Last können sich im Verguss Druckstreben zwischen Aufklauungen, Nieten und Gläsern ausbilden. Die Nieten werden durch Zug- und Scherkräfte beansprucht. Eine Druckkraftweiterleitung in das Laminat erfolgt hauptsächlich über das Vergussmaterial (Formschluss), eine Zugkrafteinleitung ausschließlich über die einlaminierten Bleche (Stoffschluss). Die Kantteile sind flächig an die Verbundfolie angebunden, was auf ein gutes Nachbruchverhalten hoffen lässt.

Die von Bagger beobachtete Notwendigkeit, die Ecken vom Anschluss auszusparen [78], oder Wurms Anmerkung zum Rückschnitt der Scheibenecken zur Vermeidung von Spannungsspitzen [23] können im vorliegenden Detail konstruktiv gelöst werden. Aus Gründen der Optik kann man die Bleche im Glas bis an den Rand führen. Auf das tragende Verbindungsdetail hingegen wird in den Ecken verzichtet, diese Bereiche werden lediglich mit einer Dichtfuge versehen. Ein solches Vorgehen bietet folgende Vorteile. Zum Vorzug der Homogenität der Faltwerksstruktur gesellt sich eine erhebliche Erleichterung für Fertigung und Montage. Nur schwer zugängliche Bereiche können so vom arbeitsintensiven Verbindungsdetail ausgespart bleiben. Darüber hinaus ist die Dichtheit des Details über eine bauseitige Versiegelung gelöst. Die innenliegende Silikonfuge wird nur aus optischen Gründen angeordnet.

Aufbauend auf den unter Kapitel 3.1.2 diskutierten Anbindungen wurde ein Vorschlag für eine linienförmige Fügung gemacht. Das vorgestellte Detail vereint die Vorteile einer stofflichen Fügung mit denen einer formschlüssigen. Unerwünschter Verbindungsschlupf und notwendiges Toleranzspiel werden durch einen linienförmigen Verguss, einem dem Vernähen nicht unähnlichen Prozess, gelöst. Die Verwendung eines Dreifachlaminats erlaubt es, die konstruktive Anbindung und die Dichtfuge innerhalb der Glasebene anzuordnen.

3.1.4 Gegenüberstellung der Konstruktionsdetails

Tabelle 3 bietet in kompakter Form eine qualitative Gegenüberstellung der unter den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 vorgestellten Anbindungen. Es sei hier nochmals auf die unter Kapitel 3.1.1 gemachten Einschränkungen hingewiesen.

Obwohl jedem vorgestellten Fügedetail ein Tragwerk zugeordnet ist, müssen wir bei der Bewertung den Versuch wagen, die Anbindungen gedanklich auf alternative Systeme zu übertragen. Wir wollen im Idealfall maximale Scheibengrößen verwenden und Spannweiten bis zu 30m überbrücken. Ob dies mit der hier vorgestellten Entwicklung grundsätzlich möglich ist, muss natürlich noch bewertet werden.

Unter dem Punkt Traglast diskutieren wir sowohl die geschätzte Höhe als auch die auf Anschauung basierende Übertragbarkeit aller Belastungsmoden. Unter Redundanz wollen wir im eigentlichen Sinn die Fähigkeit eines Anbindungsdetails verstehen, eine gebrochene Scheibe im Verband zu halten, und nicht die Umlagerungskapazität des Globalsystems.

Tabelle 3 „Konstrukteursvergleich“ der Bauweisen

Kriterium	Informationsstele Aachen	SG-Fuge Bagger	Faltwerk Freie Evang. Gmde.	Delfter Glaskuppel	Reibschluss Bagger	Formschluss Bagger	Verbindung durch Randbew.	PUB-Zwischenschicht	Faltwerk TU-WIEN
Traglast [1)]	0	+/0	+/0	+/0	0/-	++/+	++/+	-	++
Redundanz [2)]	+	+/0	+/0	-	0/-	0/-	++	++/+	++
chem. Verträglichkeit	+/0	+/0	++	++	++	0/-	++	0/-	++
Fertigung Herstellbarkeit	++	++	++	++	++	0/-	++	0/-	+
Montagefreundlichkeit	++	++	++/+	++/+	++	0/-	++	0/-	+
Revisionierbarkeit Glastausch [3)]	++	++	++	++	++	0/-	++	0	+
Dichtheit	++	++	-	-	++	++	-	+	++
UV Beständigkeit	++	++	++	0/-	++	++	++	+	++
Kleine Verbindungsnachgiebigkeit	+/0	+/0	+	+/++	0/-	++	0	0/-	++
Anwendbarkeit Fuge auf Geometrien	+	+	+/0	+/0	0	++/+	++/+	+/0	++
Dauerhaftigkeit	++	++	++	++/+	+/0	++/+	++/+	-	++/+

++ sehr gut / + geeignet / 0 teilweise geeignet / - kritisch

1) qualitative Bewertung
2) im zugehörigen Konstruktionsverbund
3) Tauschbarkeit einzelner Gläser ohne benachbarte Elemente zu zerstören

3.2 Materialien

Im folgenden Abschnitt werden jene Materialien behandelt, die im Detail „TU-Wien“ Anwendung finden sollen. Neben chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften werden gegebenenfalls auch prozess- und fertigungsrelevante Limitierungen besprochen.

3.2.1 Glas

> *„Denn im ganzen Mittelalter war Glas ... unverhältnissmäßig teuer und noch bis ins 19. Jahrhundert galten größerer und vor allem vollkommen klare und farblose Scheiben mit Recht als Luxus – wie es der biedere Apotheker in Goethes Hermann und Dorothea so treuherzig ausdrückt“ [86]*

Diese Textpassage unterstreicht die Beteiligung moderner Herstellungsprozesse am Siegeszug des Baustoffs Glas von der mittelalterlichen Glasbläserkunst zum heute allgegenwärtigen Float-Verfahren zur Herstellung planparalleler Oberflächen in einem industriellen Maßstab [87]. Im Hochbau wird heute hauptsächlich Kalk-Natronglas (Tabelle 4) eingesetzt [88]. In Tabelle 5 sind dessen wichtigste physikalische Eigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 4 Zusammensetzung von Kalk-Natronglas nach DIN EN 572-1 [89] [90]

Chemische Bestandteile		
Siliziumoxid (Sand)	SiO_2	69 – 74%
Bortrioxid	B_2O_3	-
Calciumoxid (Kalk)	CaO	5 – 12%
Natriumoxid (Soda)	Na_2O	12 – 16%
Kaliumoxid	K_2O	-
Aluminiumoxid	Al_2O_3	0 – 3%
Magnesiumoxid	MgO	0 – 6%
Sonstige		kleinere Mengen

Für die angestrebte Anwendung in einem Faltwerk werden die zulässigen Spannungen von unbehandeltem Flachglas nicht ausreichend sein. Gläser aus thermisch vorgespanntem Einscheibensicherheitsglas geben uns die höchste zulässige Spannung, sind aber vom Standpunkt der Reststandsicherheit im Überkopfbereich als kritisch zu bewerten. Die Möglichkeit, Gläser chemisch vorzuspannen, wird auf-

grund der hohen Kosten und den vorhandenen Größenbeschränkungen nicht betrachtet. Ein konstruktiv sinnvoller Ansatz ist Verbundsicherheitsglas aus teilvorgespanntem Glas [92].

Tabelle 5 Allgemeine Eigenschaften von Kalk-Natronglas nach DIN EN 572-1 aus [91]

Dichte	ρ	kg/m^3	2500
Härte	nach Mohs		6
E-Modul	E	N/mm^2	70000
Poissonzahl	ν	-	0,2 [1)]
Spezifische Wärmekapazität	c	J/(kg K)	720
Nominaler mittlerer thermischer Wärmeausdehnungskoeffizient (20 bis 300°C)	α_T	1/K	$9{,}0 \times 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(mK)	1

1) In der baupraktischen Anwendung und der Forschung werden häufig Werte zwischen 0,22 und 0,24 verwendet [90]

Während die Biegezugfestigkeit von Glas normativ geregelt ist (Tabelle 6), gibt es zur Druckfestigkeit von Glas noch keine einheitliche Festlegung. Für die Belange dieser Arbeit werden wir die zulässige Belastung über Bauteilversuche (siehe Kapitel 4.3.4) nachweisen. In [22] konnte auf anschauliche Weise die Drucktragfähigkeit von in der Ebene beanspruchten Glaselementen beobachtet werden. Bei planparalleler Lagerung wurden die Lasteinleitungsbacken des Versuchstandes plastisch verformt (Abb. 36).

Tabelle 6 Charakteristische Biegezugfestigkeiten ausgewählter Glaserzeugnisse [93]

Glaserzeugnis	f_k in N/mm^2	Norm
Floatglas	45	DIN EN 572-1
TVG	70	DIN EN 1863-1
Emailiertes TVG	45	DIN EN 1863-1
ESG aus Float	120	DIN EN 12150-1
Emailiertes ESG	75	DIN EN 12150-1

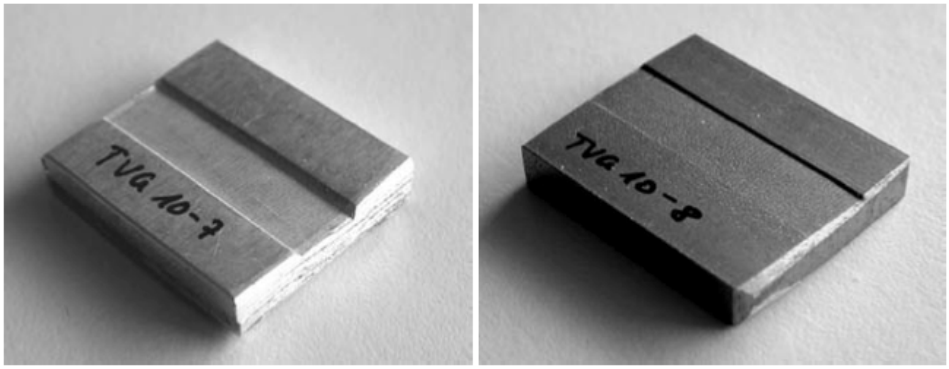


Abb. 36 Plastische Verformung der Lasteinleitungsbacken [22]. (li.) Aluminium, (re.) Stahl

Neben Kenntnis der mechanischen Eigenschaften ist für die Planung eines Tragwerks das Wissen um die maximalen Lieferteilgrößen von entscheidender Bedeutung. In Tabelle 7 sind die wichtigsten Bearbeitungsschritte und die zugehörigen Fertigungsmöglichkeiten zusammengefasst.

Tabelle 7 Grenzabmessungen Glasfertigung [120]

	Länge [m]	Breite [m]	Dicke [mm]
Zuschnitt	15.00	3.21	4-19
Kantenbearbeitung	15.00	3.30	4-80
Vorspannen (TVG)	15.00	3.21	6-12
Laminieren	17.00	4.50	-

3.2.2 Verbundfolie

Neben Silikon-, PU- oder Acryl-Klebstoffen nimmt die SentryGlas®-Folie der Firma Kuraray (vormals DuPont™) eine besondere Rolle ein. Obwohl es sich um eine Verbundglasfolie handelt, führt sie Wurm in [64] als eine Sonderform des Klebens an. Ursprünglich für den Einsatz in sturm- und einbruchsicherer Verglasung entwickelt [104], liegt der jüngere Focus auf den hervorragenden Verbundeigenschaften zu Metall [63], worauf sich die Wahl für die vorliegende Arbeit begründet.

Auch wenn in [64] von einer „harten“ Verklebung gesprochen wird, ist es wichtig zu beachten, dass SentryGlas® als Ionomer ein Thermoplast ist und wie PVB viskoelastisches Materialverhalten aufweist. Steifigkeiten und Querdehnzahl ändern sich in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsdauer (Tabelle 8 bis 10) [103]. Der Umstand, dass SentryGlas® um ein Vielfaches steifer als PVB ist, soll nicht über noch notwendige Forschungen hinwegtäuschen. Für einen Einsatz als

Lasteinleitung [63] müssen durch weiterführende Versuche eine zulässige Schubspannung unter Dauerlast sowie ein Grenzschubmodul gefunden werden. Anzustrebende Versuchsreihen sollten alternative Verbundmaterialien (Polylam, Ködistrukt, EVA SAFE) einbeziehen. Die in Kapitel 4 folgenden Bauteilversuche erlauben keinen Rückschluss auf das Langzeitverhalten der Verbundfolie.

Tabelle 8 Elastizitätsmodul [N/mm²] SentryGlas® Plus [103]

E	Belastungsdauer						
Temp.	1 Sek.	3 Sek.	1 Min.	1 Std.	1 Tag	1 Mo.	10 J
10°C	692	681	651	597	553	499	448
20°C	628	612	567	493	428	330	256
24°C	581	561	505	416	327	217	129
30°C	442	413	324	178	148	34,7	15,9
40°C	228	187	91,6	27,8	13,6	9,86	8,84
50°C	108	78,8	33,8	12,6	8,45	6,54	6
60°C	35,3	24,5	10,9	5,10	3,87	3,24	2,91
70°C	11,3	8,78	5,64	2,52	1,77	1,44	1,35
80°C	4,65	3,96	2,49	0,96	0,75	0,63	0,54

Tabelle 9 Schubmodul [N/mm²] SentryGlas® Plus [103]

G	Belastungsdauer						
Temp.	1 Sek.	3 Sek.	1 Min.	1 Std.	1 Tag	1 Mo.	10 J
10°C	240	236	225	206	190	171	153
20°C	217	211	195	169	146	112	86,6
24°C	200	193	173	142	111	73,2	43,3
30°C	151	141	110	59,9	49,7	11,6	5,31
40°C	77	63	30,7	9,28	4,54	3,29	2,95
50°C	36,2	26,4	11,3	4,20	2,82	2,18	2
60°C	11,8	8,18	3,64	1,70	1,29	1,08	0,97
70°C	3,77	2,93	1,88	0,84	0,59	0,48	**0,45**
80°C	1,55	1.32	0,83	0,32	0,25	0,21	0,18

Tabelle 10 Querdehnzahl [-] SentryGlas® Plus [103]

ν	Belastungsdauer						
Temp.	1 Sek.	3 Sek.	1 Min.	1 Std.	1 Tag	1 Mo.	10 J
10°C	0,442	0,443	0,446	0,450	0,454	0,458	0,463
20°C	0,448	0,449	0,453	0,459	0,464	0,473	0,479
24°C	0,452	0,453	0,458	0,465	0,473	0,482	0,489
30°C	0,463	0,466	0,473	0,485	0,488	0,497	0,499
40°C	0,481	0,484	0,492	0,498	0,499	0,499	0,499
50°C	0,491	0,493	0,497	0,499	0,499	0,500	0,500
60°C	0,497	0,498	0,499	0,500	0,500	0,500	0,500
70°C	0,499	0,499	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
80°C	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500

Zur Veranschaulichung der Vorteile von SGP gegenüber PVB werden die wichtigsten physikalischen und mechanischen Eigenschaften in Tabelle 11 vergleichend nebenangestellt. Da wir es bei beiden Materialien mit zeit- und temperaturabhängigen Eigenschaften zu tun haben, wollen wir den Schubmodul von PVB genauer vorstellen (Tabelle 12). Es ist gemeinhin bekannt, dass bei der Berechnung von Verbundsicherheitsgläsern aus PVB nur in Ausnahmefällen bzw. bei kurzer Beanspruchungsdauer ein Schubverbund angesetzt werden darf. Auch kann bei PVB-Folien ab der Glasübergangstemperatur von 20-30°C nicht von konstanten Materialeigenschaften ausgegangen werden [101].

Tabelle 11 Physikalische und mechanische Eigenschaften

	ρ	f_u	ε_u	α_T	E	ν
	g/cm³	N/mm²	%	10^{-4}/K	N/mm²	-
SGP [104]	0,95 [1)]	34,5 [2)]	400 [3)]	1,0 – 1,5 [4)]	300 [5)]	-
PVB [107]	1,07 [6)]	> 23 [7)]	> 280 [8)]	2,2 [9)]	-	-
					G	
PVB [108] [10)]	1,07	≥ 20	≥ 300	0,8	0 - 4	≈ 0,50

1) ASTM D792, 2) nach ASTM D638, 3) ASTM D638, 4) ASTM D696, 5) ASTM D5026, 6) DIN 53479, 7) u. 8) DIN EN ISO 527, 10) Typische Werte für PVB-Folien

Im Vergleich dazu bieten Ionomer-Folien (SentryGlas®) bis zu einer Temperatur von 50°C höhere und relativ konstante mechanische Eigenschaften [101]. Der für PVB zulässige Ansatz eines Schubmoduls von 0,4 N/mm² bei kurzer Lasteinwirkungsdauer [102] ist mit SentryGlas® bis zu einer Temperatur von 70°C und einer Belastungsdauer von 10 Jahren möglich.

Zur genauen Beschreibung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften reicht die Bezeichnung „PVB-Folie“ ohne Angabe des Fabrikats ohnehin nicht aus. So hat Sackmann zwar im Versuch bei allen PVB-Folien ein linear viskoelastisches Verhalten festgestellt, die Schubmoduln hingegen unterschieden sich betragsmäßig in Bereichen um das Zwei- bis Dreifache [110].

Tabelle 12 Schubmodul (>0,05 N/mm2) für PVB nach [109]

G_{ZTV}	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	30°C	40°C	55°C	70°C
1 s	21,9	21,8	19,0	9,12	4,06	0,75	0,44	0,31	0,21
3 s	21,9	21,6	16,1	5,82	1,95	0,59	**0,40**	0,28	0,17
5 s	21,9	21,4	14,6	4,70	1,53	0,53	0,38	0,26	0,17
10 s	21,9	20,9	12,4	3,12	1,19	0,47	0,36	0,24	0,13
60 s	21,8	17,8	6,20	1,23	0,64	0,40	0,30	0,18	0,07
1 h	19,3	5,,06	0,83	0,44	0,38	0,27	0,17	0,06	
3 h	16,5	2,63	0,62	0,40	0,34	0,24	0,13		
10 h	12,9	1,40	0,49	0,36	0,30	0,20	0,09		
1 T	9,56	0,99	0,44	0,34	0,28	0,16	0,07		
3 T	6,07	0,67	0,40	0,30	0,25	0,13			
1 Wo.	4,19	0,57	0,37	0,28	0,22	0,10			
1 Mo.	1,75	0,46	0,33	0,24	0,17	0,07			
2 Mo.	1,30	0,43	0,31	0,21	0,14				
4 Mo.	0,97	0,40	0,29	0,18	0,12				
6 Mo.	0,82	0,38	0,28	0,17	0,10				

3.2.3 Einlaminierteile

Da mit SentryGlas® zur Anbindung der metallischen Fügeelemente eine steife Verklebung zum Einsatz kommt [94], erscheint zur Vermeidung von Zwangsbeanspruchungen aus Temperatur die Verwendung eines Materials mit ähnlichem Ausdehnungskoeffizienten wie dem von Glas sinnvoll. Mit einem Wärmeausdeh-

nungskoeffizienten von $8{,}7 \times 10^{-6}$ (vgl. Tabelle 5 für Glas) stellt deshalb gerade Titan (Tabelle 13) ein für den Glasbau interessantes Konstruktionsmaterial dar [95]. Ob der Einsatz dieses teuren Werkstoffes tatsächlich zweckmäßig ist, muss noch im Detail untersucht werden (nicht zuletzt mit Blick auf den Ausdehnungskoeffizienten der Verbundfolie selbst). Alternativ könnten galvanisierter Stahl [95] oder die Materialvorschläge von Puller [96] (1.4301, Domex 700 MC D) und Carvalho [72] (1.4301, AISI 304) zur Anwendung kommen. So werden etwa für das Forum Mittelrhein in Koblenz (Abb. 37) Fassadengläser mit Formaten bis zu 3x5m über einlaminierte Edelstahlbleche an die Unterkonstruktion fixiert (Abb. 38).

Tabelle 13 Chemische Zusammensetzung aus [98]

Bezeichnung gemäß				Massenanteile in %						
ASTM	VdTÜV	DIN		Fe	O	N	C	H	Al	V
Grade 1	Ti1	3.7025	min.	-	-	-	-	-	-	-
			max.	0,15	0,12	0,05	0,06	0,013	-	-
Grade 2	Ti2	3.7035	min.	-	-	-	-	-	-	-
			max.	0,20	0,18	0,05	0,06	0,013	-	-

Abb. 37 Forum Mittelrhein Koblenz [118]

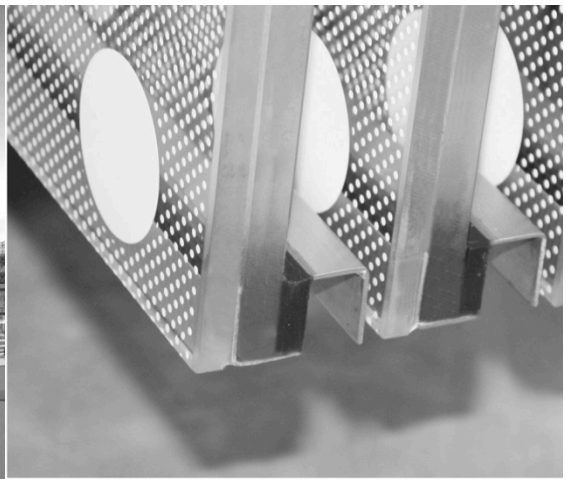


Abb. 38 Anbindungsdetail aus [118]

Obwohl für die Versuchsreihe dieser Arbeit auf den Werkstoff 1.4301 zurückgegriffen wird, wollen wir auf einige materialspezifische Besonderheiten eingehen, die mit einer Verwendung von Titan einhergehen. So sind speziell die Titansorten RT12 (grade 1) und RT15 (grade 2) für den Prozess des Kaltumformens geeignet, während höherfeste Sorten nur bedingt einsetzbar sind [97]. Dies liegt in der che-

mischen Zusammensetzung des Materials begründet. Je geringer der Anteil an Begleitelementen, desto umformungsfreudiger ist der vorliegende Werkstoff [99]. Die empfohlenen Biegeradien beim Kaltumformen von Titanblech können DIN 9003-3 [100] entnommen werden (Abb. 39). Diese sollten bei der Planung der Konstruktion Beachtung finden. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften ausgewählter Metalle sind in Tabelle 14 und 15 zusammengefasst. Das erforderliche Halbzeug zur Fertigung der Kantteile wäre für die geplanten Blechdicken mit einer Länge von bis zu 10m als kaltgewalztes Blech oder Coil lieferbar [98]. Zur besseren Handhabung wäre bei Verwendung entsprechender Betriebsmittel zur Lagesicherung während des Laminierens ein Unterteilen der Blechteile anzustreben.

Grade	s [mm]	r [mm]
1	1.50	4.00
2	1.50	6.00

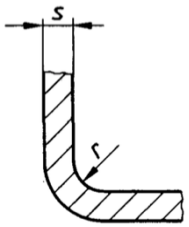


Abb. 39 Empfohlene Umkantradien gemäß DIN 9003-3

Tabelle 14 Physikalische Eigenschaften aus [98]

	ρ	c	α_T	λ	E	G
	g/cm³	bei 20°C	20-200°C	bei 20°C	bei 20°C	bei 20°C
		J/(kg K)	10^{-6}/K	W/(m K)	kN/mm²	kN/mm²
Grade 1	4,50	520	8,70	22,6	105	38
Grade 2	4,50	520	8,70	22,6	105	38
1.4301	7,90	500	16,00	15,0	200	77

Tabelle 15 Mechanisch-technologische Eigenschaften aus [98]

	Dehngrenzen N/mm²		Zugfestigkeit N/mm²	
	$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$	R_m	
	min.	min.	min.	max.
Grade 1	180	200	290	410
Grade 2	250	270	390	540
1.4301	230	260	540	750

3.2.4 Injektionsmörtel

Der Formschluss der Glaselemente wird entlang der Verbindungskanten durch Verguss mit Hilti HIT-HY 70 [111] hergestellt. Der Mörtel geht keine Verbindung mit Glas ein und überträgt dementsprechend ausschließlich Druckkräfte. Im Falle von Zugkräften kommt es zur klaffenden Fuge zwischen den Kontaktmaterialien. Durch die hohe Fließfreudigkeit des Materials füllt es kleinste Spalten, gleicht Unebenheiten aus und stellt einen gleichmäßigen Lasttransfer ohne Spannungsspitzen sicher (siehe Abb. 40).

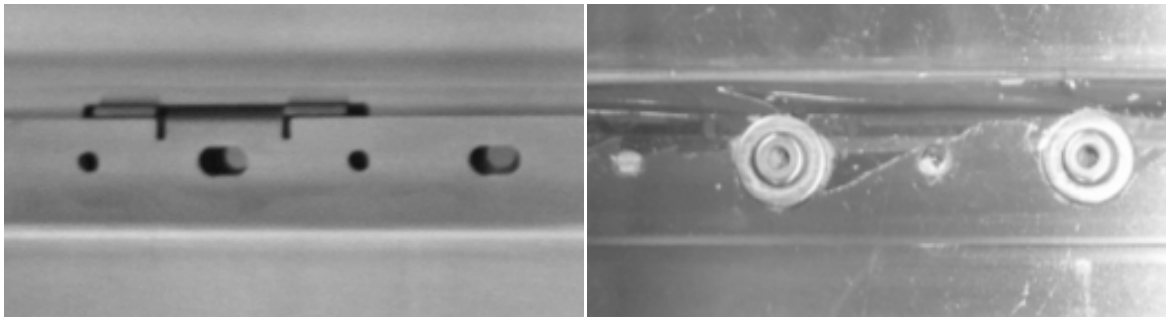


Abb. 40 Verbindungsdetail vor (li.) und nach dem Verguss (re.)

Von einer chemischen Verträglichkeit mit den Kunststofffolien der Zwischenschicht kann ausgegangen werden [111] (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16 Eigenschaften Vergussmörtel gemäß [111]

Technische Daten	Hilti HIT-HY 70
Anwendungs-Temperaturbereich	-40°C bis 120°C
Montage-Temperaturbereich	-5°C bis 40°C
Aushärtezeit	45 Min. bei 20°C
Mörtel-Druckfestigkeit	Max. 65 N/mm², Bemessungswert 31 N/mm²
Elastizitätsmodul	1750 N/mm²
Therm. Ausdehnungskoeffizient	0,0034% / °C
	UV-Licht: OK
	Temperatur bis 120°C
Mörtelbeständigkeiten	Wasser: keine Auswirkung auf Mörtel-Druckfestigkeit
	Reinigungstenside: beständig
Verträglichkeiten	Keine Effekte auf PVD- und EPDM-Folien sowie Silikone

3.2.5 Dichtfuge

Im Detail TU-Wien wird die Dichtebene durch eine Silikonfuge hergestellt (Abb. 33). Für eine reine Dichtfuge könnte niedrigmoduliges DC791 Verwendung finden. Zusätzlich zur Funktion als Wetterfuge kann man sich vorstellen, die Fuge aus 2K-Silikon zum Lastabtrag mit heranzuziehen. Da die erwartete Traglaststeigerung als gering bewertet wird, wurde in den Versuchen auf eine Silikonfuge gänzlich verzichtet. Mögliche Materialien für eine SG-Verklebung wären beispielsweise DC993, Sikasil-SG500® (siehe Tabelle 17) oder Sikasil-SG550®.

Tabelle 17 Eigenschaften von Sikasil®-SG500 [112]

Dichte (Mischdichte)	kg/l	~ 1,37	CQP 006-4
Härte	Shore A	~ 40	ISO 868
Zugfestigkeit	N/mm²	~ 2,2	ISO 37
Reissdehnung	%	~ 300	ISO 37
Weiterreisswiderstand	N/mm	~ 6	ISO 34
Spannung bei 100% Dehnung	N/mm²	~ 1,1	ISO 37
Spannung bei 12,5% Dehnung	N/mm²	~ 0,3	ISO 37
Zulässige Bewegungsaufnahme	%	± 12,5	ASTM C 719

4 Versuche

Der folgende Abschnitt widmet sich den experimentellen Betrachtungen für die unter Kapitel 3.1.3 vorgestellte lineare Fügung. Das Tragverhalten wird getrennt nach den Belastungsmoden gemäß Tabelle 18 untersucht. Grundgedanke dieser Vorgehensweise ist die Annahme, dass jedem Mode eine Versagensart zuordenbar ist. So kann Versagen unter Druckbelastung durch Glasbruch und bei Zugbelastung durch Fließen der einlaminierten Verbindungselemente charakterisiert sein. Kenntnis der kritischen Komponenten sowie der Belastungsgrenzen je Mode informiert eine sinnvolle Modellbildung der in Kapitel 5.1 folgenden Numerik.

Tabelle 18 Prüfkörper und Auswertungsziel

Bezeichnung (Mode)	Belastung	Anzahl Prüfkörper [stk]		Auswertungsziel
		20°C	60°C	
M	Moment	5	6	Versagensart/last und k_φ
T	Schub	6	4	Versagensart/last und k_x
Z	Zug	6	4	Versagensart/last und k_t
D	Druck	6	4	Versagensart/last und k_c
V	Querkraft	6	-	Versagensart/last und k_v

Die Probekörper werden bei Raum- und erhöhter Betriebstemperatur (60°) belastet. Letztere soll einer Bauteilerwärmung in der späteren Einbaulage Rechnung tragen. Alle Probekörper werden ausschließlich kurzzeitigen Lasten ausgesetzt. Das Verhalten der Verbindung unter Dauerlast oder Langzeiteffekte wie Kriechen werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

4.1 Aufgaben

Die Versuche dienen der Identifikation von versagenskritischen Komponenten entlang der Anbindung und der Validierung von numerischen Modellen. Darauf aufbauend können Interaktionsdiagramme (Abb. 41) entwickelt werden, die ein Bewerten der Verbindungsfuge auf Verbandsauflösung unter kombinierter Beanspruchung erlauben. Für Berechnungen an einem Globalmodell können aus den

gemessenen Last-Verschiebungsbeziehungen Verbindungssteifigkeiten abgeleitet und Aussagen über die Belastungsgrenzen je Belastungsart (Mode) gemacht werden. Für die Beantwortung von Fragen zur Leistungsfähigkeit der Anbindung und eines entsprechenden Tragsystems sind die Versuche von zentraler Bedeutung.

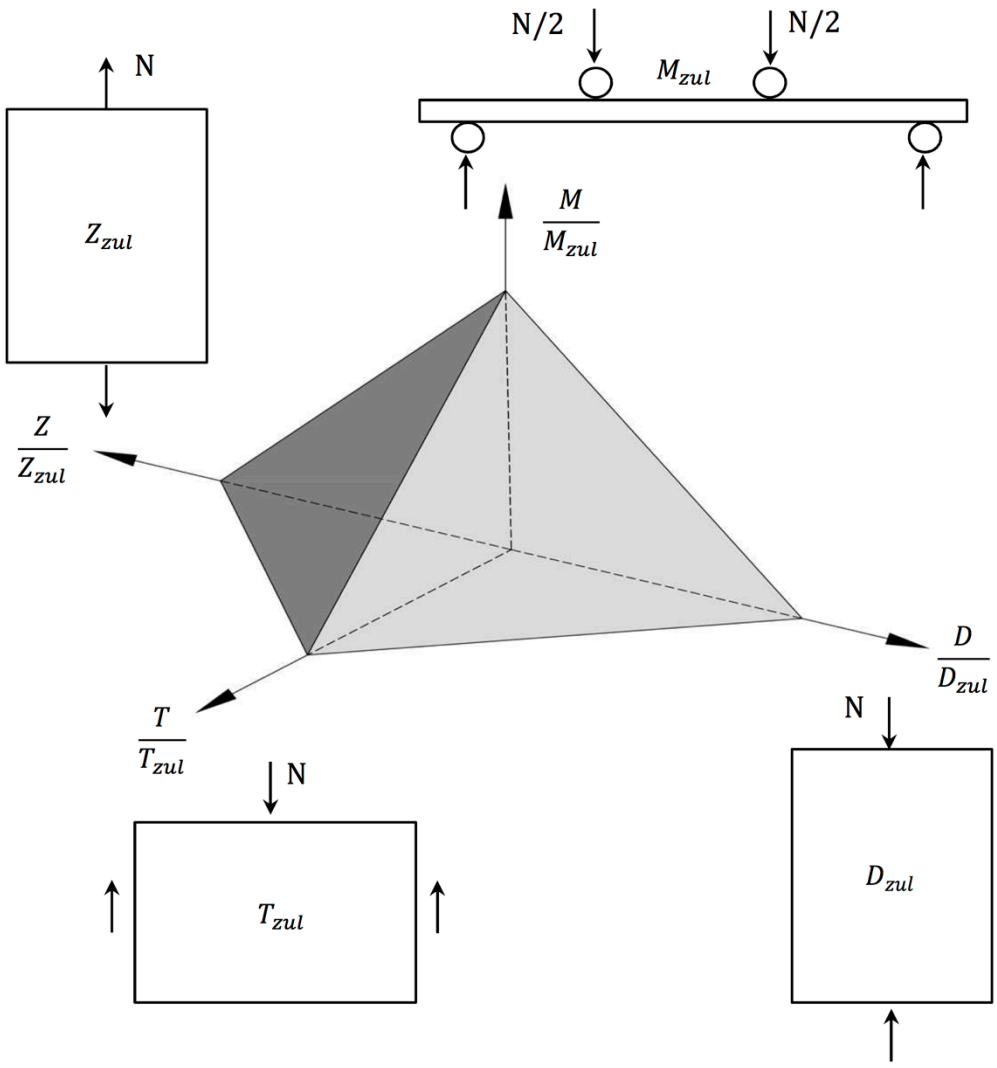


Abb. 41 Schematisches Interaktionsdiagramm

4.2 Probekörper

Zur Beurteilung der Momententragfähigkeit wird auf den klassischen Vierpunktbiegezugversuch (Abb. 42) zurückgegriffen. Die Bestimmung der Schubtragfähigkeit erfolgt an Probekörpern gemäß Abb. 43, Zug- und Drucktragfähigkeit werden über Versuchsaufbauten entsprechend Abb. 45 untersucht. Das Grundelement aller Probekörper ist ein Laminat der Größe 350x350mm. Dementsprechend besteht der 4-PBV aus zwei, alle weiteren Versuche aus einem dieser Grundelemente. Die

Größenangaben beziehen sich auf die Glasfläche und lassen überstehende Einlaminierteile unberücksichtigt. Letztere werden (mit Ausnahme der Probekörper in Abb. 42) um Frästeile aus Stahl ergänzt, die der Lasteinleitung dienen.

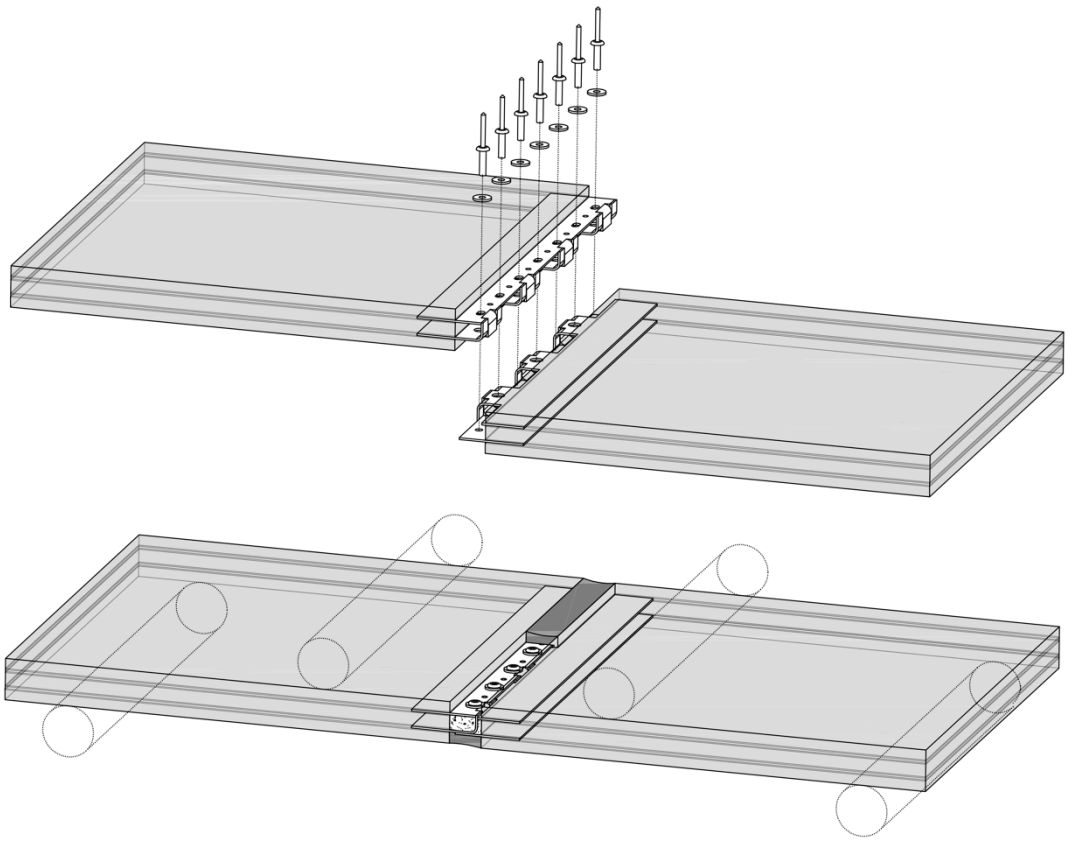


Abb. 42 Probekörper zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit

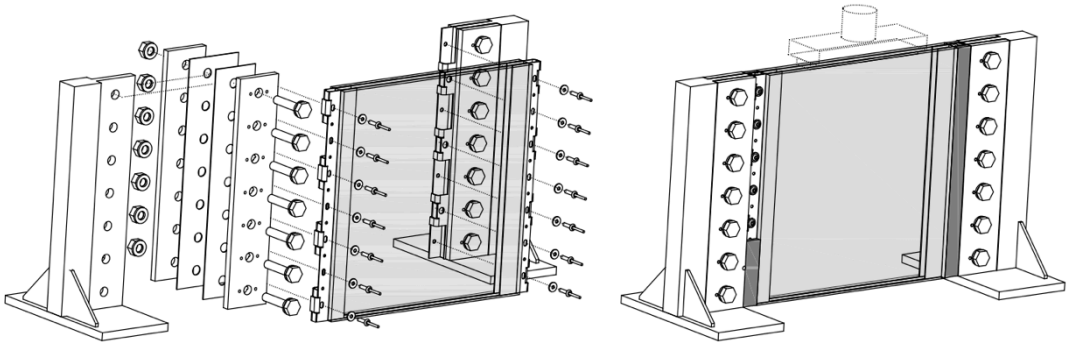


Abb. 43 Probekörper zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit

Dem Formschluss zwischen Lasteinleitungskonstruktion und Probekörper wird besondere Beachtung geschenkt. Um störenden Verbindungsschlupf an dieser Stelle zu vermeiden, werden die Verbindungsmittel der Lasteinleitung durch Verguss

als SLP-Verbindungen ausgeführt (Abb. 44). Von dieser Regelung ausgenommen sind die Ringschrauben an den Probekörperenden (die Ringschrauben sind in Abb. 45 nicht dargestellt).

Abb. 44 Schraubenverguss an der Lasteinleitung

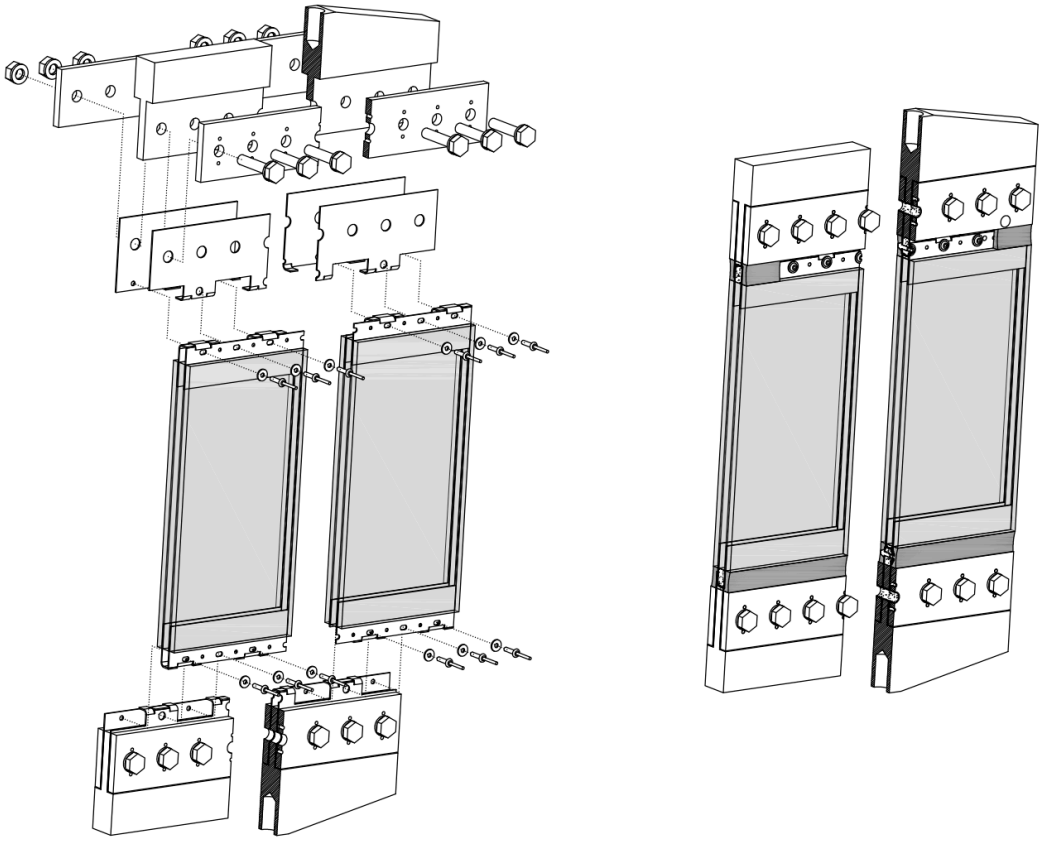


Abb. 45 Probekörper zur Ermittlung der Druck- und Zugtragfähigkeit

Weitere Details zum Versuchsaufbau und der Durchführung folgen im Abschnitt 4.3. Alle Probekörper werden ohne die dargestellte Silikonfuge ausgeführt (vgl. Kapitel 3.2.5). Detaillierte Beschreibungen der Probekörper finden sich im Anhang A – Technische Zeichnungen.

4.3 Versuchsdurchführung

Alle Versuche werden in einer Prüfmaschine vom Fabrikat Zwick/Roell Z250 durchgeführt (Wegauflösung des Antriebs 0,2nm, Positionierwiederholgenauigkeit an der Traverse ±2µm). Die Lasteinleitungskonstruktion für die Versuche Z, D und T ist den Druckproben entsprechend vereinheitlicht, um die Frästeile für alle Probekörper verwendbar zu machen. Die erforderlichen Einzelteile werden für 6 Probekörper gefertigt. Diese Optimierungsmaßnahme macht ein Prüfen in Etappen gemäß Tabelle 19 erforderlich.

Tabelle 19 Prüfprogramm (Probekörper/Labortag dd.mm.2013)

Versuch (Σ)	Prüftemperatur 20°C + 60°C [stk/d]						
Datum	04.09.	12.09.	18.09.	20.09.	24.09	01.10.	11.10.
M (11)	5 + 6	-	-	-	-		-
T (10)	2 + 0	-	-	2 + 0	2 + 4		-
Z (10)	1 + 0	5 + 1	0 + 3	-	-		-
D (10)	3 + 0	-	3 + 0	0 + 4	-		-
V (6)	-	-	-	-	-	6 + 0	-
Kalibrierversuche	-	-	-	-	-	-	6 + 0

Die Probekörper für erhöhte Betriebstemperatur (60°) konditioniert man 24 Stunden vor Testbeginn in einem Laborofen (Abb. 46 li.) auf die entsprechende Temperatur.

Abb. 46 Laborofen Binder ED 400 (li.) und Temperaturmessung während des Versuches (re.)

Auf Heizdecken wird verzichtet, die tatsächliche Prüftemperatur liegt daher ablaufbedingt mit ungefähr 55°C unter der Konditionierungstemperatur (Abb. 46). Die Probekörper unterteilt man in zwei Versuchsabläufe, ohne und mit Hysterese. Bei allen Proben wird die Belastung weggesteuert aufgebracht. Details der Versuchsabläufe getrennt nach Mode können Tabelle 20 entnommen werden.

Tabelle 20 Anzahl Probekörper und Prüfablauf

Mode	M R	M 60	T R	T 60	Z R	Z 60	D R	D 60
- [1)]	2	0	3	0	3	1	3	0
H [2)]	3	6	3	4	3	3	3	4
HG [3)]	1 kN	1 kN	50 kN	50 kN	5 kN	5 kN	10 kN	10 kN
HZ [4)]	6s	6s	6s	6s	5s	5s	6s	6s
mm/min	3	3	4	4	1	1	1	1

1) Proben mit stetiger Belastung 2) Hysterese 3) Grenzlast Hysterese 4) Haltezeit Wendepunkte
M...Moment, T...Schub, Z...Zug, D...Druck, R...Raumtemperatur, 60...erhöhte Betriebstemperatur

Tabelle 20 führt die von nun an verwendete Probenbenennung ein. M2 R verweist auf Biegeprobe zwei, geprüft bei Raumtemperatur. T4 60 H benennt Schubprobe vier, untersucht bei erhöhter Betriebstemperatur und in Hysterese. Nicht in der Tabelle angeführt sind die Versuche zur Belastbarkeit quer zur Fuge (Kapitel 4.3.5) und die Kontrollversuche zum Verhalten der Lasteinleitung (Kapitel 4.3.6). Details hierfür folgen an entsprechender Stelle.

4.3.1 Versuchsanordnung M

Die Versuche zur Momententragfähigkeit werden im unteren Prüfraum der Prüfmaschine durchgeführt (Abb. 47). Die Probekörpergröße ist mit 725 x 350mm gegeben. Der Abstand der Lagerrollen beträgt 625mm, jener der Lasteinleitungsrollen 225mm. Zu Beginn der Versuchsreihe werden 2 Probekörper stetig belastet (Abb. 55, M1 R und M2 R). Auf Basis dieser ersten Messungen legt man den oberen Wert der Hysterese-Schleife mit 1000N fest. Alle weiteren Probekörper werden mit jeweils 5 Belastungszyklen in Hysterese geprüft und im Anschluss an die Hysterese bis Versuchsende weiter belastet. Zwischen den Rollen und dem Probekörper sind 2mm dicke Silikonplatten angeordnet, um einen Glasbruch durch unplanmäßige Spannungsspitzen zu vermeiden. Zur Messung der Durchbiegung werden zusätzlich zur Abnahme an der Traverse Wegaufnehmer zentrisch unter der Verbindungsfuge und entlang der Längsachse an der Probekörperoberseite angeordnet (je 180 mm vom kurzen Ende, vgl. Abb. 47). Aufgrund der gewählten Lage

der Wegaufnehmer kann die Translation des Probekörpers infolge von Kompression der Beilagen an den Lagerrollen nicht direkt aus den Messwerten abgeleitet werden. Auswertung von Videomaterial zeigt eine gleichförmige Bewegung von Lasttraverse und Probekörper während des Versuches. Diese Messungenauigkeit ist im Vergleich zu den Bauteilverformungen klein und bleibt in weiterer Folge unberücksichtigt.

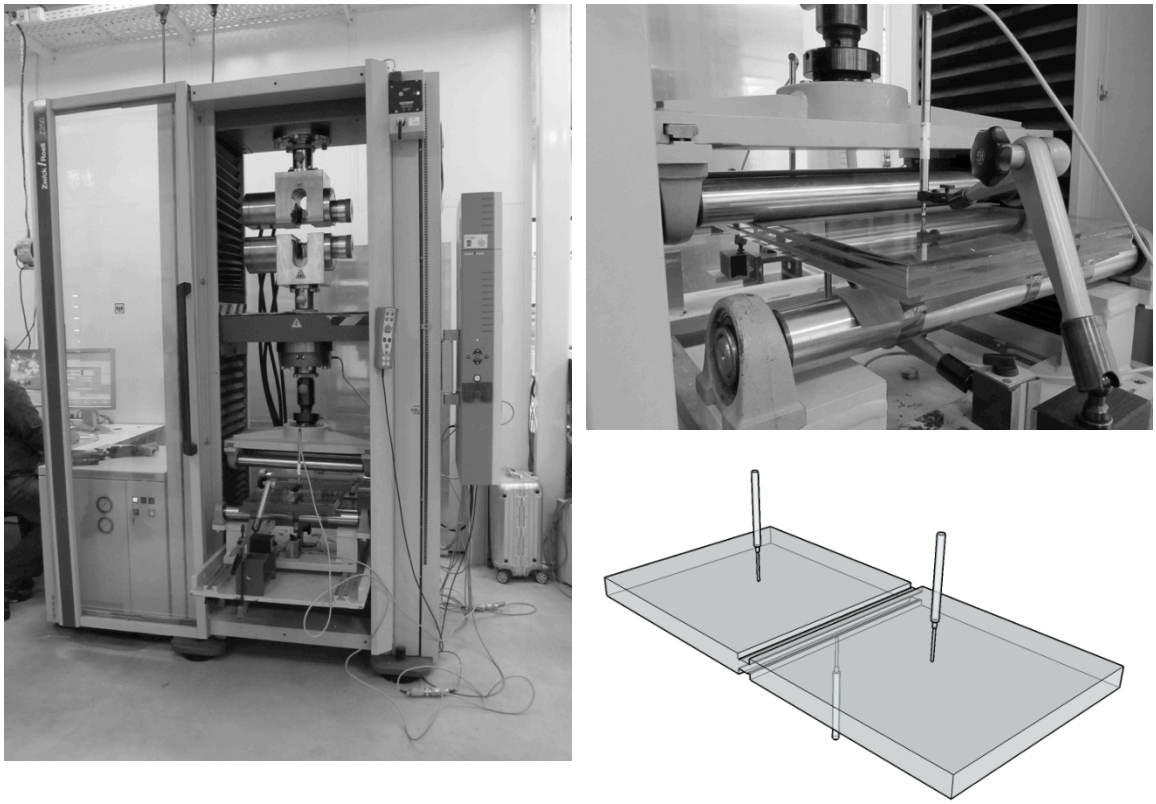


Abb. 47 Probekörper im unteren Prüfraum (li.), Detailaufnahme der Wegaufnehmer (re.)

4.3.2 Versuchsanordnung T

Die Versuche zur Schubtragfähigkeit werden im oberen Prüfraum der Prüfmaschine durchgeführt (Abb. 48 li.). Zur Lagerung des Probekörpers wird ein Stahlprofil über ein angeschweißtes Fahnenblech in der Prüfmaschine fixiert. An den Lagerpunkten der Probekörper sind Futterbleche beigelegt, um während des Versuches ausreichend Abstand zwischen Glas und Querträger sicherzustellen. Einhandzwingen verhindern ein seitliches Verrücken der Probekörper. Die Lasteinleitung erfolgt über ein T-Profil, das eine Trennlage aus Teflon und seitlichen Glasklötzen vom Laminat trennt (Abb. 48 re. oben). Durch Quetschung des Teflons (Abb. 62) und Verformung des Stahlträgers infolge von Biegung sind die Messergebnisse des Traversenwegnehmers nicht verwertbar. Zur Bestimmung des Lastverformungs-

verhaltens werden daher Wegaufnehmer an der Oberkante des Laminats und den Anbauteilen angebracht (Abb. 48 re.). Aus der Differenz der Messungen kann die entsprechende Verschiebung in der Fügekante ermittelt werden. Bei einer Probe sind die Futterbleche an den Auflagern nicht korrekt ausgebildet (vgl. Kapitel 4.4.2). Die mangelhafte Ausführung der Versuchsanordnung hat eine Exzentrizität zur Folge, welche bei einem Probekörper zu einer Verbandsauflösung führt (Abb. 49).

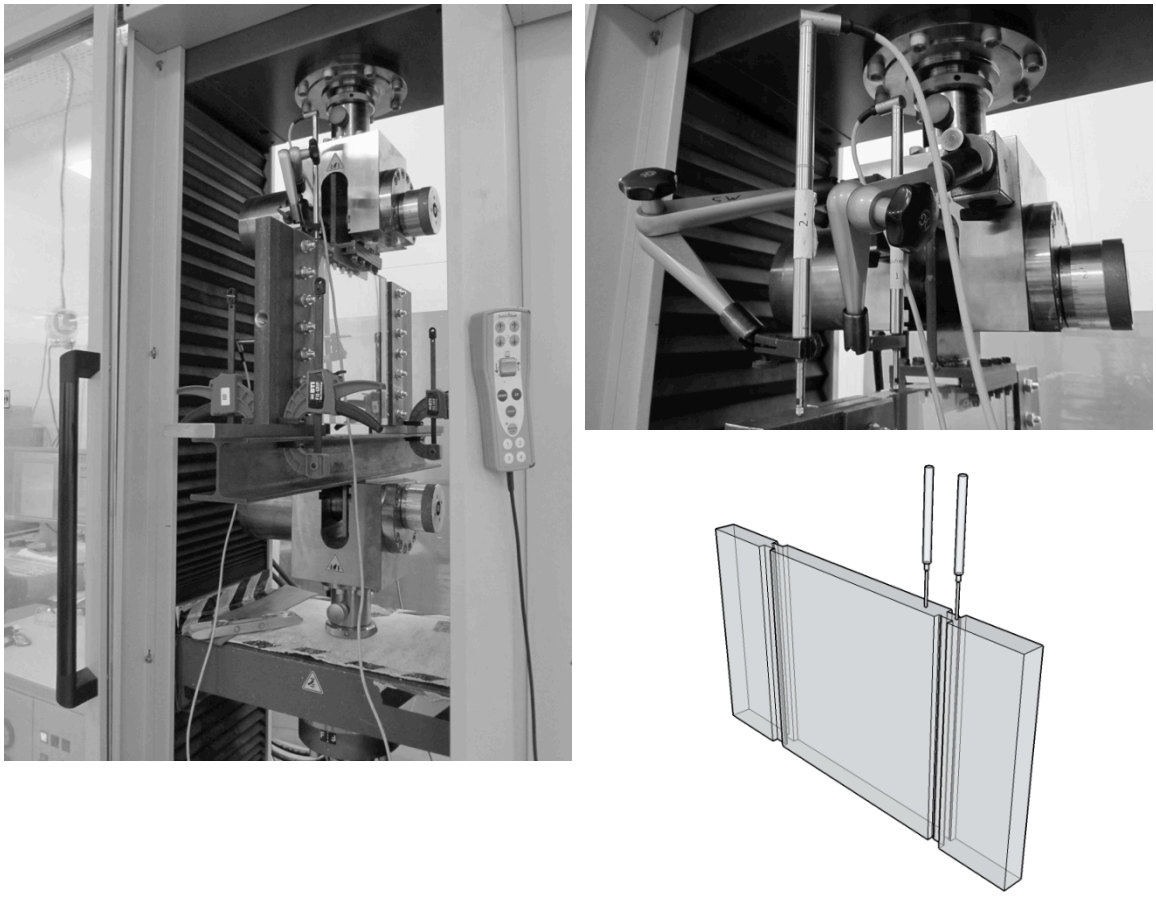


Abb. 48 Probekörper T im oberen Prüfraum (li.), Detailaufnahme zur Anordnung der Wegaufnehmer (re.)

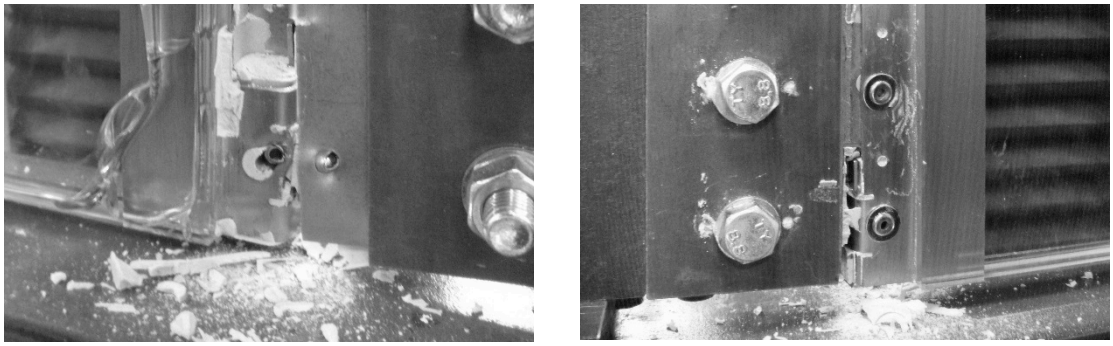


Abb. 49 Verbandsauflösung durch mangelhafte Lagerung beim Schubversuch

Das zusätzliche Moment wird über ein inneres Kräftepaar ausgeleitet. Erwartungsgemäß kommt es in der Zugzone zu einem Versagen entlang der Fügekante. Mit zunehmender Belastung kann ein Abscheren des Vergussmörtels gepaart mit einem Ausziehen der Verbindungsmittel beobachtet werden. Bei korrekter Lagerung kommt es zu keinem Versagen entlang der Verbindungsfuge.

4.3.3 Versuchsanordnung Z

Die Versuche Z werden im oberen Prüfraum der Maschine durchgeführt. Die Einleitung der Prüflasten erfolgt über zwei Gewindebohrungen M24 an den Frästeilen und passende Ringschrauben. Letztere sind über die hydraulische Spannvorrichtung der Prüfmaschine an den Ringflanken in Position gepresst (Abb. 50).

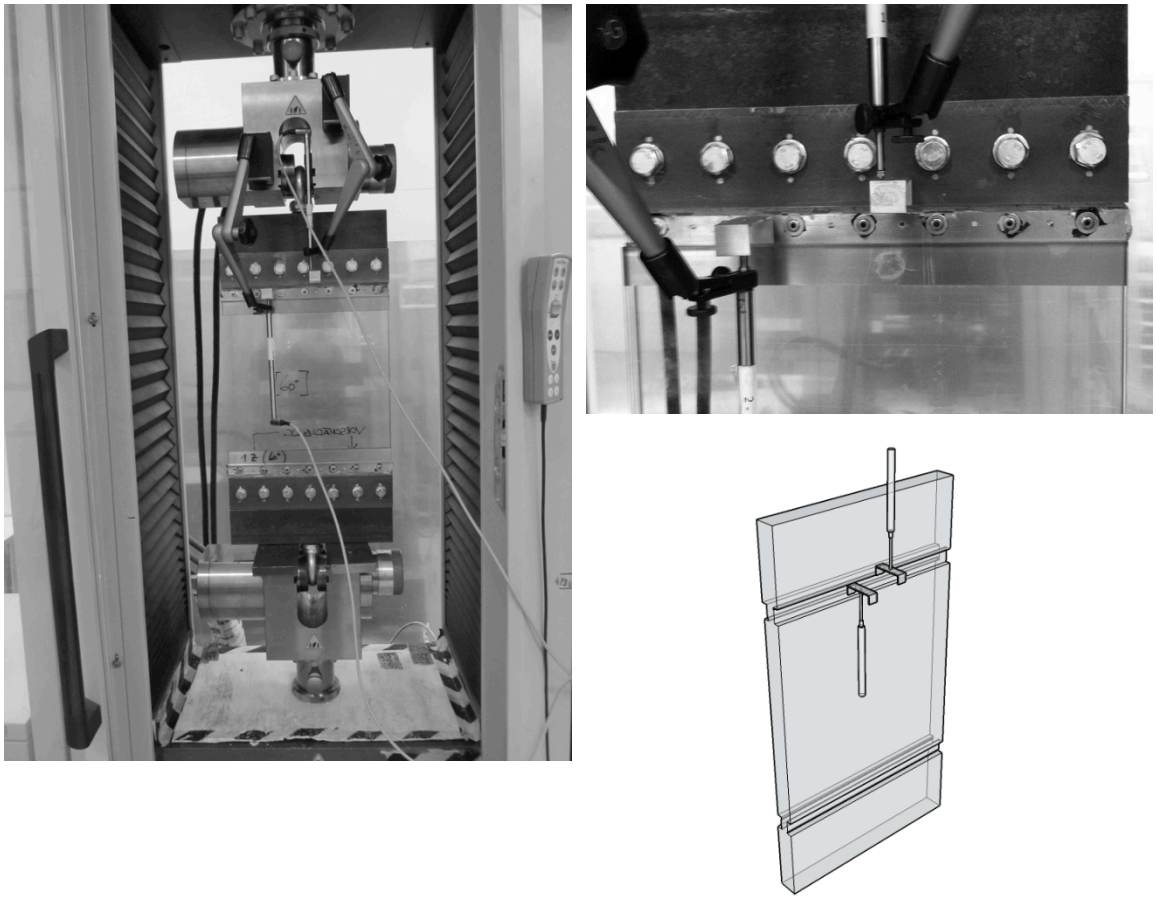


Abb. 50 Zugversuch im oberen Prüfraum (li.), Detailaufnahme zur Positionierung der Wegaufnehmer (re.)

Am Probekörper werden zwei Wegaufnehmer angebracht, um die Verformung im Bereich der Fuge zu dokumentieren und die verbleibenden Effekte aus Verbindungsschlupf der Lasteinleitung zu kompensieren. Aufgezeichnet wird die Relativ-

verschiebung der Einlaminierteile über die Anbindung. Die Anordnung der zusätzlichen Wegnehmer lässt Verschiebungen aus der laminierten Anbindung unberücksichtigt. Versuchsaufbau und Messmittelanordnung haben Schwächen. Wie unter Kapitel 4.2 angemerkt, werden die Ringschrauben nicht vergossen, das Gewindespiel der Anbindung ist nicht behindert (vgl. Abb. 68, S.81). Die Ausführung der Anschlagpunkte für die Wegnehmer über angeklebte Aluminiumwinkel ist mit Blick auf die Kleinheit der gemessenen Verformungen ungünstig. Die Konstruktion zeichnet sich durch eine kleine Exzentrizität entlang der Fügekante aus. Beim Aufbringen einer Last kommt es zu einer Verdrehung der Lasteinleitungskonstruktion, welche über den Hebel der angeklebten Winkel vergrößert wird. Vorhandene fertigungsbedingte Winkelungenauigkeiten zwischen Probekörper und Lasteinleitung (Knicke) haben das Bestreben sich unter Zugbelastung auszurichten. Diese Drehbewegung wird über den Hebelarm potenziert und geht direkt in die Messung ein (vgl. Abb. 67). Die beschriebenen Effekte sind in der Auswertung der Daten, soweit möglich, entsprechend zu berücksichtigen. Zur besseren Beurteilung von Effekten, die der Einleitungskonstruktion zuzuschreiben sind, führen wir Kontrollversuche gemäß Kapitel 4.3.6 durch.

4.3.4 Versuchsanordnung D

Die Druckversuche werden analog zu den Zugversuchen durchgeführt. Alle unter Kapitel 4.3.3 getätigten Aussagen gelten sinngemäß mit folgenden Ergänzungen. Im Bereich der Lasteinleitung werden für diese Versuchsreihe Stahlbacken zum Lasteintrag auf Kontakt beigelegt (Abb. 51). Die Ringschrauben dienen lediglich der Fixierung des Probekörpers im unteren Lastbereich. Die Anordnung der Wegaufnehmer erfolgt analog zu den Zugversuchen. Auch dieser Versuchsaufbau ist gekennzeichnet durch die bereits erwähnten Schwächen. Anstelle des Rückstellens des Knickes beobachten wir hier ein Eindrehen der Lasteinleitung unter Druck.

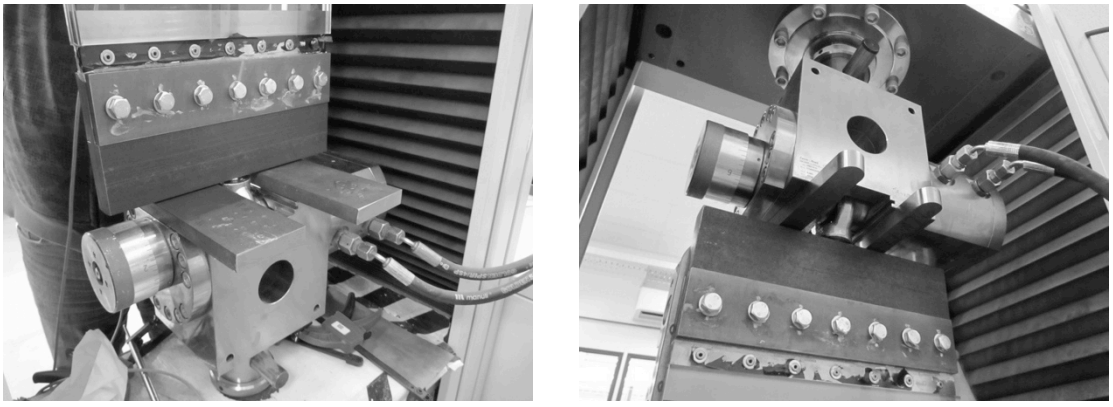


Abb. 51 Kontaktbacken für die Druckversuche

Die Aufzeichnung des Traversenwegnehmers ist die Summe aus Stauchung der Fuge und Drehbewegung der Lasteinleitung. Da die Drehbewegung nicht explizit aufgezeichnet wird, kann hier kein verlässlicher Korrekturwert ermittelt werden. Im Falle der Wegaufnehmer kommt es beim Eindrehen zu einem Verkleinerungseffekt, der direkt in die Messung eingeht. Die Messmittelwahl der zusätzlichen Wegaufnehmern (HBM, WA50 80 mV/V) kann aufgrund der Kleinheit der Messwerte keine gesicherten Daten liefern.

4.3.5 Versuchsanordnung V

Bei Betrachtung der Druckversuche stellt sich die Frage nach dem Verbindungsverhalten unter einer flächennormalen Belastungskomponente wie sie bei Faltwerken auftritt. Zur Überprüfung der Belastbarkeit werden 6 Probekörper im unteren Prüfraum der Maschine analog zu den 4-PBV mit Last beaufschlagt. Belastet wird von beiden Seiten des Verbindungsdetails, jeweils mit 3 Proben. Die Hysteresegrenze ist mit 10kN festgelegt. Die Belastungsrollen haben ihren Angriffspunkt 60mm von den Lagerrollen entfernt. Zusätzlich zur Aufzeichnung an der Traverse werden zwei Wegaufnehmer angeordnet: ein Wegnehmer in der Verbindungsfuge und ein zweiter an der Oberseite des Probekörpers am Lagerpunkt.

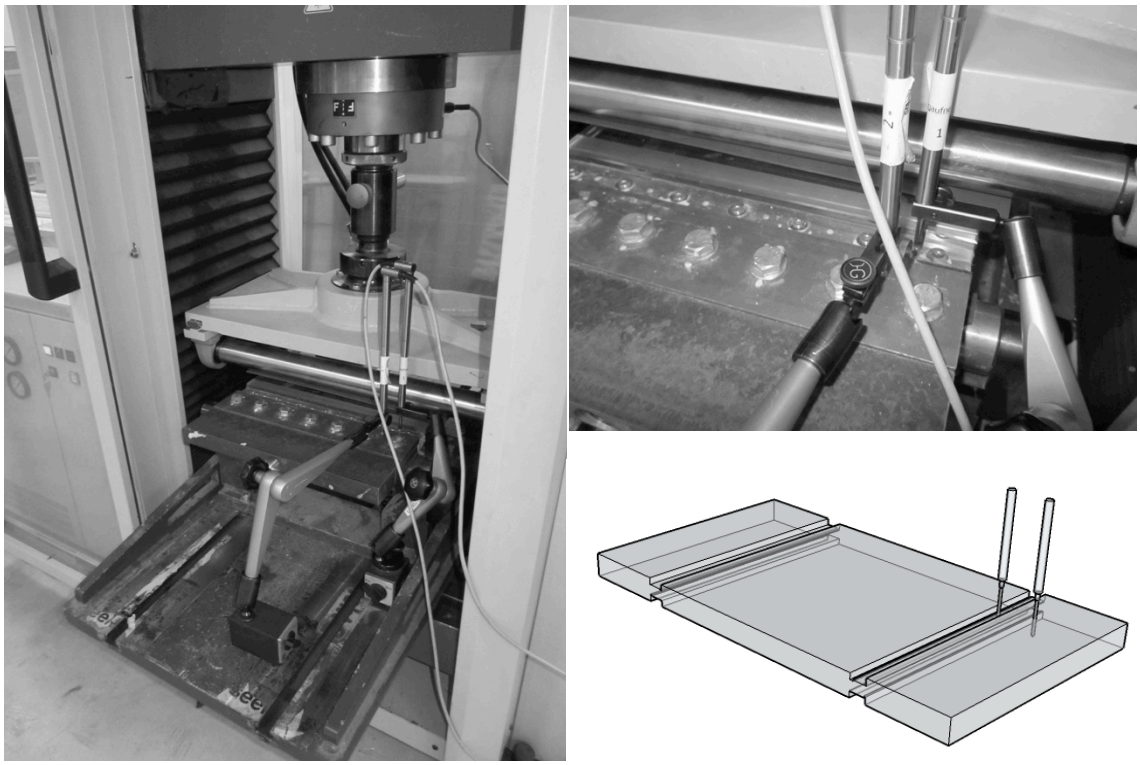


Abb. 52 Versuch Q im Prüfraum unten (li.) und Detail Wegnehmer (re.)

Bei Probe V6 R H kommt es zu einem teilweisen Aufreiten der Verbindungsmittel der Lasteinleitung an den Lagerrollen.

4.3.6 Versuchsanordnung Kontrollversuche Z und D

Aufgrund der unter Kapitel 4.3.3 und 4.3.4 besprochenen anordnungsbedingten Einflüsse werden zusätzliche Versuche ausgeführt. Die Prüfanordnung erfolgt in Analogie zu den Zug und Druckproben. Aufgabe ist es, die Einflüsse der Schnittstelle Prüfmaschine und Probekörper und ihre Auswirkung auf die Messergebnisse besser zu verstehen. Aufgezeichnet wird ausschließlich mit dem Traversenwegaufnehmer der Prüfmaschine.

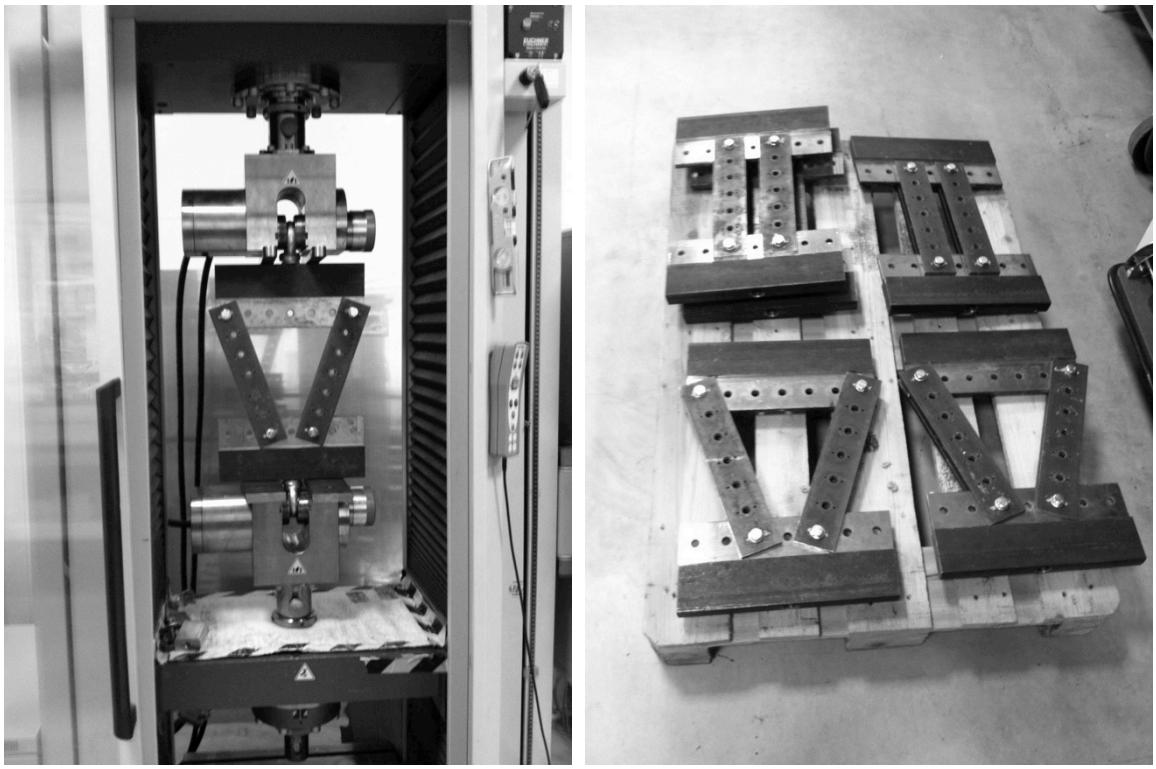


Abb. 53 Kalibrierversuch D (li.), vorbereitete Probekörper Z (o. im Bild re.)

4.3.7 Versuche Anzugskraft Nieten

Wie sich bei den FEM-Analysen herausstellt, ist die Nietenvorspannung (Abb. 54) ein zu berücksichtigender Lastfall bei der Bewertung des Verbindungsdetails. Für den verwendeten Nietentyp und den entsprechenden Klemmbereich mißt und dokumentiert die Industrie die Anzugskräfte. Gemessen werden die Setzkurven über ein Nietwerkzeug, das mit einer entsprechenden Auswertungseinheit ausgestattet ist [136].

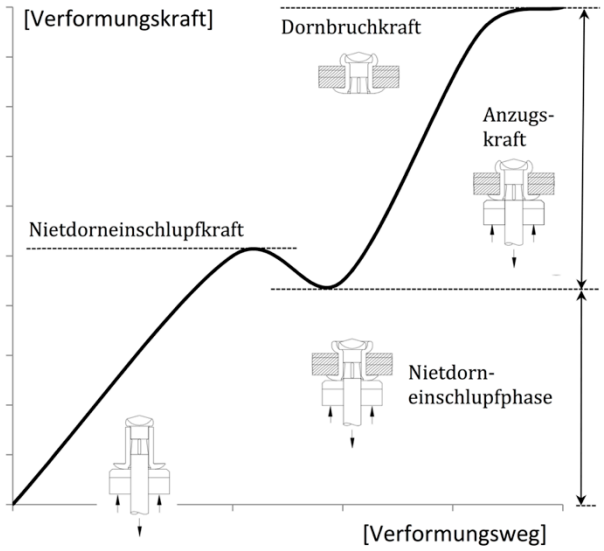


Abb. 54 Setzkurve einer Niete [137]

4.4 Versuchsauswertung

4.4.1 Auswertung M

In Abb. 55 sind die Messwerte des Traversenwegnehmers für die Versuche M ausgewertet. Die maximale Prüflast liegt bei 4000-4500N bei Raum- bzw. bei 3500-4000N bei erhöhter Betriebstemperatur. Eine vergrößerte Darstellung der Auswertung ist in Anhang B zu finden. Man erkennt bei beiden Prüftemperaturen bei etwa 500N das Einschlupfverhalten des Kugelkopfes (Abb. 47 re.) an der Lasteinleitungstraverse (Abb. 56). Werden alternativ dazu die zusätzlichen angebrachten

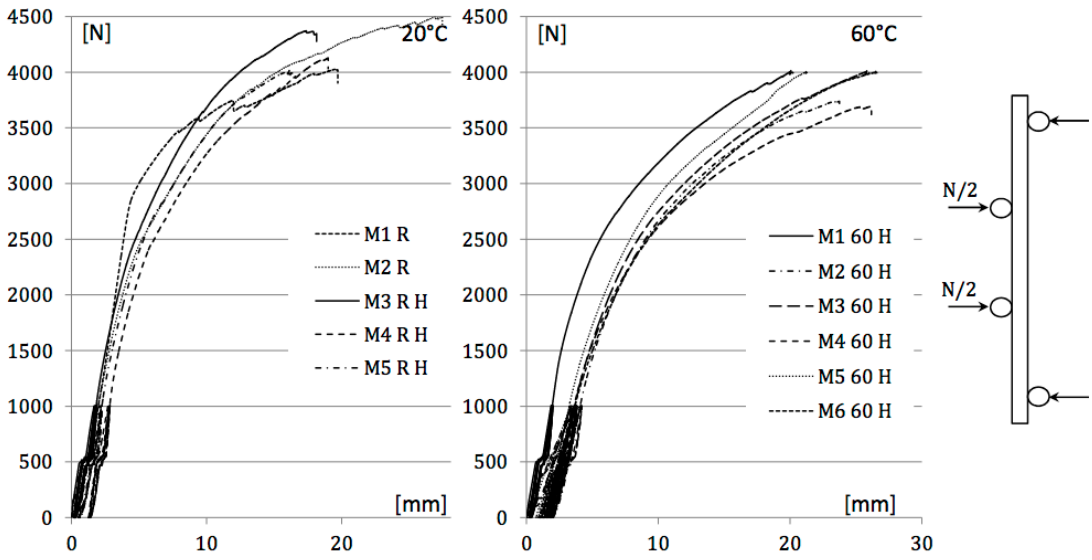


Abb. 55 Auswertung des Traversenwegnehmers für die Versuche M

Wegaufnehmer betrachtet, zeigt sich ein nahezu lineares Verhalten zwischen Verschiebung und Last bis zu einer Kraft von 2000N (Abb. 57 und Abb. 58). Die Auswertung der Proben M3 R, M4 R und M5 R zeigt ein Problem mit der Aufzeichnung des mittig angeordneten Wegnehmers (Abb. 57, fehlende Aufzeichnung links vom Ursprung). Durch Auswertung von Videomaterial kann die Ursache des Messfehlers auf mangelhafte Magnet-Messstative zurückgeführt werden. Durch Anwendung des Strahlensatzes kann von den Werten der Glasoberseite (Abb. 57, rechts vom Ursprung) auf die fehlenden Werte geschlossen werden. Die so ermittelten Werte sind in Tabelle 21 kursiv dargestellt.

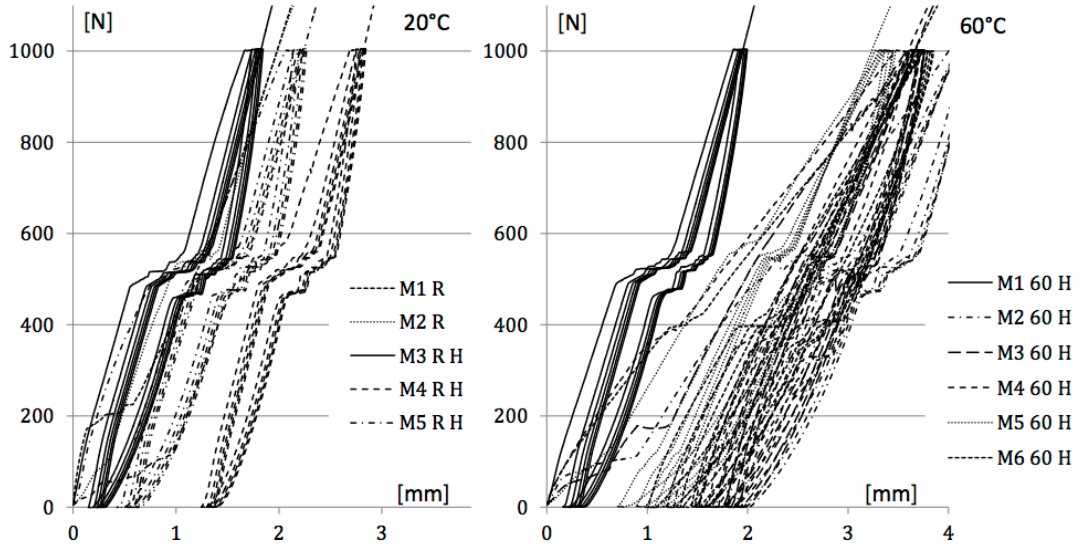


Abb. 56 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch M

Die seitliche Verschiebung der Hysterese-Schleifen ist auf die Positionsungenauigkeiten der Lasttraverse vor Prüfungsbeginn zurückzuführen. Eine unzureichende Positionierung der Traverse ist nicht kritisch, da sich diese mit der Erstbelastung entlang des Probekörpers ausrichtet. Bei den Versuchen 60°, bei denen schnelles Handeln zur Reduzierung übermäßigen Abkühlens angeraten war, kann eine Zunahme der Abweichungen beobachtet werden (Abb. 56). Da die Hysterese-Schleifen über Kraftgrenzen gesteuert werden, kommt es nach dem anfänglichen Ausrichten der Lasteinleitung bei den späteren Belastungszyklen zu keinen weiteren Beeinträchtigungen der Messungen. Die erste Belastung ist eine Mischung aus Probekörperverformung und Traversenausrichtung. Die Messwerte des ersten Belastungszyklus sind daher nicht verwendbar, da letztere für uns nicht von Interesse ist. Wie eingangs erwähnt, zeigen die Aufzeichnungen der zusätzlichen Wegnehmer bis zu einer Last von 2000N ein relativ konstantes Verhalten. Die Messwerte bewegen sich in einem Streubereich von 3,8 – 6,0 mm bei einer Prüflast von 2000N (Tabelle 21). Diese Werte werden bei der Validierung von FE-Modellen

(Kapitel 5.1.7) und bei der Bestimmung von Verbindungssteifigkeiten (Kapitel 5.5.1) Verwendung finden. Wie man aus Tabelle 21 erkennt, sind die Proben unter erhöhter Betriebstemperatur in der Regel von einer größeren Verformung gekennzeichnet. Hiervon ausgenommen ist lediglich Probe M1 60 H. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bei der Probe zu einer unzulässigen Abkühlung gekommen ist. In Abb. 57 und Abb. 58 sind exemplarisch ausgewählte Werte der Auswertung dargestellt (vgl. Anhang B für die Auswertung der einzelnen Messnehmer).

Tabelle 21 Durchbiegung in Probenmitte (WN3, siehe Anhang B)

M1 R	M2 R	M3 R H	M4 R H	M5 R H	M1 60 H	M2 60 H	M3 60 H	M4 60 H	M5 60 H	M6 60 H
[mm] / 2kN Prüflast										
4	4	*4*	*3,8*	*4,6*	3,8	5,5	5,5	5,5	5,5	6

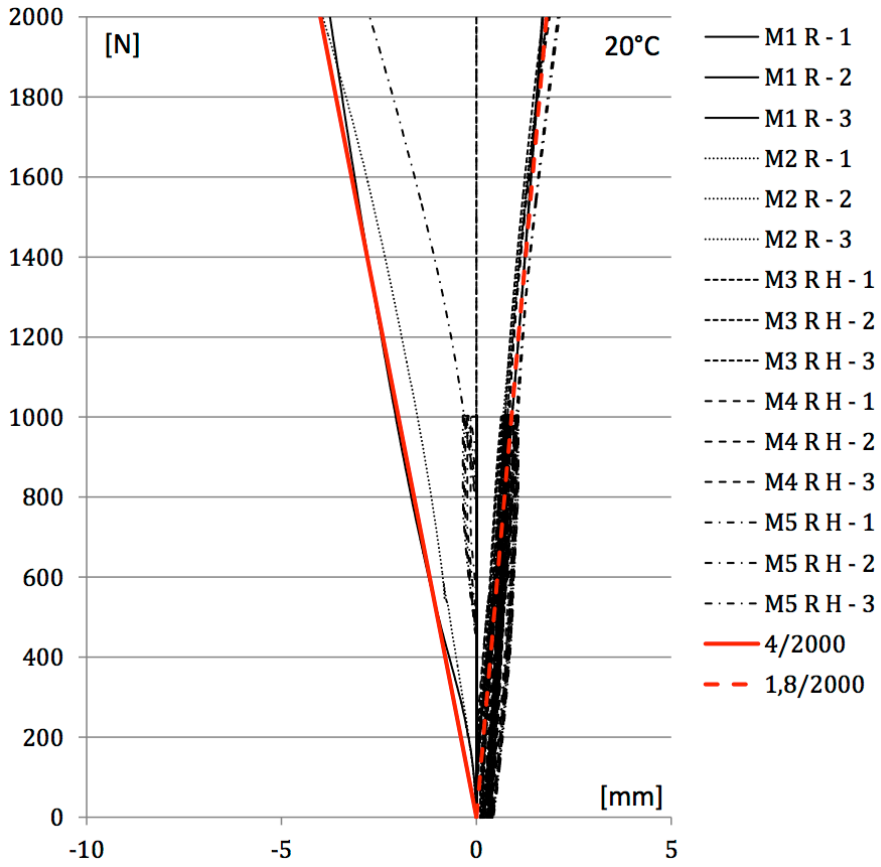


Abb. 57 Wegaufnehmer Versuche M bei Raumtemperatur

Bei allen Probekörpern wird der Versuch bei gezeigtem Lastniveau beendet. Bei keinem der Probekörper kommt es zum Glasbruch. Die metallischen Verbin-

dungsmittel verformen sich plastisch. Die Probekörper zeigen nach dem Versuch kein Aufweichen der Verbindungskante (kein beobachtbares Verbindungsspiel) und präsentieren sich in der Handhabung solide gefügt (Abb. 59). An der Klebefläche der Einlaminierteile kommt es zu keiner beobachtbaren Veränderung.

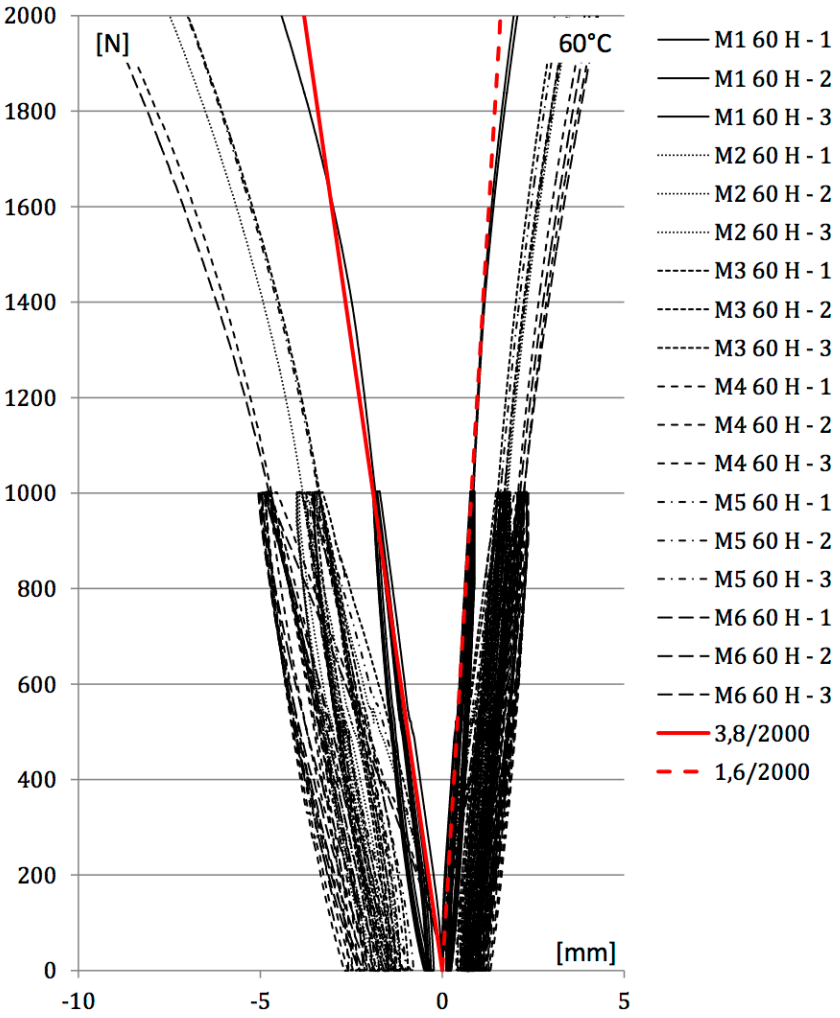


Abb. 58 Auswertung der Wegaufnehmer Versuche M bei 60°C Konditionierungstemperatur.

Abb. 59 Verformte Probekörper nach der Versuchsdurchführung

4.4.2 Auswertung T

Abb. 60 zeigt die Auswertung des Traversenwegaufnehmers für die Schubversuche. Die maximale Prüflast liegt bei 170-180kN bei Raum- und bei 150-165kN bei erhöhter Betriebstemperatur. Eine vergrößerte Darstellung von Abb. 60 ist in Anhang B zu finden. Die Messwerte bei 20°C sind nicht konsistent und machen ergänzende Erklärungen notwendig. T4 R ist gekennzeichnet durch ein horizontales Plateau bei 40000N, das durch eine unplanmäßige Lagerverschiebung an der oberen Einspannung verursacht wird. Das über Flankenpressung fixierte T-Profil zur Lastausleitung beginnt sich nach einem Überwinden der Reibkraft zu bewegen. Wie aus dem Diagramm zu erkennen, wird mit einer Verschiebung von 7-8mm eine stabile Lage erreicht. Das T-Profil stützt sich an der oberen Aufnahme ab, was zu einem Kraftschluss auf Kontakt führt und eine weitere Steigerung der Last ermöglicht. Im Diagramm nicht dargestellt ist die einmalige Vorbelastung des Probekörpers auf 40kN. Auch Probekörper T3 R H wird vor der gezeigten Belastungsgeschichte (5 Hystereseschleifen) bereits viermal auf 40kN belastet. Diese nicht dokumentierten Vorbelastungen liegen in der Fehlersuche begründet, welche schlussendlich die obere Einspannung identifiziert hat. Ein weiterer Messwert, der besprochen werden soll, ist T2 R. Wie unter Kapitel 4.3.2 beschrieben, wird an der oberen Lasteinleitung zwischen Laminat und T-Profil eine Trennlage aus Teflon eingelegt. Der bei T2 R verwendeten Trennlage werden beim Vorversuch (T1 R) bleibende Verformungen eingeprägt (Abb. 62 re.).

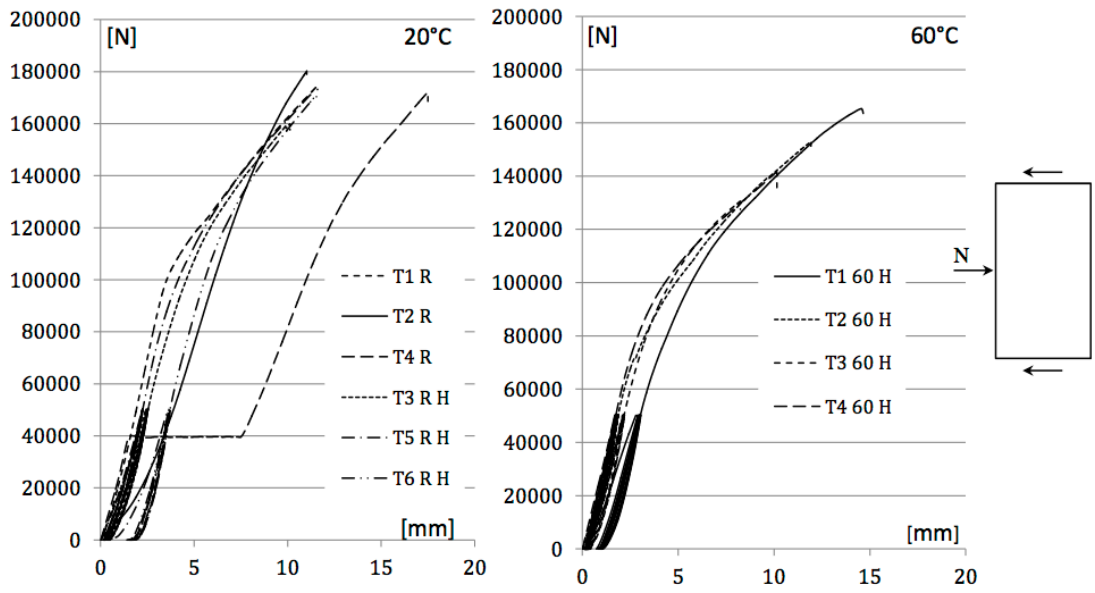


Abb. 60 Auswertung Traversenwegaufnehmer Schubversuch

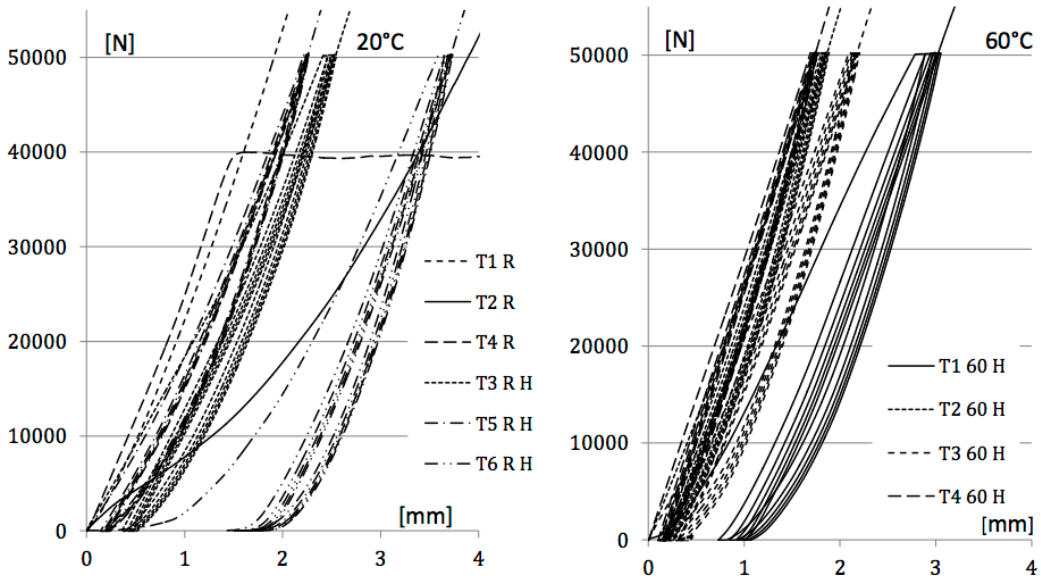


Abb. 61 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch T

Die eingeprägte Rillenstruktur muss beim nachfolgenden Versuch überdrückt werden, was sich bei Probe T2 R an der flacheren Neigung erkennbar macht (Abb. 61). Auf die maximale Prüflast der Probe hat dies keinen Einfluss. Für die weiteren Versuche wird die Beilage dünner gewählt, um dem Effekt entgegenzuwirken.

Abb. 62 Durch Delamination verursachter Glasbruch (li.), plastische Verformung der Teflonbeilage (re.)

Auch Probe T6 R H zeigt diesen Effekt. Aufgrund mangelhafter Verarbeitung kommt es bei Probe T3 R H zu einer handflächengroßen Delamination zwischen einem der Deckgläser und der SGP-Folie (Abb. 49 li.). Diese Delamination führt zum Bruch der Deckscheibe bei ca. 150kN. Der mangelhafte Verbund hat keine Auswirkung auf die Höhe der Traglast. Der Versuch wird bei 160kN abgebrochen. Bei T1 60 H kommt es zur Verbandsauflösung infolge unplanmäßiger Exzentrizität

(vgl. Kapitel 4.3.2 zur Lagerungsproblematik). Das Wandern der Hysterese-Schleifen bei T1 60 H ist auf Schlupf an der oberen Lasteinleitung zurückzuführen, die flachere Neigung vermutlich der Lagerung geschuldet. Der anfängliche Abfall der Verformung der Wegnehmermessungen in Abb. 63, wie bei Probe T5 R H zu sehen, ist einem der Messmitteln geschuldet. Einer der Wegnehmer hat im unteren Lastbereich keine Ergebnisse geliefert. Analog zu den Versuchen zur Momententragfähigkeit gelten die Aussagen zur Positioniergenauigkeit der Traverse. Aufgrund der Erstausrichtung der Lasteinleitung bzw. der Beilagen soll auch hier von einer Auswertung abgesehen werden. Weitere Beobachtungen an dieser Versuchsreihe zeigen eine vor Versuchsbeginn festgestellte Delaminationen im Bereich der Einlaminierteile bei Probe T3 60 H sowie eine Vorschädigung eines Deckglases bei Probe T4 60 H.

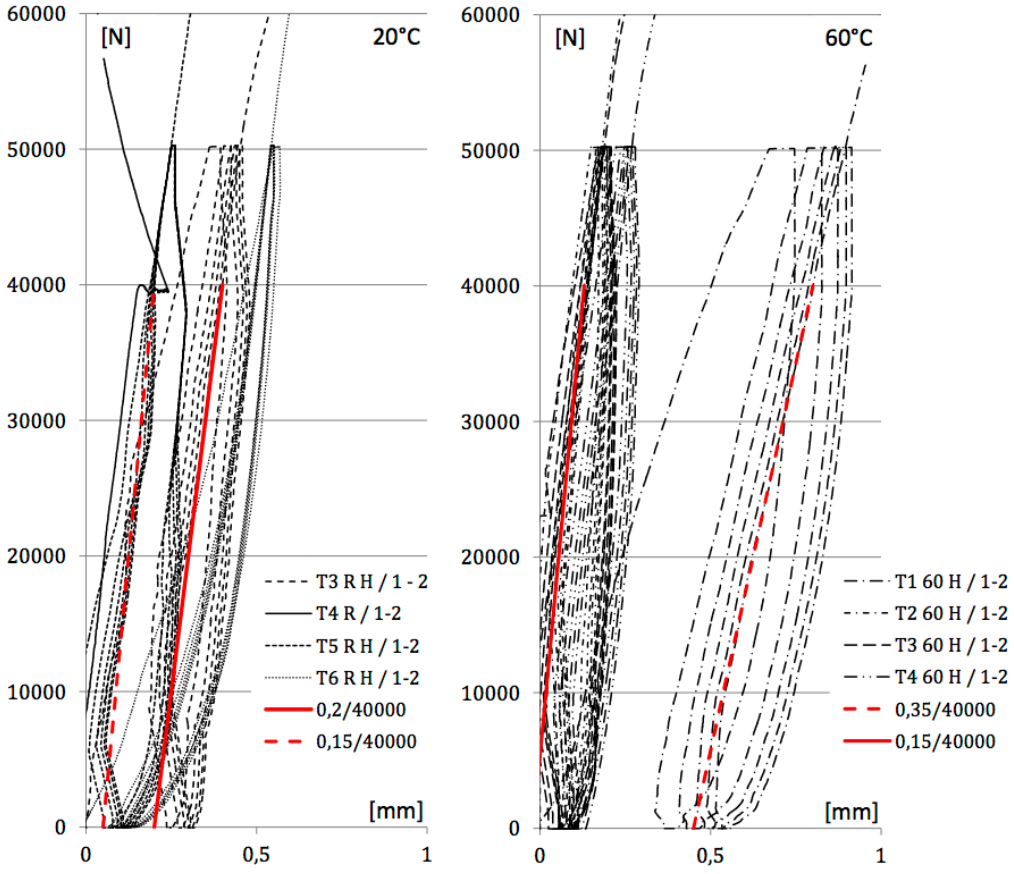


Abb. 63 Auswertung der Wegaufnehmer für den Schubversuch

Wie aus den Kraft-Verschiebungs-Diagrammen ersichtlich, hat dies keinen Einfluss auf die aufnehmbaren Lasten. Die Anordnung der Wegnehmer wird nach Probe T2 R der Beschreibung in Kapitel 4.3.2 angepasst. In Abb. 63 ist die Auswertung der Wegaufnehmer für Versuche T1 und 2 R daher nicht aufgeführt. In Tabelle 22 fin-

det sich die zahlenmäßigen Werte der einzelnen Probekörper. Die Auswertung ist in Anhang B zu finden. Interessanterweise unterscheiden sich die Ergebnisse bei Raumtemperatur nicht von denen bei erhöhter Betriebstemperatur, wie dies erwartet wäre.

Tabelle 22 Auswertung der Wegnehmer für den Schubversuch

T3 R H	T4 R	T5 R H	T6 R H	T1 60 H	T2 60 H	T3 60 H	T4 60 H
[mm] / 40kN Prüflast							
0,2	0,2	0,15	0,2	0,35	0,15	0,15	0,17

Bei keinem der Probekörper kommt es bei korrekter Fertigung und Versuchsanordnung zum Glasbruch. Auch bei den Schubversuchen sind Verformungen im Bereich der Einlaminierteile zu beobachten (Abb. 64 re.). An den Probekörperenden kommt es zu Abplatzungen überstehenden Vergussmaterials (Abb. 64 li.). Die Versuche werden bei den gezeigten Lastniveaus beendet.

Abb. 64 Lokale Abplatzungen des Vergussmörtels am Probekörperende (li.) und Verwerfungen der Blechteile im oberen Lastbereich (re.)

4.4.3 Auswertung Z

Abb. 65 zeigt die Auswertung des Traversenwegnehmers der Zugproben. Die maximale Prüflast liegt bei 40-45kN bei Raum- und 35-40kN bei erhöhter Betriebstemperatur. In Anhang B findet sich eine vergrößerte Darstellung von Abb. 65. Auffallend sind die der Hysterese folgenden Sprungstellen zwischen 0 und 5000N (Abb. 66). Wie bereits unter Kapitel 4.3.3 erwähnt, kann das Ausrichten des Probekörpers entlang der Achsen der Ringschrauben im vorhandenen Gewindespiel die Messwerte beeinflussen (Abb. 68). Einen größeren Einfluss haben aber die Fertigungstoleranzen (vgl. Kapitel 4.3.3) der Probekörper. Sie führen zu einer rückstellenden Drehbewegung, die von den Messmitteln aufgezeichnet wird (Abb. 67). Abhängig von der Größe der Imperfektion muss auch die von der Prüflast hervorgerufene Umlenk- oder Rückstellkraft variieren. Diese Verformungen sind im elastischen Bereich und können ein Folgen der Hystereseschleife befriedigend erklären (Abb. 66).

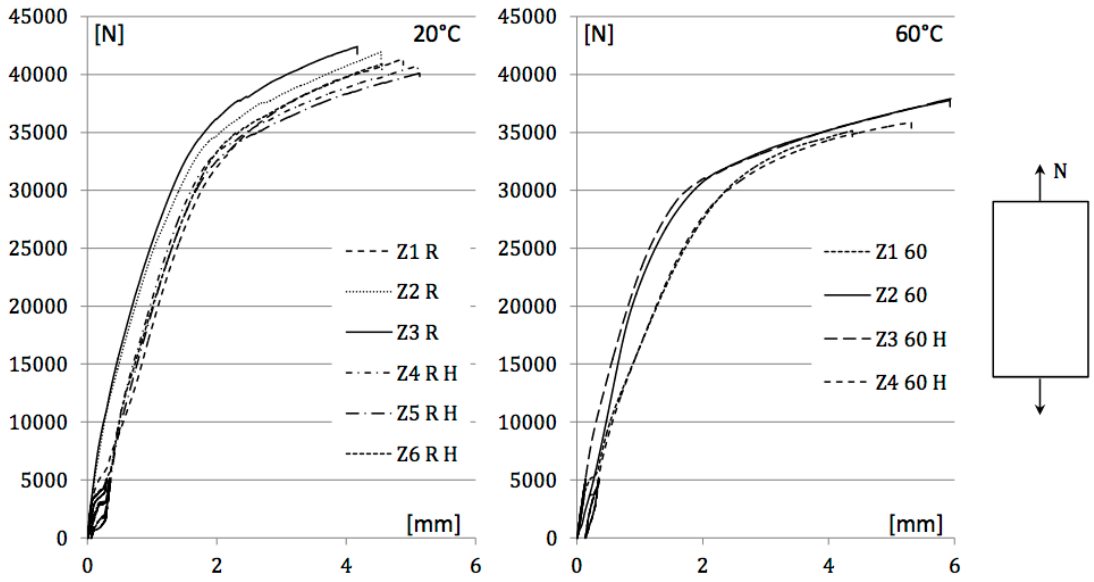


Abb. 65 Auswertung Traversenwegnehmer der Zugversuche

Probe Z1 R wird vor der Zugbelastung einmal auf Druck gefahren. Z1 60 und Z5 R H weisen lokale Vorschädigungen am Glas auf (entstanden beim Entfernen von überschüssigem Vergussmaterial). Bei den Proben Z5 R H und Z6 R H muss der Verguss lokal nachgebessert werden. Bei Proben Z2 60 und Z3 60 H gibt es Probleme mit den Einstellungen der Prüfmaschine, was eine Abkühlung der Prüfkörper auf 35°C zur Folge hat. Die Lage der Wegaufnehmer wird nach Versuch Z1 R gemäß den Erläuterungen abgeändert. Die Auswertung der Wegnehmer von Z1 R findet aus diesem Grund keinen Eingang in Abb. 69.

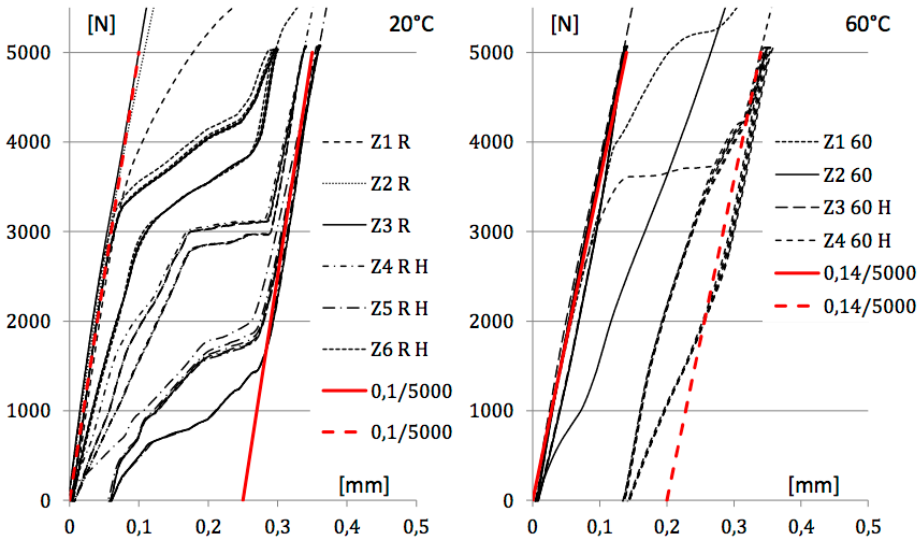


Abb. 66 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch Z

Wie in Kapitel 4.3.3 erwähnt, lässt die Position der Wegnehmer Verformungen in der Klebefuge unberücksichtigt. Hier lohnt ein Blick auf den Traversenwegnehmer (Abb. 66 li.). Die Verformung am Probekörper entspricht 0,10mm bei einer Last von 5000N (0,10mm am Probekörper ergibt 0,05mm für eine Fuge). Das entspricht in guter Übereinstimmung der oberen Schranke der Wegnehmer (Tabelle 23) und den Gesamtverformungen des FE-Modells für das halbe System (0,058mm). Bei erhöhter Betriebstemperatur steigt die gemessene Verformung von 0,10 auf 0,12mm (Abb. 66 re.).

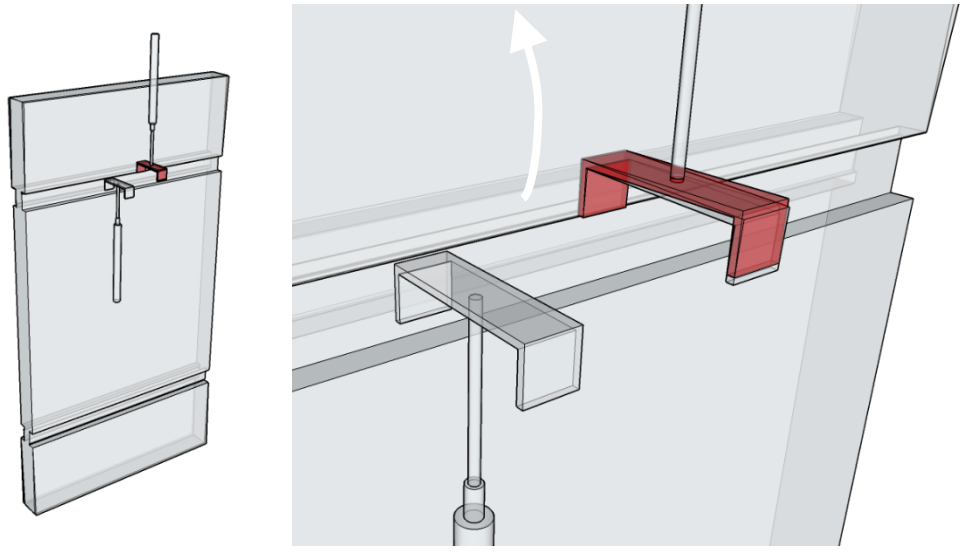


Abb. 67 Einfluss auf Wegnehmer durch Verdrehung der Lasteinleitung bei den Zugversuchen.

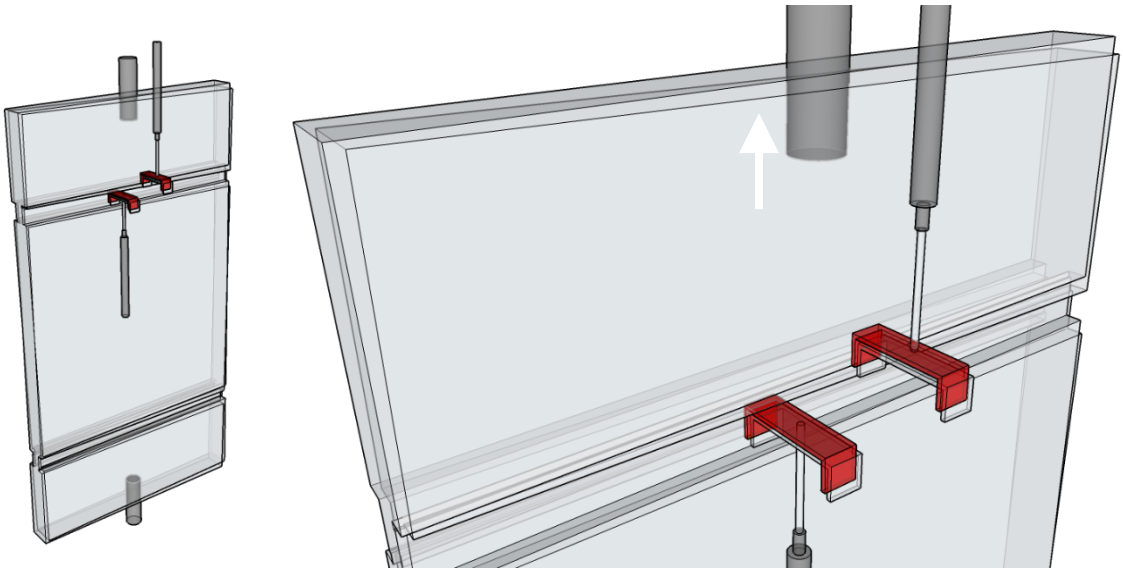


Abb. 68 Einfluss des Einschlupfens der Ringschrauben auf die Wegnehmer.

Auch in Abb. 69 sind die unter Kapitel 4.3.3 beschriebenen Einflüsse durch Ausrichten und Einschlupfen gut erkennbar (Abb. 67, Abb. 68). Die Auswertung der Wegnehmer ist in Tabelle 23 zusammengefasst und in Anhang B zu finden. Die Werte finden bedingt Verwendung in der noch folgenden Modell-Validierung der FE-Modelle. Durch fortdauernde Probleme mit den zusätzlichen Wegnehmern (siehe auch 4.4.2) sind die Messergebnisse nur bedingt verwertbar.

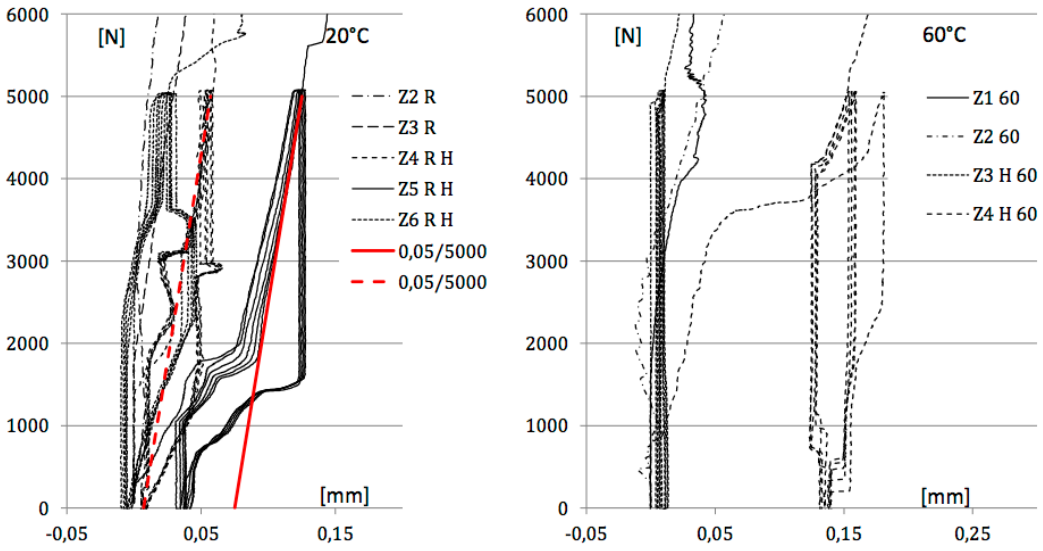


Abb. 69 Auswertung der Wegaufnehmer an den Zugproben

So liefert die Auswertung von Z3 60 und Z4 60 H keine brauchbaren Werte (Nullmessung). Auch die verbleibenden Werte sind aufgrund ihrer Kleinheit mit Hinblick auf die verwendeten Messmittel kritisch zu beurteilen. Wir wollen alle Messwerte kleiner 0,05mm als nicht bzw. nur bedingt brauchbar betrachten. Diese Auflösung ist mit den gewählten Messmitteln laut Hersteller (HBM, WA50 80 mV/V) nicht abbildbar. Die entsprechenden Messwerte setzten wir in Tabelle 23 daher in Klammer.

Tabelle 23 Dehnung der Anbindung (Anhang B)

Z2 R	Z3 R	Z4 R H	Z5 R H	Z6 R H	Z1 60	Z2 60	Z3 60 H	Z4 60 H
[mm] / 5kN Prüflast								
(0,01)	(0,03)	0,05	0,05	(0,02)	(0,04)	(0,04)	-	-

Bei keinem der Probekörper kommt es zum Glasbruch. Die Zugversuche zeigen im oberen Lastbereich ein stärkeres Abfallen der Steifigkeit als dies bei den Versuchen T zu beobachten ist und sind vom Verhalten her den Versuchen M nicht unähnlich (Abb. 65). Die Versuche werden bei gezeigten Lastniveaus beendet. Auch bei den Zugversuchen können die Einlaminierteile als die kritischen Komponenten betreffend Verbandsauflösung identifiziert werden.

4.4.4 Auswertung D

In Abb. 70 sehen wir die Aufzeichnungen des Traversenwegnehmers der Druckversuche. Die maximale Prüflast liegt bei beiden Temperaturniveaus bei 160-180kN. Eine Vergrößerung der Abbildung ist in Anhang B zu finden. Wie in Abb. 51 gezeigt, werden bei den Druckversuchen Kontaktbeilagen gesetzt, um eine optimale Einleitung der Kraft zu erlauben. Die Pressung der Fixierbacken wird bewusst reduziert, damit die Last über Kontakt abgetragen wird. Die Proben D6 R H, D2 60 H und D3 60 H zeigen das Kontakt-Fahren bei Erstbelastung am anschaulichsten (Abb. 71). D3 R fällt zwischen 100000N und 120000N stark ab. Diese Probe ist als Zugprobe montiert und wird durch ein Problem mit der Steuerung als Druckprobe gefahren. Aufgrund der fehlenden Kontaktbeilagen wird bei 100000N die Reibungskraft der Fixiereinheit überwunden und es kommt zu Schlupf in der oberen Aufnahme.

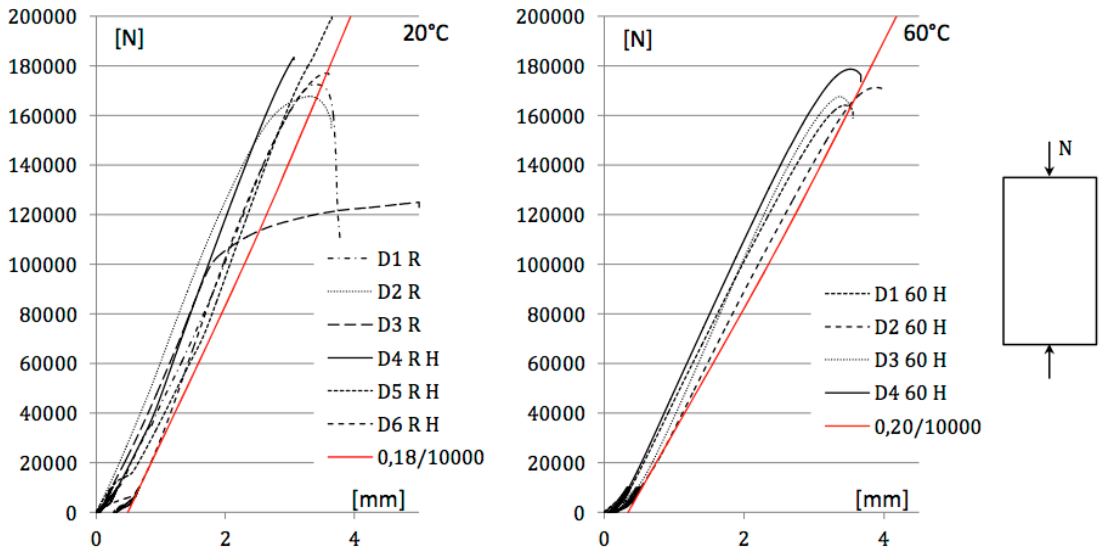


Abb. 70 Auswertung des Traversenwegaufnehmers für die Druckversuche

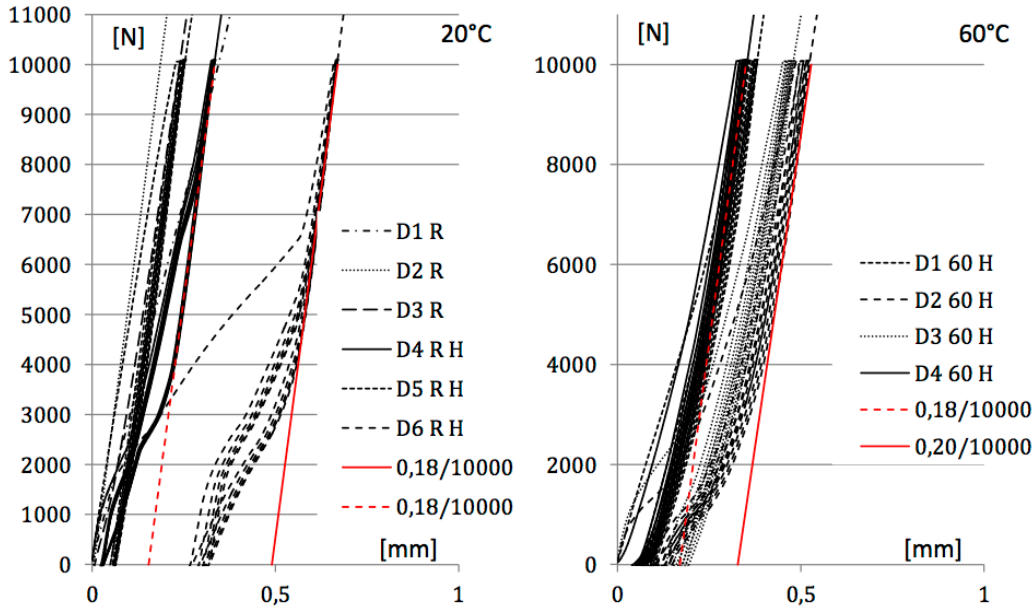


Abb. 71 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch D

Knicke im unteren Lastbereich, die der Hysterese-Schleife folgen, sind wie bei den Zugversuchen den Fertigungsimperfektionen der Probekörper zuzuschreiben. Bei fehlender Parallelität der angebauten Frästeile kommt es nach anfänglicher Kontaktfindung zu einem Eindrehen des Probekörpers (Abb. 72). Diese Drehbewegung folgt ähnlich dem Fertigungsknick der Hysterese. Am besten beschreibt man anhand von D6 R H diese Vorgänge (Abb. 71). Das anfängliche Kontaktfahren ist bei circa 6500N abgeschlossen. Bei dieser Laststufe verschwinden anfängliche Lichtspalte zwischen Kontaktbeilagen und Prüfmaschine gänzlich, das Eindrehen der

Probe ist also abgeschlossen (Abb. 72). Zusätzlich zum Eindrehen ist aufgrund der Winkeltoleranzen (vgl. Kapitel 4.3.3) mit einem beginnenden Einknicken der Einleitungskonstruktion zu rechnen. Der Traversenwegaufnehmer überschätzt die Fugenstauchung, da er messtechnisch diese Effekte miterfasst. In Abb. 70 ist den Aufzeichnungen des Traversenaufnehmers eine kontinuierliche Verschiebung von 0,18mm/10kN nebenangestellt. Diese entspricht im Hysteresebereich in guter Übereinstimmung dem vermeintlich um Rotation bereinigten Messwert. Abb. 70 zeigt aber, dass die Steifigkeit von Probe D6 R H mit fortschreitender Prüflast weiter zunimmt. Die Rotation muss also über den Hysteresebereich hinaus weiter zunehmen. Einer gemessenen Stauchung von 0,18mm bei 10kN über zwei Fugen hinweg (Abb. 71 li.), steht ein numerischer Wert von circa 0,07mm gegenüber. Eine Plausibilitätskontrolle der numerischen gefundenen Stauchung (0,035mm) einer Fuge unter Verwendung der Dehnsteifigkeit vom Vergussmaterial zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Handrechnung (0,034mm) und Numerik. Die Messwerte bei 60°C zeigen sich weicher (Abb. 71 re.), was mit Blick auf das angesprochene beginnende Einknicken der Einleitungskonstruktion durchaus schlüssig scheint. Die aufgebrachte Exzentrizität müsste über ein Kräftepaar abgetragen werden, das auf Zugseite durch den Einlaminierteil im Gleichgewicht gehalten wird. Mit Erhöhung der Temperatur ist auch mit einer größeren Nachgiebigkeit bei einsetzender Verdrehung zu rechnen. Im oberen Lastbereich kann man meist ein merkliches Einknicken der Anbindung erkennen. (vgl. D2 R in Abb. 70)

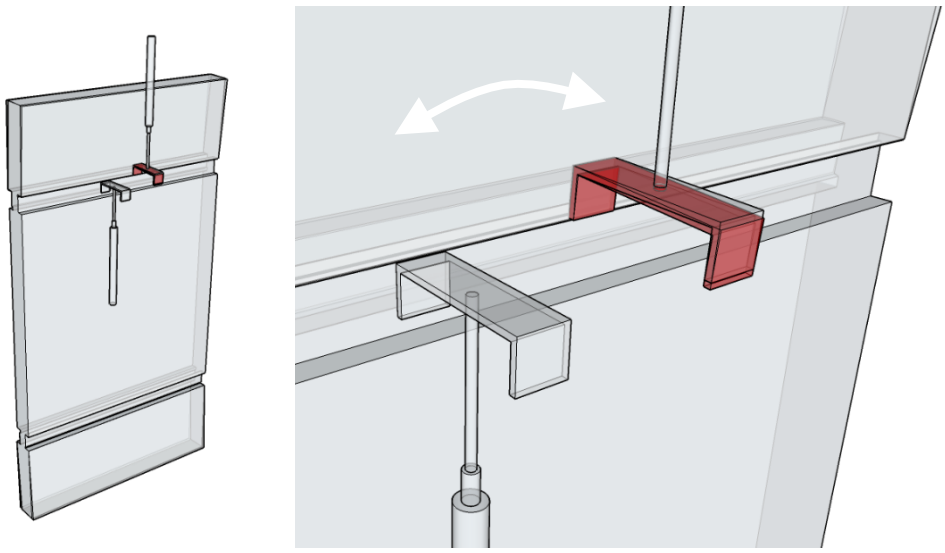


Abb. 72 Überschätzung der Messergebnisse durch Verdrehung der Lasteinleitung bei den Druckversuchen.

Die Messungen der Wegnehmer aus Abb. 73 sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Die Auswertung ist in Anhang B zu finden. Bei allen Messungen kommt es zu einem

teilweisen Ausfall der Messmittel bzw. zu sehr kleinen Messwerten. Aufgrund der Kleinheit der gemessenen Werte (<0,05mm, vgl. 4.4.3) sind die Ergebnisse nicht zuverlässig. Die verwendeten Messmittel liefern hier keine gesicherten Daten. Auch in Tabelle 24 setzten wir die entsprechenden Werte in Klammer. Eine Validierung der Numerik ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich (alle Messwerte bei Raumtemperatur sind betroffen). Bei keinem der Probekörper kommt es zum Glasbruch. Mit steigender Belastung tritt eine zunehmende Verdrehung der Anbauteile auf. Die Versuche werden bei den gezeigten Lastniveaus beendet.

Tabelle 24 Stauchung der Anbindung (siehe Anhang B)

D4 R H	D5 R H	D6 R H	D1 60 H	D3 60 H	D2 60 H	D4 60 H
[mm] / 10kN Prüflast						
(0,001)*	(0,001)*	(0,001)*	(0,001)* (0,015)*	(0,001)*	-	-

* Messwerte nicht zuverlässig

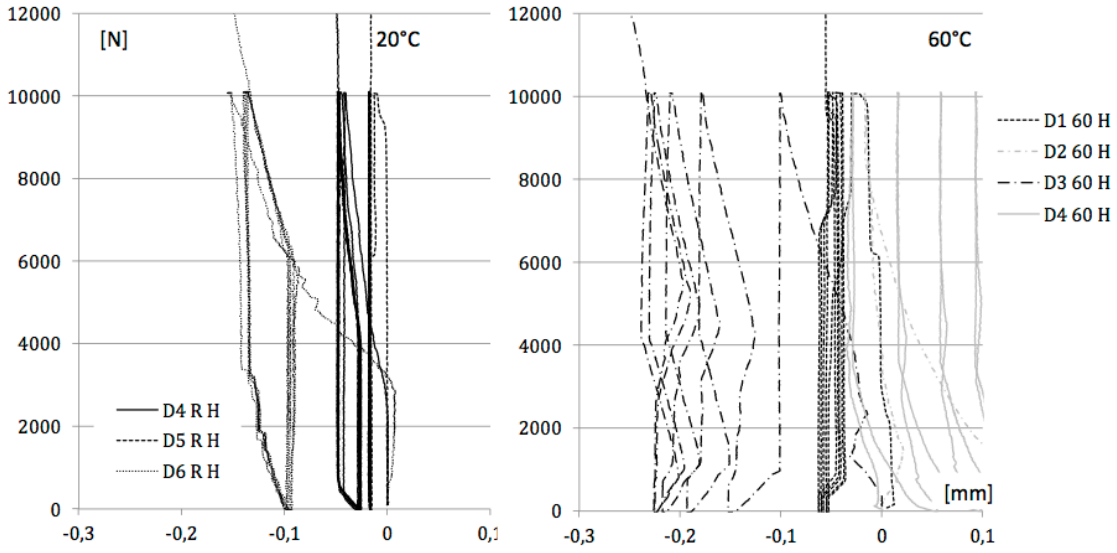


Abb. 73 Auswertung der Wegaufnehmer der Druckprobekörper

Die Verformungen unter Drucklast sollten mit einem angepassten Versuchsaufbau und geeigneten Messmitteln untersucht werden. Im Zuge dieser Arbeit muss jedoch von zusätzlichen Versuchen abgesehen werden.

4.4.5 Auswertung V

In Abb. 74 ist die Auswertung des Traversenwegaufnehmers für die Versuche zur Querbelastbarkeit dargestellt, eine Vergrößerung der Kraft-Weg-Diagramme ist wieder im Anhang B zu finden. Die maximale Prüflast beträgt bei den Proben „Nietenkopf oben“ 20-35kN und bei den Proben „Nietenkopf unten“ 25kN. Bei letzteren ist ein deutliches Abfallen der Steifigkeit zu beobachten.

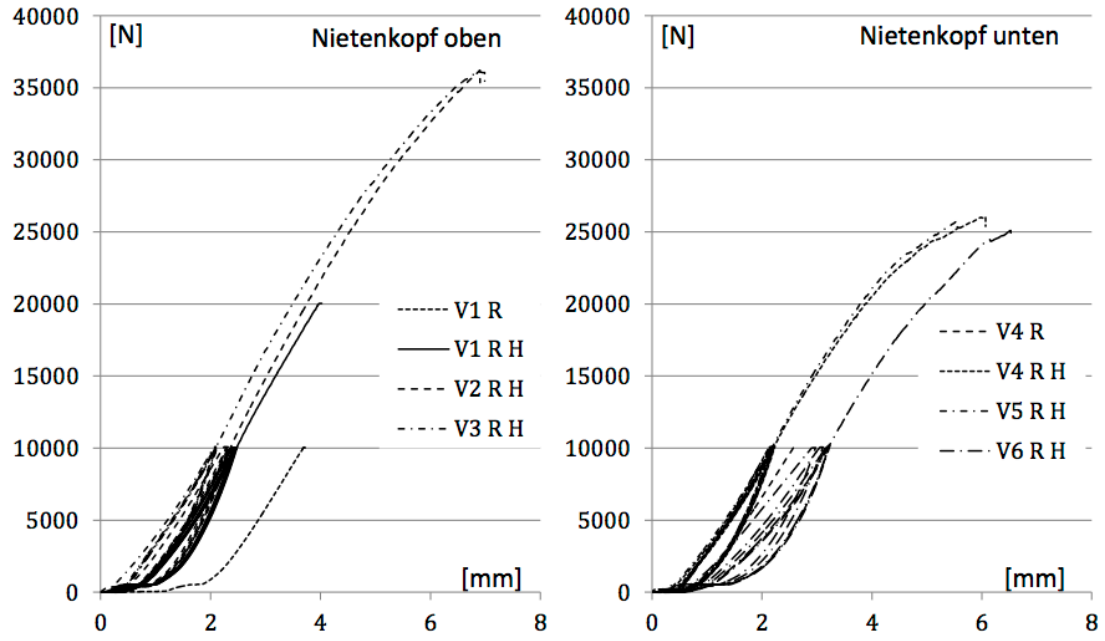


Abb. 74 Auswertung Traversenwegaufnehmer Versuch V

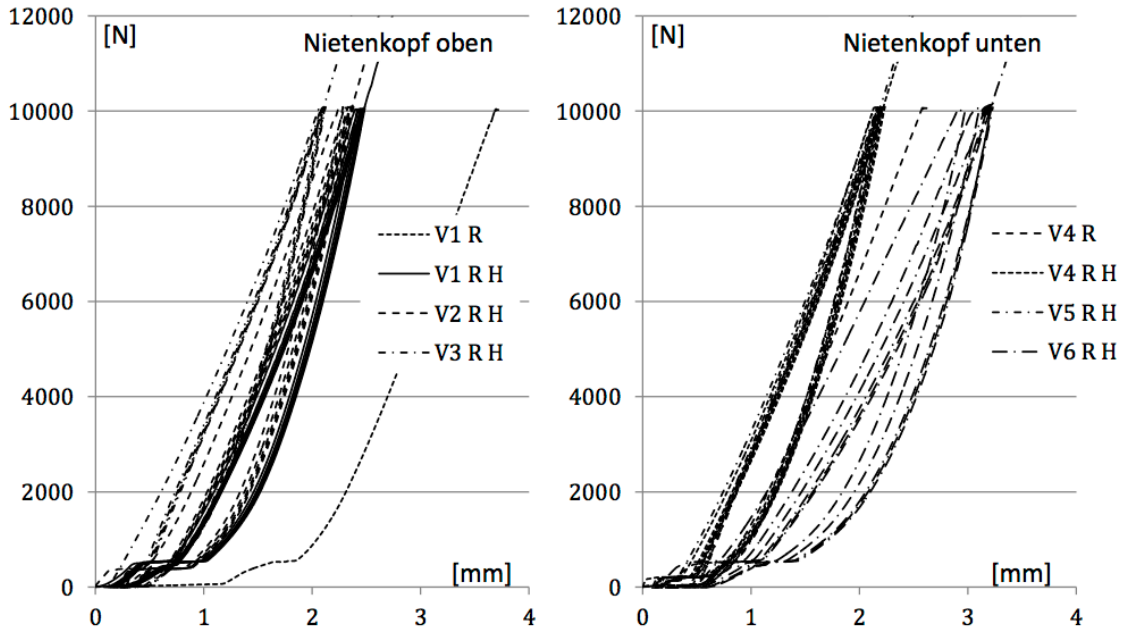


Abb. 75 Vergrößerung Hysteresebereich Versuch V

Analog zu den Biegeversuchen erkennt man auch hier gut das Einschlupfen der Lasteinleitungstraverse. Das unter Abschnitt 4.3.5 beschriebene Aufreiten der Verbindungsmittel an den Lagerrollen ist bei V6 R H an den Aufzeichnungen des Traversenwegnehmers (Abb. 75) und den Messungen der Wegnehmer an versetzten Hystereseschleifen zu erkennen.

In Tabelle 25 ist die Auswertung der Wegnehmer zusammengefasst. Sieht man von V6 R H ab, zeigen die Proben im Hysteresebereich ein identes Verschiebungsverhalten mit 0,25-0,30mm/10kN. In Abb. 76 sind exemplarisch Verschiebungswerte den Messwerten an die Seite gestellt. Die Auswertung für die einzelnen Messungen ist in Anhang B zu finden.

Tabelle 25 Verformung Versuche V (siehe Anhang B)

V1 R	V1 R H	V2 R H	V3 R H	V4 R	V4 R H	V5 R H	V6 R H
[mm] / 10kN Prüflast							
0,25	0,25	0,25	0,35	0,27	0,27	0,35	0,60

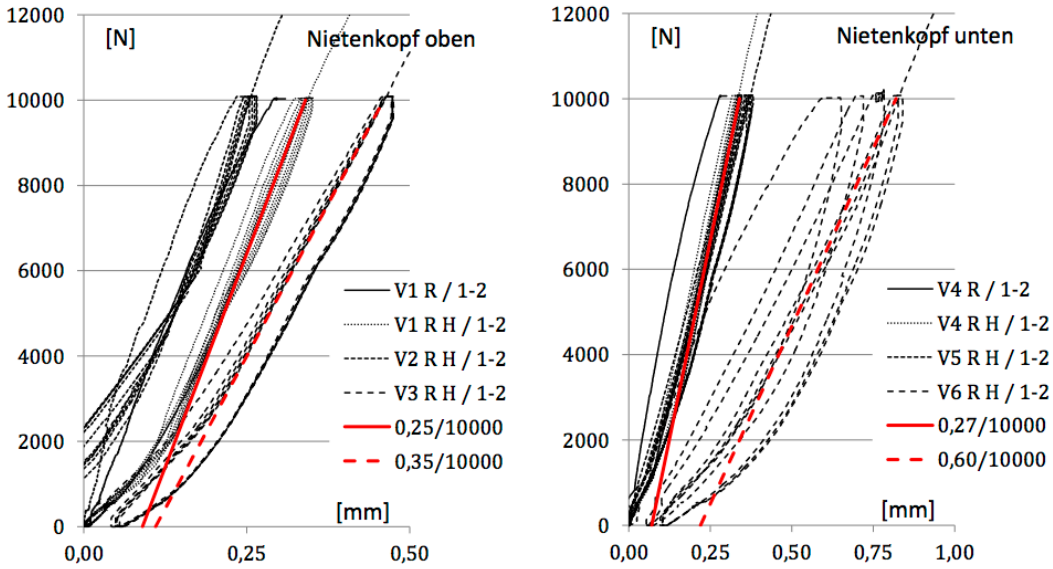


Abb. 76 Auswertung der Wegaufnehmer bei den Versuchen V

4.4.6 Auswertung Anzugskraft Nieten

Die Funktionsprüfung für die Nieten führt die Industrie für einen Klemmbereich von 17,5 mm und einem Bohrlochdurchmesser von 5,1mm durch [137]. Über den Einschlupf- und den Abrisswert des Nietdorns kann der vorhandene Anzugswert bestimmt werden (Abb. 54). Konstruktionsbedingt weicht der Bohrlochdurchmes-

ser an den Probekörpern vom untersuchten Wert ab. Formschluss zwischen Nietenschaft und Blechen wird durch nachträglichen Verguss hergestellt. Die Verformung der Einlaminierteile während des Setzvorganges bildet die Funktionsprüfung nicht ab. Eine Änderung des Klemmbereiches ändert auch die Anzugskraft in der Niete. Zusätzliche Untersuchungen für unterschiedliche Klemmbereiche mit korrekten Steifigkeitsverhältnissen des Klemmpackets sind notwendig. Die in Tabelle 26 angegebenen Werte sind als Richtwert zu verstehen.

Tabelle 26 Funktionsprüfung Nieten A2/A2 5x25 F

															$\bar{X}$	S
unterer Einschlupfwert																
[N]	5394	6195	5176	6503	7030	5072	6068	6791	6690	5855	7165	5959	5496		6107	698
[mm]	7,07	7,23	7,38	7,07	7,07	6,92	7,23	7,23	7,07	7,38	7,23	7,07	7,23		7,17	0,13
Abrisswert																
[N]	9858	9776	9795	9622	9754	9577	9858	9742	9742	9806	9768	9806	9761		9759	81
[mm]	8,62	8,42	9,08	8,27	8,04	8,58	8,54	8,27	8,19	8,81	8,11	8,42	8,62		8,46	0,29
Anzugswert																
[N]	4465	3580	4618	3119	2724	4505	3791	2951	3053	3951	2604	3847	4266		3652	704

4.4.7 Auswertung Kontrollversuch Z und D

Abb. 77 zeigt die Aufzeichnung des Traversenwegnehmers für die Kontrollversuche Zug. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Zugversuche grau hinterlegt (li.). Der Hysteresebereich ist vergrößert dargestellt. Man erkennt eine deutliche Reduktion des Knickes im unteren Lastbereich. Dieser ist der Fertigungsimperfektion der Probekörper aus der Ebene geschuldet. Die verbleibende Bewegung ist auf das Gewindespiel der Ringschrauben zurückzuführen. In Abb. 78 findet sich eine analoge Darstellung für die Druckversuche. Auch bei den Versuchen D ist mit Ausnahme von KD 2 R der Knick nahezu verschwunden. Das Eindrehen in der Ebene kann mit den Probekörpern nur bedingt nachgestellt werden, da geringe Verdrehungen wohl nicht ausreichend behindert werden. Das Einschlupfen eines Probekörpers kann an KD 2 R anschaulich nachgestellt werden.

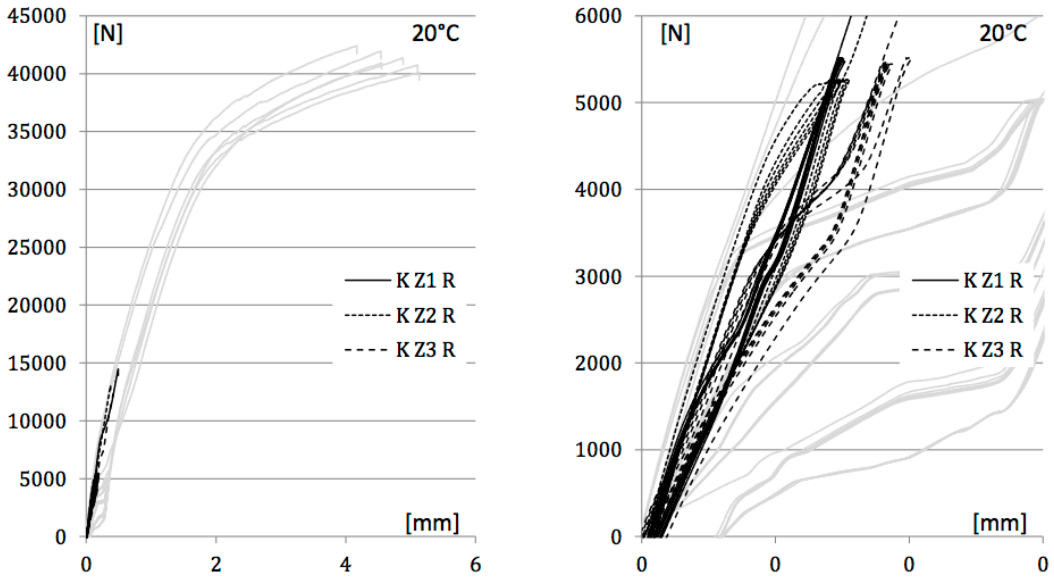


Abb. 77 Auswertung des Traversenwegnehmers - Kontrollversuche Z

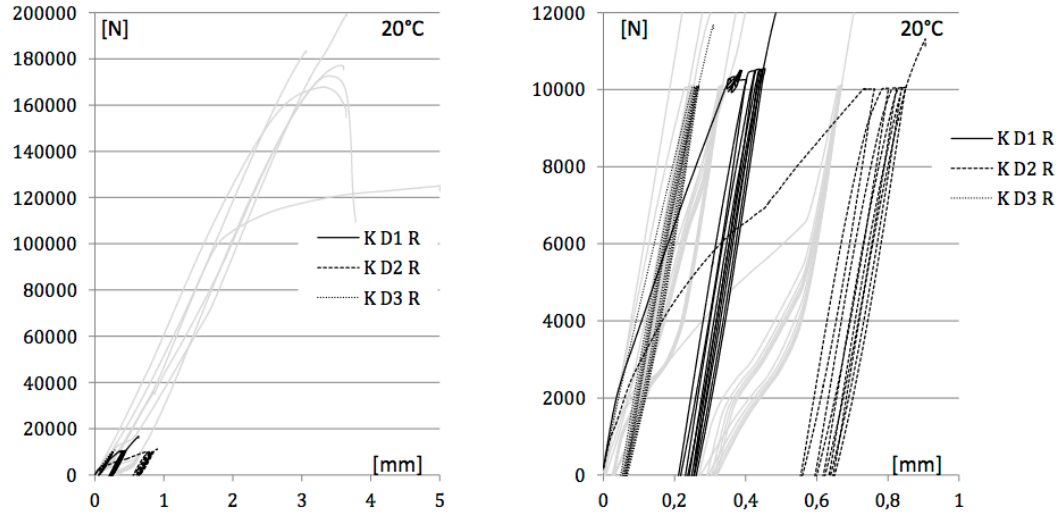


Abb. 78 Auswertung des Traversenwegnehmers - Kontrollversuch D

5 Berechnung

In dieser Arbeit wird zwischen lokalen und globalen Berechnungen unterschieden. Zu den lokalen Nachweisen zählen die numerischen Untersuchungen der Probekörper und des Verbindungsdetails unter kombinierter Beanspruchung oder variablen Winkel. Die globalen Berechnungen dienen der Bewertung von Tragwerken.

5.1 Numerische Untersuchung der Probekörper

Um die Weiterleitungsmechanismen der Verbindung möglichst realitätsnahe abzubilden, ist ein Berechnungsprogramm notwendig, mit dem Kontaktprobleme abgebildet werden können. Zur numerischen Betrachtung der Probekörper und für die Lastinteraktion wird auf die Finite Elemente Software ANSYS 14.5 zurückgegriffen und für jede Belastungsart (Mode) sowie den Temperaturfall 20°C ein entsprechendes Volumenmodell untersucht. Die Ergebnisse der Numerik der Probekörper sind den entsprechenden Messwerten der Versuche zur Modellvalidierung an die Seite gestellt. Für den Fall der erhöhten Betriebstemperatur werden keine Berechnungen durchgeführt.

5.1.1 Modellbildung

Die Modellierung der Volumenelemente erfolgte in Autocad®. Die dreidimensionalen Bauteile können über eine unidirektionale Schnittstelle in das Berechnungsprogramm importiert werden. Entlang der Fügekante sind allen Berechnungssystemen Kontakte (Abb. 79) gemäß Tabelle 27 zugeordnet.

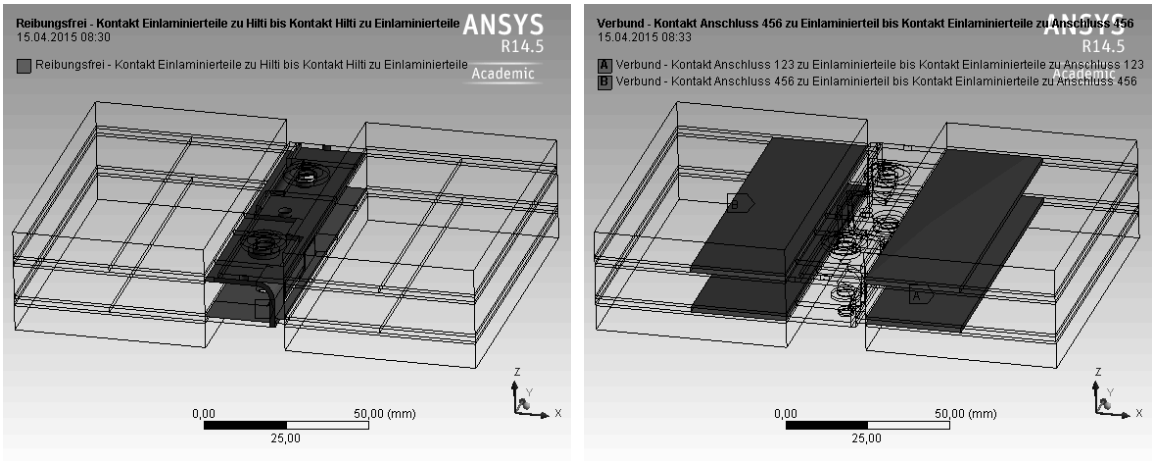


Abb. 79 Abhebender Kontakt zwischen Vergussmörtel und Einlaminierteilen (li.) Verbund zwischen SentryGlas® (SGP) und Einlaminierteilen (re.)

Tabelle 27 Kontaktmatrix

Kontaktpartner	Hilti Hit	Glas	SGP	EL1	EL2	EL3	EL4	Nietenkopf	Nietenschaft	Nieteneinzug	Scheibe
Hilti Hit	-	a	a	a	a	a	a	-	a	-	-
Glas		-	v	-	-	-	-	-	-	-	-
SGP			-	v	v	v	v	-	-	-	-
EL1				-	a	µ	a	-	-	-	-
EL2					-	a	µ	-	-	v	-
EL3						-	a	-	-	-	v
EL4							-	-	-	-	-
Nietenkopf								-	-	-	v
Nietenschaft									-	-	-
Nieteneinzug										-	-
Scheibe											-

a - Reibungsfrei abhebend µ - Abhebend, reibungsbehaftet (0,15) v - Verbund, nicht abhebend als Kontakt oder Baugruppe ausgeführt

Abhebende Kontakte (bspw. zwischen Vergussmörtel und Einlaminierteilen) sind reibungsfrei modelliert. Ausgenommen von dieser Festlegung sind Einlaminierteile (EL), die über Nieten gegenseitig auf Kontakt gepresst werden (bspw. EL1 auf EL3). Für diese Kontaktbereiche wird ein Reibbeiwert von 0,15 festgelegt (Haftreibung für Stahl auf Stahl aus [121]). Der Kontaktbereich zwischen Nieten und Einlaminierteilen ist gemäß den Empfehlungen von [122] als Verbund definiert. Die Benennung der Einlaminierteile gemäß ihrer Lage in der Anbindung ist in Abb. 80 dargestellt.

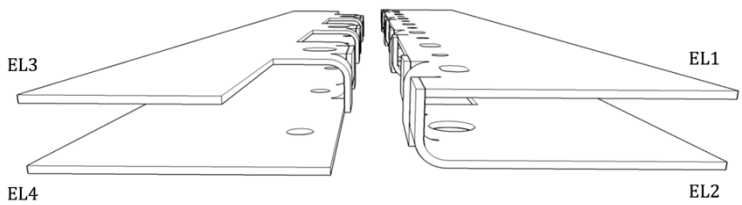


Abb. 80 Benennung der Einlaminierteile nach ihrer Lage in der Anbindung

In Tabelle 28 sind die verwendeten physikalischen und mechanischen Werte der numerischen Simulationen zusammengefasst. Die Berechnung erfolgte ausschließlich mit linear-elastischen Materialmodellen (Abb. 81).

Tabelle 28 Modellmaterialien samt Kennwerte

Beschreibung	Material	ρ [kg/m³]	E [N/mm²]	ν [-]	G [N/mm²]
Stahl Lasteinleitung 1)		7850	200000	0,30	76923
Einlaminierteil [123] 3)	1.4301	7900	200000	0,30	76923
Vergussmörtel [124]	HY70	1500	1757	0,23	714
Glas [91]		2500	70000	0,20	29167
SentryGlas [103] 2)	SGP5000	950	567	0,453	195

1) ANSYS Materialmodell Baustahl 2) Materialwerte bei 20°C / 1 Minute 3) inkl. Nieten

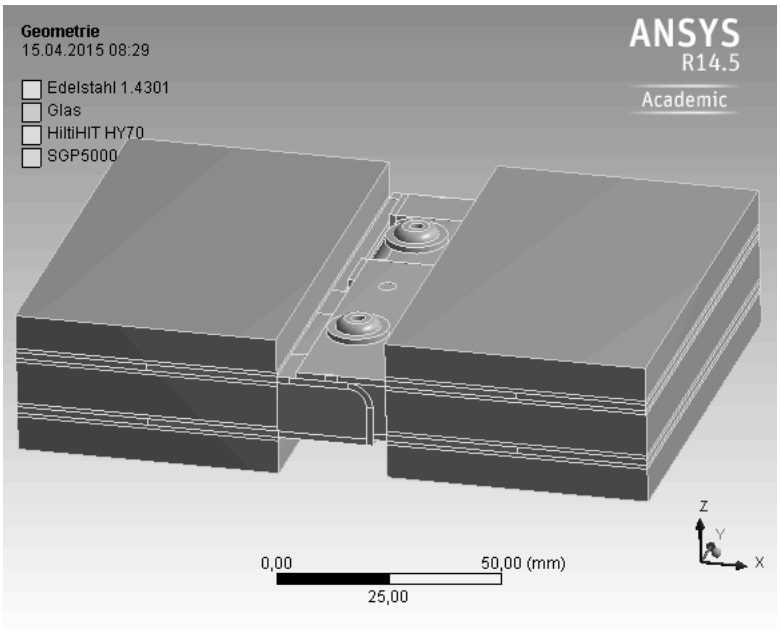


Abb. 81 Ausschnitt aus dem Modell M mit Darstellung der Modellmaterialien

Bei der Vernetzung werden aufgrund der verbesserten Netzmetrik hexagonale Elemente bevorzugt. Komplizierte Volumen wie der Vergusskörper sind mit Tetraedern vernetzt (siehe Abb. 82). Angaben zu Netzfeinheit und Elementtyp im Bereich der Anbindung sind in Tabelle 29 zusammengefasst. Für die Modelle Z, D und T ist die Elementqualität mit hochwertig mechanisch und für das Modell M mit normal mechanisch festgelegt.

Eine weitere Vereinfachung betrifft die Belastungshistorie. Bei der Fertigung der Probekörper wurden die Nieten vor dem Vergießen gesetzt. Das Modell bildet diesen Systemwechsel nicht ab. In der Simulation ist der Verguss vor dem Setzen der Niete bereits vorhanden. Im ersten Lastschritt (LS1) wird die Nietenvorspannung aufgebracht. Im zweiten Lastschritt (LS2) wird die Vorspannung gesperrt und die eigentliche Prüflast aufgebracht. Die Prüflast entspricht in etwa der Hysteresegrenze (Tabelle 30) und zeigt in guter Näherung eine lineare Last-Verschiebungs-Charakterisitik während der Versuche. Die Nietenvorspannung wird in einem Lastschritt aufgebracht. Bei allen Modellen wird der Wert der Nietenvorspannung gemäß Tabelle 31 variiert. Die Prüflast wird in 10 Substeps unterteilt.

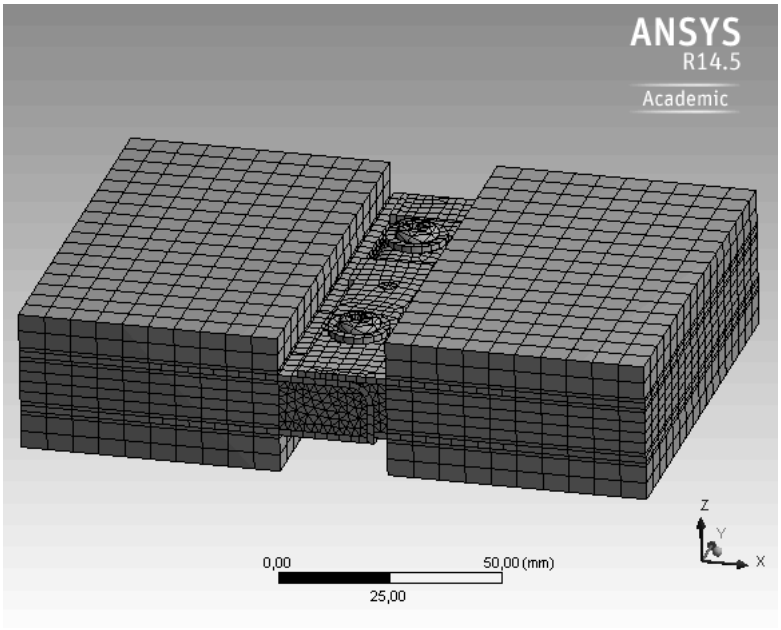


Abb. 82 Ausschnitt aus dem Modell M mit Darstellung der Vernetzung

Tabelle 29 Elementgröße und Typ

Bauteil	Elementgröße [mm]	Elementtyp
Einlaminierteil	3	SOLID186
Glas	6 / 2,5[1)]	SOLID186
SGP	6	SOLID186
Verguss	2	SOLID187
Verbindungsmittel	3	SOLID187

1) Im Kontaktbereich zum Verguss vertikal unterteilt mit 2,5mm

Die Wahl von zwei Lastschritten erlaubt eine Auswertung der Betriebslast der Niete erst nach Abschluss von Lastschritt zwei (LS2), der erste Lastschritt dient der Kalibrierung der Niete [122].

Tabelle 30 Zusammenfassung Versuchs- und Berechnungslasten

Versuch	Last [kN] Versuch beendet	Last [kN] Hysterese	Last [kN] Interaktion
M Biegung [1)]	~ 4	1	2 (≙ 570Nm/m)
Z Zug [1)]	~ 40	5	5
D Druck [1)]	~ 180	10	10
T Schub [2)]	~ 160	50	40

Länge der untersuchten Verbindung: [1)] 350mm [2)] 700mm

Tabelle 31 FEM-Modelle der Probekörper und zugehörige Belastungen

Beschreibung	Lastschritte	LS1 [N]	Substeps LS1	LS2 [kN]	Substeps LS2
Modell M	2	2900	1	2	10
		3650	1	2	10
		4500	1	2	10
Modell Z	2	2900	1	5	10
		3650	1	5	10
		4500	1	5	10
Modell D	2	2900	1	10	10
		3650	1	10	10
		4500	1	10	10
Modell T	2	2900	1	[1)] 20	10
		3650	1	20	10
		4500	1	20	10
Modell V (Nietenkopf oben)	2	3650	1	[2)]5	30
Modell V (Nietenkopf unten)	2	3650	1	[2)]5	1

1) Wegen Symmetrie im Modell entspricht die Prüflast 40kN

2) Wegen Symmetrie im Modell entspreicht die Prüflast 10kN

5.1.2 Modell Versuch M

In Abb. 83 ist das Modell für den Probekörper M dargestellt. Zusätzlich zu den Kontakten aus Tabelle 27 sind zwischen Lager- bzw. Belastungsrollen und Laminat Verbundkontakte angeordnet. Entsprechend der Versuchseinrichtung erhalten die Lagerrollen eine Stützung in z-Richtung und einen Freiheitsgrad der Rotation um die x-Achse. An der rechten Lagerrolle wird zusätzlich eine Verschiebung in x-Richtung zugelassen. Diese Lagerung entspricht weitestgehend den realen Bedingungen in der Prüfmaschine. Lediglich die Verschieblichkeit in x-Richtung wird als Freiheitsgrad nicht dem Kontaktbereich Lagerrolle-Probekörper zugewiesen. Die Zuordnung dieses Freiheitsgrades an die Lagerrolle liegt im verbesserten Konvergenzverhalten der Simulation begründet. Eine Berechnung mit starren Lagerrollen (kein Freiheitsgrad der Verdrehung oder Verschiebung) unterschätzt das Verformungsverhalten um eine Größenordnung (~ Faktor 10).

Die Prüflast wird anteilig an den Mittelflächen der Belastungsrollen beaufschlagt. Die Nietenvorspannung wird den Schaftflächen der Verbindungsmittel zugewiesen.

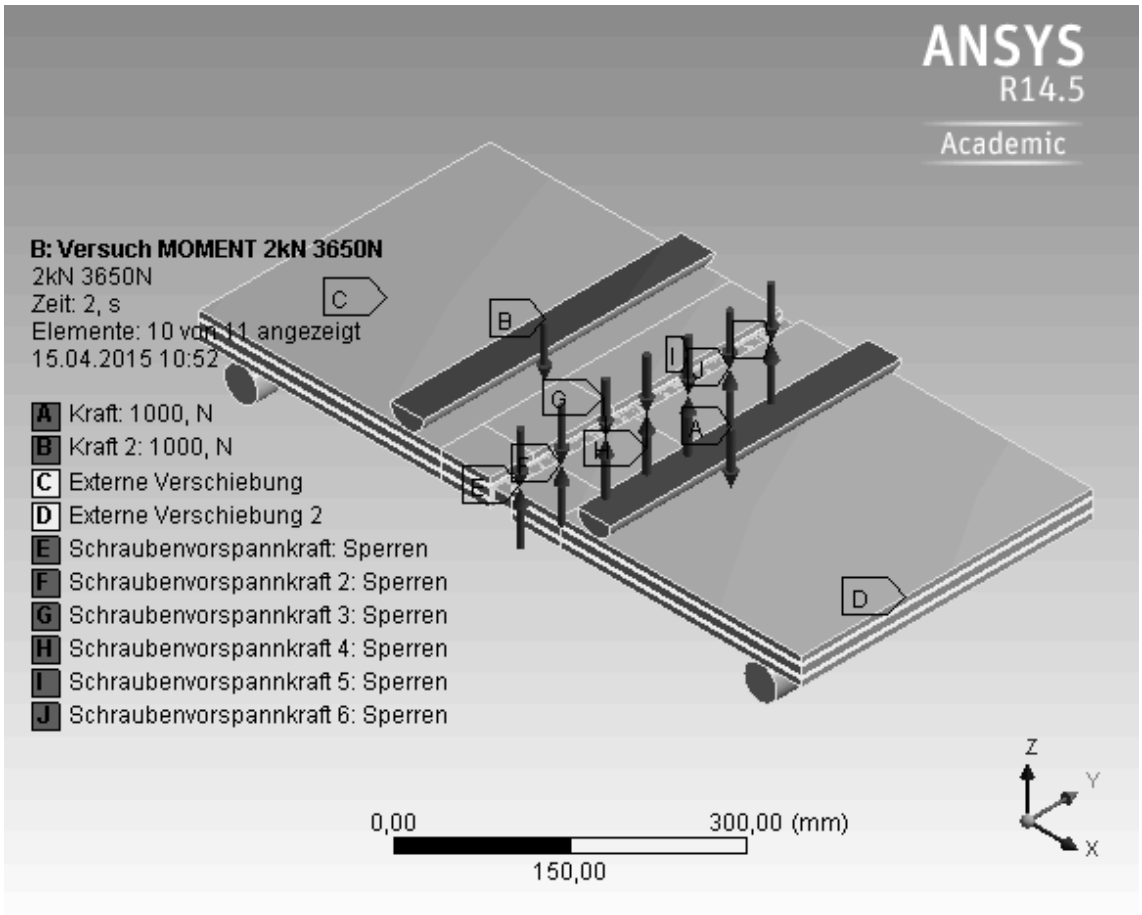


Abb. 83 ANSYS-Modell für den Biegeversuch (Mode M)

Die gewählte Lagerung hingegen überschätzt die Verformung, da am realen Probekörper ein freies Verschieben in x-Richtung durch Kontaktpressung und Reibung zwischen Lagerrollen und Glas zumindest teilweise behindert wird. Eine entsprechende Abbildung dieses Umstandes wäre über Lagersteifigkeiten möglich. Da die zugehörigen Verschiebungen am Probekörper während der Versuche nicht gemessen wurden, liegen keine validierten Eingangswerte zur Ermittlung der Lagersteifigkeit vor. Von einer entsprechenden Modellanpassung wurde daher abgesehen.

5.1.3 Modell Versuch T

Unter Ausnützung der Symmetrie kann beim Modell zur Schubbelastung (Abb. 84) die Elementzahl halbiert und somit die Rechenzeit erheblich reduziert werden. Die Modellbelastung entspricht der halben Prüflast. An der Symmetrieebene wird eine reibungsfreie Lagerung definiert. Am Frässteil der Lasteinleitung wird eine fixierte Lagerung modelliert. Die Prüflast wird an der oberen Glaskante beaufschlagt. Aufgrund der gewählten Modellsymmetrie wird dem halben System nur die halbe Prüfkraft zugewiesen. Die Nietenvorspannung wird analog Modell M den Nietenschäften zugewiesen.

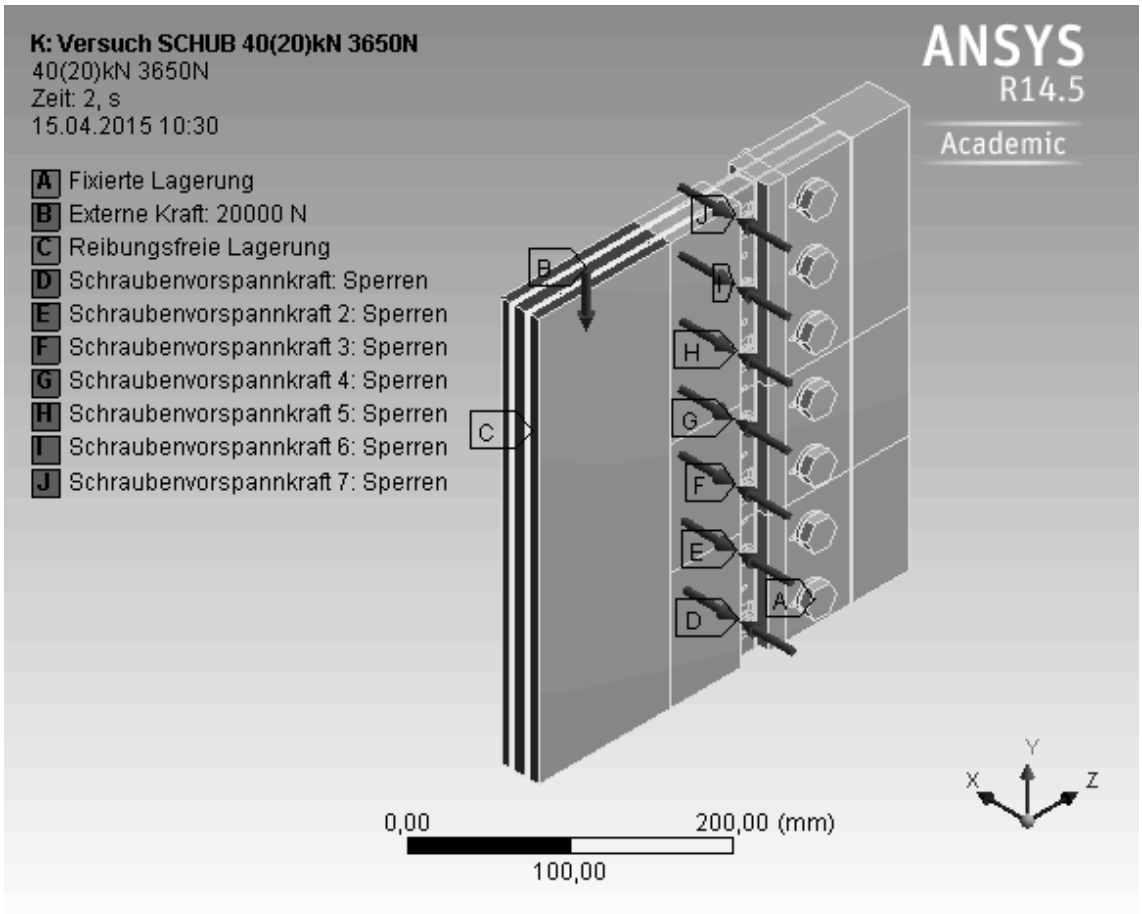


Abb. 84 ANSYS-Modell für den Schubversuch (Mode T)

Bleibt die Nietenvorspannung unberücksichtigt, kommt der numerische Wert außerhalb des Streubereiches zu liegen (0,22mm/40kN).

5.1.4 Modell Versuch Z

Das Modell für den Probekörper Zug wird ebenfalls unter Ausnützung der Symmetrie modelliert (Abb. 85). An der Symmetrieebene definiert man eine fixierte Lagerung. Die Prüflast wird an der Schnittfläche des Zugstabes aufgebracht. Das Zugelement ist im Modell starr mit der Lasteinleitungskonstruktion verbunden. Mit der Nietenvorspannung wird analog zu den vorangegangen Modellen verfahren. Ohne Berücksichtigung des Lastfalls der Nietenvorspannung wird die Verformung des Systems überschätzt. Unter Berücksichtigung der Nietenvorspannung kommt es bei 5kN Versuchslast in etwa zu einer Halbierung der Verschiebungswerte von 0,071 auf 0,036 bei einer Nietenanzugskraft von 3650N. Analog zum Schubmodell würde auch für das Zugmodell der numerische Wert ohne Berücksichtigung der Nietenvorspannung außerhalb des Streubereiches der Messwerte liegen.

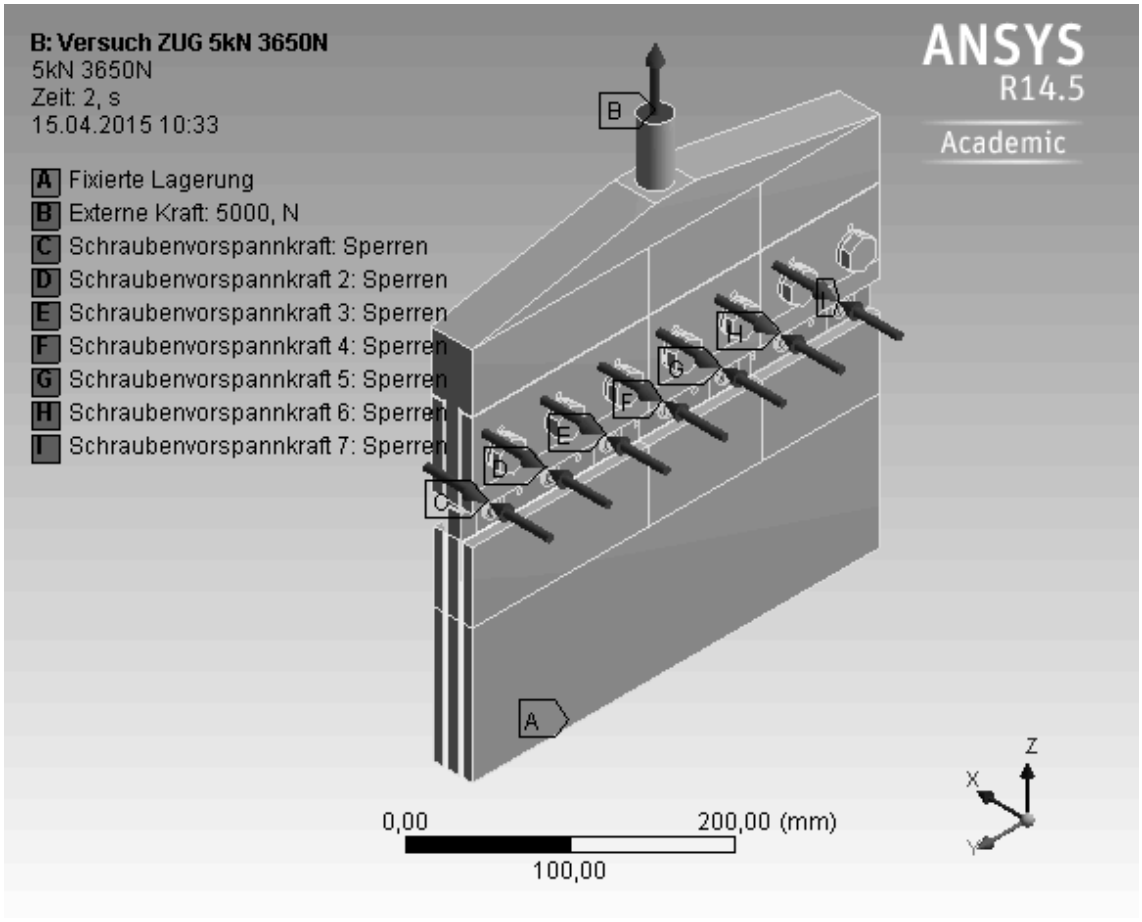


Abb. 85 ANSYS-Modell für den Zugversuch (Mode Z)

5.1.5 Modell Versuch D

Analog zum Modell Zug wird nur das halbe Modell berechnet (Abb. 86). An der Symmetrieebene wird eine Verschiebung in x-Richtung zugelassen. An den Flanken des Frästeils der Lasteinleitung wird eine Verschiebung in z-Richtung und eine Verdrehung um die y-Achse zugelassen. Die Prüfkraft wird über die horizontale Stirnfläche der Einleitungskonstruktion beaufschlagt. Unter Berücksichtigung der Vorspannung entspricht die Verformung am Modell in guter Näherung den Stauchungen, die man für das Vergussmaterial erwarten würde (vgl. Kapitel 4.4.4). Bei Vernachlässigung der Nietenvorspannung erhöht sich die Verformung am Gesamtsystem von 0,035mm auf 0,05mm. Der Einfluss der Nietenvorspannung ist demnach unter Drucklast nicht so ausgeprägt wie unter Zuglast, kann aber grundsätzlich beobachtet werden.

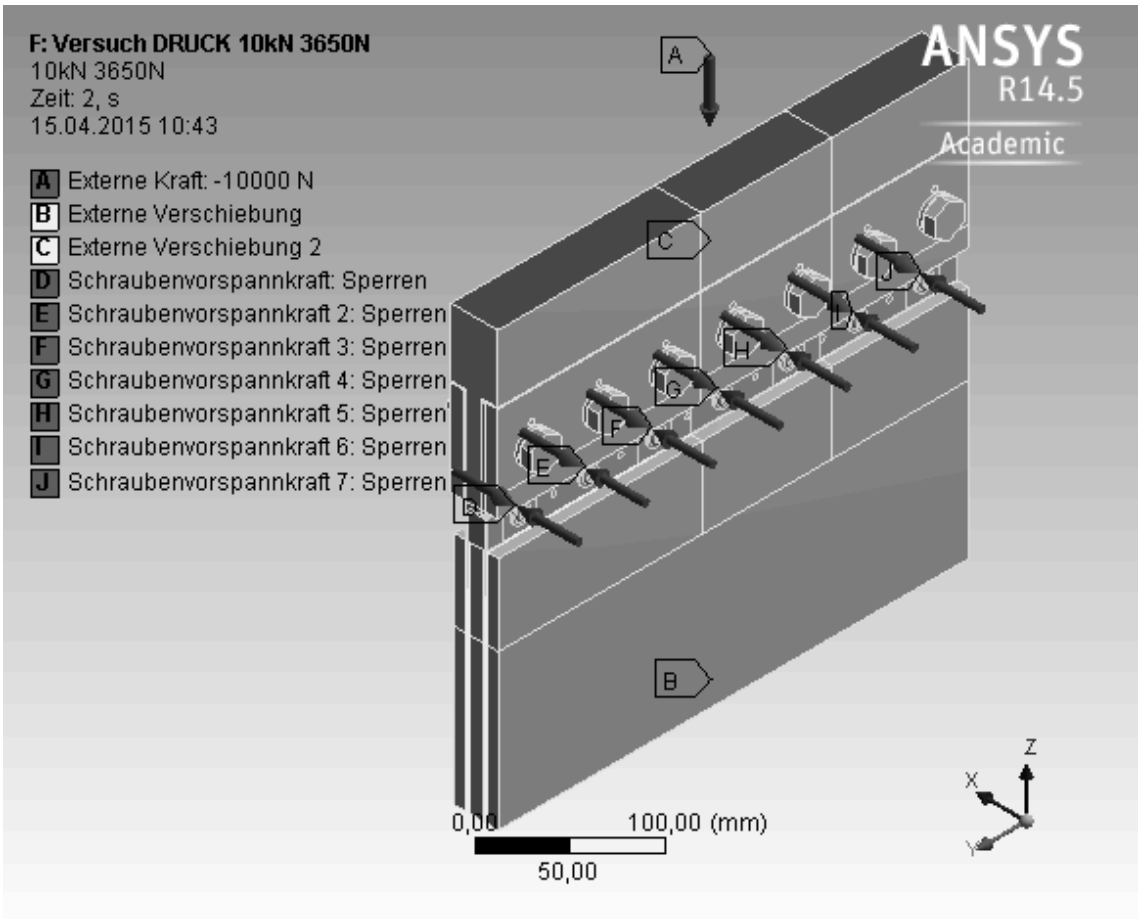


Abb. 86 ANSYS-Modell für den Druckversuch (Mode D)

5.1.6 Modell Versuch V

Auch die Modelle zur Querbelastung bedienen sich der Symmetrie. In Abb. 87 ist das Modell „Nietenkopf oben“ dargestellt. Die Aussagen in diesem Absatz gelten sinngemäß auch für das Modell „Nietenkopf unten“. Die Schnitt- bzw. Symmetrieebene ist als reibungsfreie Lagerung modelliert. Der Kontakt zwischen Lagerrolle und Prüfkörper wird analog zum Biegezugversuch als Verbund definiert (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Lagerrolle kann sich in z-Richtung verschieben und um die y-Achse rotieren. Auch hier ist die Vorgehensweise mit einem stabileren Konvergenzverhalten der Berechnung begründet. Die Prüflast wird analog zum Modell M den Mittelflächen der Belastungsrollen zugewiesen. Die Modelle zur Querbelastung werden ausschließlich unter Berücksichtigung der Nietenvorspannung berechnet.

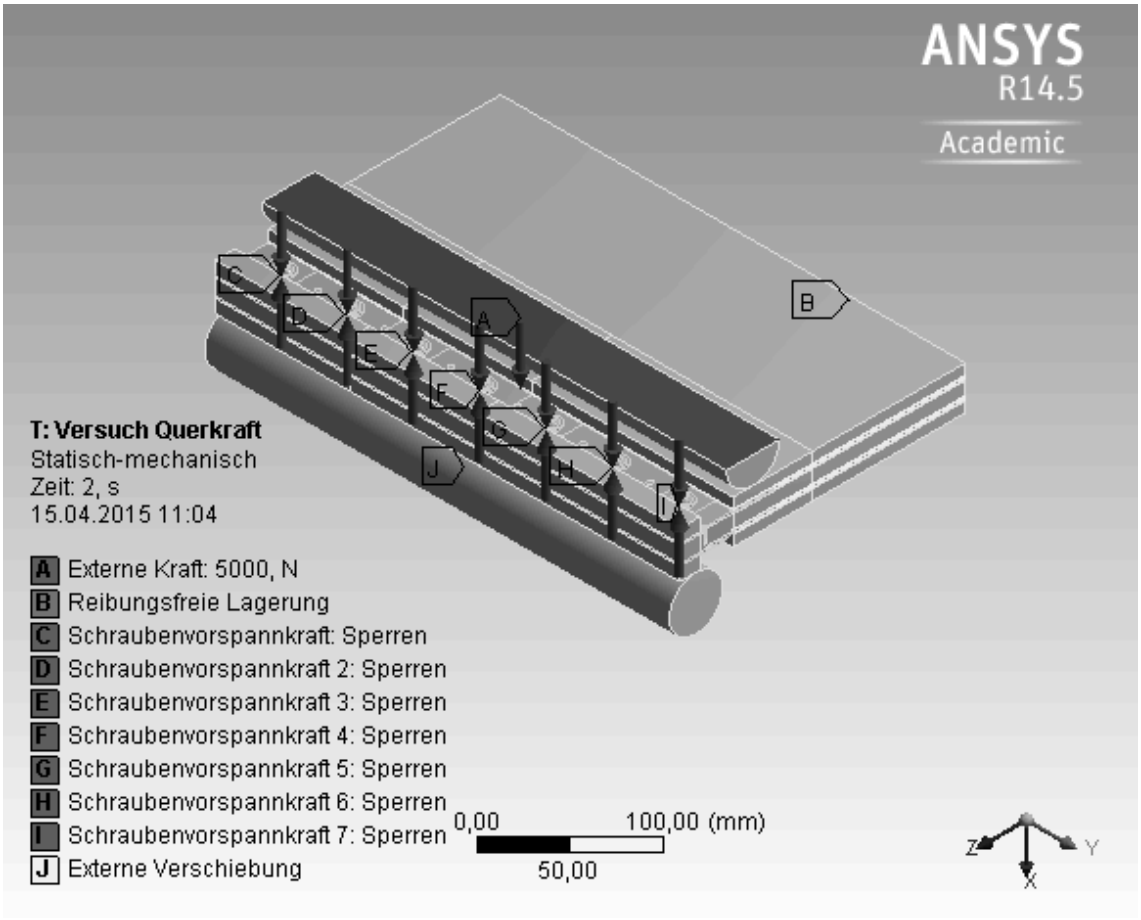


Abb. 87 ANSYS-Modell für den Querbelastungsversuch (Mode V)

5.1.7 Gegenüberstellung Versuch und Numerik

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnungen den Versuchen gegenübergestellt. Bei den Versuchsergebnissen handelt es sich um die gemessenen Maximal- und Minimalwerte (Streubereich) der zusätzlich angeordneten Wegaufnehmer. Die in Kapitel 4.4.3 und Kapitel 4.4.4 diskutierten Limitierungen der Messwerte gelten sinngemäß. Die Modelle wurden gemäß Tabelle 31 belastet. Um der Streuung der Nietenanzugskraft Rechnung zu tragen, wurde diese in der Numerik variiert. Bei der Auswertung der Verformungen muss auf die Belastungsgeschichte Rücksicht genommen werden. Als Referenz dient die verformte Lage zufolge Nietenvorspannung (Ende LS1). In Abb. 88 ist das Last-Verformungsverhalten der Biege- (M) und Querbelastungsversuche (V) den numerischen Werten an die Seite gestellt. Zur besseren Lesbarkeit wird der Verformungsbereich bis 0,20mm der Zug- (Z), Druck- (D) und Schubversuche (T) in Abb. 89 hervorgehoben. Wie in Kapitel 5.1.2 diskutiert, überschätzt Modell M die Verformungen. Errechneten Werten von 5,3-5,6mm stehen bei Raumtemperatur Messungen von 3,8-4,6mm gegenüber.

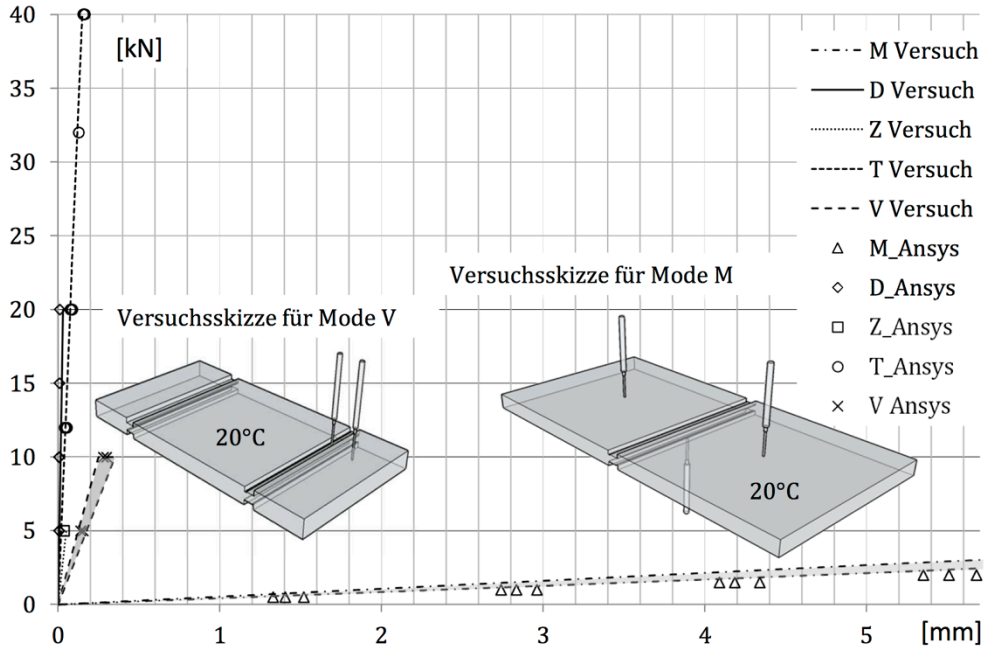


Abb. 88 Gegenüberstellung Numerik zu Messwerten Mode M und V

Messwerte, die mittels Strahlensatz gefunden wurden (vgl. Kapitel 4.4.1), überschätzen zudem die Verformungen um wenige $^{1}/_{10}$ mm (~0,3mm). Grund hierfür ist die nichtlineare Verformungscharakteristik im Bereich der Anbindung. Berücksichtigt man die vorgenommenen Modellvereinfachungen, im Speziellen die unbehinderte Lagerverschiebung, kann man dennoch von einer vertretbaren Genauig-

keit ausgehen. Auch der Vergleich der Versuche V (Abb. 88) und T (Abb. 89) liefert eine brauchbare Übereinstimmung zwischen gemessenen und numerischen Werten. Die Rechenwerte von V und T kommen im Streubereich der Messwerte zu liegen. Die Proben Z können über die Messungen der zusätzlichen Wegnehmer nicht hinreichend validiert werden. Die verwertbaren Messwerte bilden die untere Schranke des Streubereiches in der Darstellung (0,05mm/5kN). Durch Betrachtung der Traversenwegnehmer gewinnt man zusätzliche Werte. Auch sie liegen im Bereich von 0,05mm. Da wir auf diese Weise Werte über die ganze Anbindung erhalten, kann folglich ein Teil der Fuge, wie er von den Wegnehmern abgebildet wird, nur einer kleineren Verformung unterworfen sein. Man kann so zeigen, dass es einen Streubereich nach links geben muss. Über die tatsächliche Größe kann an dieser Stelle keine gesicherte Aussage getroffen werden. Der Umstand, dass die Fugenverformungen am gesamten Modell (0,058mm/5kN) eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten des Traversenwegnehmers besitzen (0,05mm/5kN), soll hier genügen (vgl. Kapitel 4.4.3). Für die Validierung der Druckproben haben wir keine gesicherten Daten aus den Wegnehmern erhalten (vgl. Kapitel 4.4.4).

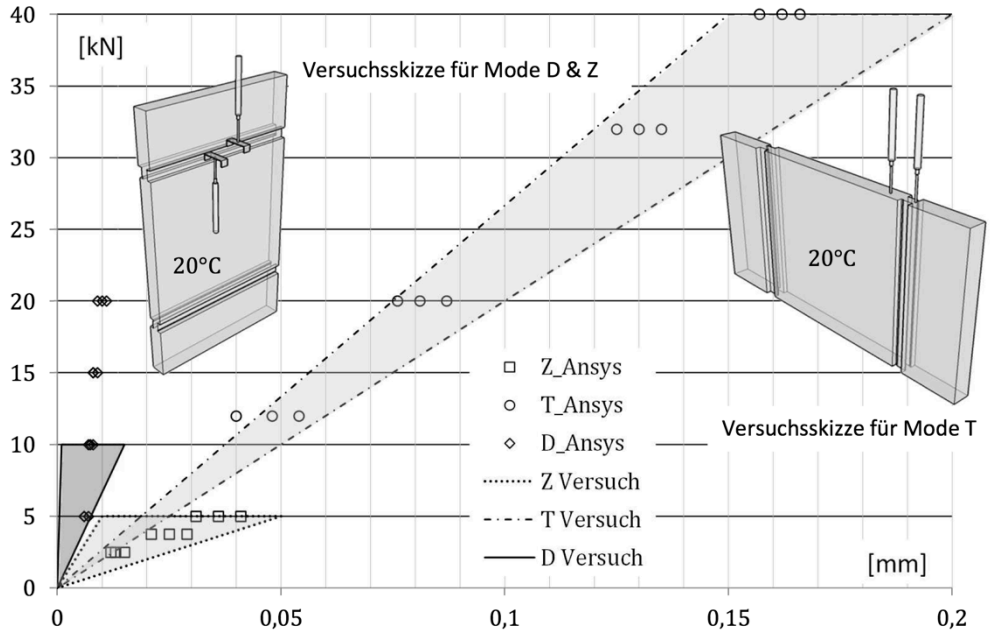


Abb. 89 Gegenüberstellung Numerik zu Messwerten Mode Z, D und T

Ein Zurückgreifen auf die Aufzeichnungen des Traversenwegaufnehmers analog zu den Zugproben ist aufgrund der diskutierten Schwächen im Versuchsaufbau wenig sinnvoll (vgl. Kapitel 4.3.4). Wir können aber durch einfache Handrechnung das FE-Modell auf Plausibilität prüfen. Wie bereits ausgeführt, steht dem numerischen

Wert der Fugenstauchung von 0,035mm ein aus der Dehnsteifigkeit ermittelter Wert von 0,034mm gegenüber (vgl. ANHANG C). Das Modell liefert somit plausible Werte. Verwendet man bei der Berechnung der Dehnsteifigkeit den E-Modul unter behinderter Querdehnung (im Modell wurde der Wert ohne behinderte Querdehnung verwendet), würde sich die Fugenstauchung halbieren. Die Kleinheit der zu erwartenden Werte ist evident. Bei unveränderter Anordnung können die Wegaufnehmer auch hier nur einen Teil der Fugenverformung aufzeichnen. Messmittel für weiterführende Versuche müssten entsprechend gewählt und der Versuchsaufbau angepasst werden. Auch stellt sich die Frage, inwieweit die in Abb. 89 dargestellten Werte aufgrund ihrer Kleinheit, jenseits der hier dargelegten theoretischen Betrachtungen, baupraktisch relevant sind.

Wie aus Abb. 88 ablesbar, ist die Verformung der Verbindung in der Ebene um Größenordnungen kleiner als die Biegeverformung. Die Modelle bilden die unterschiedlichen Steifigkeiten für die vorliegende Arbeit in brauchbarer Näherung ab. Die betragsmäßigen Werte der Numerik, die an dieser Stelle ausschließlich grafisch dargestellt sind, können Anhang C entnommen werden.

5.1.8 Auswertung der Spannungen

Die Versuche haben für kurzzeitige Lasten die Einlaminierteile als versagenskritische Komponente identifiziert. Die Auswertung der Spannungen im Sinne eines klassischen Punktnachweises ist an den diskutierten Modellen nicht zielführend und wird in der vorliegenden Arbeit nicht angestrebt. Dieses Vorgehen liegt in den Modellvereinfachungen und den gewählten Materialmodellen begründet. Bei einem Berechnungssystem mit vorliegender Komplexität ist eine Spannungskonvergenz in jedem Punkt nur schwer umsetzbar. Speziell mit Hinblick auf die unzähligen Kontaktbereiche und Innenecken ist man mit erheblichen Problemen konfrontiert. Bei den gewählten Grenzlasten der Interaktion liegen die Spannungen der Einlaminierteile zwar mit guter Näherung im elastischen Bereich, Einflüsse wie die Belastungsgeschichte (Kaltverformen der Bleche) sind aber gänzlich unberücksichtigt. Auch treten Spannungsspitzen in aller Regel lokal begrenzt an Rückschnitten, Innenecken oder Lochbohrungen auf (Stellen der Modellvereinfachung). Ein lehrbuchmäßiges Auswerten dieser Spannungen ist ohne weitere Verfeinerungen am Modell (Ausrundungen, Netzdichte) nicht möglich. Für die in dieser Arbeit angestrebte erste Beurteilung der Detailbrauchbarkeit wurde von weiterführenden Berechnungen abgesehen.

Da über die Versuche ein sicherer Verschiebungszustand je Belastungsmode gefunden wurde, trat die Frage der betragsmäßig auftretenden Spannungen weitestgehend in den Hintergrund. Für die angestrebte Interaktionsbetrachtung wird al-

ternativ die Verwendung eines Referenzspannungszustandes vorgeschlagen. Der Referenzspannungszustand ist einem Last- und Verschiebungszustand bei gewählter Modellbildung (Geometrie und Netz) zuordenbar und entspricht nicht den tatsächlichen Spannungen in der Konstruktion. Diesem Vorgehen liegt der Gedanke zugrunde, dass an identen Stellen die Spannungen von Referenz- und Bewertungszustand modellbedingt in hinreichender Genauigkeit gleichermaßen über- oder unterschätzt werden.

Die Spannungsbilder der Probekörpermodelle liefern Referenzspannungszustände, die mit Spannungsbildern eines beliebigen Belastungszustandes verglichen werden können. Dieses Vorgehen gilt sinngemäß auch für die Komponenten aus Glas und die Verbundfolie. Für die Einzelkomponenten haben wir damit ein Werkzeug zur Verfügung, dass eine erste Bewertung über die Verträglichkeit eines Belastungszustandes erlaubt. Der Vergleich von Spannungsbildern ist lediglich als „weiches“ Kriterium zu verstehen, welcher weiterführende Versuche und Berechnungen keinesfalls ersetzen kann. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird in den Auswertungen ausschließlich die Veränderung zur Referenz dargestellt. Spannungen, die der Betrachtung zugrunde liegen, sind ausnahmslos in Anhang D zu finden. Eine Verfeinerung der Modelle zur Verbesserung der Aussagequalität der auftretenden Spannungen ist in einem nächsten Schritt anzustreben.

5.2 Numerische Interaktionsbetrachtungen

Um der Beanspruchung in einem Faltwerk Rechnung zu tragen, ist die Interaktion der Belastungsmoden von Interesse. Untersucht werden lineare Interaktionen gemäß Tabelle 32.

Tabelle 32 Kombinationsbeiwerte für die Interaktionsbetrachtung

Last Interaktion [1]					Kombinationsschema						
Mode	M	Z	D	T	MZ	MD	MT	TZ	TD	MTZ	MTD
M	1	-	-	-	0,5	0,5	0,5	-	-	0,33	0,33
Z	-	1	-	-	0,5	-	-	0,5	-	0,33	-
D	-	-	1	-	-	0,5	-	-	0,5	-	0,33
T	-	-	-	1	-	-	0,5	0,5	0,5	0,33	0,33

[1] Referenzlast zur Ermittlung der Referenzspannungen je Mode = Grenzwert je Mode

Unter Verwendung der Spannungsbilder der Probekörpermodelle wird versucht, die Brauchbarkeit der vorgeschlagenen Interaktion zu bewerten. Beurteilt wird, ob

die Spannungen zufolge Interaktion die Referenzspannungen an kritischer Stelle maßgeblich überschreiten. Obwohl dieser Betrachtung Spannungen zugrunde liegen, werden nicht Versagenshypothesen auf ihre Einhaltung überprüft. Bei den Einlaminierteilen wird demnach nicht das Fließkriterium an einem Punkt, sondern das Spannungsbild an gewählter Stelle mit den Werten der Referenz verglichen. Dieses Bewertungsprinzip findet auf alle Bauteile sinngemäß Anwendung.

5.2.1 Modellbildung

Die Modellierung der Volumenkörper erfolgt mit Autodesk Inventor. Die validierten Modellannahmen und Vereinfachungen der Probekörpermodelle gemäß Kapitel 5.1.1 finden konsequente Anwendung. Das Interaktionsmodell (Abb. 90) unterscheidet sich in der Lagerung von den Probekörpermodellen. Entlang der Längsseiten wird stirnseitig gelagert und gegenüberliegend die Last beaufschlagt. Gemäß Tabelle 32 werden am Interaktionsmodell Hauptbelastungsrichtungen (Moden) und kombinierte Beanspruchungen berechnet und untersucht. Die Nietenvorspannung wird für die Interaktionsberechnung nicht variiert. Alle Modelle werden ausschließlich mit einem Anzugswert von 3650N/Niete simuliert. Bei kombinierten Beanspruchungen entsprechen die Lastunterteilungen (Substeps) Tabelle 31.

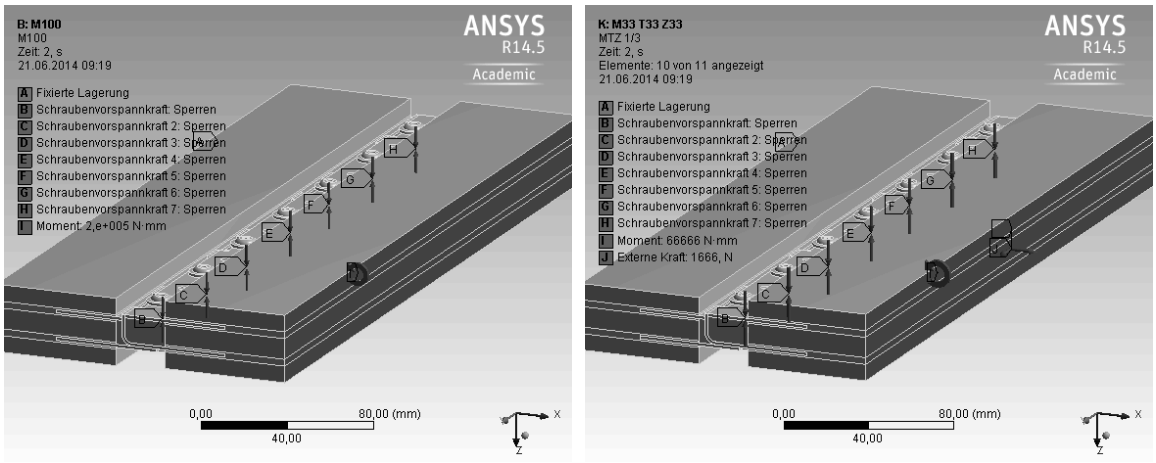


Abb. 90 Interaktionsmodell 180°: Referenz M (li.) und Interaktion MTZ (re.)

5.2.2 Numerische Interaktion 180°

In Abb. 91 sind die Auslastungen getrennt nach Hauptbelastungen (Mode) und Einlaminierteilen dargestellt. Für jeden Mode wird zusätzlich zu den Auslastungen der Einlaminierteile die maximale Versuchs- und die Referenzlast des jeweiligen Versuchs angeführt. Letztere entspricht der Interaktionslast aus Tabelle 30. Die Referenzspannungen der Probekörper werden den Referenzspannungen am Modell 180° gegenübergestellt (*Referenzspannungen NEU*). Einflüsse aus dem Modell-

wechsel können so erkannt werden. Aufgrund der für die Interaktionsberechnung notwendigen Freiheitsgrade zur Lastaufbringung ist die Modellbildung der Lagerung mit Einschränkungen versehen. Bei den Einlaminierteilen bewegen sich die *Referenzspannungen NEU* in der Regel um 5-10% um die Referenzspannungen der Proben. Eine nennenswerte Überschreitung ist bei EL3 unter Schubbeanspruchung zu beobachten (43%). Aufgrund der gewählten Lagerung kommt es infolge Exzentrizität zu einer zusätzlichen Beanspruchung, die unter realen Bedingungen nicht auftritt, da die Scheibe in ihrer Lage gegen ein Verdrehen fixiert ist. Bei EL3 kommt es auch unter Zuglast zu einer Varianz jenseits von 10%, die auf den Modellwechsel zurückzuführen ist.

Modellwechselbedingte Schwankungen von 5-10% werden zwar als unkritisch erachtet, um den größeren Abweichungen Rechnung zu tragen, wird in weiterer Folge aber mit den *Referenzspannungen NEU* verglichen. Abb. 91 zeigt eine gute Übereinstimmung der Auslastungen für die Referenzspannungen der Probe mit den *Referenzspannungen NEU*. Unter Berücksichtigung der vorangegangen Ausführungen und Ergänzungen kann man von der Brauchbarkeit des Interaktionsmodells für die vorliegende Arbeit ausgehen. Die betrachteten Spannungen, ihre

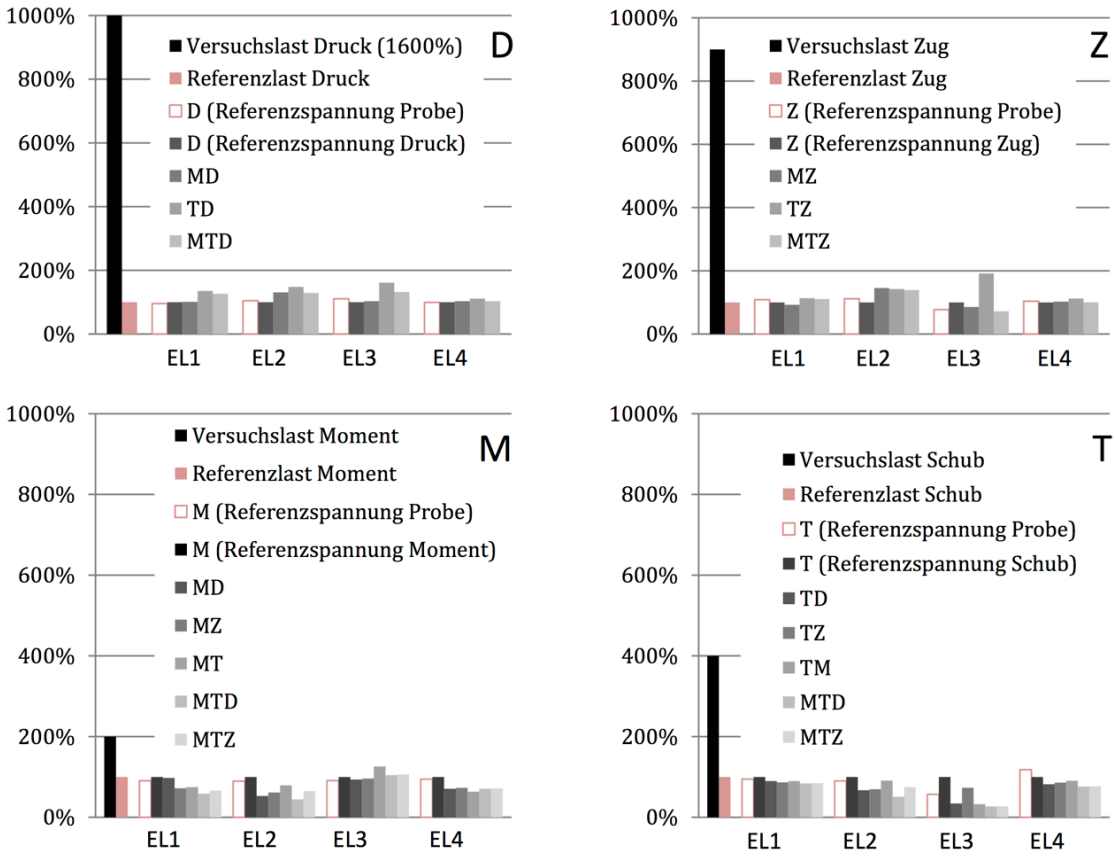


Abb. 91 Auswertung der Einlaminierteile für die Interaktion 180°

Stellen der Auswertung sowie ergänzende Kommentare können Anhang D entnommen werden. Für die Bewertung der Anbindung unter kombinierter Beanspruchung wird das Spannungsbild jeder Interaktion mit den *Referenzspannungen NEU* der beteiligten Moden verglichen. Einer Spannung infolge von Interaktion ist immer eine Referenzspannung an gleicher Stelle gegenüberzustellen. Die Spannungsbilder der Einlaminierteile bedienen sich der Mises-Vergleichsspannung. Interaktionen mit T führen bei Mode D und Z zu einer Überschreitung der Referenzspannung. Wie aus Abb. 91 ersichtlich, sind die Versuchslasten der Moden für Belastungen in der Ebene um ein Vielfaches größer als die gewählte Interaktionsgrenze. Demnach ist das Überschreiten von 100% nicht mit einer Verbandsauflösung gleichzusetzten. Für Mode M kommt es für Interaktionen mit T nur bei EL3 zu einer nennenswerten Überschreitung. Wie zuvor erwähnt, kommt es infolge Schubbelastung speziell für EL3 zu einer zusätzlichen Belastung aus unbehinderter Verdrehung. Auch treten die Maximalwerte der Spannungen für alle Moden nur lokal begrenzt auf und fallen rasch auf ein unbedenkliches Niveau. Die Spannungsbilder der Interaktion stellen sich grundsätzlich als unbedenklich dar und man kann für die Einlaminierteile von einem brauchbaren Interaktionsschema ausgehen. Analog zu den Hauptbelastungen finden sich die zugrundeliegenden Spannungen, ihre Lage sowie ergänzende Erklärungen zur Auswertung in Anhang D.

Die Auslastung der Glasspannungen ist in Abb. 92 zusammengefasst. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der FEM-Werte der Proben mit den Ergebnissen des Interaktionsmodells.

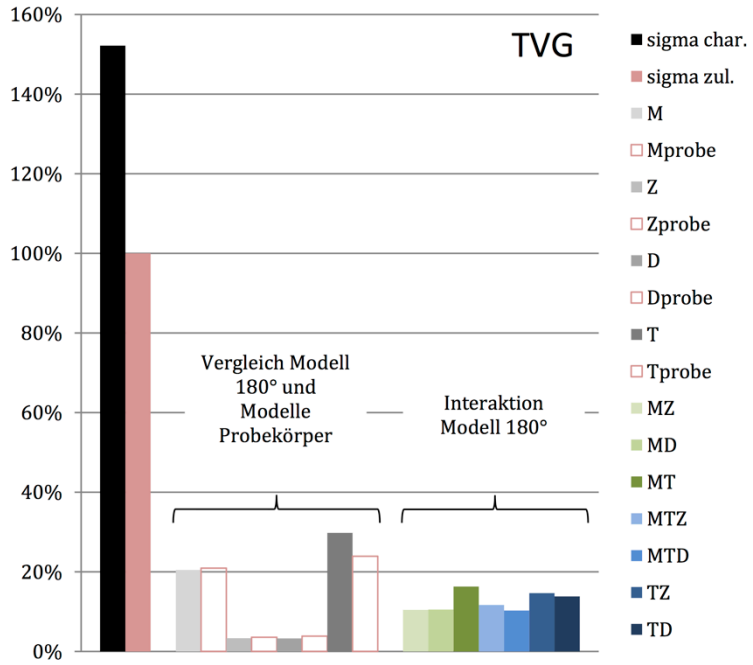


Abb. 92 Auswertung Glas für die Interaktion 180°

Abweichend von der Vereinbarung der Referenzspannungen wird hier die Auslastung auf die zulässige Spannung von TVG bezogen. Auch in diesem Fall wollen wir nicht von einem klassischen Spannungsnachweis sprechen und erklären das Vorgehen mit einer weiteren Plausibilitätskontrolle der Modelle. Während der Versuche kam es bei entsprechender Versuchsdurchführung nicht zum Glasbruch. Die Referenzspannungen der Hauptmoden liegen klar im zulässigen Bereich. Multipliziert man in einer Abschätzung die Auslastung der Hauptmoden mit dem Quotienten aus den zugehörigen Versuchs- und Interaktionslasten, liegen die Glasspannungen weiterhin im zulässigen Bereich. Auch die Hauptzugspannungen der Interaktionen liegen eindeutig in einem unkritischen Bereich. Die zahlenmäßigen Werte sind in Anhang D zusammengefasst.

Zur Bewertung der Verbundfolie (siehe Abb. 93) wird die errechnete Maximalreferenzschubspannung der Hauptmoden unter kurzer Lasteinwirkung verwendet. Die Numerik liefert lokale Spitzenspannungen. Diese Stellen sind auf Dauerhaftigkeit zu untersuchen, da sie Ausgangspunkte für Delaminationen darstellen können. Die unter Kapitel 5.1.8 gemachten Aussagen gelten sinngemäß, für eine betragsmäßige Auswertung der Schubspannungen sind entsprechende Modellverfeinerungen vorzunehmen. Das Interaktionsmodell liefert unter Schubbelastung größerer Werte als das Modell des Probekörpers, was auf die unbehinderte Verdrehung infolge der Lastausmitte zurückzuführen ist.

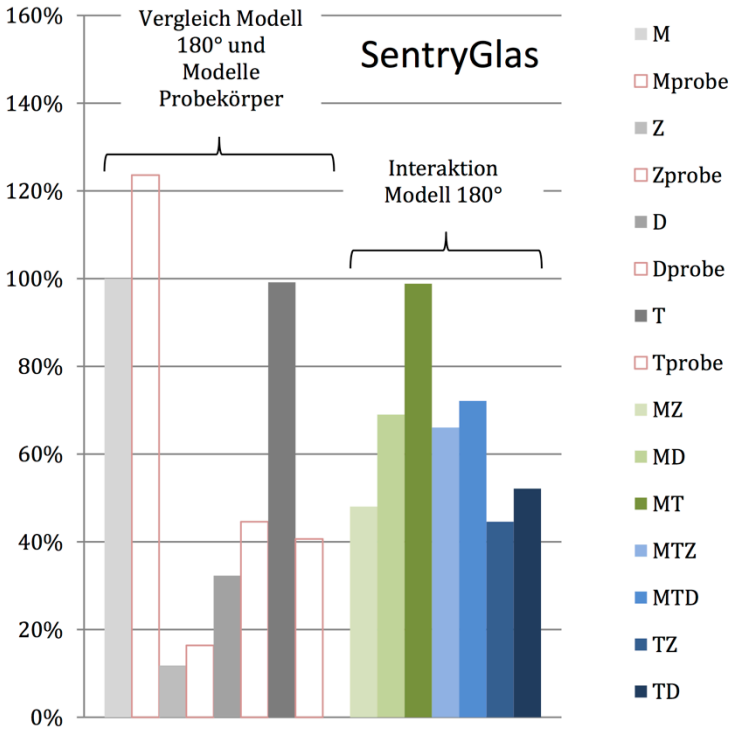


Abb. 93 Auswertung SentryGlas für die Interaktion 180°

Die durchgeführten Versuche erlauben keinen Rückschluss auf die zulässigen Schubspannungen unter ständiger Belastung. Hier sind weitere Versuche notwendig. Für den betrachteten Fall der kurzzeitigen Beanspruchung übersteigen die errechneten Referenzschubspannungen infolge Interaktion den Maximalwert nicht. Die Interaktion kann auch für die Verbundfolie in einem ersten Schritt als verträglich angesehen werden. Die Auswertung und entsprechende Erklärungen sind in Anhang D zusammengefasst.

Für den Vergussmörtel wird ein analoger Ansatz gewählt. In Abb. 94 wird mit dem errechneten Minimalwert der Hauptspannungen verglichen. Als Referenz (100%) wurde der numerische Wert für Mode M gewählt. Die Verwendung des Wertes unter Schubbelastung ist aufgrund der erwähnten Lastausmitte nicht sinnvoll. Ein Vergleich der Werte der Hauptbelastungen am Interaktionsmodell mit den Werten der kombinierten Beanspruchung zeigt keine Überschreitungen der gewählten Referenz bei Interaktion. Betrachtet man die Spannungsbilder der Hauptdruckspannungen in Anhang D, sieht man, dass, abgesehen von lokalen Effekten, die zulässigen Werte nicht überschritten werden (<65MPa [111]). Rechnerisch kommt es im Bereich des Verbindungsspiels der Nieten zu Überschreitungen der zulässigen Druckspannungen. Da der Verguss allseitig umschlossen ist, kann von einer erhöhten Beanspruchbarkeit ausgegangen werden, zulässige Werte unter behinderter Querdehnung müssen aber über weitere Versuche gefunden werden.

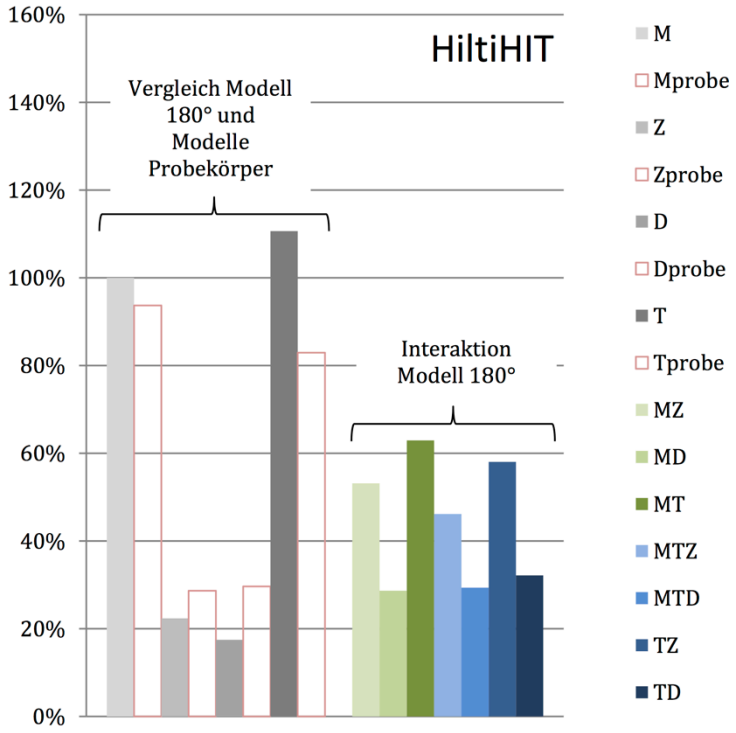


Abb. 94 Auswertung Verguss für die Interaktion 180°

Zur vollständigen Betrachtung der Anbindung sollen noch die Verbindungsmittel diskutiert werden. In Abb. 95 werden hierzu die Betriebslasten einer Niete ausgewertet. Die Änderung der Betriebskraft der Niete bewegt sich in einer Bandbreite von ±10% um den Anzugswert. Der Maximalwert der Betriebslast aus den Hauptmoden wird unter Interaktion nicht überschritten. Erwartungsgemäß sind die Verbindungsmittel nicht versagenskritisch. Eine Zusammenfassung der Auswertung ist in Anhang D zu finden.

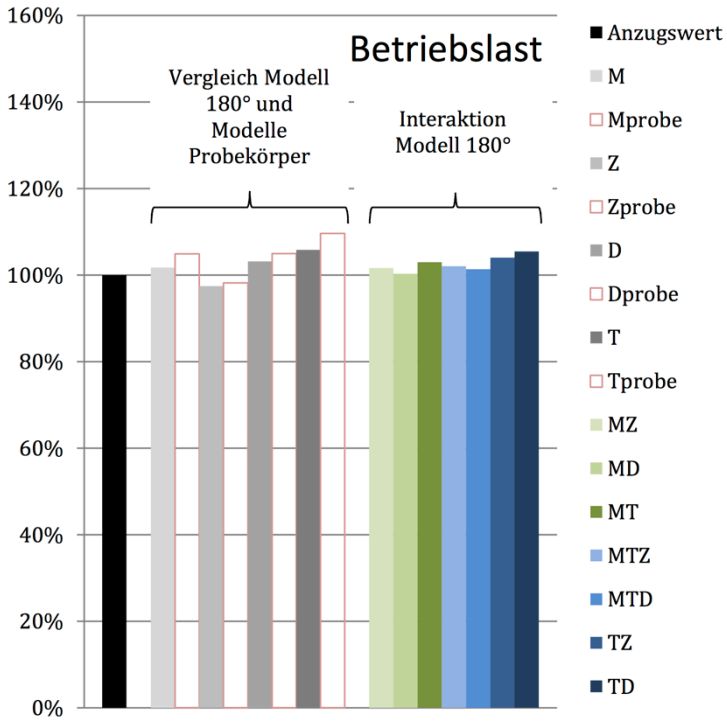


Abb. 95 Betriebslasten einer Niete für die Interaktion 180°

5.2.3 Zusammenfassung der Auswertung

Die Auswertung der Numerik bestätigt die Beobachtungen der Versuche. Die Glasspannungen stellen sich als unkritisch dar. Bei den Einlaminierteilen kommt es lediglich zu lokalen Spannungsspitzen, die der beobachteten linearen Last-Verschiebungscharakteristik in den festgelegten Grenzen nicht widersprechen. Lokale Spannungsspitzen bei Rückschnitten und Kerben bauen sich in der Realität rasch ab und beeinflussen die Steifigkeit der Anbindung nicht maßgeblich. Unter Beachtung der gemachten Einschränkungen wollen wir für diese Arbeit von einem verträglichen Interaktionsschema ausgehen. Versuche zur Validierung der vorgestellten Interaktion sind anzustreben. Bevor man den Schritt in Richtung eines Bemessungskonzeptes wagt, sind eingehende Untersuchungen der Verbindung unter Dauerlast und zyklischer Beanspruchung unumgänglich.

5.3 Numerik zum Einfluss des Knickwinkels

Für eine Anwendung der Anbindung in einem Faltwerk ist der Einfluss des Anstellwinkels auf die Auslastung von Interesse. Die Änderung der Auslastungen wird anhand von Modellen mit variablem Winkel für die Grenzlasten der Interaktion untersucht.

5.3.1 Modellbildung

Unter Anwendung der Modellannahmen und Vereinfachungen gemäß Kapitel 5.1.1 werden Modelle für Knickwinkel von 180° bis 60° in Schritten von 30° berechnet. Das Verbindungsdetail wird als parametrisches 3D-Modell in Autodesk Inventor modelliert. Durch Eingabe des Knickwinkels kann das Detail variiert und über eine uni-direktionale Schnittstelle an ANSYS übergeben werden (Abb. 96). Das FEM-Modell muss so nur einmal konfiguriert werden. Material und Kontaktdefinitionen, Vernetzungsmethoden und Netzfeinheiten werden entsprechend den Probekörpermodellen übernommen. Die Kickmodelle unterscheiden sich in der Lagerung von den Modellen der Probekörper, die auch die Lasteinleitung abbilden. Analog zum Interaktionsmodell 180° wird an einer Längsseite gelagert, an der abgewandten belastet sowie die Nietenvorspannung nicht variiert.

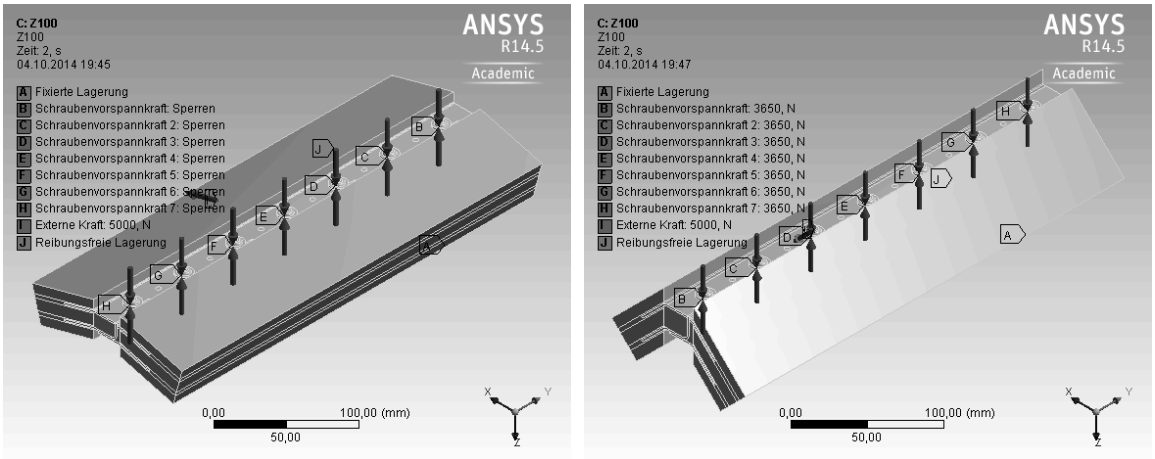


Abb. 96 Parametrisches Modell 150° (li.) und 90° (re.)

Da bei den Knickmodellen nur die Hauptbelastungsrichtungen untersucht werden, kann die Lagerung verbessert werden. Für den Mode M ist die Lagerung unverändert. Bei Mode Z und D wird zusätzlich die Scheibe der Lastseite in ihrer Ebene und bei Mode T darüber hinaus die Stirnseite der Lasteinleitung reibungsfrei gelagert. Diese zusätzlichen Lagerungen verhindern Verdrehungen durch geometrisch bedingte Ausmitten an den geknickten Modellen. Für die Moden Z und D wurde das Modell zusätzlich spiegelsymmetrisch gelagert bzw. belastet. Um der fehlenden

Belastungssymmetrie gerecht zu werden, wurde von beiden Seiten in das System eingerechnet. Die zahlenmäßigen Werte, die der Auswertung zugrunde liegen, sind in Anhang D zusammengefasst.

5.3.2 Numerische Untersuchung der Knickwinkel 150° / 120° / 90° / 60°

Analog zum Interaktionsmodell 180° werden die Einlaminierteile getrennt nach den Hauptbelastungsrichtungen ausgewertet. Vergleicht man in Abb. 97 die *Referenzspannung NEU* mit den Werten der Probe, erkennt man in der Regel einen Rückgang der Auslastungen. Vor allem bei Mode T erkennt man eine deutliche Annäherung zwischen den Werten der Modelle. Mit abnehmendem Winkel kommt es für Belastungen in der Ebene zu einer tendenziellen Zu- und für die Belastungen aus der Ebene zu einer tendenziellen Abnahme der Auslastungen. Sieht man von lokalen Effekten an Stellen von Modellvereinfachungen ab, stellen sich auch diese Spannungsbilder grundsätzlich als unkritisch dar. Ein Vergleich mit den maximalen Prüflasten ist hier nur mit dem Modell 180° sinnvoll, da für davon abweichende Winkel keine entsprechenden Testdaten vorliegen. Die zahlenmäßigen Werte und die Stellen der Auswertung können Anhang D entnommen werden.

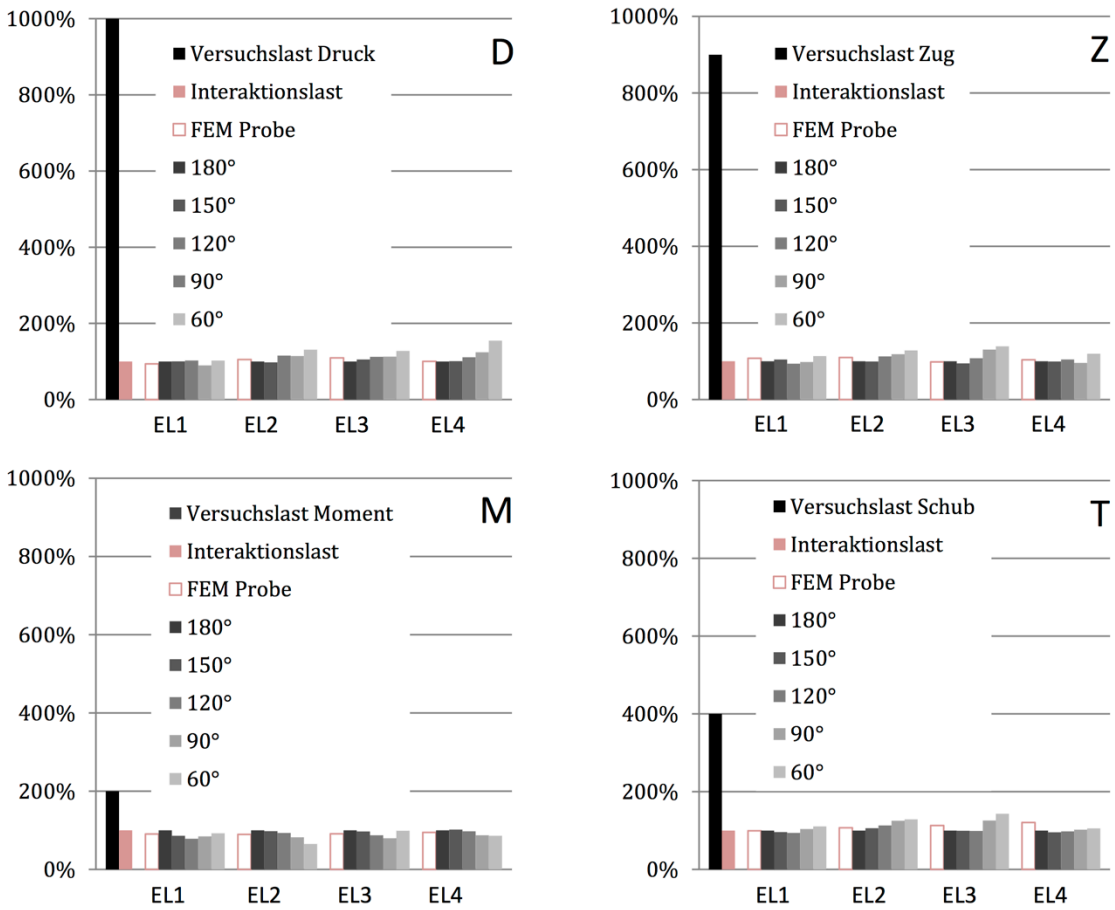


Abb. 97 Auswertung der Einlaminierteile für variable Knickwinkel

Die Auswertung der Glasspannungen in Abb. 98 (o.l.) zeigt für alle Belastungsmoden eine Zunahme der Auslastung mit abnehmendem Knickwinkel. Die numerischen Werte lassen auch hier das Ausbleiben eines Glasbruchs für die festgelegten Lastgrenzen vermuten. Für den Vergussmörtel sehen wir in Abb. 98 (o.r.) für alle Moden eine tendenzielle Abnahme der Auslastungen. Die Werte der Verbundfolie zeigen bei Mode M eine Abnahme und bei allen Belastungen in der Ebene eine tendenzielle Zunahme der Auslastungen (Abb. 98 u.l.). Die Maximalwerte der Schubspannung von Probe M werden nicht maßgeblich überschritten. Die unter Kapitel 5.2.2 gemachten Aussagen zu den zulässigen Spannungen gelten sinngemäß. Auch für die Knickmodelle bewegen sich die Betriebslasten der Nieten in Grenzen von ±10% um den Anzugswert (Abb. 98 u.r.). Die betragsmäßigen Werte, die den Auswertungen zugrunde liegen, können Anhang D entnommen werden.

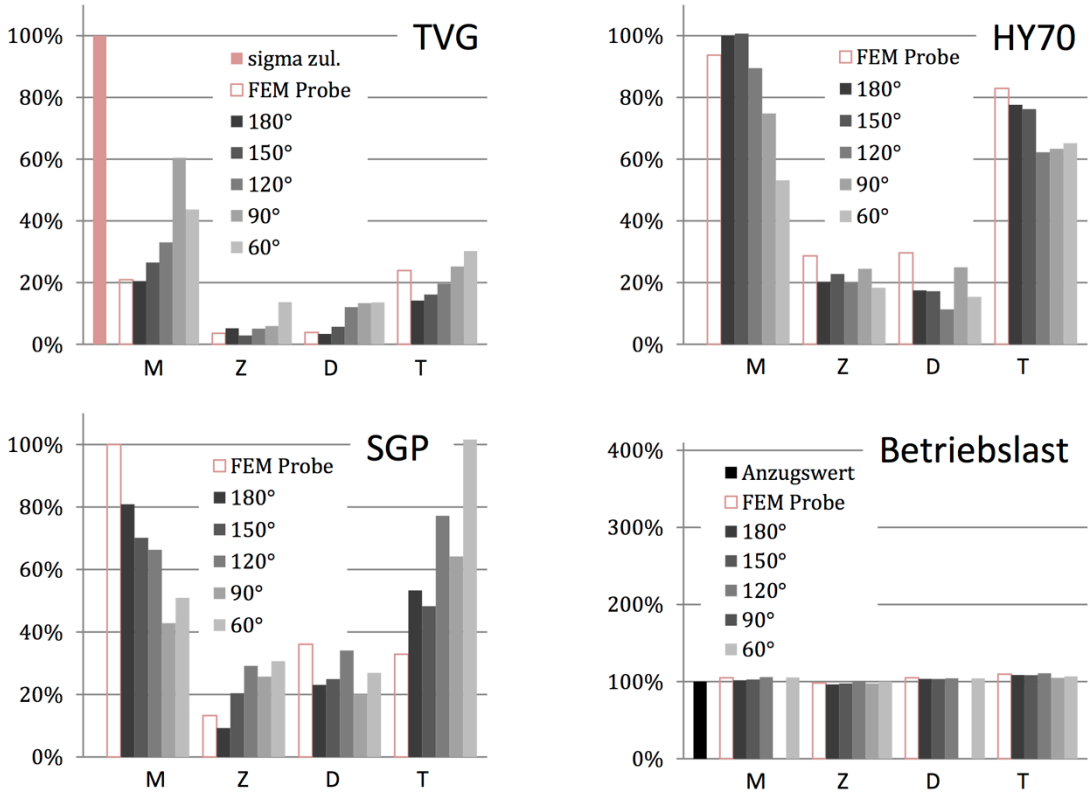


Abb. 98 Auswertung der Ausnutzung für unterschiedliche Komponenten in Abhängigkeit vom Knickwinkel

5.3.3 Zusammenfassung der Auswertung

Die vorangegangenen Auswertungen zeigen ein grundsätzliches Ansteigen der Auslastungen mit abnehmendem Winkel. Die laut Numerik prognostizierten Veränderungen erscheinen unbedenklich. Bei den Einlaminierteilen sind es lokal begrenzte Effekte und die Auswertung der restlichen Komponenten legt nahe, dass

die Maximalwerte der Referenzen bzw., wo bekannt, die zulässigen Spannungen nicht überschritten werden. Für die vorliegende Arbeit können wir von einer Verwendbarkeit der Anbindung unter den Hauptbelastungsmoden ausgehen. Versuche zur Validierung der Modelle sind anzustreben.

5.4 Grenzen der Modelle

Die vorgestellten Modelle und numerischen Betrachtungen sind ein erstes Werkzeug, um die Anbindung für einen Einsatz unter kombinierter Belastung bzw. variablem Winkel zu bewerten, und kein Vorschlag für ein Bemessungskonzept. Die verwendeten Modellvereinfachungen erlauben keine Aussage über die real auftretenden Spannungen in den Einlaminierteilen. Auch sind die diskutierten Modelle für eine eingehende Diskussion der Verbundfolie und der Klebefläche wenig geeignet. Es muß hier auf verfeinerte Modelle zurückgegriffen werden. Die am 180°-Modell vorgenommenen Interaktionsbetrachtungen müssen in einem nächsten Schritt auf die geknickten Modelle übertragen werden.

5.5 Berechnungen am Globalsystem

Betrachtungen am Globalsystem werden mit der Finite-Elemente-Software Dlubal RFEM4 durchgeführt. Abweichend zu den detaillierten Simulationen der Anbindung in ANSYS werden die Berechnungen zu Verbandsauflösung und Stabilitätsversagen an einem reduzierten System durchgeführt (Abb. 99). Im Folgenden werden die Modellbildung und damit einhergehende Vereinfachungen diskutiert.

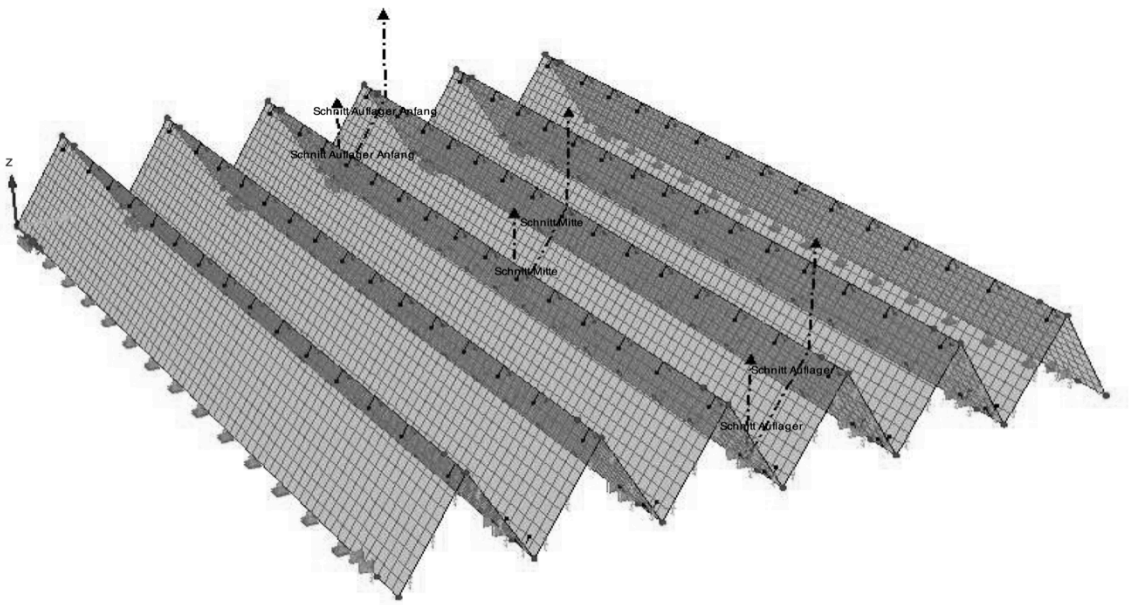


Abb. 99 Globalmodell für die Tragwerksberechnungen

5.5.1 Modellbildung

Aufbauend auf den gemessenen Last-Verformungseigenschaften der Verbindung (Tabelle 33) wird das Detail im Globalmodell (Abb. 99) unter Anwendung der Formeln (1) durch Federelemente abgebildet (Tabelle 34). Im verwendeten Berechnungsprogramm kann man über die Funktion *Liniengelenk* Verbindungssteifigkeiten entlang der Scheibenkanten definieren. Untersucht wird eine Struktur mit paralleler Faltung für variable Faltwinkel und Faltenbreiten (Tabelle 37). Die Tragwerke sind gemäß einem Balken auf zwei Stützen an der unteren Faltung über eine Länge von 300mm gelagert, die Randscheiben und Stirnseiten zudem vertikal. Im Bereich lokaler Lagerung ist eine elastische Stützung mit 10.000kN/m² modelliert, um Spannungsspitzen zu reduzieren.

$$F_i = k_i \times u \qquad i = Z, D, T, V; \qquad M = k_\varphi \times \varphi \qquad (1)$$

Tabelle 33 Versuchslasten und Verformungen zur Berechnung der Steifigkeiten

		Z	D	T	V	M
Last		5[kN]	10[kN]	40[kN]	10[kN]	200[Nm]
Anbindungslänge	[mm]	350	350	700	700	350
$u_{max,Versuch}$	[mm]	0,05	0,015	0,20	0,35	4,6
$u_{min,Versuch}$	[mm]	0,01	0,001	0,15	0,25	3,8
$u_{MW,Versuch}$	[mm]	0,03	0,008	0,175	0,30	4,2
u_{ANSYS}	[mm]	0,036	0,007	0,161	0,30	5,50
Abweichung	[%]	+17	-14	-9	-	+24

Tabelle 34 Verbindungssteifigkeiten des Anbindungsdetails

	k_Z	k_D	k_T	k_V	k_φ
	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/m²]	[kN/RAD/m]
ANSYS	396.825	4.081.633	354.925	47.619	32
Versuch MW	476.190	3.571.429	326.531	47.619	43
Modell RFEM	480.000	3.600.000	330.000	48.000	35

Die Ersatzdicke der Verbundgläser wird für die Grenzwerte voller Verbund und kein Verbund gemäß DIN 18008 [125] wie in Formel (2) ermittelt. Auf eine Berechnung in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsdauer (vgl. [126][127][128]) wird in dieser Arbeit zugunsten der gewählten Schwellenbetrachtung verzichtet. Das Eigengewicht der Modelle voller Verbund berücksichtigt nur das Glasgewicht. Für den Fall voller Verbund wird die Dichte angepasst, um der Ersatzdicke Rechnung zu tragen. Im Zuge dieser Anpassung wird der Wert von 5150kg/m³ auf 5950kg/m³ angehoben, um das Eigengewicht von Verbundfolie und Anbindung zu berücksichtigen. Die Belastungen aus Eigengewicht unterscheiden sich demnach um ~15%. Die verwendeten Modellmaterialien sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 35 Modellmaterialien RFEM

Beschreibung	t [mm]	ρ [kg/m³]	E [N/mm²]	ν [-]	G [N/mm²]
Glas (voller Verbund)	26	2500	70000	0,23	28000
Glas (ohne Verbund)	12.6	5950	70000	0,23	28000

$$d^* = d_1 + d_2 + \cdots \quad \text{voller Verbund} \qquad (2)$$

$$d^* = \sqrt[3]{d_1^3 + d_2^3 + \cdots} \quad \text{ohne Verbund}$$

Zusätzlich zum Eigengewicht werden die Modelle mit flächennormalen Lasten beaufschlagt. Die Laststeigerung erfolgt stufenweise in 0.5kN-Schritten auf 2kN/m2. Die Lastfälle gemäß Tabelle 36 werden nach Theorie I. Ordnung berechnet. Es werden charakteristische Schnittkräfte ermittelt.

Tabelle 36 Untersuchte Lastfälle

Lastfall	I	II	III	IV	V
EG (Tabelle 35)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Nutzlast [kN/m²]	-	0.5	1.0	1.5	2.0
γ,ψ	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Die Normalkräfte dienen der Bestimmung von Eigenformen und Verzweigungslastfaktoren und erlauben eine Einschätzung der Struktur auf ihre Stabilitätsgefährdung. Details zur Eigenwertanalyse in RFEM finden sich in [129]. Darüber hinaus finden die Schnittgrößen Eingang in die Interaktionsbetrachtung zur Untersuchung der Anbindung auf Verbandsauflösung.

Die Modelle werden mit Elementen vom Typ MITC4 (Reissner-Mindlin) berechnet [130]. Die Netzfeinheit wird mit 0,10m festgelegt.

Tabelle 37 Übersicht der untersuchten Globalmodelle

Winkel	Spannweite	7,5[m]			15[m]		
	Faltenbreite	1[m]	2[m]	3[m]	1[m]	2[m]	3[m]
60°		VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV
90°		VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV
120°		VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV
150°		VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV	VV/OV

VV ... voller Verbund OV ... ohne Verbund

5.5.2 Modellkontrolle

Die Implementierung der Nachgiebigkeit entlang der Anbindung wurde über Kontrollmodelle getrennt nach den Hauptbelastungen untersucht (Abb. 100).

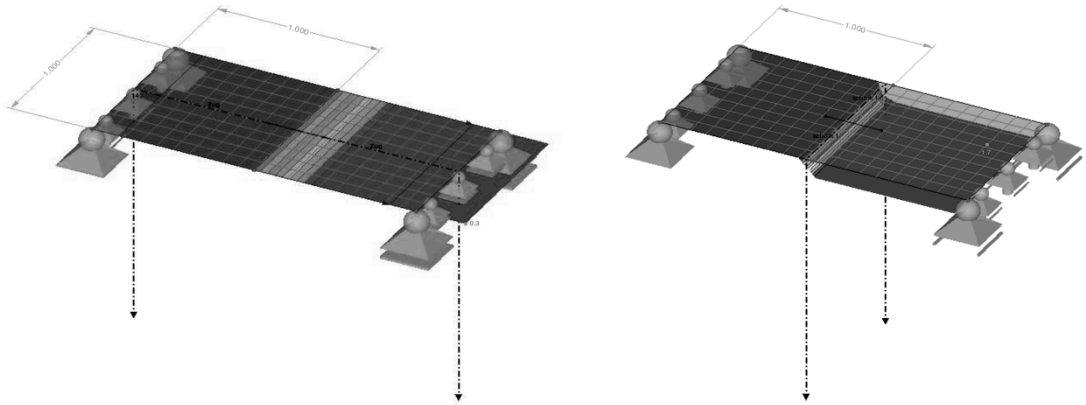


Abb. 100 Kontrollmodelle der Federelemente für Zug (li.) und Schub (re.)

Die Federsteifigkeiten sind zwischen benachbarten Elementen, mit Ausnahme von k_φ, im Sinne einer Reihenschaltung aufzuteilen. Die Einzelsteifigkeiten entsprechen demnach dem Zweifachen der in Tabelle 34 angeführten Werte. Für k_φ erhält man

bei Verwendung des Tabellenwertes das gewünschte Last-Verformungsverhalten. Ein Auslesen der Anschlusskräfte kann nicht an der Kante erfolgen. Grund hierfür ist die programmtechnische Umsetzung des Liniengelenks, die in der ersten Elementreihe die Steifigkeit anpasst. Korrektes Kräfte-Gleichgewicht ist ab der zweiten Elementreihe gegeben. Berechnungen haben gezeigt, dass bei gewählter Netzfeinheit die Grundschnittgrößen unterschätzt werden. Für ein untersuchtes Modell wurden Abweichungen von ~10% beobachtet (Tabelle 38).

Tabelle 38 Einfluss der Netzfeinheit bei Modell 60°/7,5m/1m VV

Elementgröße	[cm]	10	5	2,5	1,25
Scheibenkraft n_x Lastfall I	[kN/m]	27,12	29,13	29,59	29,74
Veränderung	[%]	-	6,9	1,6	0,5

Mit zunehmender Netzfeinheit wandert die Stelle der Auswertung näher an die Faltung und die Kräfte zeigen konvergentes Verhalten. Für eine Bemessungsaufgabe ist eine entsprechende Netzfeinheit zu wählen. Die Frage, ob Verbandsauflösung oder Plattenbeulen zum Tragwerksversagen führen, kann aufgrund der klaren Differenzierung der Ergebnisse bereits mit der gewählten Netzdichte beantwortet werden. Auf analytische Vergleichsrechnungen wie in [27][131][132] wird aufgrund der Anbindungssteifigkeiten verzichtet.

5.5.3 Stabilität und Verbandsauflösung

Die in Tabelle 37 beschriebenen Modelle werden unter Verwendung der Interaktionsbeziehung aus Kapitel 5.2.2 auf eine mögliche Verbandsauflösung untersucht. Die hierfür notwendigen Schnittgrößen werden gemäß den Anmerkungen in Kapitel 5.5.2 ausgelesen und den Grenzlasten der Interaktion gegenübergestellt (Tabelle 39). Die Auswertung der Auslastung für die kombinierte Beanspruchung nach Formel (3) erfolgt getrennt nach Lastfällen.

$$\frac{M_y}{M_{y,Grenz}} + \frac{D_y}{D_{y,Grenz}} + \frac{T_x}{T_{x,Grenz}} \leq 1 \quad \text{bzw.} \quad \frac{M_y}{M_{y,Grenz}} + \frac{Z_y}{Z_{y,Grenz}} + \frac{T_x}{T_{x,Grenz}} \leq 1 \qquad (3)$$

Tabelle 39 Grenzlasten der Interaktion

$M_{y,Grenz}$	$T_{x,Grenz}$	$Z_{y,Grenz}$	$D_{y,Grenz}$
0,57kNm/m	57,14kN/m	14,29kN/m	28,57kN/m

Zahlenwerte können Anhang E entnommen werden. Die Auslastung der Anbindung steigt mit zunehmender Spannweite und abnehmendem Verbund. Mit ansteigender Scheibenbreite nimmt die Momentenbelastung zu. Der Schubfluss und die Scheibenkräfte, die parallel zur Fuge in der Ebene wirken, nehmen ab. Es gibt demnach eine ideale Plattenbreite, bei der die Summe der Ausnutzungen ein Minimum ergibt. Das Ansteigen der Auslastung bei abnehmendem Verbund ist den Randmomenten entlang der Anbindung zuzuschreiben. Mit zunehmender Verdrehung der Plattenenden steigt auch das Randmoment. Auf die Schnittgrößen in der Ebene hat der Verbundgrad keinen nennenswerten Einfluss. Die Anbindung wird für jede Faltenbreite an den maßgebenden Stellen für Grat und Kehle ausgewertet. Als solche gelten die Lage des maximalen Schubflusses und des größten Randmomentes, jeweils mit den zugeordneten Schnittgrößen für eine Interaktion nach Formel (3). Am Grat fallen die Maximalwerte aus Moment und Schubbelastung in der Regel nicht zusammen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in Tafel 5 für jede Plattenbreite nur die maßgebende Stelle (maximale Auslastung) der Auswertung aufgenommen. Der Endbereich der Anbindung ist über eine Länge von 300mm von der Bewertung ausgenommen. Durch das „Schüsseln“ der Gläser entstehen in den Ecken Zug- und Druckkräfte, die im Lagerbereich über eine geeignete Konstruktion aufzunehmen sind. Für das untersuchte Tragwerk bietet sich hier zur Kraftausleitung ein an der Kante angeordnetes Profil an. Alternativ kann das Anbindungsdetail im Randbereich entsprechend ausgespart werden. Um numerische Probleme bei der Eigenwertanalyse zu vermeiden, wurde auf letztere Möglichkeit in der Modellbildung verzichtet.

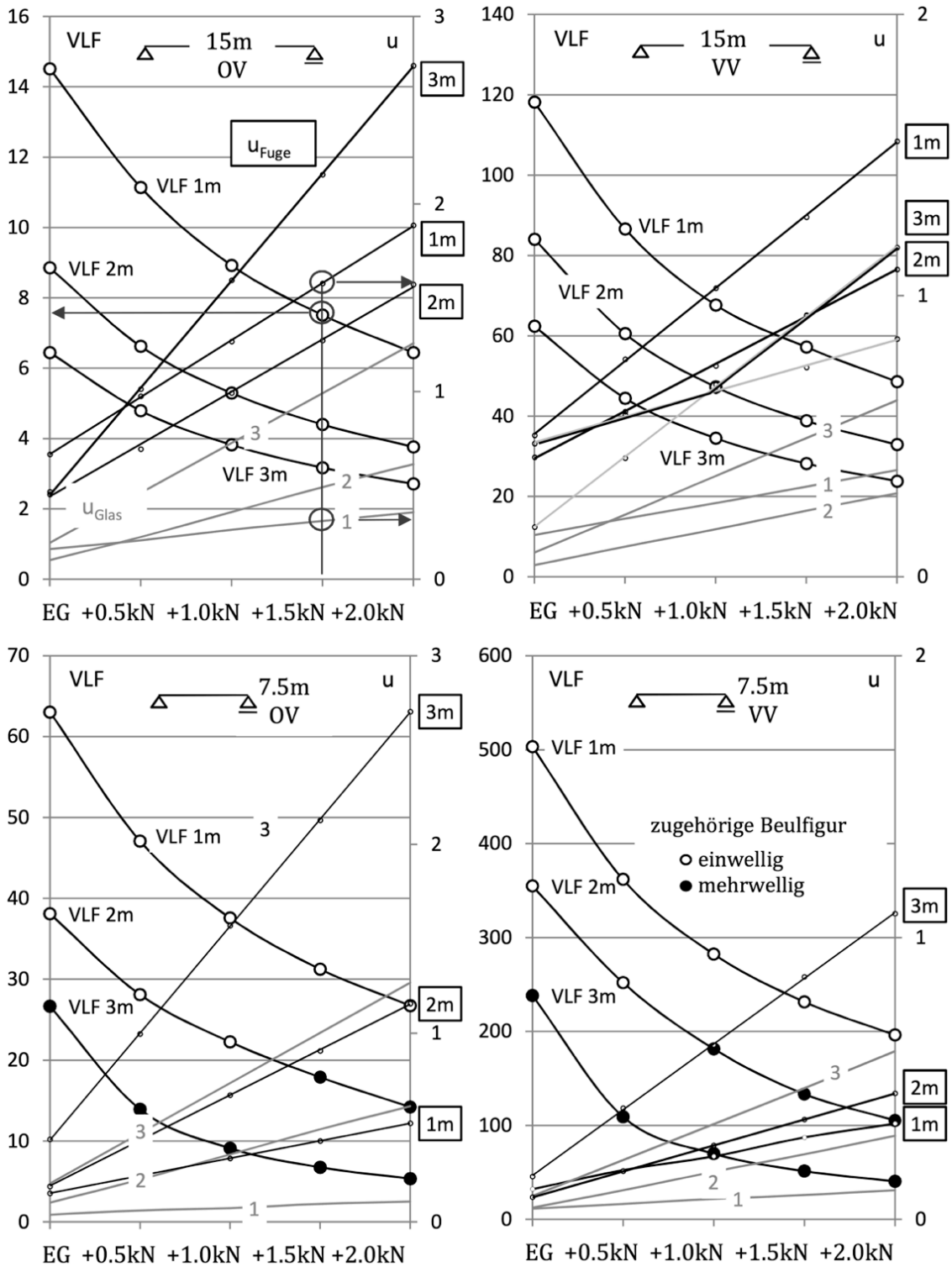
Zur Bewertung der Stabilitätsgefährdung werden für jede Laststufe die ersten zehn Eigenformen und die zugehörigen Verzweigungslastfaktoren berechnet. Der Wert der ersten Eigenform wird dem der Auslastung der Fügekante an die Seite gestellt.

Die Auswertung wird für die Grenzen „ohne Verbund“ (OV) und „voller Verbund“ (VV) sowie für die Spannweiten 7.5m und 15m durchgeführt (vgl. Tafel 5). Die linke Ordinate der Einzeldiagramme ist dem Verzweigungslastfaktor (VLF), die rechte den Auslastungen (u) zugeordnet. Anhand letzterer kann man demnach die Fügekantenauslastung (u_{Fuge}) und die Glasauslastung (u_{Glas}) ablesen.

In Tafel 5 ist ein entsprechendes Lesebeispiel eingetragen. Zieht man bei gewählter Belastung (*gewählt EG +1.5kN*) eine vertikale Hilfslinie, schneidet diese die Auswertungsgeraden bzw. -kurven. Wählt man nun eine Plattenbreite (*zur Auswahl stehen 1m, 2m und 3m - gewählt 1m*), kann man den zugehörigen Verzweigungslastfaktor an der linken und die Glas- und Fügekantenauslastung an der rechten Ordinate ablesen. Im Beispiel ergibt sich für die gewählte Laststufe ein Verzweigungslastfaktor von 7.51, eine Fugenauslastung von 1.58 und eine Glasauslastung

von 0.31. Im gewählten Schnitt ist die Fuge überbeansprucht, Glasauslastung und Verzweigungslastfaktor hingegen würden eine weitere Laststeigerung zulassen.

Tafel 5 Gegenüberstellung von Anbindungs- und Glasausnutzung mit den Laststeigerungsfaktoren für die Faltung 60° und drei Elementbreiten



Mit zunehmender Belastung steigt die Auslastung in der Verbindung. Der Verzweigungslastfaktor sinkt mit einem Ansteigen der Normalkräfte im System. Für die Faltung 60° ist die Verbandsauflösung bei verwendeter Interaktionsbedingung die kritische Versagensart (u>1 bei LSF>1). Ein Vergleich der Laststeigerungsfaktoren zeigt, dass Tragwerke „ohne Verbund“ grundsätzlich stabilitätsgefährdeter sind (LSF(OV)<LSF(VV)).

Unabhängig vom Verbundgrad kommt es mit ansteigendem Faltwinkel zu einer Zunahme der Normalkräfte sowie der Fugenauslastungen und einem Sinken der Laststeigerungsfaktoren (siehe Anhang E für Knickwinkel 90°, 120° und 150°). Bei allen Strukturen ist von einer Verbandsauflösung vor dem Erreichen der kritischen Beullast auszugehen. Ein Stabilitätsversagen kann somit bei den untersuchten Systemen ausgeschlossen werden. Ein plötzliches Versagen im überkritischen Bereich auf Beulen ist ohnehin wenig wünschenswert. Aufgrund der hohen gespeicherten Energie entspricht das Bruchbild auch bei Verwendung von TVG dem des ESG [133], was sich negativ auf die Resttragfähigkeit auswirkt.

Die gefundenen Eigenformen können in zwei Kategorien unterteilt werden, einwellige, zur Verformung affine und mehrwellige Beulfiguren in Scheibenmitte (Abb. 101). In den Auswertungen (Tafel 5 für die Faltung 60°, Anhang E für die weiteren Knickwinkel) werden mehrwellige Beulfiguren über einen Kreis ohne und einwellige über einen Kreis mit Füllung dargestellt. Globale Beulfiguren (Abb. 102 re.) sind zusätzlich mit einem *„g“* gekennzeichnet.

Zur Bewertung der Glasspannungen werden die Hauptzugspannungen an maßgebender Stelle im Auswertungsbereich betrachtet. Für die Modelle „voller Verbund“ kann diese direkt aus dem Programm entnommen werden. Für den Fall „ohne Verbund“ muss man die Grundschnittgrößen auf die korrekten Glasdicken beziehen. Für Faltenbreiten von 1m liegen die Maximalspannungen an den Scheibenrändern, mit zunehmender Scheibenbreite wandern sie zur Faltenmitte. Erstere werden von der fugenparallelen Scheibenkraft und letztere durch Biegung maßgeblich beeinflusst. Der Fall „ohne Verbund“ liefert bei Auswertung an Stellen maßgeblicher Biegebeanspruchung die größeren Spannungen. Liegen die maximalen Glasspannungen im Bereich maximaler Scheibenkräfte, unterscheiden sich die Auslastungen kaum. Ungeachtet dieser Beobachtungen ist auch hier von einer Verbandsauflösung vor Glasbruch auszugehen (u_{Fuge}=1 bei u_{Glas}<1). Die Auslastung der Glasspannungen ist analog zu den Auslastungen der Anbindung in Tafel 5 ausgewiesen. Die Hauptzugspannungen werden mit einem zulässigen Wert von 29MPa [134] verglichen. Die Auswertung kann Anhang E entnommen werden.

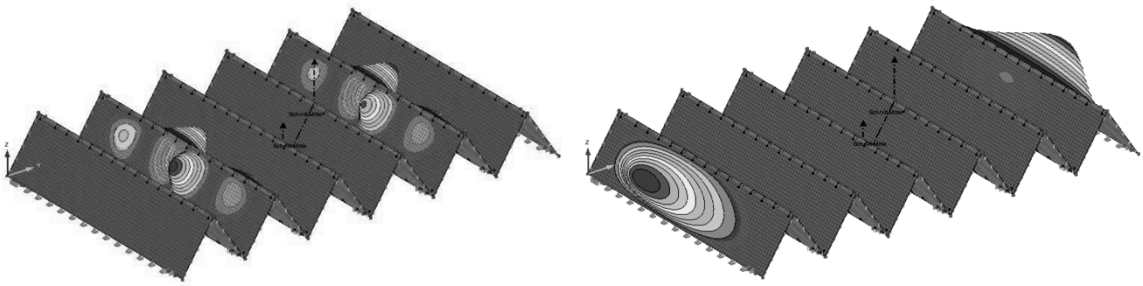


Abb. 101 Mehrwellige (li.) und einwellige Beulfigur (re.)

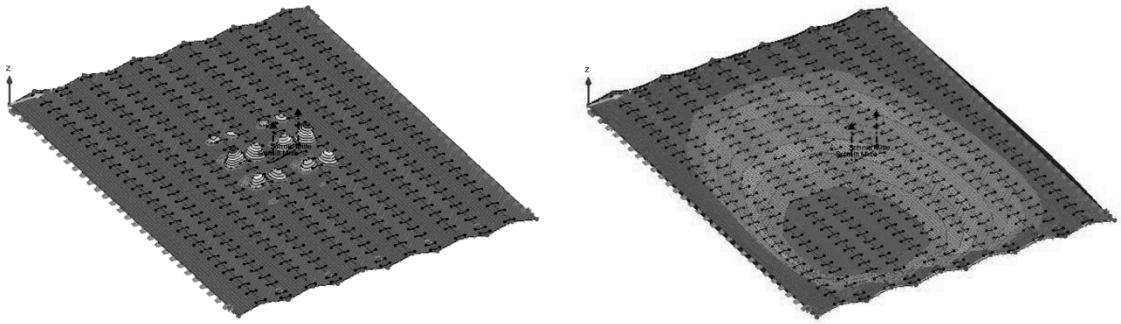


Abb. 102 Mehrwellige (li.) und einwellige globale Beulfigur (re.)

5.5.4 Zusammenfassung der Auswertung

Die Ergebnisse der Untersuchung legen nahe, dass parallele Faltwerke mit Spannweiten von ~15m bei einer Faltung von 60° und einer Plattenbreite von 2-3m grundsätzlich möglich sind, die Überbrückung größerer Spannweiten mit Faltwerken aus Glas scheint denkbar. Limitierend zeigt sich die Anbindung.

Wir erinnern an dieser Stelle, dass es sich hier um kein Bemessungskonzept handelt. Die Verwendung der Interaktionsbeziehung nach Kapitel 5.2.2 ist mit Einschränkungen behaftet. Sie lässt sowohl den Einfluss des Knickwinkels (vgl. Kapitel 5.3.2) als auch die Querkraft infolge Lastweiterleitung durch Biegung unberücksichtigt. Ihr Einfluss auf die Fugenauslastung und die Brauchbarkeit dieser Vereinfachung muss noch eingehender untersucht werden. Die getroffenen Feststellungen gelten zudem ausschließlich für die untersuchten symmetrischen Lastfälle, antimetrische Belastungen werden in vorliegender Arbeit nicht untersucht.

Auch Fragen zur Dauerhaftigkeit oder zum Langzeitverhalten werden in dieser Arbeit nicht behandelt und bedürfen noch eingehender Betrachtung sowie weiterführender Forschung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit wurde ein Verbindungsdetail zur linienförmigen Fügung von Glas vorgestellt. Die Vorzüge der Anbindung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Detail vereint die Vorteile einer geklebten Lösung (gleichmäßiger Lasteintrag) mit denen einer mechanischen (Montage, Glastausch).
- Durch das nachträgliche Vergießen der Anbindung erlaubt das Detail einen Toleranzausgleich während der Montage.
- Über den Verguss wird eine formschlüssige und lineare Anbindung hergestellt.
- Klare Lastweiterleitungsmechanismen in der Anbindung, Zugkräfte werden über die Einlaminierteile in das Glas eingeleitet.
- Die Verbundfolie der Gläser ist in das Anbindungsdetail integriert, was auf eine höhere Systemredundanz hoffen lässt (noch durch entsprechende Versuche zu bestätigen).
- Das Verbindungsdetail ist in der Fuge versteckt angeordnet. Keine vorstehenden Bauteile (Pressleisten oder ähnliches).
- Die Abdichtung der Konstruktion ist mit der statisch konstruktiven Durchbildung abgestimmt.
- Die konstruktive Anbindung kann an kritischen Stellen (Glasecken) ausgespart werden.
- Gutmütige Versagenscharakteristik, die Verbandsauflösung ist durch ein Versagen der metallischen Verbinder und nicht durch Glasbruch gekennzeichnet.

Ein mögliches Vorgehen zur Begutachtung des Verbindungsdetails wurde dargelegt. Die Anbindung wurde versuchstechnisch und numerisch auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht und für einen ausgesuchten Tragwerkstyp im Detail diskutiert. Der gewählte Versuchsaufbau ist in Hinblick auf die Größe der gemessenen Verformungen als kritisch zu bewerten und sollte angepasst werden. Hier ist im Speziellen die Versuchsreihe D (Druck) hervorzuheben. Die durchgeführten Versuche dienten der Validierung von FEM-Modellen. Durch Gegenüberstellung von Versuch und Berechnung konnte ein brauchbarer Modellierungsansatz zur Diskussion der Anbindung gefunden werden.

Für die Anbindung wurde numerisch ein Interaktionsschema betrachtet und der Einfluss des Knickwinkels auf die Ausnutzung je Hauptbelastungsrichtung untersucht. Die vorgeschlagene lineare Interaktion zeigt innerhalb der gewählten Grenzen grundsätzlich Verträglichkeit. Die durchgeführten Berechnungen legen nahe, dass der Einfluss des Knickwinkels auf die Auslastung der Anbindung klein ist. Die Betrachtung numerischer Modelle erlaubt eine erste Bewertung der Anbindung auf ihre Brauchbarkeit unter kombinierter Beanspruchung oder variablen Winkel. Der nicht unerhebliche Auswertungs- und Interpretationsaufwand, der mit den Simulationen einher geht, unterstreicht die Wichtigkeit von Versuchen. Die Numerik ist eine sinnvolle Ergänzung, nicht aber Ersatz für diese.

Aufbauend auf den Versuchen und den gefundenen Steifigkeiten wurden Globalmodelle erstellt und zur Bewertung des Fügedetails eine Interaktion von Scheibenkräften und Momenten zufolge Plattenwirkung durchgeführt. Eine Gegenüberstellung von Verzweigungslastfaktor, Glas- und Fügekantenausnutzung identifiziert die Verbandsauflösung als den kritischen Versagenszustand (Abb. 103, die in der Darstellung implizierte Laststeigerung nach einer Verbandsauflösung zum Glasbruch oder gar darüber hinaus zum Stabilitätsversagen ist natürlich nur gedanklich möglich). Die numerischen Ergebnisse legen nahe, dass Tragwerke der untersuchten Bauform unter Einhaltung bestimmter Grenzen (Spannweite, Faltenbreite, Belastungsart und -höhe) grundsätzlich möglich sind.

Das vorgestellte Detail und die angewendeten Beurteilungsmethoden sind nicht als Konstruktionsvorschlag mit einhergehendem Bemessungskonzept, sondern als Machbarkeitsstudie zu verstehen.

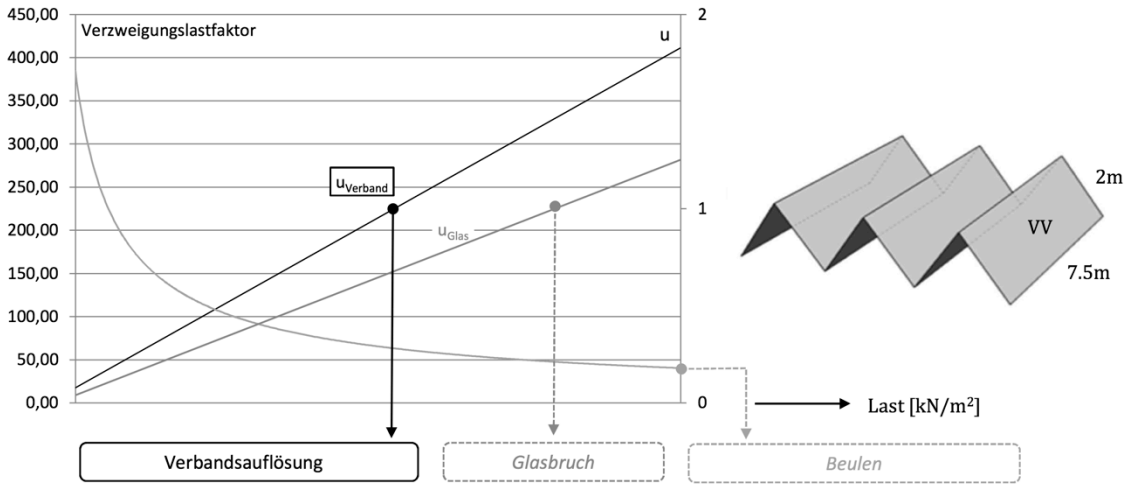


Abb. 103 Versagensarten und Reihung am Beispiel 7.5m/2m VV

6.2 Weiterführende Forschung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten nicht alle Fragestellungen beantwortet werden. Wie in den jeweiligen Abschnitten ausgeführt, wurden Annahmen getroffen, die noch einer weiteren Untersuchung bedürfen. Die wichtigsten Punkte sind an dieser Stelle zusammengefasst und werden, wo nötig, entsprechend ergänzt:

- Brauchbarkeit der Verbindung unter Dauerlast.
- Verhalten unter zyklischer Beanspruchung.
- Untersuchung unterschiedlicher Verbundfolien bzw. Gießharze auf ihre Brauchbarkeit unter Dauerlast. Festlegung von zulässigen Grenzschubspannungen für Dauer- und Kurzzeitlast.
- Numerische Untersuchung des Verbundbereichs Folie-Einlaminierteil-Glas.
- Bewertung unterschiedlicher Metalle auf deren Brauchbarkeit als Einlaminierteil mit Blick auf den Lastfall Temperatur.
- Untersuchungen zum Resttragverhalten.
- Versuchstechnische Validierung der Interaktionsbeziehung.
- Erstellung von Interaktionsbeziehungen für variable Winkel.
- Untersuchung des Einflusses der Querkraft aus der Lastweiterleitung auf die Fügekantenauslastung bzw. ihre Aufnahme in die Interaktion.
- Überarbeitung der Interaktionsbeziehung mit erhöhten Grenzwerten der Belastbarkeit.
- Konstruktive Verbesserung der Anbindung zur Steigerung der Traglast.
- Überprüfung der Sensitivität der Globalmodelle auf Varianz der Anbindungssteifigkeiten.
- Untersuchung des Lagerungseinflusses auf die Fügekantenausnutzung.
- Untersuchung der Anbindung auf ihre Rotationskapazität in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Verklebung (Delamination durch Schälkräfte).
- Überlegungen zu einem Bemessungs- und Sicherheitskonzept.

6.3 Ausblick

In Abschnitt 6.2 sind Forschungsfragen zusammengefasst, deren Beantwortung mit nicht zu unterschätzendem Aufwand verbunden ist. Die Mühsal, die mit der Bearbeitung der Fragstellungen verbunden ist, darf nicht abschrecken, scheinen doch beeindruckende Flächentragwerke aus Glas in greifbarer Nähe. Speziell in Hinblick auf die Themen zur Gebrauchstauglichkeit unter Dauerlast wäre es sinnvoll den Weg zum Dachtragwerk über vertikale Strukturen zu nehmen. Der Einsatz von Faltwerken in einer pfostenfreien Fassadenkonstruktion würde zu einigen

Erleichterungen führen. So würde bei geeignetem Eigengewichtsabtrag an der Aufstandskante die Anbindung nur über kurzzeitige Lasten beansprucht werden (vgl. Abb. 15). Der Focus dieser Arbeit auf das Faltwerk mit paralleler Faltung, welches in Kapitel 5.5 untersucht wurde, soll auch nicht die Sicht auf die Vielzahl möglicher Tragwerksformen verstellen, die sich für den Baustoff Glas erschließen.

Erste Untersuchungen an einem Tragwerk mit Gegenfaltung (Abb. 104) haben gezeigt, dass Spannweiten von 15m unter Verwendung der vorgestellten Interaktionsbetrachtung denkbar scheinen. In nachstehender Grafik ist hierfür die Fugenauslastungen ausgewählter Kanten bei steigender Belastung für die zwei Verbundfälle VV und OV dargestellt. Die vorangegangenen Limitierungen gelten sinngemäß.

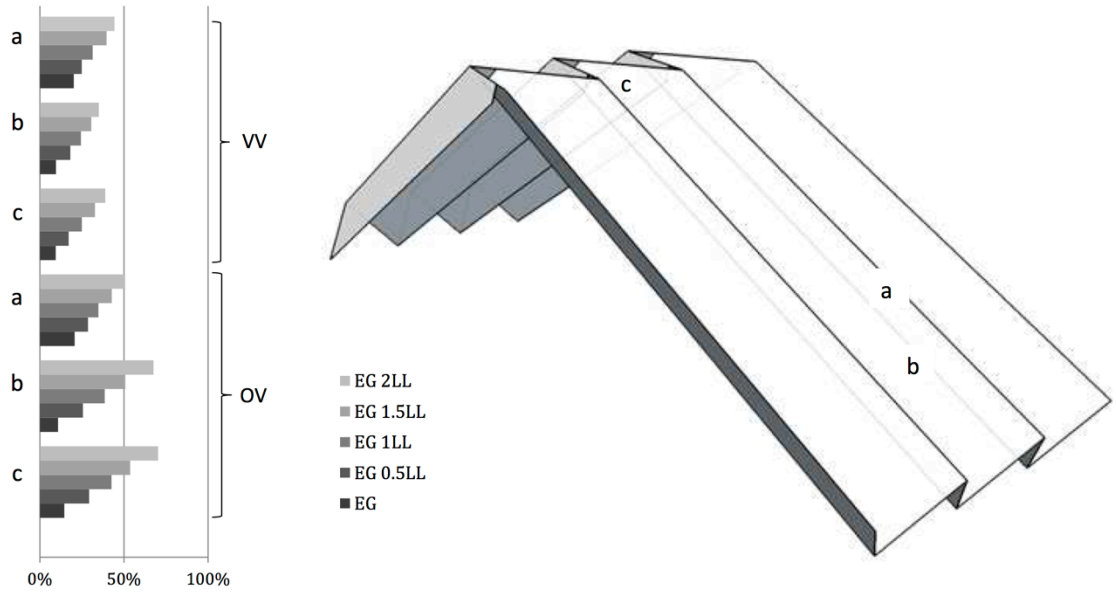


Abb. 104 Parallele Faltung mit Gegenfaltung, Ausnutzung an ausgewählten Kanten (OV ... ohne Verbund, VV ... voller Verbund)

Das vorgestellte Detail könnte in einem nächsten Schritt auch von den Faltwerken aus ebenen Elementen auf Konstruktionen aus großformatigen, laminationsgebogenen Scheiben übertragen werden (Abb. 105).

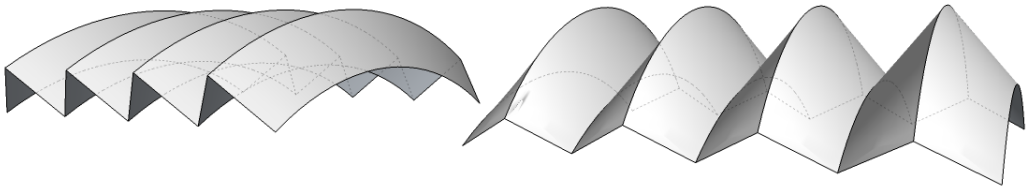


Abb. 105 Mögliche Faltwerke aus laminationsgebogenen Scheiben. Einfach (li.) und zweifach (re.) gekrümmte Oberflächen.

Anhang A – Technische Zeichnungen

[30-001] Einzelteilzeichnung Einlaminierteile Pos 1 – 4

[30-002] Einzelteilzeichnung Einlaminierteile Pos 5 – 6

[30-003] Einzelteilzeichnung Gläser f. Laminate

[30-004] Einzelteilzeichnung Lasteinleitungskonstruktion

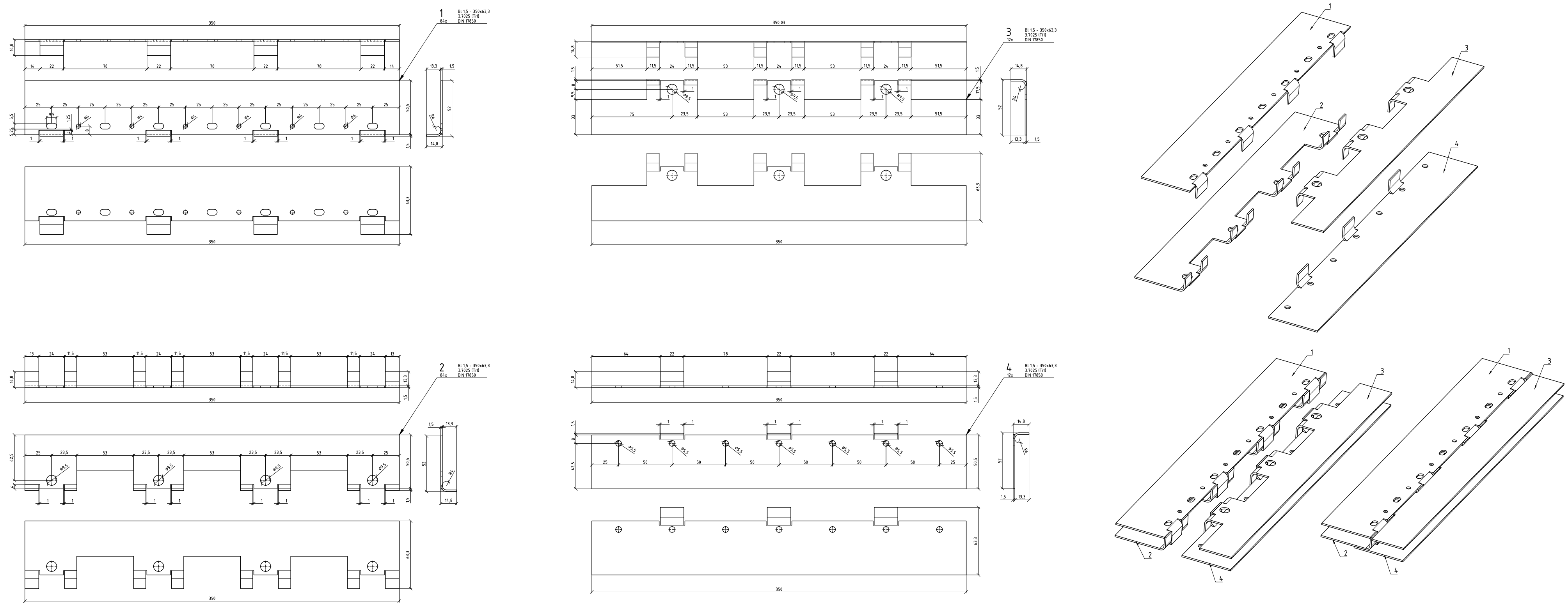
[40-001] Zusammenbau Lamination – Versuche M

[40-002] Zusammenbau Lamination – Versuche Z,D,T

[80-001] Zusammenbau Prüfkörper – Versuche M

[80-002] Zusammenbau Prüfkörper – Versuche Z & D

[80-003] Zusammenbau Prüfkörper – Versuche T



Oberfläche Titanteile – gebürstet Ra 0,3

VORABZUG ZUR ANFRAGE

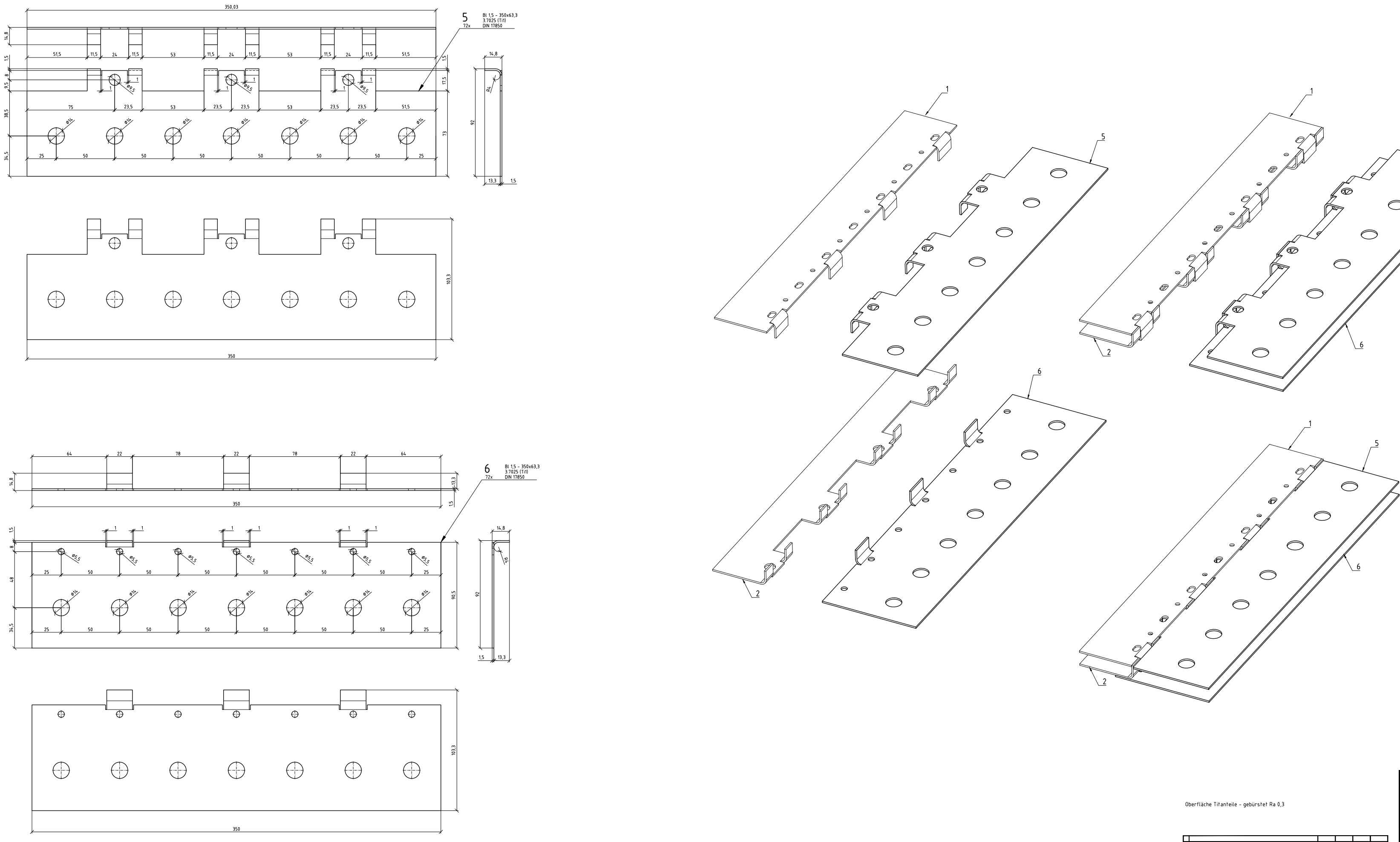
ZEICHNUNG URHEBERRECHTLICH GESCHÜTZT. DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, ÖSTERREICH. JEDE VERWERTUNG VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VORFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED DISTRIBUTED, PUBLISHED AND EXHIBITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

BESTELLER: PURCHASER: Stefan MARINITSCH	KONSERVIERUNG: SURFACE PROTECTION: laut Ko-Vorschrift			Proj. Met. 1 gem. ISO 128
BAUWERK: STRUCTURE: Versuche M	GLAS SPEZIF.: GLASS SPECIF.:			
	ABT. DEPT.	NAME NAME	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE
	KONSTRUKTEUR DESIGNER	Marinitsch		04.02.2013
	GEPRÜFT CHECKED			
	BERECHNUNGSING. STATIC ENG.	Marinitsch		04.02.2013
	SCHWEISSTECHNOLOGE WELDING ENG.			
BENENNUNG: TITLE: Einzelteilzeichnung Einlaminierteile Pos 1-4	AUSFÜHREN UNITS OFF	MASSE/AUSFG. MASS PER UNIT kg; GESAMTMASSE TOTAL MASS kg		FORMAT: SIZE: A0 L
	HAUPTMASSSTAB: MAIN SCALE: M1:1	ERSATZ FÜR: SUBSTITUTION FOR:; ERSETZT DURCH: REPLACED BY:		

ANGEBOT NR./ OFFER NO. – / ZEICHNUNG NR./ DRAWING NO. 30 – 001 – POS.NR./ ITEM NO. – ÄNDERUNGSINDEX MODIFICATION INDEX

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



VORABZUG ZUR ANFRAGE

Oberfläche Titanteile - gebürstet Ra 0,3

ZEICHNUNG URHEBERRECHTLICH GESCHÜTZT. DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, ÖSTERREICH. JEDE VERWERTUNG VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VORFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED DISTRIBUTED, PUBLISHED AND EXHIBITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

KONSERVIERUNG: / SURFACE PROTECTION:	laut Ko-Vorschrift			Proj. Met. 1 gen. ISO 128
GLAS SPEZIF.: / GLASS SPECIF.:				
ABT. / DEPT.	NAME / NAME	UNTERSCHRIFT / SIGNATURE	DATUM / DATE	
KONSTRUKTEUR / DESIGNER	Marinitsch		04.02.2013	
GEPRÜFT / CHECKED				
BERECHNUNGSING. / STATIC ENG.	Marinitsch		04.02.2013	
SCHWEISSTECHNOLOGE / WELDING ENG.				
AUSFÜHREN / UNITS OFF	MASSE/AUSFG. / MASS PER UNIT: kg	GESAMTMASSE / TOTAL MASS: kg	FORMAT: / SIZE: A0 L	
HAUPTMASSSTAB: / MAIN SCALE: M1:1	ERSATZ FÜR: / SUBSTITUTION FOR:	ERSETZT DURCH: / REPLACED BY:		

BESTELLER: / PURCHASER: Stefan MARINITSCH

BAUWERK: / STRUCTURE: Versuche M

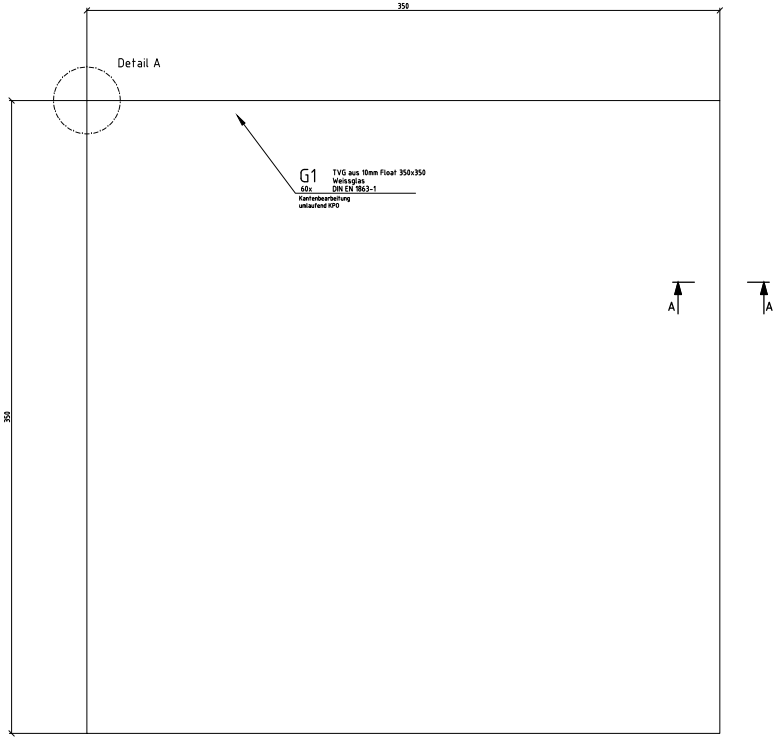
BENENNUNG: / TITLE: Einzelteilzeichnung Einlaminierteile Pos 5-6

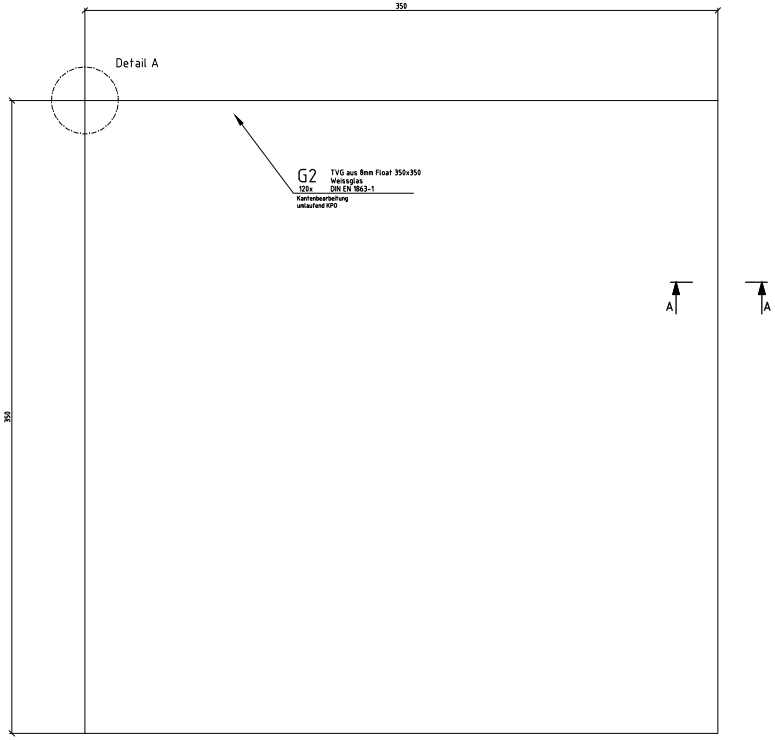
ANGEBOT NR./ OFFER NO. – / ZEICHNUNG NR./ DRAWING NO. 30 - 002 - POS.NR./ ITEM NO. – ÄNDERUNGSINDEX / MODIFICATION INDEX

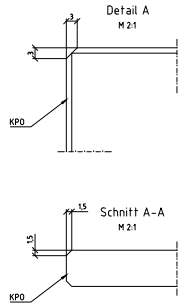
ÄNDERUNG / MODIFICATION — UNTERSCHRIFT / SIGNATURE — DATUM / DATE — KONSTRUKTEUR / DESIGNER — GEPRÜFT / CHECKED

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT







VORABZUG ZUR ANFRAGE

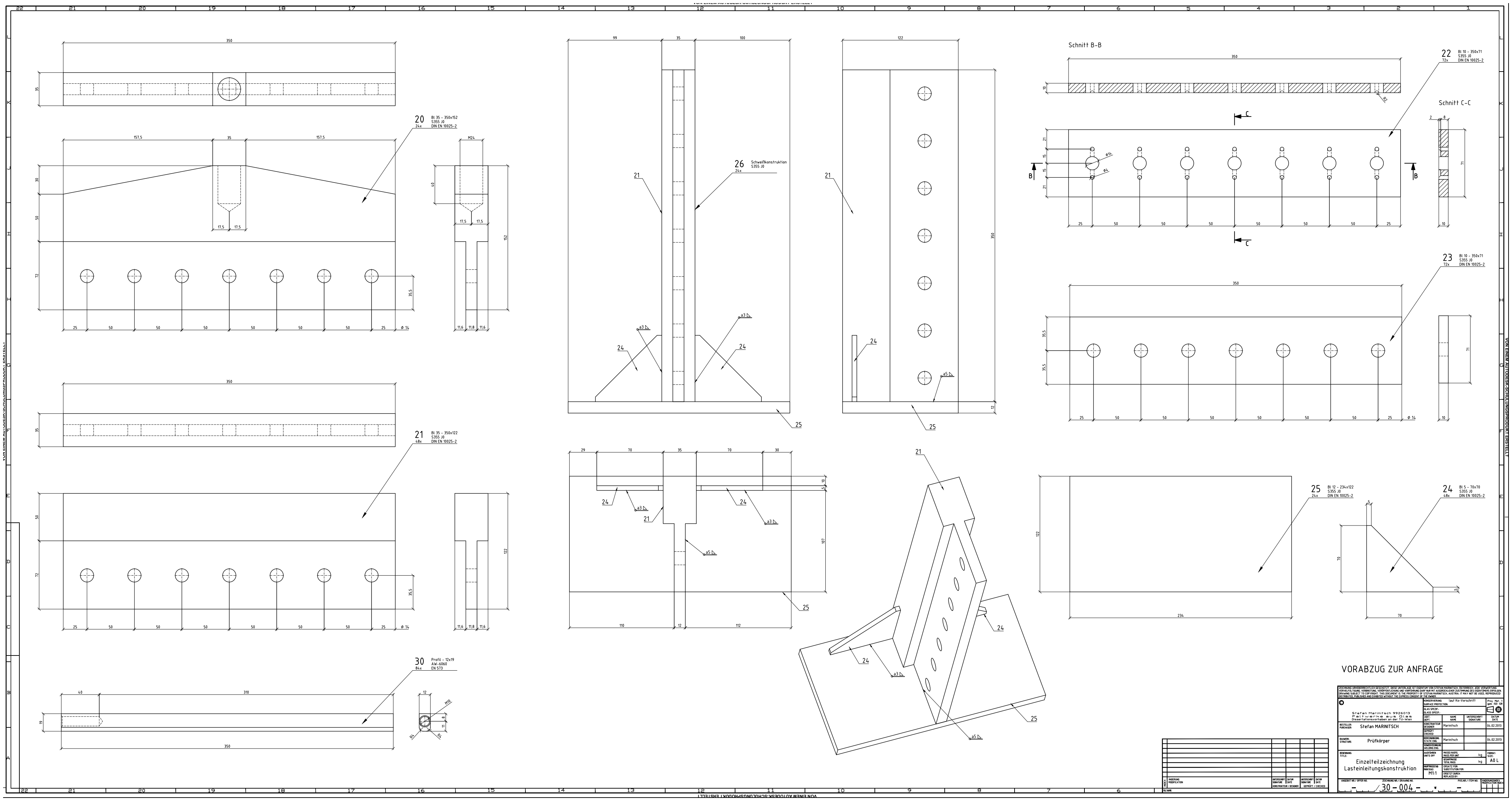
VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

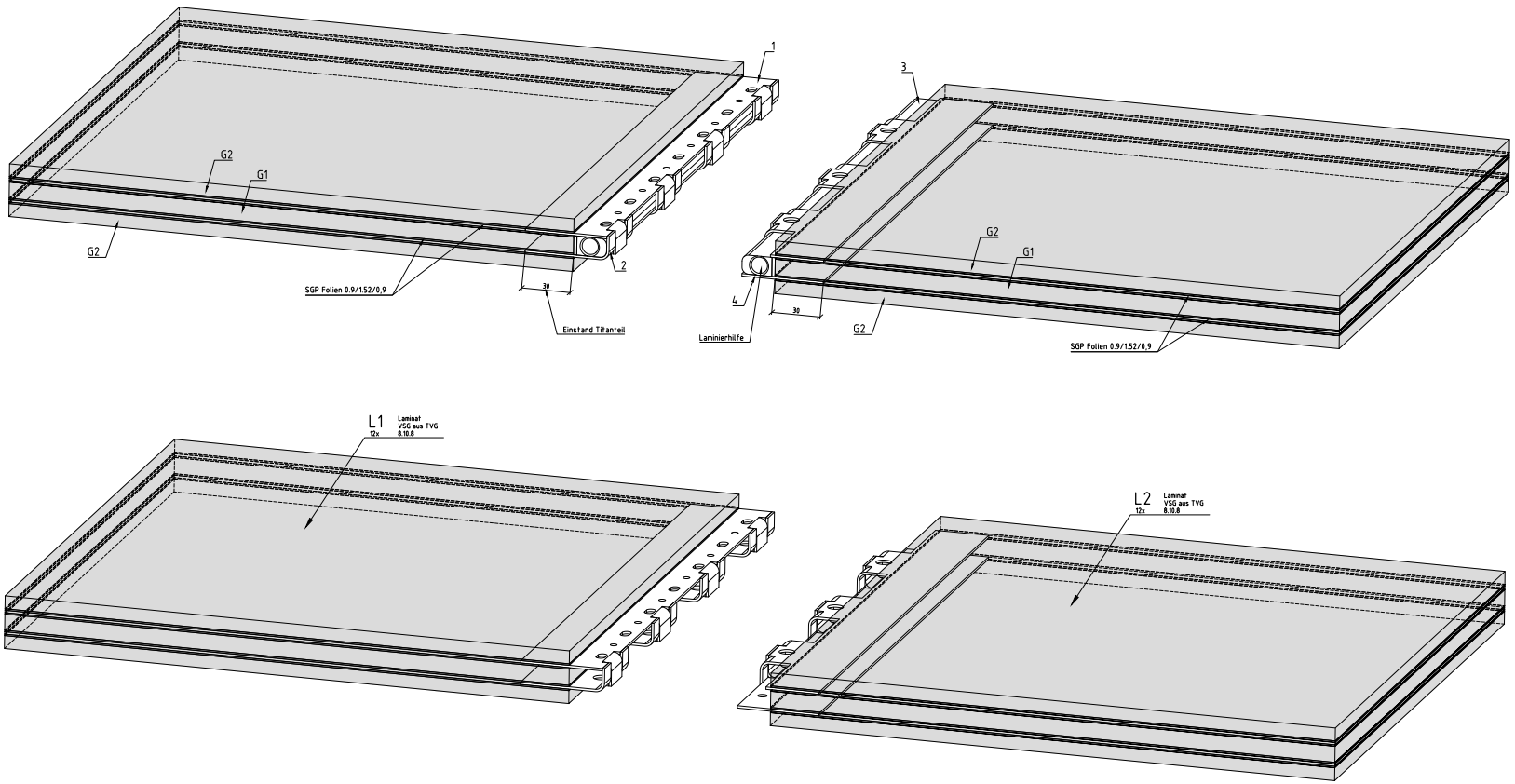
Stefan Marinitsch 9926013 Fallwerke aus Glas Dissertationsvorhaben an der TU-Wien					
BESTELLER PURCHASER: Stefan MARINITSCH					
BAUWERK STRUCTURE: Versuche M					
BENENNUNG TITLE: Einzelteilzeichnung Einzelgläser f. Laminate					
ANGEBOT NR / OFFER NO.	ZEICHNUNG NR / DRAWING NO.	POS.NR. / ITEM NO.			
	- / 30 - 003 -				

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT
Schnitt B-B
Schnitt C-C
20 Bl 35 – 350x152 S355 J0 DIN EN 10025-2 24x
21 Bl 35 – 350x122 S355 J0 DIN EN 10025-2 48x
22 Bl 10 – 350x71 S355 J0 DIN EN 10025-2 72x
23 Bl 10 – 350x71 S355 J0 DIN EN 10025-2 72x
24 Bl 5 – 70x70 S355 J0 DIN EN 10025-2 48x
25 Bl 12 – 234x122 S355 J0 DIN EN 10025-2 24x
26 Schweißkonstruktion S355 J0 24x
30 Profil – 12x19 AW-6060 EN 573 84x
VORABZUG ZUR ANFRAGE
ZEICHNUNG URHEBERRECHTLICH GESCHÜTZT. DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, ÖSTERREICH. JEDE VERWERTUNG VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VORFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN.
DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED DISTRIBUTED, PUBLISHED AND EXHIBITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.
Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien
BESTELLER: PURCHASER: Stefan MARINITSCH
BAUWERK: STRUCTURE: Prüfkörper
BENENNUNG: TITLE: Einzelteilzeichnung Lasteinleitungskonstruktion
KONSERVIERUNG: SURFACE PROTECTION: laut Ko-Vorschrift
GLAS SPEZIF.: GLASS SPECIF.:
Proj. Met. 1 gem. ISO 128
KONSTRUKTEUR DESIGNER Marinitsch 04.02.2013
GEPRÜFT CHECKED
BERECHNUNGSING. STATIC ENG. Marinitsch 04.02.2013
SCHWEISSTECHNOLOGE WELDING ENG.
AUSFÜHREN UNITS OFF
MASSE/AUSFG. MASS PER UNIT kg
GESAMTMASSE TOTAL MASS kg
FORMAT: SIZE: A0 L
HAUPTMASSSTAB: MAIN SCALE: M1:1
ERSATZ FÜR: SUBSTITUTION FOR:
ERSETZT DURCH: REPLACED BY:
ANGEBOT NR./ OFFER NO.
ZEICHNUNG NR./ DRAWING NO. 30-004
POS.NR./ ITEM NO.
ÄNDERUNGSINDEX MODIFICATION INDEX

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

ZEICHNUNG UNTERSTÜTZT DIESE ENTWICKLUNG IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, OSTERREICH. JEDE VERWERTUNG VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VORFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED DISTRIBUTED, PUBLISHED AND COMMITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

BEHANDLUNG: SURFACE PROTECTION:	laut Ko-Vorschrift			Proj. Mat. 1 gem. ISO 100
GLAS SPEZIF.: GLASS SPECIF.:				
AUST. DEPT.	NAME NAME	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE	
KONSTRUKTEUR DESIGNER	Marinitsch		04.02.2013	
GEPRÜFT CHECKED				
BERECHNUNG: STATIC ENG.	Marinitsch		04.02.2013	
SCHWEIZERISCHE WELDING ENG.				
AUSFÜHRUNG: UNITS OFF	MASSE/AUSFG. MASS POS UNIT	kg	FORMAT: SIZE:	A0 L
	GESAMTMASSE TOTAL MASS	kg		
MAPPENSTAB: MARKSAG.	M1:1	ERSATZ FÜR: SUBSTITUTION FOR:		
		ERSETZT DURCH: REPLACED BY:		

DESTELLER: PURCHASER: Stefan MARINITSCH

BAUWERK: STRUCTURE: Versuche M

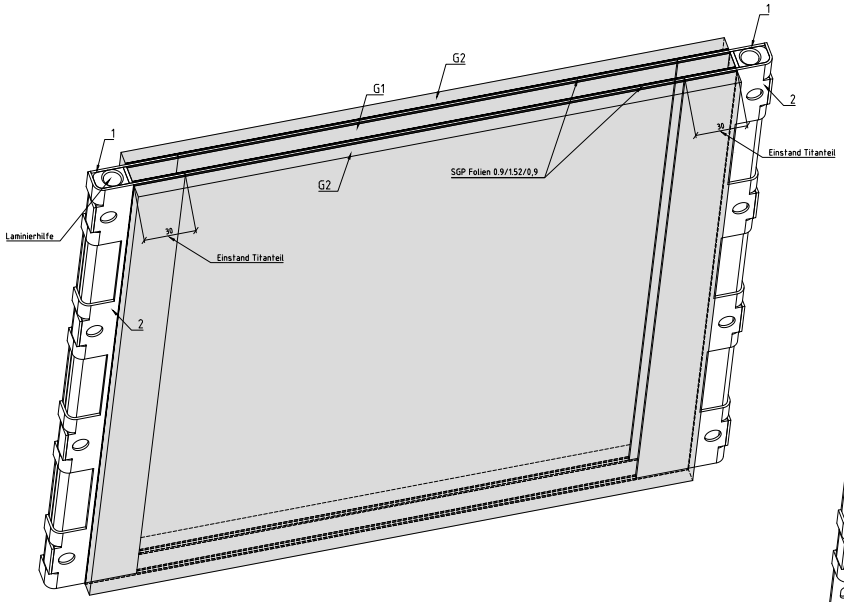
BENENNUNG: TITLE: Zusammenbau Lamination

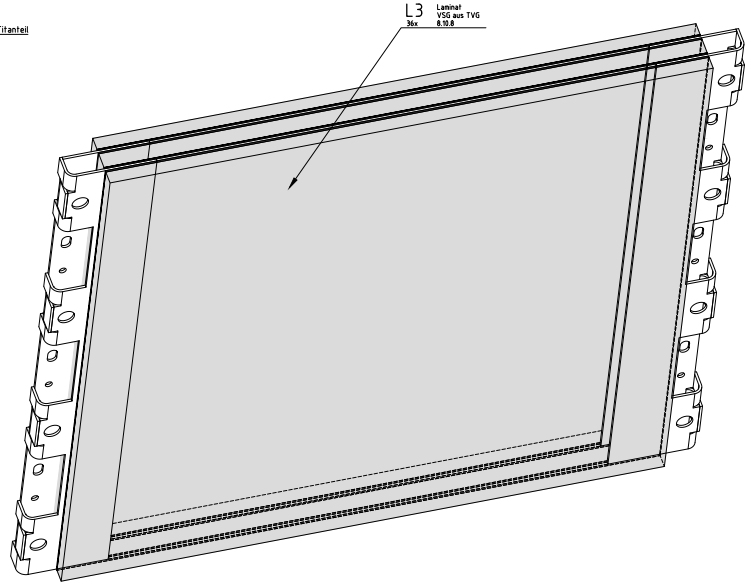
ANGEBOT NR./ OFFER NO. – – ZEICHNUNG NR./ DRAWING NO. /40 – 001 – POS.NR./ ITEM NO. – – ÄNDERUNGSINDEX MODIFICATION INDEX

INDEX	ÄNDERUNG MODIFICATION	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE
		KONSTRUKTEUR / DESIGNER		GEPRÜFT / CHECKED	

FILENAME: 01/JAHRSCHAU

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT





VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

ZEICHNUNG UNTERSCHRIFTLICH GESCHÜTZT DIESE ZEICHNUNG IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, ÖSTERREICH. JEDE VERWERTUNG VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VORFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED DISTRIBUTED, PUBLISHED AND COMPETED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

BEHANDLUNG: SURFACE PROTECTION:	laut Ko-Vorschrift		Proj. Mat. 1 gem. ISO 128
GLAS SPEZIF.: GLASS SPECIF.:			
AUST. DEPT.	NAME NAME	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE
KONSTRUKTEUR DESIGNER	Marinitsch		04.02.2013
GEPRÜFT CHECKED			
BEZEICHNUNG: STATIC ENG.	Marinitsch		04.02.2013
SCHWEIZERISCHE WELDING ENG.			
AUSFÜHREN UNITS OFF	MASSE/AUSFG. MASS PER UNIT kg		FORMAT: SIZE: A0
	GESAMTMASSE TOTAL MASS kg		
MAPPMASSEN-MARKSAKE: M1:1	ERSETZT FÜR: SUBSTITUTION FOR:		
	ERSETZT DURCH: REPLACED BY:		

DESTELLER PURCHASER: Stefan MARINITSCH

BAUWERK STRUCTURE: Versuche Z, D, T

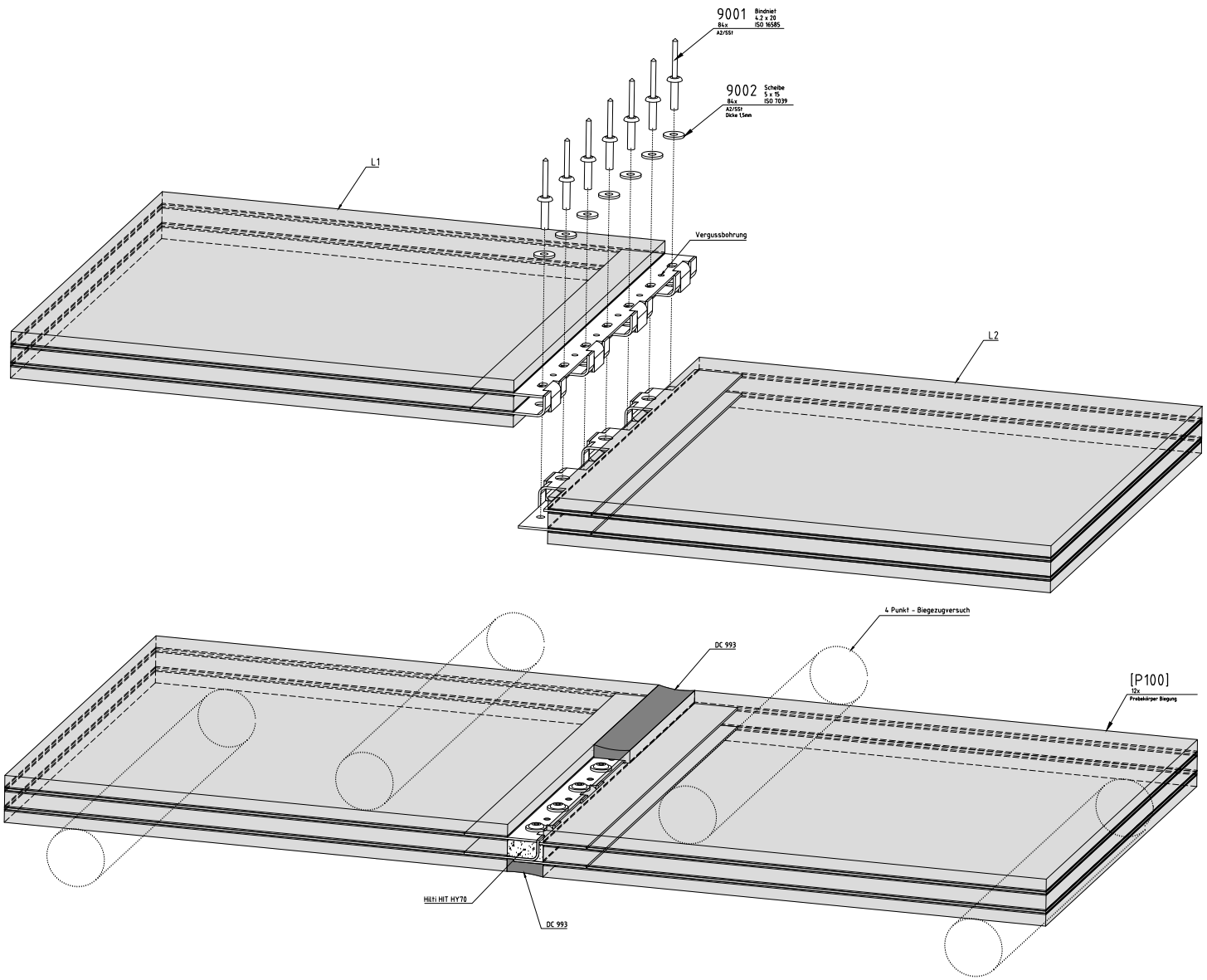
BENENNUNG TITLE: Zusammenbau Lamination

ANGEBOT NR / OFFER NO.	ZEICHNUNG NR / DRAWING NO.	POS.NR. / ITEM NO.	ANDERUNGSBLATT MODIFICATION NOCH
-	/40-002-	-	

ZEICHNUNG: MODIFICATION	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE
	KONSTRUKTEUR / DESIGNER		GEPRÜFT / CHECKED	

FILENAME: 01TABEKMAB

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

DIESE ZEICHNUNG, SOWIE ALLE DARIN ENTHALTENEN, BEIGESTELLTEN UND ERSTELLTEN DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, OSTERREICH. JEDE VERWERTUNG, VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VERFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED, DISTRIBUTED, PUBLISHED AND COMMITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

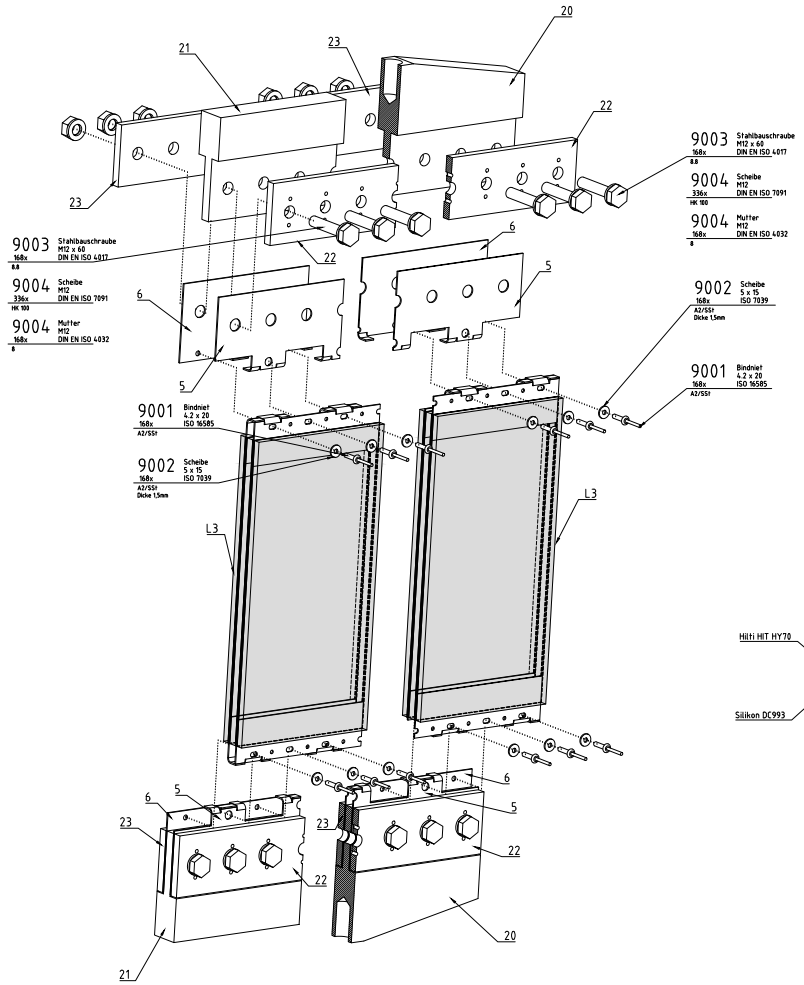
BEZEICHNUNG:	Ist Ko-Vorschrift			Proj. Mat. 1 gem. ISO 128
SURFACE PROTECTION:				
GLAS SPEZIF.:				
GLASS SPEZIF.:				
ABT.: DEPT.:	NAME: NAME	UNTERSCHRIFT: SIGNATURE	DATUM: DATE	
KONSTRUKTEUR: DESIGNER:	Marinitsch		04.02.2013	
GEPRÜFT: CHECKED				
BEZEICHNUNG: STATIC ENG.	Marinitsch		04.02.2013	
SCHWEIZERINNE: WELDING ENG.				
AUSFÜHREN: UNITS OFF	MASSE/AUSFG.: MASS POS UNIT	kg	FORMAT: SIZE:	
	GESAMTMASSE: TOTAL MASS	kg	A0	
BEZEICHNUNG: TITLE:	Zusammenbau Prüfkörper			
MAPPENSTAB: MARKSAG:	M1:1	ERSATZ FÜR: SUBSTITUTION FOR:		
		ERSETZT DURCH: REPLACED BY:		

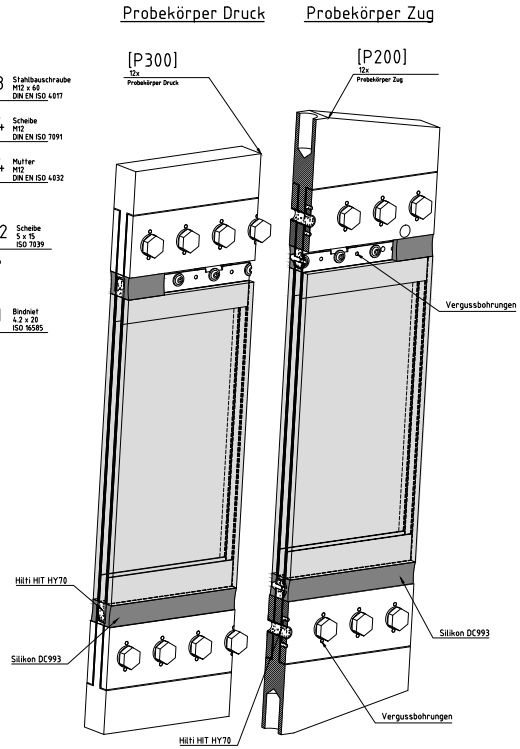
ANGEBOT NR. / OFFER NO.	ZEICHNUNG NR. / DRAWING NO.	POS.NR. / ITEM NO.	ÄNDERUNGSDIENST: MODIFICATION NOTE
-	80 - 001 -	-	

REV.	ÄNDERUNG: MODIFICATION	UNTERSCHRIFT: SIGNATURE	DATUM: DATE	UNTERSCHRIFT: SIGNATURE	DATUM: DATE
		KONSTRUKTEUR / DESIGNER		GEPRÜFT / CHECKED	

FILE NAME: B1.1.DASCH.A0

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT





VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

ZEICHNUNG URHEBERRECHTLICH GESCHÜTZT! DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, ÖSTERREICH. JEDE VERWENDUNG, VERVIELFÄLTIGUNG, VERÄNDERUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND ÜBERGABE AN DRITTE IST AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES CEDENTEN ERFORDERLICH. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED, DISTRIBUTED, PUBLISHED AND EXHIBITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

DIENSTVERFÜHRUNG:	lauf Ko-Verschrift			Proj. Mat. 1 gem. ISO 128
GLAS DICK.:				
GLAS SPECIF.:				
SURFACE PROTECTION				
ART ABFT.:	NAME NAME	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE	
CONSTRUKTEUR DESIGNER	Marinitsch		04.02.2013	
GEPRÜFT CHECKED				
BESCHRÄNKUNG STATIC END.	Marinitsch		04.02.2013	
CONDITIONING WELDING END.				
AUSFÜHRUNG UNITS OPT	MASSE/MASSE PRESS PER UNIT	kg	FORMAT SIZE:	
	GESAMTGEW. TOTAL MASS	kg	A0	
MAßSTAB/SCALE M1:2	CREATE FOR SUBSTITUTION FOR:			
	ERSETZT DURCH REPLACED BY:			

BESTELLER PURCHASER: Stefan MARINITSCH

BAUGRUP. STRUCTURE: Versuche D & Z

BENENNUNG TITLE: Zusammenbau Prüfkörper

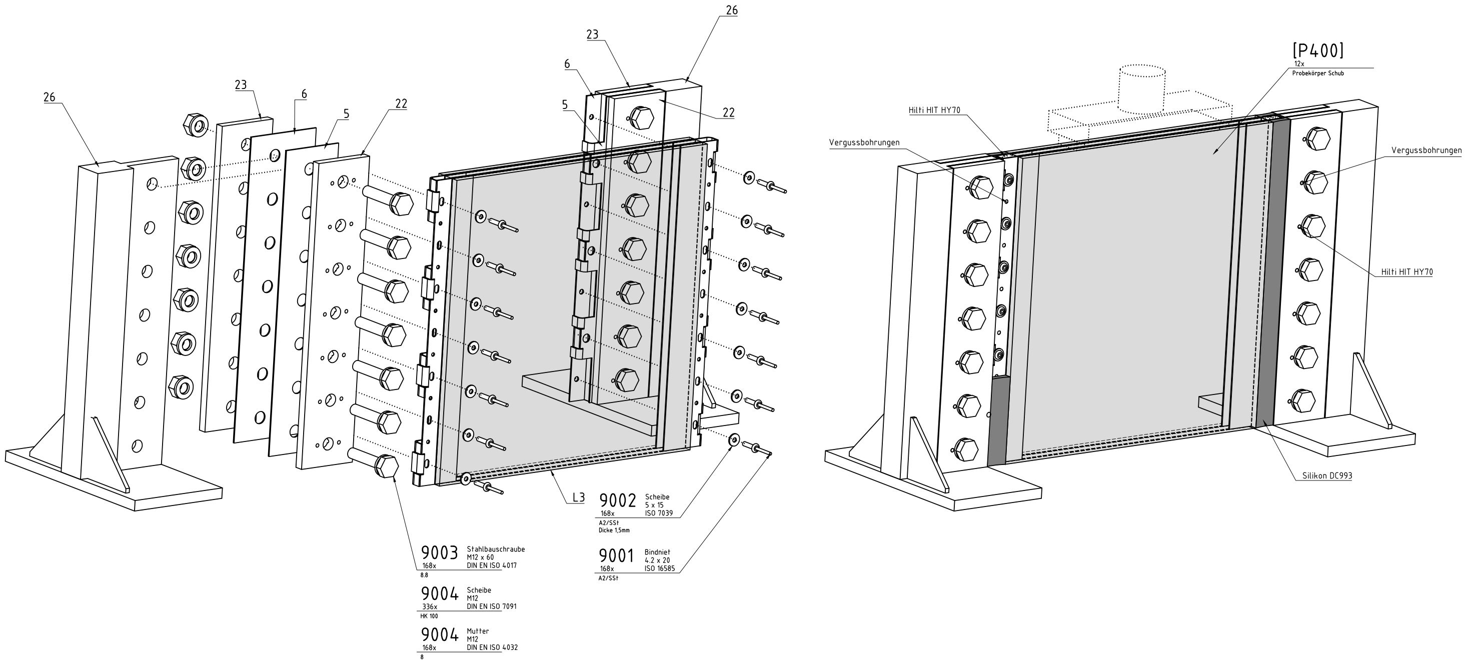
ANZEIGE NR / OFFER NO. — — / 80 - 002 - — ZEICHNUNG NR / DRAWING NO. — — — POS.NR / ITEM NO. — — ÄNDERUNGSINDEX / REVISION INDEX

ÄNDERUNG MODIFICATION		UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE
		CONSTRUKTEUR / DESIGNER		GEPRÜFT / CHECKED	

REIHE SERIES: 9/STAHLBAU

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT

VON EINEM AUTODESK-SCHULUNGSPRODUKT ERSTELLT



ZEICHNUNG URHEBERRECHTLICH GESCHÜTZT. DIESE UNTERLAGE IST EIGENTUM VON STEFAN MARINITSCH, ÖSTERREICH. JEDE VERWERTUNG VERVIELFÄLTIGUNG, VERBREITUNG, VERÖFFENTLICHUNG UND VORFÜHRUNG DARF NUR MIT AUSDRÜCKLICHER ZUSTIMMUNG DES EIGENTÜMERS ERFOLGEN. DRAWING SUBJECT TO COPYRIGHT. THIS DOCUMENT IS THE PROPERTY OF STEFAN MARINITSCH, AUSTRIA. IT MAY NOT BE USED, REPRODUCED DISTRIBUTED, PUBLISHED AND EXHIBITED WITHOUT THE EXPRESS CONSENT OF THE OWNER.

Stefan Marinitsch 9926013
Faltwerke aus Glas
Dissertationsvorhaben an der TU-Wien

KONSERVIERUNG: SURFACE PROTECTION:	laut Ko-Vorschrift		Proj. Met. 1 gem. ISO 128
GLAS SPEZIF.: GLASS SPECIF.:			
ABT. DEPT.	NAME NAME	UNTERSCHRIFT SIGNATURE	DATUM DATE
KONSTRUKTEUR DESIGNER	Marinitsch		04.02.2013
GEPRÜFT CHECKED			
BERECHNUNGSING. STATIC ENG.	Marinitsch		04.02.2013
SCHWEISSTECHNOLOGE WELDING ENG.			

BESTELLER: PURCHASER: Stefan MARINITSCH

BAUWERK: STRUCTURE: Versuche T

BENENNUNG: TITLE: Zusammenbau Prüfkörper

AUSFÜHREN UNITS OFF

MASSE/AUSFG. MASS PER UNIT kg

GESAMTMASSE TOTAL MASS kg

FORMAT: SIZE: A0

HAUPTMASSSTAB: MAIN SCALE: M1:2

ERSATZ FÜR: SUBSTITUTION FOR:

ERSETZT DURCH: REPLACED BY:

ANGEBOT NR./ OFFER NO. — ZEICHNUNG NR./ DRAWING NO. — POS.NR./ ITEM NO. — ÄNDERUNGSINDEX MODIFICATION INDEX

-/80-003-.-

INDEX | ÄNDERUNG MODIFICATION | UNTERSCHRIFT SIGNATURE | DATUM DATE | KONSTRUKTEUR / DESIGNER | GEPRÜFT / CHECKED

Anhang B – Versuchsergebnisse

Auswertungsstand Mai 2015

B1. Versuch M – Auswertung Traversenwegaufnehmer und zusätzliche Wegaufnehmer

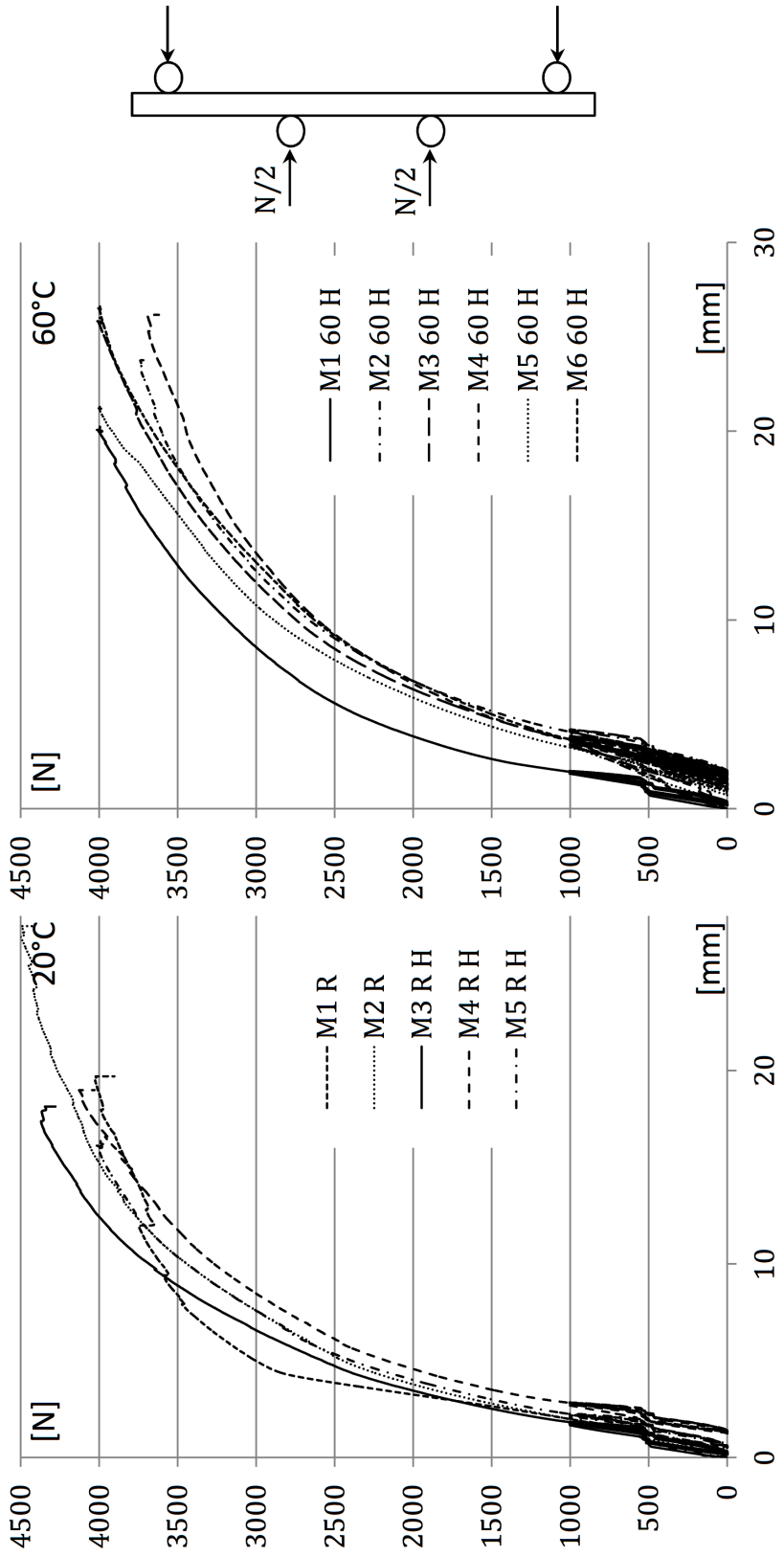
B2. Versuch T – Auswertung Traversenwegaufnehmer und zusätzliche Wegaufnehmer

B3. Versuch Z – Auswertung Traversenwegaufnehmer und zusätzliche Wegaufnehmer

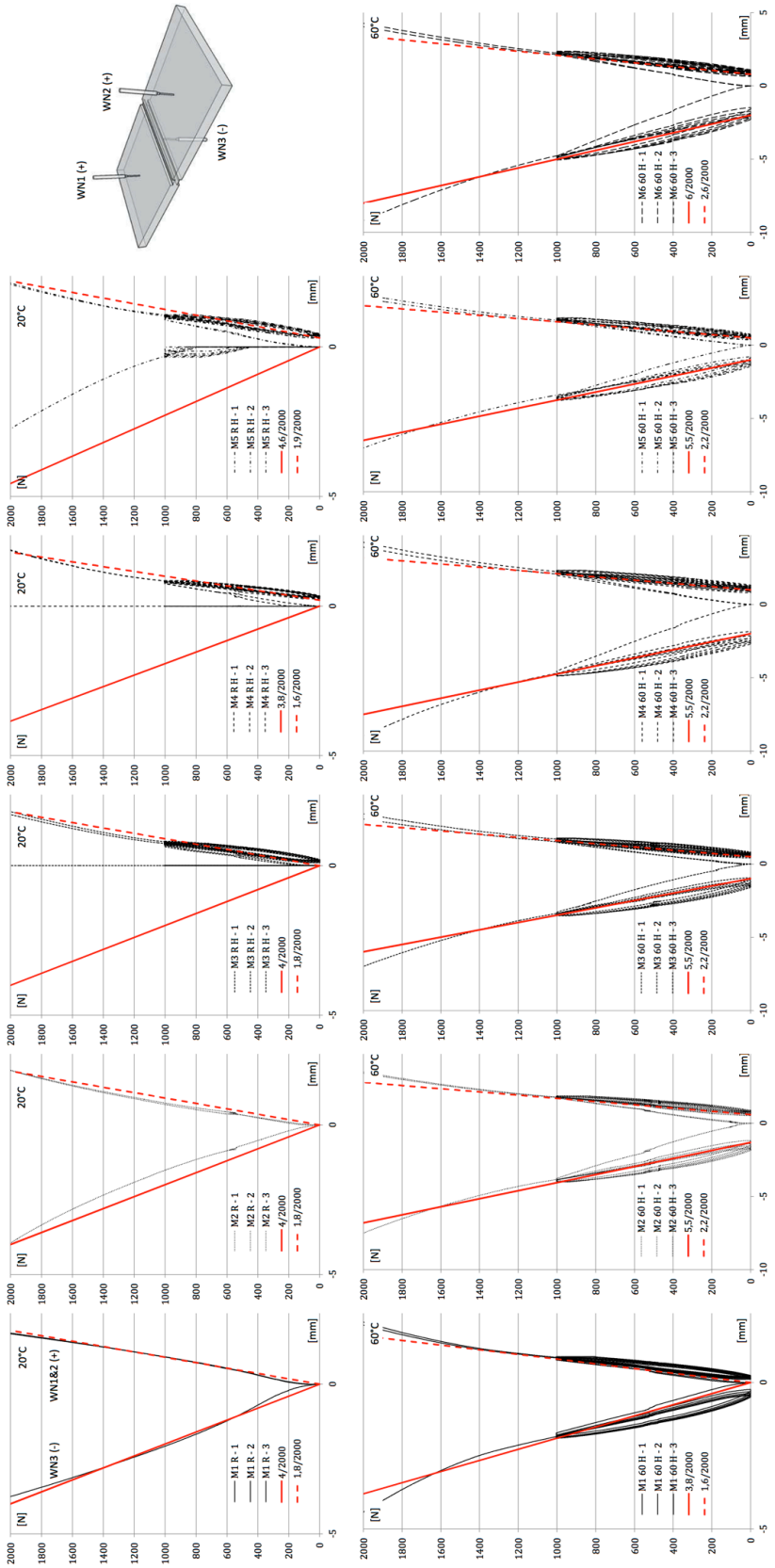
B4. Versuch D – Auswertung Traversenwegaufnehmer und zusätzliche Wegaufnehmer

B5. Versuch V – Auswertung Traversenwegaufnehmer und zusätzliche Wegaufnehmer

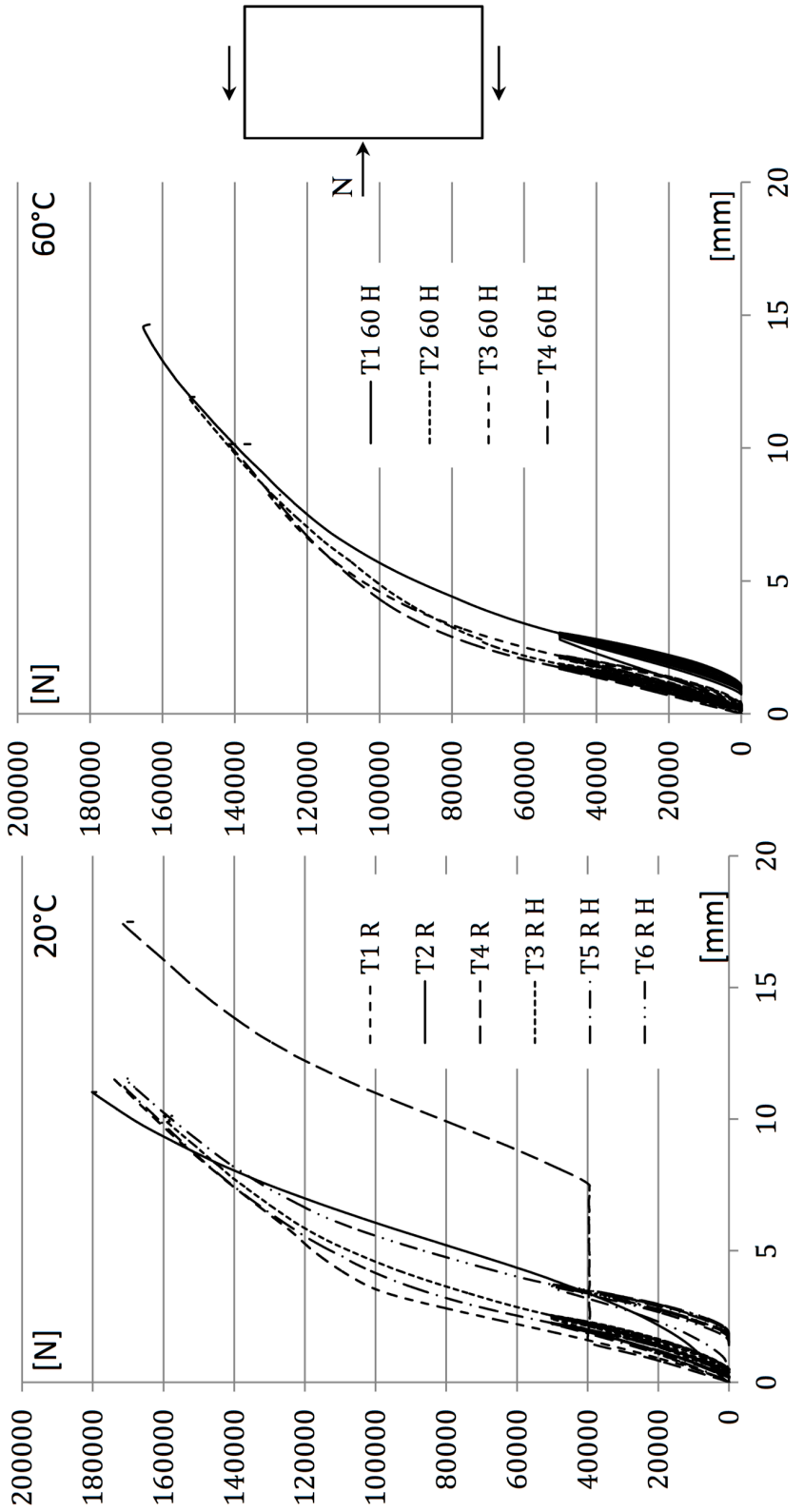
B1. Versuch M – Auswertung Traversenwegaufnehmer



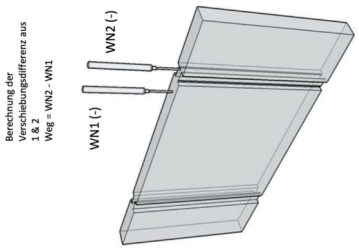
B1. Versuch M – Auswertung Wegaufnehmer

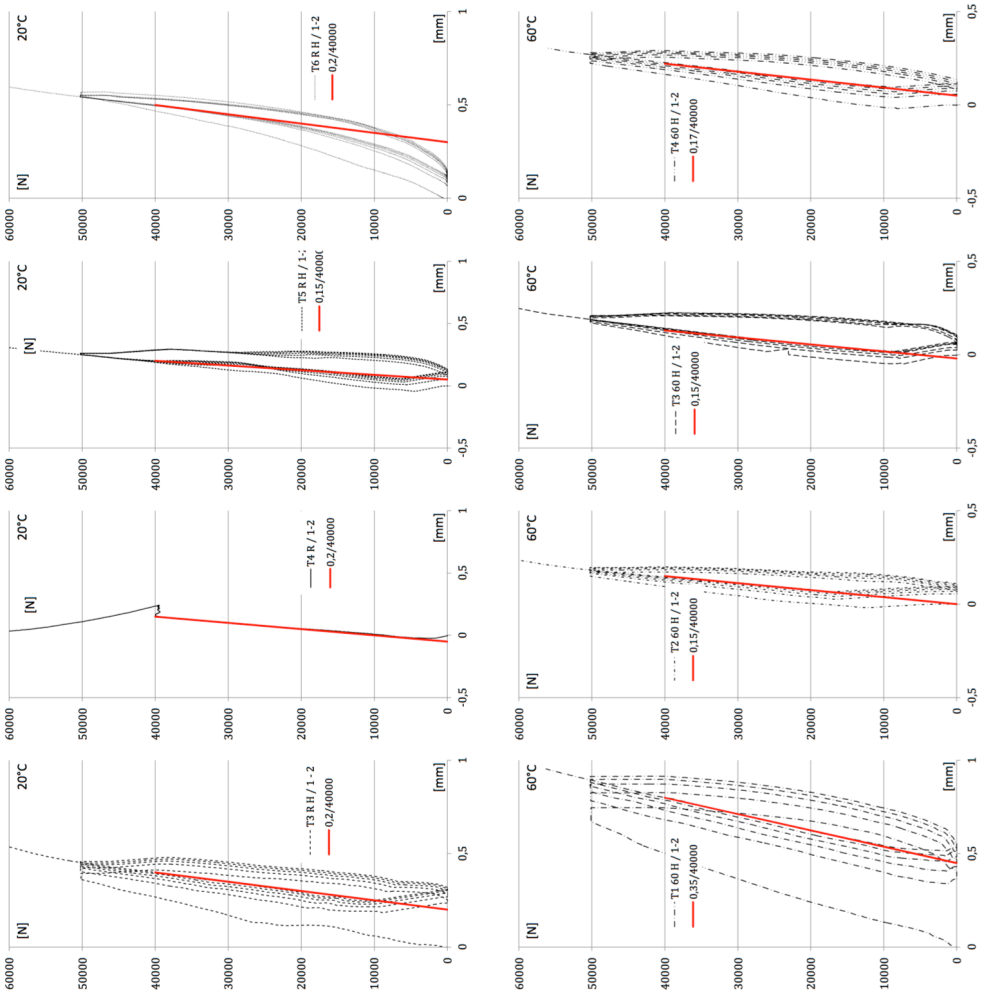


B2. Versuch T – Auswertung Traversenwegaufnehmer

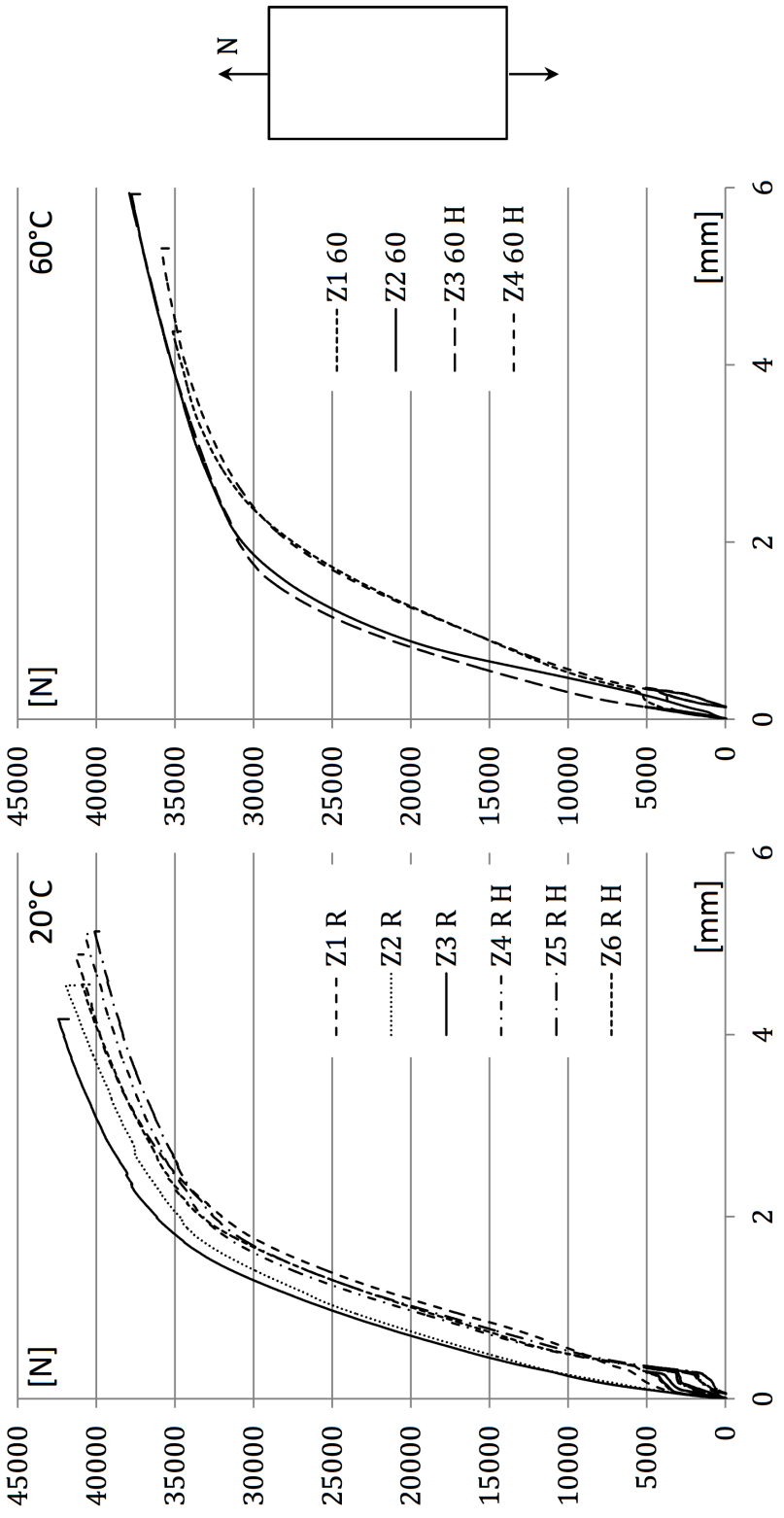


B2. Versuch T – Auswertung Wegaufnehmer

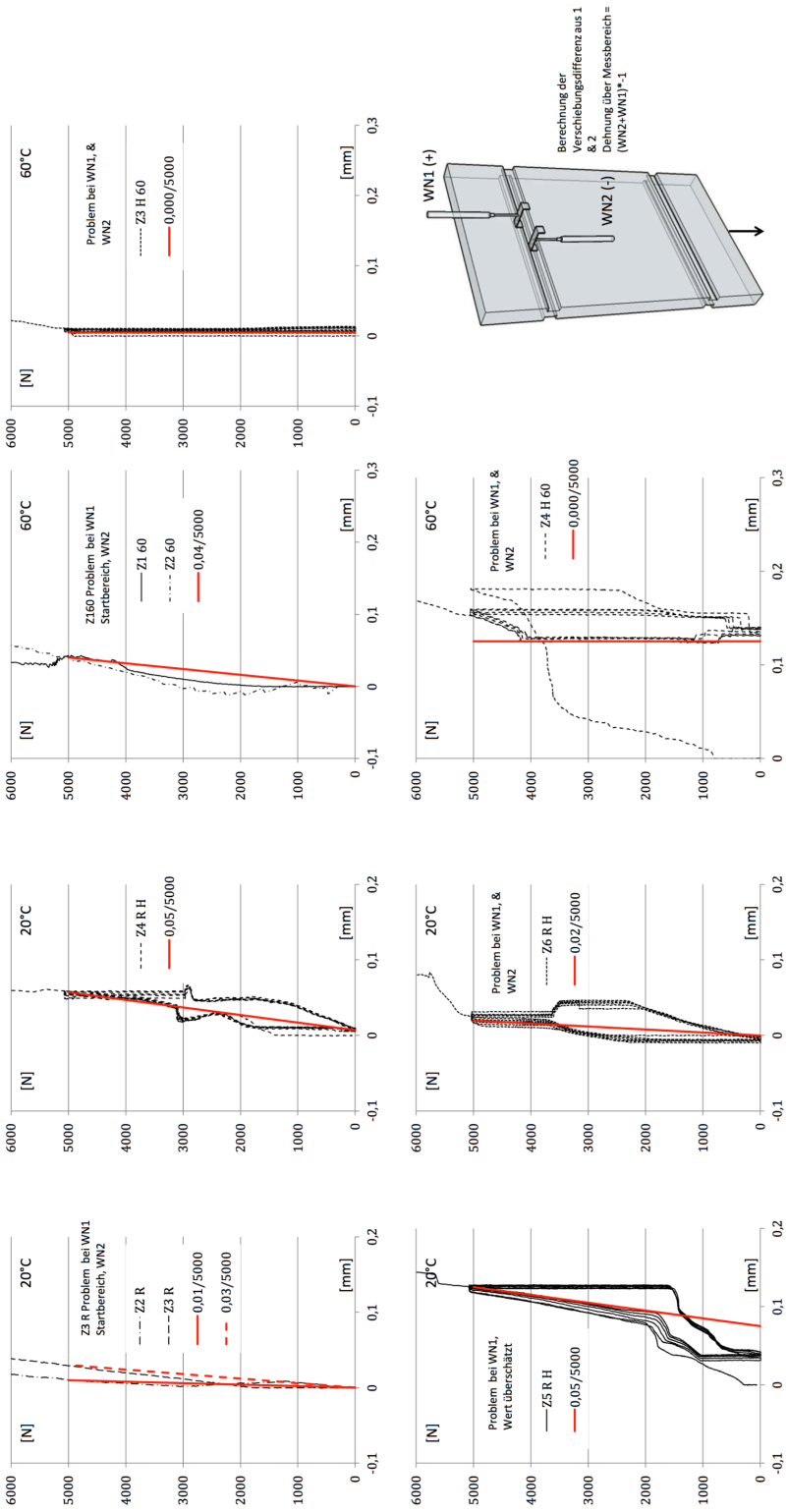




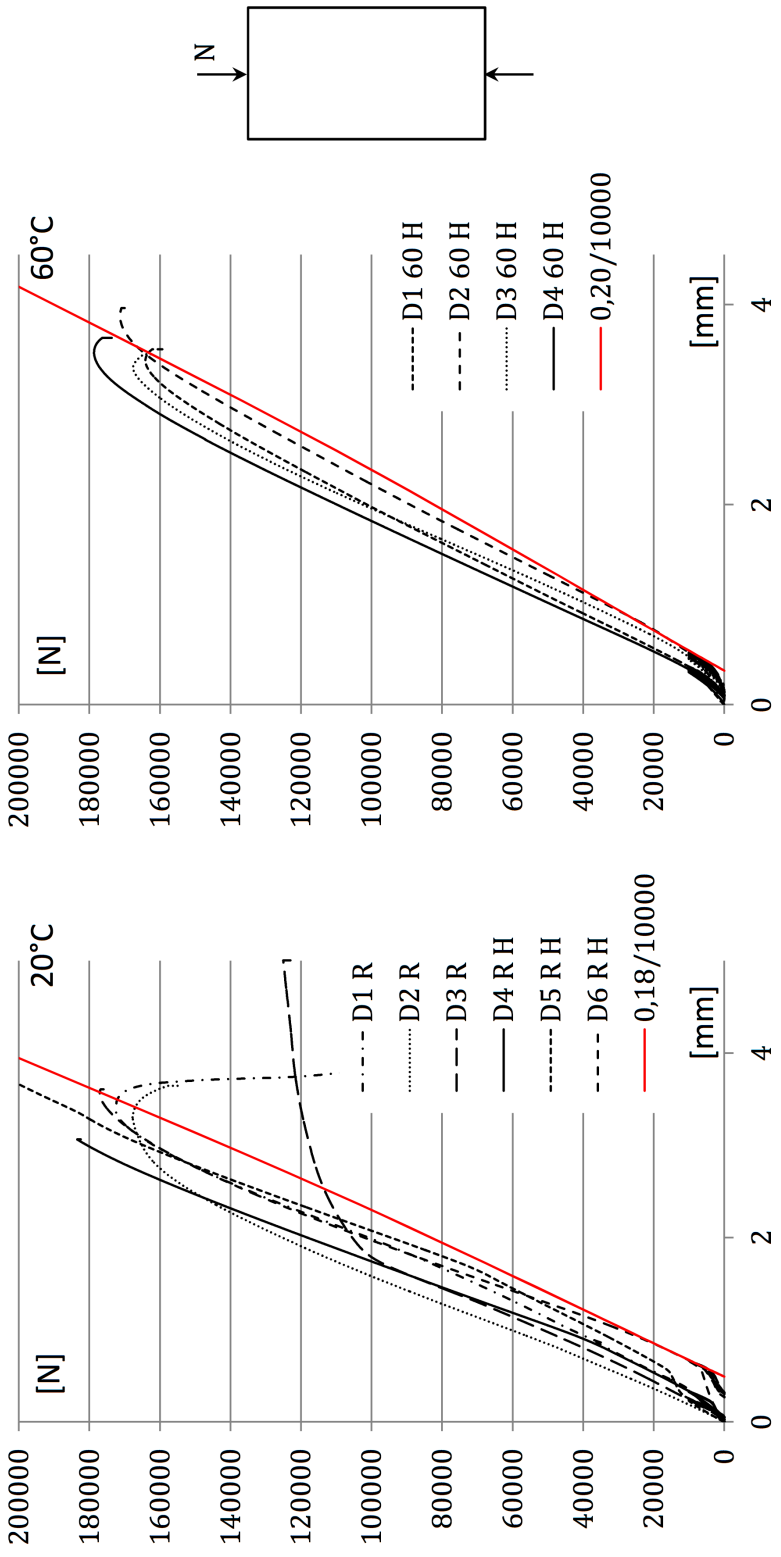
B3. Versuch Z – Auswertung Traversenwegaufnehmer



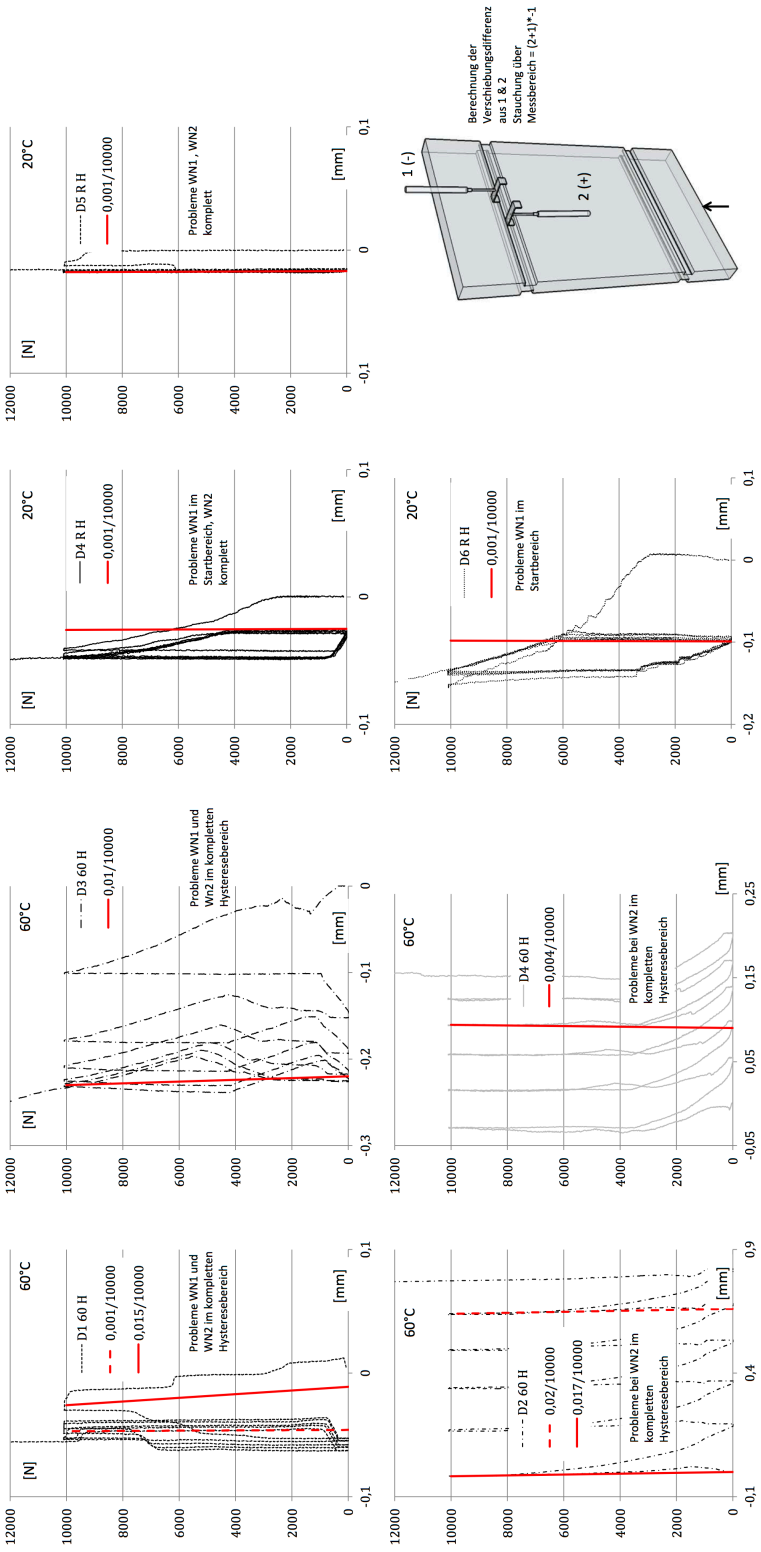
B3. Versuch Z – Auswertung Wegaufnehmer



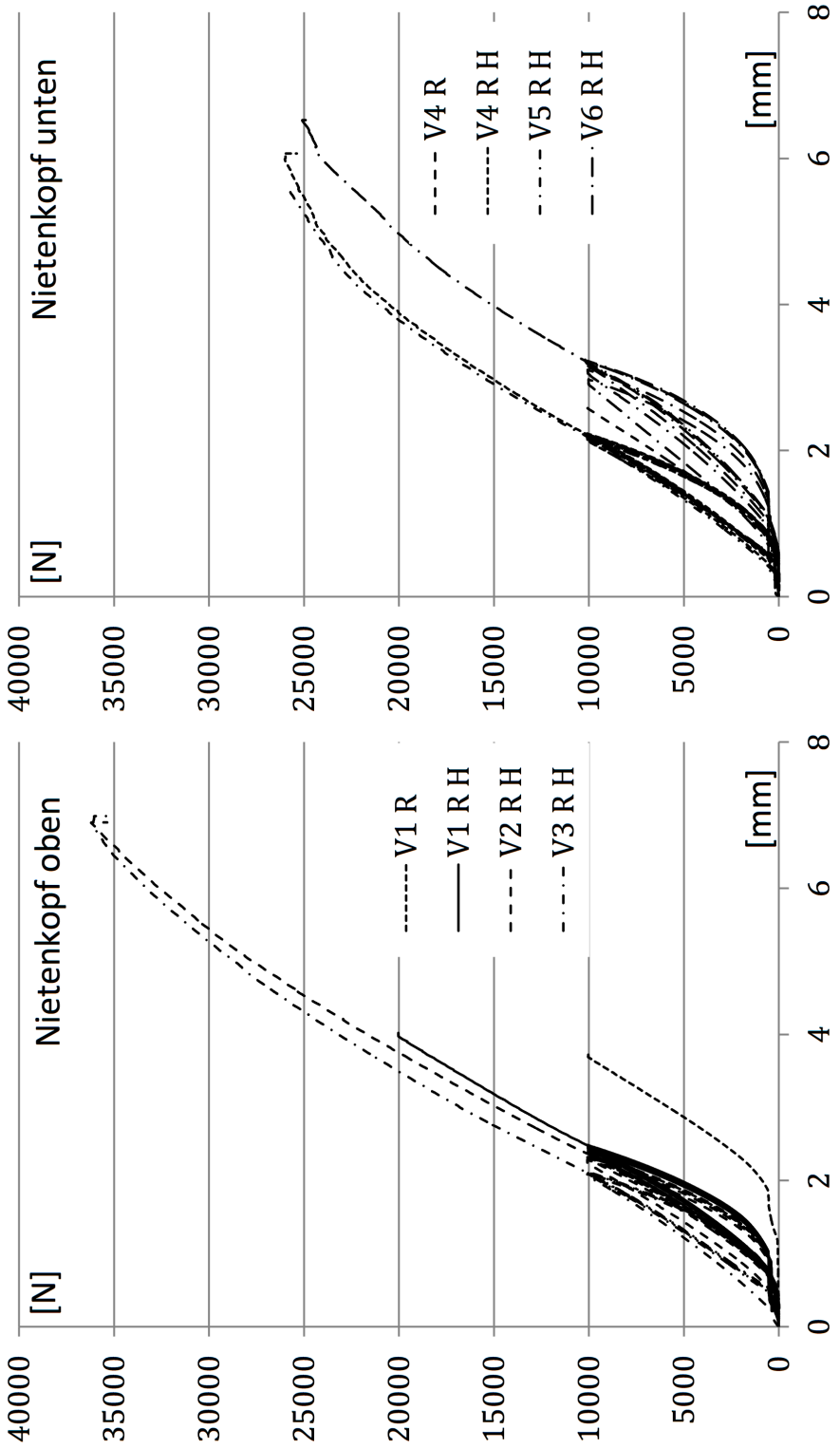
B4. Versuch D – Auswertung Traversenwegaufnehmer



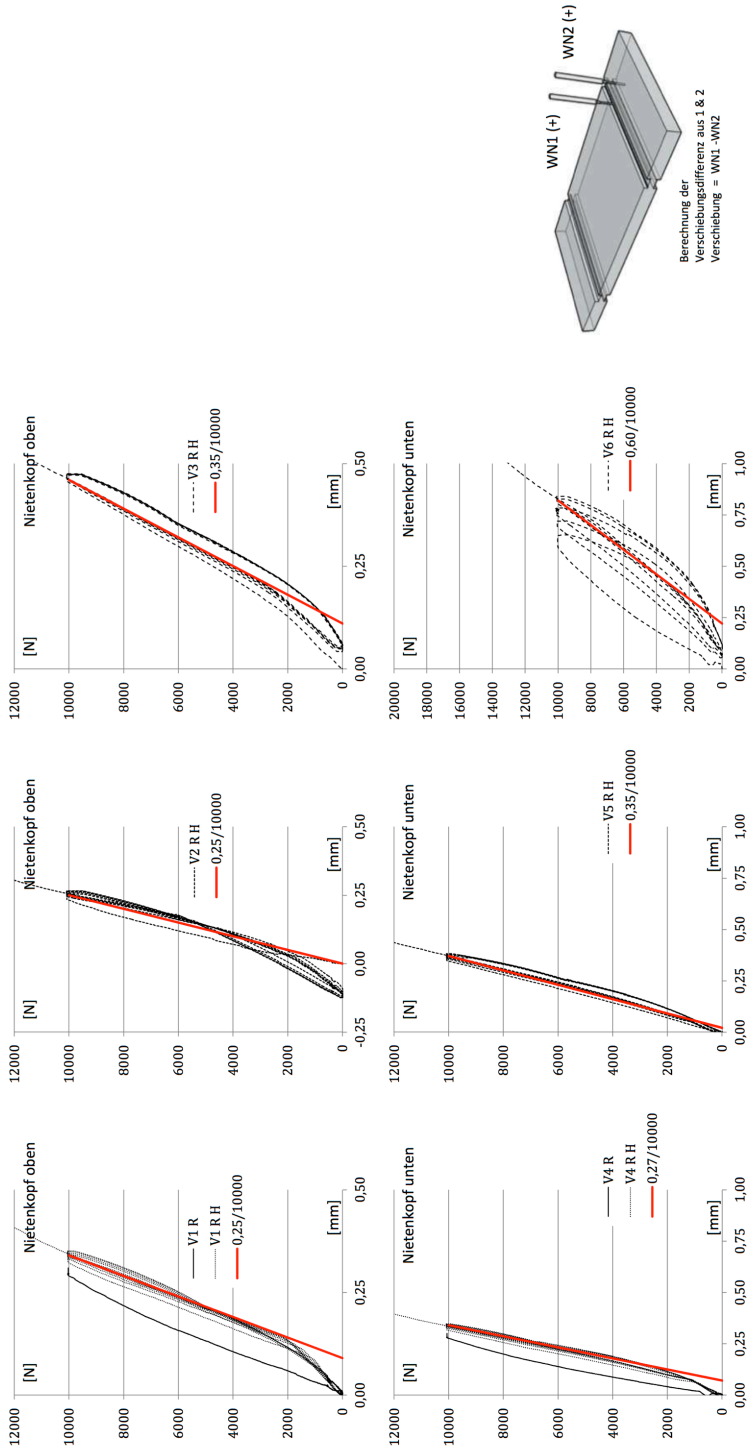
B4. Versuch D – Auswertung Wegaufnehmer



B5. Versuch V – Auswertung Traversenwegaufnehmer



B5. Versuch V – Auswertung Wegaufnehmer

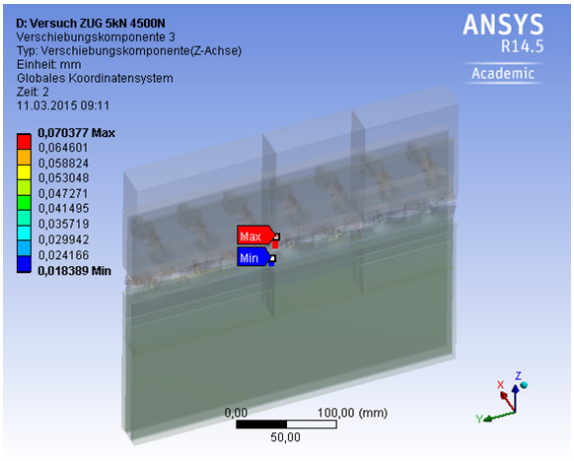


Anhang C – Modellvalidierung

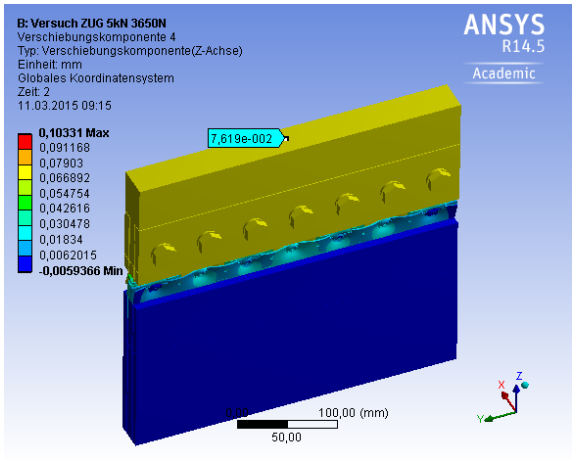
Auswertungsstand Mai 2015

C1. Modellvalidierung Zug
C2. Modellvalidierung Druck
C3. Modellvalidierung Schub
C4. Modellvalidierung Moment
C5. Modellvalidierung Querlast

C1. Modellvalidierung Zug



C I



C II

Niete 3650

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
5000	0,0362	0,022	0,0722	0,004	0,018
3750	0,025	0,022	0,057	0,004	0,014
2500	0,013	0,022	0,042	0,004	0,011

Niete 2900

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
5000	0,041	0,018	0,074	0,003	0,018
3750	0,029	0,018	0,058	0,003	0,014
2500	0,015	0,018	0,04	0,003	0,01

Niete **4500** **vgl. Bild CI**

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	**LS2** oben	LS1 unten	**LS2** unten
5000	0,031	0,026	**0,07**	0,005	**0,018**
3750	0,021	0,026	0,057	0,005	0,015
2500	0,012	0,026	0,044	0,005	0,011

Verformung am Gesamtsystem

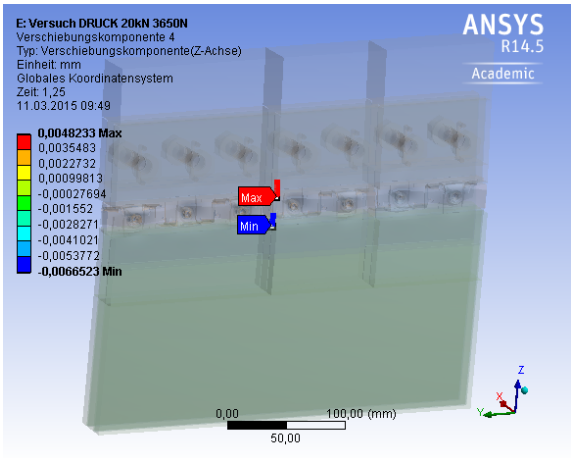
Niete **3650** **vgl. Bild CII**

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	**LS2** oben	LS1 unten	LS2 unten
5000	0,058	0,018	**0,076**	0	0

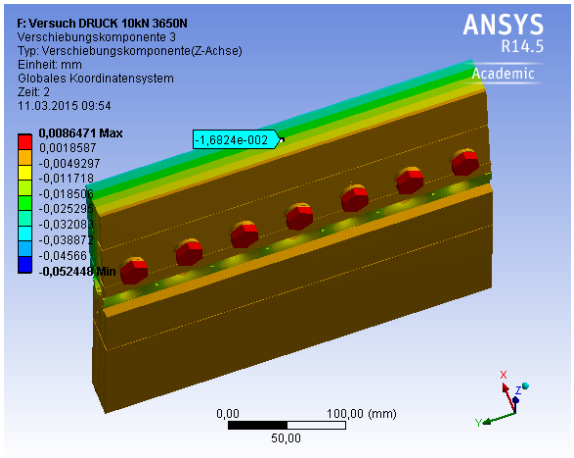
Verformung ohne Nietenvorspannung

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS1 unten
5000	0,071	0,091	0,02

C2. Modellvalidierung Druck



C III



C IV

Niete **3650** **vgl. Bild CIII**

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	**LS2** oben	LS1 unten	**LS2** unten
20000	-0,01	0,022	-0,014	0,004	-0,022
15000	-0,008	0,022	-0,007	0,004	-0,017
10000	-0,0074	0,022	-0,0014	0,004	-0,012
5000	-0,006	0,022	**0,005**	0,004	**-0,007**

Niete 2900

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
20000	-0,011	0,018	-0,017	0,003	-0,021
15000	-0,008	0,018	-0,01	0,003	-0,017
10000	-0,007	0,018	-0,004	0,003	-0,012
5000	-0,006	0,018	0,002	0,003	-0,007

Niete 4500

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
20000	-0,009	0,026	-0,01	0,005	-0,022
15000	-0,009	0,026	-0,005	0,005	-0,017
10000	-0,008	0,026	0,001	0,005	-0,012
5000	-0,007	0,026	0,008	0,005	-0,006

Verformung am Gesamtsystem

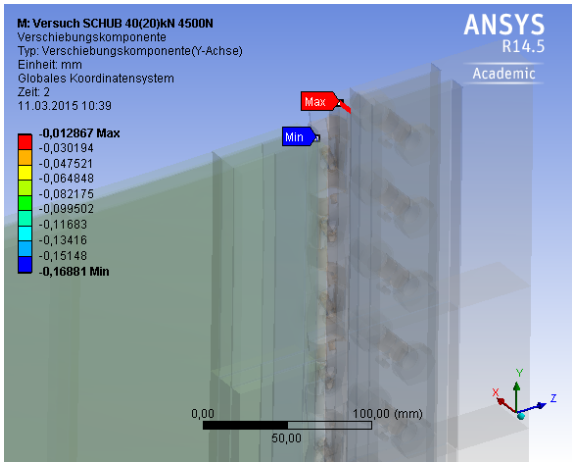
Niete 3650 vgl. Bild CIV

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
10000	-0,035	0,018	-0,017	0	0

Verformung ohne Nietenvorspannung (am Gesamtsystem)

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
10000	-0,051	-0,051	0	0	0

C3. Modellvalidierung Schub



C V

Niete 3650

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
40000	0,162	0,003	-0,013	0,003	-0,175
32000	0,13	0,003	-0,01	0,003	-0,14
20000	0,081	0,003	-0,006	0,003	-0,087
12000	0,048	0,003	-0,002	0,003	-0,05

Niete 2900

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
40000	0,166	0,0022	-0,014	0,0022	-0,18
32000	0,135	0,0022	-0,011	0,0022	-0,146
20000	0,087	0,0022	-0,006	0,0022	-0,093
12000	0,054	0,0022	-0,003	0,0022	-0,057

Niete **4500** vgl. Bild CV

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	**LS2** oben	LS1 unten	**LS2** unten
40000	0,157	0,0038	**-0,013**	0,0043	**-0,169**
32000	0,125	0,0038	-0,0097	0,0043	-0,1344
20000	0,076	0,0038	-0,0049	0,0043	-0,0807
12000	0,040	0,0038	-0,00146	0,0043	-0,0406

ohne Nietenvorspannung, Vergleich bei 20kN

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS1 unten
40000	0,218	0,0155	0,2335

C4. Modellvalidierung Moment

Niete 3650

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1	LS2
2000	-5,505	0,065	-5,44
1500	-4,185	0,065	-4,12
1000	-2,835	0,065	-2,77
500	-1,405	0,065	-1,34

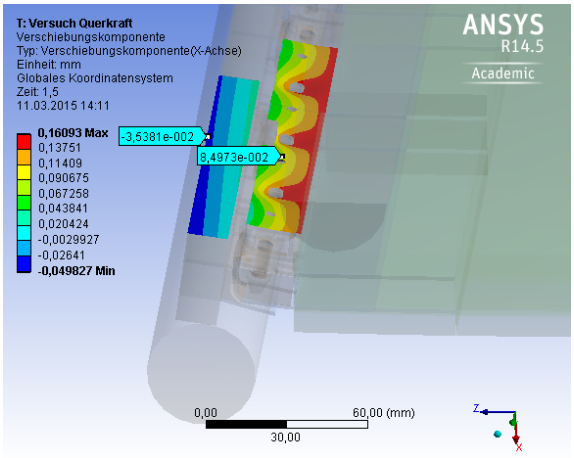
Niete 2900

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1	LS2
2000	-5,6874	0,1068	-5,5806
1500	-4,3417	0,1068	-4,2349
1000	-2,9647	0,1068	-2,8579
500	-1,5237	0,1068	-1,4169

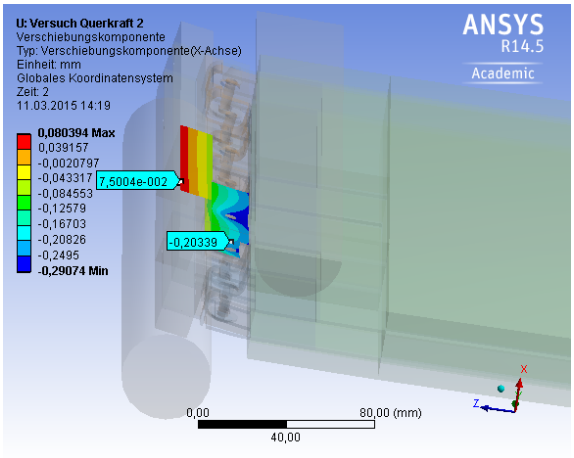
Niete 4500

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1	LS2
2000	-5,34949	0,07749	-5,272
1500	-4,09049	0,07749	-4,013
1000	-2,74449	0,07749	-2,667
500	-1,32949	0,07749	-1,252

C5. Modellvalidierung Querlast



C VI



C VII

Querkraft (V) Nietenkopf Oben
Niete 3650 vgl. Bild CVI

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
10000	-0,2978	0,0034	-0,08	-0,0168	0,1976
5000	-0,1402	0,0034	**-0,035**	-0,0168	**0,085**

Querkraft (V) Nietenkopf Unten
Niete 3650 vgl. Bild CVII

Kraft [N]	Weg [mm]	LS1 oben	LS2 oben	LS1 unten	LS2 unten
10000	0,2752	0,0039	**0,075**	0,0011	**-0,203**
5000	0,1562	0,0039	0,038	0,0011	-0,121

Anhang D – Referenzzustände

Auswertungsstand Mai 2015

D1. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode Z
D2. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode D
D3. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode M
D4. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode T
D5. Interaktion 180° - TVG
D6. Interaktion 180° - Hilti Hit HY70
D7. Interaktion 180° - SentryGlas
D8. Interaktion 180° - Betriebslast Nieten
D9. Knick – Einlaminierteile Mode Z
D10. Knick – Einlaminierteile Mode D
D11. Knick – Einlaminierteile Mode M
D12. Knick – Einlaminierteile Mode T
D13. Knick – TVG
D14. Knick –Hilti Hit HY70
D15. Knick –Sentry Glas
D16. Knick –Betriebslast Nieten
D17. Spannungsbilder Einlaminierteile Referenzen und Interaktion 180°
D18. Spannungsbilder Einlaminierteile Referenzen für variable Knickwinkel
D19. Spannungsbilder TVG, Hilti und SGP am Beispiel der Probekörper

D1. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode Z

	[N]	
Versuchslast Zug	45000	900%
Referenzlast Zug	5000	100%

EL1	[MPa]	Referenz	Abw.	Anmerkung Auswertungsort
Z Referenz NEU EL1	414		100%	Maximalwert Lochrand
Z (Referenz Probe)	450	414	109%	Maximalwert Lochrand
MZ	383	414	93%	
TZ	470	414	114%	
MTZ	458	414	111%	
EL2				
Z Referenz NEU EL2	309		100%	Maximalwert Lochrand
Z (Referenz Probe)	345	309	112%	Maximalwert Lochrand
MZ	450	309	146%	Ausgewertet am Lochrand. Wert bei Rückschnitt 502/370=135% (502/220=228%) [1)]
TZ	440	309	142%	Ausgewertet am Lochrand. Wert bei Rückschnitt 495/370=134% (495/220=225%) [1)]
MTZ	430	309	139%	Ausgewertet am Lochrand. Wert bei Rückschnitt 531/370=143% (531/220=241%) [1)]
EL3				
Z Referenz NEU EL3	370		100%	Maximalwert Rückschnitt
Z (Referenz Probe)	286	370	77%	Maximalwert Loch, verglichen mit Rückschnitt. Wert bei Loch 286/230=124%
MZ	197	230	86%	Ausgewertet am Lochrand.
TZ	709	370	192%	
MTZ	266	370	72%	
EL4				
Z Referenz NEU EL4	491		100%	Maximalwert Lochnahbereich
Z (Referenz Probe)	510	491	104%	Maximalwert Lochnahbereich
MZ	504	491	103%	
TZ	552	491	112%	
MTZ	493	491	100%	

1) Ein Vergleich mit EL3 zeigt das Spannungsspitzen bis 370MPa beim Rückschnitt unkritisch sind. Der Wert in Klammer vergleicht den Wert beim Rückschnitt EL2 mit der Referenz beim Rückschnitt EL2.

D2. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode D

	[N]		
Versuchslast Druck	160000		1600%
Referenzlast Druck	10000		100%

EL1	[MPa]	Referenz	Abw.	Anmerkung Auswertungsort
D Referenz NEU EL2	360		100%	Maximalwert Lochrand
D (Referenz Probe)	345	360	96%	Maximalwert Lochrand
MD	364	360	101%	
TD	487	360	135%	
MTD	455	360	126%	
EL2				
D Referenz EL2	272		100%	Maximalwert Lochrand
D (Referenz Probe)	285	272	105%	Maximalwert Lochrand
MD	356	272	131%	
TD	403	272	148%	
MTD	350	272	129%	Ausgewertet am Lochrand. Wert bei Rückschnitt 362/185=196% [1)]
EL3				
D Referenz EL3	186		100%	Maximalwert Lochrand
D (Referenz Probe)	206	186	111%	Maximalwert Lochrand
MD	192	186	103%	
TD	300	186	161%	Ausgewertet am Lochrand. Wert bei Rückschnitt 332/155=214% [1)]
MTD	246	186	132%	Ausgewertet am Lochrand. Wert bei Rückschnitt 261/150=174% [1)]
EL4				
D Referenz EL4	473		100%	Maximalwert Lochnahbereich
D (Referenz Probe)	470	473	99%	Maximalwert Lochnahbereich
MD	488	473	103%	
TD	526	473	111%	
MTD	489	473	103%	

1) Gewähltes Auswertungskriterium Lochrand. Lokale Spannungsspitzen beim Rückschnitt unkritisch unter Druckbelastung.

D3. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode M

	[N]		
Versuchslast M	4000		200%
Referenzlast M	2000		100%

EL1	[MPa]	Ref.	Abw.	Anmerkung Auswertungsort
M Referenz NEU EL1	478		100%	Maximalwert in Kontaktbereich
M (Referenz Probe)	433	478	91%	Maximalwert in Kontaktbereich
MD	364	373	98%	Ausgewertet am Lochrand
MZ	283	393	72%	Ausgewertet in Fläche. Wert bei Loch 383/373=103%, Wert bei Referenz M 269/478=56% 1)
MT	294	393	75%	Ausgewertet in Fläche. Wert bei Loch 487/373=131% 1)
MTD	230	393	59%	Ausgewertet in Fläche. Wert bei Loch 455/373=122% 1)
MTZ	260	393	66%	Ausgewertet in Fläche. Wert bei Loch 458/373=123% 1)
EL2				
M Referenz NEU EL2	817		100%	Maximalwert bei Rückschnitt
M (Referenz Probe)	732	817	90%	Maximalwert bei Rückschnitt
MD	356	673	53%	Ausgewertet am Lochrand
MZ	502	817	61%	
MT	647	817	79%	
MTD	362	817	44%	
MTZ	531	817	65%	
EL3				
M Referenz NEU EL3	257		100%	Maximalwert bei Aufklauung
M (Referenz Probe)	234	257	91%	Maximalwert bei Aufklauung
MD	192	205	94%	Ausgewertet am Lochrand
MZ	197	205	96%	Ausgewertet am Lochrand
MT	315	250	126%	Ausgewertet bei Rückschnitt. Wert bei Aufklauung 270/257=105%
MTD	261	250	104%	Ausgewertet bei Rückschnitt
MTZ	266	250	106%	Ausgewertet bei Rückschnitt
EL4				
M Referenz NEU EL4	690		100%	Maximalwert in Kontaktbereich
M (Referenz Probe)	652	690	94%	Maximalwert in Kontaktbereich
MD	488	690	71%	
MZ	504	690	73%	
MT	438	690	63%	Ausgewertet in Fläche. Wert bei Anschnitt 547/453=121%
MTD	489	690	71%	
MTZ	493	690	71%	

1) Biegung in Fläche für Momentenbeanspruchung kritischer als die Betrachtung der lokalen Lochleibungsspannung

D4. Interaktion 180° - Einlaminierteile Mode T

	[N]			
Versuchslast Schub	160000		400%	
Referenzlast Schub	40000		100%	

EL1	[MPa]	Referenz	Abw.	Anmerkung Auswertungsort
T Referenz NEU EL1	645		100%	Maximalwert bei Aufklauung
T (Referenz Probe)	611	645	95%	Maximalwert bei Aufklauung
TD	487	542	90%	Ausgewertet am Lochrand
TZ	470	542	87%	Ausgewertet am Lochrand
TM	487	542	90%	Ausgewertet am Lochrand
MTD	455	542	84%	Ausgewertet am Lochrand
MTZ	458	542	85%	Ausgewertet am Lochrand
EL2				
T Referenz NEU EL2	711		100%	Maximalwert bei Rückschnitt
T (Referenz Probe)	641	711	90%	Maximalwert bei Lochrand[1)]
TD	403	600	67%	Ausgewertet am Lochrand
TZ	495	711	70%	
TM	647	711	91%	
MTD	362	711	51%	
MTZ	531	711	75%	
EL3				
T Referenz NEU EL3	968		100%	Maximalwert bei Rückschnitt
T (Referenz Probe)	552	968	57%	Maximalwert bei Rückschnitt
TD	332	968	34%	
TZ	709	968	73%	
TM	315	968	33%	
MTD	261	968	27%	
MTZ	266	968	27%	
EL4				
T Referenz NEU EL4	642		100%	Maximalwert Lochnahbereich
T (Referenz Probe)	758	642	118%	Maximalwert Lochnahbereich
TD	526	642	82%	
TZ	552	642	86%	
TM	548	605	91%	Ausgewertet bei Aufklauung
MTD	489	642	76%	
MTZ	493	642	77%	

D5. Interaktion 180° - TVG

	[MPa]	
sigma char.	70	152%
sigma zul.	46	100% DIN 18008

	[Mpa]	Ausl.
M	9,42	20%
Z	1,53	3%
D	1,51	3%
T	13,7	30%

M (Referenz Probe)	9,63	21%
Z (Referenz Probe)	1,64	4%
D (Referenz Probe)	1,77	4%
T (Referenz Probe)	11	24%

MZ	4,8	10%
MD	4,84	11%
MT	7,5	16%
MTZ	5,37	12%
MTD	4,73	10%
TZ	6,74	15%
TD	6,36	14%

D6. Interaktion 180° - Hilti Hit HY70

	[MPa]	Ausl.
M	**143**	**100%**
Z	32	22%
D	25	17%
T	160	112%
M (Referenz Probe)	134	94%
Z (Referenz Probe)	41	29%
D (Referenz Probe)	42,4	30%
T (Referenz Probe)	118,6	83%
MZ	76	53%
MD	41	29%
MT	90	63%
MTZ	66	46%
MTD	42	29%
TZ	83	58%
TD	46	32%

D7. Interaktion 180° - SentryGlas

	[MPa]	
M	**6,1**	**100%**
Z	0,72	12%
D	1,97	32%
T	6,05	99%
M (Referenz Probe)	7,54	124%
Z (Referenz Probe)	1	16%
D (Referenz Probe)	2,72	45%
T (Referenz Probe)	2,48	41%
MZ	2,93	48%
MD	4,21	69%
MT	6,03	99%
MTZ	4,03	66%
MTD	4,4	72%
TZ	2,72	45%
TD	3,18	52%

D8. Interaktion 180° - Betriebslast Nieten

	[N]	
Anzugswert	3650	100%
M	3714	102%
Z	3558	97%
D	3766	103%
T	3864	106%
M (Referenz Probe)	3829	105%
Z (Referenz Probe)	3585	98%
D (Referenz Probe)	3832	105%
T (Referenz Probe)	4002	110%
MZ	3709	102%
MD	3662	100%
MT	3759	103%
MTZ	3726	102%
MTD	3700	101%
TZ	3797	104%
TD	3849	105%

D9. Knick - Einlaminierteile Mode Z

	[N]		
Versuchslast Zug	45000		900%
Interaktionslast	5000		100%

EL1	[Mpa]	Referenz	Abw.	Anmerkung Auswertungsort
180°	417		100%	Maximalwert Lochrand
180° (Referenz)	450	417	108%	Maximalwert Lochrand
150°	436	417	105%	
120°	391	417	94%	
90°	409	417	98%	
60°	473	417	113%	
EL2				
180	314		100%	Maximalwert Lochrand
180° (Referenz)	345	314	110%	Maximalwert Lochrand
150	312	314	99%	
120	354	314	113%	
90	372	291	128%	Ausgewertet für Rückschnitt. Wert am Lochrand 341/314=109%[1)]
60	403	291	138%	Ausgewertet für Rückschnitt. Wert am Lochrand 366/314=117%[1)]
EL3				
180	291		100%	Maximalwert Rückschnitt
180° (Referenz)	286	291	98%	Verglichen mit Rückschnitt. Wert bei Loch 286/230=124%
150	275	291	95%	
120	314	291	108%	
90	380	291	131%	
60	404	291	139%	
EL4				
180	491		100%	Maximalwert Lochnahbereich
180° (Referenz)	510	491	104%	Maximalwert Lochnahbereich
150	488	491	99%	
120	514	491	105%	
90	470	491	96%	
60	587	491	120%	Ausgewertet für Lochrand

1) Bei EL3 ist die Referenz mit 291MPa beim Rückschnitt unkritisch.

D10. Knick - Einlaminierteile Mode D

	[N]		
Versuchslast Druck	160000		1600%
Interaktionslast	10000		100%

EL1	[Mpa]	Referenz	Abweichung	Anmerkung zum Auswertungsort
180°	368		100%	Maximalwert in Kantung. Wert bei Loch 350MPa
180° (Referenz)	345	368	94%	Maximalwert Lochrand
150°	369	368	100%	
120°	378	368	103%	
90°	330	368	90%	
60°	377	368	102%	Maximalwert bei Anschnitt Kantung. Wert bei Loch 360MPa
EL2				
180	271		100%	Maximalwert Lochrand
180° (Referenz)	285	271	105%	Maximalwert Lochrand
150	265	271	98%	
120	313	271	115%	
90	310	271	114%	
60	355	271	131%	Ausgewertet bei Anschnitt. Wert am Lochrand 314/271=116%
EL3				
180	188		100%	Maximalwert Lochrand
180° (Referenz)	206	188	110%	Maximalwert Lochrand
150	198	188	105%	
120	211	188	112%	
90	212	188	113%	
60	240	188	128%	
EL4				
180	468		100%	Maximalwert Lochnahbereich
180° (Referenz)	470	468	100%	Maximalwert Lochnahbereich
150	472	468	101%	
120	520	468	111%	
90	581	468	124%	
60	724	468	155%	

D11. Knick - Einlaminierteile Mode M

	[N]		
Versuchslast Moment	4000		200%
Interaktionslast	2000		100%

EL1	[MPa]	Referenz	Abweichung	Anmerkung zum Auswertungsort
180°	478		100%	Maximalwert in Kontaktbereich
180° (Referenz)	433	478	91%	Maximalwert in Kontaktbereich
150°	411	478	86%	
120°	375	478	78%	347MPa in Fläche
90°	404	478	85%	
60°	442	478	92%	
EL2				
180	817		100%	Maximalwert bei Rückschnitt
180° (Referenz)	732	817	90%	Maximalwert bei Rückschnitt
150	800	817	98%	
120	762	817	93%	
90	672	817	82%	
60	532	817	65%	
EL3				
180	257		100%	Maximalwert bei Aufklauung
180° (Referenz)	234	257	91%	Maximalwert bei Aufklauung
150	238	245	97%	Ausgewertet bei Rückschnitt
120	214	245	87%	Ausgewertet bei Rückschnitt
90	205	257	80%	Ausgewertet bei Loch mit 257MPa[1)]. Wert bei Aufklauung 154/257=60%
60	254	257	99%	Ausgewertet bei Loch mit 257MPa[1)]. Wert bei Aufklauung 135/257=53%
EL4				
180	689		100%	Maximalwert in Kontaktbereich
180° (Referenz)	652	689	95%	Maximalwert in Kontaktbereich
150	702	689	102%	
120	672	689	98%	
90	602	689	87%	
60	593	689	86%	

1) Die Referenz bei EL3 am Lochrand beträgt eigentlich 209MPa. Bei EL2 liegen die Spannungen am Lochrand bei 600MPa. Ein Abgleich mit 257MPa ist demnach vertretbar.

D12. Knick - Einlaminierteile Mode T

Schub	[N]		
Versuchslast Schub	160000	400%	
Interaktionslast	40000	100%	

EL1	[MPa]	Referenz	Abweichung	Anmerkung zum Auswertungsort
180°	615		100%	Maximalwert bei Aufklauung
180° (Referenz)	611	615	99%	Maximalwert bei Aufklauung
150°	591	615	96%	
120°	578	615	94%	
90°	639	615	104%	
60°	680	615	111%	
EL2				
180	598		100%	Maximalwert bei Lochrand
180° (Referenz)	641	598	107%	Maximalwert bei Lochrand
150	634	598	106%	
120	676	598	113%	
90	*749*	598	125%	Abgeschätzt mit Wert Start Aufklauung. Im Lochbereich 649/598=109%
60	*770*	598	129%	Schätzwert (schlechte Elementmetrik)
EL3				
180	489		100%	Maximalwert bei Lochrand
180° (Referenz)	552	489	113%	Maximalwert bei Rückschnitt. Verglichen mit 489MPa
150	486	489	99%	
120	484	489	99%	
90	*615*	489	126%	Abgeschätzt für Anschnitt. Wert bei Loch 454/489=93%
60	*700*	489	143%	Abgeschätzt für Anschnitt (schlechte Element-metrik). Wert bei Lochrand 450/489=92%
EL4				
180	628		100%	Maximalwert Anschnitt Aufklauung. Wert im Lochnahbereich 570MPa
180° (Referenz)	758	628	121%	Maximalwert Lochnahbereich, verglichen mit 628MPa
150	600	628	96%	Ausgewertet bei Aufklauung. Wert im Lochnah-bereich 570MPa
120	619	628	99%	Ausgewertet bei Aufklauung. Wert im Lochnah-bereich 540MPa
90	642	628	102%	Ausgewertet bei Aufklauung. Wert im Lochnah-bereich 560MPa
60	662	628	105%	Maximalwert bei Lochrand. Verglichen mit 628MPa. Wert im Lochnahbereich 542MPa

D13. Knick - TVG

	[MPa]		
sigma char.	70	152%	
sigma zul.	46	100%	DIN 18008

Moment	[MPa]		
180°	9,42	20%	
180° (Referenz)	9,63	21%	
150°	12,2	27%	
120°	15,2	33%	
90°	27,8	60%	
60°	20,1	44%	
Zug			
180°	2,39	5%	
180° (Referenz)	1,64	4%	
150°	1,32	3%	
120°	2,34	5%	
90°	2,73	6%	
60°	6,28	14%	
Druck			
180°	1,55	3%	
180° (Referenz)	1,77	4%	
150°	2,62	6%	
120°	5,55	12%	
90°	6,14	13%	
60°	6,23	14%	
Schub			
180°	6,52	14%	
180° (Referenz)	11	24%	
150°	7,42	16%	
120°	9,04	20%	
90°	11,6	25%	
60°	13,9	30%	

D14. Knick - Hilti Hit HY70

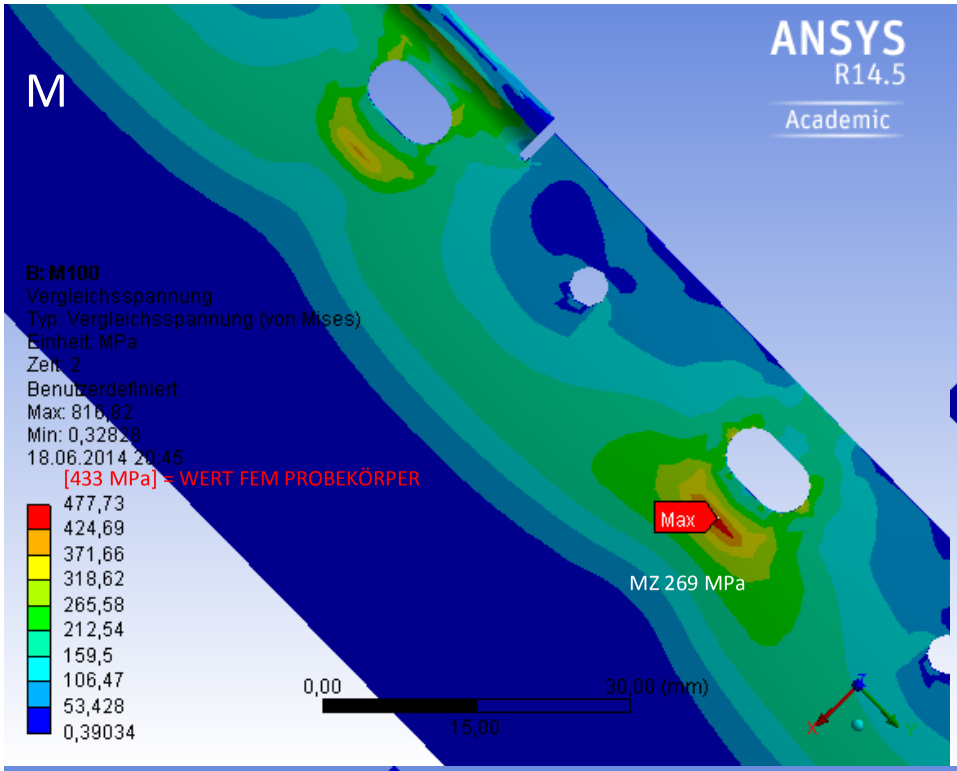
	[MPa]	
σ min (FEM 180°)	143	100%
Moment		
180°	143	100%
180° (Referenz)	134	94%
150°	144	101%
120°	128	90%
90°	107	75%
60°	76	53%
Zug		
180°	29	20%
180° (Referenz)	41	29%
150°	32,6	23%
120°	28,3	20%
90°	35	24%
60°	26,2	18%
Druck		
180°	25	17%
180° (Referenz)	42,4	30%
150°	24,6	17%
120°	16,2	11%
90°	35,7	25%
60°	22	15%
Schub		
180°	111	78%
180° (Referenz)	118,6	83%
150°	109	76%
120°	89	62%
90°	90,6	63%
60°	93,2	65%

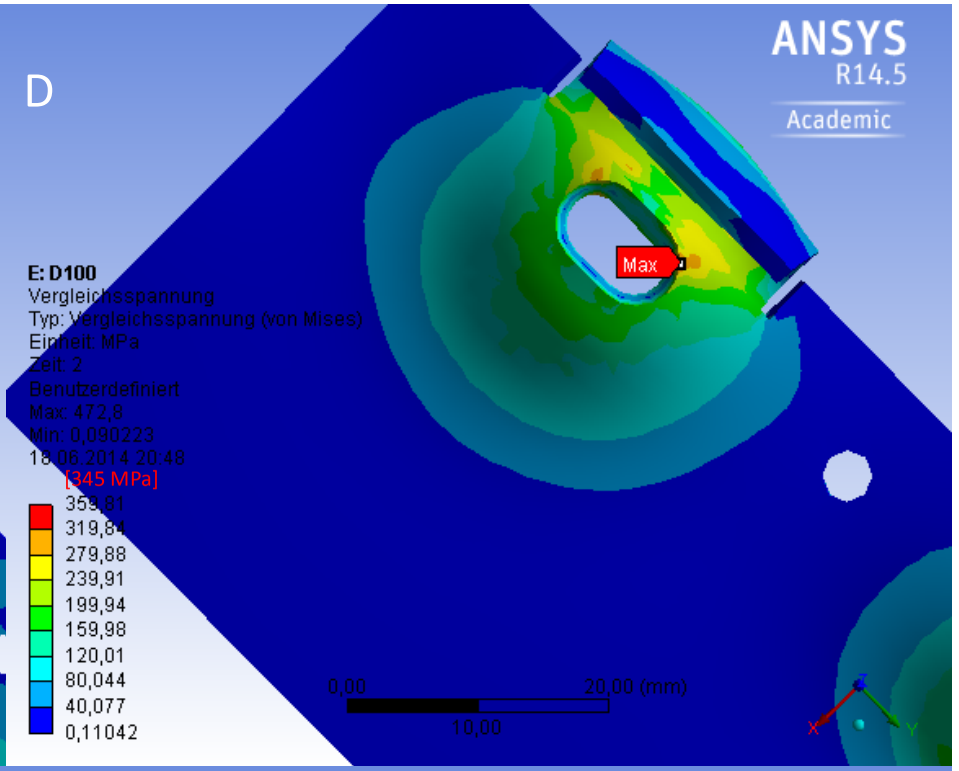
D15. Knick - SentryGlas

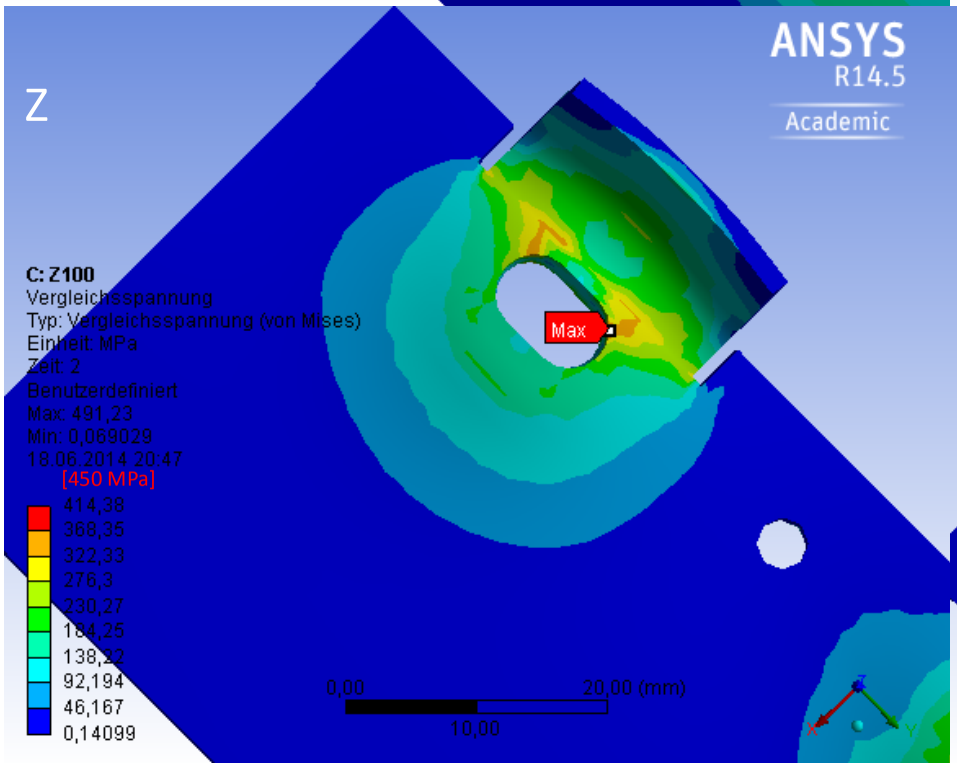
	[MPa]	
τ max (FEM Probe)	7,54	100%
Moment		
180°	6,1	81%
180° (Referenz)	7,54	100%
150°	5,29	70%
120°	5	66%
90°	3,23	43%
60°	3,84	51%
Zug		
180°	0,7	9%
180° (Referenz)	1	13%
150°	1,54	20%
120°	2,2	29%
90°	1,94	26%
60°	2,31	31%
Druck		
180°	1,74	23%
180° (Referenz)	2,72	36%
150°	1,88	25%
120°	2,57	34%
90°	1,51	20%
60°	2,03	27%
Schub		
180°	4,02	53%
180° (Referenz)	2,48	33%
150°	3,64	48%
120°	5,82	77%
90°	4,84	64%
60°	7,66	102%

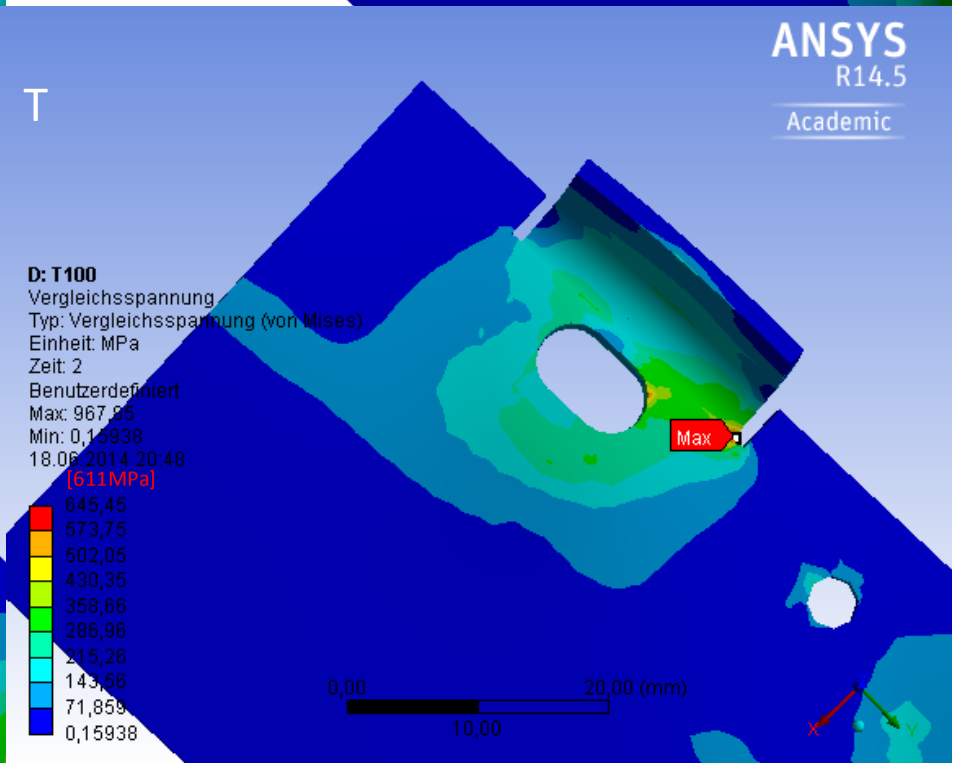
D16. Knick - Betriebslast Nieten

	[N]		
Anzugswert	3650	100%	
Moment			
180°	3714	102%	
180° (Referenz)	3829	105%	
150°	3751	103%	
120°	3864	106%	
90°		0%	nicht auswertbar
60°	3846	105%	
Zug			
180°	3521	96%	
180° (Referenz)	3585	98%	
150°	3563	98%	
120°	3682	101%	
90°	3566	98%	
60°	3653	100%	
Druck			
180°	3780	104%	
180° (Referenz)	3832	105%	
150°	3773	103%	
120°	3807	104%	
90°		0%	nicht auswertbar
60°	3803	104%	
Schub			
180°	3963	109%	
180° (Referenz)	4002	110%	
150°	3957	108%	
120°	4045	111%	
90°	3829	105%	
60°	3897	107%	

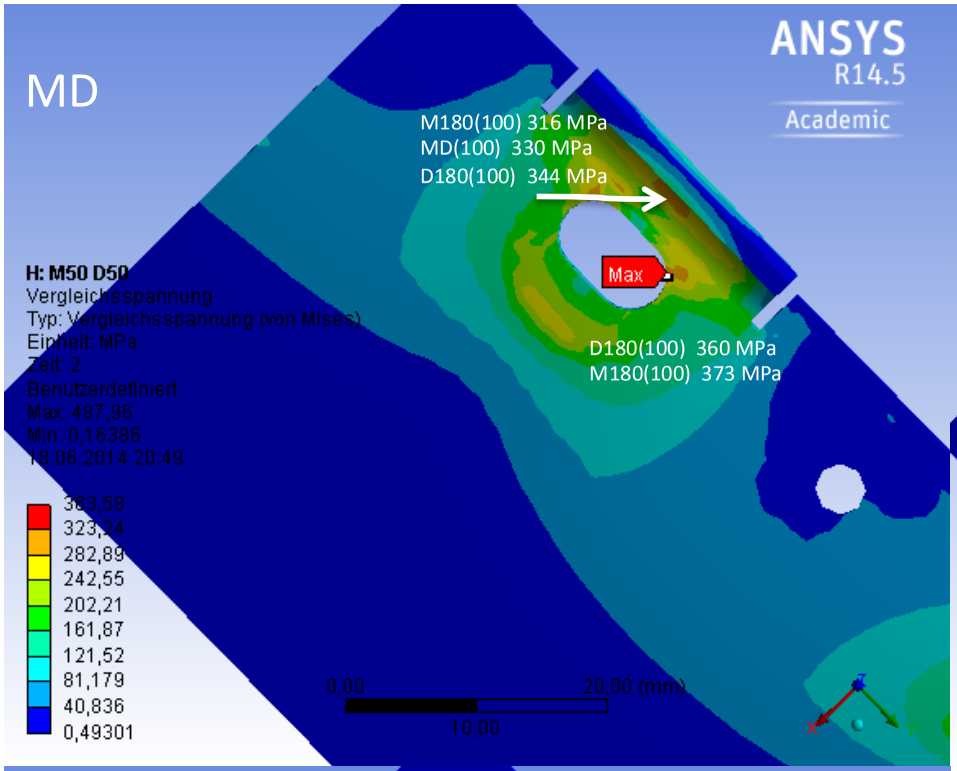


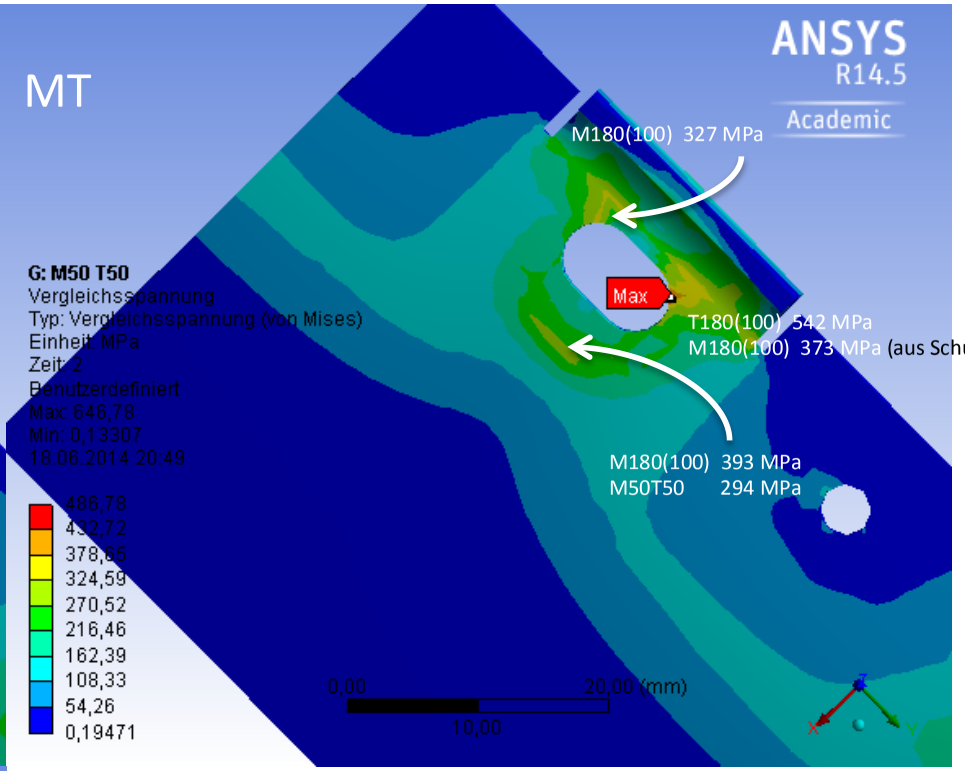


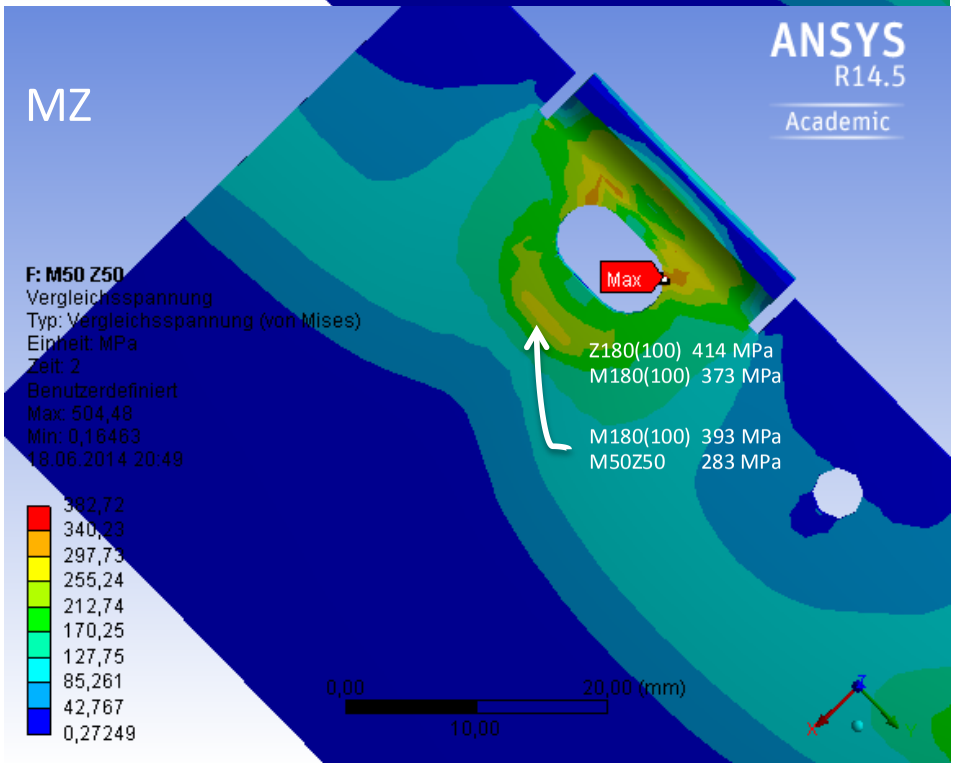


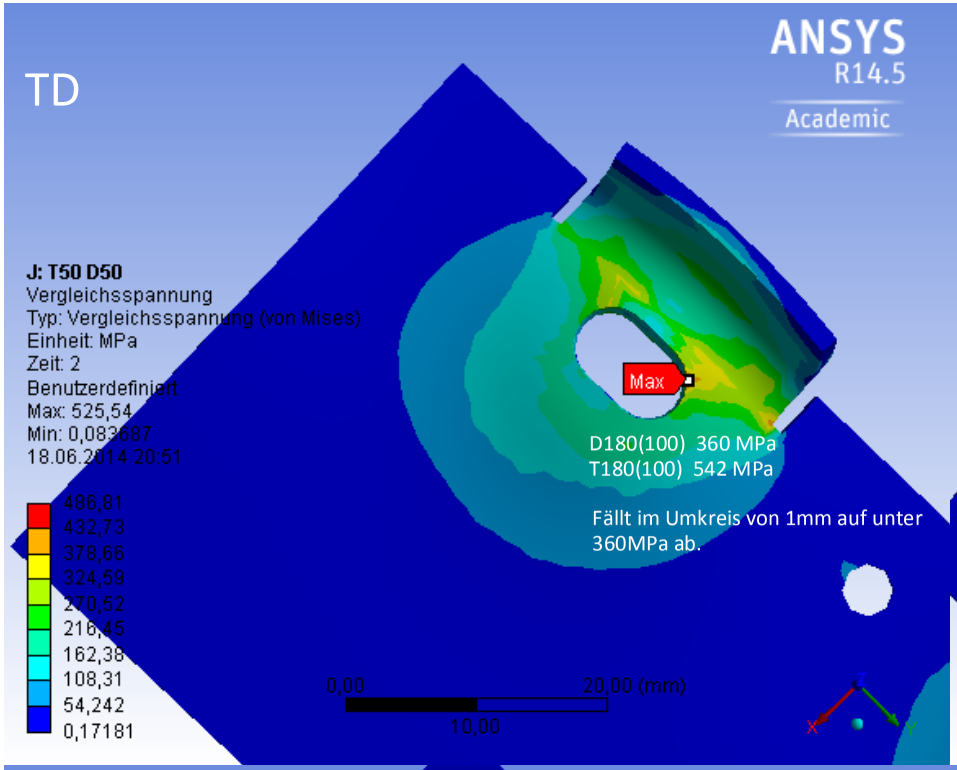


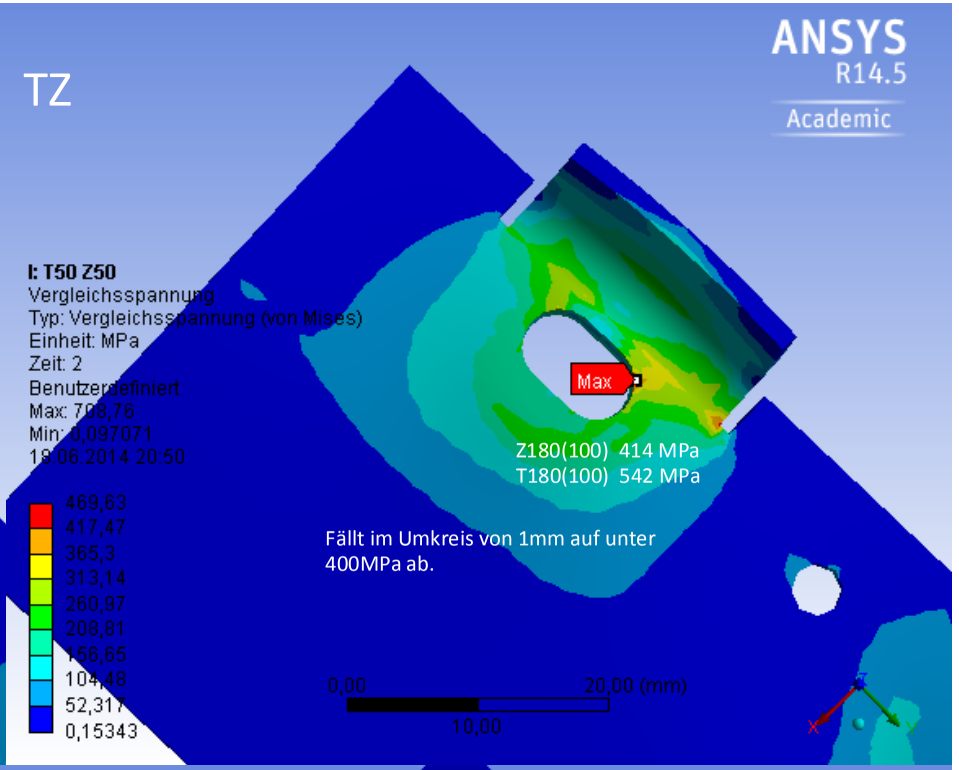
ANHANG D17 - EL1 Referenz NEU

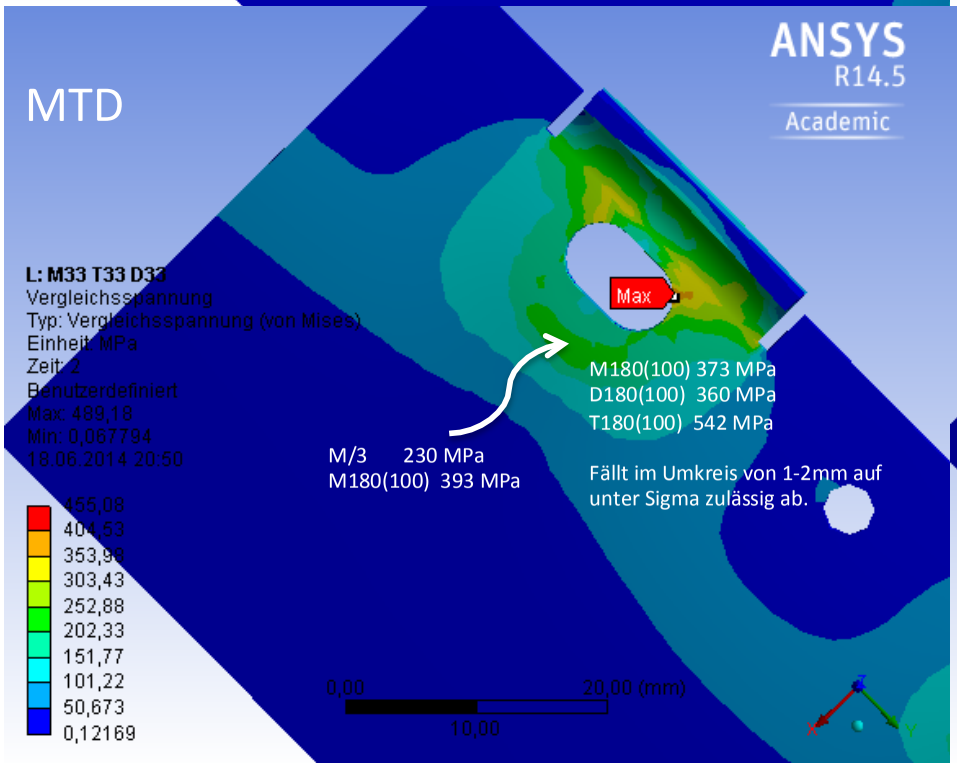

MD
ANSYS
R14.5
Academic
M180(100) 316 MPa
MD(100) 330 MPa
D180(100) 344 MPa
Max
D180(100) 360 MPa
M180(100) 373 MPa
H: M50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 487,96
Min: 0,16386
18.06.2014 20:49
363,58
323,24
282,89
242,55
202,21
161,87
121,52
81,179
40,836
0,49301
0,00
20,00 (mm)
10,00

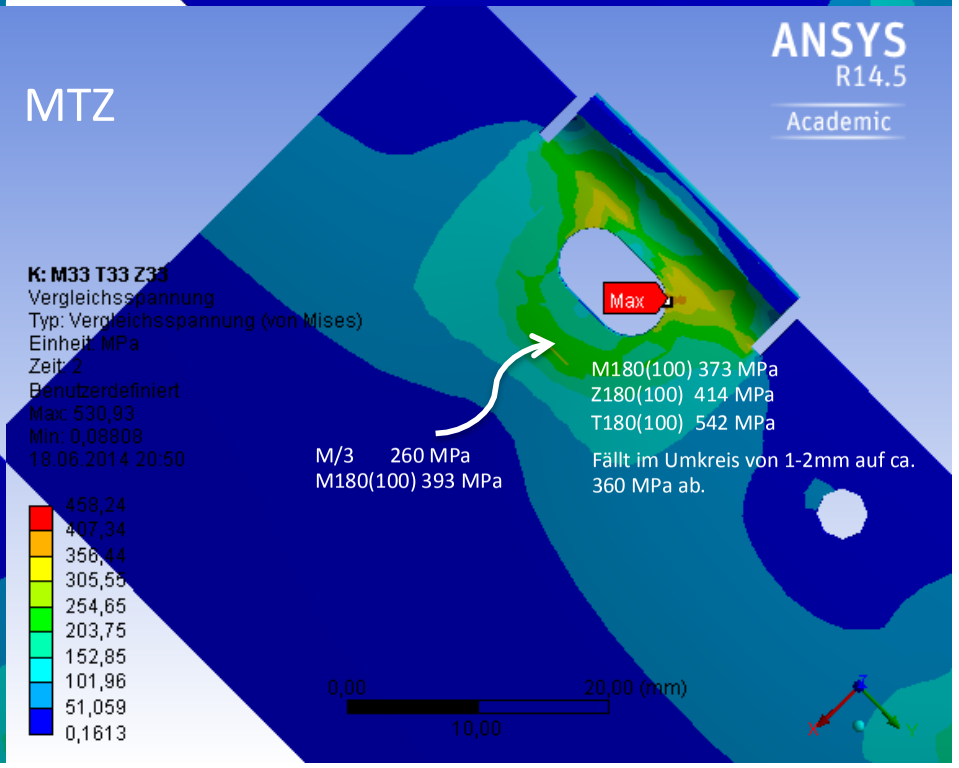

MT
ANSYS
R14.5
Academic
M180(100) 327 MPa
Max
T180(100) 542 MPa
M180(100) 373 MPa (aus Schub)
M180(100) 393 MPa
M50T50 294 MPa
G: M50 T50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 646,78
Min: 0,13307
18.06.2014 20:49
486,78
432,72
378,65
324,59
270,52
216,46
162,39
108,33
54,26
0,19471
0,00
20,00 (mm)
10,00


MZ
ANSYS
R14.5
Academic
Max
Z180(100) 414 MPa
M180(100) 373 MPa
M180(100) 393 MPa
M50Z50 283 MPa
F: M50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 504,48
Min: 0,16463
18.06.2014 20:49
382,72
340,23
297,73
255,24
212,74
170,25
127,75
85,261
42,767
0,27249
0,00
20,00 (mm)
10,00

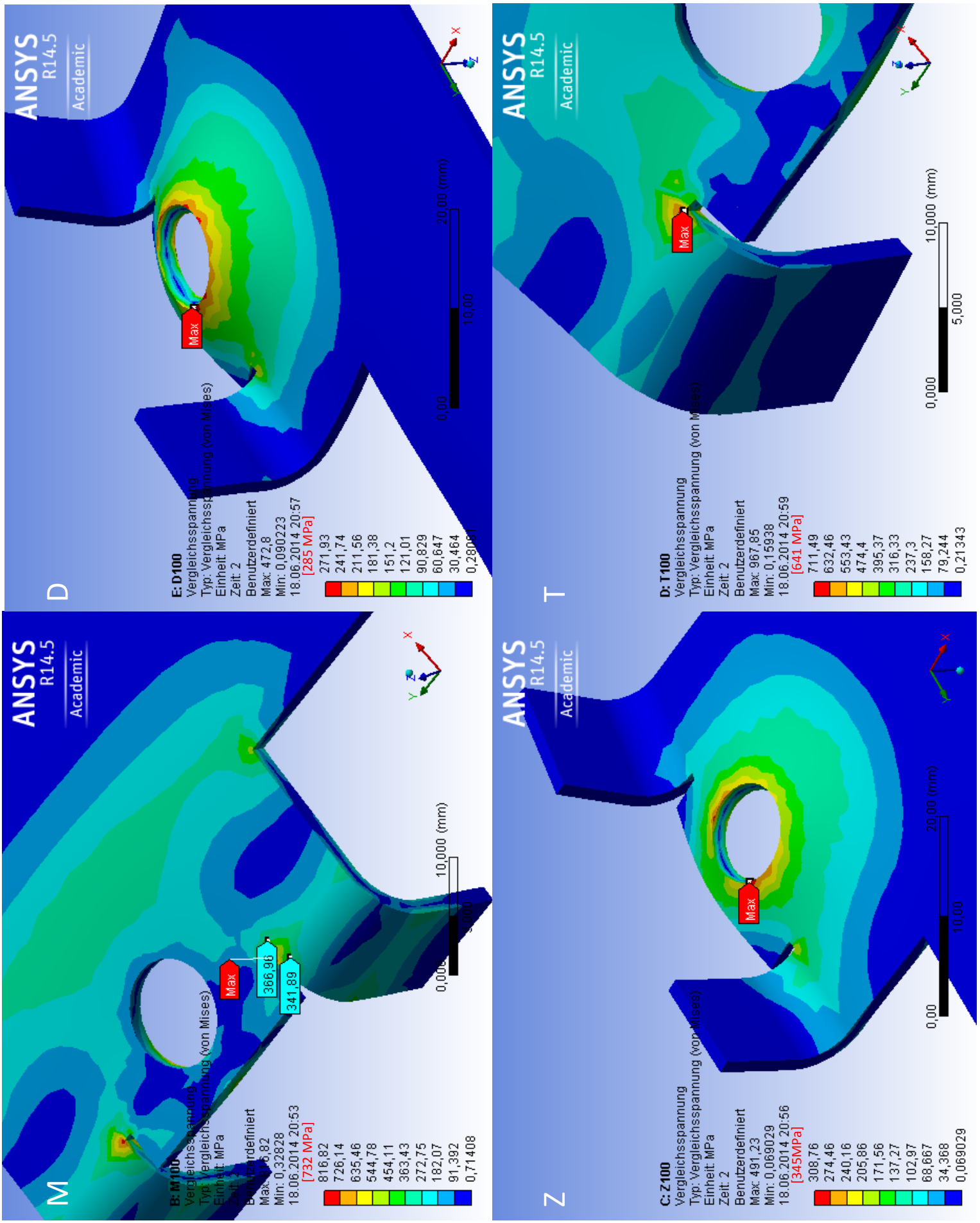

TD
ANSYS
R14.5
Academic
J: T50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 525,54
Min: 0,083687
18.06.2014 20:51
486,81
432,73
378,66
324,59
270,52
216,45
162,38
108,31
54,242
0,17181
Max
D180(100) 360 MPa
T180(100) 542 MPa
Fällt im Umkreis von 1mm auf unter 360MPa ab.
0,00
20,00 (mm)
10,00

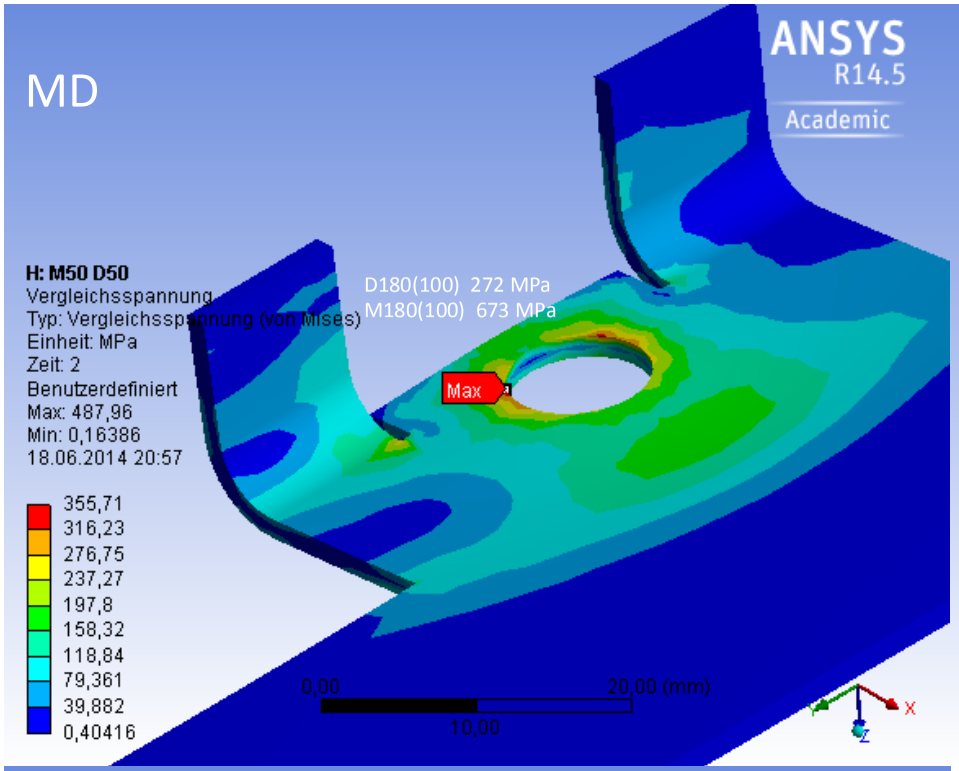

TZ
ANSYS
R14.5
Academic
I: T50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 708,76
Min: 0,097071
18.06.2014 20:50
469,63
417,47
365,3
313,14
260,97
208,81
156,65
104,48
52,317
0,15343
Max
Z180(100) 414 MPa
T180(100) 542 MPa
Fällt im Umkreis von 1mm auf unter 400MPa ab.
0,00
20,00 (mm)
10,00

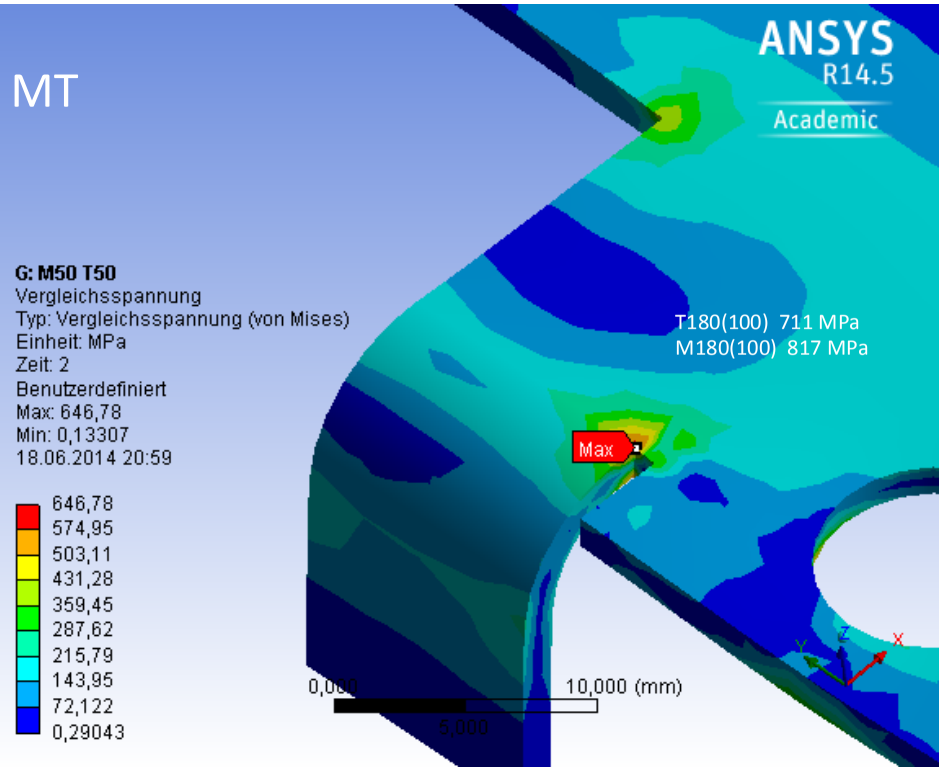

MTD
ANSYS
R14.5
Academic
L: M33 T33 D33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 489,18
Min: 0,067794
18.06.2014 20:50
455,08
404,53
353,99
303,43
252,88
202,33
151,77
101,22
50,673
0,12169
Max
M180(100) 373 MPa
D180(100) 360 MPa
T180(100) 542 MPa
M/3 230 MPa
M180(100) 393 MPa
Fällt im Umkreis von 1-2mm auf unter Sigma zulässig ab.
0,00
20,00 (mm)
10,00

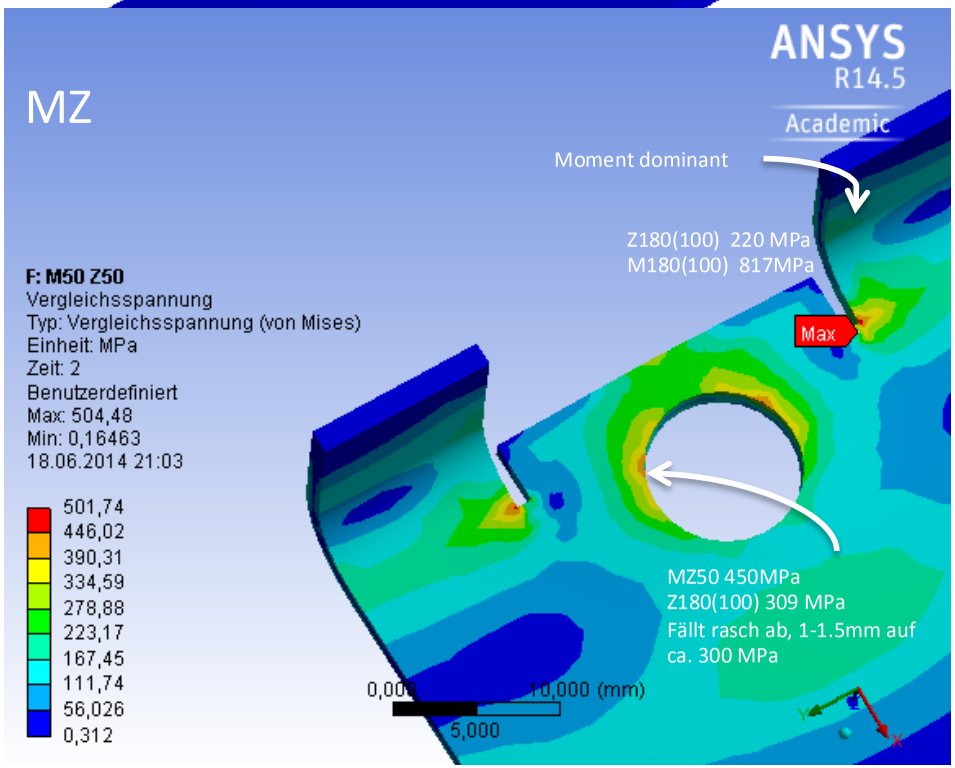

MTZ
ANSYS
R14.5
Academic
K: M33 T33 Z33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 530,93
Min: 0,08808
18.06.2014 20:50
458,24
407,34
356,44
305,55
254,65
203,75
152,85
101,96
51,059
0,1613
Max
M180(100) 373 MPa
Z180(100) 414 MPa
T180(100) 542 MPa
M/3 260 MPa
M180(100) 393 MPa
Fällt im Umkreis von 1-2mm auf ca. 360 MPa ab.
0,00
20,00 (mm)
10,00

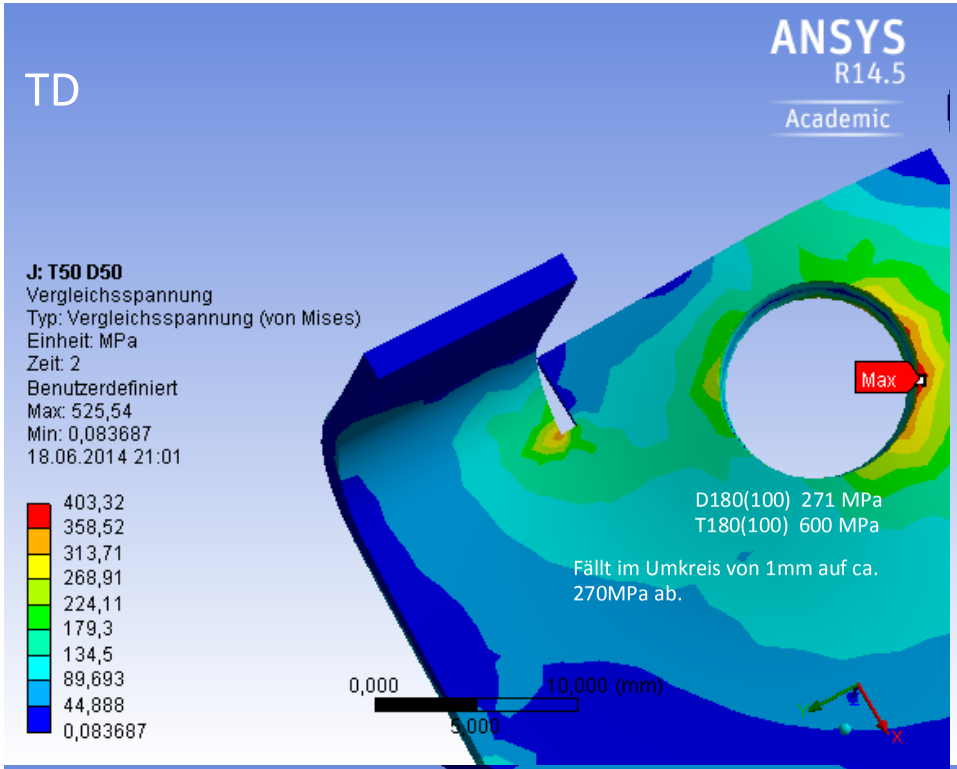
ANHANG D17 – EL2 Referenz NEU

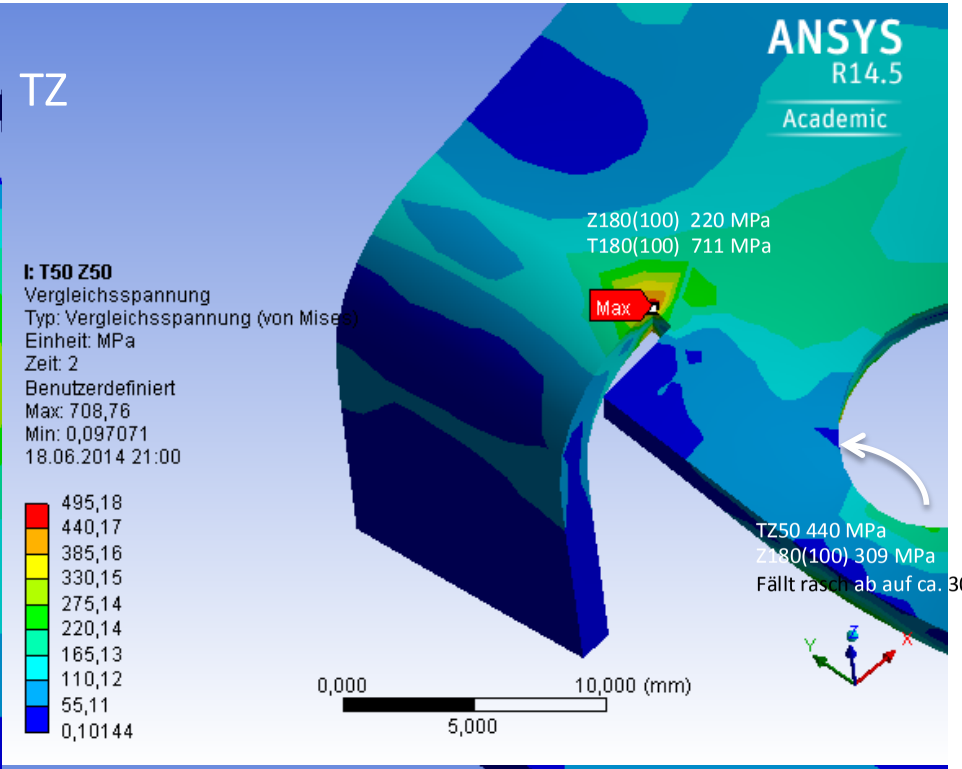


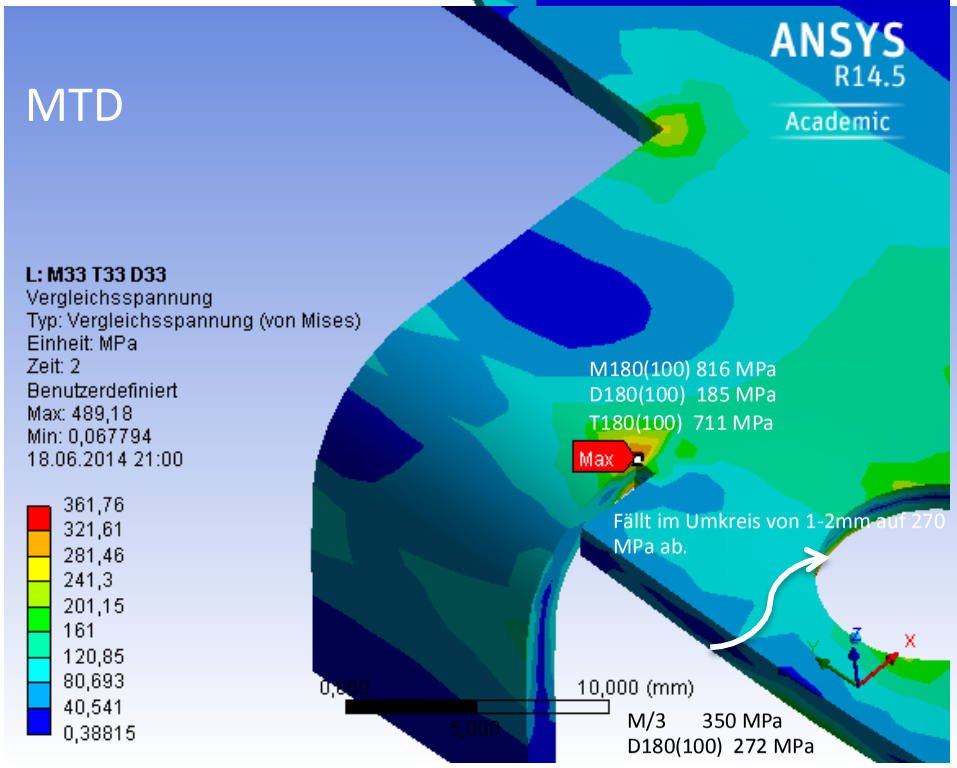

MD
ANSYS
R14.5
Academic
H: M50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 487,96
Min: 0,16386
18.06.2014 20:57
355,71
316,23
276,75
237,27
197,8
158,32
118,84
79,361
39,882
0,40416
D180(100) 272 MPa
M180(100) 673 MPa
Max
0,00
20,00 (mm)
10,00

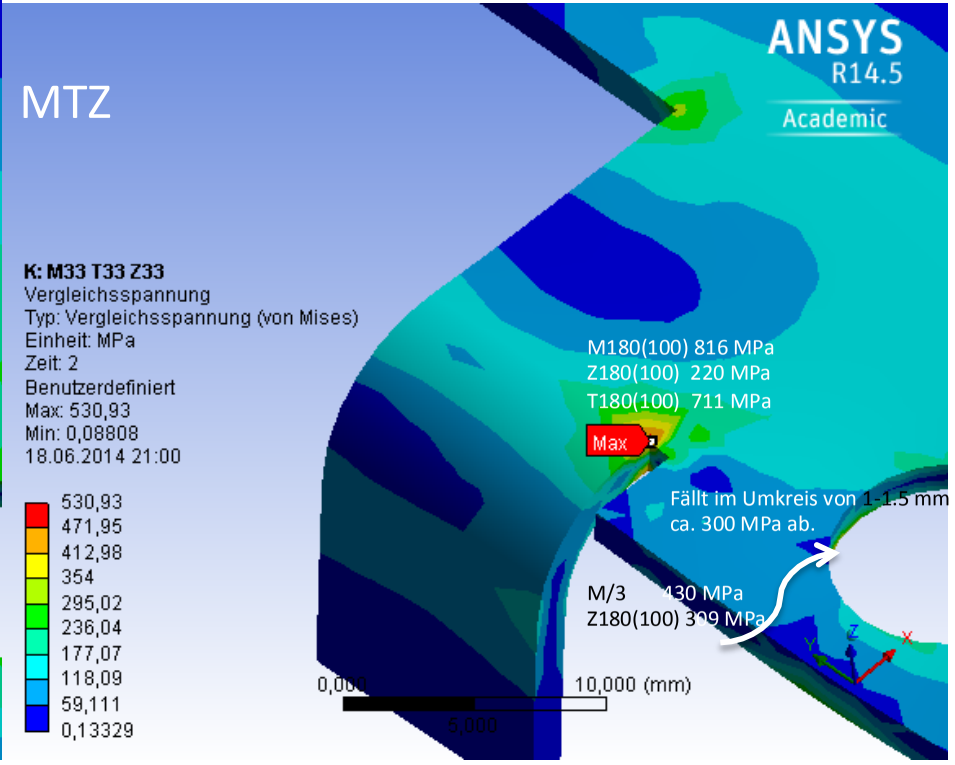

MT
ANSYS
R14.5
Academic
G: M50 T50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 646,78
Min: 0,13307
18.06.2014 20:59
646,78
574,95
503,11
431,28
359,45
287,62
215,79
143,95
72,122
0,29043
T180(100) 711 MPa
M180(100) 817 MPa
Max
10,000 (mm)
5,000

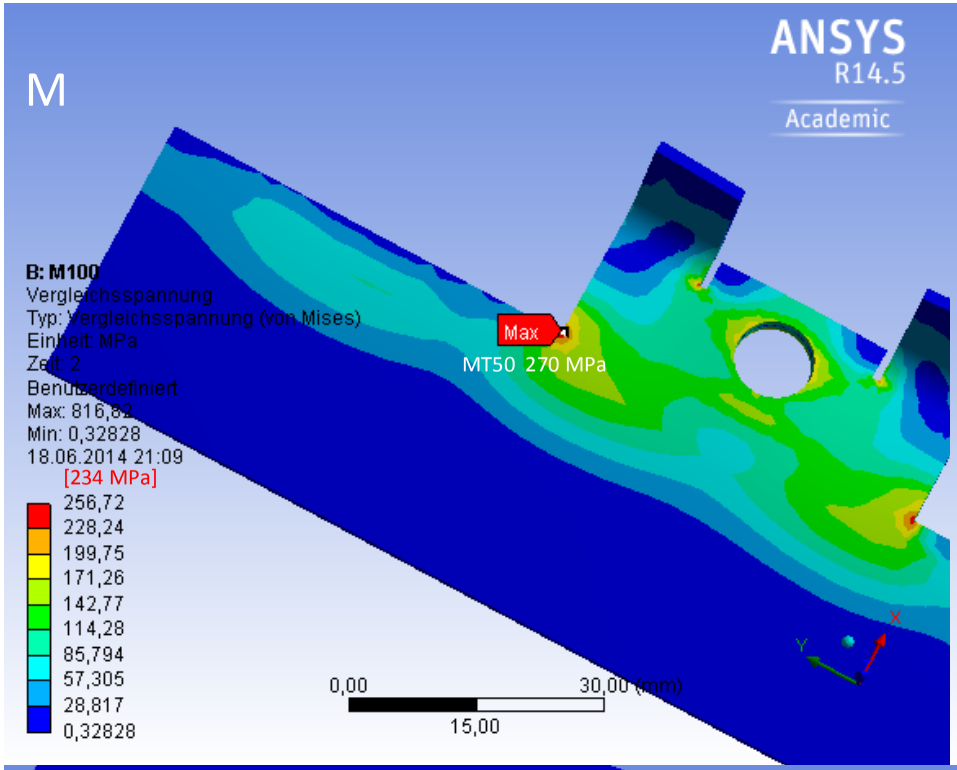

MZ
ANSYS
R14.5
Academic
Moment dominant
F: M50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 504,48
Min: 0,16463
18.06.2014 21:03
501,74
446,02
390,31
334,59
278,88
223,17
167,45
111,74
56,026
0,312
Z180(100) 220 MPa
M180(100) 817MPa
Max
MZ50 450MPa
Z180(100) 309 MPa
Fällt rasch ab, 1-1.5mm auf
ca. 300 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

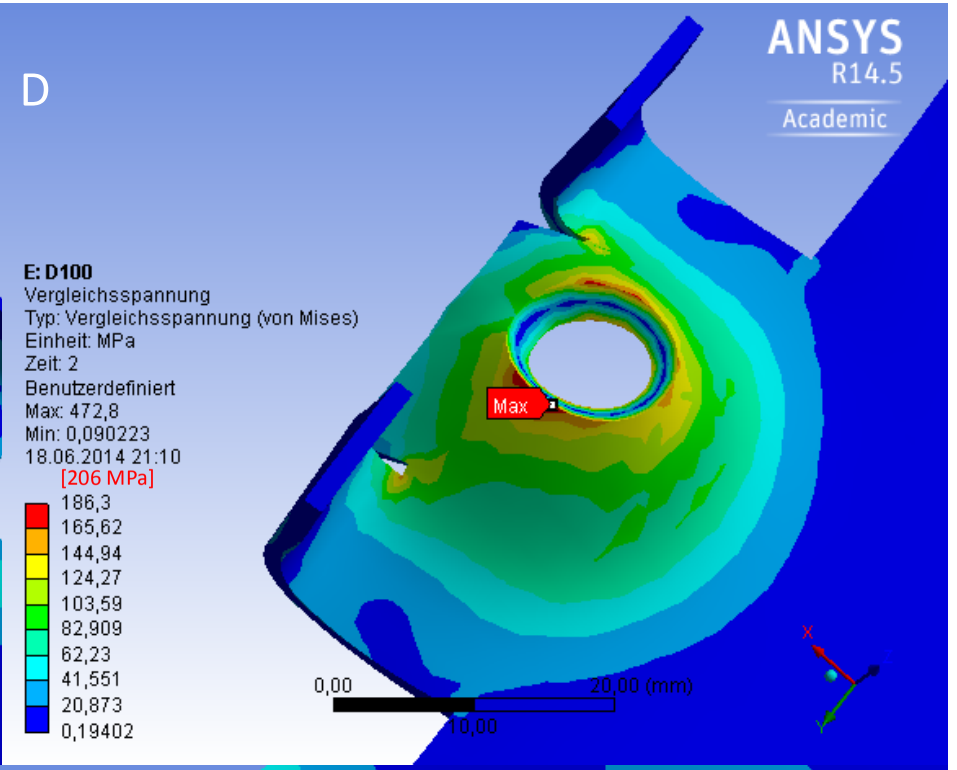

TD
ANSYS
R14.5
Academic
J: T50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 525,54
Min: 0,083687
18.06.2014 21:01
403,32
358,52
313,71
268,91
224,11
179,3
134,5
89,693
44,888
0,083687
Max
D180(100) 271 MPa
T180(100) 600 MPa
Fällt im Umkreis von 1mm auf ca. 270MPa ab.
0,000
10,000 (mm)
5,000

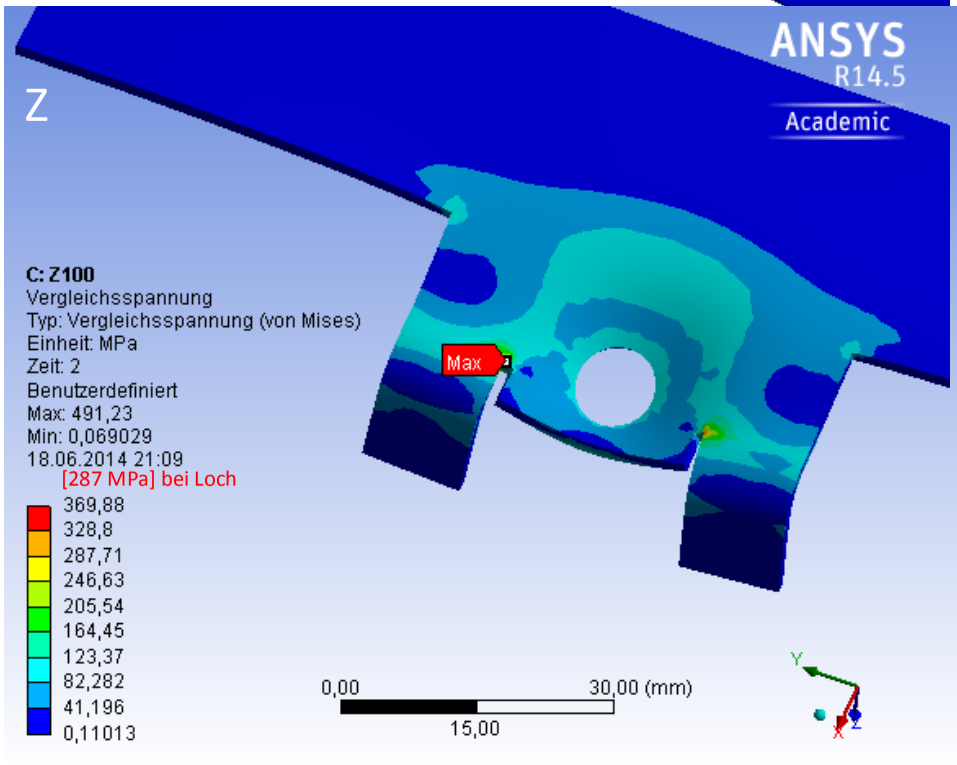

TZ
ANSYS
R14.5
Academic
I: T50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 708,76
Min: 0,097071
18.06.2014 21:00
495,18
440,17
385,16
330,15
275,14
220,14
165,13
110,12
55,11
0,10144
Z180(100) 220 MPa
T180(100) 711 MPa
Max
TZ50 440 MPa
Z180(100) 309 MPa
Fällt rasch ab auf ca. 300 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

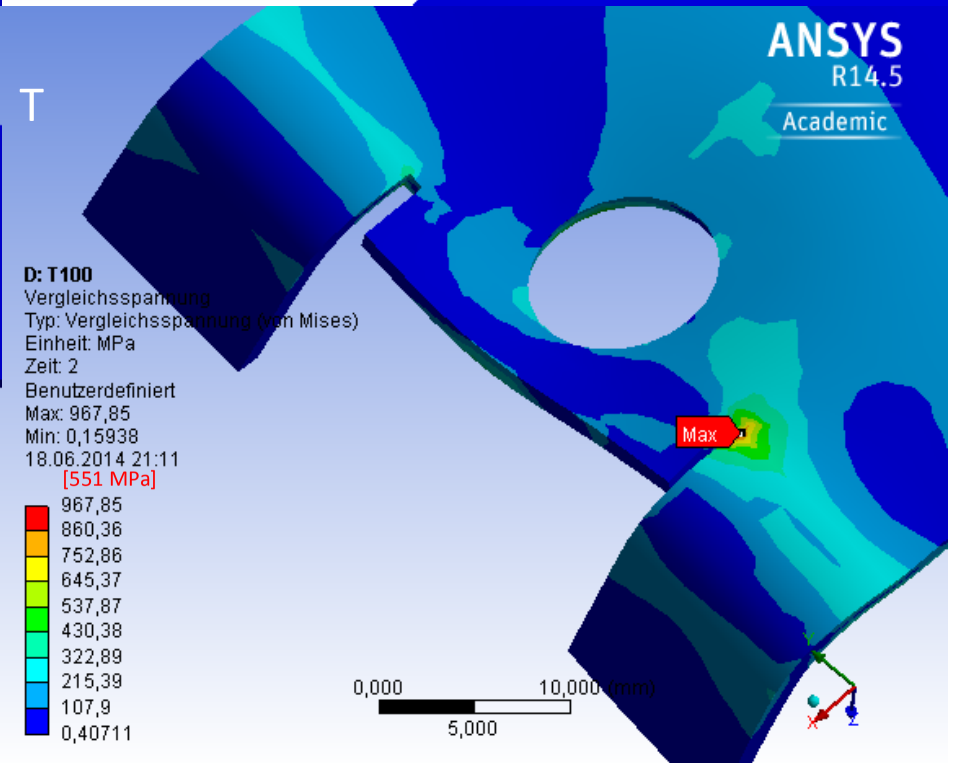

MTD
ANSYS
R14.5
Academic
L: M33 T33 D33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 489,18
Min: 0,067794
18.06.2014 21:00
361,76
321,61
281,46
241,3
201,15
161
120,85
80,693
40,541
0,38815
M180(100) 816 MPa
D180(100) 185 MPa
T180(100) 711 MPa
Max
Fällt im Umkreis von 1-2mm auf 270 MPa ab.
0,000
10,000 (mm)
5,000
M/3 350 MPa
D180(100) 272 MPa


MTZ
ANSYS
R14.5
Academic
K: M33 T33 Z33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 530,93
Min: 0,08808
18.06.2014 21:00
530,93
471,95
412,98
354
295,02
236,04
177,07
118,09
59,111
0,13329
M180(100) 816 MPa
Z180(100) 220 MPa
T180(100) 711 MPa
Max
Fällt im Umkreis von 1-1.5 mm ca. 300 MPa ab.
M/3 430 MPa
Z180(100) 309 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

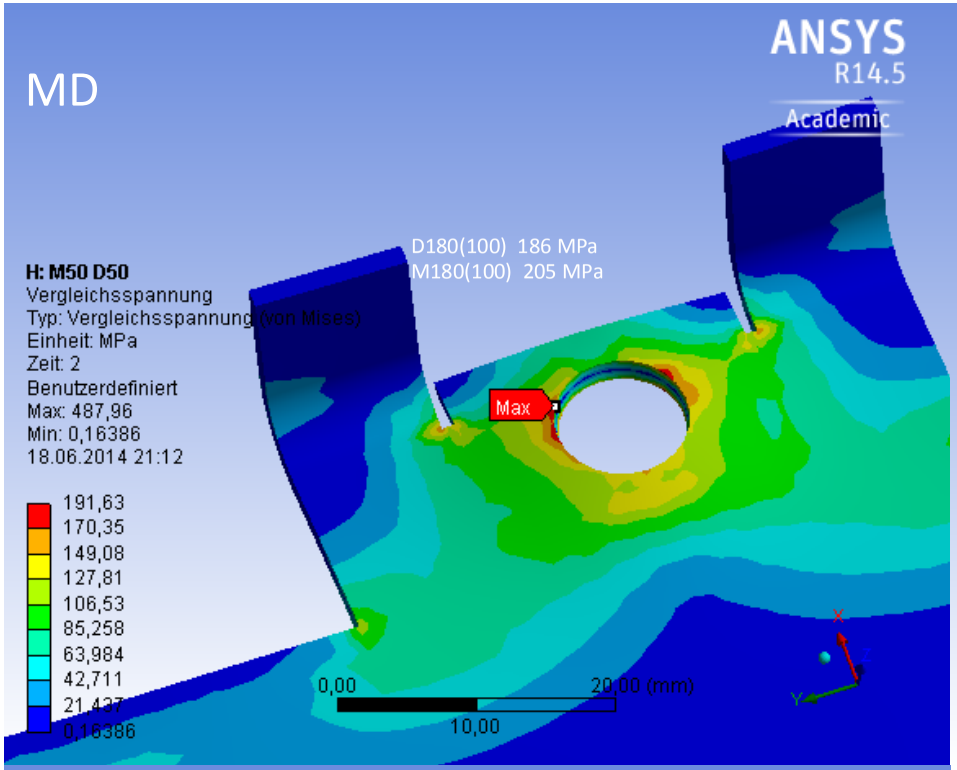


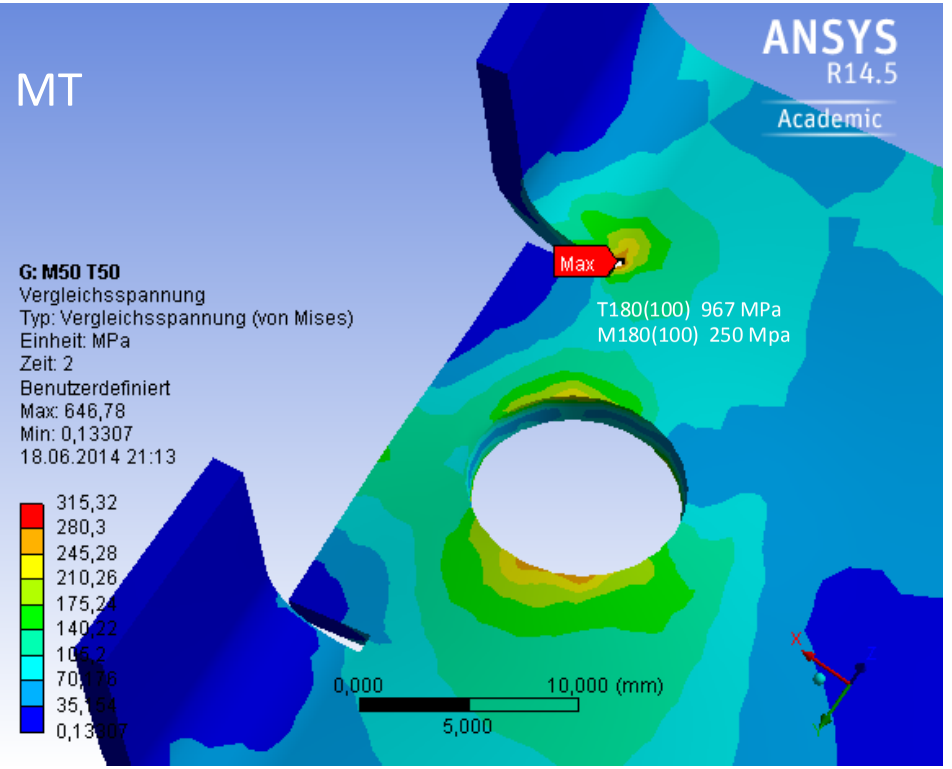


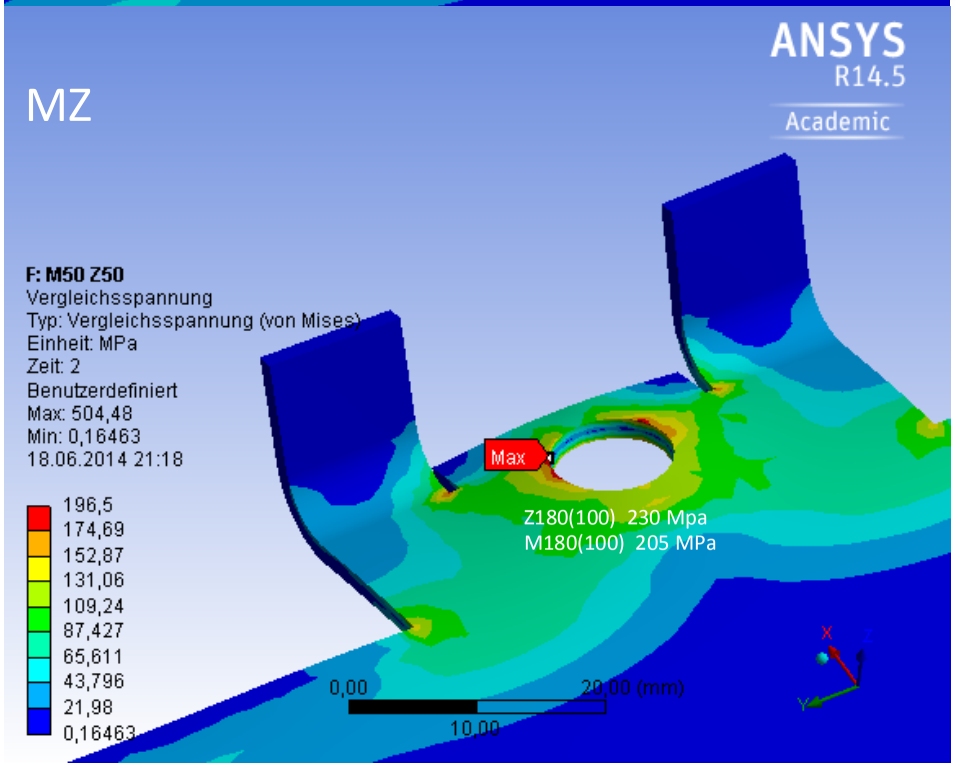


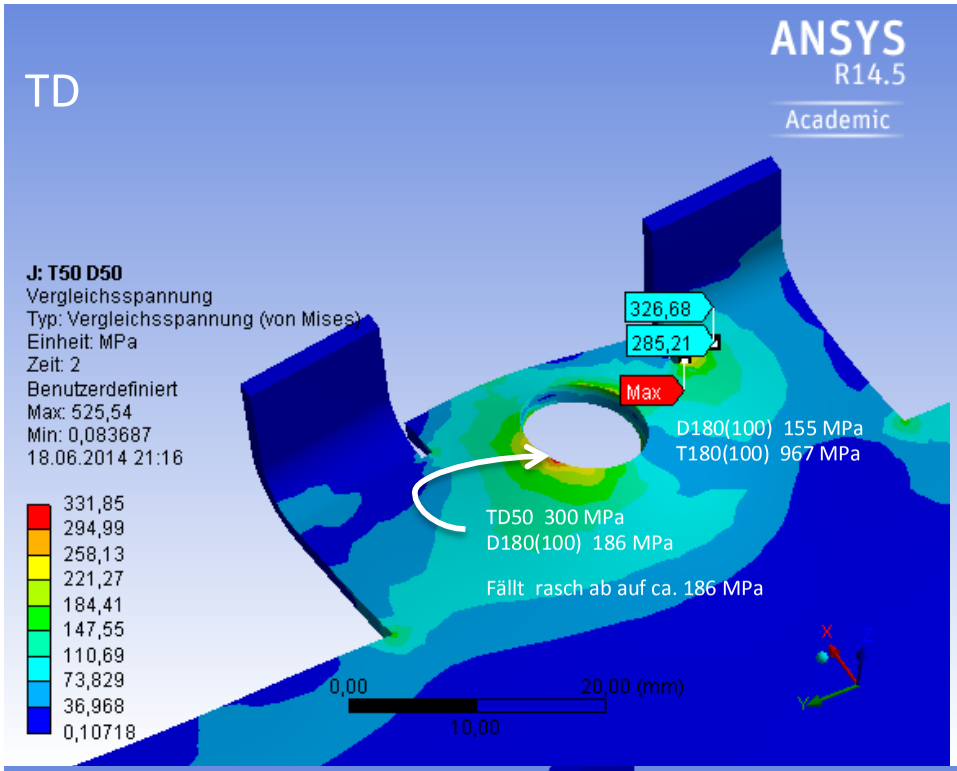


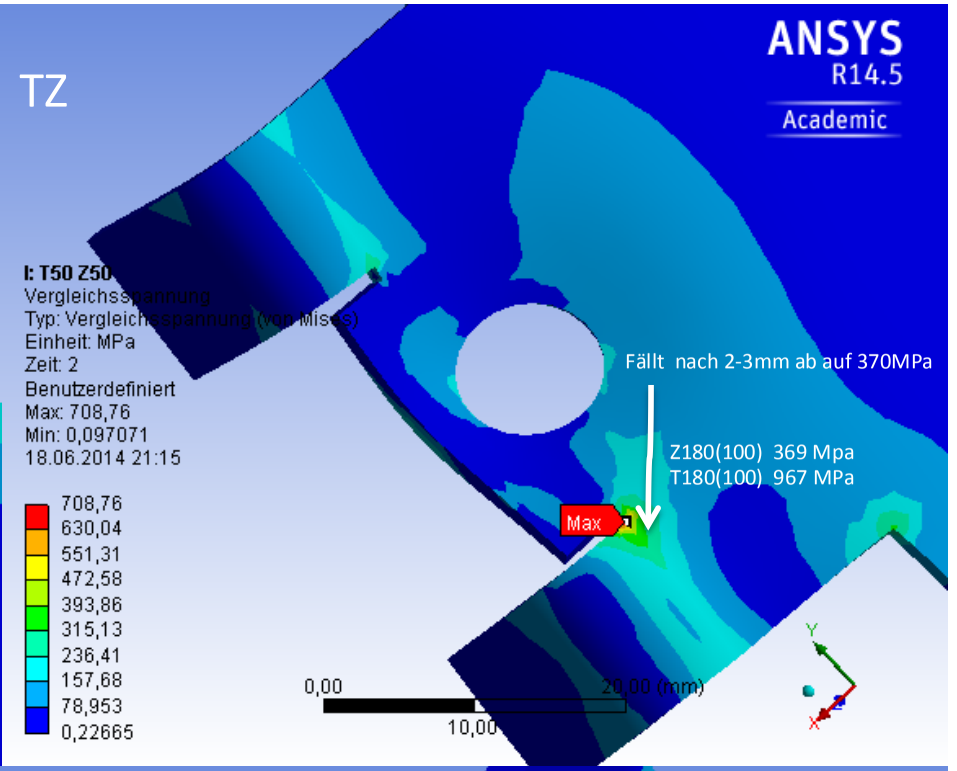
ANHANG D17 – EL3 Referenz NEU

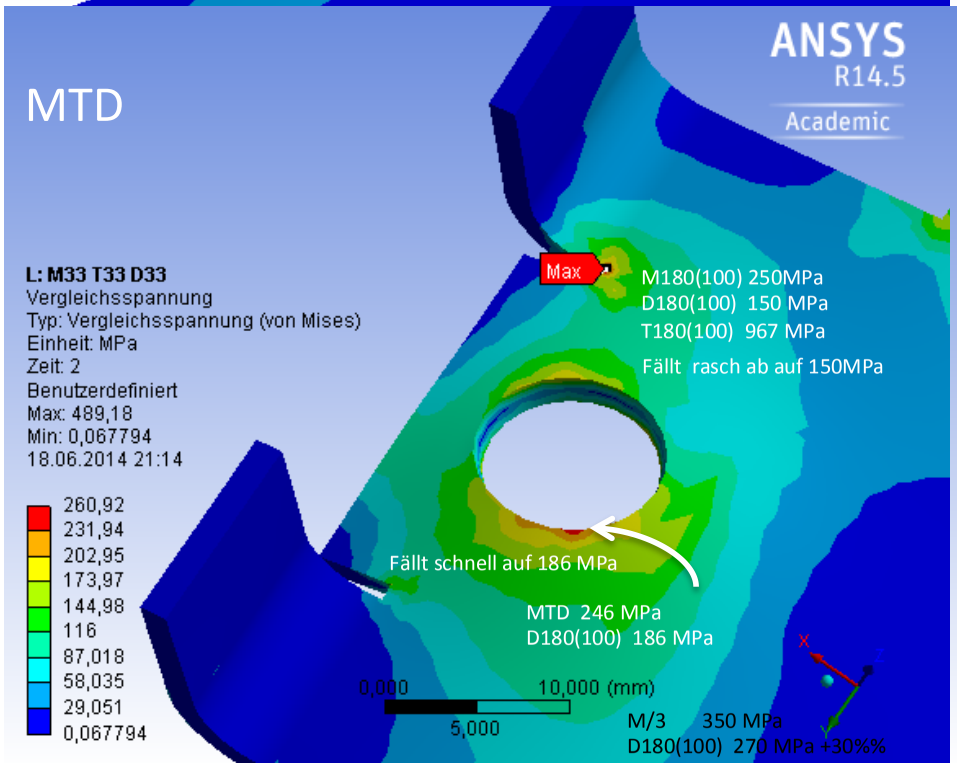

MD
ANSYS
R14.5
Academic
H: M50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 487,96
Min: 0,16386
18.06.2014 21:12
191,63
170,35
149,08
127,81
106,53
85,258
63,984
42,711
21,437
0,16386
D180(100) 186 MPa
M180(100) 205 MPa
Max
0,00
20,00 (mm)
10,00

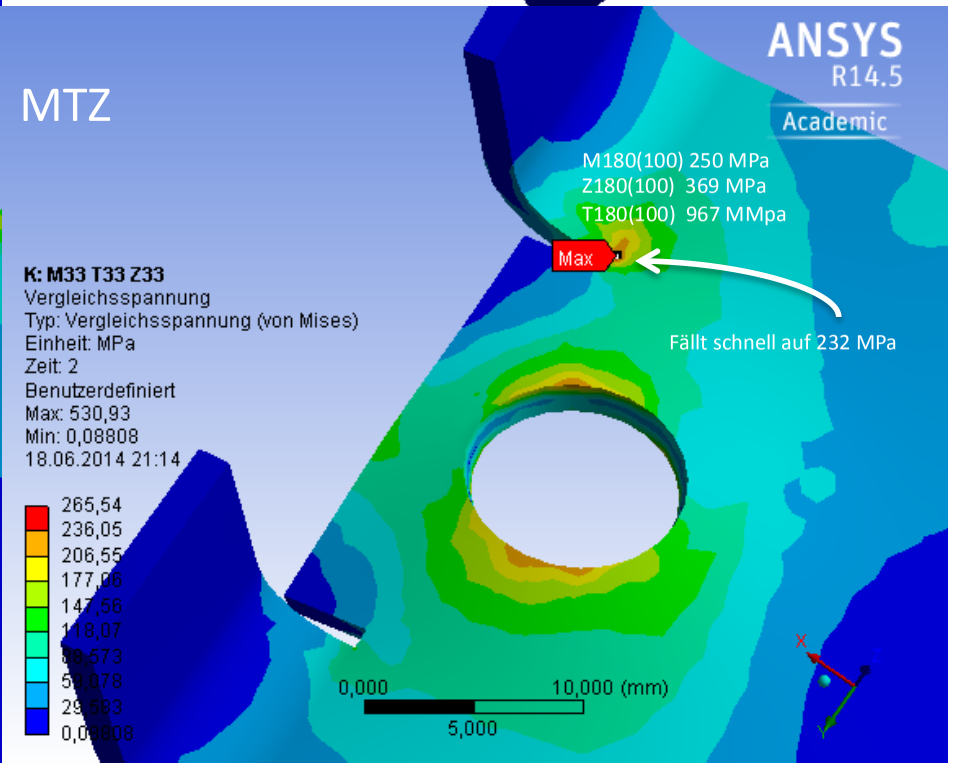

MT
ANSYS
R14.5
Academic
G: M50 T50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 646,78
Min: 0,13307
18.06.2014 21:13
315,32
280,3
245,28
210,26
Max
T180(100) 967 MPa
M180(100) 250 Mpa
0,000
10,000 (mm)
5,000


MZ
ANSYS
R14.5
Academic
F: M50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 504,48
Min: 0,16463
18.06.2014 21:18
196,5
174,69
152,87
131,06
109,24
87,427
65,611
43,796
21,98
0,16463
Max
Z180(100) 230 Mpa
M180(100) 205 MPa
0,00
20,00 (mm)
10,00

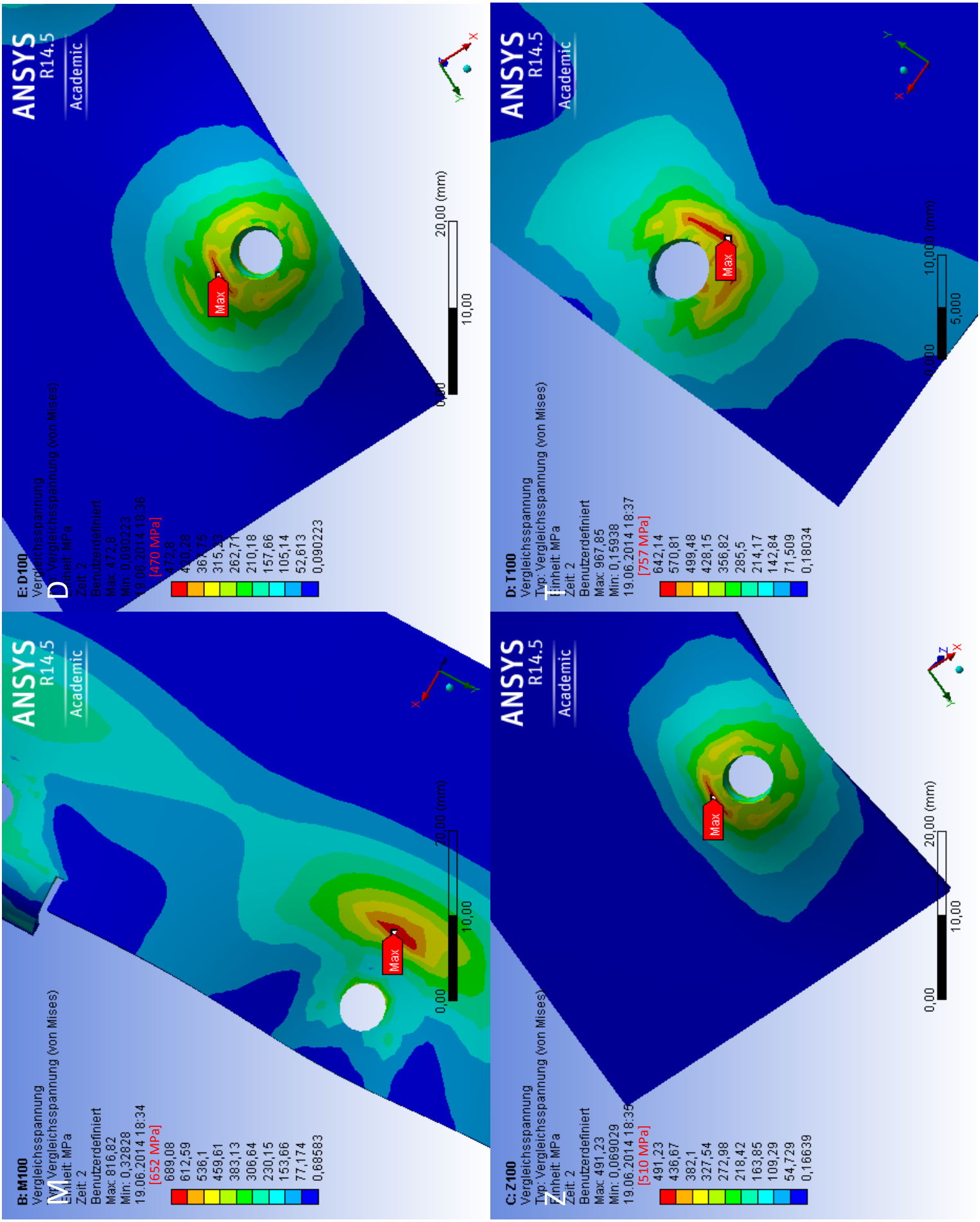

TD
ANSYS
R14.5
Academic
J: T50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 525,54
Min: 0,083687
18.06.2014 21:16
331,85
294,99
258,13
221,27
184,41
147,55
110,69
73,829
36,968
0,10718
326,68
285,21
Max
D180(100) 155 MPa
T180(100) 967 MPa
TD50 300 MPa
D180(100) 186 MPa
Fällt rasch ab auf ca. 186 MPa
0,00
20,00 (mm)
10,00

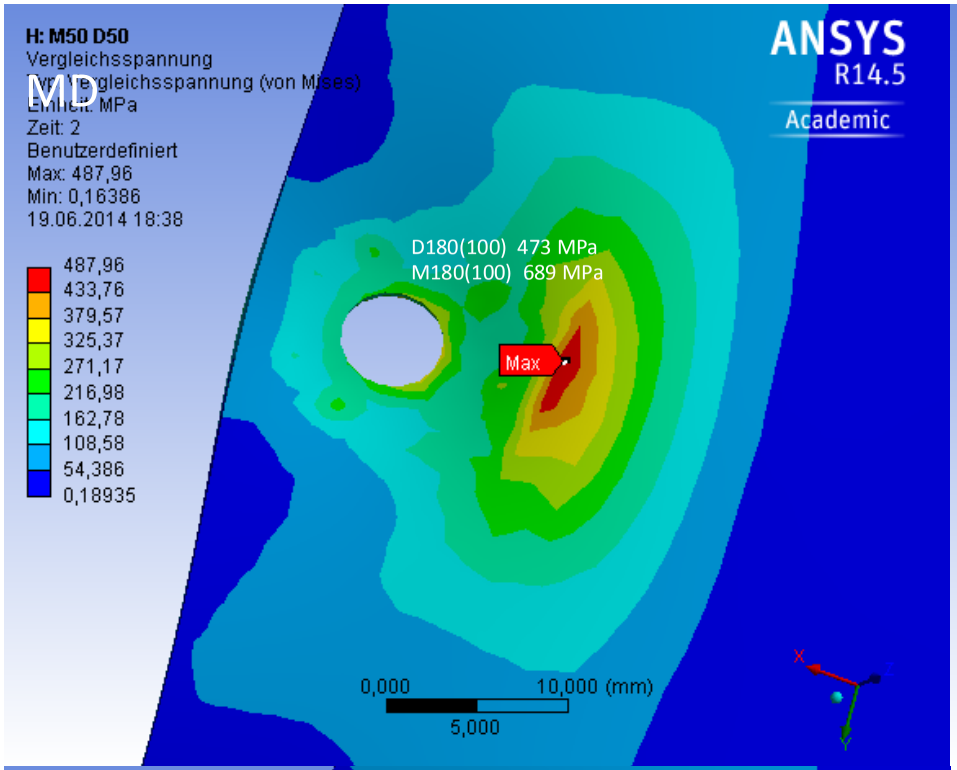

TZ
ANSYS
R14.5
Academic
I: T50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 708,76
Min: 0,097071
18.06.2014 21:15
708,76
630,04
551,31
472,58
393,86
315,13
236,41
157,68
78,953
0,22665
Fällt nach 2-3mm ab auf 370MPa
Z180(100) 369 Mpa
T180(100) 967 Mpa
Max
0,00
20,00 (mm)
10,00

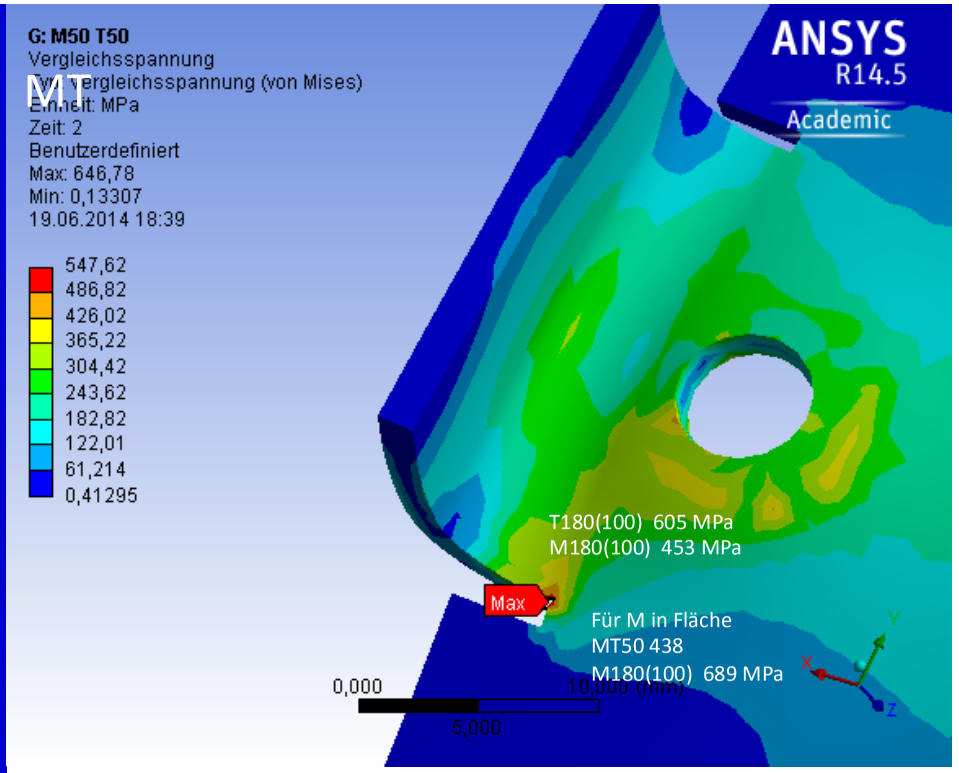

MTD
ANSYS
R14.5
Academic
L: M33 T33 D33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 489,18
Min: 0,067794
18.06.2014 21:14
260,92
231,94
202,95
173,97
144,98
116
87,018
58,035
29,051
0,067794
Max
M180(100) 250MPa
D180(100) 150 MPa
T180(100) 967 MPa
Fällt rasch ab auf 150MPa
Fällt schnell auf 186 MPa
MTD 246 MPa
D180(100) 186 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000
M/3 350 MPa
D180(100) 270 MPa +30%%

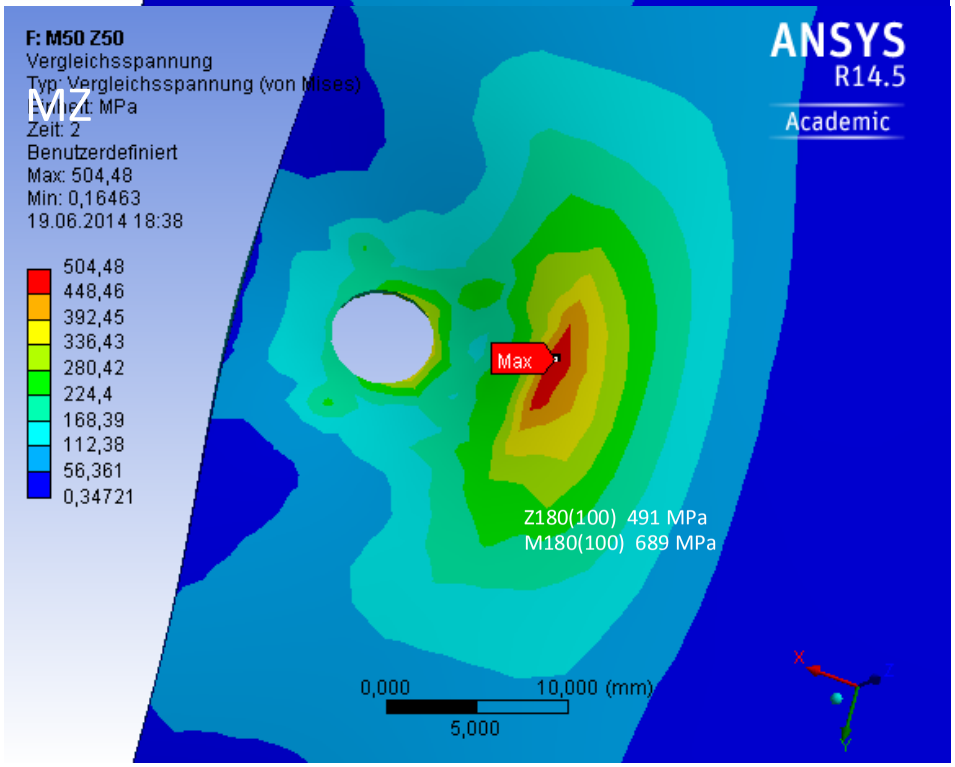

MTZ
ANSYS
R14.5
Academic
K: M33 T33 Z33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 530,93
Min: 0,08808
18.06.2014 21:14
265,54
236,05
206,55
M180(100) 250 MPa
Z180(100) 369 MPa
T180(100) 967 MMpa
Max
Fällt schnell auf 232 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

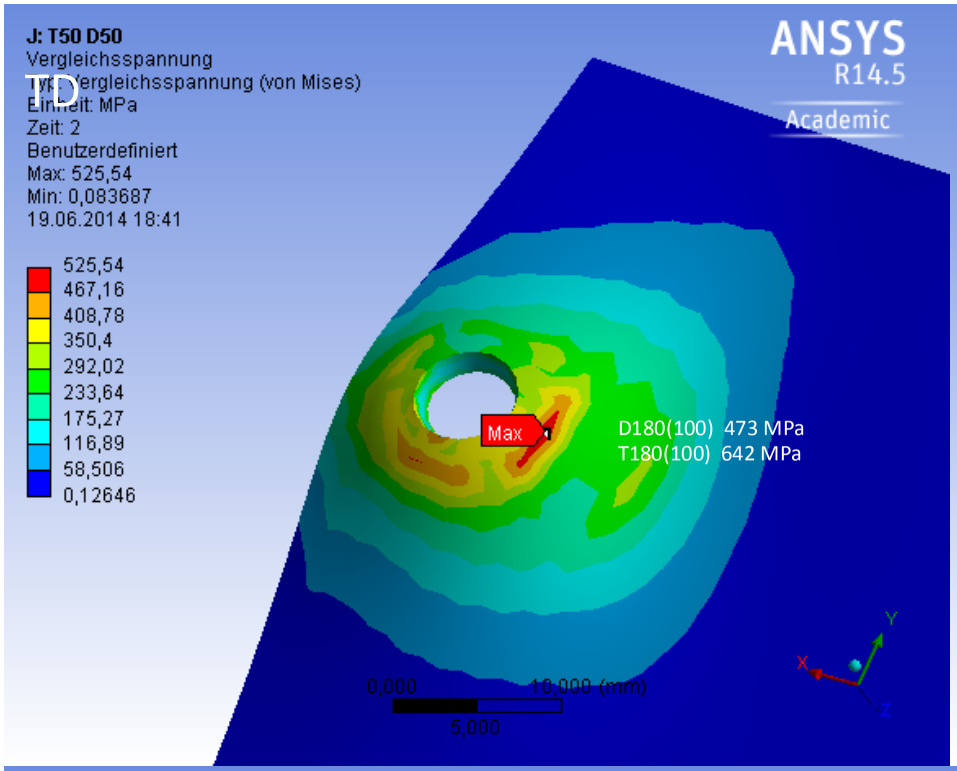
ANHANG D17 – EL4 Referenz NEU

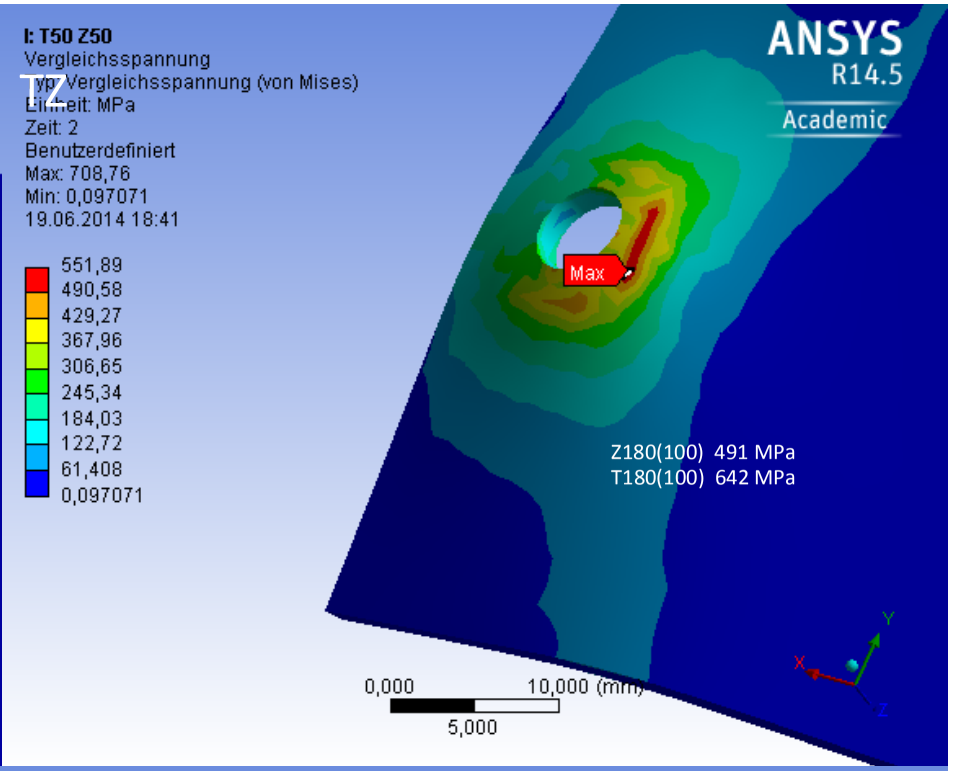


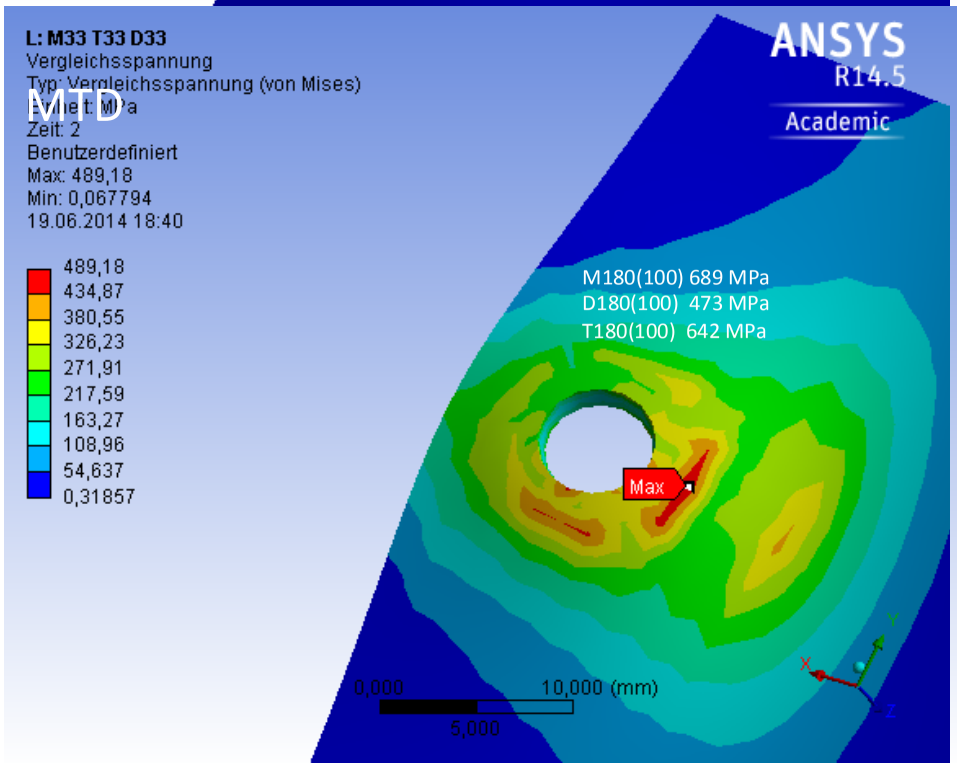

H: M50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 487,96
Min: 0,16386
19.06.2014 18:38
487,96
433,76
379,57
325,37
271,17
216,98
162,78
108,58
54,386
0,18935
ANSYS
R14.5
Academic
MD
D180(100) 473 MPa
M180(100) 689 MPa
Max
0,000
10,000 (mm)
5,000

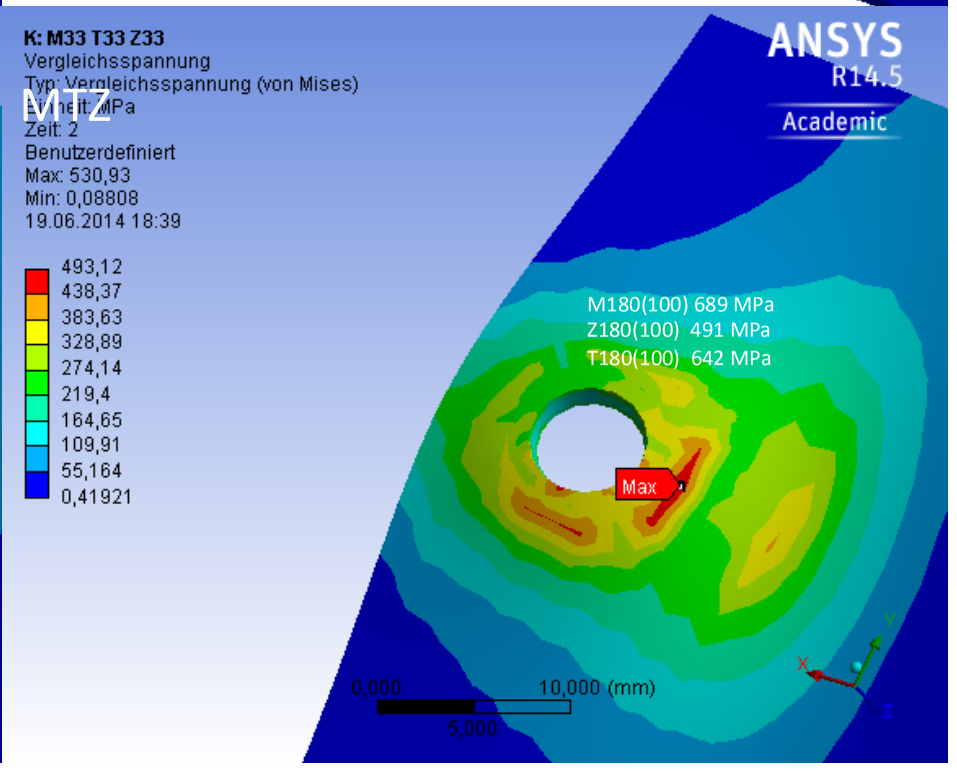

G: M50 T50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 646,78
Min: 0,13307
19.06.2014 18:39
547,62
486,82
426,02
365,22
304,42
243,62
182,82
122,01
61,214
0,41295
ANSYS
R14.5
Academic
MT
T180(100) 605 MPa
M180(100) 453 MPa
Max
Für M in Fläche
MT50 438
M180(100) 689 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

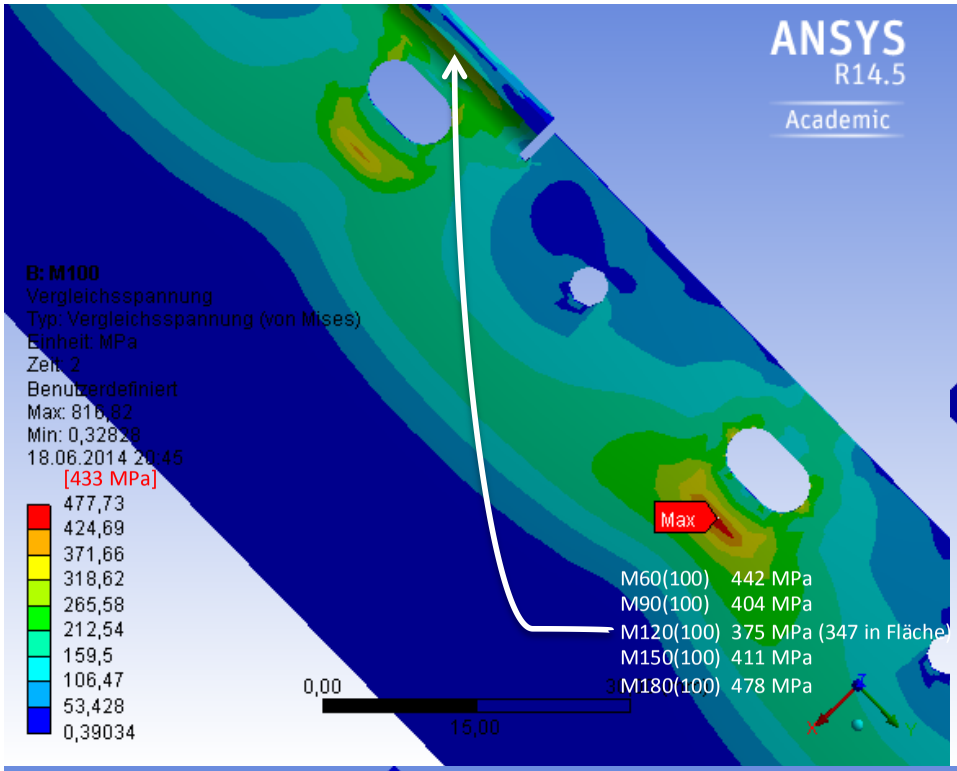

F: M50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 504,48
Min: 0,16463
19.06.2014 18:38
504,48
448,46
392,45
336,43
280,42
224,4
168,39
112,38
56,361
0,34721
ANSYS
R14.5
Academic
MZ
Z180(100) 491 MPa
M180(100) 689 MPa
Max
0,000
10,000 (mm)
5,000

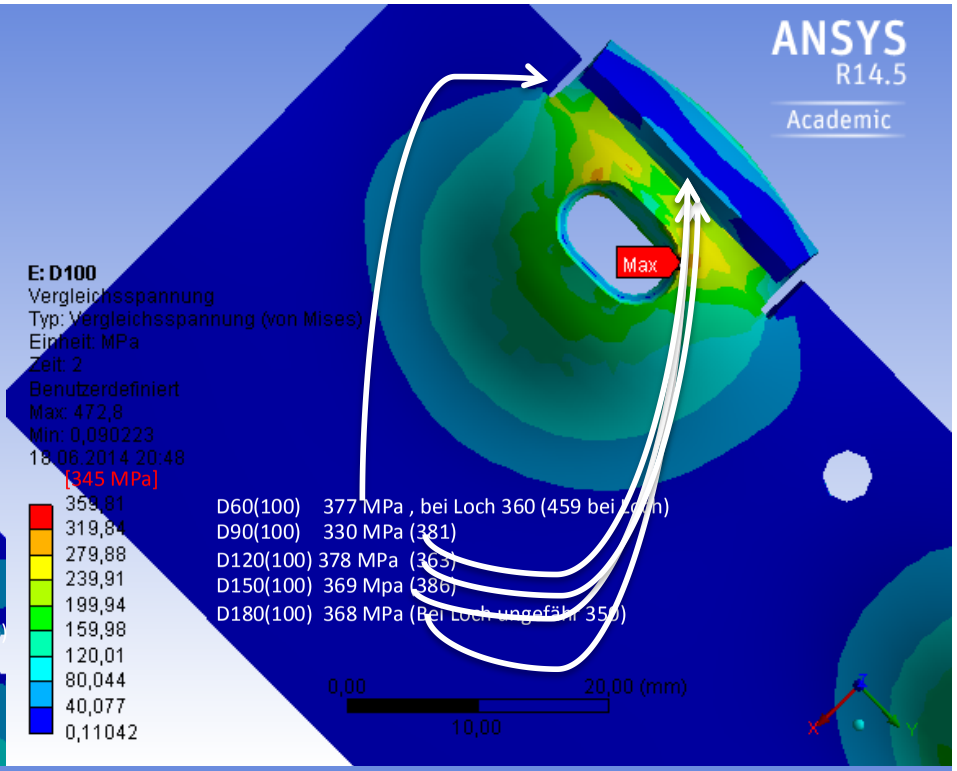

J: T50 D50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 525,54
Min: 0,083687
19.06.2014 18:41
525,54
467,16
408,78
350,4
292,02
233,64
175,27
116,89
58,506
0,12646
ANSYS
R14.5
Academic
TD
Max
D180(100) 473 MPa
T180(100) 642 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

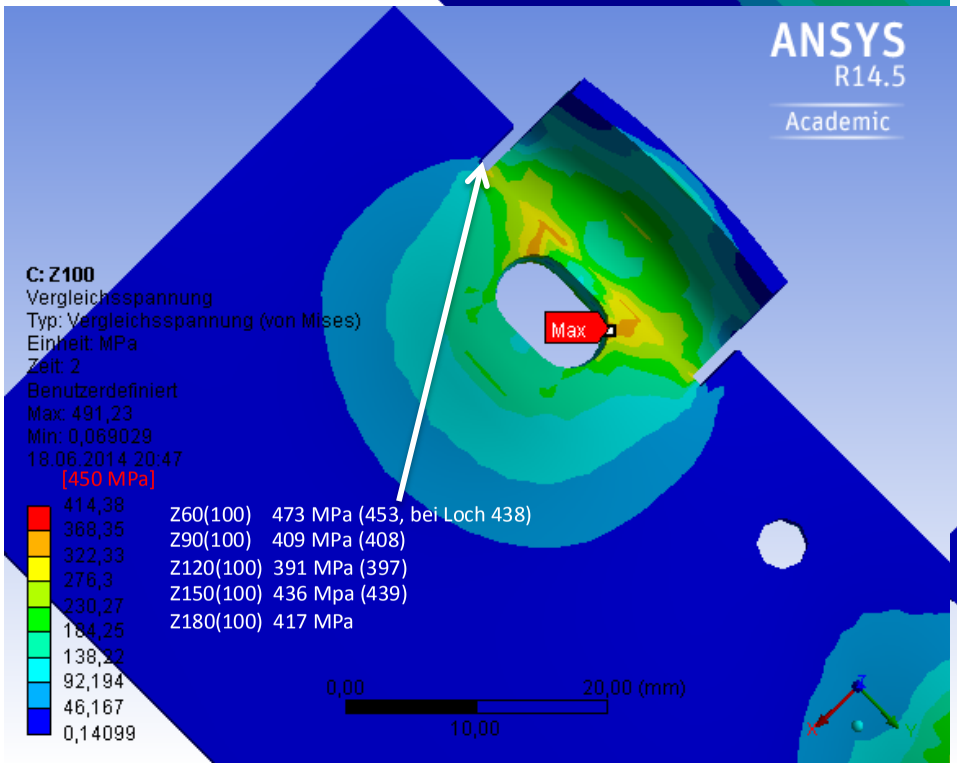

I: T50 Z50
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 708,76
Min: 0,097071
19.06.2014 18:41
551,89
490,58
429,27
367,96
306,65
245,34
184,03
122,72
61,408
0,097071
ANSYS
R14.5
Academic
TZ
Max
Z180(100) 491 MPa
T180(100) 642 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

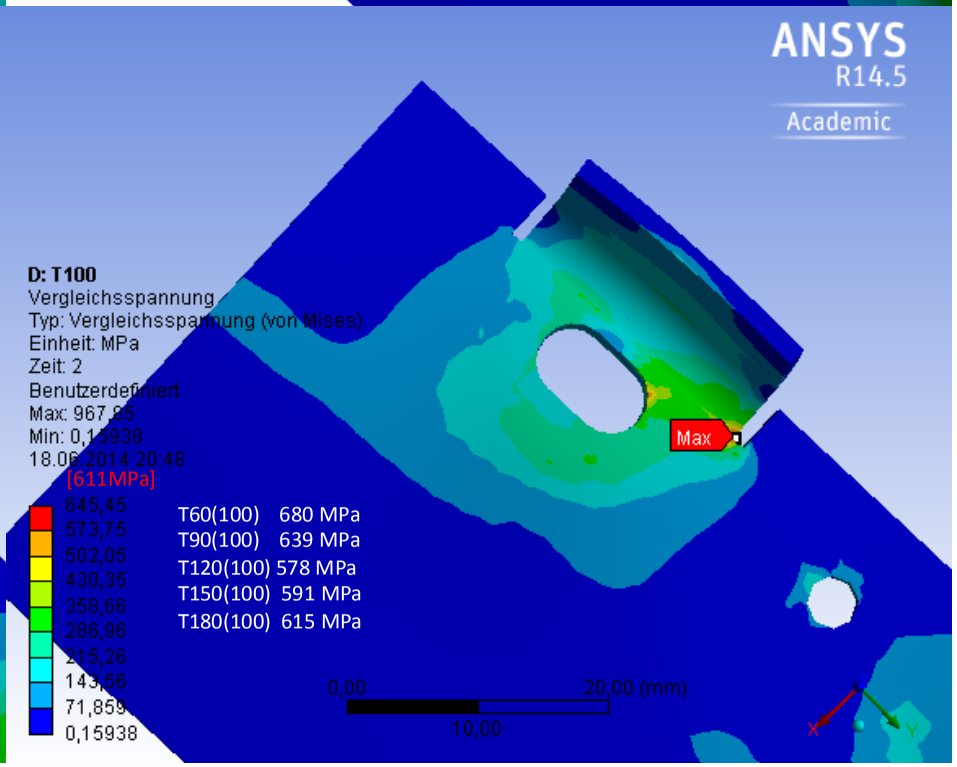

L: M33 T33 D33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 489,18
Min: 0,067794
19.06.2014 18:40
489,18
434,87
380,55
326,23
271,91
217,59
163,27
108,96
54,637
0,31857
ANSYS
R14.5
Academic
MTD
Max
M180(100) 689 MPa
D180(100) 473 MPa
T180(100) 642 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000


K: M33 T33 Z33
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 530,93
Min: 0,08808
19.06.2014 18:39
493,12
438,37
383,63
328,89
274,14
219,4
164,65
109,91
55,164
0,41921
ANSYS
R14.5
Academic
MTZ
Max
M180(100) 689 MPa
Z180(100) 491 MPa
T180(100) 642 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

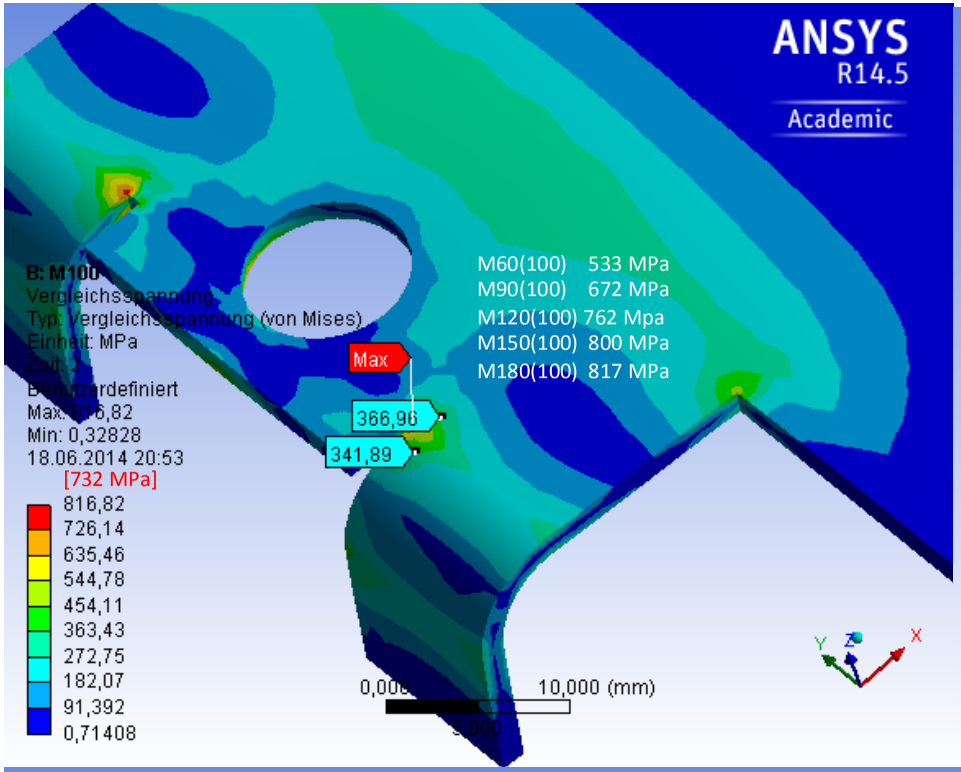


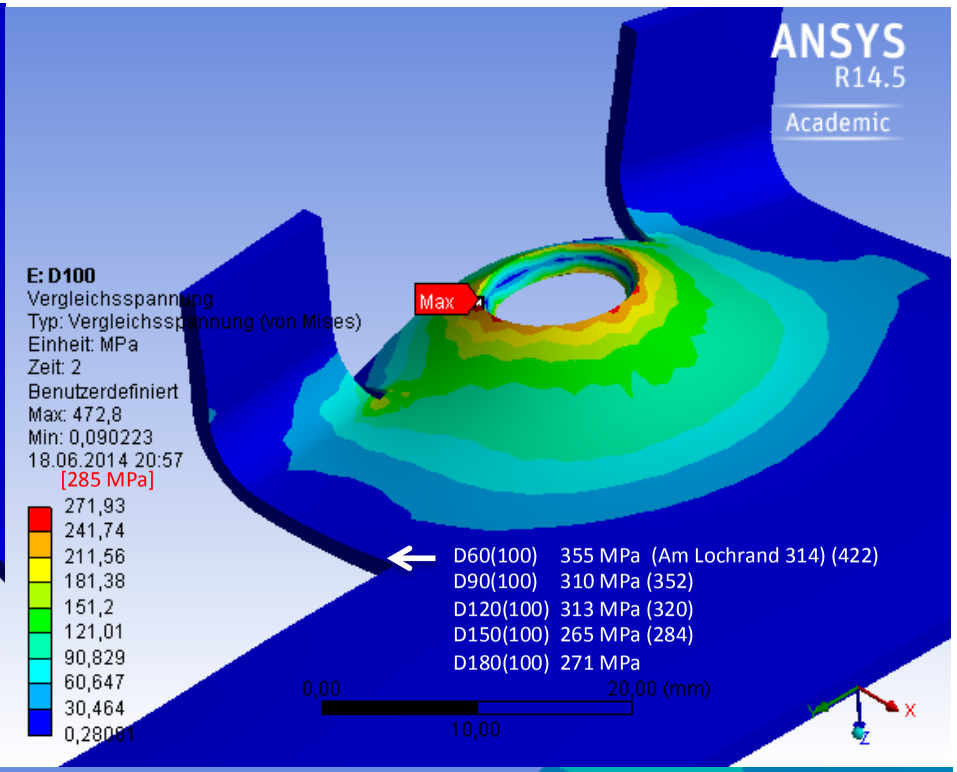


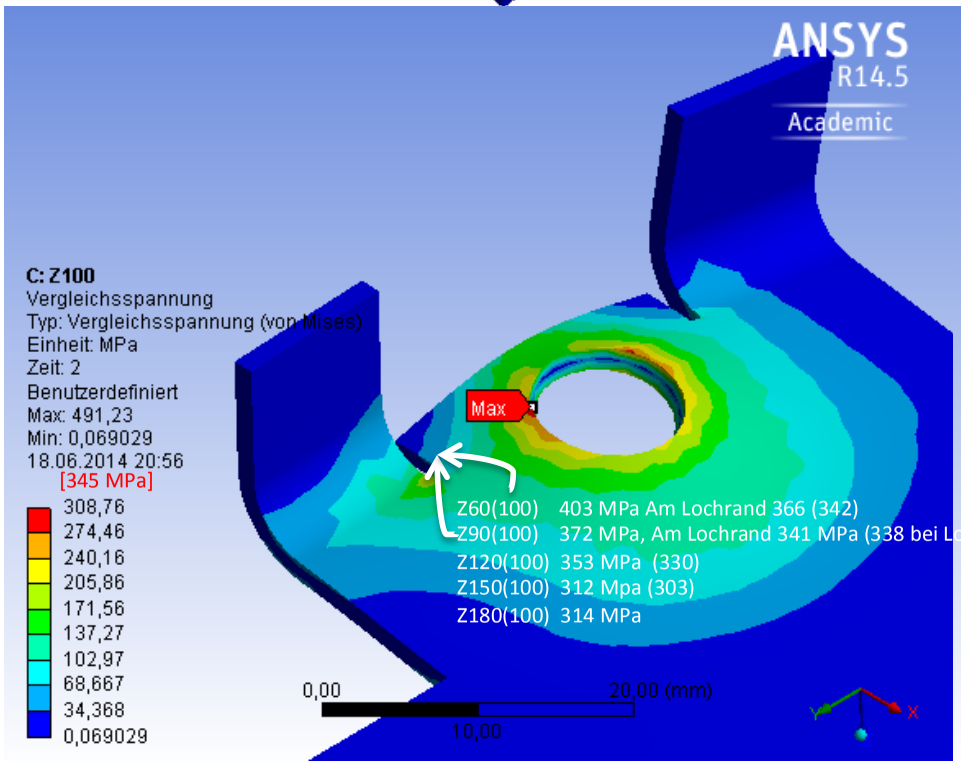


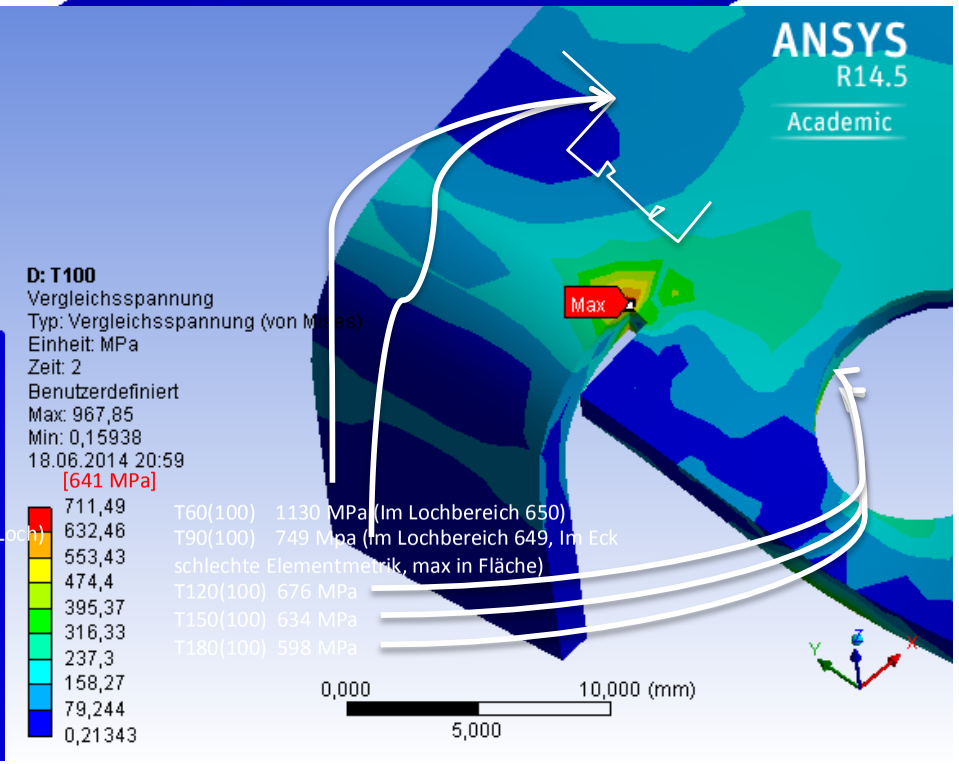


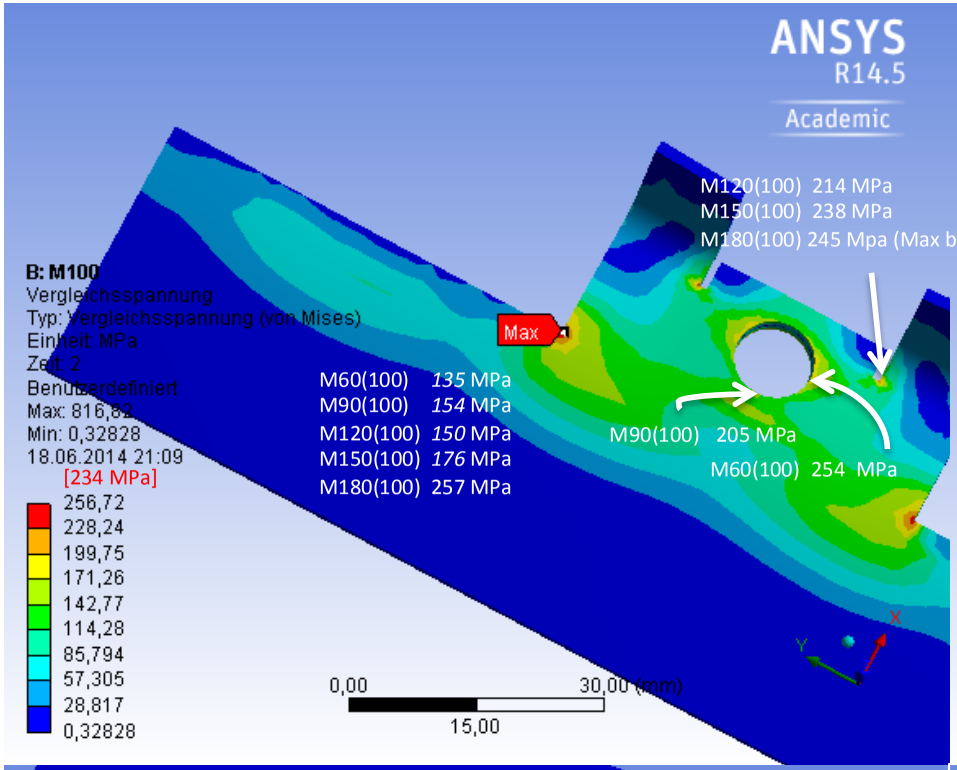
ANHANG D18 – Knick / EL1 Referenz

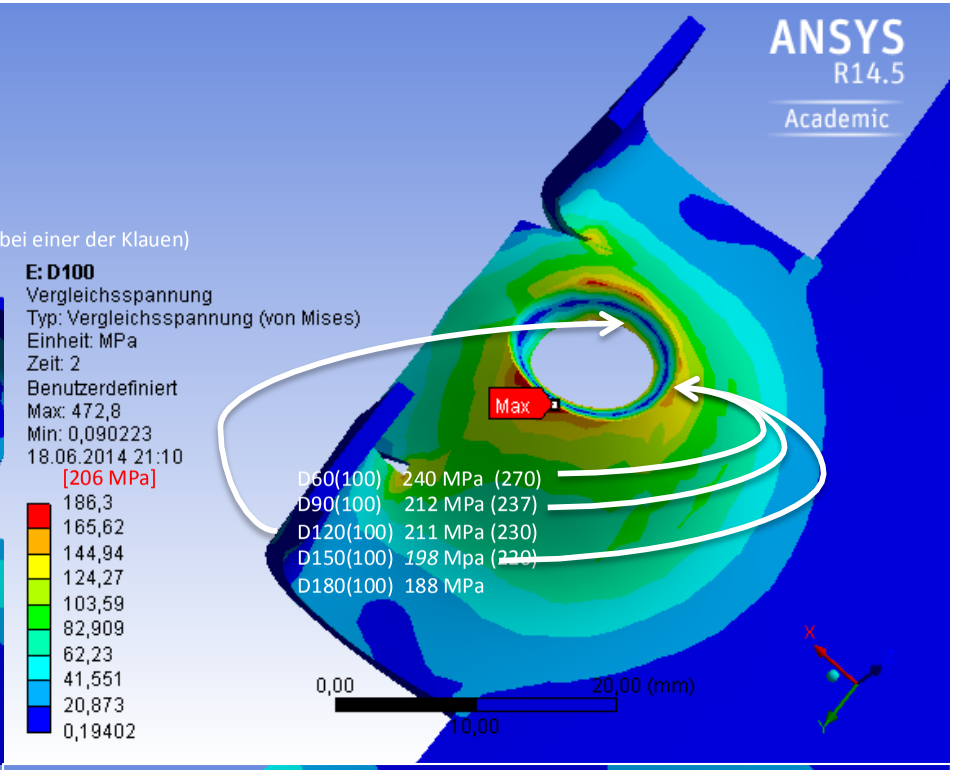

ANSYS
R14.5
Academic
B: M100
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 816,82
Min: 0,32828
18.06.2014 20:53
[732 MPa]
816,82
726,14
635,46
544,78
454,11
363,43
272,75
182,07
91,392
0,71408
Max
366,96
341,89
M60(100) 533 MPa
M90(100) 672 MPa
M120(100) 762 Mpa
M150(100) 800 MPa
M180(100) 817 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000

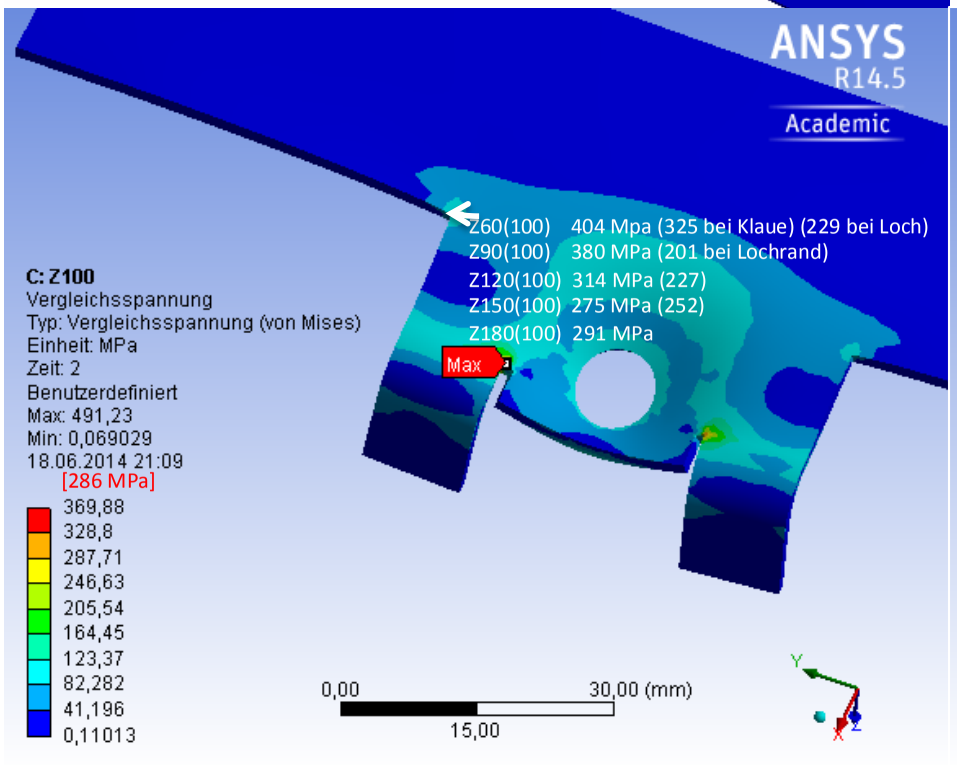

ANSYS
R14.5
Academic
E: D100
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 472,8
Min: 0,090223
18.06.2014 20:57
[285 MPa]
271,93
241,74
211,56
181,38
151,2
121,01
90,829
60,647
30,464
0,28081
Max
D60(100) 355 MPa (Am Lochrand 314) (422)
D90(100) 310 MPa (352)
D120(100) 313 MPa (320)
D150(100) 265 MPa (284)
D180(100) 271 MPa
0,00
20,00 (mm)
10,00

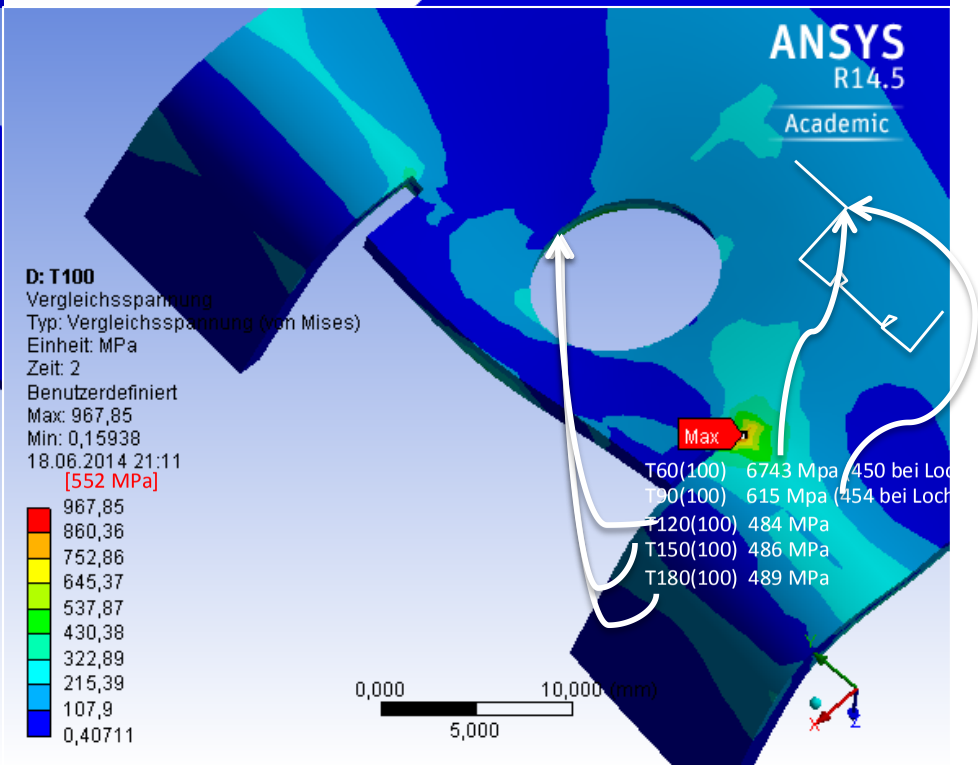

ANSYS
R14.5
Academic
C: Z100
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 491,23
Min: 0,069029
18.06.2014 20:56
[345 MPa]
308,76
274,46
240,16
205,86
171,56
137,27
102,97
68,667
34,368
0,069029
Max
Z60(100) 403 MPa Am Lochrand 366 (342)
Z90(100) 372 MPa, Am Lochrand 341 MPa (338 bei Loch)
Z120(100) 353 MPa (330)
Z150(100) 312 Mpa (303)
Z180(100) 314 MPa
0,00
20,00 (mm)
10,00


ANSYS
R14.5
Academic
D: T100
Vergleichsspannung
Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
Einheit: MPa
Zeit: 2
Benutzerdefiniert
Max: 967,85
Min: 0,15938
18.06.2014 20:59
[641 MPa]
711,49
632,46
553,43
474,4
395,37
316,33
237,3
158,27
79,244
0,21343
Max
T60(100) 1130 MPa (Im Lochbereich 650)
T90(100) 749 Mpa (Im Lochbereich 649, Im Eck
schlechte Elementmetrik, max in Fläche)
T120(100) 676 MPa
T150(100) 634 MPa
T180(100) 598 MPa
0,000
10,000 (mm)
5,000



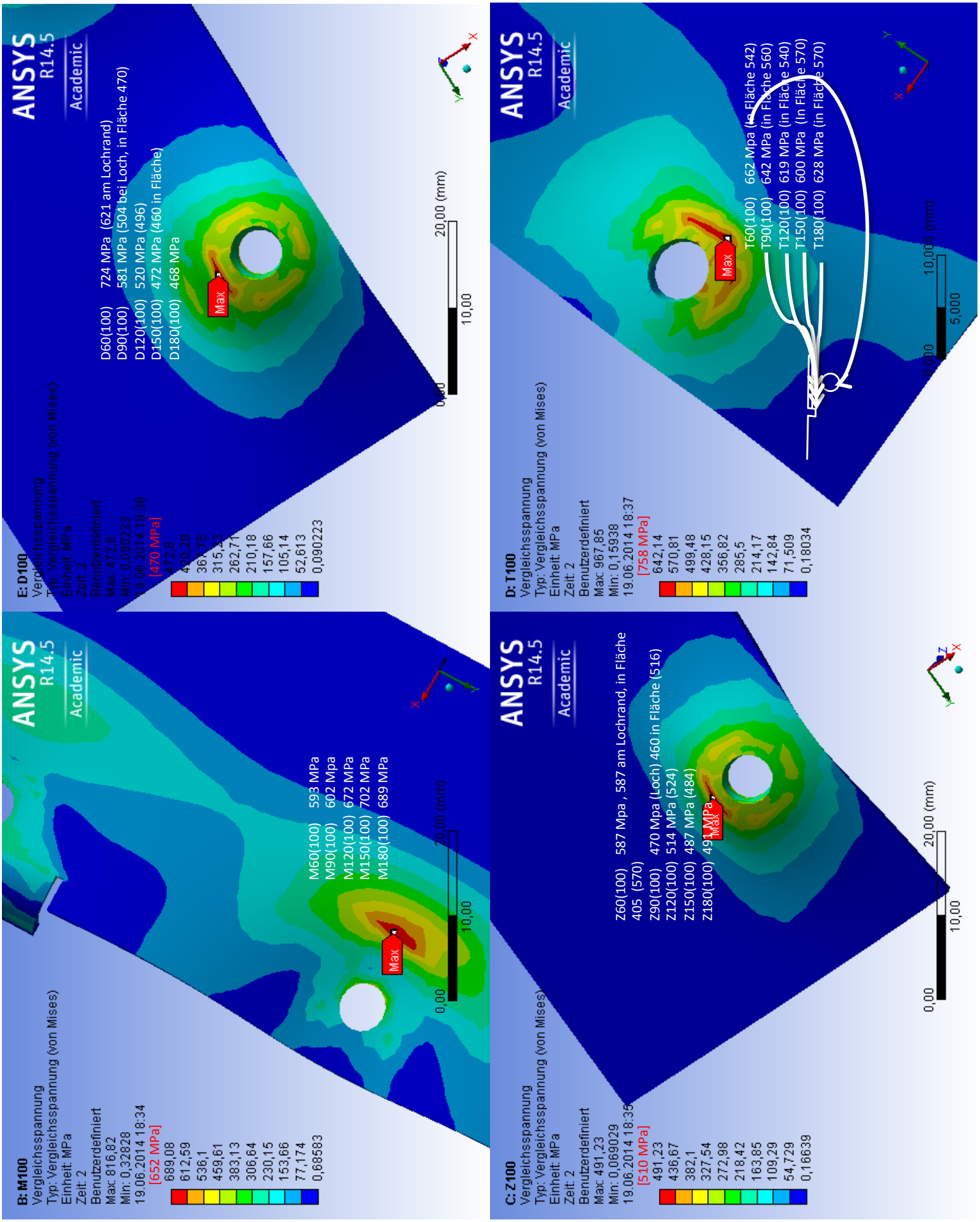


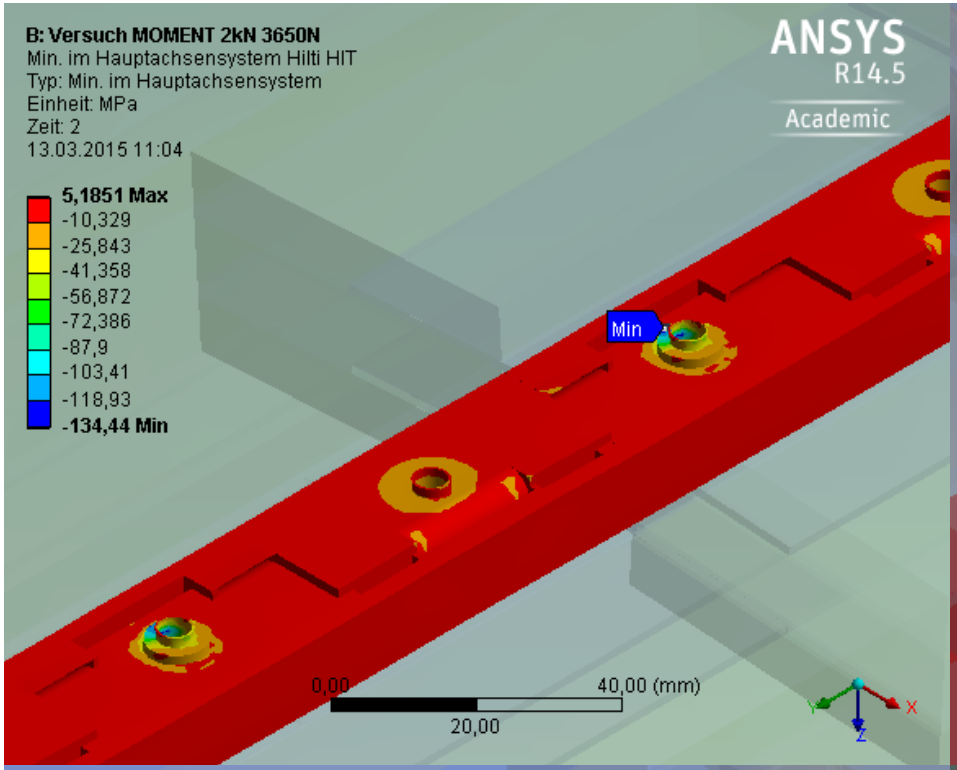


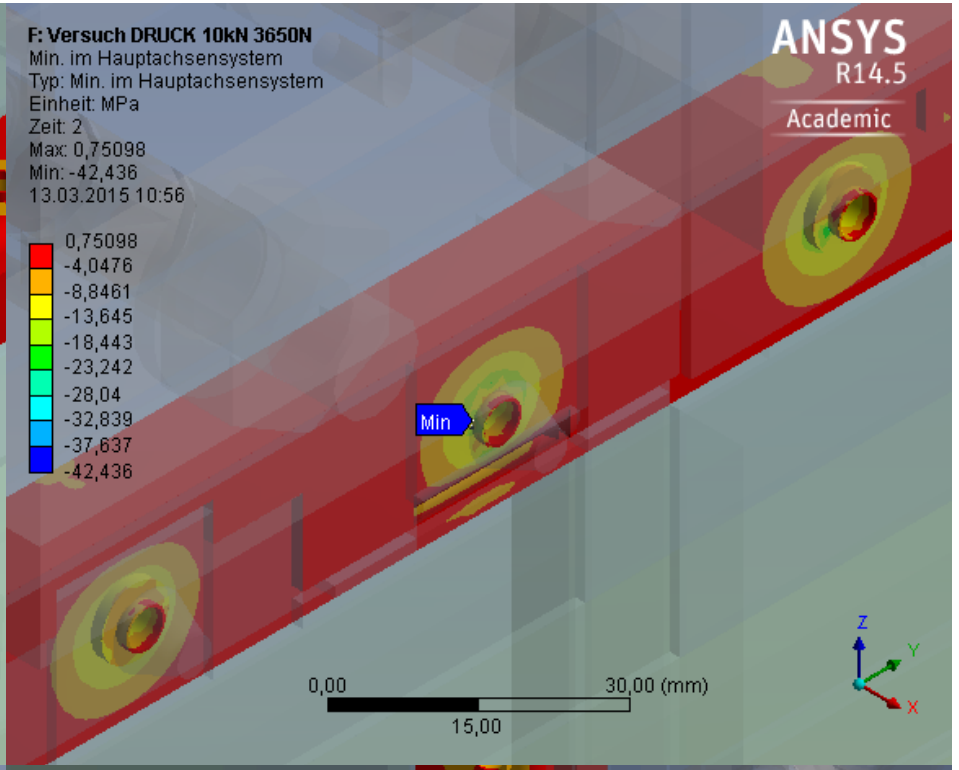


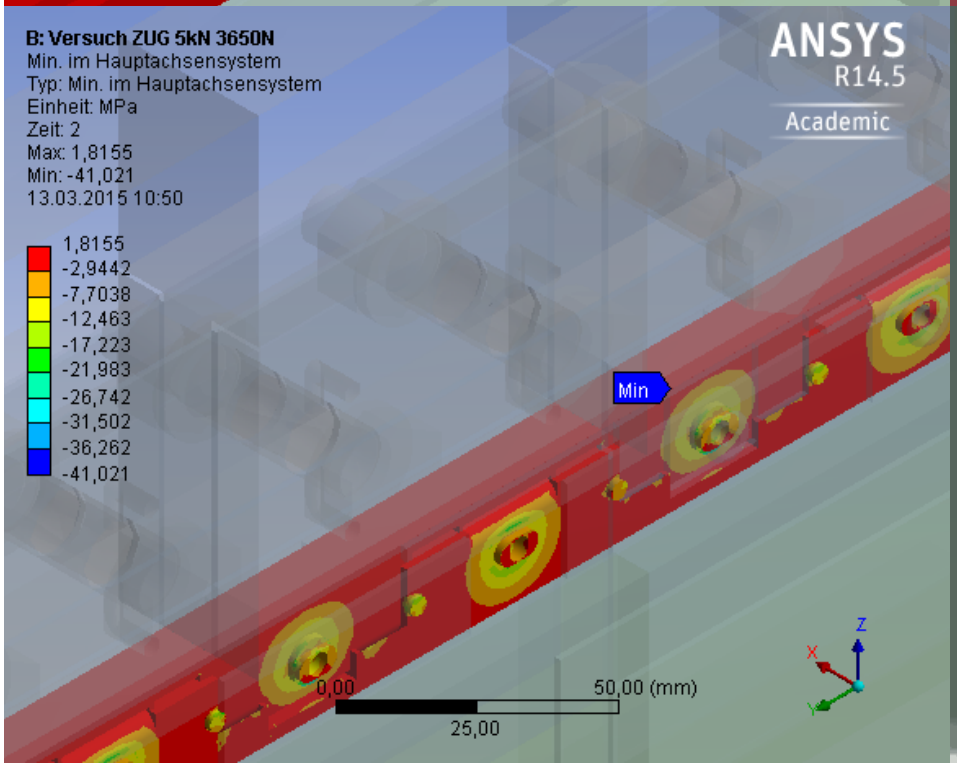
ANHANG D18 – Knick / EL3 Referenz

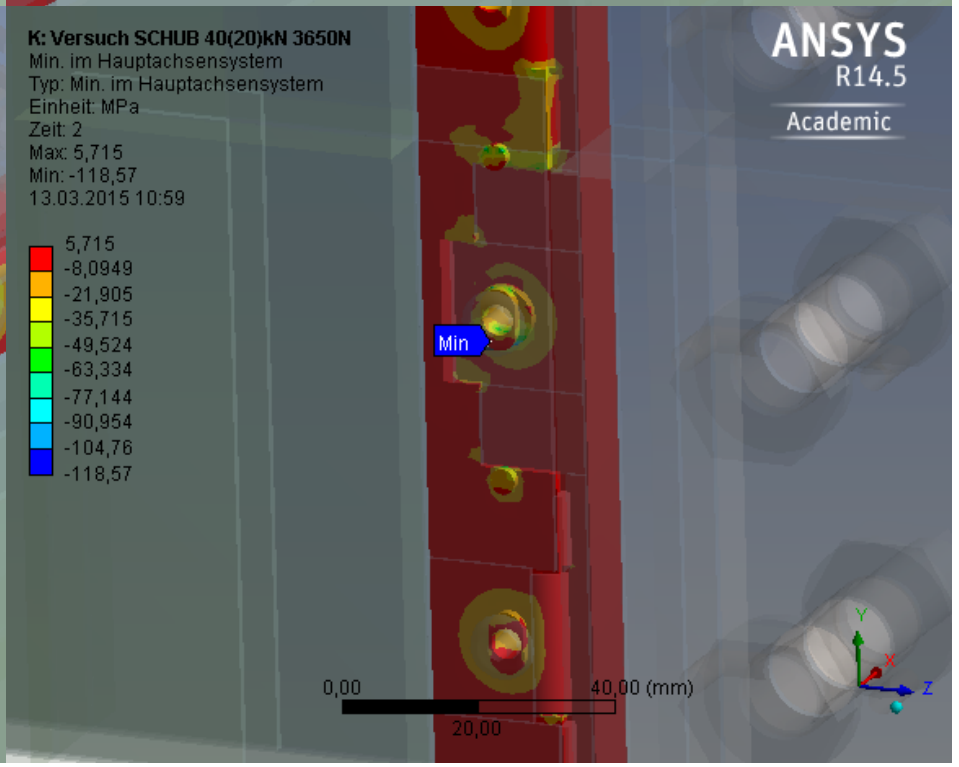
ANHANG D18 – Knick / EL4 Referenz





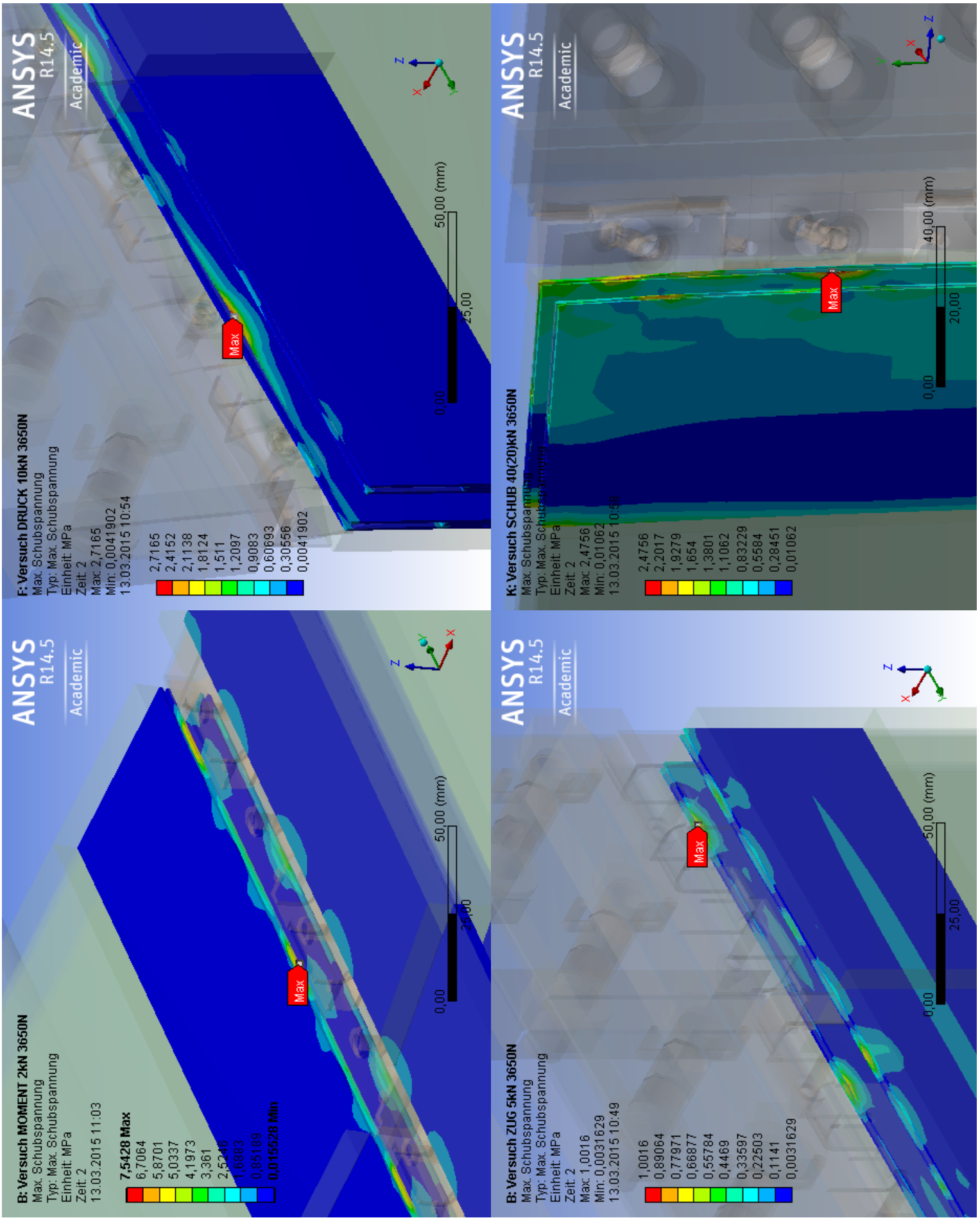


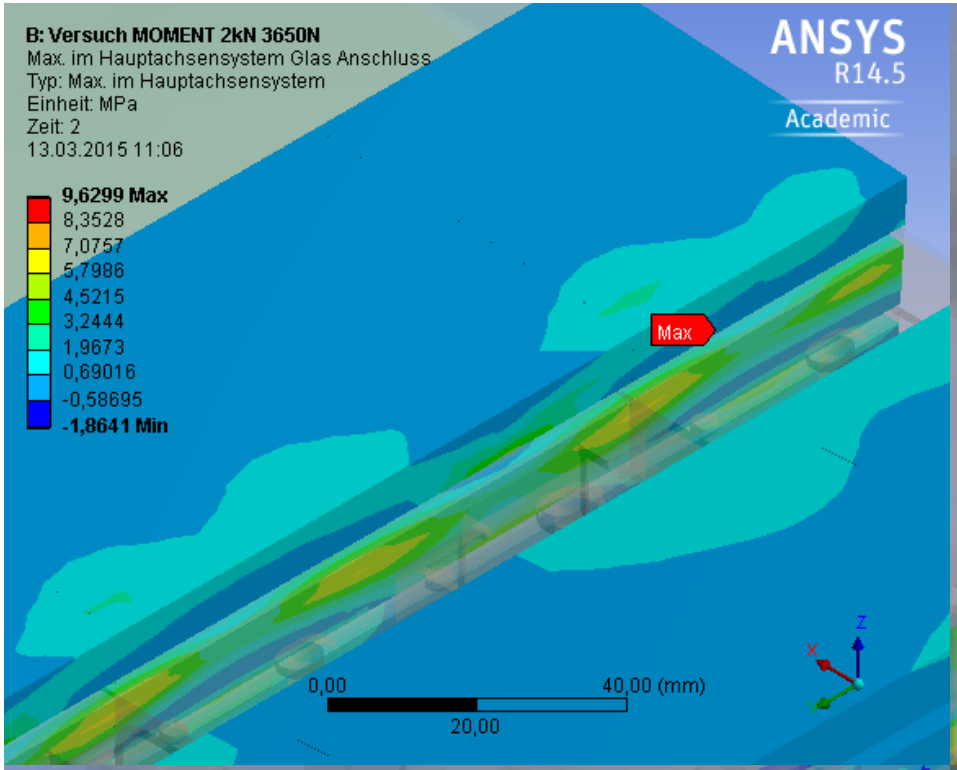


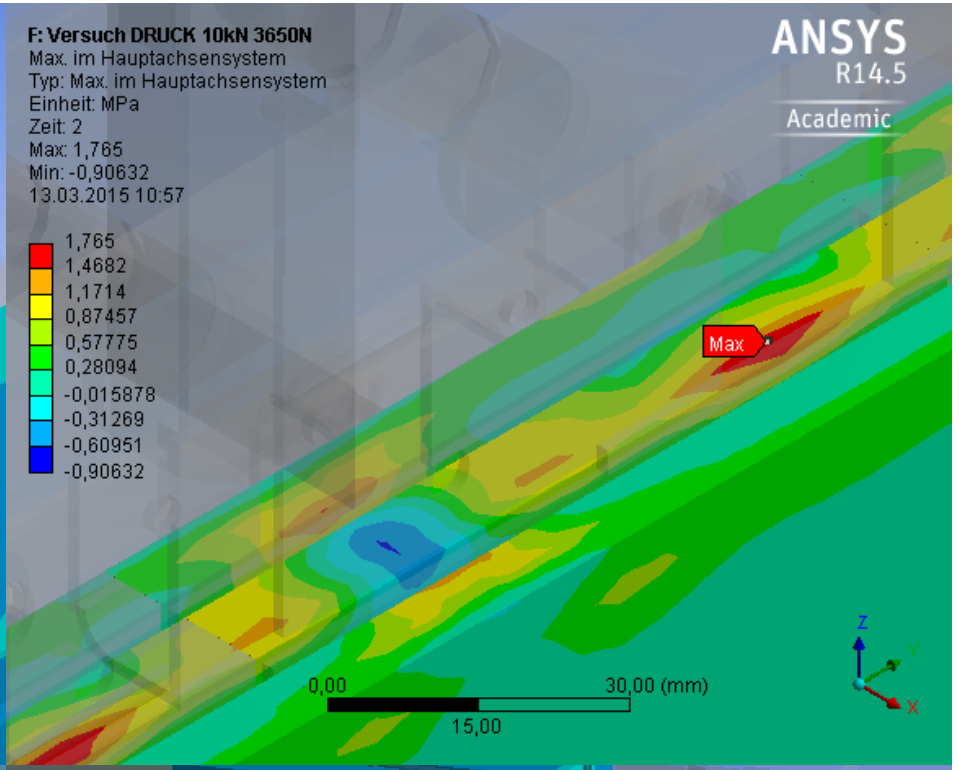


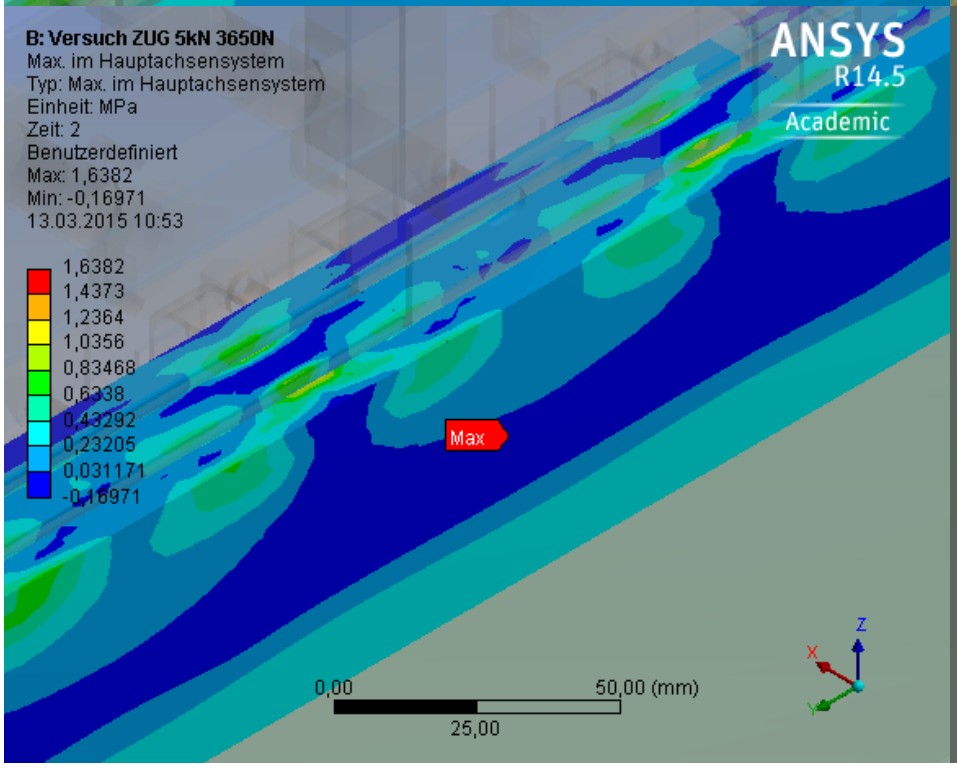
ANHANG D19 - min. Hauptspannungen HILTI HIT – FEM Probekörper

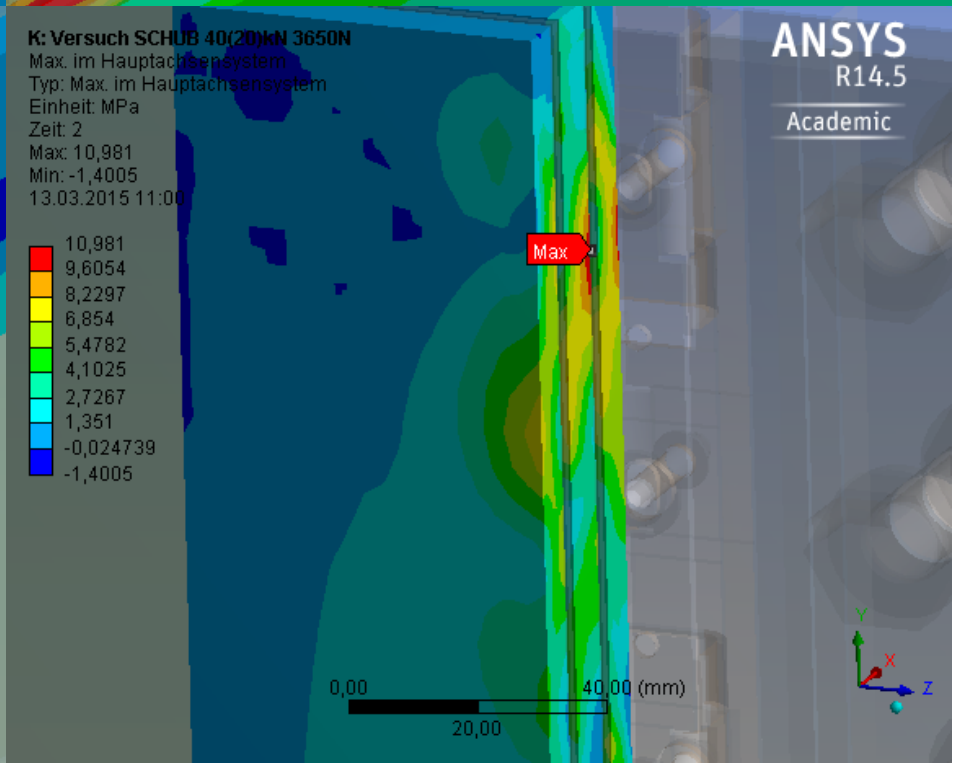
ANHANG D19 - max. Schubspannungen SentryGlas – FEM Probekörper











ANHANG D19 - max. Hauptspannungen TVG – FEM Probekörper

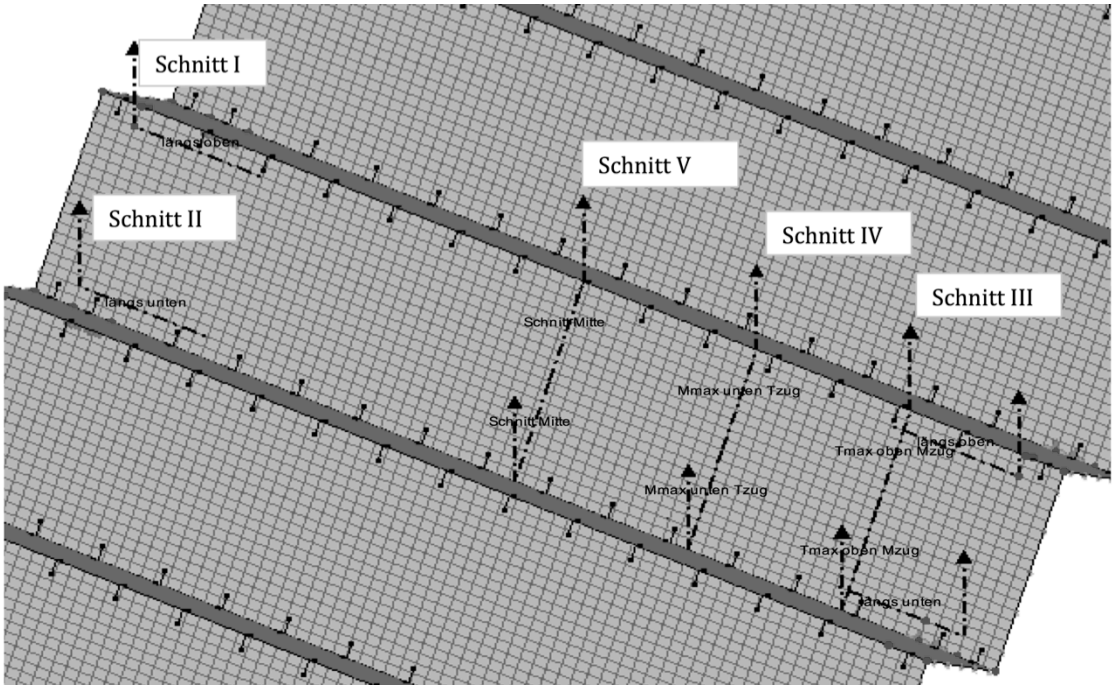
Anhang E – Schnittgrößen Tragwerke

Auswertungsstand Juni 2015

E0. Hinweise zur Auswertung
E1. Faltwerk 60°
E2. Faltwerk 90°
E3. Faltwerk 120°
E4. Faltwerk 150°

E0. Hinweise zur Auswertung

E 0 Typische der Auswertung zugrundeliegende Schnittführung



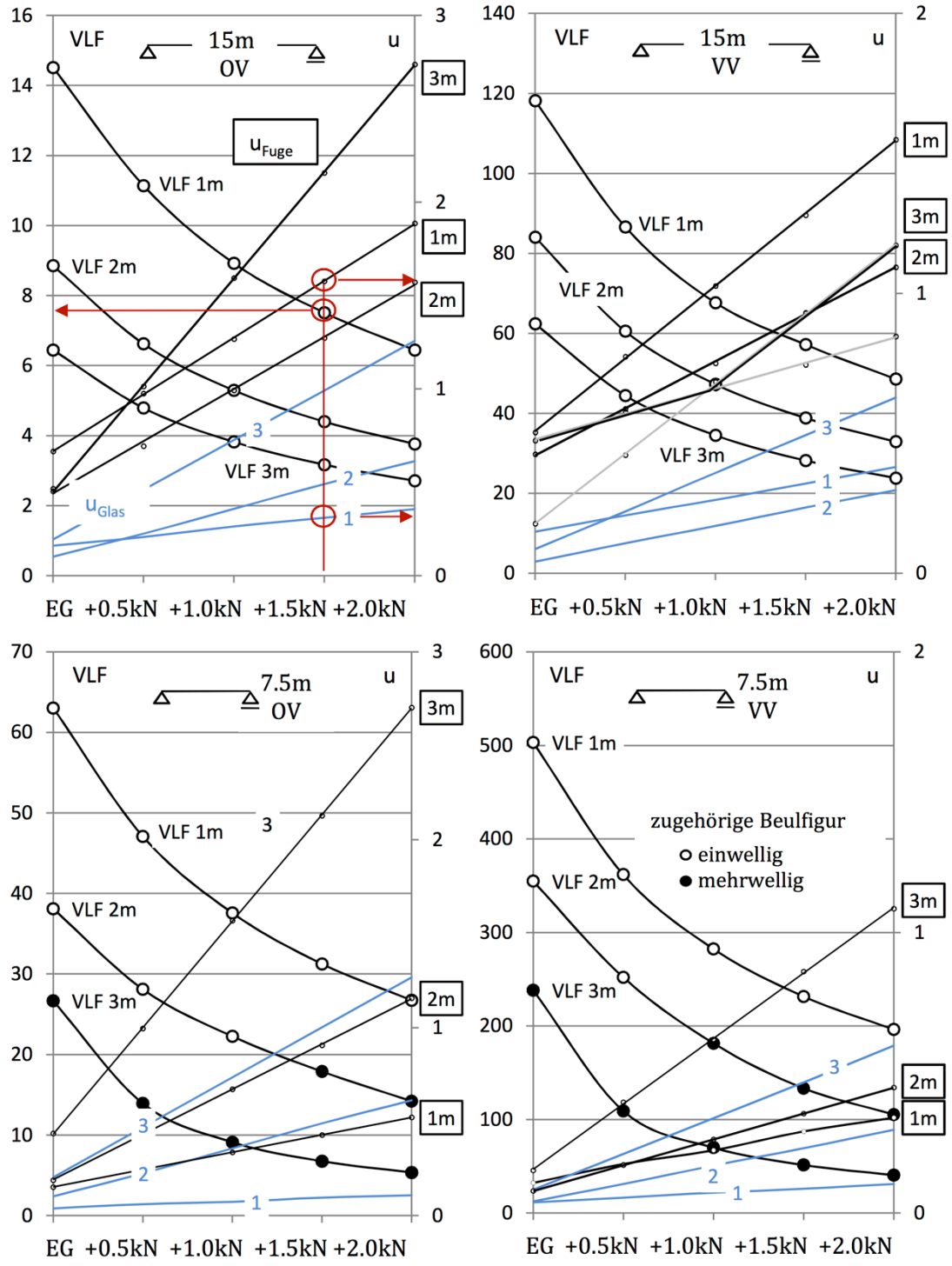
Schnitt	Lage im Modell	Auswertungswert	Bezeichnung RFEM
I	längs oben	T_{max}, D_{zug}, σ_1	n_{xy}, n_y, σ_1
II	längs unten	T_{max}, D_{zug}, σ_1	n_{xy}, n_y, σ_1
III	quer bei T_{max}	M_{zug} bei $T_{max,}$ σ_1	m_y bei $n_{xy,}$ σ_1
IV	quer bei M_{max}	M_{max}, T_{zug}, $D_{zug}/Z_{zug,}$ σ_1	m_y, n_{xy}, $n_{y,}$ σ_1
V	quer Mitte	σ_1	σ_1

max ... Maximalwert, zug ... zugeordnete Schnittgröße, für σ_1 gilt max aus {I,II,III,IV,V}

Anmerkung zur Auswertung: Gemäß Rücksprache mit Dlubal soll eine Auswertung zwei Elemente vom Liniengelenk entfernt erfolgen (vgl. Kapitel 5.5.2). Für den Schubfluss n_{xy} und die Grundschnittgröße n_y wurde entsprechend ausgewertet. Eine Vergleichsrechnung hat gezeigt, dass die Randmomente im Bereich des Liniengelenkes korrekt abgebildet werden. m_y wird daher direkt am Liniengelenk ausgewertet. Die Spannungen werden im Nahbereich der Anbindung nicht ausgewertet. Für eine Bemessungsaufgabe sollte die Funktion „Liniengelenk“ eingehender untersucht bzw. mit einer alternativen Modellierung gegengeprüft werden.

E1. Faltwerk 60°

E I Gegenüberstellung von Anbindungs- und Glasausnutzung mit den Verzweigungslastfaktoren für die Faltung 60° und drei Elementbreiten (entspricht Tafel 5)



60° 15m OV	M		T		Z	D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29	28,57				2,90	
	kNm/m		**kN/m**		**kN/m**	**kN/m**		[-]		**kN/cm2**	[-]
Schnittgrößen	M		T		Z	D		u	VLF	σ_vorh	u
60° 15m 1m I & III	(m_y)		(n_{xy})		(n_y)	(n_y)			1EW		
EG	0,02	0,04	5,54	0,10		0,00	0,27	0,01	0,14	14,51	0,47	0,16
EG 0.5LL	0,04	0,07	7,41	0,13		0,00	0,36	0,01	0,21	11,14	0,60	0,21
EG 1LL	0,07	0,12	9,28	0,16		0,00	0,51	0,02	0,30	8,92	0,77	0,26
EG 1.5LL	0,09	0,16	11,16	0,20		0,00	0,65	0,02	0,38	7,51	0,90	0,31
EG 2LL	0,12	0,21	13,03	0,23		0,00	0,80	0,03	0,47	6,44	1,04	0,36
60° 15m 1m II & III												
EG	0,00	0,00	12,94	0,23		0,00	12,55	0,44	0,67			
EG 0.5LL	0,02	0,04	18,05	0,32		0,00	17,84	0,62	0,98			
EG 1LL	0,03	0,05	23,15	0,41		0,00	23,13	0,81	1,27			
EG 1.5LL	0,05	0,09	28,25	0,49		0,00	28,41	0,99	1,58			
EG 2LL	0,07	0,12	33,36	0,58		0,00	33,70	1,18	1,89			
60° 15m 1m IV												
EG	0,02	0,04	5,54	0,10		0,00	0,27	0,01	0,14			
EG 0.5LL	0,04	0,07	7,41	0,13		0,00	0,36	0,01	0,21			
EG 1LL	0,07	0,12	9,28	0,16		0,00	0,51	0,02	0,30			
EG 1.5LL	0,09	0,16	11,16	0,20		0,00	0,65	0,02	0,38			
EG 2LL	0,12	0,21	13,03	0,23		0,00	0,80	0,03	0,47			
60° 15m 1m IV												
EG	0,02	0,04	4,85	0,08	0,19	0,01		0,00	0,13			
EG 0.5LL	0,04	0,07	6,44	0,11	0,31	0,02		0,00	0,20			
EG 1LL	0,07	0,12	8,03	0,14	0,44	0,03		0,00	0,29			
EG 1.5LL	0,09	0,16	9,62	0,17	0,57	0,04		0,00	0,37			
EG 2LL	0,12	0,21	11,20	0,20	0,70	0,05		0,00	0,46			
60° 15m 2m I & III												
EG	0,09	0,16	2,30	0,04		0,00	0,36	0,01	0,21			
EG 0.5LL	0,20	0,35	3,13	0,05		0,00	0,67	0,02	0,43			
EG 1LL	0,32	0,56	3,97	0,07		0,00	0,95	0,03	0,66			
EG 1.5LL	0,44	0,77	4,81	0,08		0,00	1,26	0,04	0,90			
EG 2LL	0,56	0,98	5,65	0,10		0,00	1,56	0,05	1,14			
60° 15m 2m II & III												
EG	0,02	0,04	7,61	0,13		0,00	8,48	0,30	0,47			
EG 0.5LL	0,04	0,07	11,25	0,20		0,00	12,18	0,43	0,69			
EG 1LL	0,10	0,18	14,90	0,26		0,00	15,88	0,56	0,99			
EG 1.5LL	0,15	0,26	18,54	0,32		0,00	19,58	0,69	1,27			
EG 2LL	0,21	0,37	22,19	0,39		0,00	23,28	0,81	1,57			
60° 15m 2m IV												
EG	0,09	0,16	2,07	0,04		0,00	0,32	0,01	0,21	8,85	0,30	0,10
EG 0.5LL	0,22	0,39	2,87	0,05		0,00	0,60	0,02	0,46	6,62	0,65	0,22
EG 1LL	0,34	0,60	3,66	0,06		0,00	0,88	0,03	0,69	5,29	1,04	0,36
EG 1.5LL	0,46	0,81	4,46	0,08		0,00	1,16	0,04	0,93	4,40	1,42	0,49
EG 2LL	0,59	1,04	5,25	0,09		0,00	1,44	0,05	1,18	3,76	1,78	0,61

60° 15m 2m IV												
EG	0,09	0,16	1,95	0,03	0,32	0,02		0,00	0,21			
EG 0.5LL	0,22	0,39	2,62	0,05	0,61	0,04		0,00	0,47			
EG 1LL	0,34	0,60	3,30	0,06	0,89	0,06		0,00	0,72			
EG 1.5LL	0,46	0,81	3,98	0,07	1,17	0,08		0,00	0,96			
EG 2LL	0,59	1,04	4,65	0,08	1,45	0,10		0,00	1,22			
60° 15m 3m I & III												
EG	0,21	0,37	1,40	0,02		0,00	0,47	0,02	0,41	6,44	0,56	0,19
EG 0.5LL	0,49	0,86	1,91	0,03		0,00	0,92	0,03	0,93	4,79	1,33	0,46
EG 1LL	0,78	1,37	2,43	0,04		0,00	1,36	0,05	1,46	3,82	2,10	0,73
EG 1.5LL	1,06	1,86	2,94	0,05		0,00	1,81	0,06	1,97	3,17	2,88	0,99
EG 2LL	1,34	2,35	3,46	0,06		0,00	2,25	0,08	2,49	2,71	3,65	1,26
60° 15m 3m II & III												
EG	0,02	0,04	6,85	0,12		0,00	9,88	0,35	0,50			
EG 0.5LL	0,10	0,18	9,70	0,17		0,00	13,18	0,46	0,81			
EG 1LL	0,22	0,39	12,56	0,22		0,00	16,48	0,58	1,18			
EG 1.5LL	0,34	0,60	15,41	0,27		0,00	19,78	0,69	1,56			
EG 2LL	0,45	0,79	18,27	0,32		0,00	23,08	0,81	1,92			
60° 15m 3m IV												
EG	0,23	0,40	1,20	0,02		0,00	0,44	0,02	0,44			
EG 0.5LL	0,53	0,93	1,66	0,03		0,00	0,87	0,03	0,99			
EG 1LL	0,84	1,47	2,13	0,04		0,00	1,31	0,05	1,56			
EG 1.5LL	1,13	1,98	2,60	0,05		0,00	1,74	0,06	2,09			
EG 2LL	1,44	2,53	3,06	0,05		0,00	2,17	0,08	2,66			
60° 15m 3m IV												
EG	0,23	0,40	0,99	0,02	0,44	0,03		0,00	0,45			
EG 0.5LL	0,53	0,93	1,33	0,02	0,87	0,06		0,00	1,01			
EG 1LL	0,84	1,47	1,67	0,03	1,30	0,09		0,00	1,59			
EG 1.5LL	1,14	2,00	2,01	0,04	1,74	0,12		0,00	2,16			
EG 2LL	1,45	2,54	2,35	0,04	2,17	0,15		0,00	2,74			

Werte in Zelle gehen in Tabelle ein

60° 15m VV	M		T		Z	D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29	28,57				2,90	
60° 15m 1m I & III	M		T		Z	D		u	VLF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	4,49	8%		0,00	0,24	0,01	0,09	118,16	
EG 0.5LL	0,00	0,00	6,33	11%		0,00	0,36	0,01	0,12	86,62	
EG 1LL	0,00	0,00	8,18	14%		0,00	0,50	0,02	0,16	67,65	
EG 1.5LL	0,01	0,02	10,03	18%		0,00	0,65	0,02	0,22	57,17	
EG 2LL	0,01	0,02	11,89	21%		0,00	0,81	0,03	0,25	48,55	
60° 15m 1m II & III											
EG	0,02	0,04	9,80	17%		0,00	8,48	0,30	0,50		
EG 0.5LL	0,03	0,05	14,65	26%		0,00	13,27	0,46	0,77		
EG 1LL	0,03	0,05	19,51	34%		0,00	18,06	0,63	1,03		
EG 1.5LL	0,03	0,05	24,37	43%		0,00	22,85	0,80	1,28		
EG 2LL	0,04	0,07	29,23	51%		0,00	27,64	0,97	1,55		
60° 15m 1m IV											
EG	0,00	0,00	2,28	4%			0,39	0,01	0,05	0,43	0,15
EG 0.5LL	0,04	0,07	3,92	7%			0,58	0,02	0,16	0,60	0,21
EG 1LL	0,07	0,12	4,97	9%			0,77	0,03	0,24	0,76	0,26
EG 1.5LL	0,08	0,14	6,01	11%			0,96	0,03	0,28	0,93	0,32
EG 2LL	0,09	0,16	7,05	12%			1,15	0,04	0,32	1,10	0,38
60° 15m 1m IV											
EG	0,02	0,04	9,80	17%		0,00	8,48	0,30	0,50		
EG 0.5LL	0,03	0,05	14,65	26%		0,00	13,27	0,46	0,77		
EG 1LL	0,03	0,05	19,51	34%		0,00	18,06	0,63	1,03		
EG 1.5LL	0,03	0,05	24,37	43%		0,00	22,85	0,80	1,28		
EG 2LL	0,04	0,07	29,23	51%		0,00	27,64	0,97	1,55		
60° 15m 2m I & III											
EG	0,01	0,02	1,97	3%		0,00	0,32	0,01	0,06	84,05	
EG 0.5LL	0,04	0,07	2,79	5%		0,00	0,62	0,02	0,14	60,52	
EG 1LL	0,08	0,14	3,62	6%		0,00	0,91	0,03	0,24	47,26	
EG 1.5LL	0,11	0,19	4,44	8%		0,00	1,21	0,04	0,31	38,81	
EG 2LL	0,14	0,25	5,27	9%		0,00	1,51	0,05	0,39	32,89	
60° 15m 2m II & III											
EG	0,08	0,14	5,57	10%		0,00	5,34	0,19	0,42		
EG 0.5LL	0,08	0,14	8,83	15%		0,00	8,36	0,29	0,59		
EG 1LL	0,08	0,14	12,09	21%		0,00	11,38	0,40	0,75		
EG 1.5LL	0,09	0,16	15,35	27%		0,00	14,40	0,50	0,93		
EG 2LL	0,09	0,16	18,61	33%		0,00	17,42	0,61	1,09		
60° 15m 2m IV											
EG	0,02	0,04	1,84	3%			0,29	0,01	0,08	0,37	0,13
EG 0.5LL	0,06	0,11	2,65	5%			0,57	0,02	0,17	0,54	0,19
EG 1LL	0,10	0,18	3,45	6%			0,86	0,03	0,27	0,72	0,25
EG 1.5LL	0,14	0,25	4,26	7%			1,15	0,04	0,36	0,9	0,31
EG 2LL	0,17	0,30	5,06	9%			1,44	0,05	0,44	1,07	0,37

60° 15m 2m IV												
EG	0,03	0,05	1,39	2%	0,28	0,02		0,00	0,10			
EG 0.5LL	0,07	0,12	1,94	3%	0,56	0,04		0,00	0,20			
EG 1LL	0,11	0,19	2,49	4%	0,84	0,06		0,00	0,30			
EG 1.5LL	0,15	0,26	3,05	5%	1,12	0,08		0,00	0,39			
EG 2LL	0,19	0,33	3,60	6%	1,40	0,10		0,00	0,49			
60° 15m 3m I & III												
EG	0,05	0,09	1,18	2%		0,00	0,41	0,01	0,12	62,37	0,25	0,09
EG 0.5LL	0,16	0,28	1,68	3%		0,00	0,84	0,03	0,34	44,44	0,64	0,22
EG 1LL	0,26	0,46	2,18	4%		0,00	1,28	0,04	0,54	34,49	1,04	0,36
EG 1.5LL	0,36	0,63	2,68	5%		0,00	1,71	0,06	0,74	28,17	1,43	0,49
EG 2LL	0,47	0,82	3,18	6%		0,00	2,15	0,08	0,96	23,80	1,82	0,63
60° 15m 3m II & III												
EG	0,11	0,19	4,42	8%		0,00	5,83	0,20	0,47			
EG 0.5LL	0,10	0,18	6,68	12%		0,00	8,11	0,28	0,58			
EG 1LL	0,08	0,14	8,94	16%		0,00	10,38	0,36	0,66			
EG 1.5LL	0,06	0,11	11,20	20%		0,00	12,66	0,44	0,74			
EG 2LL	0,05	0,09	13,46	24%		0,00	14,94	0,52	0,85			
60° 15m 3m IV.												
EG	0,08	0,14	0,68	1%			0,38	0,01	0,17			
EG 0.5LL	0,20	0,35	1,00	2%			0,81	0,03	0,40			
EG 1LL	0,33	0,58	1,33	2%			1,23	0,04	0,65			
EG 1.5LL	0,45	0,79	1,65	3%			1,66	0,06	0,88			
EG 2LL	0,57	1,00	1,98	3%			2,09	0,07	1,11			
60° 15m 3m IV												
EG	0,08	0,14	0,59	1%	0,38	0,03		0,00	0,18			
EG 0.5LL	0,20	0,35	0,83	1%	0,81	0,06		0,00	0,42			
EG 1LL	0,33	0,58	0,99	2%	1,24	0,09		0,00	0,68			
EG 1.5LL	0,45	0,79	1,30	2%	1,66	0,12		0,00	0,93			
EG 2LL	0,57	1,00	1,44	3%	2,09	0,15		0,00	1,17			

60° 7.5m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
60° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	VLF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,01	0,02	2,18	0,04		0,00	0,27	0,01	0,07	63,03	0,11	0,04
EG 0.5LL	0,04	0,07	2,92	0,05		0,00	0,38	0,01	0,13	47,09	0,18	0,06
EG 1LL	0,06	0,11	3,67	0,06		0,00	0,53	0,02	0,19	37,57	0,21	0,07
EG 1.5LL	0,08	0,14	4,42	0,08		0,00	0,70	0,02	0,24	31,25	0,28	0,10
EG 2LL	0,11	0,19	5,17	0,09		0,00	0,86	0,03	0,31	26,74	0,31	0,11
60° 7.5m 1m II & III												
EG	0,00	0,00	3,78	0,07		0,00	2,46	0,09	0,15			
EG 0.5LL	0,02	0,04	5,18	0,09		0,00	3,40	0,12	0,24			
EG 1LL	0,04	0,07	6,58	0,12		0,00	4,34	0,15	0,34			
EG 1.5LL	0,06	0,11	7,98	0,14		0,00	5,28	0,18	0,43			
EG 2LL	0,08	0,14	9,39	0,16		0,00	6,22	0,22	0,52			
60° 7.5m 1m IV												
EG	0,02	0,04	2,08	0,04		0,00	0,18	0,01	0,08			
EG 0.5LL	0,04	0,07	2,81	0,05		0,00	0,31	0,01	0,13			
EG 1LL	0,07	0,12	3,54	0,06		0,00	0,44	0,02	0,20			
EG 1.5LL	0,09	0,16	4,27	0,07		0,00	0,57	0,02	0,25			
EG 2LL	0,12	0,21	5,00	0,09		0,00	0,70	0,02	0,32			
60° 7.5m 1m IV												
EG	0,02	0,04	1,95	0,03	0,17	0,01		0,00	0,08			
EG 0.5LL	0,04	0,07	2,63	0,05	0,29	0,02		0,00	0,14			
EG 1LL	0,07	0,12	3,31	0,06	0,40	0,03		0,00	0,21			
EG 1.5LL	0,09	0,16	3,98	0,07	0,52	0,04		0,00	0,26			
EG 2LL	0,12	0,21	4,66	0,08	0,64	0,04		0,00	0,34			
60° 7.5m 2m I & III												
EG	0,07	0,12	0,89	0,02		0,00	0,35	0,01	0,15	38,09	0,30	0,10
EG 0.5LL	0,18	0,32	1,21	0,02		0,00	0,66	0,02	0,36	28,10	0,65	0,22
EG 1LL	0,29	0,51	1,53	0,03		0,00	0,95	0,03	0,57	22,25	1,04	0,36
EG 1.5LL	0,40	0,70	1,84	0,03		0,00	1,24	0,04	0,78	17,89	1,42	0,49
EG 2LL	0,50	0,88	2,16	0,04		0,00	1,53	0,05	0,97	14,21	1,78	0,61
60° 7.5m 2m II & III												
EG	0,02	0,04	2,56	0,04		0,00	2,72	0,10	0,18			
EG 0.5LL	0,09	0,16	3,37	0,06		0,00	3,27	0,11	0,33			
EG 1LL	0,16	0,28	4,17	0,07		0,00	3,82	0,13	0,49			
EG 1.5LL	0,23	0,40	4,97	0,09		0,00	4,37	0,15	0,64			
EG 2LL	0,30	0,53	5,78	0,10		0,00	4,91	0,17	0,80			
60° 7.5m 2m IV												
EG	0,09	0,16	0,55	0,01		0,00	0,31	0,01	0,18			
EG 0.5LL	0,22	0,39	0,75	0,01		0,00	0,59	0,02	0,42			
EG 1LL	0,34	0,60	0,95	0,02		0,00	0,87	0,03	0,64			
EG 1.5LL	0,46	0,81	1,16	0,02		0,00	1,15	0,04	0,87			
EG 2LL	0,59	1,04	1,36	0,02		0,00	1,43	0,05	1,11			

60° 7.5m 2m IV													
EG	0,09	0,16	0,49	0,01	0,32	0,02		0,00	0,19				
EG 0.5LL	0,22	0,39	0,66	0,01	0,60	0,04		0,00	0,44				
EG 1LL	0,34	0,60	0,83	0,01	0,88	0,06		0,00	0,67				
EG 1.5LL	0,46	0,81	1,00	0,02	1,16	0,08		0,00	0,91				
EG 2LL	0,59	1,04	1,17	0,02	1,44	0,10		0,00	1,16				
60° 7.5m 3m I & III													
EG	0,18	0,32	0,47	0,01		0,00	0,46	0,02	0,34	26,66		0,59	0,20
EG 0.5LL	0,33	0,58	0,64	0,01		0,00	0,90	0,03	0,62	13,93		1,36	0,47
EG 1LL	0,69	1,21	0,82	0,01		0,00	1,33	0,05	1,27	9,11		2,13	0,74
EG 1.5LL	0,94	1,65	1,00	0,02		0,00	1,76	0,06	1,73	6,75		2,91	1,00
EG 2LL	1,19	2,09	1,18	0,02		0,00	2,19	0,08	2,19	5,36		3,68	1,27
60° 7.5m 3m II & III													
EG	0,05	0,09	2,49	0,04		0,00	3,62	0,13	0,26				
EG 0.5LL	0,19	0,33	3,05	0,05		0,00	3,98	0,14	0,53				
EG 1LL	0,33	0,58	3,62	0,06		0,00	4,34	0,15	0,79				
EG 1.5LL	0,46	0,81	4,19	0,07		0,00	4,70	0,16	1,04				
EG 2LL	0,60	1,05	4,75	0,08		0,00	5,06	0,18	1,31				
60° 7.5m 3m IV													
EG	0,23	0,40	0,22	0,00		0,00	0,44	0,02	0,42				
EG 0.5LL	0,53	0,93	0,30	0,01		0,00	0,87	0,03	0,97				
EG 1LL	0,84	1,47	0,37	0,01		0,00	1,31	0,05	1,53				
EG 1.5LL	1,14	2,00	0,45	0,01		0,00	1,74	0,06	2,07				
EG 2LL	1,45	2,54	0,53	0,01		0,00	2,18	0,08	2,63				
60° 7.5m 3m IV													
EG	0,23	0,40	0,17	0,00	0,44	0,03		0,00	0,44				
EG 0.5LL	0,53	0,93	0,23	0,00	0,88	0,06		0,00	1,00				
EG 1LL	0,84	1,47	0,29	0,01	1,31	0,09		0,00	1,57				
EG 1.5LL	1,14	2,00	0,35	0,01	1,75	0,12		0,00	2,13				
EG 2LL	1,45	2,54	0,42	0,01	2,18	0,15		0,00	2,70				

60° 7.5m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
60° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	VLF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	1,89	0,03			0,23	0,01	0,04	503	0,11	0,04
EG 0.5LL	0,00	0,00	2,63	0,05			0,40	0,01	0,06	362	0,16	0,06
EG 1LL	0,00	0,00	3,37	0,06			0,57	0,02	0,08	282	0,21	0,07
EG 1.5LL	0,01	0,02	4,11	0,07			0,67	0,02	0,11	232	0,25	0,09
EG 2LL	0,01	0,02	4,86	0,09			0,82	0,03	0,13	196	0,30	0,10
60° 7.5m 1m II & III												
EG	0,00	0,00	3,04	0,05		0,00	1,55	0,05	0,11			
EG 0.5LL	0,01	0,02	4,36	0,08		0,00	2,30	0,08	0,17			
EG 1LL	0,01	0,02	5,68	0,10		0,00	3,05	0,11	0,22			
EG 1.5LL	0,02	0,04	7,00	0,12		0,00	3,80	0,13	0,29			
EG 2LL	0,02	0,04	8,31	0,15		0,00	4,55	0,16	0,34			
60° 7.5m 1m IV												
EG	0,02	0,04	1,59	0,03			0,24	0,01	0,07			
EG 0.5LL	0,02	0,04	2,19	0,04			0,38	0,01	0,09			
EG 1LL	0,03	0,05	2,79	0,05			0,59	0,02	0,12			
EG 1.5LL	0,03	0,05	3,39	0,06			0,66	0,02	0,14			
EG 2LL	0,04	0,07	3,99	0,07			0,80	0,03	0,17			
60° 7.5m 1m IV												
EG	0,00	0,00	1,39	0,02	0,15	0,01		0,00	0,03			
EG 0.5LL	0,01	0,02	1,91	0,03	0,28	0,02		0,00	0,07			
EG 1LL	0,01	0,02	2,42	0,04	0,40	0,03		0,00	0,09			
EG 1.5LL	0,02	0,04	2,94	0,05	0,52	0,04		0,00	0,12			
EG 2LL	0,03	0,05	3,45	0,06	0,65	0,05		0,00	0,16			
60° 7.5m 2m I & III												
EG	0,00	0,00	0,77	0,01			0,31	0,01	0,02	355	0,12	0,04
EG 0.5LL	0,03	0,05	1,09	0,02			0,59	0,02	0,09	252	0,30	0,10
EG 1LL	0,07	0,12	1,40	0,02			0,87	0,03	0,18	181	0,49	0,17
EG 1.5LL	0,10	0,18	1,72	0,03			1,16	0,04	0,25	133	0,67	0,23
EG 2LL	0,13	0,23	2,03	0,04			1,44	0,05	0,31	105	0,86	0,30
60° 7.5m 2m II & III												
EG	0,05	0,09	1,76	0,03		0,00	1,45	0,05	0,17			
EG 0.5LL	0,04	0,07	2,41	0,04		0,00	1,72	0,06	0,17			
EG 1LL	0,04	0,07	3,05	0,05		0,00	2,00	0,07	0,19			
EG 1.5LL	0,03	0,05	3,70	0,06		0,00	2,27	0,08	0,20			
EG 2LL	0,03	0,05	4,34	0,08		0,00	2,55	0,09	0,22			
60° 7.5m 2m IV												
EG	0,03	0,05	0,33	0,01			0,28	0,01	0,07			
EG 0.5LL	0,07	0,12	0,44	0,01			0,56	0,02	0,15			
EG 1LL	0,11	0,19	0,55	0,01			0,84	0,03	0,23			
EG 1.5LL	0,15	0,26	0,66	0,01			1,12	0,04	0,31			
EG 2LL	0,19	0,33	0,77	0,01			1,40	0,05	0,40			

60° 7.5m 2m IV

EG	0,03	0,05	0,35	0,01	0,28	0,02		0,00	0,08				
EG 0.5LL	0,07	0,12	0,48	0,01	0,56	0,04		0,00	0,17				
EG 1LL	0,11	0,19	0,61	0,01	0,84	0,06		0,00	0,26				
EG 1.5LL	0,15	0,26	0,75	0,01	1,12	0,08		0,00	0,35				
EG 2LL	0,19	0,33	0,88	0,02	1,40	0,10		0,00	0,45				

60° 7.5m 3m I & III

EG	0,05	0,09	0,39	0,01		0,00	0,39	0,01	0,11	238		0,24	0,08
EG 0.5LL	0,14	0,25	0,56	0,01		0,00	0,81	0,03	0,28	109		0,61	0,21
EG 1LL	0,24	0,42	0,74	0,01		0,00	1,22	0,04	0,48	70		0,98	0,34
EG 1.5LL	0,34	0,60	0,90	0,02		0,00	1,65	0,06	0,67	51		1,35	0,47
EG 2LL	0,43	0,75	1,07	0,02		0,00	2,06	0,07	0,85	41		1,73	0,60

60° 7.5m 3m II & III

EG	0,06	0,11	1,45	0,03		0,00	1,84	0,06	0,20				
EG 0.5LL	0,03	0,05	1,76	0,03		0,00	1,75	0,06	0,14				
EG 1LL	0,01	0,02	2,08	0,04		0,00	1,65	0,06	0,11				
EG 1.5LL	0,02	0,04	2,39	0,04		0,00	1,56	0,05	0,13				
EG 2LL	0,05	0,09	2,71	0,05		0,00	1,46	0,05	0,19				

60° 7.5m 3m IV

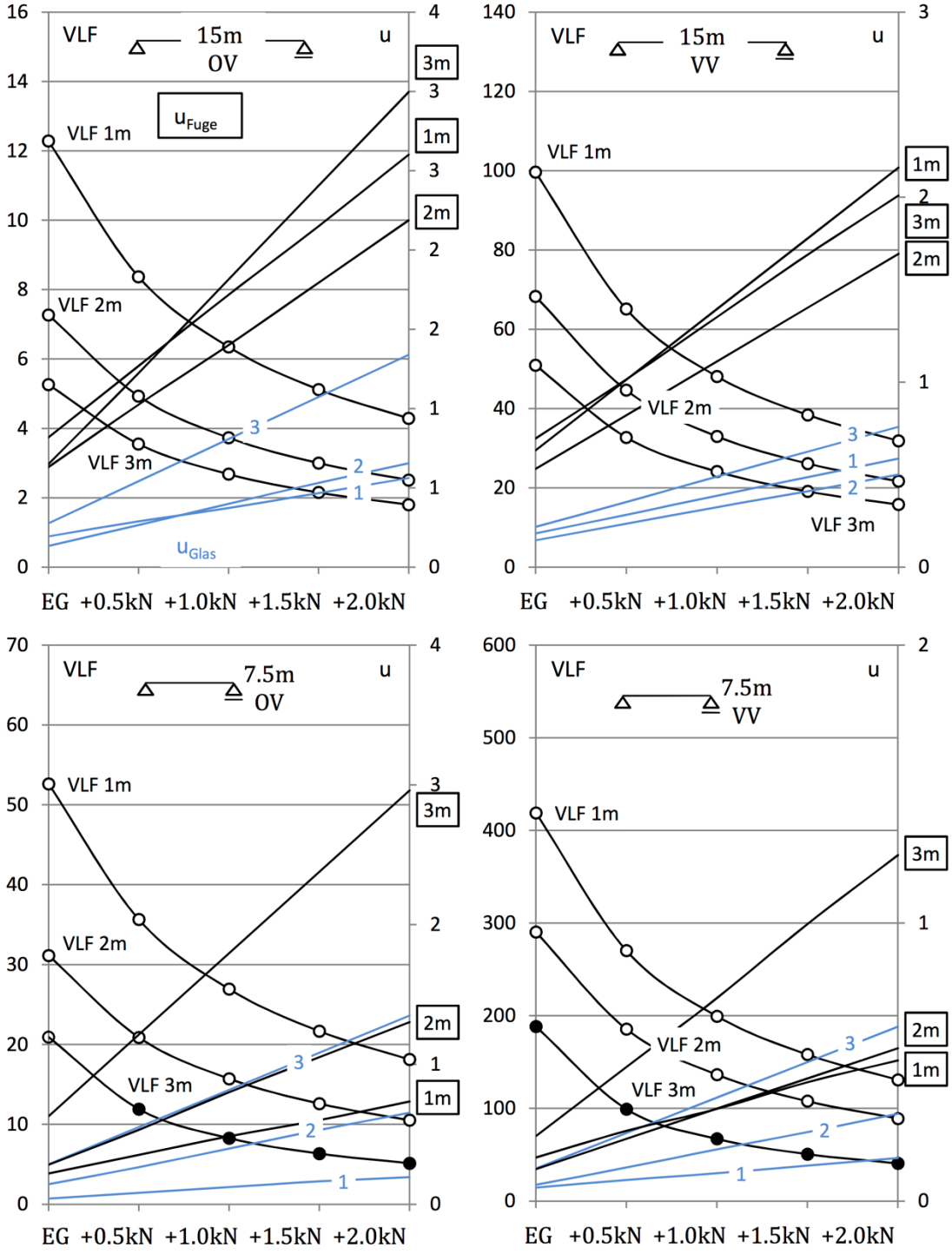
EG	0,07	0,12	0,15	0,00			0,38	0,01	0,14				
EG 0.5LL	0,19	0,33	0,19	0,00			0,82	0,03	0,37				
EG 1LL	0,30	0,53	0,24	0,00			1,25	0,04	0,57				
EG 1.5LL	0,42	0,74	0,29	0,01			1,69	0,06	0,80				
EG 2LL	0,53	0,93	0,33	0,01			2,12	0,07	1,01				

60° 7.5m 3m IV

EG	0,07	0,12	0,15	0,00	0,38	0,03		0,00	0,15				
EG 0.5LL	0,19	0,33	0,21	0,00	0,82	0,06		0,00	0,39				
EG 1LL	0,30	0,53	0,26	0,00	1,25	0,09		0,00	0,62				
EG 1.5LL	0,42	0,74	0,32	0,01	1,69	0,12		0,00	0,86				
EG 2LL	0,53	0,93	0,38	0,01	2,12			0,00	1,08				

E2. Faltwerk 90°

E II Gegenüberstellung von Anbindungs- und Glasausnutzung mit den Verzweigungslastfaktoren für die Faltung 90° und drei Elementbreiten



90° 15m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
90° 15m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,03	0,05	6,34	0,11			0,39	0,01	0,18	12,28	0,56	0,19
EG 0.5LL	0,05	0,09	9,39	0,16			0,67	0,02	0,28	8,37	0,84	0,29
EG 1LL	0,07	0,12	12,44	0,22			0,94	0,03	0,37	6,35	1,08	0,37
EG 1.5LL	0,10	0,18	15,49	0,27			1,23	0,04	0,49	5,12	1,35	0,47
EG 2LL	0,12	0,21	18,54	0,32			1,50	0,05	0,59	4,29	1,63	0,56
90° 15m 1m II & IIII												
EG	0,01	0,02	15,04	0,26		0,00	15,34	0,54	0,82			
EG 0.5LL	0,03	0,05	22,75	0,40		0,00	23,35	0,82	1,27			
EG 1LL	0,05	0,09	30,45	0,53		0,00	31,35	1,10	1,72			
EG 1.5LL	0,06	0,11	38,16	0,67		0,00	39,35	1,38	2,15			
EG 2LL	0,08	0,14	45,87	0,80		0,00	47,36	1,66	2,60			
90° 15m 1m IV												
EG	0,03	0,05	6,34	0,11			0,39	0,01	0,18			
EG 0.5LL	0,05	0,09	9,39	0,16			0,67	0,02	0,28			
EG 1LL	0,07	0,12	12,44	0,22			0,94	0,03	0,37			
EG 1.5LL	0,10	0,18	15,49	0,27			1,23	0,04	0,49			
EG 2LL	0,12	0,21	18,54	0,32			1,50	0,05	0,59			
90° 15m 1m IV												
EG	0,03	0,05	6,03	0,11	0,22	0,02		0,00	0,17			
EG 0.5LL	0,05	0,09	8,93	0,16	0,38	0,03		0,00	0,24			
EG 1LL	0,07	0,12	11,84	0,21	0,55	0,04		0,00	0,33			
EG 1.5LL	0,10	0,18	14,74	0,26	0,71	0,05		0,00	0,43			
EG 2LL	0,12	0,21	17,65	0,31	0,87	0,06		0,00	0,52			
90° 15m 2m I & III												
EG	0,12	0,21	2,84	0,05			0,66	0,02	0,28	7,27	0,39	0,13
EG 0.5LL	0,24	0,42	4,22	0,07			1,18	0,04	0,54	4,93	0,77	0,27
EG 1LL	0,35	0,61	5,60	0,10			1,71	0,06	0,77	3,73	1,16	0,40
EG 1.5LL	0,47	0,82	6,97	0,12			2,22	0,08	1,02	3,00	1,54	0,53
EG 2LL	0,59	1,04	8,35	0,15			2,76	0,10	1,28	2,51	1,90	0,65
90° 15m 2m II & III												
EG	0,02	0,04	10,39	0,18		0,00	11,83	0,41	0,63			
EG 0.5LL	0,07	0,12	15,90	0,28		0,00	17,81	0,62	1,02			
EG 1LL	0,11	0,19	21,42	0,37		0,00	23,78	0,83	1,40			
EG 1.5LL	0,16	0,28	26,93	0,47		0,00	29,76	1,04	1,79			
EG 2LL	0,21	0,37	32,44	0,57		0,00	35,73	1,25	2,19			
90° 15m 2m IV												
EG	0,13	0,23	2,50	0,04			0,60	0,02	0,29			
EG 0.5LL	0,26	0,46	3,74	0,07			1,09	0,04	0,56			
EG 1LL	0,38	0,67	4,98	0,09			1,57	0,05	0,81			
EG 1.5LL	0,50	0,88	6,22	0,11			2,06	0,07	1,06			
EG 2LL	0,63	1,11	7,45	0,13			2,54	0,09	1,32			

90° 15m 2m IV													
EG	0,13	0,23	2,30	0,04	0,61	0,04		0,00	0,31				
EG 0.5LL	0,25	0,44	3,40	0,06	1,10	0,08		0,00	0,58				
EG 1LL	0,38	0,67	4,49	0,08	1,59	0,11		0,00	0,86				
EG 1.5LL	0,50	0,88	5,59	0,10	2,08	0,15		0,00	1,12				
EG 2LL	0,63	1,11	6,69	0,12	2,57	0,18		0,00	1,40				
90° 15m 3m I & III													
EG	0,29	0,51	1,74	0,03			0,93	0,03	0,57	5,26	0,80	0,28	
EG 0.5LL	0,57	1,00	2,59	0,05			1,71	0,06	1,11	3,55	1,57	0,54	
EG 1LL	0,85	1,49	3,43	0,06			2,48	0,09	1,64	2,68	2,34	0,81	
EG 1.5LL	1,13	1,98	4,28	0,07			3,25	0,11	2,17	2,15	3,11	1,07	
EG 2LL	1,41	2,47	5,13	0,09			4,03	0,14	2,70	1,80	3,88	1,34	
90° 15m 3m II & III													
EG	0,05	0,09	9,86	0,17		0,00	13,92	0,49	0,75				
EG 0.5LL	0,15	0,26	14,78	0,26		0,00	20,33	0,71	1,23				
EG 1LL	0,25	0,44	19,71	0,34		0,00	26,74	0,94	1,72				
EG 1.5LL	0,35	0,61	24,63	0,43		0,00	33,15	1,16	2,21				
EG 2LL	0,45	0,79	29,55	0,52		0,00	39,56	1,38	2,69				
90° 15m 3m IV													
EG	0,32	0,56	1,54	0,03			0,89	0,03	0,62				
EG 0.5LL	0,62	1,09	2,30	0,04			1,64	0,06	1,19				
EG 1LL	0,92	1,61	3,06	0,05			2,09	0,07	1,74				
EG 1.5LL	1,23	2,16	3,83	0,07			3,14	0,11	2,33				
EG 2LL	1,53	2,68	4,59	0,08			3,90	0,14	2,90				
90° 15m 3m IV													
EG	0,32	0,56	1,40	0,02	0,91	0,06		0,00	0,65				
EG 0.5LL	0,61	1,07	2,08	0,04	1,67	0,12		0,00	1,22				
EG 1LL	0,91	1,60	2,75	0,05	2,42	0,17		0,00	1,81				
EG 1.5LL	1,21	2,12	3,42	0,06	3,18	0,22		0,00	2,41				
EG 2LL	1,51	2,65	4,10	0,07	3,94	0,28		0,00	3,00				

90° 15m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
90° 15m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	5,50	0,10			0,36	0,01	0,11	99,62	0,53	0,18
EG 0.5LL	0,00	0,00	8,55	0,15			0,66	0,02	0,17	65,10	0,82	0,28
EG 1LL	0,00	0,00	11,62	0,20			0,97	0,03	0,24	48,10	1,12	0,39
EG 1.5LL	0,00	0,00	14,67	0,26			1,27	0,04	0,30	38,38	1,41	0,49
EG 2LL	0,00	0,00	17,73	0,31			1,57	0,05	0,37	31,83	1,70	0,59
90° 15m 1m II & III												
EG	0,02	0,04	12,24	0,21		0,00	10,89	0,38	0,63			
EG 0.5LL	0,03	0,05	19,53	0,34		0,00	17,66	0,62	1,01			
EG 1LL	0,04	0,07	26,82	0,47		0,00	24,44	0,86	1,39			
EG 1.5LL	0,05	0,09	34,11	0,60		0,00	31,21	1,09	1,78			
EG 2LL	0,06	0,11	41,41	0,72		0,00	37,99	1,33	2,16			
90° 15m 1m IV												
EG	0,04	0,07	3,27	0,06		0,00	0,48	0,02	0,14			
EG 0.5LL	0,07	0,12	5,01	0,09		0,00	0,79	0,03	0,24			
EG 1LL	0,09	0,16	6,76	0,12		0,00	1,10	0,04	0,31			
EG 1.5LL	0,11	0,19	8,50	0,15		0,00	1,41	0,05	0,39			
EG 2LL	0,13	0,23	10,25	0,18		0,00	1,72	0,06	0,47			
90° 15m 1m IV												
EG	0,02	0,04	12,24	0,21		0,00	10,89	0,38	0,63			
EG 0.5LL	0,03	0,05	19,53	0,34		0,00	17,66	0,62	1,01			
EG 1LL	0,04	0,07	26,82	0,47		0,00	24,44	0,86	1,39			
EG 1.5LL	0,05	0,09	34,11	0,60		0,00	31,21	1,09	1,78			
EG 2LL	0,06	0,11	41,41	0,72		0,00	37,99	1,33	2,16			
90° 15m 2m I & III												
EG	0,02	0,04	2,43	0,04			0,59	0,02	0,10	68,30		
EG 0.5LL	0,04	0,07	3,79	0,07			1,12	0,04	0,18	44,62		
EG 1LL	0,07	0,12	5,15	0,09			1,64	0,06	0,27	32,97		
EG 1.5LL	0,10	0,18	6,51	0,11			2,18	0,08	0,37	26,11		
EG 2LL	0,13	0,23	7,87	0,14			2,70	0,09	0,46	21,65		
90° 15m 2m II & III												
EG	0,08	0,14	7,45	0,13		0,00	7,43	0,26	0,53		0,42	0,14
EG 0.5LL	0,11	0,19	12,11	0,21		0,00	11,90	0,42	0,82		0,68	0,23
EG 1LL	0,14	0,25	16,77	0,29		0,00	16,37	0,57	1,11		0,94	0,32
EG 1.5LL	0,17	0,30	21,44	0,38		0,00	20,84	0,73	1,40		1,19	0,41
EG 2LL	0,20	0,35	26,10	0,46		0,00	25,32	0,89	1,69		1,45	0,50
90° 15m 2m IV												
EG	0,12	0,21	1,35	0,02	0,76	0,05		0,00	0,29			
EG 0.5LL	0,17	0,30	2,11	0,04	1,07	0,07		0,00	0,41			
EG 1LL	0,23	0,40	2,87	0,05	1,37	0,10		0,00	0,55			
EG 1.5LL	0,28	0,49	3,64	0,06	1,67	0,12		0,00	0,67			
EG 2LL	0,34	0,60	4,40	0,08	1,98	0,14		0,00	0,81			

90° 15m 2m IV													
EG	0,08	0,14	7,45	0,13		0,00	7,43	0,26	0,53				
EG 0.5LL	0,11	0,19	12,11	0,21		0,00	11,90	0,42	0,82				
EG 1LL	0,14	0,25	16,77	0,29		0,00	16,37	0,57	1,11				
EG 1.5LL	0,17	0,30	21,44	0,38		0,00	20,84	0,73	1,40				
EG 2LL	0,20	0,35	26,10	0,46		0,00	25,32	0,89	1,69				
90° 15m 3m I & III													
EG	0,08	0,14	1,46	0,03			0,81	0,03	0,19	50,94			
EG 0.5LL	0,18	0,32	2,28	0,04			1,57	0,05	0,41	32,72			
EG 1LL	0,27	0,47	3,10	0,05			2,33	0,08	0,61	24,09			
EG 1.5LL	0,37	0,65	3,92	0,07			3,09	0,11	0,83	19,07			
EG 2LL	0,47	0,82	4,75	0,08			3,86	0,14	1,04	15,77			
90° 15m 3m II & III													
EG	0,17	0,30	6,29	0,11		0,00	8,20	0,29	0,70		0,63	0,22	
EG 0.5LL	0,23	0,40	9,95	0,17		0,00	12,49	0,44	1,01		1,02	0,35	
EG 1LL	0,30	0,53	13,61	0,24		0,00	16,79	0,59	1,35		1,42	0,49	
EG 1.5LL	0,37	0,65	17,27	0,30		0,00	21,08	0,74	1,69		1,81	0,62	
EG 2LL	0,43	0,75	20,93	0,37		0,00	25,37	0,89	2,01		2,20	0,76	
90° 15m 3m IV													
EG	0,11	0,19	0,88	0,02		0,00	0,77	0,03	0,24				
EG 0.5LL	0,23	0,40	1,39	0,02		0,00	1,51	0,05	0,48				
EG 1LL	0,35	0,61	1,91	0,03		0,00	2,25	0,08	0,73				
EG 1.5LL	0,47	0,82	2,43	0,04		0,00	2,99	0,10	0,97				
EG 2LL	0,60	1,05	2,94	0,05		0,00	3,73	0,13	1,23				
90° 15m 3m IV													
EG	0,11	0,19	0,74	0,01	0,88	0,06		0,00	0,27				
EG 0.5LL	0,23	0,40	1,14	0,02	1,68	0,12		0,00	0,54				
EG 1LL	0,35	0,61	1,55	0,03	2,49	0,17		0,00	0,82				
EG 1.5LL	0,47	0,82	1,95	0,03	3,29	0,23		0,00	1,09				
EG 2LL	0,60	1,05	2,36	0,04	4,10	0,29		0,00	1,38				

90° 7.5m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
90° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,02	0,04	2,68	0,05			0,42	0,01	0,10	52,60	0,12	0,04
EG 0.5LL	0,05	0,09	3,95	0,07			0,63	0,02	0,18	35,64	0,24	0,08
EG 1LL	0,07	0,12	5,22	0,09			0,89	0,03	0,25	26,94	0,36	0,12
EG 1.5LL	0,09	0,16	6,50	0,11			1,15	0,04	0,31	21,66	0,47	0,16
EG 2LL	0,12	0,21	7,77	0,14			1,40	0,05	0,40	18,11	0,56	0,19
90° 7.5m 1m II & III												
EG	0,01	0,02	4,83	0,08		0,00	3,39	0,00	0,22			
EG 0.5LL	0,03	0,05	7,18	0,13		0,00	5,01	0,00	0,35			
EG 1LL	0,05	0,09	9,53	0,17		0,00	6,63	0,00	0,49			
EG 1.5LL	0,06	0,11	11,89	0,21		0,00	8,24	0,00	0,60			
EG 2LL	0,08	0,14	14,24	0,25		0,00	9,86	0,00	0,73			
90° 7.5m 1m IV												
EG	0,03	0,00	2,36	0,00		0,00	0,28	0,00	0,10			
EG 0.5LL	0,05	0,00	3,50	0,00		0,00	0,49	0,00	0,17			
EG 1LL	0,08	0,00	4,64	0,00		0,00	0,70	0,00	0,25			
EG 1.5LL	0,10	0,00	5,79	0,00		0,00	0,91	0,00	0,31			
EG 2LL	0,13	0,00	6,93	0,00		0,00	1,12	0,00	0,39			
90° 7.5m 1m IV												
EG	0,03	0,00	2,20	0,00	0,30	0,00		0,00	0,11			
EG 0.5LL	0,05	0,00	3,25	0,00	0,51	0,00		0,00	0,18			
EG 1LL	0,08	0,00	4,30	0,00	0,73	0,00		0,00	0,27			
EG 1.5LL	0,10	0,00	5,35	0,00	0,94	0,00		0,00	0,33			
EG 2LL	0,13	0,00	6,40	0,00	1,16	0,00		0,00	0,42			
90° 7.5m 2m I & III												
EG	0,11	0,19	1,11	0,02			0,65	0,02	0,24	31,12	0,42	0,14
EG 0.5LL	0,22	0,39	1,64	0,03			1,16	0,04	0,46	20,88	0,77	0,27
EG 1LL	0,32	0,56	2,17	0,04			1,69	0,06	0,66	15,71	1,16	0,40
EG 1.5LL	0,43	0,75	2,71	0,05			2,21	0,08	0,88	12,59	1,54	0,53
EG 2LL	0,53	0,93	3,24	0,06			2,72	0,10	1,08	10,51	1,90	0,65
90° 7.5m 2m II & III												
EG	0,05	0,09	3,57	0,06		0,00	3,82	0,13	0,28			
EG 0.5LL	0,11	0,19	5,19	0,09		0,00	5,30	0,19	0,47			
EG 1LL	0,18	0,32	6,81	0,12		0,00	6,77	0,24	0,67			
EG 1.5LL	0,24	0,42	8,43	0,15		0,00	8,25	0,29	0,86			
EG 2LL	0,30	0,53	10,05	0,18		0,00	9,73	0,34	1,04			
90° 7.5m 2m IV												
EG	0,13	0,00	0,59	0,00		0,00	0,60	0,00	0,26			
EG 0.5LL	0,26	0,00	0,87	0,00		0,00	1,08	0,00	0,51			
EG 1LL	0,38	0,00	1,16	0,00		0,00	1,57	0,00	0,74			
EG 1.5LL	0,50	0,00	1,45	0,00		0,00	2,05	0,00	0,97			
EG 2LL	0,63	0,00	1,74	0,00		0,00	2,53	0,00	1,22			

90° 7.5m 2m IV

EG	0,13	0,00	0,69	0,00	0,61	0,00		0,00	0,28				
EG 0.5LL	0,25	0,00	1,01	0,00	1,10	0,00		0,00	0,53				
EG 1LL	0,38	0,00	1,34	0,00	1,59	0,00		0,00	0,80				
EG 1.5LL	0,50	0,00	1,67	0,00	2,08	0,00		0,00	1,05				
EG 2LL	0,62	0,00	2,00	0,00	2,57	0,00		0,00	1,30				

90° 7.5m 3m I & III

EG	0,27	0,47	0,59	0,01			0,92	0,03	0,52	20,92	0,83	0,29	
EG 0.5LL	0,53	0,93	0,88	0,02			1,67	0,06	1,00	11,91	1,60	0,55	
EG 1LL	0,79	1,39	1,17	0,02			2,43	0,09	1,49	8,27	2,37	0,82	
EG 1.5LL	1,05	1,84	1,45	0,03			3,18	0,11	1,98	6,33	3,14	1,08	
EG 2LL	1,31	2,30	1,74	0,03			3,94	0,14	2,47	5,13	3,91	1,35	

90° 7.5m 3m II & III

EG	0,10	0,18	3,68	0,06		0,00	5,12	0,18	0,42				
EG 0.5LL	0,23	0,40	5,18	0,09		0,00	6,87	0,24	0,73				
EG 1LL	0,36	0,63	6,69	0,12		0,00	8,61	0,30	1,05				
EG 1.5LL	0,48	0,84	8,20	0,14		0,00	10,36	0,36	1,35				
EG 2LL	0,61	1,07	9,70	0,17		0,00	12,10	0,42	1,66				

90° 7.5m 3m IV

EG	0,32	0,00	0,31	0,00		0,00	0,89	0,00	0,60				
EG 0.5LL	0,62	0,00	0,46	0,00		0,00	1,65	0,00	1,15				
EG 1LL	0,92	0,00	0,61	0,00		0,00	2,40	0,00	1,71				
EG 1.5LL	1,22	0,00	0,76	0,00		0,00	3,15	0,00	2,26				
EG 2LL	1,52	0,00	0,90	0,00		0,00	3,90	0,00	2,82				

90° 7.5m 3m IV

EG	0,32	0,00	0,23	0,00	0,93	0,00		0,00	0,63				
EG 0.5LL	0,62	0,00	0,34	0,00	1,71	0,00		0,00	1,21				
EG 1LL	0,92	0,00	0,45	0,00	2,48	0,00		0,00	1,80				
EG 1.5LL	1,22	0,00	0,56	0,00	3,26	0,00		0,00	2,38				
EG 2LL	1,52	0,00	0,67	0,00	4,03	0,00		0,00	2,96				

90° 7.5m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
90° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	2,33	0,04			0,38	0,01	0,05	418,84	0,14	0,05
EG 0.5LL	0,00	0,00	3,61	0,06			0,66	0,02	0,09	270,22	0,22	0,08
EG 1LL	0,00	0,00	4,89	0,09			0,85	0,03	0,12	199,44	0,29	0,10
EG 1.5LL	0,00	0,00	6,16	0,11			1,24	0,04	0,15	158,05	0,37	0,13
EG 2LL	0,00	0,00	7,44	0,13			1,52	0,05	0,18	130,89	0,45	0,16
90° 7.5m 1m II & III												
EG	0,01	0,02	3,85	0,07		0,00	2,05	0,07	0,16			
EG 0.5LL	0,02	0,04	6,02	0,11		0,00	3,21	0,11	0,25			
EG 1LL	0,02	0,04	8,19	0,14		0,00	4,37	0,15	0,33			
EG 1.5LL	0,03	0,05	10,36	0,18		0,00	5,53	0,19	0,43			
EG 2LL	0,03	0,05	12,53	0,22		0,00	6,69	0,23	0,51			
90° 7.5m 1m IV												
EG	0,00	0,00	1,87	0,03		0,00	0,25	0,01	0,04			
EG 0.5LL	0,01	0,02	2,91	0,05		0,00	0,46	0,02	0,08			
EG 1LL	0,02	0,04	3,95	0,07		0,00	0,67	0,02	0,13			
EG 1.5LL	0,02	0,04	4,99	0,09		0,00	0,88	0,03	0,15			
EG 2LL	0,03	0,05	6,04	0,11		0,00	1,10	0,04	0,20			
90° 7.5m 1m IV												
EG	0,00	0,00	1,76	0,03	0,26	0,02		0,00	0,05			
EG 0.5LL	0,01	0,02	2,73	0,05	0,47	0,03		0,00	0,10			
EG 1LL	0,02	0,04	3,70	0,06	0,69	0,05		0,00	0,15			
EG 1.5LL	0,02	0,04	4,67	0,08	0,90	0,06		0,00	0,18			
EG 2LL	0,03	0,05	5,64	0,10	1,12	0,08		0,00	0,23			
90° 7.5m 2m I & III												
EG	0,01	0,02	0,95	0,02			0,57	0,02	0,05	290,24	0,17	0,06
EG 0.5LL	0,04	0,07	1,47	0,03			1,07	0,04	0,13	185,59	0,35	0,12
EG 1LL	0,06	0,11	2,00	0,04			1,58	0,06	0,20	136,38	0,54	0,19
EG 1.5LL	0,09	0,16	2,53	0,04			2,08	0,07	0,27	107,79	0,72	0,25
EG 2LL	0,11	0,19	3,05	0,05			2,58	0,09	0,34	89,11	0,91	0,31
90° 7.5m 2m II & III												
EG	0,03	0,05	2,40	0,04		0,00	2,05	0,07	0,17			
EG 0.5LL	0,03	0,05	3,64	0,06		0,00	2,87	0,10	0,22			
EG 1LL	0,03	0,05	4,87	0,09		0,00	3,69	0,13	0,27			
EG 1.5LL	0,03	0,05	6,11	0,11		0,00	4,50	0,16	0,32			
EG 2LL	0,03	0,05	7,35	0,13		0,00	5,32	0,19	0,37			
90° 7.5m 2m IV												
EG	0,04	0,07	0,50	0,01		0,00	0,53	0,02	0,10			
EG 0.5LL	0,08	0,14	0,78	0,01		0,00	1,01	0,04	0,19			
EG 1LL	0,12	0,21	1,06	0,02		0,00	1,50	0,05	0,28			
EG 1.5LL	0,16	0,28	1,34	0,02		0,00	1,99	0,07	0,37			
EG 2LL	0,20	0,35	1,62	0,03		0,00	2,48	0,09	0,47			

90° 7.5m 2m IV

EG	0,04	0,07	0,45	0,01	0,53	0,04		0,00	0,12				
EG 0.5LL	0,08	0,14	0,70	0,01	1,02	0,07		0,00	0,22				
EG 1LL	0,12	0,21	0,95	0,02	1,51	0,11		0,00	0,33				
EG 1.5LL	0,16	0,28	1,20	0,02	1,99	0,14		0,00	0,44				
EG 2LL	0,20	0,35	1,44	0,03	2,48	0,17		0,00	0,55				

90° 7.5m 3m I & III

EG	0,07	0,12	0,48	0,01			0,78	0,03	0,16	188,35		0,34	0,12
EG 0.5LL	0,16	0,28	0,76	0,01			1,51	0,05	0,35	99,20		0,71	0,24
EG 1LL	0,26	0,46	1,03	0,02			2,25	0,08	0,55	67,11		1,08	0,37
EG 1.5LL	0,35	0,61	1,31	0,02			2,98	0,10	0,74	50,68		1,45	0,50
EG 2LL	0,44	0,77	1,58	0,03			3,71	0,13	0,93	40,70		1,82	0,63

90° 7.5m 3m II & III

EG	0,02	0,04	2,11	0,04		0,00	2,59	0,09	0,16				
EG 0.5LL	0,00	0,00	3,02	0,05		0,00	3,33	0,12	0,17				
EG 1LL	0,02	0,04	3,92	0,07		0,00	4,07	0,14	0,25				
EG 1.5LL	0,04	0,07	4,83	0,08		0,00	4,81	0,17	0,32				
EG 2LL	0,07	0,12	5,74	0,10		0,00	5,55	0,19	0,42				

90° 7.5m 3m IV

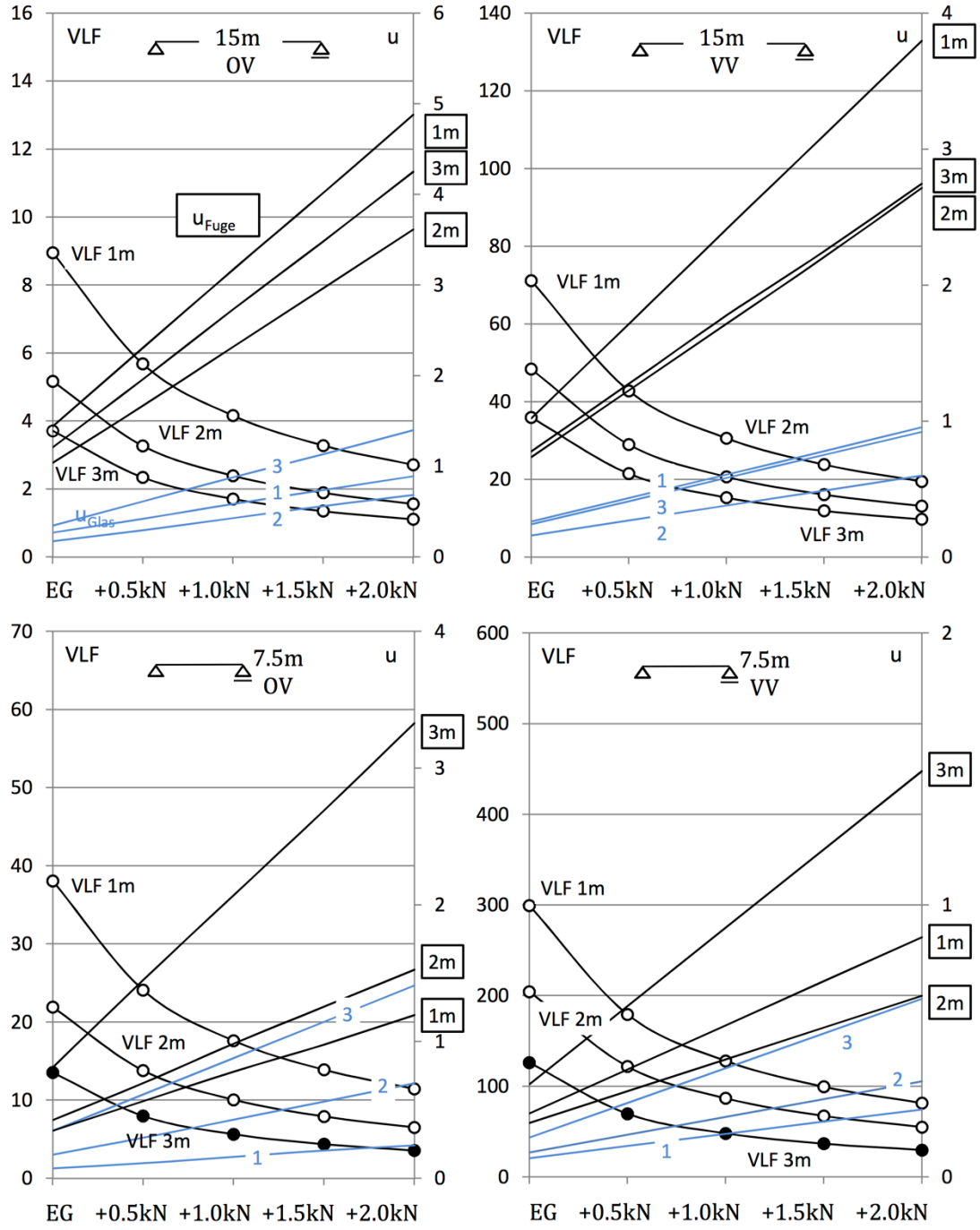
EG	0,10	0,18	0,27	0,00		0,00	0,81	0,03	0,21				
EG 0.5LL	0,21	0,37	0,42	0,01		0,00	1,59	0,06	0,43				
EG 1LL	0,32	0,56	0,57	0,01		0,00	2,36	0,08	0,65				
EG 1.5LL	0,44	0,77	0,72	0,01		0,00	3,14	0,11	0,89				
EG 2LL	0,55	0,96	0,87	0,02		0,00	3,91	0,14	1,12				

90° 7.5m 3m IV

EG	0,10	0,18	0,24	0,00	0,78	0,05		0,00	0,23				
EG 0.5LL	0,21	0,37	0,37	0,01	1,54	0,11		0,00	0,48				
EG 1LL	0,32	0,56	0,50	0,01	2,29	0,16		0,00	0,73				
EG 1.5LL	0,44	0,77	0,63	0,01	3,05	0,21		0,00	1,00				
EG 2LL	0,55	0,96	0,77	0,01	3,80	0,27		0,00	1,24				

E3. Faltwerk 120°

E III Gegenüberstellung von Anbindungs- und Glasausnutzung mit den Verzweigungslastfaktoren für die Faltung 120° und drei Elementbreiten



120° 15m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
120° 15m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,03	0,05	9,04	0,16			0,66	0,02	0,23	8,95	0,78	0,27
EG 0.5LL	0,06	0,11	14,30	0,25			1,11	0,04	0,39	5,68	1,22	0,42
EG 1LL	0,08	0,14	19,55	0,34			1,57	0,05	0,54	4,16	1,70	0,59
EG 1.5LL	0,11	0,19	24,81	0,43			2,02	0,07	0,70	3,28	2,14	0,74
EG 2LL	0,13	0,23	30,07	0,53			2,48	0,09	0,84	2,71	2,58	0,89
120° 15m 1m II & III												
EG	0,04	0,07	23,80	0,42		0,00	27,33	0,96	1,44			
EG 0.5LL	0,07	0,12	37,86	0,66		0,00	43,47	1,52	2,31			
EG 1LL	0,10	0,18	51,93	0,91		0,00	59,60	2,09	3,17			
EG 1.5LL	0,12	0,21	65,99	1,15		0,00	75,74	2,65	4,02			
EG 2LL	0,15	0,26	80,05	1,40		0,00	91,88	3,22	4,88			
120° 15m 1m IV												
EG	0,03	0,05	8,66	0,15		0,00	1,16	0,04	0,24			
EG 0.5LL	0,05	0,09	13,66	0,24		0,00	1,92	0,07	0,39			
EG 1LL	0,08	0,14	18,67	0,33		0,00	2,68	0,09	0,56			
EG 1.5LL	0,10	0,18	23,67	0,41		0,00	3,44	0,12	0,71			
EG 2LL	0,13	0,23	28,67	0,50		0,00	4,20	0,15	0,88			
120° 15m 1m IV												
EG	0,04	0,07	23,80	0,42		0,00	27,33	0,96	1,44			
EG 0.5LL	0,07	0,12	37,86	0,66		0,00	43,47	1,52	2,31			
EG 1LL	0,10	0,18	51,93	0,91		0,00	59,60	2,09	3,17			
EG 1.5LL	0,12	0,21	65,99	1,15		0,00	75,74	2,65	4,02			
EG 2LL	0,15	0,26	80,05	1,40		0,00	91,88	3,22	4,88			
120° 15m 2m I & III												
EG	0,15	0,26	4,05	0,07			1,25	0,04	0,38	5,17	0,50	0,17
EG 0.5LL	0,27	0,47	6,41	0,11			2,16	0,08	0,66	3,27	0,86	0,30
EG 1LL	0,38	0,67	8,77	0,15			3,05	0,11	0,93	2,39	1,25	0,43
EG 1.5LL	0,50	0,88	11,13	0,19			3,97	0,14	1,21	1,89	1,63	0,56
EG 2LL	0,61	1,07	13,49	0,24			4,86	0,17	1,48	1,56	1,99	0,68
120° 15m 2m II & III												
EG	0,05	0,09	16,29	0,29		0,00	19,01	0,67	1,04			
EG 0.5LL	0,09	0,16	26,05	0,46		0,00	30,15	1,06	1,67			
EG 1LL	0,14	0,25	35,80	0,63		0,00	41,30	1,45	2,32			
EG 1.5LL	0,19	0,33	45,55	0,80		0,00	52,44	1,84	2,97			
EG 2LL	0,24	0,42	55,30	0,97		0,00	63,58	2,23	3,61			
120° 15m 2m IV												
EG	0,16	0,28	3,48	0,06		0,00	1,15	0,04	0,38			
EG 0.5LL	0,28	0,49	5,52	0,10		0,00	1,99	0,07	0,66			
EG 1LL	0,41	0,72	7,56	0,13		0,00	2,83	0,10	0,95			
EG 1.5LL	0,53	0,93	9,61	0,17		0,00	3,66	0,13	1,23			
EG 2LL	0,66	1,16	11,65	0,20		0,00	4,50	0,16	1,52			

120° 15m 2m IV												
EG	0,16	0,28	3,13	0,05	1,16	0,08		0,00	0,42			
EG 0.5LL	0,28	0,49	4,95	0,09	2,01	0,14		0,00	0,72			
EG 1LL	0,41	0,72	6,77	0,12	2,85	0,20		0,00	1,04			
EG 1.5LL	0,53	0,93	8,59	0,15	3,70	0,26		0,00	1,34			
EG 2LL	0,66	1,16	10,40	0,18	4,54	0,32		0,00	1,66			
120° 15m 3m I & III												
EG	0,36	0,63	2,49	0,04			1,82	0,06	0,74	3,71	1,01	0,35
EG 0.5LL	0,64	1,12	3,94	0,07			3,16	0,11	1,30	2,34	1,78	0,61
EG 1LL	0,92	1,61	5,40	0,09			4,50	0,16	1,87	1,71	2,55	0,88
EG 1.5LL	1,20	2,11	6,85	0,12			5,85	0,20	2,43	1,35	3,29	1,13
EG 2LL	1,48	2,60	8,30	0,15			7,18	0,25	2,99	1,11	4,06	1,40
120° 15m 3m II & III												
EG	0,10	0,18	15,61	0,27		0,00	21,75	0,76	1,21			
EG 0.5LL	0,19	0,33	24,76	0,43		0,00	34,14	1,19	1,96			
EG 1LL	0,29	0,51	33,91	0,59		0,00	46,53	1,63	2,73			
EG 1.5LL	0,38	0,67	43,05	0,75		0,00	58,92	2,06	3,48			
EG 2LL	0,48	0,84	52,20	0,91		0,00	71,31	2,50	4,25			
120° 15m 3m IV												
EG	0,39	0,68	2,02	0,04		0,00	1,88	0,07	0,79			
EG 0.5LL	0,70	1,23	3,21	0,06		0,00	3,25	0,11	1,40			
EG 1LL	1,00	1,75	4,40	0,08		0,00	4,62	0,16	1,99			
EG 1.5LL	1,30	2,28	5,59	0,10		0,00	5,99	0,21	2,59			
EG 2LL	1,61	2,82	6,78	0,12		0,00	7,36	0,26	3,20			
120° 15m 3m IV												
EG	0,39	0,68	1,81	0,03	1,76	0,12		0,00	0,84			
EG 0.5LL	0,70	1,23	2,86	0,05	3,06	0,21		0,00	1,49			
EG 1LL	1,00	1,75	3,91	0,07	4,37	0,31		0,00	2,13			
EG 1.5LL	1,30	2,28	4,96	0,09	5,67	0,40		0,00	2,76			
EG 2LL	1,61	2,82	6,02	0,11	6,97	0,49		0,00	3,42			

120° 15m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
120° 15m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	7,85	0,14			0,64	0,02	0,16	71,16	0,76	0,26
EG 0.5LL	0,00	0,00	13,12	0,23			1,15	0,04	0,27	42,80	1,26	0,43
EG 1LL	0,00	0,00	18,38	0,32			1,65	0,06	0,38	30,59	1,76	0,61
EG 1.5LL	0,00	0,00	23,64	0,41			2,15	0,08	0,49	23,80	2,26	0,78
EG 2LL	0,00	0,00	28,91	0,51			2,66	0,09	0,60	19,47	2,77	0,96
120° 15m 1m II & III												
EG	0,02	0,04	19,01	0,33		0,00	18,66	0,65	1,02			
EG 0.5LL	0,03	0,05	32,00	0,56		0,00	31,49	1,10	1,71			
EG 1LL	0,04	0,07	44,99	0,79		0,00	44,42	1,55	2,41			
EG 1.5LL	0,05	0,09	57,98	1,01		0,00	57,15	2,00	3,10			
EG 2LL	0,06	0,11	70,97	1,24		0,00	69,98	2,45	3,80			
120° 15m 1m IV												
EG	0,03	0,05	3,59	0,06		0,00	0,83	0,03	0,14			
EG 0.5LL	0,06	0,11	5,98	0,10		0,00	1,43	0,05	0,26			
EG 1LL	0,08	0,14	8,36	0,15		0,00	2,03	0,07	0,36			
EG 1.5LL	0,10	0,18	10,74	0,19		0,00	2,63	0,09	0,46			
EG 2LL	0,12	0,21	13,13	0,23		0,00	3,23	0,11	0,55			
120° 15m 1m IV												
EG	0,02	0,04	19,01	0,33		0,00	18,66	0,65	1,02			
EG 0.5LL	0,03	0,05	32,00	0,56		0,00	31,49	1,10	1,71			
EG 1LL	0,04	0,07	44,99	0,79		0,00	44,42	1,55	2,41			
EG 1.5LL	0,05	0,09	57,98	1,01		0,00	57,15	2,00	3,10			
EG 2LL	0,06	0,11	70,97	1,24		0,00	69,98	2,45	3,80			
120° 15m 2m I & III												
EG	0,02	0,04	3,46	0,06			1,11	0,04	0,13	48,37		
EG 0.5LL	0,05	0,09	5,79	0,10			2,03	0,07	0,26	28,96		
EG 1LL	0,08	0,14	8,12	0,14			2,95	0,10	0,39	20,67		
EG 1.5LL	0,10	0,18	10,45	0,18			3,87	0,14	0,49	16,07		
EG 2LL	0,13	0,23	12,78	0,22			4,78	0,17	0,62	13,14		
120° 15m 2m II & III												
EG	0,07	0,12	11,55	0,20		0,00	11,72	0,41	0,74		0,46	0,16
EG 0.5LL	0,11	0,19	19,58	0,34		0,00	19,72	0,69	1,23		0,78	0,27
EG 1LL	0,15	0,26	27,61	0,48		0,00	27,71	0,97	1,72		1,10	0,38
EG 1.5LL	0,19	0,33	35,64	0,62		0,00	35,70	1,25	2,21		1,42	0,49
EG 2LL	0,24	0,42	43,67	0,76		0,00	43,70	1,53	2,71		1,74	0,60
120° 15m 2m IV												
EG	0,11	0,19	2,43	0,04	1,43	0,10		0,00	0,34			
EG 0.5LL	0,18	0,32	4,05	0,07	2,29	0,16		0,00	0,55			
EG 1LL	0,25	0,44	5,68	0,10	3,14	0,22		0,00	0,76			
EG 1.5LL	0,32	0,56	7,31	0,13	4,00	0,28		0,00	0,97			
EG 2LL	0,39	0,68	8,94	0,16	4,86	0,34		0,00	1,18			

120° 15m 2m IV												
EG	0,07	0,12	11,55	0,20		0,00	11,72	0,41	0,74			
EG 0.5LL	0,11	0,19	19,58	0,34		0,00	19,72	0,69	1,23			
EG 1LL	0,15	0,26	27,61	0,48		0,00	27,71	0,97	1,72			
EG 1.5LL	0,19	0,33	35,64	0,62		0,00	35,70	1,25	2,21			
EG 2LL	0,24	0,42	43,67	0,76		0,00	43,70	1,53	2,71			
120° 15m 3m I & III												
EG	0,08	0,14	2,04	0,04			1,60	0,06	0,23	35,93		
EG 0.5LL	0,17	0,30	3,42	0,06			2,93	0,10	0,46	21,47		
EG 1LL	0,25	0,44	4,80	0,08			4,27	0,15	0,67	15,31		
EG 1.5LL	0,33	0,58	6,17	0,11			5,61	0,20	0,88	11,90		
EG 2LL	0,41	0,72	7,55	0,13			6,95	0,24	1,09	9,73		
120° 15m 3m II & III												
EG	0,09	0,16	10,01	0,18		0,00	12,71	0,44	0,78			
EG 0.5LL	0,14	0,25	16,78	0,29		0,00	21,00	0,74	1,27			
EG 1LL	0,18	0,32	23,55	0,41		0,00	29,99	1,05	1,78			
EG 1.5LL	0,23	0,40	30,33	0,53		0,00	37,58	1,32	2,25			
EG 2LL	0,28	0,49	37,10	0,65		0,00	45,86	1,61	2,75			
120° 15m 3m IV												
EG	0,14	0,25	1,01	0,02		0,00	1,50	0,05	0,32		0,7	0,24
EG 0.5LL	0,26	0,46	1,70	0,03		0,00	2,78	0,10	0,58		1,19	0,41
EG 1LL	0,38	0,67	2,40	0,04		0,00	4,07	0,14	0,85		1,69	0,58
EG 1.5LL	0,50	0,88	3,09	0,05		0,00	5,05	0,18	1,11		2,18	0,75
EG 2LL	0,63	1,11	3,78	0,07		0,00	6,63	0,23	1,40		2,67	0,92
120° 15m 3m IV												
EG	0,14	0,25	0,78	0,01	1,50	0,11		0,00	0,36			
EG 0.5LL	0,26	0,46	1,30	0,02	2,78	0,19		0,00	0,67			
EG 1LL	0,38	0,67	1,83	0,03	4,07	0,28		0,00	0,98			
EG 1.5LL	0,50	0,88	2,35	0,04	5,35	0,37		0,00	1,29			
EG 2LL	0,63	1,11	2,87	0,05	6,63	0,46		0,00	1,62			

120° 7.5m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
120° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,03	0,05	3,79	0,07			0,65	0,02	0,14	38,08	0,21	0,07
EG 0.5LL	0,05	0,09	5,99	0,10			1,09	0,04	0,23	24,10	0,32	0,11
EG 1LL	0,08	0,14	8,19	0,14			1,55	0,05	0,34	17,63	0,46	0,16
EG 1.5LL	0,10	0,18	10,39	0,18			2,00	0,07	0,43	13,90	0,59	0,20
EG 2LL	0,12	0,21	12,59	0,22			2,44	0,09	0,52	11,47	0,70	0,24
120° 7.5m 1m II & III												
EG	0,02	0,04	6,31	0,11		0,00	5,79	0,20	0,35			
EG 0.5LL	0,04	0,07	10,00	0,18		0,00	9,11	0,32	0,56			
EG 1LL	0,06	0,11	13,69	0,24		0,00	12,43	0,44	0,78			
EG 1.5LL	0,07	0,12	17,39	0,30		0,00	15,75	0,55	0,98			
EG 2LL	0,09	0,16	21,08	0,37		0,00	19,07	0,67	1,19			
120° 7.5m 1m IV												
EG	0,03	0,05	3,73	0,07		0,00	0,58	0,02	0,14			
EG 0.5LL	0,06	0,11	5,89	0,10		0,00	0,98	0,03	0,24			
EG 1LL	0,08	0,14	8,06	0,14		0,00	1,39	0,05	0,33			
EG 1.5LL	0,10	0,18	10,22	0,18		0,00	1,79	0,06	0,42			
EG 2LL	0,13	0,23	12,39	0,22		0,00	2,20	0,08	0,52			
120° 7.5m 1m IV												
EG	0,03	0,05	3,51	0,06	0,50	0,04		0,00	0,15			
EG 0.5LL	0,06	0,11	5,55	0,10	0,85	0,06		0,00	0,26			
EG 1LL	0,08	0,14	7,60	0,13	1,21	0,08		0,00	0,36			
EG 1.5LL	0,10	0,18	9,64	0,17	1,56	0,11		0,00	0,45			
EG 2LL	0,13	0,23	11,68	0,20	1,91	0,13		0,00	0,57			
120° 7.5m 2m I & III												
EG	0,14	0,25	1,58	0,03			1,23	0,04	0,32	21,92	0,50	0,17
EG 0.5LL	0,24	0,42	2,50	0,04			2,11	0,07	0,54	13,80	0,86	0,30
EG 1LL	0,35	0,61	3,42	0,06			3,00	0,11	0,78	10,07	1,25	0,43
EG 1.5LL	0,45	0,79	4,34	0,08			3,93	0,14	1,00	7,92	1,63	0,56
EG 2LL	0,56	0,98	5,26	0,09			4,82	0,17	1,24	6,53	2,02	0,70
120° 7.5m 2m II & III												
EG	0,07	0,12	5,52	0,10		0,00	5,90	0,21	0,43			
EG 0.5LL	0,13	0,23	8,65	0,15		0,00	9,06	0,32	0,70			
EG 1LL	0,20	0,35	11,79	0,21		0,00	12,22	0,43	0,98			
EG 1.5LL	0,26	0,46	14,92	0,26		0,00	15,38	0,54	1,26			
EG 2LL	0,32	0,56	18,05	0,32		0,00	18,53	0,65	1,53			
120° 7.5m 2m IV												
EG	0,15	0,26	1,56	0,03		0,00	1,21	0,04	0,33			
EG 0.5LL	0,26	0,46	2,47	0,04		0,00	2,09	0,07	0,57			
EG 1LL	0,37	0,65	3,38	0,06		0,00	2,97	0,10	0,81			
EG 1.5LL	0,48	0,84	4,29	0,08		0,00	3,85	0,13	1,05			
EG 2LL	0,59	1,04	5,20	0,09		0,00	4,73	0,17	1,29			

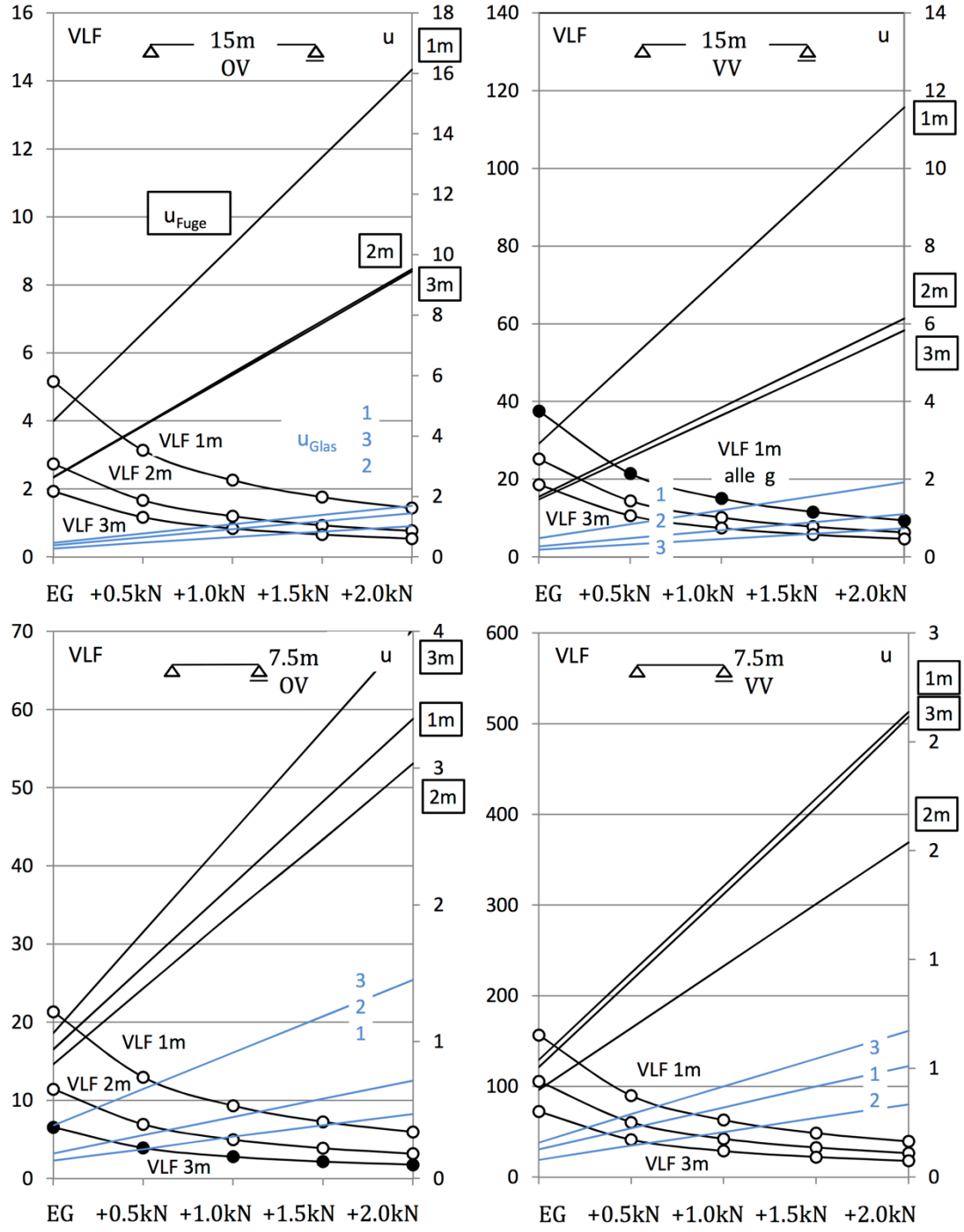
120° 7.5m 2m IV													
EG	0,16	0,28	1,08	0,02	1,18	0,08		0,00	0,38				
EG 0.5LL	0,28	0,49	1,71	0,03	2,03	0,14		0,00	0,66				
EG 1LL	0,40	0,70	2,33	0,04	2,89	0,20		0,00	0,94				
EG 1.5LL	0,52	0,91	2,96	0,05	3,74	0,26		0,00	1,23				
EG 2LL	0,64	1,12	3,59	0,06	4,60	0,32		0,00	1,51				
120° 7.5m 3m I & III													
EG	0,33	0,58	0,85	0,01			1,79	0,06	0,66	13,54	1,01	0,35	
EG 0.5LL	0,59	1,04	1,34	0,02			3,10	0,11	1,17	7,98	1,78	0,61	
EG 1LL	0,85	1,49	1,84	0,03			4,42	0,15	1,68	5,65	2,55	0,88	
EG 1.5LL	1,11	1,95	2,34	0,04			5,73	0,20	2,19	4,37	3,32	1,15	
EG 2LL	1,37	2,40	2,83	0,05			7,05	0,25	2,70	3,57	4,09	1,41	
120° 7.5m 3m I& III													
EG	0,15	0,26	5,80	0,10		0,00	7,82	0,27	0,64				
EG 0.5LL	0,27	0,47	8,99	0,16		0,00	11,87	0,42	1,05				
EG 1LL	0,39	0,68	12,17	0,21		0,00	15,91	0,56	1,45				
EG 1.5LL	0,51	0,89	15,36	0,27		0,00	19,96	0,70	1,86				
EG 2LL	0,63	1,11	18,54	0,32		0,00	24,00	0,84	2,27				
120° 7.5m 3m IV													
EG	0,40	0,70	0,25	0,00		0,00	1,75	0,06	0,77				
EG 0.5LL	0,70	1,23	0,41	0,01		0,00	3,06	0,11	1,34				
EG 1LL	1,00	1,75	0,56	0,01		0,00	4,36	0,15	1,92				
EG 1.5LL	1,31	2,30	0,71	0,01		0,00	5,66	0,20	2,51				
EG 2LL	1,61	2,82	0,86	0,02		0,00	6,96	0,24	3,08				
120° 7.5m 3m IV													
EG	0,39	0,68	0,26	0,00	1,76	0,12		0,00	0,81				
EG 0.5LL	0,70	1,23	0,40	0,01	3,07	0,21		0,00	1,45				
EG 1LL	1,00	1,75	0,55	0,01	4,38	0,31		0,00	2,07				
EG 1.5LL	1,30	2,28	0,70	0,01	5,69	0,40		0,00	2,69				
EG 2LL	1,61	2,82	0,85	0,01	6,99	0,49		0,00	3,33				

120° 7.5m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
120° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	3,31	0,06			0,66	0,02	0,08	299,52	0,20	0,07
EG 0.5LL	0,01	0,02	5,52	0,10			1,17	0,04	0,16	179,44	0,33	0,11
EG 1LL	0,01	0,02	7,73	0,14			1,68	0,06	0,21	128,09	0,46	0,16
EG 1.5LL	0,01	0,02	9,95	0,17			2,19	0,08	0,27	99,59	0,59	0,20
EG 2LL	0,01	0,02	12,16	0,21			2,71	0,09	0,33	81,47	0,72	0,25
120° 7.5m 1m II & III												
EG	0,01	0,02	5,71	0,10		0,00	3,32		0,23			
EG 0.5LL	0,02	0,04	9,54	0,17		0,00	5,53		0,40			
EG 1LL	0,03	0,05	13,38	0,23		0,00	7,74		0,56			
EG 1.5LL	0,04	0,07	17,22	0,30		0,00	9,95		0,72			
EG 2LL	0,05	0,09	21,05	0,37		0,00	12,16		0,88			
120° 7.5m 1m IV												
EG	0,02	0,04	2,60	0,05		0,00	0,41	0,01	0,09			
EG 0.5LL	0,04	0,07	4,34	0,08		0,00	0,74	0,03	0,17			
EG 1LL	0,05	0,09	6,07	0,11		0,00	1,06	0,04	0,23			
EG 1.5LL	0,07	0,12	7,80	0,14		0,00	1,38	0,05	0,31			
EG 2LL	0,08	0,14	9,53	0,17		0,00	1,71	0,06	0,37			
120° 7.5m 1m IV												
EG	0,01	0,02	5,71	0,10		0,00	3,32		0,23			
EG 0.5LL	0,02	0,04	9,54	0,17		0,00	5,53		0,40			
EG 1LL	0,03	0,05	13,38	0,23		0,00	7,74		0,56			
EG 1.5LL	0,04	0,07	17,22	0,30		0,00	9,95		0,72			
EG 2LL	0,05	0,09	21,05	0,37		0,00	12,16		0,88			
120° 7.5m 2m I & III												
EG	0,02	0,04	1,35	0,02			1,08	0,04	0,10	204,48		
EG 0.5LL	0,04	0,07	2,26	0,04			1,96	0,07	0,18	121,88		
EG 1LL	0,07	0,12	3,16	0,06			2,85	0,10	0,28	86,80		
EG 1.5LL	0,09	0,16	4,07	0,07			3,73	0,13	0,36	67,40		
EG 2LL	0,11	0,19	4,97	0,09			4,62	0,16	0,44	55,09		
120° 7.5m 2m II & III												
EG	0,02	0,04	3,02	0,05		0,00	3,16	0,11	0,20		0,26	0,09
EG 0.5LL	0,03	0,05	4,99	0,09		0,00	5,01	0,18	0,32		0,45	0,16
EG 1LL	0,04	0,07	6,96	0,12		0,00	6,87	0,24	0,43		0,64	0,22
EG 1.5LL	0,05	0,09	8,93	0,16		0,00	8,72	0,31	0,55		0,83	0,29
EG 2LL	0,06	0,11	10,90	0,19		0,00	10,57	0,37	0,67		1,02	0,35
120° 7.5m 2m IV												
EG	0,04	0,07	0,54	0,01		0,00	1,00	0,04	0,11			
EG 0.5LL	0,09	0,16	0,91	0,02		0,00	1,85	0,06	0,24			
EG 1LL	0,13	0,23	1,28	0,02		0,00	2,69	0,09	0,34			
EG 1.5LL	0,17	0,30	1,65	0,03		0,00	3,53	0,12	0,45			
EG 2LL	0,21	0,37	2,02	0,04		0,00	4,37	0,15	0,56			

120° 7.5m 2m IV												
EG	0,04	0,07	0,42	0,01	1,00	0,07			0,15			
EG 0.5LL	0,09	0,16	0,71	0,01	1,85	0,13			0,30			
EG 1LL	0,13	0,23	0,99	0,02	2,69	0,19			0,43			
EG 1.5LL	0,17	0,30	1,28	0,02	3,53	0,25			0,57			
EG 2LL	0,21	0,37	1,56	0,03	4,37	0,31			0,70			
120° 7.5m 3m I & III												
EG	0,10	0,18	0,70	0,01			1,52	0,05	0,24	126,12	0,42	0,14
EG 0.5LL	0,19	0,33	1,17	0,02			2,80	0,10	0,45	69,70	0,79	0,27
EG 1LL	0,28	0,49	1,64	0,03			4,09	0,14	0,66	48,13	1,16	0,40
EG 1.5LL	0,37	0,65	2,11	0,04			5,37	0,19	0,87	36,75	1,53	0,53
EG 2LL	0,47	0,82	2,58	0,05			6,65	0,23	1,10	29,73	1,90	0,66
120° 7.5m 3m II & III												
EG	0,01	0,02	2,61	0,05		0,00	3,92		0,20			
EG 0.5LL	0,00	0,00	4,21	0,07		0,00	6,02		0,28			
EG 1LL	0,01	0,02	5,81	0,10		0,00	8,13		0,40			
EG 1.5LL	0,01	0,02	7,41	0,13		0,00	10,23		0,51			
EG 2LL	0,02	0,04	9,01	0,16		0,00	12,34		0,62			
120° 7.5m 3m IV												
EG	0,13	0,23	0,36	0,01		0,00	1,54	0,05	0,29			
EG 0.5LL	0,24	0,42	0,61	0,01		0,00	2,85	0,10	0,53			
EG 1LL	0,35	0,61	0,85	0,01		0,00	4,16	0,15	0,77			
EG 1.5LL	0,46	0,81	1,10	0,02		0,00	5,47	0,19	1,02			
EG 2LL	0,57	1,00	1,34	0,02		0,00	6,77	0,24	1,26			
120° 7.5m 3m IV												
EG	0,13	0,23	0,26	0,00	1,54	0,11			0,34			
EG 0.5LL	0,24	0,42	0,44	0,01	2,85	0,20			0,63			
EG 1LL	0,35	0,61	0,61	0,01	4,17	0,29			0,92			
EG 1.5LL	0,46	0,81	0,79	0,01	5,48	0,38			1,20			
EG 2LL	0,57	1,00	0,97	0,02	6,79	0,48			1,49			

E4. Faltwerk 150°

E IV Gegenüberstellung von Anbindungs- und Glasausnutzung mit den Verzweigungslastfaktoren für die Faltung 150° und drei Elementbreiten



150° 15m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
150° 15m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,04	0,07	17,93	0,31			1,30	0,05	0,43	5,16	1,37	0,47
EG 0.5LL	0,06	0,11	29,48	0,52			2,25	0,08	0,70	3,14	2,26	0,78
EG 1LL	0,09	0,16	41,04	0,72			3,16	0,11	0,99	2,26	3,14	1,08
EG 1.5LL	0,11	0,19	52,60	0,92			4,32	0,15	1,26	1,76	4,03	1,39
EG 2LL	0,14	0,25	64,16	1,12			4,37	0,15	1,52	1,44	4,92	1,70
150° 15m 1m II & III												
EG	0,16	0,28	61,39	1,07		0,00	89,87	3,15	4,50			
EG 0.5LL	0,27	0,47	101,03	1,77		0,00	147,82	5,17	7,42			
EG 1LL	0,37	0,65	140,66	2,46		0,00	205,76	7,20	10,31			
EG 1.5LL	0,48	0,84	180,30	3,16		0,00	263,70	9,23	13,23			
EG 2LL	0,58	1,02	219,94	3,85		0,00	321,65	11,26	16,12			
150° 15m 1m IV												
EG	0,13	0,23	13,17	0,23		0,00	2,66	0,09	0,55			
EG 0.5LL	0,21	0,37	21,68	0,38		0,00	4,40	0,15	0,90			
EG 1LL	0,30	0,53	3,20	0,06		0,00	6,13	0,21	0,80			
EG 1.5LL	0,38	0,67	38,71	0,68		0,00	7,86	0,28	1,62			
EG 2LL	0,47	0,82	47,22	0,83		0,00	9,60	0,34	1,99			
150° 15m 1m IV												
EG	0,16	0,28	61,39	1,07		0,00	89,87	3,15	4,50			
EG 0.5LL	0,27	0,47	101,03	1,77		0,00	147,82	5,17	7,42			
EG 1LL	0,37	0,65	140,66	2,46		0,00	205,76	7,20	10,31			
EG 1.5LL	0,48	0,84	180,30	3,16		0,00	263,70	9,23	13,23			
EG 2LL	0,58	1,02	219,94	3,85		0,00	321,65	11,26	16,12			
150° 15m 2m I & III												
EG	0,17	0,30	7,95	0,14			2,89	0,10	0,54	2,74	0,82	0,28
EG 0.5LL	0,28	0,49	13,08	0,23			4,86	0,17	0,89	1,67	1,38	0,48
EG 1LL	0,39	0,68	18,21	0,32			6,80	0,24	1,24	1,20	1,91	0,66
EG 1.5LL	0,51	0,89	23,34	0,41			7,99	0,28	1,58	0,93	2,43	0,84
EG 2LL	0,62	1,09	28,47	0,50			10,76	0,38	1,96	0,77	2,96	1,02
150° 15m 2m II & III												
EG	0,12	0,21	39,15	0,69		0,00	50,09	1,75	2,65			
EG 0.5LL	0,20	0,35	64,51	1,13		0,00	82,39	2,88	4,36			
EG 1LL	0,29	0,51	89,88	1,57		0,00	114,69	4,01	6,10			
EG 1.5LL	0,37	0,65	115,24	2,02		0,00	146,98	5,14	7,81			
EG 2LL	0,45	0,79	140,60	2,46		0,00	179,28	6,27	9,52			
150° 15m 2m IV												
EG	0,18	0,32	7,59	0,13		0,00	2,70	0,09	0,54			
EG 0.5LL	0,30	0,53	12,50	0,22		0,00	4,54	0,16	0,90			
EG 1LL	0,42	0,74	17,40	0,30		0,00	6,38	0,22	1,26			
EG 1.5LL	0,54	0,95	22,31	0,39		0,00	8,22	0,29	1,63			
EG 2LL	0,66	1,16	27,21	0,48		0,00	10,06	0,35	1,99			

150° 15m 2m IV													
EG	0,18	0,32	6,42	0,11	2,71	0,19		0,00	0,62				
EG 0.5LL	0,30	0,53	10,56	0,18	4,56	0,32		0,00	1,03				
EG 1LL	0,42	0,74	14,70	0,26	6,41	0,45		0,00	1,44				
EG 1.5LL	0,54	0,95	18,84	0,33	8,26	0,58		0,00	1,86				
EG 2LL	0,66	1,16	22,98	0,40	10,11	0,71		0,00	2,27				
150° 15m 3m I & III													
EG	0,40	0,70	4,89	0,09			4,24	0,15	0,94	1,93	1,13	0,39	
EG 0.5LL	0,67	1,18	8,04	0,14			7,15	0,25	1,57	1,17	1,90	0,65	
EG 1LL	0,95	1,67	11,20	0,20			10,04	0,35	2,21	0,84	2,67	0,92	
EG 1.5LL	1,22	2,14	14,36	0,25			12,94	0,45	2,84	0,66	3,44	1,19	
EG 2LL	1,50	2,63	17,51	0,31			15,84	0,55	3,49	0,54	4,21	1,45	
150° 15m 3m II & III													
EG	0,16	0,28	34,85	0,61		0,00	49,62	1,74	2,63				
EG 0.5LL	0,27	0,47	57,35	1,00		0,00	81,47	2,85	4,33				
EG 1LL	0,38	0,67	79,86	1,40		0,00	113,32	3,97	6,03				
EG 1.5LL	0,49	0,86	102,36	1,79		0,00	145,17	5,08	7,73				
EG 2LL	0,61	1,07	124,87	2,19		0,00	177,02	6,20	9,45				
150° 15m 3m IV													
EG	0,44	0,77	4,36	0,08		0,00	4,10	0,14	0,99				
EG 0.5LL	0,74	1,30	7,19	0,13		0,00	6,90	0,24	1,67				
EG 1LL	1,04	1,82	10,01	0,18		0,00	9,71	0,34	2,34				
EG 1.5LL	1,35	2,37	12,83	0,22		0,00	12,52	0,44	3,03				
EG 2LL	1,65	2,89	15,65	0,27		0,00	15,32	0,54	3,70				
150° 15m 3m IV													
EG	0,44	0,77	3,33	0,06	4,36	0,31		0,00	1,14				
EG 0.5LL	0,74	1,30	5,48	0,10	7,34	0,51		0,00	1,91				
EG 1LL	1,04	1,82	7,63	0,13	10,31	0,72		0,00	2,68				
EG 1.5LL	1,35	2,37	9,78	0,17	13,29	0,93		0,00	3,47				
EG 2LL	1,65	2,89	11,93	0,21	16,27	1,14		0,00	4,24				

150° 15m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
150° 15m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,01	0,02	15,44	0,27			1,35	0,05	0,33	37,54	1,40	0,48
EG 0.5LL	0,01	0,02	26,93	0,47			2,39	0,08	0,57	21,49	2,45	0,84
EG 1LL	0,02	0,04	38,42	0,67			3,43	0,12	0,83	15,05	3,49	1,20
EG 1.5LL	0,02	0,04	49,90	0,87			4,48	0,16	1,07	11,58	4,54	1,57
EG 2LL	0,03	0,05	61,39	1,07			5,52	0,19	1,32	9,41	5,58	1,92
150° 15m 1m II & III												
EG	0,04	0,07	46,72	0,82		0,00	57,88	2,03	2,91			
EG 0.5LL	0,07	0,12	81,52	1,43		0,00	100,95	3,53	5,08			
EG 1LL	0,10	0,18	116,32	2,04		0,00	144,02	5,04	7,25			
EG 1.5LL	0,13	0,23	151,13	2,64		0,00	187,09	6,55	9,42			
EG 2LL	0,15	0,26	185,93	3,25		0,00	230,16	8,06	11,57			
150° 15m 1m IV												
EG	0,02	0,04	6,08	0,11		0,00	2,40	0,08	0,23			
EG 0.5LL	0,04	0,07	10,63	0,19		0,00	4,20	0,15	0,40			
EG 1LL	0,06	0,11	15,17	0,27		0,00	6,00	0,21	0,58			
EG 1.5LL	0,08	0,14	19,72	0,35		0,00	7,80	0,27	0,76			
EG 2LL	0,10	0,18	24,27	0,42		0,00	9,60	0,34	0,94			
150° 15m 1m IV												
EG	0,04	0,07	46,72	0,82		0,00	57,88	2,03	2,91			
EG 0.5LL	0,07	0,12	81,52	1,43		0,00	100,95	3,53	5,08			
EG 1LL	0,10	0,18	116,32	2,04		0,00	144,02	5,04	7,25			
EG 1.5LL	0,13	0,23	151,13	2,64		0,00	187,09	6,55	9,42			
EG 2LL	0,15	0,26	185,93	3,25		0,00	230,16	8,06	11,57			
150° 15m 2m I & III												
EG	0,03	0,05	6,78	0,12			2,55	0,09	0,26	25,23	0,80	0,28
EG 0.5LL	0,06	0,11	11,82	0,21			4,54	0,16	0,47	14,47	1,40	0,48
EG 1LL	0,08	0,14	16,87	0,30			6,54	0,23	0,66	10,14	2,00	0,69
EG 1.5LL	0,11	0,19	21,91	0,38			8,56	0,30	0,88	7,81	2,60	0,90
EG 2LL	0,13	0,23	26,96	0,47			10,53	0,37	1,07	6,35	3,20	1,10
150° 15m 2m II & III												
EG	0,05	0,09	26,34	0,46		0,00	28,74	1,01	1,55			
EG 0.5LL	0,08	0,14	46,04	0,81		0,00	50,14	1,75	2,70			
EG 1LL	0,11	0,19	65,75	1,15		0,00	71,53	2,50	3,85			
EG 1.5LL	0,14	0,25	85,45	1,50		0,00	92,93	3,25	4,99			
EG 2LL	0,17	0,30	105,16	1,84		0,00	114,32	4,00	6,14			
150° 15m 2m IV												
EG	0,08	0,14	5,69	0,10	3,70	0,26		0,00	0,50			
EG 0.5LL	0,14	0,25	9,92	0,17	6,40	0,45		0,00	0,87			
EG 1LL	0,21	0,37	14,14	0,25	9,10	0,64		0,00	1,25			
EG 1.5LL	0,27	0,47	18,37	0,32	11,80	0,83		0,00	1,62			
EG 2LL	0,33	0,58	22,60	0,40	14,49	1,01		0,00	1,99			

150° 15m 2m IV												
EG	0,05	0,09	5,14	0,09	2,34	0,16		0,00	0,34			
EG 0.5LL	0,08	0,14	8,96	0,16	4,19	0,29		0,00	0,59			
EG 1LL	0,12	0,21	12,77	0,22	6,03	0,42		0,00	0,86			
EG 1.5LL	0,16	0,28	16,59	0,29	7,87	0,55		0,00	1,12			
EG 2LL	0,20	0,35	20,41	0,36	9,72	0,68		0,00	1,39			
150° 15m 3m I & III												
EG	0,12	0,21	4,10	0,07			3,67	0,13	0,41	18,61		
EG 0.5LL	0,21	0,37	7,15	0,13			6,55	0,23	0,72	10,66		
EG 1LL	0,30	0,53	10,20	0,18			9,44	0,33	1,04	7,47		
EG 1.5LL	0,40	0,70	13,26	0,23			12,32	0,43	1,37	5,75		
EG 2LL	0,49	0,86	16,31	0,29			15,21	0,53	1,68	4,68		
150° 15m 3m II & III												
EG	0,08	0,14	21,63	0,38		0,00	27,56	0,96	1,48		0,78	0,27
EG 0.5LL	0,13	0,23	37,74	0,66		0,00	47,92	1,68	2,57		1,37	0,47
EG 1LL	0,18	0,32	53,85	0,94		0,00	68,28	2,39	3,65		1,96	0,68
EG 1.5LL	0,23	0,40	69,96	1,22		0,00	88,64	3,10	4,73		2,54	0,88
EG 2LL	0,29	0,51	86,07	1,51		0,00	109,00	3,82	5,83		3,13	1,08
150° 15m 3m IV												
EG	0,15	0,26	2,07	0,04		0,00	3,50	0,12	0,42			
EG 0.5LL	0,27	0,47	3,62	0,06		0,00	6,26	0,22	0,76			
EG 1LL	0,39	0,68	5,17	0,09		0,00	9,02	0,32	1,09			
EG 1.5LL	0,51	0,89	6,71	0,12		0,00	11,78	0,41	1,42			
EG 2LL	0,64	1,12	8,26	0,14		0,00	14,54	0,51	1,78			
150° 15m 3m IV												
EG	0,15	0,26	1,58	0,03	3,50	0,25		0,00	0,54			
EG 0.5LL	0,27	0,47	2,75	0,05	6,26	0,44		0,00	0,96			
EG 1LL	0,39	0,68	3,92	0,07	9,02	0,63		0,00	1,38			
EG 1.5LL	0,51	0,89	5,10	0,09	11,78	0,82		0,00	1,81			
EG 2LL	0,64	1,12	6,27	0,11	14,54	1,02		0,00	2,25			

150° 7.5m OV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
150° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,03	0,05	7,35	0,13			1,45	0,05	0,23	21,34	0,38	0,13
EG 0.5LL	0,06	0,11	12,09	0,21			2,42	0,08	0,40	12,97	0,62	0,21
EG 1LL	0,08	0,14	16,83	0,29			3,39	0,12	0,55	9,32	0,89	0,31
EG 1.5LL	0,11	0,19	21,57	0,38			4,36	0,15	0,72	7,27	1,13	0,39
EG 2LL	0,13	0,23	26,31	0,46			5,33	0,19	0,88	5,96	1,36	0,47
150° 7.5m 1m II & III												
EG	0,05	0,09	16,13	0,28		0,00	16,42	0,57	0,94			
EG 0.5LL	0,08	0,14	26,53	0,46		0,00	26,97	0,94	1,55			
EG 1LL	0,11	0,19	36,93	0,65		0,00	37,52	1,31	2,15			
EG 1.5LL	0,14	0,25	47,34	0,83		0,00	48,07	1,68	2,76			
EG 2LL	0,17	0,30	57,74	1,01		0,00	58,62	2,05	3,36			
150° 7.5m 1m IV												
EG	0,03	0,05	6,07	0,11		0,00	1,11	0,04	0,20			
EG 0.5LL	0,06	0,11	9,98	0,17		0,00	1,86	0,07	0,35			
EG 1LL	0,08	0,14	13,88	0,24		0,00	2,62	0,09	0,47			
EG 1.5LL	0,11	0,19	17,79	0,31		0,00	3,37	0,12	0,62			
EG 2LL	0,13	0,23	21,69	0,38		0,00	4,12	0,14	0,75			
150° 7.5m 1m IV												
EG	0,05	0,09	16,13	0,28		0,00	16,42	0,57	0,94			
EG 0.5LL	0,08	0,14	26,53	0,46		0,00	26,97	0,94	1,55			
EG 1LL	0,11	0,19	36,93	0,65		0,00	37,52	1,31	2,15			
EG 1.5LL	0,14	0,25	47,34	0,83		0,00	48,07	1,68	2,76			
EG 2LL	0,17	0,30	57,74	1,01		0,00	58,62	2,05	3,36			
150° 7.5m 2m I & III												
EG	0,15	0,26	3,09	0,05			2,84	0,10	0,42	11,43	0,53	0,18
EG 0.5LL	0,26	0,46	5,09	0,09			4,78	0,17	0,71	6,94	0,92	0,32
EG 1LL	0,36	0,63	7,08	0,12			6,72	0,24	0,99	4,98	1,30	0,45
EG 1.5LL	0,47	0,82	9,08	0,16			8,65	0,30	1,29	3,88	1,69	0,58
EG 2LL	0,58	1,02	11,07	0,19			10,59	0,37	1,58	3,18	2,08	0,72
150° 7.5m 2m II & III												
EG	0,09	0,16	11,88	0,21		0,00	13,42	0,47	0,84			
EG 0.5LL	0,16	0,28	19,50	0,34		0,00	21,93	0,77	1,39			
EG 1LL	0,23	0,40	27,13	0,47		0,00	30,43	1,07	1,94			
EG 1.5LL	0,29	0,51	34,75	0,61		0,00	38,94	1,36	2,48			
EG 2LL	0,36	0,63	42,38	0,74		0,00	47,45	1,66	3,03			
150° 7.5m 2m IV												
EG	0,18	0,32	2,14	0,04		0,00	2,66	0,09	0,45			
EG 0.5LL	0,30	0,53	3,53	0,06		0,00	4,48	0,16	0,74			
EG 1LL	0,42	0,74	4,91	0,09		0,00	6,30	0,22	1,04			
EG 1.5LL	0,54	0,95	6,29	0,11		0,00	8,12	0,28	1,34			
EG 2LL	0,67	1,18	7,67	0,13		0,00	9,94	0,35	1,66			

150° 7.5m 2m IV												
EG	0,18	0,32	1,86	0,03	2,69	0,19		0,00	0,54			
EG 0.5LL	0,30	0,53	3,06	0,05	4,52	0,32		0,00	0,90			
EG 1LL	0,42	0,74	4,25	0,07	6,36	0,45		0,00	1,26			
EG 1.5LL	0,54	0,95	5,45	0,10	8,19	0,57		0,00	1,62			
EG 2LL	0,67	1,18	6,65	0,12	10,02	0,70		0,00	1,99			
150° 7.5m 3m I & III												
EG	0,37	0,65	1,67	0,03			4,15	0,15	0,82	6,56	1,13	0,39
EG 0.5LL	0,63	1,11	2,74	0,05			6,99	0,24	1,40	3,92	1,90	0,65
EG 1LL	0,89	1,56	3,82	0,07			9,82	0,34	1,97	2,79	2,67	0,92
EG 1.5LL	1,15	2,02	4,89	0,09			12,66	0,44	2,55	2,17	3,44	1,19
EG 2LL	1,41	2,47	5,97	0,10			15,49	0,54	3,12	1,77	4,21	1,45
150° 7.5m 3m II & III												
EG	0,18	0,32	12,26	0,21		0,00	16,68	0,58	1,11			
EG 0.5LL	0,30	0,53	20,07	0,35		0,00	27,17	0,95	1,83			
EG 1LL	0,43	0,75	27,88	0,49		0,00	37,67	1,32	2,56			
EG 1.5LL	0,55	0,96	35,68	0,62		0,00	48,16	1,69	3,27			
EG 2LL	0,68	1,19	43,49	0,76		0,00	58,66	2,05	4,01			
150° 7.5m 3m IV												
EG	0,43	0,75	1,04	0,02		0,00	4,11	0,14	0,92			
EG 0.5LL	0,73	1,28	1,71	0,03		0,00	6,93	0,24	1,55			
EG 1LL	1,03	1,81	2,38	0,04		0,00	9,75	0,34	2,19			
EG 1.5LL	1,33	2,33	3,05	0,05		0,00	12,56	0,44	2,83			
EG 2LL	1,63	2,86	3,72	0,07		0,00	15,38	0,54	3,46			
150° 7.5m 3m IV												
EG	0,43	0,75	0,74	0,01	4,24	0,30		0,00	1,06			
EG 0.5LL	0,73	1,28	1,22	0,02	7,14	0,50		0,00	1,80			
EG 1LL	1,03	1,81	1,70	0,03	10,04	0,70		0,00	2,54			
EG 1.5LL	1,33	2,33	2,18	0,04	12,94	0,91		0,00	3,28			
EG 2LL	1,63	2,86	2,66	0,05	15,85	1,11		0,00	4,02			

150° 7.5m VV	M		T		Z		D				σ_zul	
Interaktionsgrenzen	0,57		57,14		14,29		28,57				2,90	
150° 7.5m 1m I & III	M		T		Z		D		u	LSF 1EW	σ_vorh	u
EG	0,00	0,00	6,33	0,11			1,34	0,05	0,16	156,70	0,37	0,13
EG 0.5LL	0,00	0,00	11,04	0,19			2,38	0,08	0,28	89,88	0,65	0,22
EG 1LL	0,00	0,00	15,75	0,28			3,42	0,12	0,40	63,01	0,93	0,32
EG 1.5LL	0,00	0,00	20,45	0,36			4,45	0,16	0,51	48,51	1,21	0,42
EG 2LL	0,01	0,02	25,16	0,44			5,49	0,19	0,65	39,43	1,48	0,51
150° 7.5m 1m II & III												
EG	0,00	0,00	12,16	0,21		0,00	9,31	0,33	0,54			
EG 0.5LL	0,00	0,00	21,21	0,37		0,00	16,21	0,57	0,94			
EG 1LL	0,00	0,00	30,25	0,53		0,00	23,11	0,81	1,34			
EG 1.5LL	0,00	0,00	39,39	0,69		0,00	30,01	1,05	1,74			
EG 2LL	0,00	0,00	48,35	0,85		0,00	36,90	1,29	2,14			
150° 7.5m 1m IV												
EG	0,01	0,02	3,87	0,07		0,00	0,95	0,03	0,12			
EG 0.5LL	0,03	0,05	6,74	0,12		0,00	1,68	0,06	0,23			
EG 1LL	0,04	0,07	9,61	0,17		0,00	2,41	0,08	0,32			
EG 1.5LL	0,05	0,09	12,49	0,22		0,00	3,14	0,11	0,42			
EG 2LL	0,06	0,11	15,36	0,27		0,00	3,87	0,14	0,51			
150° 7.5m 1m IV												
EG	0,01	0,02	4,15	0,07	1,02	0,07			0,16			
EG 0.5LL	0,01	0,02	7,23	0,13	1,81	0,13			0,27			
EG 1LL	0,02	0,04	10,31	0,18	2,60	0,18			0,40			
EG 1.5LL	0,02	0,04	13,39	0,23	3,40	0,24			0,51			
EG 2LL	0,03	0,05	16,48	0,29	4,19	0,29			0,63			
150° 7.5m 2m I & III												
EG	0,03	0,05	2,63	0,05			2,49	0,09	0,19	105,69		
EG 0.5LL	0,05	0,09	4,59	0,08			4,44	0,16	0,32	60,52		
EG 1LL	0,07	0,12	6,54	0,11			6,39	0,22	0,46	42,40		
EG 1.5LL	0,09	0,16	8,50	0,15			8,34	0,29	0,60	32,63		
EG 2LL	0,11	0,19	10,46	0,18			10,29	0,36	0,74	26,52		
150° 7.5m 2m II & III												
EG	0,02	0,04	7,58	0,13		0,00	6,67	0,23	0,40		0,30	0,10
EG 0.5LL	0,03	0,05	13,18	0,23		0,00	11,49	0,40	0,69		0,52	0,18
EG 1LL	0,04	0,07	18,77	0,33		0,00	16,32	0,57	0,97		0,74	0,26
EG 1.5LL	0,05	0,09	24,37	0,43		0,00	21,17	0,74	1,26		0,97	0,33
EG 2LL	0,06	0,11	29,96	0,52		0,00	25,96	0,91	1,54		1,19	0,41
150° 7.5m 2m IV												
EG	0,05	0,09	1,27	0,02		0,00	2,31	0,08	0,19			
EG 0.5LL	0,09	0,16	2,22	0,04		0,00	4,13	0,14	0,34			
EG 1LL	0,13	0,23	3,17	0,06		0,00	5,95	0,21	0,49			
EG 1.5LL	0,17	0,30	4,12	0,07		0,00	7,77	0,27	0,64			
EG 2LL	0,21	0,37	5,07	0,09		0,00	9,59	0,34	0,79			

150° 7.5m 2m IV													
EG	0,05	0,09	1,03	0,02	2,31	0,16			0,27				
EG 0.5LL	0,09	0,16	1,79	0,03	4,13	0,29			0,48				
EG 1LL	0,13	0,23	2,55	0,04	5,95	0,42			0,69				
EG 1.5LL	0,17	0,30	3,31	0,06	7,78	0,54			0,90				
EG 2LL	0,21	0,37	4,08	0,07	9,60	0,67			1,11				
150° 7.5m 3m I & III													
EG	0,11	0,19	1,37	0,02			3,54	0,12	0,34	72,36	0,46	0,16	
EG 0.5LL	0,20	0,35	2,39	0,04			6,33	0,22	0,61	41,29	0,84	0,29	
EG 1LL	0,29	0,51	3,40	0,06			9,12	0,32	0,89	28,89	1,21	0,42	
EG 1.5LL	0,38	0,67	4,42	0,08			11,91	0,42	1,16	22,22	1,58	0,54	
EG 2LL	0,47	0,82	5,44	0,10			14,70	0,51	1,43	18,05	1,95	0,67	
150° 7.5m 3m II & III													
EG	0,01	0,02	6,80	0,12		0,00	7,84	0,27	0,41				
EG 0.5LL	0,01	0,02	11,76	0,21		0,00	13,41	0,47	0,69				
EG 1LL	0,01	0,02	16,71	0,29		0,00	18,98	0,66	0,97				
EG 1.5LL	0,01	0,02	21,67	0,38		0,00	24,55	0,86	1,26				
EG 2LL	0,01	0,02	26,62	0,47		0,00	30,12	1,05	1,54				
150° 7.5m 3m IV													
EG	0,14	0,25	0,72	0,01		0,00	3,58	0,13	0,38				
EG 0.5LL	0,25	0,44	1,26	0,02		0,00	6,40	0,22	0,68				
EG 1LL	0,36	0,63	1,80	0,03		0,00	9,22	0,32	0,99				
EG 1.5LL	0,47	0,82	2,34	0,04		0,00	12,05	0,42	1,29				
EG 2LL	0,58	1,02	2,88	0,05		0,00	14,87	0,52	1,59				
150° 7.5m 3m IV													
EG	0,14	0,25	0,50	0,01	3,59	0,25			0,51				
EG 0.5LL	0,25	0,44	0,88	0,02	6,42	0,45			0,90				
EG 1LL	0,36	0,63	1,25	0,02	9,26	0,65			1,30				
EG 1.5LL	0,47	0,82	1,63	0,03	12,09	0,85			1,70				
EG 2LL	0,59	1,04	2,00	0,04	14,92	1,04			2,11				

Literaturverzeichnis

[1] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.10

[2] G. Kohlmaier, B.von Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.213

[3] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau. Müller, Köln 1998. S.42

[4] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.210

[5] K. Kurrer: Geschichte der Baustatik. Berlin, Ernst & Sohn 2003. S.211

[6] J. Anthony: Lifelines 21. Joseph Paxton. Shire Publications, Buckinghamshire 2003. S.5

[7] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.322 ff.

[8] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau. Müller, Köln 1998. S.52

[9] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.410

[10] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.11 ff.

[11] G. Sedlacek, et al.: Glas im Konstruktiven Ingenieurbau. Ernst & Sohn, Berlin 1999. S.177 ff.

[12] The Institution of Structural Engineers. Structural use of glas in buildings. IStructE, London 1999. S.75 ff.

[13] M. Feldmann, R. Kasper, K. Langosch: Glas für tragende Bauteile. Werner, Köln 2012. S.204 ff.

[14] M. Haldimann, A. Luible, M. Overend: Structural Use of Glass. Structural Engineering Documents. IABSE-AIPC-IVBH, ETH Zürich 2008. S.110 ff.

[15] Ö. Bucak, et al.: Geklebte Stahl-Glas-Verbundtragwerke. In: Stahlbau Spezial. Stahlbau - Konstruktiver Glasbau. Ernst & Sohn, Berlin 2009. S.36-40.

[16] C. Freitag, J. Wörner: Verwendung von Glas zur Aussteifung von Gebäuden. In: Stahlbau Spezial. Glasbau – Glass in Building. Ernst & Sohn, Berlin 2011. S.45-51.

[17] M. Feldmann, K. Langosch: Knickfestigkeit und einheitliche Knickkurven für scheibenförmige Glasstützen mit Monoglasquerschnitt aus TVG und ESG. In: Stahlbau Spezial. Stahlbau - Konstruktiver Glasbau. Ernst & Sohn, Berlin 2010. S.70-79

[18] S. Behling, St. Behling: GLASS Konstruktion und Technologie in der Architektur. Prestel, München 1999. S.10

[19] B. Weller, S. Reich, J. Ebert: First glass space structure with in-plane loaded glazing. Hrsg. J. Schneider, B. Weller. Glass – Facade – Energy. engineered transparency. proceedings international conference at glasstec 2010. S.323-332

[20] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S212.

[21] O. Englhardt: *FLÄCHENTRAGWERKE AUS GLAS Tragverhalten und Stabilität*. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien, Wien 2007.

[22] A. Luible: *Stabilität von Tragelementen aus Glas.* Dissertation. EPFL Lausanne, Lausanne 2004.

[23] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.157-160.

[24] H. Buri, Y. Weinand: Origami aus Brettsperrholz. In: DETAIL Zeitschrift für Architektur + Baudetail 10, München 2010. S.1066-1068.

[25] S. Engelsmann, V. Spalding: Experimentelle Ganz- Kunststoffkonstruktion. In GLAS 4/2009. S. 5-8

[26] H. Buri: *Origami – Folded Plate Structures.* Dissertation. EPFL Lausanne, Lausanne 2010.

[27] K. Girkmann: *Flächentragwerke*. Springer, Wien 1959. S.555

[28] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981.

[29] J.F. Geist: Passagen ein Bautyp des 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1969.

[30] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.300-302

[31] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.211

[32] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau. Müller, Köln 1998. S.79

[33] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau. Müller, Köln 1998. S.210-213

[34] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken. Müller, Köln 2000. S.67

[35] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken. Müller, Köln 2000. S.174-175

[36] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken. Müller, Köln 2000. S.176-179

[37] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.157

[38] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.228

[39] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.229

[40] S. Behling, St. Behling: GLASS Konstruktion und Technologie in der Architektur. Prestel, München 1999. S.104

[41] S. Niderehe: Glass strcutures and their structural reliability – a discussion. Hrsg. Bos, Louter, Veer. Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Faculcy of Architecture, Delft University of Technology. IOS Press, Amsterdam 2008. S.384

[42] B. Weller, et al.: Geklebte Ganzglaskonstruktion für das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung in Dresden. In: Stahlbau Spezial. Stahlbau - Konstruktiver Glasbau. Ernst & Sohn, Berlin 2010. S.34-40

[43] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.24 ff.

[44] U. Knaack: Konstruktiver Glasbau. Müller, Köln 1998. S.130 f.

[45] H. Buri: *Origami – Folded Plate Structures.* Dissertation. EPFL Lausanne, Lausanne 2010. S.69 ff.

[46] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.25

[47] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.9 ff.

[48] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.157

[49] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.158

[50] I. Stotz: Orhinogami. http://www.rhinoscript.org/gallery/9 (12.11.2012).

[51] M. Krupna, S. Trometer: Trösch-Preis. http://www.stahlbaustudium.de/01fmelda.htm (12.11.2012)

[52] Seele Sedak. Produktion. http://www.sedak.com/produktion.html (12.11.2012)

[53] Vorlesung Faltwerke. Grundlagen für die Planung. Parametric Prototypes Seminar SS2008. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Stuttgart 2008. S.10

[54] Vorlesung Faltwerke. Grundlagen für die Planung. Parametric Prototypes Seminar SS2008. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Stuttgart 2008. S.11

[55] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.229

[56] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.301

[57] O. Völckers: Bauen mit Glas - Die Baubücher Band 17. Hoffmansche Buchdruckerei Felix Krais und Omnitypie-Gesellchaft Nachf. Leopold Zechnall, Stuttgart 1948. S.79

[58] G. Kohlmaier, B.von. Sartory: Das Glashaus – e. Bautypus d. 19.Jahrhunderts. Prestel, München 1981. S.226

[59] B. Weller, et al.: Selbsttragende Glasdächer mit lastabtragender Verglasung In: Stahlbau Spezial. Stahlbau - Konstruktiver Glasbau. Ernst & Sohn, Berlin 2009. S.7-12

[60] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.157

[61] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.25

[62] B. Weller, et.al.: Kleben im konstruktiven Glasbau. In: Stahlbau-Kalender 2011. Hrsg. U. Kuhlmann. Ernst und Sohn, Berlin 2011. S.590

[63] Puller, K. Sobek, W. Glasbau 2012. In Verbundglas integrierte Lasteinleitungselemente und deren Tragverhalten. Hrsg. B. Weller, S. Tasche. 1 Auflage. Ernst und Sohn, Dresden 2012. S.225

[64] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.88

[65] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.89

[66] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.87

[67] U. Knaack, W. Führer, J. Wurm: Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken. Müller, Köln 2000. S.174 ff.

[68] U. Knaack, W. Führer, J. Wurm: Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken. Müller, Köln 2000. S.176 ff.

[69] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.229 ff.

[70] U. Knaack, W. Führer, J. Wurm: Konstruktiver Glasbau 2. Neue Möglichkeiten und Techniken. Müller, Köln 2000. S.115 f.

[71] S. Feirabend: Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart 2010. S.60 ff.

[72] P. Carvalho, J.S. Cruz, F. Veer: Connecting through reinforcement - experimental analysis of a glass connection using perforated steel plates. Hrsg. Bos, Louter, Veer. Challenging Glass 3. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Press, Amsterdam 2012. S.187

[73] S. Feirabend: Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart 2010.

[74] P. Willaret, D. Meyer: A new folding glass roof for the historic city swimming hall Zürich. Proceedings Glass Performance Days 2011. Finnland, 2011. S.622 ff.

[75] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for structural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.27

[76] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.88

[77] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S140

[78] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.38

[79] Bos, Louter, Veer (Eds.): Challenging Glass. Conference on Architectural and Structural Applications of Glass. Delft University of Technology. IOS Press, Amsterdam 2008. S.191

[80] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.84

[81] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.86

[82] A. Bagger: Plate shell structures of glass. Studies leading to guidelines for sructural design. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken 2010. S.87

[83] J. Zangenberg: A load transferring glued detail for connecting glass elements. Hrsg. J. Schneider, B. Weller: Glass – Facade – Energy. international conference at glasstec. engineered transparency proceedings, 2010. S.179

[84] http://www.sedak.com/laminieren.html (19.02.2013)

[85] http://www.sedak.com/glascobond-.html (19.02.2013)

[86] O. Völckers: Bauen mit Glas - Die Baubücher Band 17. Hoffmansche Buchdruckerei Felix Krais und Omnitypie-GesellchaftNachf. Leopold Zechnall, Stuttgart 1948. S.7

[87] S. Behling, St. Behling: GLASS Konstruktion und Technologie in der Architektur. Prestel, München 1999. S.14 ff.

[88] M. Feldmann, R. Kasper, K. Langosch: Glas für tragende Bauteile. Werner, Köln 2012. S.9

[89] M. Feldmann, R. Kasper, K. Langosch: Glas für tragende Bauteile. Werner, Köln 2012. S.10

[90] M. Haldimann, A. Luible, M. Overend: Structural Use of Glass. Structural Engineering Documents. IABSE-AIPC-IVBH ETH Zürich, Zürich 2008. S.7

[91] M. Feldmann, R. Kasper, K. Langosch: Glas für tragende Bauteile. Werner, Köln 2012. S.11

[92] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.68

[93] M. Feldmann, R. Kasper, K. Langosch: Glas für tragende Bauteile. Werner, Köln 2012. S.62

[94] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.89

[95] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.39

[96] K. Puller, W. Sobek: In Verbundglas integrierte Lasteinleitungselemente und deren Tragverhalten. In: Glasbau 2012. Hrsg. B. Weller, S. Tasche. 1 Auflage. Ernst und Sohn, Dresden 2012. S.223 ff.

[97] E. Möller: Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Karl Hanser Verlag, München 2008. S.467

[98] Titan – Werkstoff mit Perspektive. ThyssenKrupp Schulte (20.02.2013) http://www.thyssenkrupp-schute.de/tl_files/

[99] http://www.zapp.com/fileadmin/downloads/01-Produkte/Sonderwerkstoffe/Download/Titan_1-4_d_02.12.pdf (20.02.2013)

[100] DIN 9003-3 Biegen von Blechen und Bändern aus Leichtmetall. Deutsche Norm Luft und Raumfahrt. August 1994

[101] M. Feldmann, R. Kasper, K. Langosch: Glas für tragende Bauteile. Werner, Köln 2012. S.26

[102] ÖNORM B 3716-1:2009 11 15 Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau - Teil 1: Grundlagen S.8

[103] http://www2.dupont.com/SafetyGlass/en_US/assets/pdfs/Bennison_Lightweight_Structures.pdf (20.02.2013)

[104] http://www2.dupont.com/SafetyGlass/en_US/assets/pdfs/sentryglas_brochure.pdf (20.02.2013)

[105] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Z-70.3-170. Verbundsicherheitsglas aus SentryGlas SGP 5000 mit Schubverbund. DIBT 2011

[106] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Z-70.3-175. Glascobond Verbund-Sicherheitsglas mit Schubverbund. DIBT 2012

[107] S. Feirabend: Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart 2010. S. 23

[108] M. Haldimann, A. Luible, M. Overend: Structural Use of Glass. Structural Engineering Documents. IABSE-AIPC-IVBH, ETH Zürich, Zürich 2008. S.15

[109] V. Sackmann: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit des Schubverbunds in Verbundsicherheitsglas mit unterschiedlichen Folien aus Polyvinylbutyral. Dissertation. TU München, München 2008. S.144

[110] V. Sackmann: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit des Schubverbunds in Verbundsicherheitsglas mit unterschiedlichen Folien aus Polyvinylbutyral. Dissertation. TU München, München 2008. S.160

[111] HILTI HIT-HY 70 im konstruktiven Glasbau. Produktprospekt 8 Seiten

[112] Product Data Sheet Sikasil SG-500 Version 3 (01/2010)

[113] University of Minoh, School of Architecture.Online prototype presentation. http://www.lct.arquitectura.uminho.pt/Default.aspx?tabid=1&pageid=27&lang=en-US (19.02.2015)

[114] S. Feirabend: Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart 2010.

[115] http://www.archello.com/sites/default/files/imagecache/header_detail_large/story/media/Octatube_Moschee_Haarlem.jpg (20.02.2015)

[116] http://www.baunetzwissen.de/imgs/1/5/3/4/7/1/7/1260_034662-4f7cbc9552d55208.jpg (20.02.2015)

[117] L. Blandini, W. Sobek: 10 Jahre Stuttgarter Glasschale – eine Zwischenbilanz. In: Glasbau 2014. Hrsg. B. Weller, S. Tasche. 1 Auflage. Ernst und Sohn, Dresden 2014. S.77 ff.

[118] http://www.glaswelt.de/GLASWELT-2012-3/Structural-Glazing-einmal-aders (23.05.2015)

[119] http://www.dowcorning.com/content/publishedlit/62-0979-03.pdf S.20

[120] https://www.sedak.com/fileadmin/user_upload/pdf/Deutsch/Fertigungskompetenzen/2015_sedak_Fertigungskompetenzen_de.pdf (28.02.2015)

[121] H. Kuchling: Taschenbuch der Physik. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1986.

[122] C. Gebhart: Praxisbuch FEM in ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. Carl Hanser Verlag, München 2011. S.215 ff.

[123] NIROSTA 4301. Werkstoffdatenblatt der Thyssen Krupp Nirosta GmbH für den Werkstoff 1.4301 nach EN 10088-2

[124] M. Baitinger: Zur Bemessung von SL-belasteten Anschlüssen im konstruktiven Glasbau. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen 2009. S.18

[125] DIN 18008-2:2010-12. *Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 2:* Linienförmig gelagerte Verglasungen, S.10

[126] I. Calderone, et.al.: Effective Laminate Thickness for the Design of Laminated Glass. SentryGlas WhitePaper. First presented at Glass Processing Days 2009, Tampere, Finland

[127] L. Galuppi, G.Royer-Carfagni: The Effective Thickness of Laminated Glass Plates. University of Parma, Parma 2011.

[128] L. Galuppi, G. Royer-Carfagni: Enhanced Effective Thickness of Multi-Layered Laminated Glass. University of Parma, Parma 2012.

[129] F. Borriello, et.al.: Zusatzmodul RF-STABIL. Verzweigungslastfaktoren, Knicklängen und Eigenformen. Programmbeschreibung, Tiefenbach 2014.

[130] C. Bart, W. Rustler: Finite Elemente in der Baustatik-Praxis. Bauwerk, Berlin 2010. S.40

[131] J. Born: *Faltwerke*. Wittwer, Stuttgart 1954. S.1

[132] J. Wiedemann: Leichtbau, Elemente und Konstruktion. Springer, Berlin 2007. S.68

[133] J. Wurm: Glas als Tragwerk. Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Birkhäuser, Basel 2007. S.111

[134] K. Schneider (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Werner Verlag, Köln 2008. S.7.53

[135] K. Girkmann: *Flächentragwerke*. Springer, Wien 1959.

[136] TIOS Control, Prozesskontrolle für die Überwachung und Dokumentation von Setzprozessen in der Befestigungstechnik, Propekt Titgemeyer, Tb1436D(0410)

[137] GESIPA, Programm 2012, Blindniete und Verarbeitungsgeräte. S.9

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 John Claudius Loudon [55] und Bretton Hall [56] 15
Abb. 2 Glaslagerung im Kittbett [57] und typische Sprossenausführungen [58] 16
Abb. 3 Maximilianmuseum Augsburg [20] 18
Abb. 4 Belastungsversuch und Knoten-Prototyp Reichstagpräsidentenpalais [59] 18
Abb. 5 Beim Faltwerk verbindet sich die Tragwirkung der Scheibe und Platte [60] 21
Abb. 6 Stadtbahnhaltestelle [33] 22
Abb. 7 Vordach in Aachen [36] 22
Abb. 8 Ganzglaskuppel des ILEK [38] 23
Abb. 9 DELFT glass dome [39] 23
Abb. 10 Glaskugelkalotte G. Seele [40] 24
Abb. 11 Selimiye Mosque (NL) [115] 24
Abb. 12 Leibniz-Institut Dresden [42] 25
Abb. 13 Glas-Faltwerk der Universität Minho [113] 25
Abb. 14 Schwimmbad Zürich [116] 25
Abb. 15 Informationsstele Aachen [35] 25
Abb. 16 Grundrissformen (v.l.n.r.) Glashof, -band und –mitte nach [61] 25
Abb. 17 Pyramidisch (li. u. mi.) und halbprismatisches Faltwerk (re.) [53] 26
Abb. 18 Aus Trapezen [46] und aus Sechsecken zusammengesetzte Kuppel [47] 26
Abb. 19 Prismatische bzw. parallele Faltung [54] (vgl. Grat-Kehlen Faltwerk) 27
Abb. 20 Schräge (li.) und beliebige Faltung (re.) [54] 27
Abb. 21 Gegenfaltung bei paralleler (li.) und schräger Faltung (re.) [54] 27
Abb. 22 Studentenentwurf – Gewinner des Trösch-Innovationspreises 2006 [51] 27
Abb. 23 Parametrisches CAD-Modell am Beispiel der parallelen Faltung mit Gegenfaltung (Tafel 3) 28
Abb. 24 i. Formschluss, ii. Kraftschluss, iii. Stoffschluss [62] 33
Abb. 25 Fugendetail für eine Informationsstele vor dem Stadt-Theater Aachen 1999 [67] (Projektstudie) 36
Abb. 26 Klebefuge zur Verbindung von Elementen gemäß Bagger [75] 37
Abb. 27 Faltwerk der Eingangsüberdachung der Freien Evangelischen Gemeinde Aachen 1999 [68]. 38
Abb. 28 Delfter Glaskuppel [69] 39
Abb. 29 Reibschluss zur Verbindung von Elementen gemäß Bagger [81] 40
Abb. 30 Verbindung von Glasscheiben durch vernähen eines PUB-Films nach Knaack [70] (Konzeptstudie) 41

Abb. 31 Verbindung zweier Gläser durch „Randbewehrung“ [72] ... 42
Abb. 32 Formschluss zur Verbindung von Elementen gemäß Bagger [80] ... 43
Abb. 33 Fügedetail TU-Wien am Beispiel einer 90° Faltung ... 44
Abb. 34 Lieferteile Glas ... 45
Abb. 35 Explosionszeichnung des Fugendetails ... 46
Abb. 36 Plastische Verformung der Lasteinleitungsbacken [22]. (li.) Aluminium, (re.) Stahl ... 51
Abb. 37 Forum Mittelrhein Koblenz [118] ... 55
Abb. 38 Anbindungsdetail aus [118] ... 55
Abb. 39 Empfohlene Umkantradien gemäß DIN 9003-3 ... 56
Abb. 40 Verbindungsdetail vor (li.) und nach dem Verguss (re.) ... 57
Abb. 41 Schematisches Interaktionsdiagramm ... 60
Abb. 42 Probekörper zur Ermittlung der Biegetragfähigkeit ... 61
Abb. 43 Probekörper zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit ... 61
Abb. 44 Schraubenverguss an der Lasteinleitung ... 62
Abb. 45 Probekörper zur Ermittlung der Druck- und Zugtragfähigkeit ... 62
Abb. 46 Laborofen Binder ED 400 (li.) und Temperaturmessung während des Versuches (re.) ... 63
Abb. 47 Probekörper im unteren Prüfraum (li.), Detailaufnahme der Wegaufnehmer (re.) ... 65
Abb. 48 Probekörper T im oberen Prüfraum (li.), Detailaufnahme zur Anordnung der Wegaufnehmer (re.) ... 66
Abb. 49 Verbandsauflösung durch mangelhafte Lagerung beim Schubversuch ... 66
Abb. 50 Zugversuch im oberen Prüfraum (li.), Detailaufnahme zur Positionierung der Wegaufnehmer (re.) ... 67
Abb. 51 Kontaktbacken für die Druckversuche ... 68
Abb. 52 Versuch Q im Prüfraum unten (li.) und Detail Wegnehmer (re.) ... 69
Abb. 53 Kalibrierversuch D (li.), vorbereitete Probekörper Z (o. im Bild re.) ... 70
Abb. 54 Setzkurve einer Niete [137] ... 71
Abb. 55 Auswertung des Traversenwegnehmers für die Versuche M ... 71
Abb. 56 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch M ... 72
Abb. 57 Wegaufnehmer Versuche M bei Raumtemperatur ... 73
Abb. 58 Auswertung der Wegaufnehmer Versuche M bei 60°C Konditionierungstemperatur. ... 74
Abb. 59 Verformte Probekörper nach der Versuchsdurchführung ... 74
Abb. 60 Auswertung Traversenwegaufnehmer Schubversuch ... 75
Abb. 61 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch T ... 76
Abb. 62 Durch Delamination verursachter Glasbruch (li.), plastische Verformung der Teflonbeilage (re.) ... 76
Abb. 63 Auswertung der Wegaufnehmer für den Schubversuch ... 77
Abb. 64 Lokale Abplatzungen des Vergussmörtels am Probekörperende (li.) und Verwerfungen der Blechteile im oberen Lastbereich (re.) ... 78
Abb. 65 Auswertung Traversenwegnehmer der Zugversuche ... 79

Abb. 66 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch Z 80
Abb. 67 Einfluss auf Wegnehmer durch Verdrehung der Lasteinleitung bei den Zugversuchen. 80
Abb. 68 Einfluss des Einschlupfens der Ringschrauben auf die Wegnehmer. 81
Abb. 69 Auswertung der Wegaufnehmer an den Zugproben 81
Abb. 70 Auswertung des Traversenwegaufnehmers für die Druckversuche 83
Abb. 71 Vergrößerung Hysteresebereich Traversenwegnehmer Versuch D 83
Abb. 72 Überschätzung der Messergebnisse durch Verdrehung der Lasteinleitung bei den Druckversuchen. 84
Abb. 73 Auswertung der Wegaufnehmer der Druckprobekörper 85
Abb. 74 Auswertung Traversenwegaufnehmer Versuch V 86
Abb. 75 Vergrößerung Hysteresebereich Versuch V 86
Abb. 76 Auswertung der Wegaufnehmer bei den Versuchen V 87
Abb. 77 Auswertung des Traversenwegnehmers - Kontrollversuche Z 89
Abb. 78 Auswertung des Traversenwegnehmers - Kontrollversuch D 89
Abb. 79 Abhebender Kontakt zwischen Vergussmörtel und Einlaminierteilen (li.) Verbund zwischen SentryGlas® (SGP) und Einlaminierteilen (re.) 90
Abb. 80 Benennung der Einlaminierteile nach ihrer Lage in der Anbindung 91
Abb. 81 Ausschnitt aus dem Modell M mit Darstellung der Modellmaterialien 92
Abb. 82 Ausschnitt aus dem Modell M mit Darstellung der Vernetzung 93
Abb. 83 ANSYS-Modell für den Biegeversuch (Mode M) 95
Abb. 84 ANSYS-Modell für den Schubversuch (Mode T) 96
Abb. 85 ANSYS-Modell für den Zugversuch (Mode Z) 97
Abb. 86 ANSYS-Modell für den Druckversuch (Mode D) 98
Abb. 87 ANSYS-Modell für den Querbelastungsversuch (Mode V) 99
Abb. 88 Gegenüberstellung Numerik zu Messwerten Mode M und V 100
Abb. 89 Gegenüberstellung Numerik zu Messwerten Mode Z, D und T 101
Abb. 90 Interaktionsmodell 180°: Referenz M (li.) und Interaktion MTZ (re.) 104
Abb. 91 Auswertung der Einlaminierteile für die Interaktion 180° 105
Abb. 92 Auswertung Glas für die Interaktion 180° 106
Abb. 93 Auswertung SentryGlas für die Interaktion 180° 107
Abb. 94 Auswertung Verguss für die Interaktion 180° 108
Abb. 95 Betriebslasten einer Niete für die Interaktion 180° 109
Abb. 96 Parametrisches Modell 150° (li.) und 90° (re.) 110
Abb. 97 Auswertung der Einlaminierteile für variable Knickwinkel 111
Abb. 98 Auswertung der Ausnutzung für unterschiedliche Komponenten in Abhängigkeit vom Knickwinkel 112
Abb. 99 Globalmodell für die Tragwerksberechnungen 113
Abb. 100 Kontrollmodelle der Federelemente für Zug (li.) und Schub (re.) 116
Abb. 101 Mehrwellige (li.) und einwellige Beulfigur (re.) 121
Abb. 102 Mehrwellige (li.) und einwellige globale Beulfigur (re.) 121
Abb. 103 Versagensarten und Reihung am Beispiel 7.5m/2m VV 123

Abb. 104 Parallele Faltung mit Gegenfaltung, Ausnutzung an ausgewählten Kanten (OV ... ohne Verbund, VV ... voller Verbund).....125
Abb. 105 Mögliche Faltwerke aus laminationsgebogenen Scheiben. Einfach (li.) und zweifach (re.) gekrümmte Oberflächen.....125

Tafeln

Tafel 1 Geometrische Abhängigkeiten beim Pyramidischen Faltwerk I 29
Tafel 2 Geometrische Abhängigkeiten beim Pyramidischen Faltwerk II 30
Tafel 3 Abhängigkeiten beim parallelen Faltwerk mit Gegenfaltung 31
Tafel 4 Abhängigkeiten beim gegenläufigen Faltwerk 32
Tafel 5 Gegenüberstellung von Anbindungs- und Glasausnutzung mit den Laststeigerungsfaktoren für die Faltung 60° und drei Elementbreiten 119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Qualitative Gegenüberstellung der Verbindungsformen aus [66] 34
Tabelle 2 Beanspruchbarkeit einer Klebefuge nach Fugenkonfiguration aus [65] 35
Tabelle 3 „Konstrukteursvergleich“ der Bauweisen 48
Tabelle 4 Zusammensetzung von Kalk-Natronglas nach DIN EN 572-1 [89] [90] 49
Tabelle 5 Allgemeine Eigenschaften von Kalk-Natronglas nach DIN EN 572-1 aus [91] 50
Tabelle 6 Charakteristische Biegezugfestigkeiten ausgewählter Glaserzeugnisse [93] 50
Tabelle 7 Grenzabmessungen Glasfertigung [120] 51
Tabelle 8 Elastizitätsmodul [N/mm²] SentryGlas® Plus [103] 52
Tabelle 9 Schubmodul [N/mm²] SentryGlas® Plus [103] 52
Tabelle 10 Querdehnzahl [-] SentryGlas® Plus [103] 53
Tabelle 11 Physikalische und mechanische Eigenschaften 53
Tabelle 12 Schubmodul (>0,05 N/mm2) für PVB nach [109] 54
Tabelle 13 Chemische Zusammensetzung aus [98] 55
Tabelle 14 Physikalische Eigenschaften aus [98] 56
Tabelle 15 Mechanisch-technologische Eigenschaften aus [98] 56
Tabelle 16 Eigenschaften Vergussmörtel gemäß [111] 57
Tabelle 17 Eigenschaften von Sikasil®-SG500 [112] 58
Tabelle 18 Prüfkörper und Auswertungsziel 59
Tabelle 19 Prüfprogramm (Probekörper/Labortag dd.mm.2013) 63
Tabelle 20 Anzahl Probekörper und Prüfablauf 64
Tabelle 21 Durchbiegung in Probenmitte (WN3, siehe Anhang B) 73
Tabelle 22 Auswertung der Wegnehmer für den Schubversuch 78
Tabelle 23 Dehnung der Anbindung (Anhang B) 82
Tabelle 24 Stauchung der Anbindung (siehe Anhang B) 85
Tabelle 25 Verformung Versuche V (siehe Anhang B) 87
Tabelle 26 Funktionsprüfung Nieten A2/A2 5x25 F 88
Tabelle 27 Kontaktmatrix 91
Tabelle 28 Modellmaterialien samt Kennwerte 92
Tabelle 29 Elementgröße und Typ 93
Tabelle 30 Zusammenfassung Versuchs- und Berechnungslasten 94
Tabelle 31 FEM-Modelle der Probekörper und zugehörige Belastungen 94
Tabelle 32 Kombinationsbeiwerte für die Interaktionsbetrachtung 103
Tabelle 33 Versuchslasten und Verformungen zur Berechnung der Steifigkeiten 114

Tabelle 34 Verbindungssteifigkeiten des Anbindungsdetails 114
Tabelle 35 Modellmaterialien RFEM 115
Tabelle 36 Untersuchte Lastfälle 115
Tabelle 37 Übersicht der untersuchten Globalmodelle 116
Tabelle 38 Einfluss der Netzfeinheit bei Modell 60°/7,5m/1m VV 117
Tabelle 39 Grenzlasten der Interaktion 117