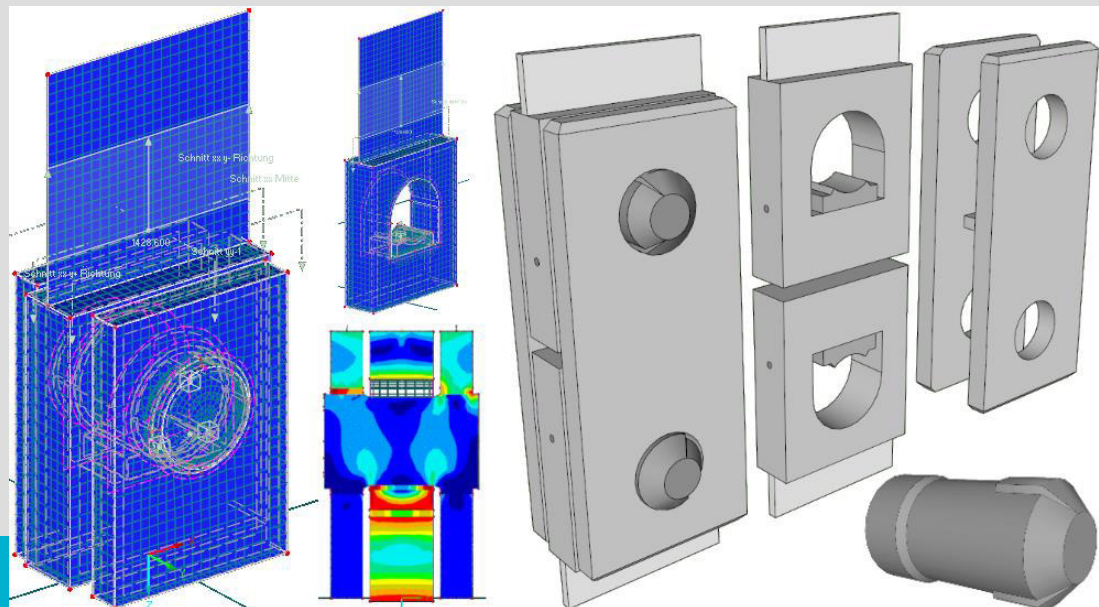


## Überlegungen zur systematischen Fügung von Brettsperrholz-Elementen und -Moduln



M-4-5/2018

**Florian Prettner**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



Florian Prettner, BSc.

# **Überlegungen zur systematischen Fügung von Brettsperrholz-Elementen und -Moduln**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
DI Dr.techn. Andreas Ringhofer, BSc.  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
DI Konstantin Ganster, BSc.  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, März 2018



# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

## AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir während des Studiums zur Seite gestanden sind und es mir ermöglicht haben, es letztendlich mit dieser Arbeit abzuschließen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer, Leiter des Instituts für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz. Durch seine Vorlesungen wurde ich schon bald nach Studienbeginn auf das Potenzial und die Möglichkeiten im Holzbau aufmerksam, worauf sich mein Studienschwerpunkt immer mehr in diese Richtung verlagert hat. Des Weiteren möchte ich mich dafür bedanken, dass er es mir ermöglicht hat, meine Arbeit in einem so interessanten und spannenden Fachbereich zu schreiben und dafür, dass er diese Arbeit dann betreut und begutachtet hat.

Mein Dank gilt außerdem meinen Betreuern Dipl.-Ing. Andreas Ringhofer und Dipl.-Ing. Konstantin Ganster, welche mich während der Arbeit unterstützt, mit Informationen versorgt und meine Arbeit Korrektur gelesen haben. Sie haben sich auch mit meinen teilweise verrückten Ideen sachlich auseinandergesetzt und mir dabei geholfen, bei der Konzentration auf unzählige Details nicht den Blick aufs große Ganze zu verlieren.

Weiters gilt mein Dank der technischen Universität Graz und allen ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, welche mir dieses wunderbare Studium ermöglichten. Laufe der letzten Jahre habe ich dabei im Zuge vieler interessanter Vorlesungen und Vorträge nicht nur Neues über mein Fach, sondern auch viel fürs Leben gelernt.

Besonders bedanken möchte ich mich bei allen meinen Studienkolleginnen und Kollegen, welche ein im universitären Bereich einzigartiges, freundliches, konstruktives und von Zusammenarbeit und gegenseitiger Hilfe geprägtes Umfeld geschaffen haben, in dem man sich auch in schweren Zeiten immer sofort an jeden wenden konnte. Es war ein Vergnügen, meine Studienzeit unter solchen Umständen zu verbringen.

Außerdem möchte ich mich noch bei allen meinen Freunden, welche mich von Anfang an durch das Abenteuer Studium begleitet haben, sowie all jenen, deren Freundschaft ich im Laufe des Studiums gewonnen habe, bedanken. Besonders freut mich, dass sich dieser Kreis im Laufe des Studiums durch eigene und fachfremde Vorlesungen, gemeinsame Unternehmungen, Sprachkurse sowie das im Zuge dieser Ereignisse gegründete Pub-Quiz-Team, die Infinite Elements, deutlich vergrößert und vertieft hat, was meine Studienzeit zur bis jetzt mit Abstand schönsten Zeit meines Lebens gemacht hat.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinem Bruder Markus, welcher mir immer bei Computerproblemen geholfen hat, und meinen Eltern Hermine und Hubert, welche immer an mich geglaubt haben und ohne deren Unterstützung dieses Studium für mich niemals möglich gewesen wäre.

Vielen Dank!

Thank you very much!

非常感谢你!

¡Muchas gracias!

Большое спасибо!

대단히 감사합니다!



## **Kurzfassung**

Ziel dieser Arbeit war es, neue Möglichkeiten zur Verbindung von großformatigen Brettsperrholzelementen zu entwickeln und diese experimentell zu testen. Die bisherige Fügechnik im Holzbau ist relativ kleinteilig und führt bei zunehmender Größe der zu verbindenden Bauteile zu immer längeren Montagezeiten sowie großen Problemen im Rückbau vorhandener Strukturen. Um die Montage zu beschleunigen und zu vereinfachen wurde daher das Grundelement eines punktförmigen Verbindungssystems entwickelt, durch finite Elemente Berechnungen optimiert und dann anhand physischer Prototypen getestet. Dieses Grundelement besteht aus jeweils zwei Anschlussteilen, welche bereits im Werk an den Bauteilen angebracht werden, und einem Verbindungsstück, welches durch Bolzen mit den Anschlussteilen verbunden wird. Der Bolzen verfügt dabei über ein exzentrisches Mittelstück, durch welches die Verbindung beim Verdrehen des Bolzens fixiert wird, sodass Montagetoleranzen von wenigen Millimetern problemlos aufgenommen werden können. Durch eine umfassende FE-Berechnung konnte am theoretischen Modell nachgewiesen werden, dass der Verbinder die geforderte Last von 100 kN problemlos aufnehmen kann und ein duktileres Versagensverhalten aufweist.

## **Abstract**

The aim of this thesis was to develop and experimentally test new possibilities for connecting cross-laminated timber elements of large size. By now most building parts are being connected by huge numbers of small-scale connectors. This leads to long assembly periods for large building parts and severe problems in the dismantling of existing buildings. To simplify and speed up the assembly process the basic element of a punctual connection system has been developed. It has been optimised using finite element calculations and tested with physical prototypes. This basic element consists of two parts that are mounted on the building parts in the factory and a connecting part that is being connected with the two other parts using a bolt. The bolt has an eccentric middle-part that locks down the connection when being turned. This enables the connection of overcoming assembly-tolerances of a few millimetres. With an extensive finite elements calculation on the theoretical model the demanded load-bearing-capacity of 100 kN and a ductile failure mode could be proofed.





# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: MOTIVATION .....</b>	<b>1</b>
<b>KAPITEL 2: EINLEITUNG UND STAND DER TECHNIK.....</b>	<b>3</b>
2-1	HOLZ-MASSIVBAUWEISE MIT BRETTSPERRHOLZ.....3
2-1.1	Abgrenzung vom Leichtbau .....3
2-1.2	Holz-Massivbauweisen.....4
2-1.3	Brettsperrholz (BSP) .....4
2-1.3.2	Querschnitte, Bauteile und Einsatzbereiche .....6
2-1.4	BSP-Technologie.....9
2-1.4.1	Ausgangsprodukte .....10
2-1.4.2	Herstellung .....10
2-1.4.3	Mechanische und physikalische Eigenschaften.....12
2-2	ÜBERBLICK MODULBAUWEISE .....16
2-2.1	Definition.....16
2-2.2	Geschichte der Modulbauweise.....16
2-2.2.1	Nomaden, Sesshaftwerdung und Baugeschichte bis zur Neuzeit .....16
2-2.2.2	Industriezeitalter und Massenfertigung .....19
2-2.2.3	Entwicklung von Baukastensystemen .....21
2-2.3	Modulbauweise Heute .....25
2-2.3.1	Allgemeines.....25
2-2.3.2	Situation in Europa .....25
2-2.3.3	Situation weltweit.....25
2-2.4	Derzeitiger Einsatz vorgefertigter Bauelemente.....26
2-2.4.1	Vorfertigungsgrad verschiedener Bauweisen .....26
2-2.5	Übersicht Über Modulbausysteme .....27
2-2.5.1	Stahl.....27
2-2.5.2	Beton .....29
2-2.5.3	Holz .....30
2-2.6	Ausgeführte Beispiele .....31
2-2.6.1	Wenckehof Container-Studentenheim, Amsterdam .....31
2-2.6.2	Impulszentrum, Graz-Eggenberg.....32
2-2.6.3	Journalistenhotel Olympische Winterspiele, Turin .....33
2-3	GRUNDLAGEN DER VERBINDUNGSTECHNIK IM HOLZBAU .....34
2-3.1	Verbindungsaufbau und Bestandteile .....34
2-3.2	Zimmermannsmässige Verbindungen .....35
2-3.2.1	Verblattung .....35

2-3.2.2	Versatzungen und Aufklauungen.....	36
2-3.2.3	Verkämmungen.....	37
2-3.2.4	Hartholzdübel.....	37
2-3.3	Ingenieurmässige Verbindungsmittel .....	38
2-3.3.1	Holzbauschrauben.....	39
2-3.3.2	Stabdübel .....	42
2-3.3.3	Nägeln.....	44
2-3.3.4	Eingeklebte Gewindestangen.....	45
2-3.3.5	Eingeklebte Bleche .....	46
2-3.3.6	Eingeklebte Rohrhülsen.....	47
2-3.4	Metalle in der Verbindungstechnik.....	49
2-3.4.1	Stahl .....	49
2-3.4.2	Aluminium .....	51
2-3.5	Metall-Metall Verbindungen .....	52
2-3.5.1	Stahlschrauben .....	52
2-3.5.2	Pass- und Steckverbindungen .....	53
2-4	STAND DER TECHNIK SYSTEMVERBINDER .....	55
2-4.1	Twistlock – Verbinder für Überseecontainer.....	55
2-4.2	Sherpa – Anschluss von BSH-Bindern und BSP-Elementen.....	57
2-4.3	X-RAD Verbinder.....	58
2-4.4	Spider Connector .....	60
2-5	VERBINDUNGSBEISPIELE AUS DEM MÖBELBAU .....	63
2-5.1	Klassische zimmermannsmässige Verbindungen .....	63
2-5.2	Lösbare Metallverbindungen .....	64
2-5.3	Scheulenburg-Verbindungssysteme.....	67
2-5.4	Lamello-Verbinder.....	69
2-6	ANFORDERUNGEN AN EIN MODULARES VERBINDUNGSSYSTEM .....	72
	<b>KAPITEL 3: ENTWICKLUNG EINES VERBINDUNGSBAUKASTENS .....</b>	<b>75</b>
3-1	KOMBINATIONSVARIANTEN VERSCHIEDENER BAUTEILE .....	75
3-2	VARIANTENSTUDIE.....	77
3-2.1	Variante 1: Schrauben und Stahlwinkel.....	77
3-2.2	Variante 2: Dreh-Schnappverbinder mit Schraub-Fixierung .....	79
3-2.3	Variante 3: Exzenterfixierter Verbinder .....	81
3-3	VARIANTEN-AUSWAHL.....	85
3-4	DIMENSIONIERUNG HANDRECHNUNG .....	86
3-4.1	Querschnitt 1.....	88
3-4.2	Querschnitt 2.....	88

3-4.3	Querschnitt 3 .....	89
3-4.4	Querschnitt 4 .....	89
3-4.5	Querschnitt 5 .....	90
3-4.6	Querschnitt 6 .....	90
3-4.7	Querschnitt 7 .....	91
3-4.8	Querschnitt 8 .....	91
3-4.9	Abmessungen aus Handrechnung.....	92
3-5	FINITE ELEMENTE BERECHNUNG .....	93
3-5.1	Erste Variante mit Abmessungen aus Handrechnung .....	94
3-5.2	Zweite Variante mit adaptiertem Modell und veränderter Geometrie.....	96
3-5.3	Gegenüberstellung halber und ganzer Verbinder .....	98
3-5.4	Dritte Variante mit abgeschrägten Innenecken im Anschlussteil.....	100
3-5.5	Vierte Variante mit Ausrundung im Anschlussteil.....	101
3-5.6	Fünfte Variante mit reduzierter oberer Riegelhöhe im Anschlussteil .....	102
3-5.7	Sechste Variante mit reduzierter unterer Riegelhöhe im Anschlussteil .....	103
3-5.8	Siebente Variante mit schmalerem Verbindungsstück.....	104
3-5.9	Achte Variante mit abgeschrägten Innenecken und dünnerem oberem Riegel .....	105
3-5.10	Neunte Variante mit leicht verstärkter Vertikalverbindung .....	106
3-5.11	Zehnte Variante mit verringerter Eckabschrägung.....	107
3-5.12	Varianz der Exzentrizität.....	108
3-5.13	Genauere Betrachtung der gewählten Variante .....	112
3-5.14	Weitere Netzverfeinerung zur Beurteilung des Verformungsverhaltens.....	114
3-5.15	Berechnung mit horizontaler Festhaltung des Lochblechs .....	115
3-6	ARBEITSLINIE DES VERBINDERS .....	117
3-7	ERKENNTNISSE AUS DER BERECHNUNG .....	122
<b>KAPITEL 4: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>		<b>123</b>
4-1	ZUSAMMENFASSUNG .....	123
4-2	AUSBLICK .....	124
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE .....</b>		<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis .....	III
A-3	Tabellenverzeichnis .....	IX
<b>ANHANG B DIVERSE ANDERE ANHÄNGE.....</b>		<b>X</b>



# KAPITEL 1: MOTIVATION

Da im Holzbau, und hier insbesondere in der Holz-Massivbauweise mit Brettspertholz, seit jeher ein hoher Vorfertigungsgrad herrscht, ist eine für diese Bauweise optimierte Verbindungstechnik von entscheidender Bedeutung.

Traditionell kamen im Holzbau meist zimmermannsmäßige Verbindungen zum Einsatz, welche in den letzten Jahrzehnten sukzessive ingenieurmäßige Verbindungen ersetzt wurden. Den meisten dieser Verbindungen ist gemein, dass sie eine Vielzahl von Verbindungsmitteln benötigen, welche in der Regel vor Ort auf der Baustelle montiert werden. Dies hat zur Folge, dass, je größer die Bauteile und die damit zu übertragenden Kräfte werden, auch die Montagezeit pro Bauteil auf der Baustelle deutlich zunimmt. Des Weiteren müssen diese Verbindungsmittel oft unter schwierigen Bedingungen (Witterung, Zugänglichkeit des Knotenpunktes, zeitlicher Druck etc.) angebracht werden.

Insbesondere bei der Verwendung von großflächigen Brettspertholzelementen als Kernbestandteile der Holz-Massivbauweise ergeben sich durch die hauptsächliche Verwendung von Schrauben und Stahlwinkeln ein hoher Montageaufwand sowie große Schwierigkeiten bei der Demontage derartig verbundener Bauteile.

All dies verlangt nach einer sauberen, klar definierten, modular aufgebauten systematischen Verbindungslösung, welche den Anforderungen einer solchen zeitgemäßen, hochgradig industriell vorgefertigten Bauweise genügt.

Diese Verbindungslösung sollte bereits im Werk am Bauteil befestigt und auf der Baustelle nur mehr durch wenige Handgriffe fixiert werden. Pro Verbinder sollte eine genau definierte Kraft übertragen werden und nach Überschreiten dieser ein gut steuerbares, plastisches Verformungsverhalten auftreten.

Des Weiteren sollten die am häufigsten auftretenden Anschlusskonfigurationen mit einer möglichst geringen Anzahl verschiedener Verbindungsmittel abgedeckt werden. So soll ein möglichst umfassender, trotzdem jedoch leicht zu verstehender und anzuwendender Verbindungsbaukasten geschaffen werden, welcher einen raschen und unkomplizierten Montageablauf auf der Baustelle ermöglicht.

Natürlich sollte eine solche Verbindungslösung im Zuge der Wiederverwendbarkeit von Bau- und Gebäudeteilen auch wieder ohne großen Aufwand demontierbar sein.

Nachdem für die Holz-Massivbauweise mit Brettspertholz noch kein solches Verbindungssystem besteht, welches allen diesen Anforderungen genügt, soll im Zuge dieser Arbeit die Basis eines solchen entwickelt und getestet werden, um darauf aufbauend neue Wege in der Holzbau-Verbindungstechnik zu beschreiten.

Die folgende Arbeit ist in 4 Kapitel untergliedert, welche sich mit folgendem Inhalt beschäftigen:

## **Kapitel 2, Einleitung und Stand der Technik:**

Dieses Kapitel beginnt mit einer Definition und Beschreibung der Holzmassivbauweise, gibt anschließend einen geschichtlichen Überblick über die Modularisierung im Bauwesen im Allgemeinen und zählt auch gebaute Beispiele mit hohem Vorfertigungsgrad auf. Danach wird auf die Verbindungstechnik im Holzbau eingegangen, ausgehend von zimmermannsmäßigen Verbindungen über ingenieurmäßige Verbindungen bis hin zu Systemverbindern und einen kurzen Exkurs in den Möbelbau. Abschließend werden, gewonnen aus all diesen Betrachtungen, Anforderungen an einen Systemverbinder ausgearbeitet.

**Kapitel 3, Entwicklung eines Verbindungsbaukastens:**

Ausgehend von den Anforderungen aus Kapitel 2 und den verschiedenen, zu erwartenden Verbindungskonfigurationen wird eine Variantenstudie durchgeführt, aus welcher ein Verbindungssystem ausgewählt und näher betrachtet wird. Das gewählte System wird zuerst anhand einer Handrechnung vordimensioniert und dann mit Hilfe einer umfassenden FE-Berechnung auf eine Tragfähigkeit von 100 kN pro Verbinder optimiert. Abschließend wird die Arbeitslinie des Verbinders ermittelt, um dessen Verformungsverhalten beurteilen zu können.

**Kapitel 4, Zusammenfassung und Ausblick:**

In diesem Kapitel wird die vorliegende Arbeit noch einmal kurz zusammengefasst und der Weg, ausgehend von den erzielten Ergebnissen, hin zur Schaffung eines vollständigen, modularen Verbindungssystems für die Holz-Massivbauweise mit Brettspertholz, welches alle in dieser Arbeit definierten Anforderungen erfüllt, skizziert.

# KAPITEL 2: EINLEITUNG UND STAND DER TECHNIK

## 2-1 HOLZ-MASSIVBAUWEISE MIT BRETTSPERRHOLZ

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [1] angeführten Literatur.

### 2-1.1 ABGRENZUNG VOM LEICHTBAU

Hochbaukonstruktionen lassen sich auf ihre Tragwirkung bezogen grundsätzlich in Massiv- und Leichtbauten unterteilen. Die Massivbauweise kann sowohl in Ziegel und Beton, als auch in Holz ausgeführt werden, die Skelettbauweise setzt sich üblicherweise aus eindimensionalen, stabförmigen Elementen in Stahl, Beton oder Holz zusammen. Der Haupttrichtung der Arbeit folgend wird nur auf den Baustoff Holz genauer eingegangen.

Leichtbauten – in Holz auch als Fachwerkbau oder Holzrahmenbau bezeichnet – bestehen aus stabförmigen Bauteilen, welche eine rein statische Funktion erfüllen, und einer Ausfachung, welche für den Raumabschluss und die Einhaltung bauphysikalischer Anforderungen zuständig ist. Die tragenden Bauteile sind dabei in Deckenebene als Träger und in vertikaler Richtung als Stützen ausgeführt. Die Aussteifung der Konstruktion erfolgt entweder stabförmig durch Verbände oder flächenhaft über die für die Ausfachung verwendeten Verschalungen oder Platten (z.B.: Holzrahmenbauweise, Fachwerkbauweise, siehe Abbildung 2-1).

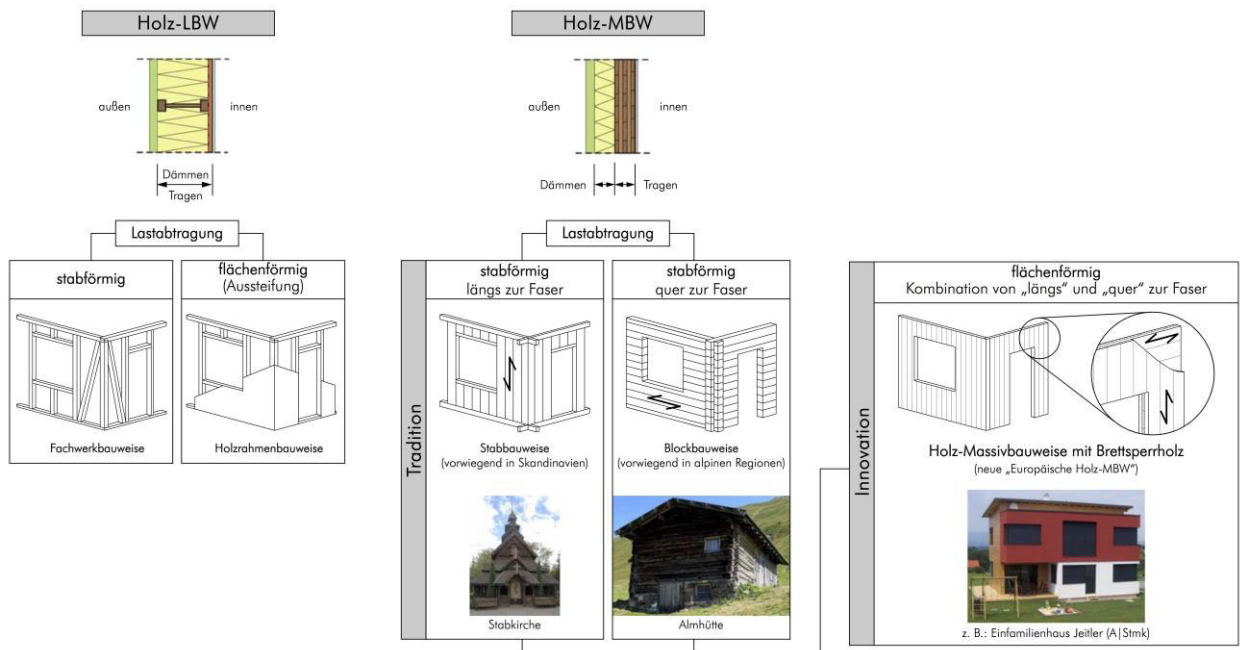


Abbildung 2-1: Übersicht über die verschiedenen Holzbauweisen und ihre Entwicklung bzw. Kombination [1]

Im Gegensatz dazu bestehen Massivbauten aus flächigen Bauteilen, welche neben der Lastabtragung auch den Raumabschluss sowie Wärme- und Schallschutz übernehmen. In horizontaler Richtung sind dies die



Deckenplatten (welche neben ihrer primären Plattentragwirkung zur Abtragung horizontaler Windlasten statisch gesehen auch als Scheiben wirken), in vertikaler Richtung sind es die Wandscheiben (welche wiederum auch Kräfte senkrecht zu ihrer Scheibenebene aufnehmen müssen). Da diese flächigen Bauteile in der Lage sind eine Scheibentragwirkung auszubilden, ist bei entsprechender Anordnung keine zusätzliche Aussteifung des Gebäudes notwendig. Die diesbezügliche Entwicklung der Holzmassivbauweisen wird in Abbildung 2-1 dargestellt.

## 2-1.2 HOLZ-MASSIVBAUWEISEN

Auch wenn Holz üblicherweise mit leichten, beplankten Ständerkonstruktionen in Verbindung gebracht wird, hat die Verwendung von Holz als Massivbaustoff vor allem in waldreichen Gegenden eine lange Tradition.

Im Alpenraum kann hier auf die Blockbauweise verwiesen werden, bei welcher ganze Baumstämme in horizontaler Lage übereinander gestapelt werden und sich jeweils an den Eckpunkten überkreuzen. Diese Bauweise ermöglicht es mit einfachen, zimmermannsmäßigen Holzverbindungen, welche auch mit grobem Werkzeug hergestellt werden können, ein stabiles Gebäude zu errichten. Die Fugen zwischen den Holzteilen wurden üblicherweise mit Wolle oder Moosen ausgestopft, um Durchzug zu vermeiden. Probleme ergeben sich im vertikalen Verformungsverhalten durch das Quellen und Schwinden, welches pro Geschoss Höhenänderungen im Bereich mehrerer Zentimeter verursachen kann. Hier sind spezielle Anschlüsse für Türen, Fenster und Stiegen gefragt.

Im skandinavischen Raum kann die Stabbauweise auf eine lange Geschichte zurückblicken, im Zuge dieser zum Beispiel die auch in Mitteleuropa bekannten Stabkirchen errichtet wurden. Bei der Stabbauweise werden vertikal stehende Hölzer zu einer Wand aneinandergereiht und durch einen horizontalen Abschluss oben und unten miteinander verbunden. Diese Anordnung stellt dabei jedoch nicht nur einen flächigen Abschluss des Bauwerks dar, sondern wirkt gleichzeitig auch als tragende Konstruktion. Dadurch, dass Holz in seiner Faserrichtung beansprucht wird, kommt es selbst bei hohen Gebäuden nur zu geringen Vertikalverformungen zufolge Belastung sowie aus Quellen und Schwinden.

## 2-1.3 BRETTSPERRHOLZ (BSP)

Das Brettspertholz stellt eine Kombination dieser beiden Bauweisen dar und schafft es durch moderne Klebtechnologie deren Vorteile zu verbinden und deren Nachteile zu eliminieren. Durch die kreuzweise Verleimung einer in der Regel ungeraden Anzahl von Holzschichten entsteht ein flächiges Element, welches sowohl in Platten- als auch in Scheibenrichtung Lasten abtragen kann. Des Weiteren reduziert die gekreuzte Brettanordnung den Einfluss des Quellens und Schwindens enorm, da das große Schwindmaß quer zur Faser durch die Verleimung mit um 90° gedrehten Brettern durch deren hohe Steifigkeit in Faserrichtung verhindert wird. Außerdem ermöglicht die Brettspertholzbauweise die Herstellung großer, flächiger Wand- und Deckenelemente ohne aufwendige Verbindungskonstruktionen innerhalb der Wandfläche. Der große tragende Querschnitt und die daraus resultierende hohe Tragfähig- und Steifigkeit erlauben den Einsatz von Brettspertholz auch für Gebäude mit deutlich größerer Geschossanzahl und Bauhöhe, als dies mit den klassischen Leichtbaumethoden möglich ist.

### 2-1.3.1 Ein kurzer Überblick zur Entstehungsgeschichte des Brettspertholzes

Die Verwendung von flächigen Holzkonstruktionen aus Brettern reicht bis ans Ende des 19. Jahrhunderts zurück. 1896 wurde in Russland eine weit gespannte Holzschale für einen Ausstellungspavillon und 1908 zwei Flugzeughangars mit einem zweilagigen Dachflächentragwerk errichtet. Es folgten zahlreiche Hypar-Schalen (Hyperbolisches Paraboloid), welche in den 60er Jahren über die ganze Welt verteilt aus Holz errichtet wurden. Die einzelnen Brettlagen wurden dabei mechanisch miteinander verbunden.

Bereits 1974 wurde von E. Cziesielski [2] ein Beitrag zum Bau mehrschichtiger, mechanisch miteinander verbundener Flächentragwerke aus Holz herausgegeben und darin angemerkt, dass sich eine quasi-starre Verbindung durch Kleben vorteilhaft auf die Tragfähigkeit auswirken würde. Zu Beginn der 1980er Jahre wurde der Begriff „Brettsperrholz“ das erste Mal in einem von G. Dröge und K.-H. Stoy geschriebenen Buch [3] erwähnt, in welchem es als Material für die Stege von Vollwandträgern vorgeschlagen wird, womit eine hohe Schubfestigkeit erreicht werden kann.

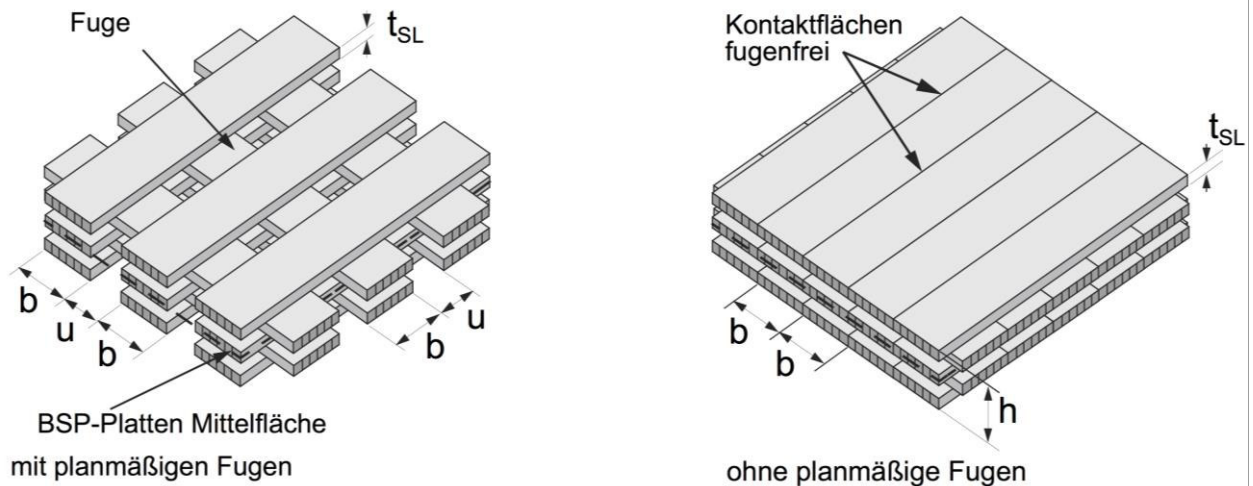


Abbildung 2-2: allgemeiner Aufbau von Brettsperrholz mit (links) und ohne Fugen (rechts) [1]

Die Unterschiede zwischen starrem und nachgiebigem Verbund bei dreilagigem Brettlagenholz wurden 1985 in der Dissertation von N. Lischke [4] untersucht, 1989 wurde der Begriff Brettsperrholz zur Definition von mehrschichtig beanspruchten Fahrbahnplatten verwendet [5]. Brettlagenholz wird dabei als allgemeiner Überbegriff für flächige Holzkonstruktionen verwendet, wozu auch Schalendächer und Gitterroststrukturen gerechnet werden, während Brettsperrholz nur aus „Mann-an-Mann“ verlegten, miteinander verklebten Brettern bestehende Platten bezeichnet wird, welche entweder eine geschlossene Oberfläche bilden oder Fugen zwischen den Brettern aufweisen (Abbildung 2-2). Das Potenzial des Holzwerkstoffs wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht wirklich erkannt. Von 1990 bis 1994 beschäftigte sich G. Schickhofer mit dem starren und nachgiebigen Verbund von geschichteten, flächigen Holzwerkstoffen und dissertierte damit 1994, wobei die Dissertation [6] noch im selben Jahr international zur Diskussion gestellt wurde. Parallel dazu wurden in Deutschland und der Schweiz erste Wohnbauten aus Brettsperrholz errichtet [7] [6].

In den folgenden Jahren erschienen im deutschsprachigen Raum (Österreich, Deutschland, Schweiz) eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten zu verschiedensten Themen rund um die Berechnung und Bemessung von Brettsperrholz. Ab 2003 wurden die Forschungen zu diesem Thema an der Technischen Universität Graz im Rahmen eines K-Programmes intensiviert und 2008 durch ein COMET-Programm fortgesetzt. Die große Anzahl daraus resultierender Publikationen trug ihren Teil zur schnellen Verbreitung der Bauweise bei, welche nun auch abseits der klassischen Brettsperrholzregion im deutschsprachigen Raum weltweit Gegenstand von Forschung und Entwicklung ist [8].

Gleichzeitig wurden erste Pilotprojekte aus Brettsperrholz errichtet und 1998 neben dem ersten mehrgeschossigen Wohnhaus in der Steiermark auch erste nationale Produktzulassungen ausgestellt [8]. 2008 begann die Arbeit an der Normung von BSP-Produkten auf europäischer Ebene, um eine umfassende Standardisierung von Prüfungen, Produkten, Konstruktionen und Ausführungsanweisungen zu erreichen, was einen breiteren Einsatz des Materials ermöglichen und erleichtern sollte.

Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, begann die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Brettsperrholz etwa in den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts. Nach etwa 20 Jahren wurden die ersten Produktzulassungen ausgestellt, womit der Holzwerkstoff erstmals regulär eingesetzt werden konnte. Die darauffolgenden 10 Jahre sind durch eine intensive Forschungs- und Entwicklungstätigkeit sowie den Aufbau von Produktionsstätten gekennzeichnet, gefolgt von einer 5- bis 10-jährigen Phase der

Standardisierung und Normung, welche letztendlich zur vollständigen Einbindung des Baustoffs Brettsperrholz in das Bauwesen führte.

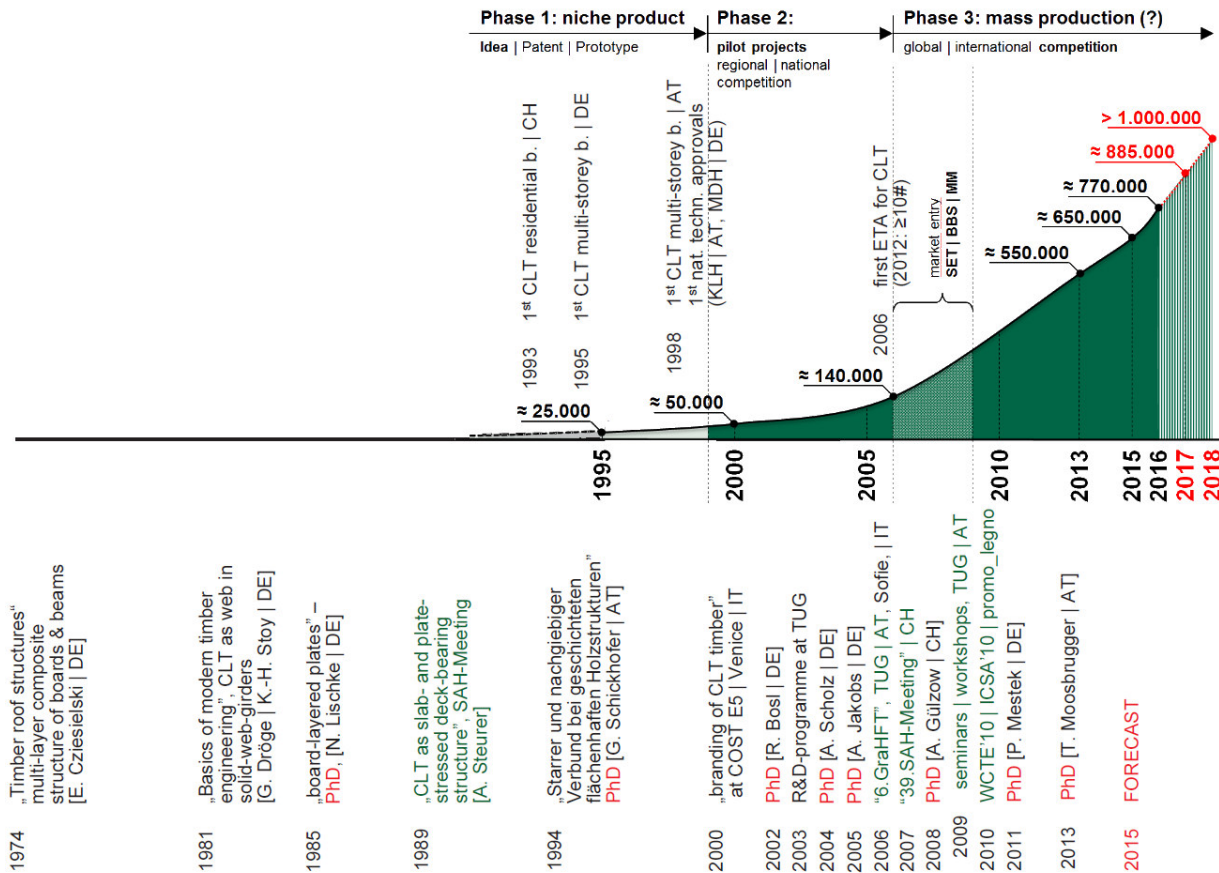


Abbildung 2-3: Entwicklung Brettsperrholz, zeitlicher Verlauf von Innovationsschritten und Produktionsmenge [9] [10]

### 2-1.3.2 Querschnitte, Bauteile und Einsatzbereiche

Brettsperrholz stellt ein massives, flächiges Tragelement dar, welches üblicherweise in Dimensionen von bis zu 3 m Breite (im Spezialfall auch bis 4,8 m) und 18 m Länge (im Spezialfall bis 30 m) hergestellt wird [7]. Im statischen Sinne findet es dabei Verwendung als Scheibe (vorwiegend in der Ebene beansprucht), Platte (vorwiegend aus der Ebene beansprucht) und Falwerk (räumliche Strukturen aus ebenen Einzelflächen, die sowohl in Scheiben- als auch in Plattenrichtung beansprucht werden) Anwendung. BSP-Produkte werden grundsätzlich unter kontrollierten Bedingungen industriell vorgefertigt und können problemlos in der Größe ganzer Wandscheiben hergestellt und mit vergleichsweise wenig Aufwand auf der Baustelle versetzt und montiert werden.

Durch die geschichtete Struktur lassen sich Platten und Scheiben einfach punktgestützt lagern, eine Verbindung verschiedener Elemente durch Schrauben oder eingeklebte Gewindestangen ist problemlos möglich. Außerdem lässt es sich noch als Balkonplatte, Stiegenlauf sowie als Fahrbahnplatte von Brücken einsetzen. Einen groben Überblick über den Einsatz von Brettsperrholz sowie die darin auftretenden Kräfte gibt Abbildung 2-4 am Beispiel des Rohbaus einer Wohnung.

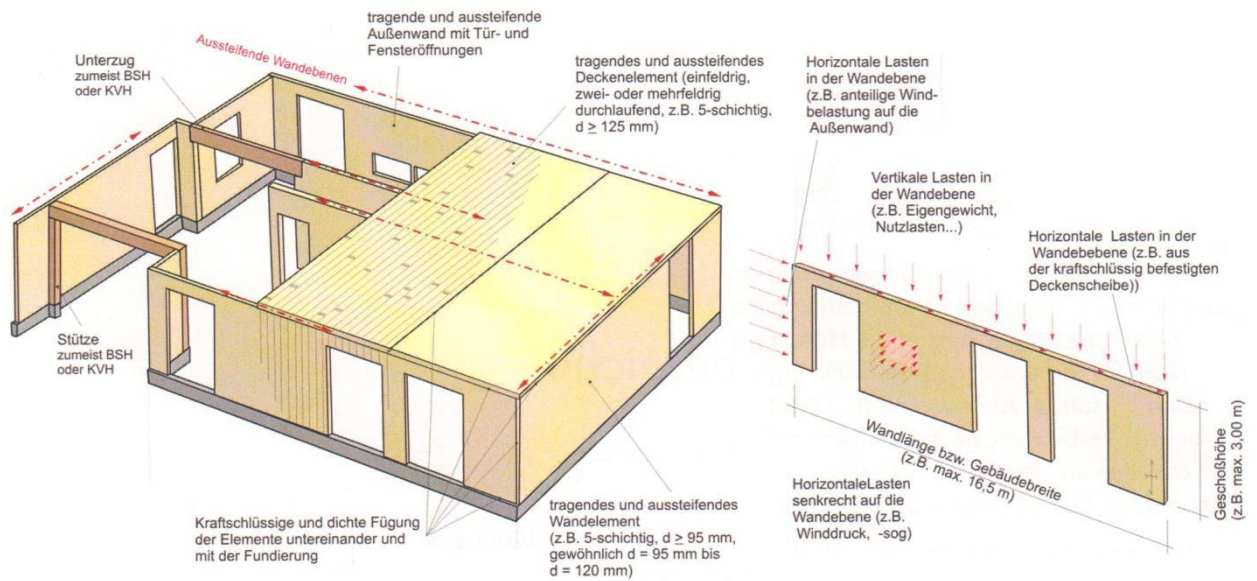


Abbildung 2-4: Verwendung von BSP-Elementen in tragender und aussteifender Funktion [1]

Neben einfachen, ebenen Platten gibt es noch andere, aufwändigere Querschnittsformen, welche aus der Addition verschiedener Brettsper Holz- und Brettschichtholzelemente entstehen (siehe Abbildung 2-5). Durch das Anbringen von Rippen können BSP-Platten zu Rippenplatten modifiziert werden, diese wiederum lassen sich durch eine zweite, an den Rippen befestigte BSP-Platte, zu einem Kastenquerschnitt erweitern.

Die Verbindung erfolgt dabei entweder durch Kleben oder mithilfe stiftförmiger oder anderer Verbindungsmittel, welche für die Übertragung der Schubkräfte in der Verbundfuge benötigt werden. Je nach Verbindungstyp ergibt sich dabei ein starrer oder nachgiebiger Verbund. Somit können große Spannweiten überbrückt und hohe Lasten bei geringem Eigengewicht der Konstruktion abgetragen werden.

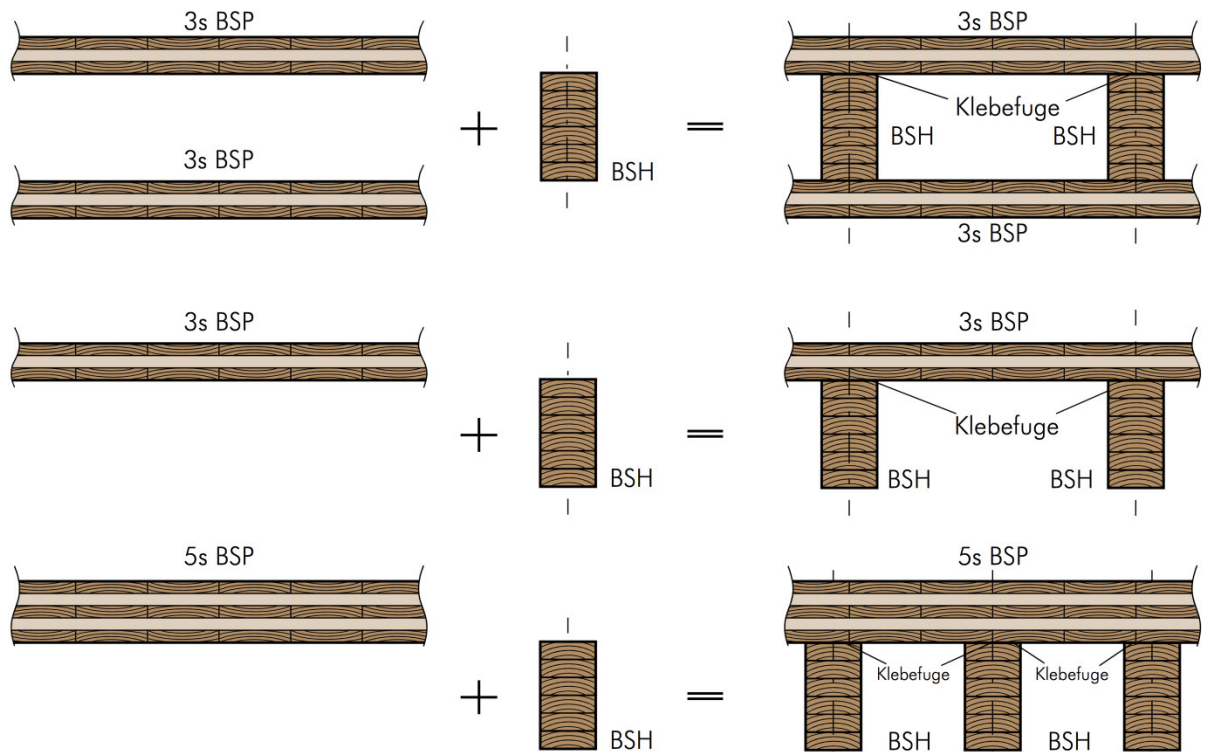


Abbildung 2-5: verschiedene Querschnittsformen und Anwendungen von Brettsper Holz [1]

Brettsperrholz kann in Form von kleinformatischen Platten, Großtafeln und Raumzellen eingesetzt werden (Abbildung 2-6). Je größer dabei die Elemente werden, desto höher ist der werkseitige Vorfertigungsgrad, während sich parallel dazu der Montageaufwand auf der Baustelle verringert. Kleinformative Bauteile ermöglichen eine verschnittarme Fertigung und erlauben großzügige Anpassungen und Umgestaltungen auf der Baustelle, erfordern dort aber eine Vielzahl von Montageaktivitäten. Großtafeln, welche üblicherweise die Ausmaße geschosshoher Wandelemente annehmen, können bereits mit allen Tür- und Fensteröffnungen vorgefertigt und bis hin zur Fassade und den Haustechnik-Installationen vollständig ausgestattet zur Baustelle gebracht werden. Das verkürzt die Bauzeit, erfordert aber gleichzeitig eine durchdachte und allen Anforderungen gerechte Ausführung der Fugen zwischen den Elementen sowie geringere Fertigungstoleranzen, da die Ausgleichsmöglichkeiten auf der Baustelle begrenzt sind. Auch Raumzellen lassen sich mit Brettsperrholz herstellen, hier steigen die Anforderungen an Genauigkeit, Verbindungstechnik und Fugenausbildung im Vergleich zu Klein- und Großtafeln jedoch noch einmal deutlich an. Der Vorfertigungsgrad hierbei kann bis zu 90% erreichen, was die Bauzeit deutlich verkürzt.

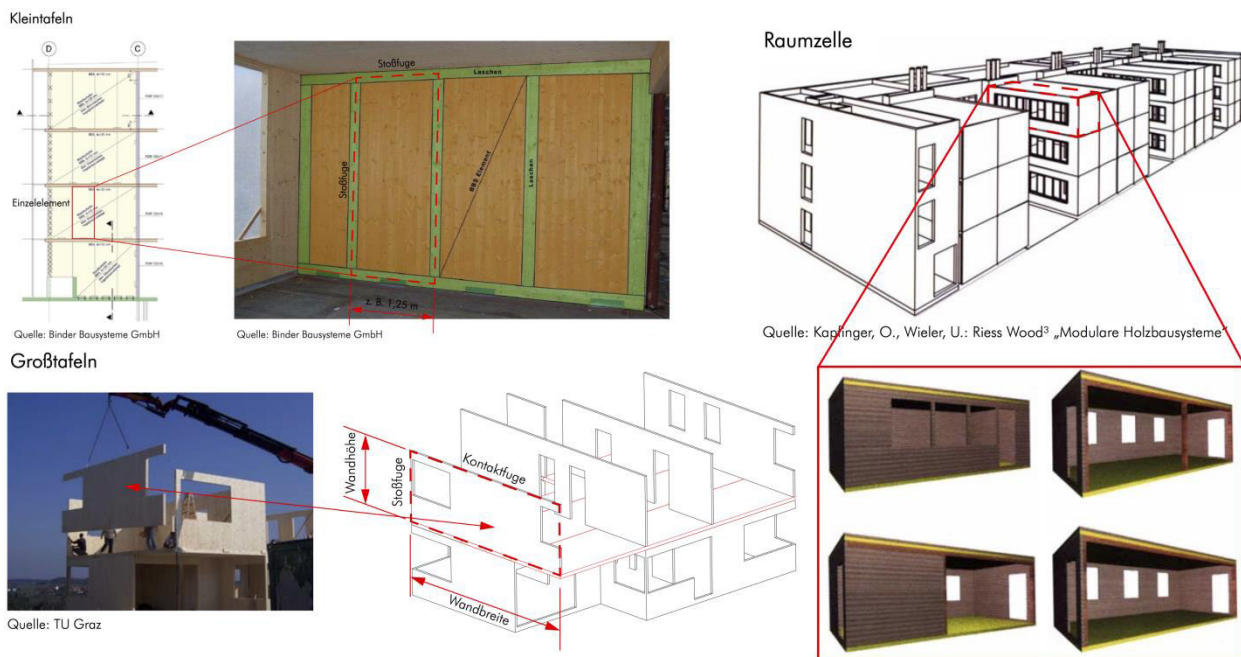


Abbildung 2-6: Einsatzmöglichkeiten von BSP, z.B. als Kleintafeln, Großtafeln und Raumzellen [1]

Neben der Verwendung in als einzeln wirkendes Scheiben- und Plattenelement kann Brettsperrholz auch für die Herstellung von Faltwerken verwendet werden, bei welchen durch die Aktivierung der Tragwerksflächen große Spannweiten mit wenig Materialeinsatz möglich sind (Abbildung 2-7). Insbesondere für Dachausbauten bzw. Erneuerungen von Steildächern bieten sich solche Tragsysteme an, da die vorhandene Geometrie so zugunsten der Lastabtragung genutzt werden kann und störende Stützen im Innenraum entfallen.

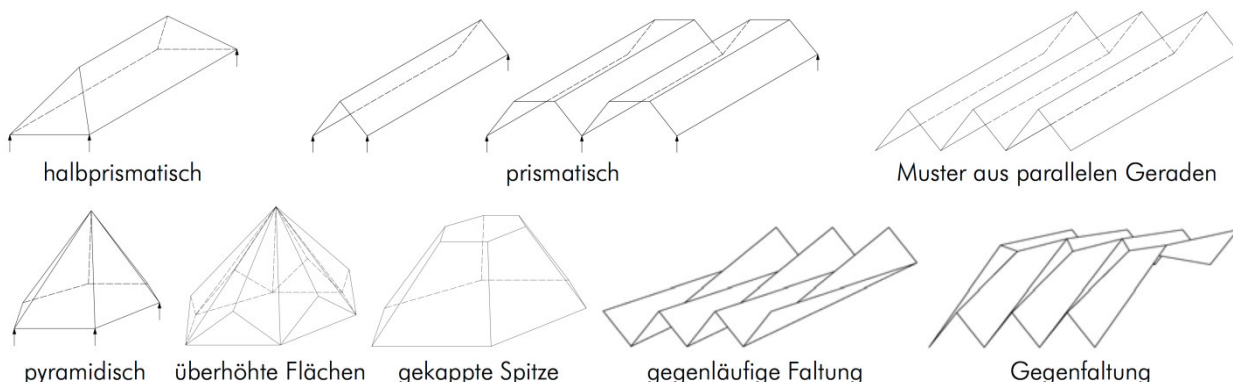


Abbildung 2-7: Formen von Faltungen, welche auch in BSP ausgeführt werden können [1]

Im innerstädtischen Raum können aufgrund des geringen Gewichts und der kurzen Montagezeiten problemlos Häuser unter Verwendung von BSP-Elementen aufgestockt werden, um so dringend benötigten Wohnraum in hoher Qualität und Quantität zu schaffen. Statisch ergeben sich dadurch aufgrund der meist starken Überdimensionierung von Altbauten kaum Probleme und auch die Erdbebenlast eines so aufgestockten Gebäudes erhöht sich zufolge der relativ geringen Ausbaumasse kaum. Die Verwendung von Raumzellen und großformatigen Modulen, welche sich zu Räumen und Wohneinheiten zusammenschließen lassen, kann hierbei, aber auch in vielen anderen Verwendungsfeldern, die Bauzeit senken und gleichzeitig die Ausführungsqualität erhöhen.

## 2-1.4 BSP-TECHNOLOGIE

In früheren Zeiten wurden Baumstämme als Ganzes oder durch einfache Bearbeitungsverfahren in Form gebracht und verbaut. Diese Vollholzquerschnitte waren einerseits durch die vorhandenen Bäume in ihrer Größe beschränkt und neigten andererseits auch zu stetigem „Arbeiten“ in Folge des Quellens und Schwindens des Holzes. Für moderne Baustoffe wird jedoch vorausgesetzt, dass diese sich nach dem Einbau weitgehend ruhig verhalten, in beliebiger Größe lieferbar sind und bauphysikalische Anforderungen wie Schall- und Luftdichtheit erfüllen. Entsprechend dem Zerlegungsgrad und des strukturellen Aufbaus werden Holzprodukte wie in Abbildung 2-8 folgendermaßen unterteilt.

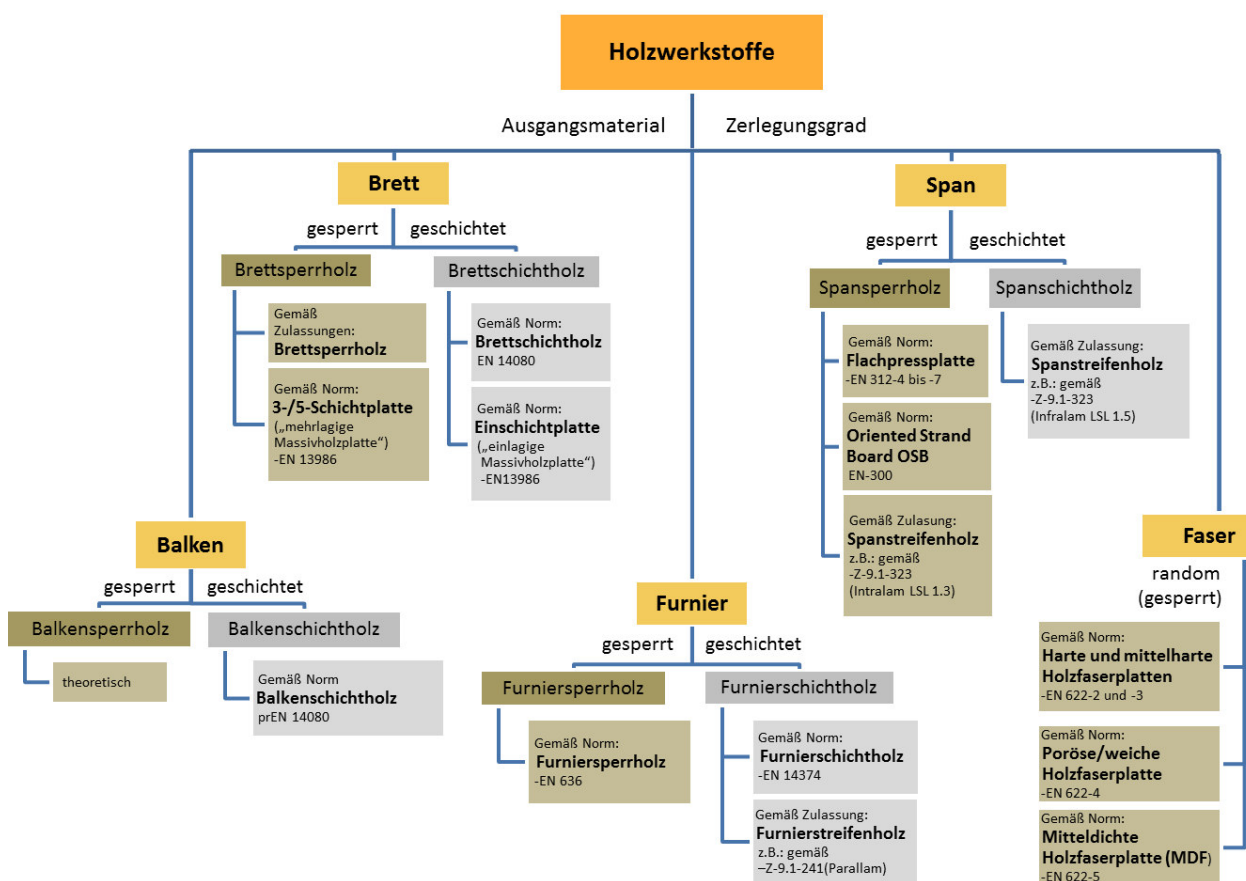


Abbildung 2-8: Einteilung der Holzwerkstoffe nach Zerlegungsgrad und Orientierung des Ausgangsprodukts [1]

In der Holzindustrie wurde lange Zeit nur der mittlere Teil des Baumstammes (Mittelware) als hochwertiges Bauholz gesehen, welches als Primärprodukt verkauft wurde. Die Seitenware wurde, trotz ihrer höheren Tragfähigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, eher als Nebenprodukt angesehen. Da durch die Verleimung zu großformatigen, flächenhaften Elementen die Abmessungen der einzelnen Bretter nicht mehr entscheidend waren, konnte dieses jedoch problemlos als Ausgangsmaterial für die Brettspertholzproduktion verwendet werden. Durch den großen Erfolg der Holz-Massivbauweise mit

Brettsperrholz wurden allerdings bald größere Mengen an Holz benötigt als durch Seitenware gedeckt werden konnten, weshalb letztendlich auf das Grundmaterial aus der Brettschichtholzindustrie zurückgegriffen werden musste.

### 2-1.4.1 Ausgangsprodukte

Als Ausgangsprodukt für die Produktion von Brettsperrholz kommt stets Holz, hauptsächlich in Form von Brettern, vereinzelt aber auch in Form von Balken oder Holzwerkstoffen wie Spanplatten und Großspanplatten (OSB, „oriented strand board“ bzw. „oriented structural board“) zum Einsatz. Die Qualität und die Materialeigenschaften des einzelnen Bretts sind für die Eigenschaften des fertigen Produkts Brettsperrholz dabei von entscheidender Bedeutung. Um BSP einer bestimmten Festigkeitsklasse herzustellen, müssen auch die dafür verwendeten Lamellen (keilgezinkte Bretter) eine bestimmte Festigkeitsklasse aufweisen. Üblicherweise erfolgt die Sortierung der Lamellen einer T-Klassierung nach Zugkenngrößen. Für eine charakteristische Biegefestigkeit des Brettsperrholzes bei Plattenbeanspruchung,  $f_{m,k}$  von 24 N/mm<sup>2</sup> müssen etwa die Lamellen einer T-Klasse von T14 gemäß ÖNORM EN 14080 [11] entsprechen.

Als Holzart kommt im europäischen Raum hauptsächlich die Holzart Fichte (*Picea abies*) zum Einsatz, welche zudem problemlos mit Tanne kombinierbar ist. Des Weiteren können auch die Holzarten Kiefer, Esche, Buche, Eiche, Lärche oder Birke verwendet werden. Üblicherweise besteht eine BSP-Platte aus Lamellen einer einzigen Holzart und -festigkeit. Im Zuge optimierter Querschnittsgestaltung können jedoch beispielsweise geringere Festigkeitsklassen derselben Holzart oder Holzarten mit geringerer Festigkeitsklasse für die Querlagen eingesetzt werden, da diese für die maßgebende Belastung nur von untergeordneter Bedeutung sind. Ferner haben Lamellen bzw. Bretter geringerer Festigkeitsklassen in der Regel einen höheren Astanteil, was zu einer, für die Querlagen optimalen, tendenziell höheren Rollschubfestigkeit führt. Gleichzeitig lässt sich damit das gesamte, in einem Stamm vorhandene Holz in technischer wie auch in ökonomischer Hinsicht besser nutzen.

### 2-1.4.2 Herstellung

Die Herstellung von Brettsperrholz setzt sich aus einer Reihe voneinander unabhängiger Produktionsschritte zusammen, welche auch von unterschiedlichen Firmen an unterschiedlichen Standorten durchgeführt werden können. Eine Übersicht des Herstellungsvorgangs ist in Abbildung 2-9 angeführt.

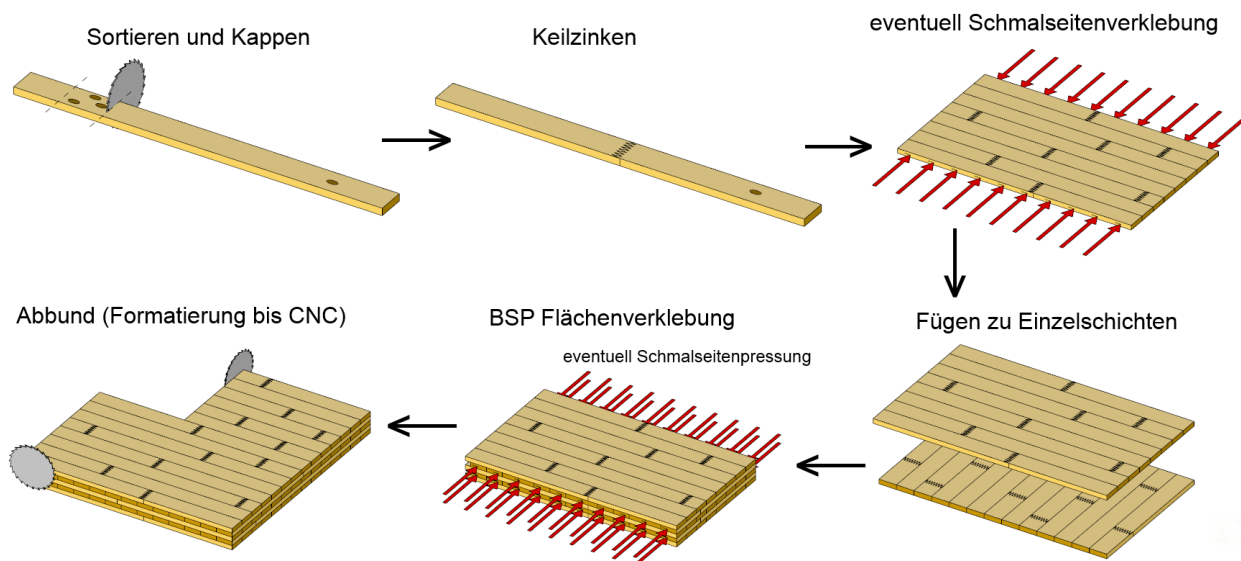


Abbildung 2-9: Übersicht über die einzelnen Herstellungsschritte von Brettsperrholz

Die Sortierung erfolgt vorwiegend maschinell, bevorzugt kommt dabei Holz der Festigkeitsklasse C24 bzw. T14 zum Einsatz. Für Querlagen können, um den Querschnittsaufbau zu optimieren, auch die

Festigkeitsklassen C16 und C18 verwendet werden. Höhere Festigkeitsklassen von Nadelhölzern sowie generell Laubhölzer kommen nur in seltenen Fällen zur Anwendung.

Zuerst werden lokale Fehlstellen aus den Brettern gekappt, bevor die verbleibenden Teile mittels Keilzinkung zu Endloslamellen verbunden werden. Diese Technik ermöglicht es, Bretter auf eine höhere Sortierklasse zu heben und so den vorhandenen Rohstoff Holz optimal zu nutzen. Wichtig in der Lamellenproduktion ist eine möglichst gleichmäßige Dickenhobelung, da nebeneinanderliegende Lamellen ansonsten nicht mit gleichmäßigem Anpressdruck und damit gleicher Fugenqualität miteinander verklebt werden können.

Die Lamellen einer Schicht werden üblicherweise Mann-an-Mann verlegt, kleine Fugen zwischen den Lamellen stellen grundsätzlich kein Problem dar, da sie sich auf das Systemverhalten im Sinne von Festigkeit und Steifigkeit kaum auswirken. Zu große Fugen verringern jedoch die Rollschubfestigkeit und die Luftdichtigkeit sowie die Oberflächenqualität im Fall von sichtbar eingebauten BSP-Elementen. Manche Hersteller verkleben die Seiten grundsätzlich, bevor mehrere Schichten zu einer Platte zusammengefügt werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass bei größeren Schichtdicken und geringer Luftfeuchte Trocknungsrisse innerhalb der Lamellen auftreten können, welche sich sonst durch eine leichte Öffnung der Fugen zwischen diesen manifestieren (Abbildung 2-10). Für BSP-Platten gibt es keine Anforderungen an die Tragfähigkeit der Seitenverklebung. Werden aus mehreren Lamellen jedoch einschichtige Massivholzplatten für tragende Zwecke hergestellt, muss die Seitenverklebung eine Mindestscherfestigkeit von  $2,5 \text{ N/mm}^2$  aufweisen, welche nach einer je nach Nutzungsklasse unterschiedlich festgelegten Vorbehandlung erreicht werden muss.

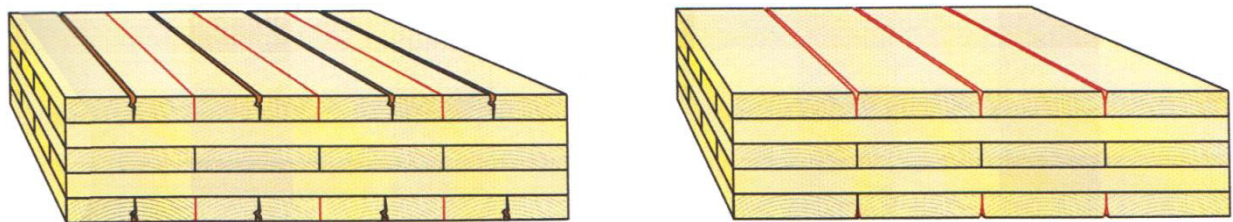


Abbildung 2-10: Rissbildung bei BSP unter niedriger Luftfeuchte mit (links) und ohne (rechts) Seitenverklebung [1]

Zur flächenhaften Verbindung der Einzelschichten ist eine sorgfältige Verklebung und Verpressung notwendig. Die dabei geltenden Richtlinien wurden hauptsächlich im Zuge von Forschungsprojekten für Brettschichtholz erarbeitet und später dann auf Brettspertholz adaptiert. Die grundsätzliche Aufgabe bleibt dabei dieselbe, allerdings sind die Anforderungen an die Menge des aufzutragenden Klebstoffes bei Brettspertholz wesentlich höher, da aufgrund der flächenhaften Ausdehnung kein seitliches Herausdrücken von überschüssigem Klebstoff möglich ist. Der Klebstoff wird, wie in Abbildung 2-11 dargestellt, entweder auf einzelne Lamellen aufgetragen, bevor diese zu einem BSP-Element zusammengefügt werden oder der Klebstoffauftrag erfolgt auf eine gesamte Schicht gleichzeitig, über welche sich ein mobiles Beleimungsportal bewegt.

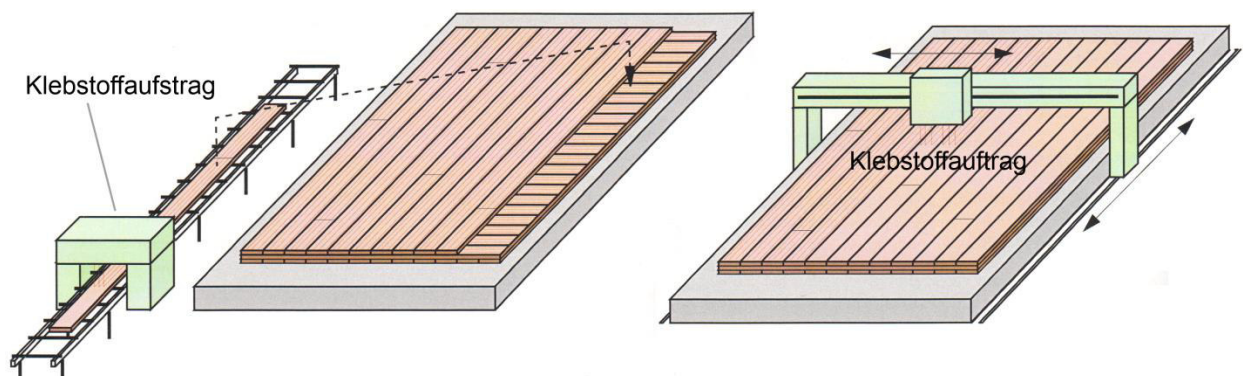


Abbildung 2-11: Beleimung von BSP-Elementen an einzelnen Lamellen (links) und über die gesamte Fläche (rechts) [1]



Der Klebstoff hält nach dem Abbinden das gesamte Lamellengefüge starr und dauerhaft zusammen, wodurch das Produkt Brettspertholz erst entsteht. Als Anforderungen an den Klebstoff gelten neben einer gewissen Mindestzug- und Scherfestigkeit auch die Dauerhaftigkeit und das Verhalten unter Feuchteinfluss sowie im Brandfall. Als Klebstoff verwendet werden vorwiegend Aminoplaste (Melamin Formaldehydklebstoff (MF), Melamin Harnstoff Formaldehydklebstoff (MUF)) und einkomponentige Polyurethanklebstoffe (1K-PUR).

Polyurethanklebstoffe zeichnen sich dabei durch eine einfache Verarbeitung und geringe Anforderungen aus. Lediglich eine Mindestholzfeuchte von 8-10 % muss eingehalten werden, um ein Aushärten des Klebstoffes zu gewährleisten. Die Temperaturbeständigkeit ist jedoch geringer als bei Aminoplasten. Diese wiederum weisen zusätzlich dazu noch einen niedrigeren Preis auf, haben aber deutlich höhere Anforderungen an die Verarbeitung, welche daher nur mit ausreichendem Know-How verwendet werden können.

Zur Verklebung der Brettspertholzelemente wird eine möglichst gleichmäßige Flächenpressung benötigt. Diese wurde an sich zur Herstellung von Brettschichtholz entwickelt, wird aufgrund der ähnlichen Voraussetzungen und Anforderungen aber auch zur Brettspertholzproduktion weitgehend gleich eingesetzt. Je nach dem verwendeten Klebstoff gelten unterschiedliche Anforderungen und Pressdrücke. Als Mindestpressdruck sind dabei  $0,6 \div 0,8 \text{ N/mm}^2$  vorgesehen, welche üblicherweise hydraulisch aufgebracht werden. Um eine zu große Verdrehung oder Schüsselung der Lamellen zu vermeiden, sollte die Verklebung möglichst rasch nach der Hobelung erfolgen.

Bei der Anwendung kalt aushärtender Klebstoffe muss das gesamte BSP-Element auf einmal gepresst werden, was aufgrund der dafür nötigen Presskräfte einen hohen maschinenbaulichen Aufwand bedeutet. Wird der Klebstoff durch höhere Temperaturen mittels hochfrequenter Strahlung ausgehärtet, können die Schichten abschnittsweise miteinander verklebt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Flächenpressung stellt die Vakuumtechnik dar, bei welcher die zu verklebenden Schichten mit einer luftdichten Folie umschlossen und dann unter Vakuum gesetzt werden. Damit kann allerdings maximal ein Pressdruck von  $0,1 \text{ N/mm}^2$  erreicht werden, was entweder das Anbringen von Entlastungsnuten oder höhere Anforderungen an Ebenheit, Verdrehung und Krümmung erfordert, um dennoch eine vollständige Verklebung zu gewährleisten. Der große Vorteil dabei besteht darin, dass auch gekrümmte Elemente herstellbar sind, was bei normaler, hydraulischer Flächenpressung nicht möglich ist.

Um den maschinentechnischen Aufwand zu verringern, kann auch auf Generalkeilzinkverbindungen zurückgegriffen werden. Dabei werden kleinere BSP-Elemente hergestellt, welche nachher über die volle Stärke mit Keilzinken verbunden werden. An den Keilzinkstellen muss jedoch die Biegefestigkeit reduziert werden.

Nach Aushärten des Klebstoffes wird die BSP-Platte noch besäumt, wobei von stumpfen Stößen über Fälze und Nuten so gut wie alles möglich ist. Die Oberfläche kann belassen, geschliffen oder durch Aufbringen weiterer Schichten verändert werden. Durch CNC-gesteuerten Abbund können auch Tür- und Fensteröffnungen sowie Fräbungen für Verbindungselemente und Leitungsführungen angebracht werden.

### 2-1.4.3 Mechanische und physikalische Eigenschaften

Die Abmessungen und Schichtdicken von Brettspertholz sowie die Maße der zur Herstellung verwendeten Bretter sind in der ÖNORM EN 16351 [12] geregelt und richten sich nach konstruktiven Anforderungen und technisch/logistischen Beschränkungen. Als Brettspertholz gilt demnach ein flächiges Bauteil, welches aus mindestens drei Lagen  $90^\circ$  zueinander verdrehter Lamellen oder Holzwerkstoffelemente besteht, wobei mindestens zwei dieser Lagen Lamellen sein müssen. Der Bereich für die Lagendicke wird darin mit 6 – 60 mm angegeben, wobei die äußerste Brettlage zwischen 6 und 45 mm dick sein darf. Für die Lamellenbreite gelten 40 – 300 mm als Grenze. Diese Lamellen können an den Schmalseiten verklebt werden, dürfen aber auch Fugen von maximal 6 mm Breite aufweisen. Die Gesamtdicke des Elements darf dabei maximal 500 mm aufweisen. Als Material dürfen kein Altholz sowie Holzwerkstoffe aus Altholz verwendet werden. [12]

Brettsper Holzplatten dürfen auch mit Generalkeilzinkverbindungen zusammengefügt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die äußeren Lagen mindestens 17 mm dick sind und die Länge der Keilzinken mindestens 45 mm beträgt. [12]

Brettsper Holz darf laut ÖNORM EN 16351 [12] nur für die Nutzungsklassen NK1 und NK2 gemäß EN 1995-1-1 [13] verwendet werden. Aufgrund der neuartigen und im klassischen Holzbau nicht auftretenden Beanspruchung des Holzes auf Rollschub, welche sich in den Querlagen von BSP-Platten ergibt, mussten dafür erst Kennwerte ermittelt werden. Grundsätzlich können im Holz drei Richtungen mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgemacht werden: Längs (in Faserrichtung), Radial und Tangential (Abbildung 2-1). Da sich Radial und Tangential in Bezug auf ihre Eigenschaften aber nicht so stark unterscheiden und in größeren Holzquerschnitten diese Richtungen oft nicht mehr genau zugeordnet werden können, wurde für die Bemessung eine Reduktion auf „in Faserrichtung“ und „quer zur Faserrichtung“ durchgesetzt. Zusätzlich zu den bekannten Festigkeits- und Steifigkeitskenngrößen in diese beiden Richtungen werden für die Bemessung von Brettsper Holz noch die Rollschubfestigkeit und der Rollschubmodul verwendet. Zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens zufolge einer Rollschubbeanspruchung wurden eigene Deformationsbeiwerte  $k_{def}$  gemäß EN 1995-1-1 [13] eingeführt.

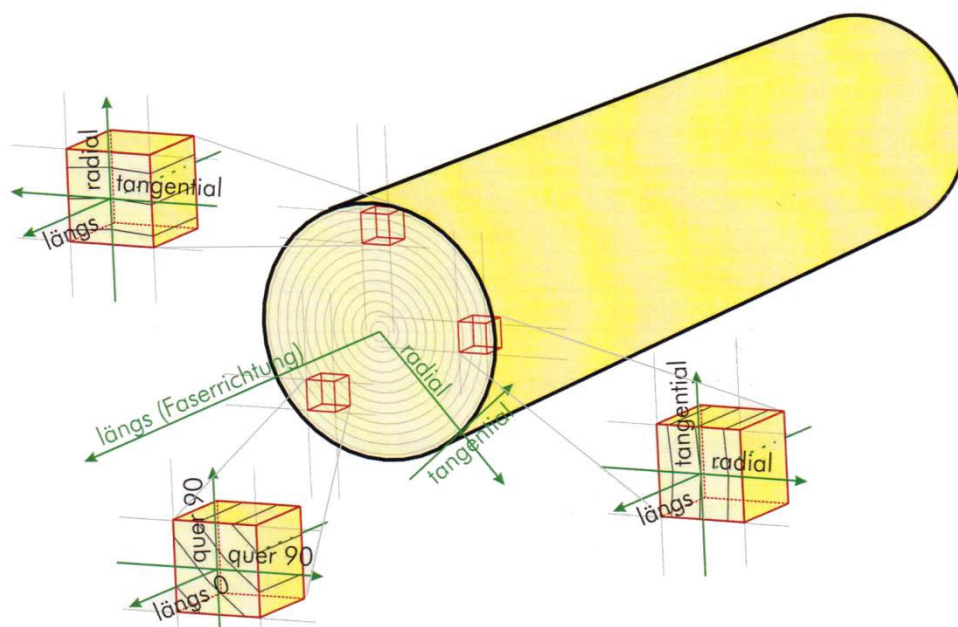


Abbildung 2-12: Hauptrichtungen, in welche Holz unterschiedliche Eigenschaften aufweist [1]

Zur Berechnung des Biegetragverhaltens von BSP wird dessen schichtweiser Aufbau modellhaft nachgebildet. Dabei kann auf die bereits bekannten Festigkeitskenngrößen der einzelnen Lamelle zurückgegriffen werden. Aufgrund der Sortierung und des Systemverhaltens kann eine geringere Streuung als bei Vollholz angesetzt werden, was zu einer um ca. 20% höheren Biegefestigkeit bei Verwendung derselben Festigkeitsklasse für beide Produkten führt. Die Querlagen von BSP-Platten sind bei einer Beanspruchung in Längsrichtung aufgrund der Orthotropie des Holzes jedoch deutlich „weicher“ und führen zu einer zusätzlichen Verformung, welche bei Längen/Höhen-Verhältnissen eines Bauteils von ca. 20 bei etwa 10% liegt. Es gibt eine Reihe von Berechnungsansätzen, welche meist eine Näherungslösung für den schubnachgiebigen mehrschichtigen Verbundbalken darstellen. Je schlanker die Bauteile, desto mehr nähern sich dabei die verschiedenen Verfahren an, Probleme treten vor allem im Auflagerbereich und an den Mittelauflagern von Durchlaufträgern auf.

Die Biegesteifigkeit einer BSP-Platte wird in der Bemessung stets als Summe der Biegesteifigkeiten der einzelnen Schichten und ihrer Steiner-Anteile gebildet, wobei die Steifigkeit der Querlagen aufgrund ihres geringen Beitrags dazu auf null gesetzt werden, was gleichzeitig den Ausfall der Querlagen aufgrund von Querspannungen vorwegnimmt.

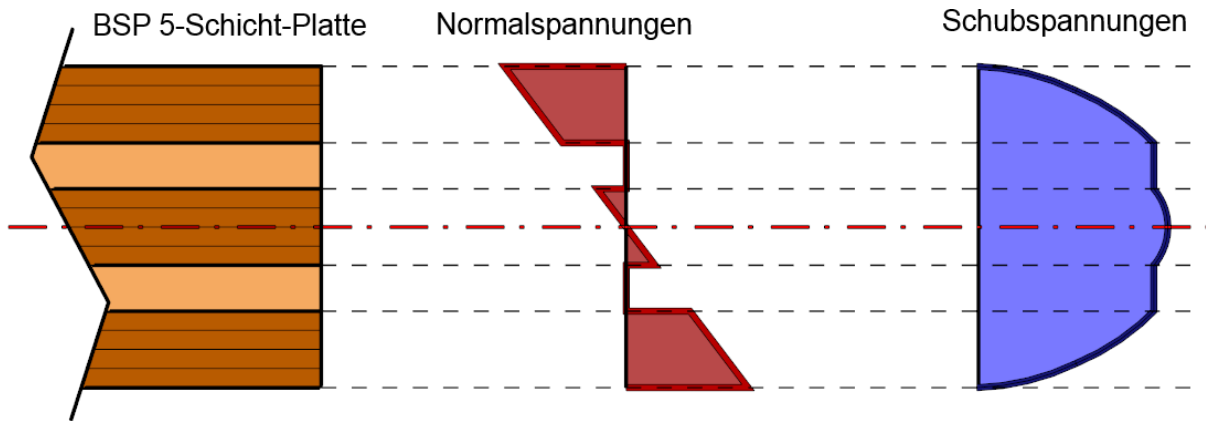


Abbildung 2-13: Normal- und Schubspannungsverlauf einer 5-schichtigen BSP-Platte zufolge einer Plattenbiegebeanspruchung [1]

Die Schubfestigkeit von BSP entspricht ebenfalls der des Grundmaterials: Für den Rollschub spielt jedoch die Lamellenbreite bzw. das Vorhandensein von Entlastungsnuten eine entscheidende Rolle. Diese schwächen die Schubtragfähigkeit und es kommt leichter zur Bildung von Quersgrissen, was zu einem Abrollen der Holzfasern aneinander führt. Zur Ermittlung der Schubsteifigkeit eines Querschnitts wird die Summe aus den Schubsteifigkeiten der einzelnen Schichten gebildet, wobei für die Längslagen der Schubmodul parallel zur Faser und für die Querlagen der Rollschubmodul angesetzt wird.

In Scheibenebene wird Schub im Wesentlichen durch zwei Mechanismen abgetragen (Abbildung 2-14). Im ersten Mechanismus wirken Schubspannungen im Nettoquerschnitt zwischen den Fugen. Diese sind bei BSP normalerweise sehr klein, wodurch es durch die orthogonal dazu verlaufenden Schichten zu einer deutlichen Erhöhung der Schubtragfähigkeit kommt. Der zweite Mechanismus tritt in den Klebeflächen zwischen den Schichten auf und erzeugt Schubwiderstand durch Torsion.

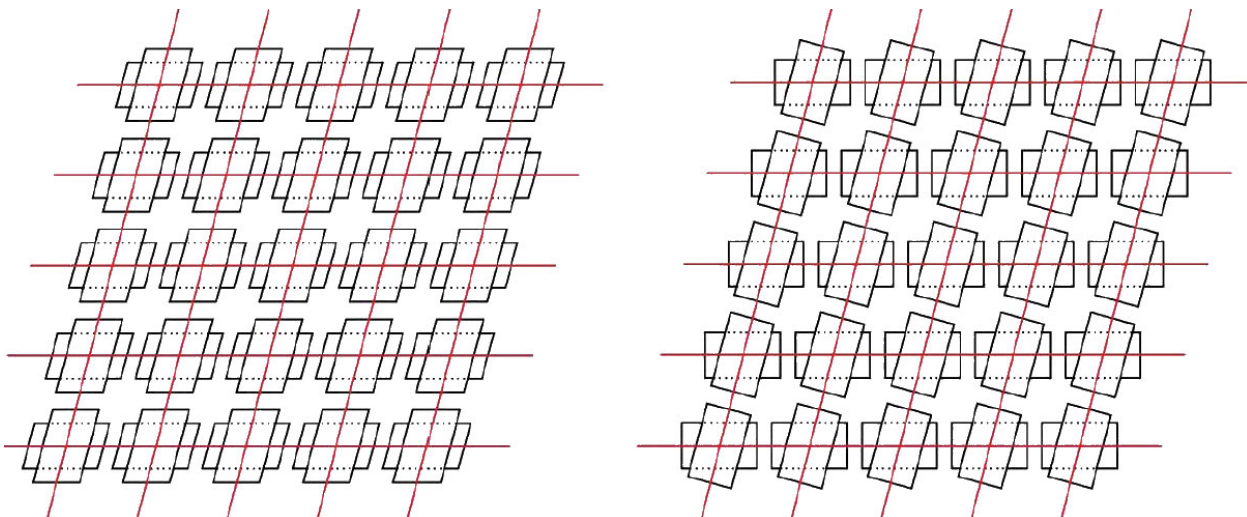


Abbildung 2-14: Schubabtragung im BSP, Mechanismus 1 „Schub“ (links) und Mechanismus 2 „Torsion“ (rechts) [14]

Vereinfacht betrachtet entspricht das Brandverhalten von Brettspertholz im Wesentlichen dem von Vollholz. Unterschieden werden kann zwischen Abbrand mit temperaturbeständigem Klebstoff und Abbrand ohne temperaturbeständigen Klebstoff. Die Abbrandgeschwindigkeit der ersten Lage ist dabei immer gleich und entspricht, sofern keine zu großen Fugen vorhanden sind ( $> 6 \text{ mm}$ ), der von Vollholz. Bei der Verwendung eines Temperaturbeständigen Klebstoffes bleibt die Abbrandgeschwindigkeit über die gesamte Querschnittsdicke konstant, wodurch sich das Brandverhalten in diesem Fall nicht von einem Vollholzquerschnitt unterscheidet. Wird hingegen ein nicht brandbeständiger Klebstoff verwendet, fällt die äußerste Lage ab, sobald sich die abgebrannte Schicht der Klebefuge nähert und legt die

darunterliegende Lage frei. Diese verfügt zu diesem Zeitpunkt noch nicht über eine Kohleschicht und brennt daher anfangs mit der doppelten Geschwindigkeit, bis sich nach etwa 25 mm eine neue Kohleschicht bildet und sich wieder die gleiche Abbrandgeschwindigkeit wie zu Beginn einstellt (Abbildung 2-15).

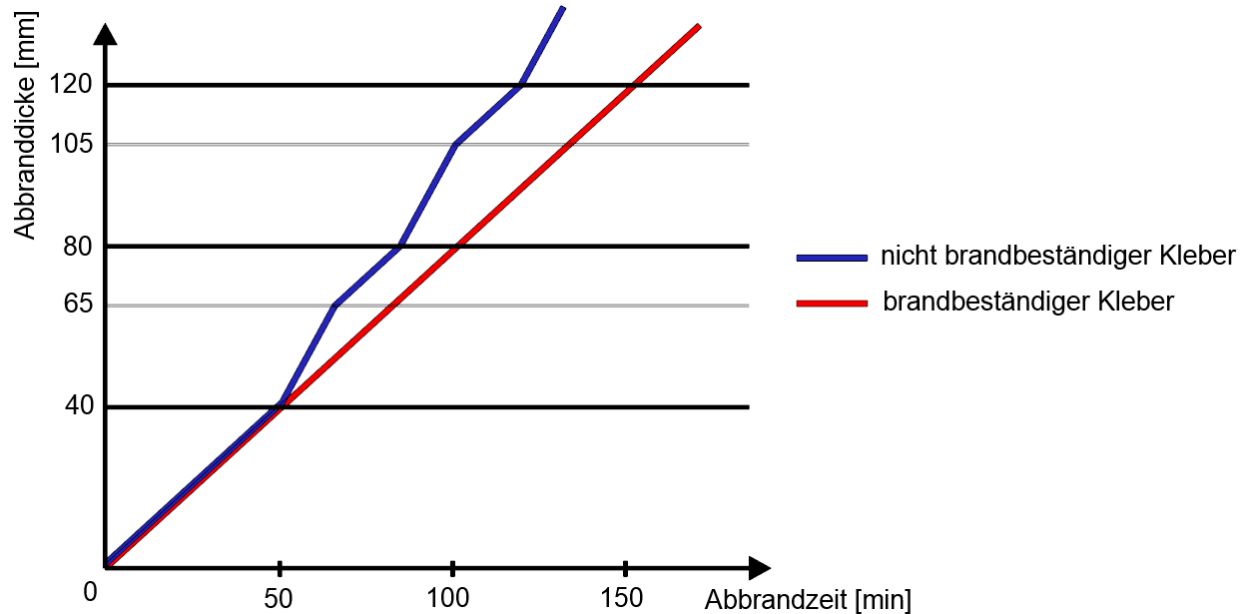


Abbildung 2-15: Abbrandkurven von Brettspertholz mit brandbeständigem und nicht brandbeständigem Klebstoff [15]

Da die Holz-Massivbauweise mit Brettspertholz von sich aus schon auf Vorfertigung angewiesen ist und ihre Stärken umso besser ausspielen kann, je höher der Vorfertigungsgrad liegt, ist sie geradezu prädestiniert dazu, für Fertigteil- und Modulbauweisen eingesetzt zu werden. Diese reichen von vergleichsweise einfachen Wandelementen, aus denen bereits im Werk Fenster- und Türöffnungen ausgeschnitten werden über vollständig mit Haustechnik ausgestattete Wand- und Deckenelemente, modulare Bausysteme verschiedener Größenordnungen und Komplexitäten bis hin zur Raumzellenbauweise, in der ganze Räume vorproduziert und auf der Baustelle nur mehr versetzt werden. Um einen Überblick über den Begriff der Modulbauweise zu schaffen, wird im folgenden Abschnitt 2-2 auf deren geschichtliche Entwicklung und den aktuellen Stand der Technik eingegangen und anhand von konkreten Projekten beleuchtet, wie sich diese Bauweise letztendlich manifestiert.

## 2-2 ÜBERBLICK MODULBAUWEISE

### 2-2.1 DEFINITION

„Als Modul bezeichnet man zum einen das Grundmaß für ein geometrisches Ordnungssystem und zum anderen ein Element, das auf Grundlage eines Ordnungsprinzips in einem System positioniert wird, z.B. Stützen, Wandtafeln, Raumzellen. Die Maßeinheit der Moduln ist eine technische Größe und wird als Modul (M) bezeichnet. Bei der Gebäudeplanung werden darauf aufbauend für den Roh- und Ausbau Grundmaße festgelegt.“ [Staib 2008, S.44] [16]

Als Modul wird grundsätzlich jedes vorgefertigte Bauelement bezeichnet, angefangen bei Ziegeln und Fliesen über Stahlträger, Fenster und Türen bis hin zu ganzen Wänden, Decken und Raumzellen, welche bereits fertig ausgestattet auf die Baustelle kommen. In dieser Arbeit wird speziell auf großformatige Bauteile und Raumzellen eingegangen, welche nur einen kleinen Teil des sehr weiten Definitionsbereichs der Modulbauweise einnehmen.

Die Modulbauweise mit großformatigen Elementen sowie der Einsatz von Raumzellen haben die wesentliche Eigenschaft, dass Gebäudeteile nicht vor Ort unter Baustellenbedingungen, sondern im Werk unter kontrollierten Bedingungen hergestellt werden. Dies ist auf der einen Seite mit einem hohen Grad an Vorausplanung und Organisation verbunden, ermöglicht es aber andererseits, in kurzer Zeit Gebäude in hoher Qualität zu errichten, welche bei entsprechender Gestaltung und Ausführung von außen gar nicht als Modulbauten erkennbar sind.

Auch wenn modulare Fertigungssysteme eher der Maschinenbau- und Elektrotechnikbranche sowie der Automobilindustrie zugerechnet werden, gibt es auch im Bauwesen eine lange Geschichte der Verwendung vorgefertigter Bauteile, auf welche im Folgenden näher eingegangen wird.

### 2-2.2 GESCHICHTE DER MODULBAUWEISE

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [16] angeführten Literatur.

Die systematische Verwendung raumgroßer Module ist zwar eine relativ junge Bauweise, einzelne Bauteile wie Bretter, Pfosten und Ziegel werden jedoch schon seit Jahrtausenden vorgefertigt.

#### 2-2.2.1 Nomaden, Sesshaftwerdung und Baugeschichte bis zur Neuzeit

Die ersten Beispiele vorgefertigter und aus Modulen bestehender Bauten reichen viele Jahrtausende zurück. Es handelt sich dabei um verschiedene Arten von Schutzdächern, Zelten und temporären Unterkünften, welche leicht transportiert, aufgebaut und wieder zerlegt werden konnten. Als Beispiel hierfür können Jurten angeführt werden (Abbildung 2-16).

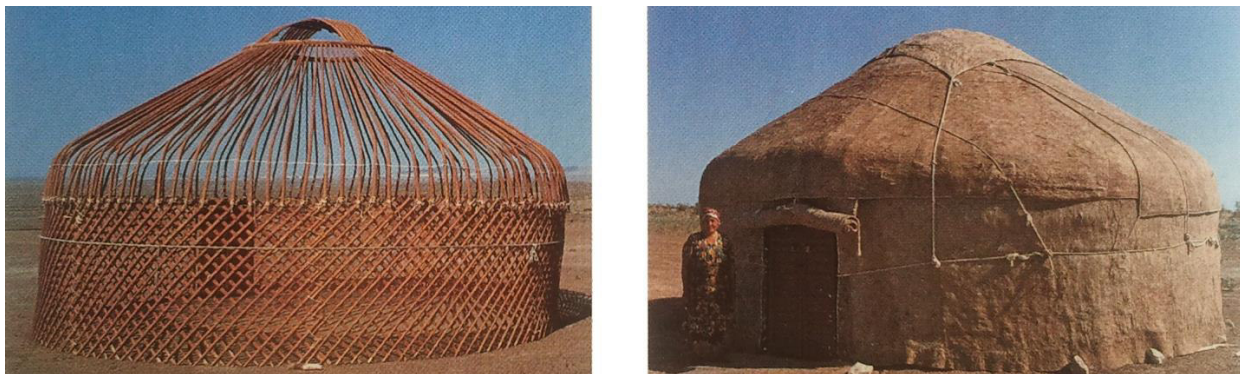


Abbildung 2-16: Jurte als Beispiel für frühe transportable Behausung, Tragkonstruktion (links) und mit Textilien bespannt (rechts) [16]

Als Materialien kamen dabei Baumstämme, Äste, Tierfelle und Häute zum Einsatz, welche mit einfachsten Werkzeugen bearbeitet wurden. Um ein schnelles Auf- und Abbauen zu gewährleisten, wurden bereits damals leicht zu handhabende, standardisierte Module verwendet. Der Erfolg dieser Bauweise zeigt sich unter anderem daran, dass manche Typen dieser transportablen Behausungen auch heute noch verwendet werden.

Nach der Sesshaftwerdung des Menschen war die Transportier- und Wiederverwendbarkeit von Behausungen nicht mehr von großem Interesse. Stattdessen wurden feste, an einen Ort gebundene Gebäude bevorzugt. Diese wurden jedoch wiederum häufig aus normierten, nahezu beliebig kombinierbaren Elementen, wie beispielsweise Ziegeln oder exakt behauenen Natursteinen hergestellt. Aus Ziegeln wurden im vorderen Orient bereits um etwa 3500 v. Chr. Tempelanlagen und ganze Städte errichtet. Eines der beeindruckendsten Bauwerke stellt dabei der Zikkurat von Ur dar (Abbildung 2-17).

Die Griechen entwickelten für den Bau ihrer Tempel ein genaues Maß und Ordnungssystem, mit welchem sich nach strengen ästhetischen Kriterien Sakralbauten verschiedenster Größe herstellen ließen. Die Römer übernahmen viele Errungenschaften der von ihnen unterworfenen Völker und entwickelten damit unter anderem auch ein Baukastensystem, mit welchem selbst in weit entfernten Kolonien gleichartige, aus vorgefertigten Elementen bestehende Tempelbauten errichtet werden konnten. Im Mittelalter wurde diese Tradition durch die filigranen, komplexen Systemen gehorchenden Kirchenkonstruktionen der Gotik fortgesetzt. Dabei wurden exakt behauene Steine nach detaillierten Plänen von verschiedenen Steinmetzen bearbeitet und auf der Baustelle nur mehr aneinander gefügt.



*Abbildung 2-17: Zikkurat von Ur, 2100 v. Chr., errichtet aus Ziegeln [16]*

Das Material Holz wurde anfangs für sehr einfache Konstruktionen verwendet, die aus wenigen aneinander gelehnten Ästen oder Baumstämmen bestanden, welche dann mit Zweigen oder Stroh abgedeckt wurden. Daraus entwickelten sich größere Pfostenbauten, bei denen Hölzer in bestimmten, meist gleichmäßigen Abständen in den Boden gerammt wurden. Der Zwischenraum wurde dann mit einem mit Lehm bestrichenen Flechtwerk ausgefüllt. Später kamen verschiedene horizontale und vertikale Konstruktionsteile hinzu, welche jeweils eine spezifische Aufgabe erfüllten und in erster Linie die Tragstruktur des Gebäudes bildeten, während der Raumabschluss von anderen Elementen übernommen wurde.

Dieser Skelettartigen Anordnung von Holzelementen lag meist ein gewisses Raster zugrunde, welches den Einsatz einer großen Zahl gleichartiger, nahezu beliebig kombinierbarer Elemente ermöglicht, durch welche sich eine Vielzahl verschiedener Gebäude errichten lässt. Modular aufgebaute Skelettsysteme aus Holz wurden über viele Jahrhunderte über die ganze Welt verteilt in den verschiedensten Ausformungen errichtet. Ein sehr bekanntes Beispiel stellen dabei die für deutsche Altstädte typischen Fachwerkhäuser dar (Abbildung 2-18). Viele dieser Systeme sind bis heute im Einsatz. Als besonders populär hat sich dabei der Holzrahmenbau erwiesen, bei welchem Träger und Stützen bereits entweder einseitig oder beidseitig beplankt im Werk vorgefertigt werden und auf der Baustelle nur mehr zusammengefügt und – im erstgenannten Fall – auf der Innenseite beplankt werden müssen. Das ermöglicht einen sehr schnellen Bauablauf ohne besondere zimmermannsmäßige Kenntnisse der beteiligten Arbeiter.

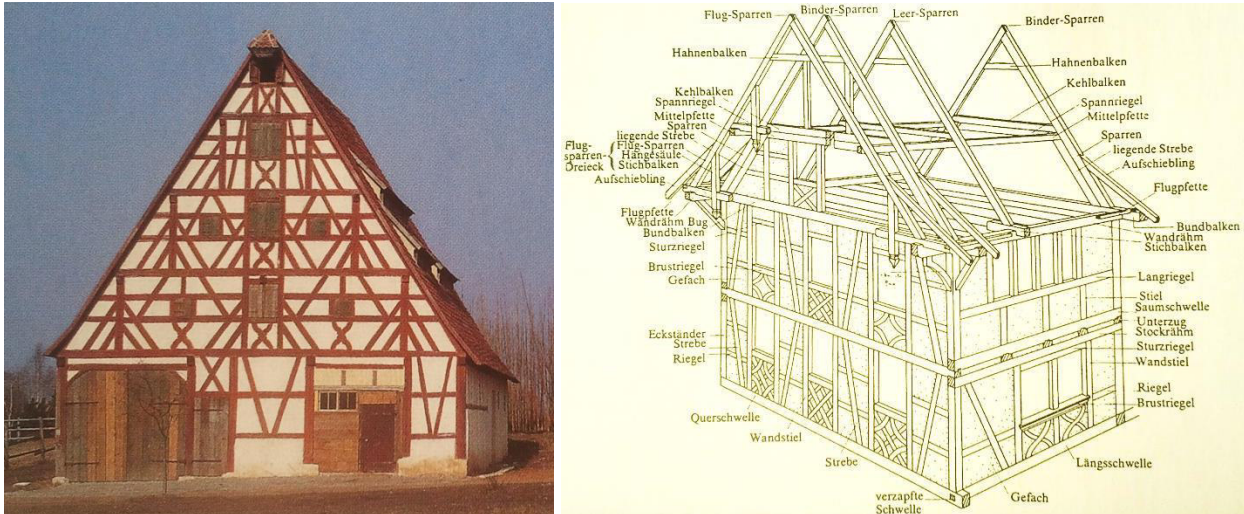


Abbildung 2-18: handwerkliche Vorfertigung von Bauteilen am Beispiel Fachwerkhaus (links) und Bezeichnung seiner Bestandteile (rechts) [16]

Ein herausragendes Beispiel für ein modulares Bausystem stellt das traditionelle japanische Wohnhaus dar. Dieses besteht aus einem genau vorgegebenen Raster, welcher auf der aus China stammenden Maßeinheit „shaku“ aufgebaut ist, welche in etwa einem englischen Fuß (30,48 cm) entspricht. Aus diesem wurde der „ken“ als Maß für den Stützenabstand eingeführt, welcher zwar regional unterschiedlich ist, dort aber jeweils der gesamten Konstruktion zugrunde liegt. Das Stützenraster stellt den Grundmodul für das Gebäude dar. Unter Einhaltung dieses Grundmoduls konnten verschiedenste Anordnungen von Räumen, Gängen und Freibereichen geschaffen werden. Die für die japanische Architektur typischen Vorhänge und Schiebetüren ermöglichen es, je nach Erfordernissen Räume zu verbinden oder zu trennen, was innerhalb des an sich starren Rasters eine hohe räumliche Flexibilität erlaubt (Abbildung 2-19).

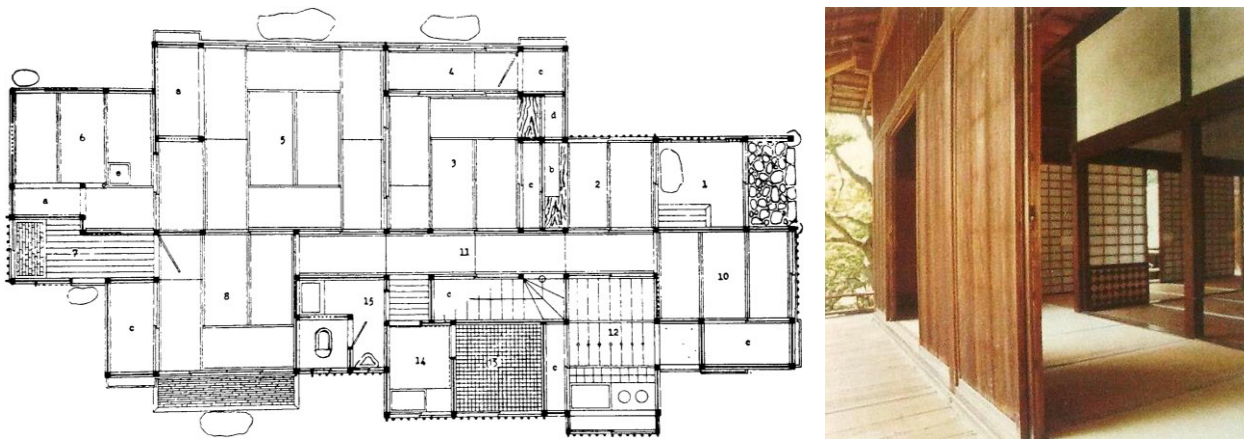


Abbildung 2-19: traditionelles japanisches Haus, Grundriss (links) und Einblick (rechts) [16]

Großen Auftrieb erhielten modulare Bauweisen und Baukastensysteme durch das Militärwesen und die koloniale Expansion. In beiden Fällen war es notwendig, möglichst schnell zu errichtende Gebäude über weite Strecken zu verfrachten und dann mit einfachsten Werkzeugen zusammen zu bauen. Im Bereich des Militärs wurde über Jahrhunderte stark auf Zelte gesetzt, durch verbesserte Transportmöglichkeiten und höhere Anforderungen an Gebäude wurde jedoch zunehmend auf verbretterte Fachwerkkonstruktionen und später auf wellblechverkleidete Gusseisenträgerwerke gesetzt. So konnten ganze Pferdeställe, Feldlazarette und Truppenunterkünfte verschifft und vor Ort in kurzer Zeit errichtet werden. Gleichzeitig wurden große Mengen vorgefertigter Gebäude verschiedenster Anwendungszwecke in die Kolonien, vor allem nach Amerika und Australien, verschifft. Anfangs waren dies hauptsächlich handwerklich gefertigte Holzkonstruktionen, später wurden diese immer industrieller hergestellt und zunehmend aus Eisen bzw. Stahl gefertigt.

## 2-2.2.2 Industriezeitalter und Massenfertigung

Im Zuge der Industriellen Revolution wurde Eisen bzw. Stahl in großen Mengen und hohen Qualitäten verfügbar, was starke Auswirkungen auf die Architektur dieser Zeit hatte. Bauwerke konnten nun immer größere Dimensionen annehmen, während die tragenden Bauteile im Gegensatz zu früheren Bauweisen deutlich an Masse verloren. Erstmals wurden Querschnittsformen und -dimensionen nach dem tatsächlichen Beanspruchungen gewählt, wodurch eine große Materialersparnis und damit deutlich wirtschaftlichere Bauwerke möglich wurden.

Da Stahlbauteile aufgrund ihrer hohen Schmelztemperatur immer im Werk vorgefertigt werden mussten, wurden schnell Standards für einzelne Bauteile wie zum Beispiel Schrauben oder Stahlträger sowie verschiedenste Bauteile aus dem Maschinenbau geschaffen. Nach und nach entwickelten sich so modular aufgebaute Systeme, welche auch für Bauten sehr großen Volumens angewandt wurden.

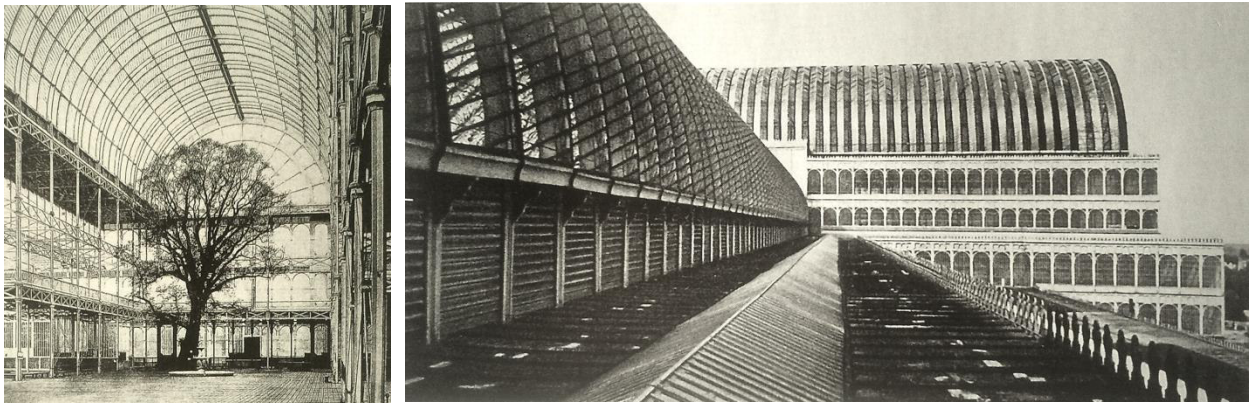


Abbildung 2-20: Kristallpalast in London, Innenansicht (links) und Dachbereich von außen (rechts) [16]

Anfangs wurden Skelettsysteme aus Gusseisen in Gebäuden eingesetzt, deren Außenwände noch aus massiven Baustoffen bestanden, und entsprechend dem damals vorherrschenden Architekturstil historisierend dekoriert. Mit der Einfuhr tropischer Pflanzen nach Europa und der dafür benötigten leichten und lichtdurchfluteten Unterbringungsplätze, wurden im Gewächshausbau erstmals reine Stahlskelettsysteme als Tragstruktur verwendet.

Eines der eindrucksvollsten Beispiele für industrielle Vorfertigung im Bauwesen ist der Kristallpalast in London (Abbildung 2-20). Dieser wurde für die Weltausstellung von 1851 im Hyde Park in London errichtet. Das Grundkonzept bestand dabei aus einem einfachen, rechtwinkligen Raster, welches mit einer geringen Anzahl variabler Elemente realisiert werden konnte. Die Träger und Stützen wurden aus Gusseisen und die Ausfachungen aus Glas hergestellt. Das gesamte Gebäude nahm bei Abmessungen von 564 x 124 m eine Fläche von ca. 7 ha ein und zeigte damit, dass industrielle Produktionstechniken auch im Bauwesen erfolgreich eingesetzt werden können.

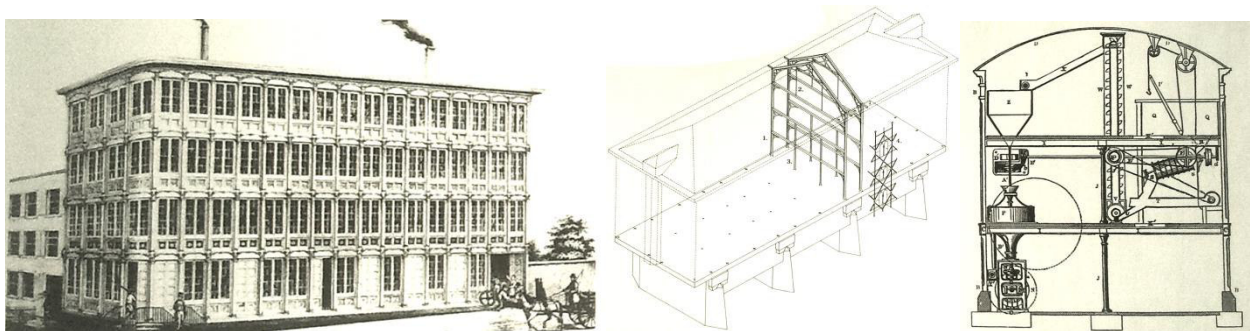


Abbildung 2-21: Bogardus Factory, New York 1848, (links), Schokoladenfabrik Noisel-sur-Marne 1872, (Mitte) und Schnitt Kornmühle 1840 (rechts) [16]

Zur gleichen Zeit begann man in Amerika damit, Fassadensysteme für mehrgeschossige Hochbauten aus vorgefertigten gusseisernen Elementen herzustellen (Abbildung 2-21, links). Diese gelten als Vorläufer



der später auftretenden curtain-wall-Fassaden und sollten klassische Natursteinfassaden billiger und schlanker nachbilden. Anfangs wurden diese an massive, in klassischer Bauweise errichtete Gebäude lediglich angehängt, später entstanden auch vollständig auf Stahlskeletten basierende Bauwerke, bis diese Bauweise Mitte des 19. Jhds ihren Höhepunkt erreichte. Als erste Beispiele für vollständig als Stahlskelett errichtete Gebäude gelten die Schokoladenfabrik Noisel-sur-Marne (Abbildung 2-21, Mitte) und eine in England gefertigte und dann in die Türkei verschiffte Kornmühle (Abbildung 2-21, rechts).

Im Jahr 1849 wurde durch die Verstärkung von Beton mittels Draht, welche anfangs für Blumenkübel angewandt wurde, der Stahlbeton erfunden und sogleich im Bauwesen eingesetzt. Relativ früh wurde dabei auch mit Fertigteilen experimentiert, welche beispielsweise 1891 zum Bau eines Casinos in Biarritz eingesetzt wurden. 1896 wurden als Bahnwärterhäuschen bei den französischen Staatsbahnen erstmals Raumzellen aus Beton verwendet (Abbildung 2-22, links). Bald darauf folgten umfassende Fertigteilsysteme aus Stahlbeton, mit denen Wohn- und Industriebauten errichtet werden konnten (Abbildung 2-22, rechts).

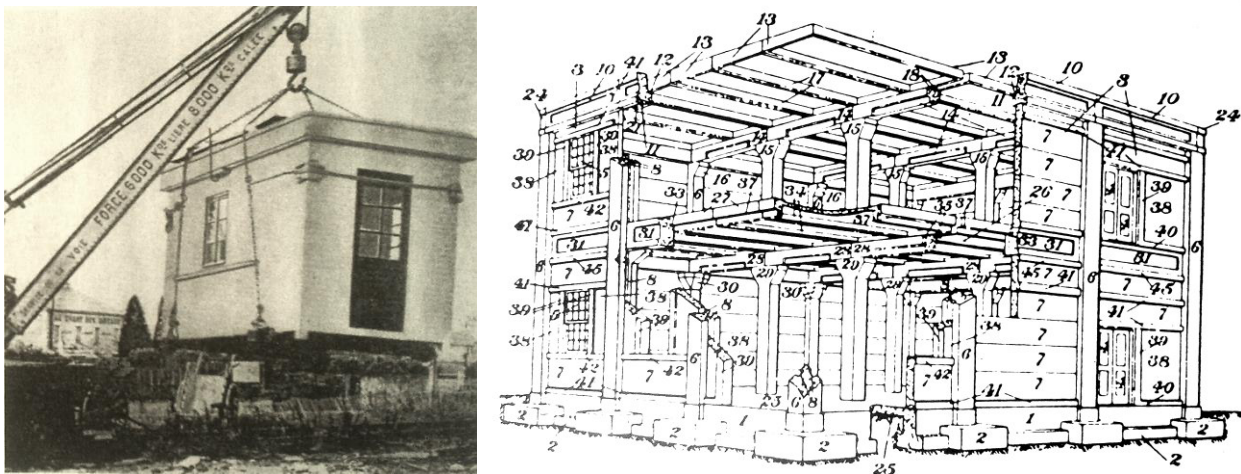


Abbildung 2-22: Versetzen eines Hennebique-Hauses als erste Beton-Raumzelle 1896 (links), „Unit Structural Concrete Method“ 1916, Fertigteil-Skelettbau-System für Industrie- und später auch Wohnbauten (rechts) [16]

Industrielle Produktionsweisen breiteten sich nun, inspiriert von den Herstellungsprinzipien im Maschinen- und Automobilbau, auch zunehmend auf das Bauwesen aus. Insbesondere das große Bevölkerungswachstum in den Städten in England, Frankreich und Deutschland erforderte den raschen Bau einer großen Zahl an Wohnstätten, um die herrschende Wohnungsnot einzudämmen. Um dies zu bewerkstelligen, waren leistungsfähige, qualitativ hochwertige und zugleich möglichst kostengünstige Bauweisen erforderlich. Beeinflusst durch architektonisch nicht gestaltete Silo- und Technikbauten in Amerika und die Rationalisierung der industriellen Produktion setzte sich auch in Europa eine funktionalere, schlicht gehaltene Architektur durch, welche unter anderem zum Ziel hatte, Häuser am Fließband zu produzieren. Standardisierung, Typisierung und Normierung wurden damit viel diskutierte Themen unter den zeitgenössischen Avantgarde-Architekten.

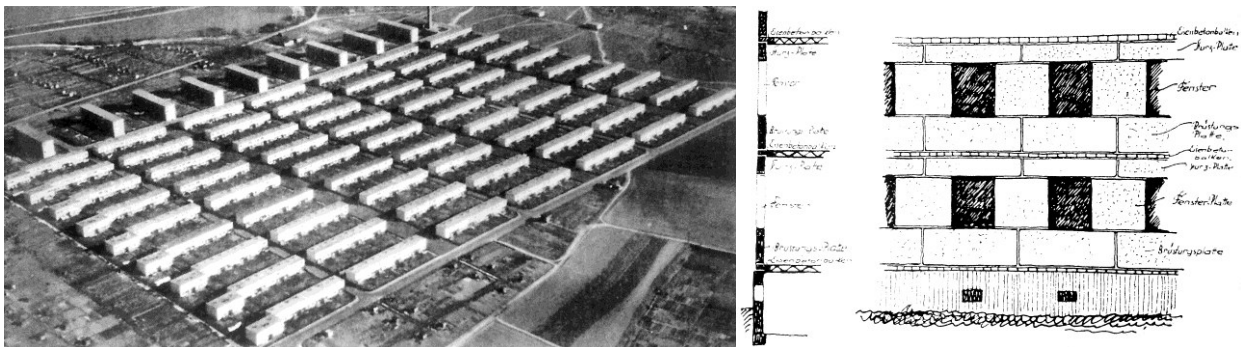


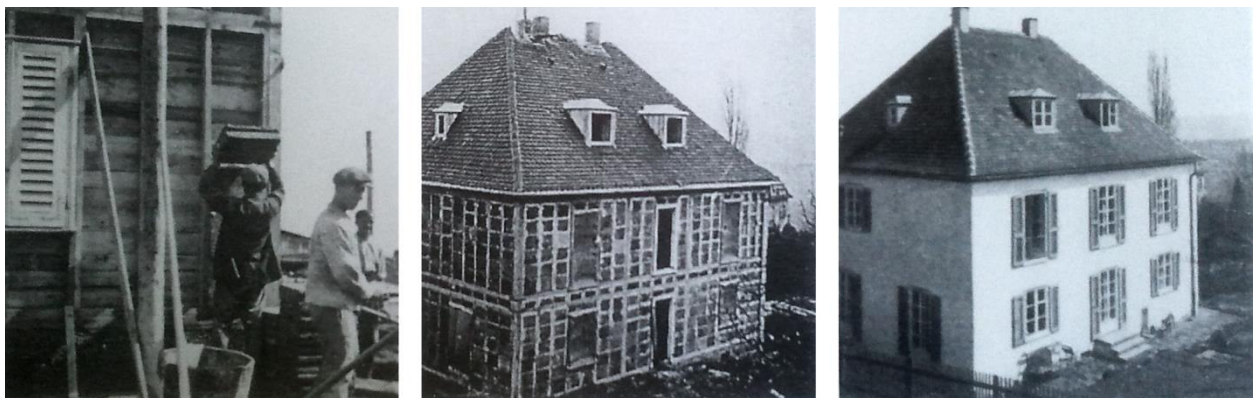
Abbildung 2-23: Siedlung Westhausen, Frankfurt am Main, Fertigteilbauten aus Leichtbeton (links), dazugehörige Systemskizze mit Plattenunterteilungen und Schnitt, „System Stadtrat Ernst May“ (rechts) [16]

Während der Großteil der Gebäude weiterhin mit traditionellen Baumethoden errichtet wurde, gab es einige Großprojekte, bei denen bereits industrielle Fertigungsmethoden angewandt wurden. So wurden für die Siedlung von Berlin-Friedrichstraße vor Ort gefertigte, mehrschichtige Betonplatten verwendet, welche dann per Kran versetzt wurden. In Frankfurt am Main wurden ab 1926 Betonplatten mit dem Namen „System Stadtrat Ernst May“ produziert, welche im dortigen Umkreis auch in großer Zahl eingesetzt wurden (Abbildung 2-23). Diese Platten konnten zu unterschiedlichen Haustypen kombiniert werden, wobei sich der Rohbau kleinerer Häuser damit in eineinhalb Tagen herstellen ließ. Die gesamte Dauer vom Baubeginn bis zum bezugsfertigen Zustand betrug 26 Tage.

### 2-2.2.3 Entwicklung von Baukastensystemen

Angeregt durch die Schriften Le Corbusiers wurde der Wunsch nach einem Baukasten für Häuser, bei welchem man aus einem gewissen Satz vorgefertigter Elemente je nach Bedarf verschiedene Gebäudetyper herstellen kann, immer häufiger geäußert. Nach dem ersten Weltkrieg wurde aufgrund von Rohstoffmangel auf neue bautechnische Systeme zurückgegriffen. Zu dieser Zeit entstanden viele Bausysteme in Holz und Stahl. Insbesondere Holzhäuser erlebten einen Aufschwung, da die dafür benötigten Rohstoffe leicht zu beschaffen waren und sich Holz aufgrund der leichten Verarbeitbarkeit gut zur Vorfertigung eignet. Nach einer Verbesserung der wirtschaftlichen Situation ab Mitte der 20er Jahre interessierte sich die Stahlindustrie vermehrt für die Herstellung von Häusern mit Stahlskeletten als Tragstruktur.

In den 1920er Jahren wurden vor allem in Deutschland einige Baukastensysteme entwickelt, welche auch im ganzen Land eingesetzt und teilweise sogar exportiert wurden. Meist handelte es sich dabei um Holzrahmenkonstruktionen, in welche Türen und Fenster bereits eingebaut waren. Diese wurden dann auf der Baustelle errichtet und fertig ausgefacht und verkleidet. Ein Beispiel dafür stellt das in Deutschland entwickelte fabrizierte Fachwerk dar (Abbildung 2-24). Die Bauzeit derartiger Gebäude lag durch die Vorfertigung deutlich unter der konventioneller Gebäude. Durch die Wirtschaftskrise Ende der 1920er Jahre und die Machtergreifung der Nationalsozialisten kam das vorgefertigte, industrielle Bauen später jedoch weitgehend zum Erliegen.



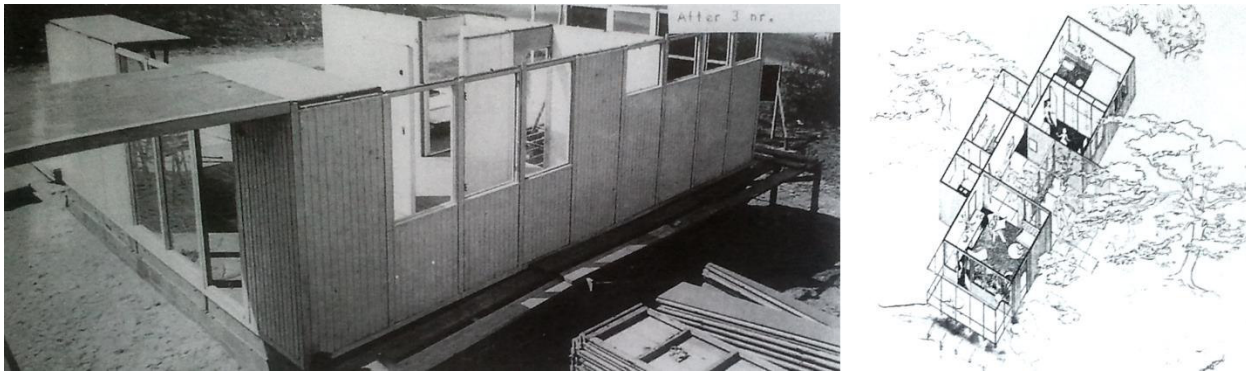
**Abbildung 2-24: System des fabrizierten Fachwerks (Fafa), Holzrahmen mit Bimsbetonhohlstein-Ausfachtung, Einbringen der Steine (links), Haus einen Tag vor Fertigstellung (Mitte), fertiges Haus (rechts) [16]**

In Amerika wurden vorgefertigte Systeme vor allem im Hochhausbau in Form von Stahlrahmen und im Einfamilienhausbau als feste oder mobile Häuser, welche von den Bewohnern selbst errichtet werden konnten, eingesetzt. Diese Baumethoden nahmen Ende des 19. Jahrhunderts ihren Anfang und erlaubten es unzähligen Menschen, zu Hausbesitzern zu werden. Mit zunehmendem Wohlstand stiegen jedoch die Ansprüche an Individualität und der Anteil vorgefertigter Häuser ging zurück, bis er infolge der Wirtschaftskrise von 1929 und dem daraus resultierenden Bedarf an möglichst günstigen Häusern wieder anstieg.

Der Erfinder, Philosoph und Visionär Buckminster Fuller entwickelte 1927 das „Dymaxion House“, welches durch eine möglichst reduzierte und leichte Konstruktion mit einem Minimum an Material ein Maximum an Raum schaffen sollte. Das Gebäude bestand aus einem Sechseckigen Raum, welcher an

einem Mast aufgehängt und verspannt wurde, sodass der Großteil der Bauteile nur auf Zug beansprucht wurde. Viele verwendete Materialien und Fertigungstechniken waren von der Automobil- und Luftfahrtindustrie inspiriert. Allerdings wurde dieser Entwurf eher als Experiment gesehen und konnte damals noch nicht im großen Stil umgesetzt werden.

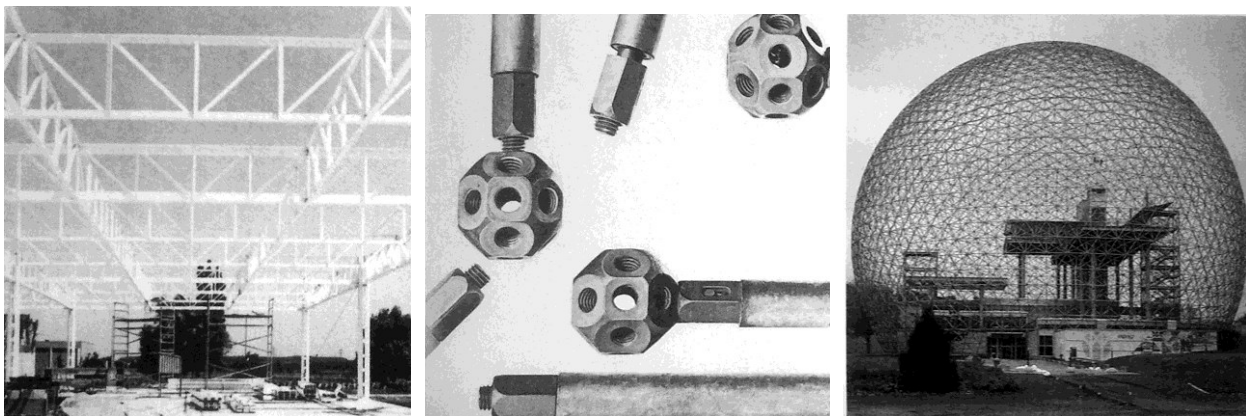
Konrad Wachsmann und Walter Gropius entwickelten in den 1940er Jahren das „Packaged House System“ (Abbildung 2-25). Dieses bestand aus modularen Holzrahmen, welche einem dreidimensionalen Raster entsprechend durch Haken und Keile zusammengesetzt werden konnten. In den Jahren 1943/44 wurde es zum „General Panel System“ weiterentwickelt, welches mit weniger Elementen und leichter zu handhabenden Verbindungen auskam. Das System war darauf ausgelegt, allein durch Zusammenfügen von Elementen durch ungelernte Arbeiter in möglichst kurzer Zeit beliebige ein- und zweigeschossige Häuser zu errichten. In lediglich 36 Arbeitsstunden konnte damit ein Haus aufgestellt werden. Allerdings waren die Elemente teurer als herkömmliche Holzrahmenkonstruktionen, weshalb die Produktion aufgrund zu geringer Verkaufszahlen 1950 gestoppt wurde.



**Abbildung 2-25: Errichtung eines Hauses der „General Panel Corporation“ (links), möglicher Grundriss mit dem „Packaged House“-System (rechts) [16]**

Der französische Unternehmer und Konstrukteur Jean Prouve entwickelte basierend auf den Materialien aus dem Schiffs- und Flugzeugbau ein Bausystem, welches sich in erster Linie an Effizienz und materialgerechter Konstruktion orientierte. Es bestand aus einem Pfosten-Riegel-System, in das Trennwände und Decken beweglich eingehängt wurden. Eine von ihm entwickelte Fassadenkonstruktion bildet die Grundlage für alle heute verwendeten Pfosten-Riegel-Systeme, des Weiteren entwickelte er Baukastensysteme für Schulen, Soldaten- und Notunterkünfte.

Im weitgehend zerstörten Nachkriegsdeutschland gab es einen großen Bedarf an Wohnraum, was dort zu einem Entwicklungsschub im industriellen Bauen führte. Es entstanden Holz- und Porenbeton-Fertigteilsysteme für kleinere Gebäude sowie Stahlssysteme für Industriehallen. Ziel war dabei stets, mit möglichst wenigen Elementen ein möglichst einfach aufzubauendes System zu schaffen, dass sich flexibel an sich ändernde technische und räumliche Anforderungen anpassen ließ.

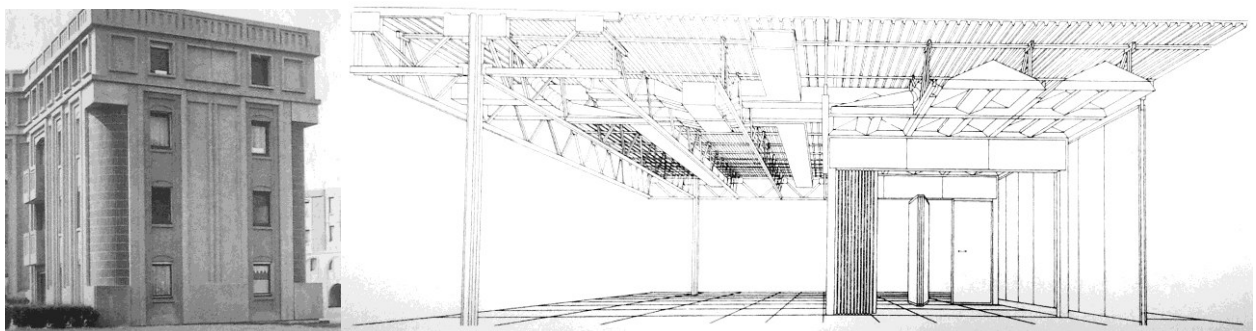


**Abbildung 2-26: Baukastensystem MAXI, 1961, für weitgespannte Hallen (links), Bauteile des MERO-Systems, 1940 (Mitte) und geodätische Kuppel des US-Pavillons auf der Weltausstellung in Montreal 1967 (rechts) [16]**

Ein weiterer Einsatzort für modulare Systeme waren weitgespannte räumliche Fachwerke. Diese entstanden im statischen Sinne durch die Auflösung des Biegeträgers und erlaubten einen deutlich effizienteren Materialeinsatz, welcher sich mehr an der tatsächlichen Beanspruchung orientiert. Eines der in diesem Sinne entwickelten Systeme ist das Baukastensystem MAXI, welches basierend auf einem fixen Raster für Industriehallen mit großen Spannweiten entwickelt wurde (Abbildung 2-26, links). Ein weiteres System ist das Mero-System, welches aus Stahlrohren und einem standardisierten Verbindungsknoten besteht, welcher die Herstellung von dreidimensionalen, orthogonalen Fachwerken inklusive Diagonalstäben ermöglicht (Abbildung 2-26, Mitte). Anleihe für diverse Konstruktionstypologien wurde dabei gern in der Natur genommen, wo beispielsweise regelmäßige Kristallstrukturen als Vorbild dafür dienten, wie man mit möglichst wenig verschiedenen Elementmaßen möglichst vielseitige und beliebig große Tragstrukturen zusammenfügen konnte. Die Abwicklung der Erdkugel und die sich daraus ergebenden Probleme in der Kartografie wiederum dienten Buckminster Fuller als Inspiration für seine Kuppelbauten, welche an verschiedenen Orten aus verschiedenen Materialien errichtet wurden (Abbildung 2-26, rechts).

Als Reaktion auf Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung wurde mit verschiedensten Möglichkeiten des Städtebaus, der Verdichtung sowie variabler, sich ständig in Bewegung befindender Systeme, experimentiert. Eines der daraus hervorgegangenen Projekte ist der Nakagin Kapsule Tower in Tokio, welcher aus einem Traggerüst besteht, in welches vorgefertigte Kapseln eingeschoben und mit acht Schrauben an vier Stellen befestigt wurden. Unter dem Begriff Metastadt wurden indes versucht, ein modulbasiertes, variables Stadtbausystem zu entwickeln, welches eine hohe räumliche Bevölkerungsdichte ermöglichen sollte. In Wulfen wurde ein Prototyp errichtet, welcher jedoch bei den Bewohnern auf Ablehnung stieß und auch wegen zahlreicher Baumängel schon nach 13 Jahren abgerissen werden musste. Dem Image von vorgefertigten Bauten war dies nicht unbedingt förderlich.

Gleichzeitig wurden industrielle Fertigungsformen als Konsequenz des technischen Fortschritts angesehen und gern zur Lösung von Wohnraum- und Platzproblemen verwendet. Nach und nach wurden die handwerklich gefertigten Bauteile durch industriell hergestellte Elemente ersetzt, wodurch die Effizienz des Bauablaufs deutlich gesteigert werden konnte. Von einzelnen Bauteilen wurde diese Bauweise nach und nach auf ganze Gebäude umgestellt. Dies hatte allerdings zur Folge, dass in erster Linie auf möglichst einfache, leicht reproduzierbare Grundrisse und Gebäudetypologien zurückgegriffen wurde, welche in ihrer Vielfalt oft recht bescheiden ausfielen. Meist wurden Wand- und Deckenteile oder ganze Wandelemente vorgefertigt und auf der Baustelle an ihren Ecken durch verschiedene Ankersysteme miteinander verbunden. Als Material kam dabei meist Leicht- oder Porenbeton zum Einsatz. Fenster, Türen und Gebäudetechnik-Installationen waren oft ebenfalls werkseitig fix eingebaut. In Europa und Nordamerika gab es eine Vielzahl solcher Systeme, welche auf ihre jeweiligen Aufgaben ausgelegt waren, während in der Sowjetunion nahezu alle Wohnungs- und Gesellschaftsbauten mit einem einzigen System durchgeführt wurden. Diese prägen zum Teil heute noch große Teile Osteuropas und Asiens und werden gern als anschauliches Beispiel dafür verwendet, wozu ein Zuviel an Standardisierung und Vereinheitlichung führen kann.



**Abbildung 2-27: Siedlung „Les Arcades du Lac“, Saint-Quentin-Yvelines 1982 (links), SCDS in Palo Alto 1965, Kombination verschiedener Subsysteme, die alle miteinander kompatibel sind (rechts) [16]**

Ein Problem dieser Bausysteme war dabei stets, dass immer gleiche Elemente aneinander gereiht wurden, was vor allem bei größeren Siedlungen und Stadtplanerischen Aufgaben schnell zu Monotonie führte. Um

dem zu entgehen, wurde mit verschiedenen Fassaden- und Farbgestaltungen experimentiert und in manchen Fällen auch sehr künstlerisch gestaltete Fassadenelemente verwendet. Eine in diesem Sinn errichtete Siedlung sind die „Les Arcades du Lac“ in Saint-Quentin-Yvelines, in welcher historisierende Fassadenelemente eingesetzt wurden (Abbildung 2-27, links). All das konnte jedoch in Kombination mit dem oft schlechten Ausbaustandard nicht verhindern, dass diese Bauten oft auf Ablehnung stießen.

Um diesen Problemen zu begegnen wurde ab den 60er Jahren an der Entwicklung sogenannter offener Bausysteme gearbeitet. Diese sollten grundsätzliche Anforderungen und Regeln für verschiedene Gebäudetypen festlegen und eine leichte Kombinierbarkeit der Systeme verschiedener Hersteller untereinander gewährleisten. Eines dieser Systeme war das SCSD-Programm (School Construction Systems Development), mit welchem eine neue Art von Schulen gebaut werden sollte (Abbildung 2-27, rechts). Das Programm war sehr fortschrittsorientiert, international ausgerichtet und wurde von verschiedenen namhaften Architekten in Zusammenarbeit mit einigen Herstellerfirmen entwickelt. Jede Firma beschäftigte sich dabei mit einzelnen Teilaspekten des Gesamtsystems und legte ihre Produkte so aus, dass diese mit denen anderer Hersteller kompatibel waren. Viele auf diese Weise entwickelten Bauteile kamen dann als industrielle Massenprodukte auf den Markt, was dank ihrer universellen Einsetzbarkeit zu einem großen Erfolg dieser Baumethode führte.

Ein weiterer Ansatz war es, Gebäude nicht als vollständig ausgestattete Strukturen zu sehen, sondern diese in einer Weise zu reduzieren, dass sie nur einen Rahmen bilden, der den Nutzern ausreichend Freiraum lässt, um das Gebäude entsprechend ihrer Bedürfnisse fertig auszustatten. Dazu wurde das Gebäude in eine skelettförmige Tragstruktur, welche fix vorgegeben ist, und relativ frei gestaltbare Einbauten untergliedert. Umgesetzt wurde dieses Konzept unter anderem im Wohnexperiment Genter Straße in München (Abbildung 2-28). Dort wurde zuerst ein Skelett aus Betonfertigteilen errichtet, welches später mit Wohnungen verschiedener Ausführungen gefüllt wurde.



**Abbildung 2-28: Wohnexperiment Genter Straße, München 1972 (links) und verwendete Konstruktion als Rohbau (rechts) [16]**

Die Industrialisierung im Bauwesen wurde anfangs noch als Fortschritt gesehen, durch einschneidende Ereignisse wie der Ölkrise 1973 und ein zunehmendes Umweltbewusstsein wurden zu sehr auf Technik fixierte Systeme jedoch zunehmend kritisch betrachtet. Während einige Gebäude noch mit einer sehr industriell anmutenden Gestaltung errichtet wurden, wie beispielsweise das „Centre Pompidou“ in Paris, das einen Großteil der Gebäudetechnik nach außen verlagert, ging die Tendenz fortan wieder mehr in die individualistische Richtung. Bausysteme verschiedenster Art bleiben damit zwar bestehen, werden aber eher als Teilsysteme, die auf unterschiedliche Art zu einem großen Ganzen zusammengesetzt werden, eingesetzt.

## 2-2.3 MODULBAUWEISE HEUTE

### 2-2.3.1 Allgemeines

Modulare Bausysteme erfreuen sich in den letzten Jahren immer größerer Beliebtheit und werden auf der ganzen Welt in immer stärkerem Ausmaß entwickelt und eingesetzt. [17]

Aufgrund des anhaltenden Zuzugs in die Städte und dem daraus resultierenden Bedarf an leistbarem Wohnraum wird der Ruf nach schnellen und flexiblen Bausystemen, welche Bedarfsspitzen in kurzer Zeit decken können, ohne dabei die Qualität zu vernachlässigen immer lauter. Die wesentlichen Möglichkeiten zur Schaffung neuen Wohnraums liegen dabei in der Erweiterung und Verdichtung bestehender Städte und Ballungsräume sowie der Schaffung neuer Siedlungsgebiete.

### 2-2.3.2 Situation in Europa

Da die Landschaft in Europa, und dabei insbesondere in Österreich, jedoch schon von starker Zersiedelung geprägt ist und auch die Bevölkerungsdichte im städtischen Raum vergleichsweise niedrig ist, bleibt die Verdichtung bestehender Siedlungsräume die einzige hier vernünftig anzuwendende Möglichkeit. Dabei können entweder bestehende Baulücken gefüllt, alte Gebäude durch neuere, höhere ersetzt oder bestehende Gebäude aufgestockt werden. Es werden zurzeit zwar durchaus neue Wohnungen durch Dachbodenausbauten und beschränkte Aufstockungen errichtet, allerdings zum Einen in zu geringer Zahl und zum Anderen meistens in einer Preiskategorie, welche für die meisten Menschen nicht erschwinglich ist. Menschen mit begrenzten finanziellen Mitteln werden dadurch aus den Zentren in die Vororte verdrängt, was einerseits die Teilhabe am städtischen Leben erschwert und andererseits eine sinnvolle Verkehrspolitik verhindert sowie die Kosten für Infrastruktur in die Höhe treibt.

Um zukünftige Bevölkerungszuwächse möglichst effektiv und nachhaltig aufnehmen zu können, ohne die dafür nötigen Infrastrukturkosten in schwindelerregende Höhen zu treiben oder eine über Jahrzehnte verfehlte Raumordnungspolitik einzuzementieren, muss daher der Gebäudebestand in und um bereits bestehende Zentren verdichtet werden. Da dies jedoch auf leistbarer Basis geschehen sollte, bietet sich die Modulbauweise mit ihren in großer Zahl unter standardisierten Bedingungen hergestellten Wohnungen an. Diese können aufgrund ihrer hohen Stückzahl exakt durchgeplant, in hoher Qualität gefertigt und trotzdem zu konkurrenzfähigen Preisen errichtet werden.

Grundsätzlich sind solche Module in den verschiedensten Materialien denk- und ausführbar. Aufgrund vor allem in Österreich ausreichend vorhandener Holzvorkommen, der daraus resultierenden kurzen Transportwege sowie der guten Klimabilanz, Verarbeitbarkeit und positiven Auswirkung auf Raumklima und Wohlbefinden, drängt sich Holz für solche Einsätze geradezu auf. Des Weiteren eignen sich Holzkonstruktionen aufgrund ihres geringen Gewichts ausgezeichnet für Aufstockungen und Gebäudeerweiterungen, ohne bereits vorhandene Gebäude statisch zu überlasten oder selbst bei großen Gebäudehöhen kritische Untergrundsetzungen zu verursachen.

### 2-2.3.3 Situation weltweit

Global betrachtet ist der Bedarf an günstigem Wohnraum nicht nur in absoluten Werten, sondern auch rein prozentuell noch deutlich größer als in Europa und den restlichen Industriestaaten, in welchen schon seit Jahrzehnten auf hohem Niveau gebaut wird. Vor allem in den Schwellen- und Entwicklungsländern hält im Zuge des wirtschaftlichen Aufschwungs vieler Weltgegenden der Zuwanderungsstrom in die Städte ungebrochen an. Um damit einhergehenden Problemen wie schlechtem Infrastruktur- und Versorgungsanschluss, unkontrolliertem Stadtwachstum und Slumbildung zu verhindern, müssen daher Möglichkeiten geschaffen werden, möglichst schnell möglichst große Mengen an möglichst günstigem Wohnraum bereitzustellen.

Dazu bedarf es groß angelegter, ausreichend durchdachter Initiativen sowie eines Modulsystems, mit dessen Hilfe man in der Lage ist, innerhalb kürzester Zeit große Mengen an Wohnungen auf einem hohen Qualitätsstandard herzustellen. Einhergehend mit der Errichtung von Wohnungen müssen dabei natürlich

auch die städtische Infrastruktur und der öffentliche Verkehr ausgebaut werden. Dies ist zwar gerade in niedrig entwickelten Ländern mit hohen Kosten, welche von diesen nicht immer selbst aufgebracht werden können, verbunden, stellt aber gleichzeitig eine große Chance dar, die dortige Wirtschaft anzukurbeln, schlecht erschlossene Gegenden aufzuwerten und die Situation der Bewohner nachhaltig zu verbessern.

Gebäude in Modulbauweise können so einen großen Betrag zur Verbesserung der sozialen und wirtschaftlichen Situation ihrer Bewohner sowie zu Umweltschutz und Ressourceneinsparung liefern und so damit helfen, unsere Städte zukunftsfit zu machen. [18]

## 2-2.4 DERZEITIGER EINSATZ VORGEFERTIGTER BAUELEMENTE

Vorgefertigte Bauelemente werden bereits in vielen Ländern in unterschiedlicher Intensität eingesetzt, dominierend sind dabei Fertigteilhäuser für jeweils ein oder zwei Familien. In anderen Bereichen des Bauwesens sowie für größere Bauprojekte werden vorgefertigte Elemente derzeit noch wenig eingesetzt.

### 2-2.4.1 Vorfertigungsgrad verschiedener Bauweisen

Im Gegensatz zu anderen Industriezweigen wird im Bauwesen immer noch wenig Gebrauch von industrieller Vorfertigung gemacht. Es werden zwar einzelne Bauprodukte in immer größerem Ausmaß vorgefertigt, das Zusammenfügen dieser erfolgt jedoch immer noch weitgehend mit handwerklichen Methoden. In Tabelle 2.1 sind verschiedene Bauweisen mit ihrem jeweiligen Vorfertigungsgrad aufgelistet, um einen groben Überblick über die derzeitige Situation im Bauwesen zu geben.

Industrielle Baustellenverfahren wie Kletterschalungen und Tunnelschalverfahren erreichen einen Vorfertigungsgrad von 20 bis 30 %. Bei konventionellen Fertigbauweisen wie dem Holzrahmenbau oder Betonfertigteilbau wird ein Vorfertigungsgrad von 40 bis 60 % erreicht. Bei der Holztafelbauweise, insbesondere wenn Holzgroßtafeln verwendet werden, liegt dieser etwas höher bei 50 bis 80 %. Eine noch höhere Vorfertigung kann mit 60 bis 90 % bei Raumzellen und Sanitärzellen erreicht werden, da diese bereits einen Teil der Ausstattung beinhalten können, was die Ausbaueiten auf der Baustelle deutlich verringert. Der höchste Vorfertigungsgrad im Bauwesen wird mit mobilen Raumzellen erreicht, welche meist mehrmals auf- und abgebaut werden, was zu einer großen Bedeutung eines geringen Montageaufwands führt.

*Tabelle 2.1: Vorfertigungsgrad verschiedener Bauweisen [16]*

Bauweise	Vorfertigungsgrad
industrielle Baustellenverfahren	20 – 30 %
konventioneller Fertigbau (Stahlbeton, Stahl, Holz)	40 – 60 %
Tafelbauweise	50 – 80 %
Raumzellen, Sanitärzellen (Stahlbeton, Stahl, Holz)	60 – 90 %
mobile Raumzellen (Stahl, Holz)	95 – 100 %
Vergleich Pkw-Fertigung	100 %

Je nach Bauweise schwankt der Vorfertigungsgrad massiv, wobei auch bei einem niedrigen Vorfertigungsgrad zu einem großen Teil industriell hergestellte Elemente verwendet werden. Deren

Anteil beträgt inzwischen ca. 50 – 60 % bei konventionell errichteten Gebäuden. Eingesetzt werden diese Bauteile in allen Bereichen des Gebäudes, angefangen bei der Tragkonstruktion über den Innenausbau und die Haustechnik bis hin zur Fassade. Meist werden dabei Einzelteile verschiedenster Herstellersysteme verwendet, welche erst auf der Baustelle zu größeren Bauteilen verbunden werden. Dieses Verbinden stellt aufgrund der ständigen Änderung der Bedingungen auf der Baustelle immer ein gewisses Risiko hinsichtlich Zeitbedarf und Qualität dar, weshalb zunehmend größere Bauteile mit weniger Verbindungsstellen verwendet werden. Als Beispiele können hier Fertigteilstützen- und Träger sowie Wandelemente mit bereits fertig eingebauten Installationen genannt werden, wodurch sich der Arbeitsaufwand zunehmend von der Baustelle hin zum Werk verlagert.

Die Vorfertigung der Bauteile kann dabei in festen oder mobilen Produktionsstätten erfolgen, welche bei Bedarf nahe der Baustelle errichtet werden. Ein typisches Beispiel dafür sind Kletter- und Gleitschalungen, welche nach Errichtung des Fundaments aufgebaut werden und sich dann von selbst weiter hochziehen. Der Einbau von Beton und Bewehrung geschieht dabei teilweise manuell und teilweise mit Kränen und Betonpumpen. Teilweise kommen für solche Aufgaben auch schon Roboter zum Einsatz. In Japan beispielsweise werden Hochhäuser teilweise mithilfe mobiler Arbeitsplattformen errichtet, welche jeweils auf dem obersten Geschoß des Gebäudes sitzen. Dort wird die gesamte Konstruktion bis hin zum Ausbau weitgehend von computergesteuerten Kränen und Baurobotern erledigt, lediglich kleinere Verfügarbeiten müssen noch manuell ausgeführt werden. Ist ein Stockwerk fertig, hebt sich die Plattform um ein Geschoß nach oben, um dort von neuem mit der Arbeit zu beginnen. [16]

## 2-2.5 ÜBERSICHT ÜBER MODULBAUSYSTEME

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [16] angeführten Literatur.

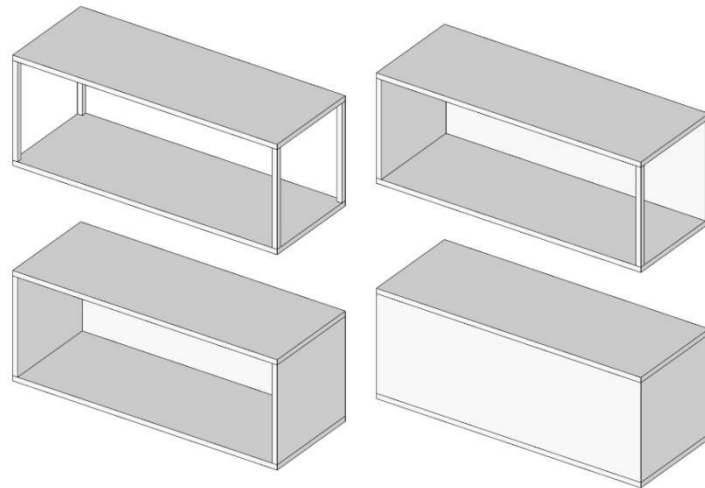
Im heutigen Modulbaumarkt ist eine Vielzahl von Unternehmen aus aller Welt vertreten, welche jeweils eigene Modulsysteme aus verschiedenen Materialien produzieren. Um einen kurzen Überblick zu geben, wird der gegenwärtige Stand des Modulbaus mit den am häufigsten verwendeten Baumaterialien Stahl, Beton und Holz kurz umrissen.

Modulsystemen im Allgemeinen und die Raumzellenbauweise im Speziellen werden, unabhängig vom Material, in letzter Zeit immer häufiger eingesetzt. Dabei werden nicht einzelne Stützen, Träger oder Wände vorgefertigt und auf der Baustelle verbunden, sondern die Konstruktion eines Raumes oder Raumteils wird im Werk unter kontrollierten Bedingungen hergestellt. Meist entsprechen diese Raumzellen einfachen Quadern mit Boden, Decke und Wandflächen, es lassen sich aber auch Zellen mit beliebiger Dachneigung oder anderen Raumabschlüssen fertigen. Eines der stärksten Argumente dafür ist die Möglichkeit, damit Gebäude schnell und effizient zu errichten. Insbesondere, wenn Raumzellen identer Form und Größe in großer Zahl verwendet werden, ergeben sich aus dieser Bauweise wirtschaftliche und organisatorische Vorteile.

### 2-2.5.1 Stahl

Stahl bietet sich aufgrund des ohnehin hohen Vorfertigungsgrades im Stahlbau und der vergleichsweise leichten Konstruktion als Baustoff für Module an. Da konstruktive Verbindungselemente in allen Modulbausystemen aus Stahl bestehen, können diese im Falle von Stahlmodulen direkt in das Tragsystem der Module integriert werden. Des Weiteren bieten Stahlmodule bei geringem Gewicht eine hohe Tragfähigkeit und ein großes plastisches Verformungsvermögen, was etwa der Erdbbensicherheit der Konstruktion zugutekommt. Die Module sind üblicherweise selbsttragend und können ohne weitere Verstärkungsmaßnahmen problemlos bei Gebäudehöhen von bis zu sechs Geschossen eingesetzt werden. Verwendet werden können Stahlraumzellen sowohl für temporäre Zwecke (Baustellencontainer, Ersatzräume bei Umbauten/Sanierungen) als auch für dauerhafte Konstruktionen. Die Verbindung erfolgt meist mit Schrauben, was durch die Wiederverwendbarkeit damit hergestellter Anschlüsse einen mehrmaligen Auf- und Abbau begünstigt.





**Abbildung 2-29: tragender Rahmen mit Aussteifungsdiagonalen und Bodenkonstruktion (links), Typen von Raumzellen: offene Zelle (Mitte oben), zweiseitig offen (oben rechts), einseitig offen (Mitte unten) und Vollzelle (unten rechts) [16]**

Die Module bestehen meist aus einem innenliegenden Fachwerk oder Rahmen und entsprechen damit dem klassischen Prinzip der Stahlbauweise. Die Tragkonstruktion wird üblicherweise beidseitig beplankt, sodass von außen kein Rückschluss auf die Primärtragstruktur mehr gezogen werden kann. Die Ausfachung zwischen den Stahlprofilen erfolgt meist mit Wärmedämmung, die Beplankung kann in verschiedensten Materialien erfolgen und an der Außenseite auch gleich die fertige Fassade bilden. Der Bodenaufbau wird meist von einem Profilblech getragen, der darüber liegende Aufbau kann je nach Anforderung in verschiedenster Weise ausgeführt werden.

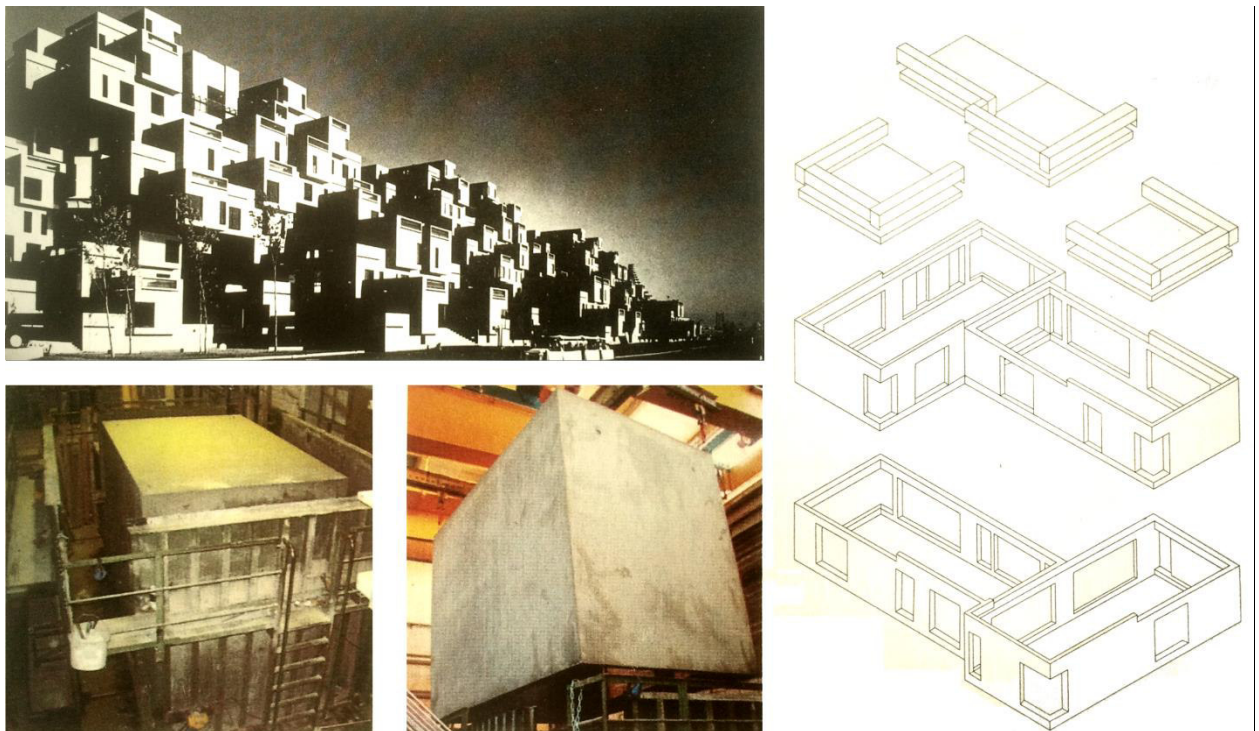
Eine solche Raumzelle kann als Vollzelle ausgeführt werden, was bedeutet, dass alle Außenflächen geschlossen sind. Die Umfassungswände können aber auch auf einzelne Stützen oder Rahmen reduziert werden, was zwar die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Systems verschlechtert, gleichzeitig aber mehr offene Seitenflächen erlaubt (Abbildung 2-29). Diese können für großflächige Fenster, Türen oder zur Schaffung größerer Räume durch das Verbinden mehrerer Module verwendet werden. Da auf allen Seiten offenen Module jedoch anfällig gegenüber horizontalen Verformungen sind, sollten diese immer in Kombination mit anschließenden, steiferen Modulen eingesetzt und mit diesen kraftschlüssig verbunden werden. Für höhere Gebäude oder extreme Windlastanforderungen können im Gebäude Kerne mit einer hohen Steifigkeit angeordnet werden, an welche die umliegenden Module angehängt werden.

Häufig zu finden ist auch eine kombinierte Bauweise, bei der die untersten Geschosse eines Gebäudes in konventioneller Bauweise errichtet werden und darauf dann mehrere Geschosse mit Modulen folgen. Diese Methode wird wegen der weitgehend freien Gestaltbarkeit der auf Geländeneiveau liegenden Gebäudebereiche vor allem bei Parkgaragen und Einkaufszentren mit darüber liegenden Wohn- oder Bürobauten oder Hotelbauten (Lobby im Erdgeschoß, sich ständig wiederholender Zimmerraster in den oberen Geschossen) gern eingesetzt.

Die Abmessungen der Module hängen von den gegebenen Anforderungen und Transportmöglichkeiten sowie den jeweiligen Herstellern ab. Das Gewicht stellt aufgrund des geringen Materialeinsatzes weder beim Transport noch bei der Montage auf der Baustelle ein Problem dar. Des Weiteren lassen sich durch das geringe Gewicht dieser Bauweise Einsparungen beim Fundament realisieren und Aufstockungen bestehender Gebäude leichter durchführen. Eine Feuerwiderstandsdauer von 30 bis 60 Minuten kann problemlos gewährleistet werden, gute Schalldämmeigenschaften ergeben sich durch den doppelwandigen Aufbau der Module. Probleme ergeben sich jedoch an den Verbindungspunkten, da zur Kraftübertragung feste Verbindungen zwischen den einzelnen Modulen benötigt werden, welche gleichzeitig eine Schallweiterleitung ermöglichen. Module aus Stahl erfreuen sich zunehmender Beliebtheit und werden oft als die typischen Vertreter der Modulbauweise gesehen.

## 2-2.5.2 Beton

Auch im ansonsten eher ortsgebundenen Betonbau werden seit geraumer Zeit Modulsysteme in verschiedenen Formen verwendet. Diese gehen zum Teil weit über die klassischen Fertigbetonfundamente, -stützen und -träger hinaus und reichen bis hin zu voll ausgestatteten Raumzellen, welche auf der Baustelle nur mehr versetzt werden müssen. Stahlbeton-Raumzellen entsprechen üblicherweise einer Massivbauweise mit scheibenförmiger Lastabtragung. Die Stahlbetonwände dienen dabei sowohl als Tragstruktur wie auch als Raumabschluss. Dadurch ist diese Bauweise vor allem bei kleineren, an vier Seiten umschlossenen Raumeinheiten interessant. Ein bekanntes Beispiel für die Betonraumzellenbauweise ist das Habitat 67 in Montreal, eine Wohnanlage, deren Wohneinheiten aus vor Ort gegossenen und dann per Kran versetzten Raumzellen bestehen (Abbildung 2-30, oben und links).



**Abbildung 2-30:** Einsatz der Betonraumzellenbauweise für das Habitat 67, Montreal (oben) und dabei verwendete Bauteile (rechts), Ausschalen einer Raumzelle (links), montagefertige Raumzelle (Mitte) [16]

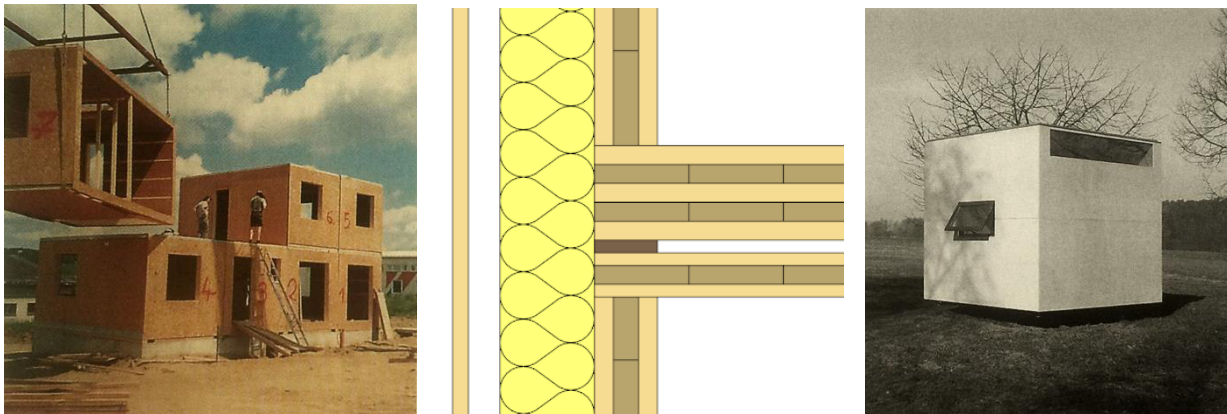
Als Material wird Leicht- oder Normalbeton verwendet, die Fertigung erfolgt meist in Stahlschalungen in einem Guss (Abbildung 2-30, unten links und Mitte). Dabei entsteht beidseitig eine fugenlose Betonoberfläche in Sichtqualität, welche keiner Nachbehandlung mehr bedarf. Die Bewehrung erfolgt nach statischen Erfordernissen. Die Bauteildicke richtet sich in erster Linie nach konstruktiven Gesichtspunkten wie etwa der Betondeckung der Bewehrung. Bei ausreichender Bauteildicke lässt sich problemlos die Brandschutzklasse REI90 erreichen. Meist verfügen Betonraumzellen sowohl über eine Decke als auch über einen Boden, was bei deren Stapelung zu einem doppelten Aufbau führt. Will man dies vermeiden, können Betonraumzellen auch ohne Boden oder Decke ausgeführt werden. Im Bereich der Wände gewährleistet die doppelte Konstruktion angrenzender Zellen einen besseren Brand- und Schallschutz. Aufgrund der massiven Ausführung und der damit einhergehenden Tragfähigkeit können problemlos mehrgeschossige Gebäude hergestellt werden.

Im Gegensatz zu Stahlmodulen spielt das Gewicht bei Betonraumzellen eine durchaus signifikante Rolle und kann etwa bei Modulgrößen von 3 x 9 m und einer Wandstärke von 10 cm durchaus im Bereich von 20 – 30 Tonnen liegen, was bei Transport und Versatz, wie auch bei der Bemessung der Fundamente auf jeden Fall beachtet werden muss.

### 2-2.5.3 Holz

Holz bietet sich wegen seines geringen Gewichts, seiner leichten Verarbeitbarkeit und guten Wärmedämmeigenschaften für Modulkonstruktionen an. Mit der Ausführung entweder als Skelett- oder Massivbau sind hier zwei vollkommen verschiedene Konstruktionsarten möglich. Je nach Anforderungen können Holzraumzellen für temporäre oder dauerhafte Gebäude verwendet werden.

Holzmodule in Skelettbauweise entsprechen der Holzrahmenbauweise, ausgedehnt in den dreidimensionalen Raum. Der tragende Rahmen des Moduls wird nach statischen und konstruktiven Erfordernissen dimensioniert. Boden und Decke können dabei entweder als Balkendecke, plattenförmiges Holzelement oder in einer Holz-Beton-Verbundbauweise ausgeführt werden. Die Aussteifung erfolgt dann entweder durch Verbände oder eine flächige Beplankung. Zwischen den Stehern kann eine Dämmschicht eingebaut werden, was zwar die Wandstärken bei niedrigen Gebäuden klein hält, jedoch aus bauphysikalischer Sicht zu einem inhomogenen Wandaufbau führt. Da die gesamte Lastabtragung über einzelne Steher erfolgt, können problemlos große Öffnungen eingebaut werden und Räume, die über mehrere Module reichen, sind ohne weiteres möglich. Allerdings sind die Bauhöhen aufgrund des geringen tragenden Querschnitts und der geringen Systemsteifigkeit begrenzt.



**Abbildung 2-31: Versetzen von Holz-Raumzellen (links), Schnitt durch Wohnhaus in Massivholz-Raumzellenbauweise (Mitte), drehbarer Wohnwürfel als Holzraumzelle (rechts) [16]**

Raumzellen in Holz-Massivbauweise bestehen üblicherweise aus Brettspertholz und tragen Lasten über Scheiben, welche zugleich als Wandabschluss dienen, ab. Die BSP-Platten werden dabei im Werk zugeschnitten und zu Raumzellen verschraubt, der Innenausbau inklusive Einbau der Haustechnik erfolgt nach den jeweiligen Erfordernissen. Außen kann bei Bedarf noch eine zusätzliche Dämmung angebracht werden, bevor die Randelemente mit einer Fassade versehen werden. Da Brettspertholz auch in Sichtqualität hergestellt werden kann, können Wände und Decken und in manchen Fällen sogar Fußböden ohne weiteren Ausbau belassen werden. Ansonsten können Trocken- oder Nassestriche verschiedenster Art mit dazugehörigem Fußbodenaufbau eingebaut werden. Durch die im Vergleich zur Holzrahmenbauweise hohe Masse von Holzmassivwänden verfügen diese über einen ausgezeichneten Luftschallschutz. Massivholz-Raumzellen können auf der Baustelle zu größeren Strukturen verbunden werden, indem die Raumzellen neben- und übereinander gestapelt werden (Abbildung 2-31, links und Mitte) oder als geschlossene Raumzellen bereits ein fertiges Gebäude darstellen (Abbildung 2-31, rechts).

Aufgrund der Abmessungsbeschränkungen für den Transport bietet sich die Massivholz-Raumzellenbauweise in erster Linie für Gebäude mit kleineren Räumen an, wenn auch mehrere ein- oder mehrseitig offene Raumzellen zu größeren Räumen verbunden werden können. Hier muss dann besonderer Wert auf die Verbindungs- und Fugentechnik gelegt werden. Aufgrund des geringen Gewichts lassen sich Raumzellen sowohl in Holz-Leichtbauweise als auch in Holz-Massivbauweise leicht transportieren und montieren. Das Gewicht selbst wird hierbei normalerweise nicht maßgebend, was diese Raumzellen für Bauwerke auf schlechtem Untergrund oder als Aufstockung für bestehende Gebäude sehr attraktiv macht. Durch den größeren tragenden Querschnitt und die daraus resultierenden

höheren Steifigkeiten sind mit Massivholz-Raumzellen deutlich höhere Gebäude möglich als mit Skelettbau-Modulen. [16]

Einen besonderen Problembereich stellen jedoch wasserführende Installationen dar. Deren Gesamtlänge und Verteilung im Gebäude sollte möglichst reduziert werden. Eine gebündelte und im Nachhinein leicht zu kontrollierende Führung ist anzustreben, da sich so die Gefährdung durch Undichtigkeiten besser beherrschen lässt. Nassräume sind üblicherweise als abgeschlossene, gekapselte Bereiche ausgeführt, um den Eintritt von Feuchtigkeit in die Konstruktion zu verhindern. Auch wenn es dafür bereits erste Lösungen gibt, ist in diesem Bereich noch ein großer Entwicklungsbedarf vorhanden.

## 2-2.6 AUSGEFÜHRTE BEISPIELE

Anhand ausgeführter Beispiele wird nun gezeigt, welche zum Teil wegweisenden Projekte bereits in Modul- bzw. Raumzellenbauweise errichtet wurden. Dies demonstriert, dass solche Gebäude nicht nur in technischer Hinsicht funktionstüchtig sind, sondern auch ästhetischen Ansprüchen gerecht werden und rein aufgrund ihres Erscheinungsbildes oft gar nicht mehr von konventionellen Gebäuden unterschieden werden können. Manche dieser Bauten setzen sogar neue architektonische Akzente und überstrahlen ihre „gewöhnlichen“ Nachbarn bei Weitem. Um den Umfang dieses Kapitels nicht zu überdehnen, wird hier nur auf Gebäude aus Raumzellen eingegangen.

### 2-2.6.1 Wenckehof Container-Studentenheim, Amsterdam

In Amsterdam wurde 2006 ein neues Studentenwohnheim aus 1000 alten Frachtcontainern errichtet. Der Grundgedanke dabei war es, zwei Probleme auf einmal zu lösen. Einerseits ging es darum, überschüssige Schiffscontainer, welche sich aufgrund asiatischer Exportüberschüsse in Europa stapeln, da deren Rücktransport teurer als eine Neuproduktion in Asien ist, loszuwerden. Andererseits sollte günstiger Wohnraum für Studenten geschaffen werden, da dieser in Amsterdam ansonsten nur schwer zu finden ist.



Abbildung 2-32: Container im Bauzustand (links), Blick in den Innenhof des Studentenheims (rechts) [19]

Da die Stadtentwicklungspläne für Amsterdam eine auf 5 Jahre beschränkte Nutzung des Grundstücks vorsehen, bietet sich die Containerbauweise hier an, um die voll ausgestatteten Container nach Ablauf dieser Zeit einfach abzubauen und an anderer Stelle wieder aufzustellen. Durch die Klassifizierung als temporäres Gebäude konnten auch die Bauvorschriften gelockert werden.

Tragfähigkeit und Verbindungstechnik der Container waren aufgrund ihrer früheren Verwendung als Frachtcontainer kein Problem, da die Stapelung auf Schiffen in gleicher Weise, aber unter deutlich höheren Lasten, erfolgt. Um Kosten zu sparen, wurden die Container letztendlich jedoch, entgegen der

ursprünglichen Intention, in China extra für diesen Zweck hergestellt und ausgestattet und dann in die Niederlande transportiert. Pro Tag wurden dann 20-25 der jeweils 2,4 x 12 x 2,6 m großen Container aufgestellt, was die Möglichkeiten der Raumzellenbauweise in Bezug auf kürzere Bauzeiten eindrucksvoll belegt (Abbildung 2-32, links). Die Dämmung der Container erfolgt durch Extrudiertes Polystyrol (XPS), auf die oberste Containerreihe wurde ein zusätzliches Dach aufgebracht. Die Container sind durch Laubengänge in den Innenhöfen und außenliegende Stiegenhäuser miteinander verbunden (Abbildung 2-32, rechts).

Inzwischen wurde das Projekt aufgrund seines Erfolgs bereits auf 10 Jahre verlängert, wobei weitere Verlängerungen in Aussicht stehen [19].

### 2-2.6.2 Impulszentrum, Graz-Eggenberg

Auf den Gründen der ehemaligen Reininghaus-Brauerei im Westen von Graz wurde von 2003 bis 2004 das Impulszentrum Graz errichtet. Dieses sollte den Beginn einer Gründer- und Wissenschaftsstadt markieren, welche auf dem Areal in den nachfolgenden Jahren errichtet werden sollte. Das Gebäude selbst ist dabei wie eine Stadt organisiert. Von außen wirkt es wie ein in sich geschlossenes Objekt, während der Innenraum offen und luftig wirkt und von der Gliederung der verwendeten Module dominiert wird. Aufgrund des Modellcharakters des Projekts für weitere Bestrebungen in Bezug auf die Modularisierung von Gebäuden galten hohe Anforderungen in Bezug auf Konstruktion, Gebäudetechnik und Nachhaltigkeit.



**Abbildung 2-33: Fertigung der Raumzellen im Werk (links) und Montage auf der Baustelle (rechts) [20]**

Die Idee, welche diesem Gebäude zugrunde liegt, sieht vor, möglichst autonome Raumeinheiten zur Nutzung als Büro, Werkstatt oder Labor herzustellen. Diese sollten dann an Start-ups und sich schnell entwickelnden Firmen vermietet werden, wobei möglichst einfach und flexibel auf Änderungen im Platzbedarf einzelner Mieter reagiert werden können sollte. Erreicht wird das durch Büromodule mit einer Fläche von jeweils 80 m<sup>2</sup> und Labor- und Werkstatteinheiten mit Größen von 50 bis 200 m<sup>2</sup>. Ein Unternehmen kann dabei ein oder mehrere Einheiten anmieten, Geräte und Personal können auch mit anderen Firmen geteilt werden.

Das Gebäude besteht zum größten Teil aus Brettsperrholz-Raumzellen, welche bereits während der werkseitigen Fertigung mit entsprechend konzipierten Haustechnikmodulen ausgestattet wurden, was die Baustellenmontage entsprechend beschleunigte (Abbildung 2-33). Diese beinhalten unter anderem Fußbodenheizung und Deckenkühlung, wobei jedes Raummodul heiztechnisch separat angesteuert werden kann. Die Raumzellen selbst wurden in einer mehrjährigen Zusammenarbeit einer Holzbaufirma, des Architekten und des Statikers entwickelt und auf alle bauphysikalischen und fertigungstechnischen Anforderungen hin optimiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf den Schallschutz gelegt und dadurch realisiert, dass zwischen den Elementen sowohl horizontal als auch vertikal Fugen von mindestens 1 cm eingehalten wurden, um die Körperschallübertragung zu unterbrechen. Durch

umfassende Wärmedämm- und Energiesparmaßnahmen erreicht das Gebäude Niedrigenergiestandard. [20]

### 2-2.6.3 Journalistenhotel Olympische Winterspiele, Turin

Anlässlich der olympischen Winterspiele 2006 in Turin wurde ein viergeschossiges Journalistenhotel in Holzraumzellenbauweise errichtet. Die dafür verwendeten Module wurden in Katsch an der Mur (Steiermark) mit hohem Vorfertigungsgrad hergestellt und dann nach Turin transportiert.



*Abbildung 2-34: Montage der Raumzellen (links), aus Raumzellen zusammengesetztes Gebäude vor dem Innenausbau (rechts) [20]*

Die Module selbst bestehen aus Brettsperrholz, wobei eine Raumzelle jeweils einem Hotelzimmer entspricht. Im Werk in Katsch wurden die einzelnen Brettsperrholzelemente zuerst zu Raumzellen zusammengebaut und dann so weit als möglich ausgestattet. Die Fenster wurden bereits im Werk eingesetzt, bevor die Raumzellen als Ganzes nach Turin verfrachtet wurden. Dort wurden sie mit einem Kran direkt vom LKW auf ihren Platz auf der Baustelle gehoben (Abbildung 2-34). Aufgrund der Ausführung in Holzmassivbauweise, was eine sehr steife Konstruktion ergibt, musste keine eigene Transport- und Montagestatik gerechnet werden. Die Verfliesung der Nasszellen wurde erst nach Versetzen der Elemente angebracht, da ansonsten die Entstehung von Rissen befürchtet wurde. [20]

## 2-3 GRUNDLAGEN DER VERBINDUNGSTECHNIK IM HOLZBAU

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der bestehenden Verbindungstechnik im Holzbau. Dazu wird zuerst die Gliederung in zimmermanns- und ingenieurmäßige Holzverbindungen und deren Untergruppen erläutert, bevor auf diese genauer eingegangen wird. Des Weiteren folgt eine kurze Abhandlung über die in der Verbindungstechnik im Holzbau verwendeten Metalle sowie die Fügungsmöglichkeiten dieser untereinander. Somit wird in diesem Kapitel ein Bogen von der Modul- bzw. Raumzellenbauweise im Großen hin zu einzelnen Holzverbindungen im Kleinen vollzogen. Dies wiederum dient als Grundlage zur Erläuterung darauf aufgebauten, komplexerer Verbindungssysteme.

### 2-3.1 VERBINDUNGS-AUFBAU UND BESTANDTEILE

Ohne auf einzelne Verbindungstypen genauer einzugehen, kann die grundlegende Systematik von Holzverbindungen als Kette von Einzelbestandteilen dargestellt werden, in welchen jeweils eine Kraftübertragung stattfindet. Deren genaue Anzahl variiert zwar je nach Verbindungstyp, kann aber in ein grundsätzliches Schema gegossen werden, an dessen beiden Enden die Bauteile stehen, zwischen denen Kräfte übertragen werden sollen. Die Verbindungstechnik im Holzbau lässt sich allgemein in den Bereich der zimmermannsmäßigen und der ingenieurmäßigen Verbindungsmittel unterteilen, welche wiederum eine Reihe von Unterkategorien aufweisen (siehe Abbildung 2-35).

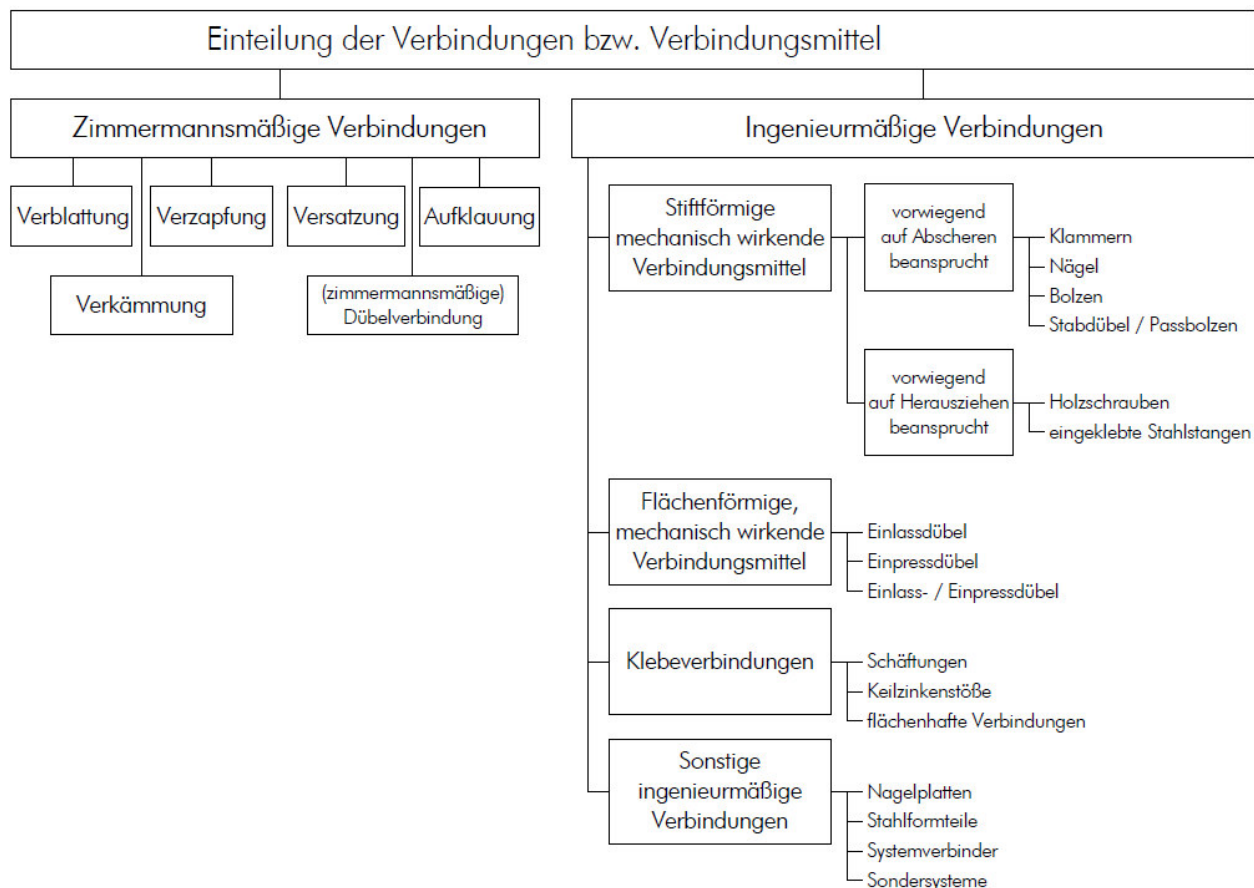


Abbildung 2-35: Einteilung der am häufigsten im Holzbau verwendeten Verbindungen bzw. Verbindungsmittel [21]

## 2-3.2 ZIMMERMANNSMÄSSIGE VERBINDUNGEN

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [22] angeführten Literatur.

Zimmermannsmäßige Holzverbindungen gehören zu den ältesten und am längsten verwendeten Holzverbindungen und sind dadurch gekennzeichnet, dass alle Verbindungsbestandteile aus den zusammenzufügenden Holzstücken herausgearbeitet sind. Es gibt im Allgemeinen keine zusätzlichen Verbindungsmittel und auch keine metallischen Bestandteile wie Nägel oder Schrauben.

Druck wird üblicherweise über direkten Kontakt übertragen, Schub in Form von Zapfen und Zug durch ineinandergreifende Bauteile. Die Kraftflüsse innerhalb der Verbindung können sehr komplex sein, was eine genaue Berechnung dieser Anschlüsse oftmals erschwert. Vielfach ist man hier auf Erfahrung aus dem langjährigen Einsatz der Verbindung angewiesen. Die Ausnutzungsgrade sind aufgrund der oft starken Schwächung des Querschnitts meist gering. Es folgt eine kurze Auflistung der gängigsten zimmermannsmäßigen Verbindungen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

### 2-3.2.1 Verblattung

Verblattungen dienen der Verlängerung, dem Eckstoß sowie dem Anschluss von Hölzern in einer Ebene. Je nach Ausführung dienen sie der Übertragung von Druck oder gegebenenfalls geringen Zugkräften. In der einfachsten Ausführung, als gerades Blatt, werden die beiden zu verbindenden Holzteile nur abgestuft aneinander gelegt, was zur Druckübertragung oder als Zwischenaufleger bzw. zur Weiterführung eines Durchlaufträgers verwendet werden kann. Komplexere Verblattungen können zusätzlich Zapfen zur Lagesicherung und Haken oder Schwalbenschwänze zur Zugübertragung aufweisen.



Abbildung 2-36: *gerades Blatt (links), gerades Blatt mit Zapfen (Mitte) und schräges Hakenblatt (rechts) [21]*

Die in Abbildung 2-36 abgebildeten Stoßverbindungen dienen der Verlängerung eines Holzbauteils. Je nach Holzdimensionen und Randbedingungen kommen verschiedene Formen zur Anwendung. Sollen durch eine solche Verbindung Durchlaufträger hergestellt werden, ist die Orientierung der Verbindung wichtig, um Risse zu vermeiden. Eine Fixierung durch Holzdübel ist sinnvoll und kann bei entsprechender Anwendung auch zum Aufbau einer gewissen Momenten- und Zugtragfähigkeit der Verbindung verwendet werden. Heutzutage werden zur Fixierung jedoch meist Nägel oder Schrauben verwendet, was allerdings nicht mehr der strengen Definition einer rein zimmermannsmäßigen Verbindung entspricht.



Abbildung 2-37: *Eck- und Winkelverbindungen, Scherblatt (links), kammförmiges Eckblatt (Mitte) und schwalbenschwanzförmiges Blatt mit Brust (rechts) [21]*



Auch für Eckverbindungen gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, eine Auswahl daraus ist in Abbildung 2-37 dargestellt. Zu den einfachsten gehören gerade Eckblätter und Scherblätter, welche nur Druck übertragen können. Durch eine schräge Ausführung oder mittels haken- bzw. kammförmiger Elemente lässt die Verbindung auch eine begrenzte Zugübertragung zu und verfügt gleichzeitig über eine bessere Lagesicherung. Wird ein Balken an einen anderen in annähernd rechtem Winkel angeschlossen, kann dieser entweder aufgelegt oder eingeschoben werden. Je nach Ausführung können dabei entweder nur Druckkräfte oder bei Anwendung schwalbenschwanzförmiger Elemente auch Zugkräfte übertragen werden.

### 2-3.2.2 Versatzungen und Aufklauungen

Diese klassischen Verbindungen des zimmermannsmäßigen Holzbaus kommen üblicherweise für die Herstellung von Dachkonstruktionen zum Einsatz. Sie sind vergleichsweise einfach gehalten und müssen teils hohe Kräfte, welche sich aus dem Konstruktionsprinzip von Sparren- und Pfettendächern ergeben, übertragen können. Versätze dienen dem Anschluss von im Winkel einfallenden Hölzern an durchgehende Bauteile, die häufigsten Varianten sind in Abbildung 2-38 dargestellt. Sie finden ihre Anwendung hauptsächlich in Sparrendächern bei der Verbindung zwischen Sparren und Bundtram.



Abbildung 2-38: einfacher Versatz mit Zapfen (links), Fersenversatz (Mitte) und doppelter Versatz (rechts) [21]

Grundsätzlich werden nur Druckkräfte, welche vom Sparren ausgehen, über Flächenpressung in den Bundtram eingeleitet, wo sie eine Zugkraft verursachen, welche mit der Kraft auf der gegenüberliegenden Seite des Tragwerks kurzgeschlossen wird. Versätze können je nach der zu übertragenden Kraft und den gegebenen Platzverhältnissen verschieden ausgeführt werden und werden meist zusätzlich durch Nägel oder Schrauben in der Lage gesichert, um ein Abheben oder Verrutschen des Daches zu verhindern.

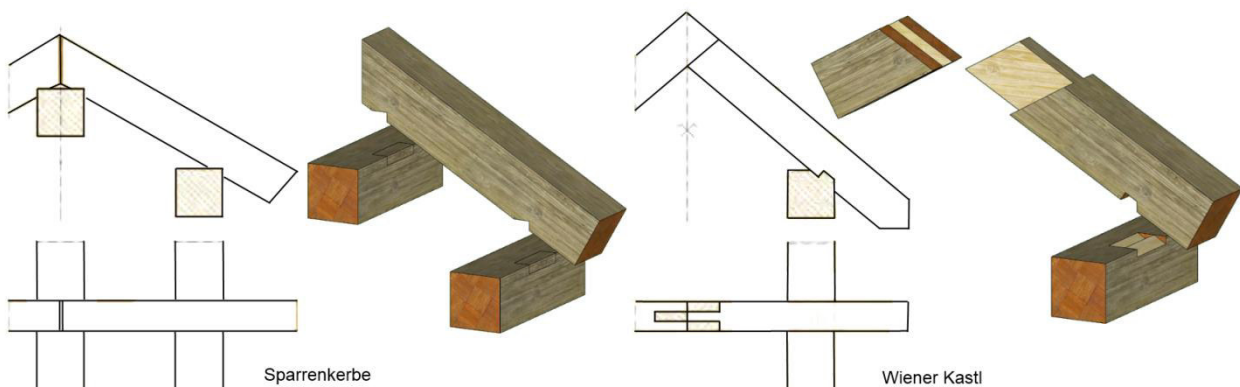


Abbildung 2-39: Aufklauungen im Dachstuhlbereich, Sparrenkerbe (links) und Wiener Kastl (rechts) [21]

Bei Pfettendächern kommt meist eine Sparrenkerbe zum Einsatz, bei welcher ein Keilstück aus dem Sparren geschnitten wird, um diesen so waagrecht auf der Pfette zu lagern (Abbildung 2-39, links). Dadurch kommt es bei vertikaler Beanspruchung der Dachkonstruktion zu einer rein vertikalen Kraftübertragung vom Sparren in die Pfette, seitlich wirkende Abtriebskräfte treten dabei keine auf. Zur Lagesicherung dienen Stahlklammern, Nägel oder Schrauben. Das Wiener Kastl bietet zusätzlich zum Auflager noch eine Einkerbung an der Pfette, in welcher der Sparren unverschieblich liegt. Somit ist die

Lagesicherheit gewährleistet und auch abtreibende Horizontalkräfte können in einem gewissen Maß aufgenommen werden (Abbildung 2-39, rechts).

### 2-3.2.3 Verkämmungen

Dieser Verbindungstyp wird zur Fixierung von sich kreuzenden, übereinanderliegenden Hölzern verwendet, eine kleine Auswahl davon ist in Abbildung 2-40 dargestellt. Verkämmungen werden in erster Linie zur Lagesicherung eingesetzt, um ein Verrutschen der einzelnen Bauteile gegeneinander zu verhindern.



Abbildung 2-40: Ganzkamm (links), Kreuzkamm (Mitte) und schwalbenschwanzförmiger Kamm (rechts) [21]

In erster Linie übertragen diese Verbindungen Druck vom obenliegenden Bauteil in den darunterliegenden, das Holz wird dabei auf Querdruck beansprucht. Die Verkämmung sorgt dabei für eine Lagesicherung und ermöglicht es außerdem, in begrenztem Maße Zugkräfte in Achsrichtung der beiden Hölzer zu übertragen. Diese Kräfte müssen dann innerhalb des jeweiligen Holzes in Form von Schubspannungen längs der Faser übertragen werden. Endet eines der auf Zug beanspruchten Hölzer kurz nach der Verbindung, empfiehlt sich die Anwendung eines schwalbenschwanzförmigen Kamms, da dieser einen höheren Widerstand gegen das Versagen des Vorholzes auf Schub aufweist.

### 2-3.2.4 Hartholzdübel

Hartholzdübel gehören zu den ältesten, heute noch verwendeten, Dübelarten und stellen in gewisser Weise einen Übergang zwischen den zimmermanns- und ingenieurmäßigen Verbindungsmitteln dar. Eingesetzt wurden sie entweder als Zugverbindung zweier über- oder nebeneinanderliegender Hölzer oder zur schubstarreren Verbindung zweier übereinander liegender Balken, um so einen höheren und damit biegesteiferen Querschnitt zu erhalten. Der Einbau und die grundlegende Wirkungsweise von Hartholzdübeln ist in Abbildung 2-41 dargestellt.

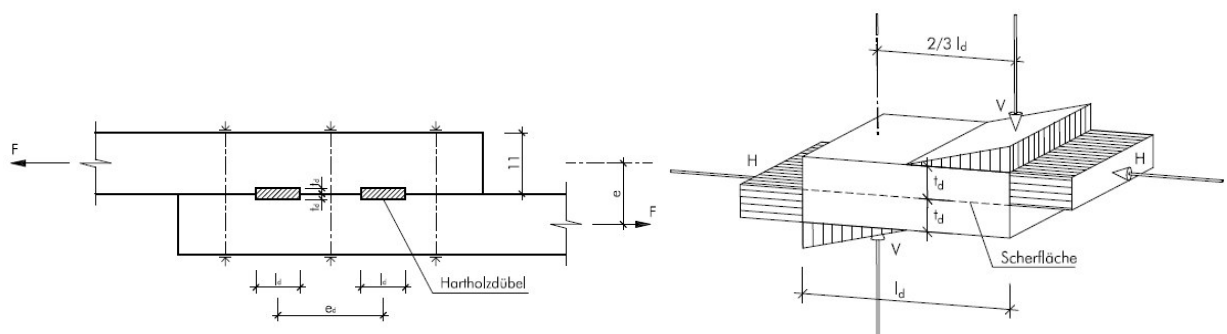


Abbildung 2-41: Zugstoß mit Hartholzdübel (links) und anliegende Spannungen am Hartholzdübel (rechts) [21]

Der Hartholzdübel selbst ist ein quaderförmiges Holzteil, welches in eine genau angepasste Vertiefung im Holz gelegt wird. Um Probleme in Bezug auf Quellen und Schwinden zu vermeiden, sollte der

Hartholzdübel möglichst trocken eingebaut und in Faserrichtung beansprucht werden. Eine passgenaue Ausführung ist nötig, um ein Verschieben des Stoßes unter Belastung zu verhindern. Da aufgrund der Exzentrizität der Verbindung ein Moment auftritt, welches die beiden Hölzer auseinandertreibt, ist eine Sicherung der Verbindung durch Klemmbolzen nötig. Insgesamt ergibt sich dadurch eine konstante Druckbelastung auf den Dübel in Faserrichtung. Quer zur Faser tritt jeweils gegengleich auf der einen Hälfte des Dübels ein linearer Druckkraftverlauf auf, während auf der dazu gegenüberliegenden Seite wegen Kontaktverlust keine Kraft übertragen werden kann.

### 2-3.3 INGENIEURMÄSSIGE VERBINDUNGSMITTEL

Im Gegensatz zu zimmermannsmäßigen Holzverbindungen weisen ingenieurmäßige Holzverbindungen immer metallische Verbindungsmittel, welche die Kräfte von einem Bauteil in das andere leiten, auf. Die Verbindung kann dabei als Kette von Kraftübertragungsmechanismen betrachtet werden (Abbildung 2-42).

Der erste Teil der Kraftübertragung findet vom Holz auf das metallische Verbindungsmittel statt, dort wird die Kraft weitergeleitet und eventuell noch über Metall-Metall-Verbindungen übertragen, bevor sie am anderen Ende der Verbindung wieder in das Holz (bzw. in das andere anzuschließende Bauprodukt) übergeleitet wird. Diese Kette existiert grundsätzlich bei allen mit ingenieurmäßigen Verbindungsmitteln ausgeführten Verbindungen, manifestiert sich dabei aber jedes Mal in anderer Form. Die Wirkungsmechanismen bleiben dabei jedoch stets die gleichen.

Die einzelnen Glieder dieser Kette können in verschiedenster Weise ausgeführt werden. Jede Verbindung muss die grundlegenden Anforderungen von Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität erfüllen. Während Tragfähigkeit und Steifigkeit für alle Glieder der Verbindungskette vorausgesetzt wird, ist es in Bezug auf die Duktilität ausreichend, wenn zumindest ein Teil der Verbindung diese gewährleistet, da die Verbindung bei fachgerechter Dimensionierung dann auch genau in diesem Teil ihr duktilen Potential entfaltet, bevor andere Komponenten der Kette spröde versagen.



Abbildung 2-42: schematische Darstellung einer ingenieurmäßigen Holzverbindung als Kette von Kraftübertragungs-mechanismen zwischen verschiedenen Materialien

Für den Bereich des Holzes kann in Faserrichtung grundsätzlich ein sprödes Versagen angesetzt werden. Sind Vorkehrungen gegen ein Aufspalten zufolge Querkzugbeanspruchung getroffen, kann jedoch auf Druck vor dem Versagen des Bauteils eine deutlich größere Verformung erreicht werden als auf Zug. Quer zur Faserrichtung erfolgt das Versagen auf Zug spröde und ohne Vorankündigung, während das Holz auf Querdruck buchstäblich bis zur vollständigen Kompression zusammengedrückt werden kann. Da die meisten Verbindungsmittel, insbesondere die im Ingenieurbau verwendeten, jedoch auf Zug wirken, wird die Holzkomponente der Verbindung normalerweise als spröde angesetzt.

Die Verbindung zwischen Holz und Metall kann je nach Ausführung entweder spröde oder duktil gestaltet werden, hier kommt es sehr stark auf die Verbindungsmittelwahl an. Als spröde Verbindungen gelten Verklebungen verschiedenster Art sowie auf Zug beanspruchte stabförmige Verbindungsmittel. Als duktil können auf ein Biegeversagen bemessene, auf Abscheren beanspruchte Verbindungsmittel angesehen werden. Diese können unter Lasteinwirkung ihr Fließmoment erreichen und erlauben somit eine gewisse Verformbarkeit der Verbindung, bevor es zu einem Versagen der gesamten Verbindung kommt.

Der reine Metallbereich der Verbindung wird meist als duktil angesetzt. Um dieses Versagen für die gesamte Kette zu gewährleisten ist dementsprechend eine Überdimensionierung des Metallbereichs der Verbindung in jedem Fall zu vermeiden. Dazu wird der Metallteil der Verbindung normalerweise

schwächer ausgeführt als die Holz-Metall-Verbindung, um ein gezieltes Fließen der Verbindung in diesem Bereich zu ermöglichen, bevor andere Teile der Verbindung versagen. Als Konstruktionsgrundsatz gilt daher, den Metallteil der Verbindung als duktile Zone bzw. als Fließgelenk auszuführen.

Der wesentliche Unterschied zu den zimmermannsmäßigen Verbindungen liegt darin, dass die Tragfähigkeit von ingenieurmäßigen Verbindungen rechnerisch nachgewiesen wird, und nicht vorwiegend auf reiner Erfahrung beruht. Der Kraftfluss erfolgt dabei über die Verbindungsmittel und nicht mehr durch direkten Kontakt der zu verbindenden Holzbauteile. Als Material kommen hauptsächlich Stahl und Gusseisen, in manchen Fällen Hartholz und Kunststoff, sowie seit einigen Jahren auch Aluminium zum Einsatz.

Ingenieurmäßige Verbindungsmittel können nach Beanspruchung und Geometrie unterschieden werden. Die Beanspruchung kann in Richtung der Verbindungsmittelachse erfolgen, was axialen Druck oder Zug im Verbindungsmittel verursacht. Oder sie wirkt quer zur Verbindungsmittelachse, wodurch eine Schub- bzw. Biegebeanspruchung und folglich eine Belastung auf Abscheren resultiert. Auf Zug (Herausziehen) bzw. Druck (Hineindrücken) werden hauptsächlich Schrauben, eingeklebte Stahlstangen und eingeklebte Stahlbleche beansprucht, Abscheren ist die vorwiegende Tragwirkung bei Klammern, Nägeln, Bolzen, Stabdübeln und Passbolzen. Des Weiteren wird zwischen stiftförmigen und flächigen Verbindungsmitteln unterschieden.

### 2-3.3.1 Holzbauschrauben

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [21] angeführten Literatur.

Holzbauschrauben zählen zu den am häufigsten verwendeten Verbindungsmittel im Holzbau und sind einfach und vielseitig einsetzbar. Sie sind in verschiedensten Nenndurchmessern (i.d.R. Gewindeaußendurchmesser  $d \leq 14$  mm) und Längen ( $\leq 2000$  mm) erhältlich und können je nach Ausführung der Spitze selbstbohrend oder nicht selbstbohrend sein. Meist werden Schrauben axial auf Druck oder Zug und nur in seltenen Fällen quer zu ihrer Achse auf Schub beansprucht.

Der übliche Einsatz von Holzbauschrauben liegt im Bereich von Holz-Holz-Verbindungen und Stahl-Holz-Verbindungen sowie als Verstärkung von Auflagerbereichen und stark auf Querkraft beanspruchten Bauteilbereichen. Für die Herstellung von einschnittigen Holz-Holz- oder Stahl-Holz-Verbindungen werden die Schrauben zumeist in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Kraftrichtung bzw. zur Scherfläche eingedreht, um so ein optimales Verhältnis zwischen den Kräften in und den Kräften quer zur Achsrichtung zu erreichen.

Im Wesentlichen wird im ingenieurmäßigen Holzbau zwischen Vollgewinde- und Teilgewindeschrauben unterschieden (Abbildung 2-43, links und Mitte). Für die Bemessung ist deren Gewindeaußendurchmesser  $d$  von großer Bedeutung, welcher zur Ermittlung des Widerstands der Schrauben auf Herausziehen und auf Abscheren dient. Eine entsprechende Definition inklusive weiterer Gewindeparameter ist in Abbildung 2-43 (rechts) angeführt.

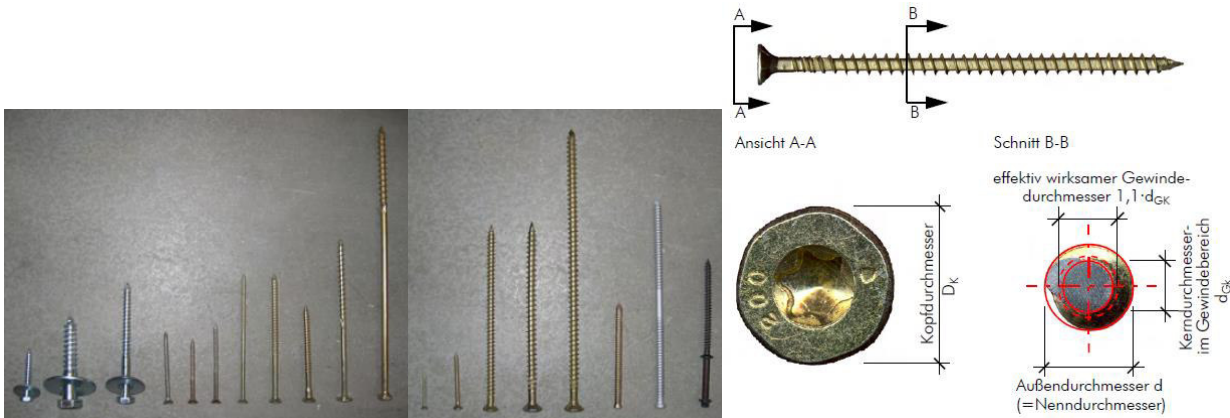


Abbildung 2-43: Holzbauschrauben mit Vollgewinde (links), Teilgewinde (Mitte) und verschiedene Durchmesser einer Vollgewinde-Holzbauschraube (rechts) [21]

Aus dem Tragmechanismus von einzelnen, axial beanspruchten Holzbauschrauben ergeben sich 3 Versagensmechanismen: Ausziehen bzw. Hineindrücken, Kopfdurchziehen und Stahlbruch. Diese basieren auf jeweils verschiedenen Durchmessern und Festigkeitskenngrößen.

Der Mechanismus Ausziehen bzw. Hineindrücken ergibt sich aus der Kraftübertragung vom Holz in die Schraube, wo vereinfacht betrachtet eine Schubspannung entlang der äußeren Mantelfläche der Schraube wirkt. Der Auszieh- und Hineindringwiderstand ist somit von Außendurchmesser und Einbindetiefe bzw. der Mantelfläche des äußeren Randes des Schraubengewindes abhängig. Bei Teilgewindeschrauben wirkt nur der Teil der Schraube auf Ausziehen, der auch tatsächlich über ein Gewinde verfügt. Im Falle einer Druckbeanspruchung kann zusätzlich zum Hineindrücken noch ein Ausknicken der Schraube auftreten, welches üblicherweise im Kopfbereich, wo die größte Druckspannung herrscht, vorkommt (Abbildung 2-44, links).



Abbildung 2-44: Versagen von Holzbauschrauben auf Hineindrücken, Ausknicken im Kopfbereich (links) und Kopfdurchziehen von Schrauben (rechts) [21]

Der Mechanismus Kopfdurchziehen wird nur bei Holz-Holz-Verbindungen aktiviert und beschreibt ein Versagensverhalten, bei dem der Kopf durch das Schraubenloch durchgezogen wird (Abbildung 2-44, rechts). Dabei wirkt die Auflagerfläche des Kopfes (bzw. bei Verwendung von Unterlagsscheiben deren Fläche) auf Querpressung auf das Holz. Wird durch ein Metallblech geschraubt, tritt lange vor dessen Schubversagen um das Loch Stahlbruch im Schraubenschaft auf. Der Versagensmechanismus Kopfdurchziehen wird nur bei Teilgewindeschrauben oder nach Versagen des Vollgewindes im entsprechenden Holzteil aktiviert und benötigt große Verformungen, um zu wirken. In der Bemessung letzterer werden der Auszieh- und der Kopfdurchzieh- und Stahlbruchwiderstand einander gegenübergestellt, wobei aufgrund der quasi parallelen Wirkung der jeweils größere Wert maßgebend ist.

Der Mechanismus Stahlbruch kommt nur bei großen Einbindetiefen zu tragen und tritt erst auf, wenn der Auszieh- und der Kopfdurchzieh- und Stahlbruchwiderstand größer als die Tragfähigkeit des Schraubenschafts ist. Diese wiederum hängt ausschließlich von der Stahlgüte und dem Kerndurchmesser ab und bezieht sich dadurch im Grunde rein

auf die vorhandene Querschnittsfläche. Kerbwirkungen durch den Beginn des Gewindes können die Tragfähigkeit der Schraube jedoch verringern. In der Bemessung wird die Tragfähigkeit auf Stahlbruch mit dem Auszieh- bzw. Kopfdurchziehungswiderstand verglichen, wobei in diesem Fall der kleinere Wert maßgebend ist.

Die Tragfähigkeit einer Schraubengruppe entspricht nicht der Summe der Einzeltragfähigkeiten. Aufgrund der Spaltzugwirkung im Zuge der Kraftübertragung zwischen Schraube und Holz sowie der begrenzten Umlagerungsfähigkeit dieser vergleichsweise steifen Verbindungen kommt es zu einer Verschlechterung der Tragfähigkeit, die umso größer ausfällt, je mehr Schrauben in der Verbindung vorhanden sind. Am wichtigsten sind dabei die Anzahl und der Abstand der Schrauben, welche in Faserrichtung hintereinander liegen. Je kleiner die Abstände, desto stärker wird dieser Abminderungseffekt. Bei zu kleinen Abständen kann es zu einem Blockversagen der gesamten Verbindung kommen. Dann wirken nicht mehr die Schrauben einzeln auf Herausziehen, sondern der gesamte, von der Verbindung umschriebene Holzblock, versagt entlang seiner Begrenzungsflächen auf Schub, Rollschub und Querschub (Blockversagen).

Sollte eine Schraube auf Abscheren beansprucht sein, wird sie entsprechend ihres Durchmessers mit einem Faktor zur Berücksichtigung des angeschnittenen Gewindeteils multipliziert und wie ein Stabdübel behandelt. Aufgrund der guten Verzahnung der Schraube mit dem Holz kann durch den Seileffekt eine deutliche Tragfähigkeitserhöhung erreicht werden. Dieser erreicht aufgrund der gleichen Wirkungsweise in etwa die Größe des Ausziehungswiderstands.

Neben der Verbindung von Holz und Stahlteilen werden Schrauben auch zur Verstärkung von Bauteilen eingesetzt, indem sie vollständig im Holz versenkt werden. Dies geschieht zum Beispiel bei Auflagerverstärkungen, wo Schrauben im Auflagerbereich in Krafrichtung eingedreht werden. So wird die auftretende Druckkraft tiefer in den Querschnitt eingeleitet und somit eine bessere Lastverteilung erreicht, welche die Querdruckbeanspruchung an der Oberfläche und damit auch die Verformung im Auflagerbereich stark reduziert. Zur Erhöhung der Schubfestigkeit beispielsweise im Auflagerbereich oder bei Durchbrüchen, werden Schrauben schräg zu einer aufgrund der Rissbildung resultierenden Scherfläche in einen Träger gedreht. Dort wirken sie als „Bewehrung“, welche den Rissfortschritt und folglich das Versagen des Trägers zufolge Schub verhindert. Des Weiteren werden Schrauben vermehrt zur Verstärkung von Stabdübelverbindungen verwendet, wo sie die Spaltzugkräfte aufnehmen und so ein vorzeitiges Versagen der Verbindung verhindern.



**Abbildung 2-45: Schraubentypen und übliche Schraubenspitzen, von links nach rechts: Sechskant-Holzschraube, Selbstbohrende Holzbauschraube mit Teil- oder Vollgewinde, Selbstbohrende Schraubenstangen [21], Schraubenspitze mit Schneidkerbe [23]**

Holzbauschrauben gibt es in den verschiedensten Formen und Größen, die Typenunterscheidung erfolgt im Wesentlichen nach Antrieb, Gewinde und Spitze (Abbildung 2-45). Der Antrieb kann durch einen Außensechskant, mit Innensechskant, durch Kreuzschlitz oder – aktuell am häufigsten eingesetzt – durch einen Stern („Torx“) erfolgen.

Das Gewinde kann als Teil- oder Vollgewinde ausgeführt sein, daneben gibt es auch noch Spezialgewinde mit unterschiedlichen Steigungen innerhalb eines Gewindevverlaufs oder Schrauben mit zwei Gewindevverläufen unterschiedlicher Ausprägung. Die klassischen Holzbauschrauben müssen i.d.R.

zuerst auf den Innendurchmesser vorgebohrt werden, während dies bei den heutzutage weiter verbreiteten selbstbohrenden Holzschrauben nicht mehr nötig ist. Um eine gute Bohrleistung bei möglichst geringer Spaltwirkung zu erreichen, verfügen selbstbohrende Holzschrauben über eine große Vielfalt verschiedenster Spitzenausformungen, welche ständig weiterentwickelt werden.

### 2-3.3.2 Stabdübel

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [21] angeführten Literatur.

Stabdübel und Bolzen werden im Holzbau ebenfalls häufig verwendet und kommen aufgrund der hohen Lastaufnahmefähigkeit vor allem bei großen, hoch beanspruchten Verbindungen zum Einsatz. Die Kraftrichtung verläuft üblicherweise normal zur Stabdübelachse, bezogen auf den dazugehörigen Holzquerschnitt können damit bei entsprechender Ausführung Druck, Zug, Schub und Biegemomente übertragen werden. Stabdübelverbindungen können im Grunde mit beliebiger Schnittigkeit (= Anzahl der Scherfugen) ausgeführt werden.

Die Tragfähigkeit von Stabdübeln wurde früher durch einfaches Messen der maximal aufnehmbaren Kraft, dividieren durch deren Anzahl und dem Abziehen eines Sicherheitsbeiwerts ermittelt. Da dies für Nachweise nach dem heute gültigen semiprobabilistischen Sicherheitskonzept nicht ausreicht, wurden neue Modelle entwickelt, um mit Hilfe von Materialkennwerten und den Abmessungen der einzelnen Verbindungsteile eine hinreichend genaue Berechnung der Tragfähigkeit zu ermöglichen.

Stabdübelverbindungen wirken grundsätzlich auf Lochleibung im Holz und auf Abscheren im Dübel. Einige Versagensmechanismen sind exemplarisch in Abbildung 2-46 dargestellt. Daraus ergibt sich ein Grundmaß der Verbindungstragfähigkeit, das einerseits von der der Breite des Seiten- und Mittelholzes abhängt und damit in Kombination mit dem Dübelndurchmesser die auf Lochleibung beanspruchte Holzfläche festlegt. Zum anderen hängt die Tragfähigkeit direkt vom Durchmesser des Stabdübelns beziehungsweise dessen Fließmoment ab, welches die maximal übertragbaren Kräfte limitiert. Das Fließmoment entspricht dabei der maximalen plastischen Momententragfähigkeit des Dübels und kann entweder durch 4-Punkt-Biegeversuche oder die Prüfung der gesamten Verbindung ermittelt werden.

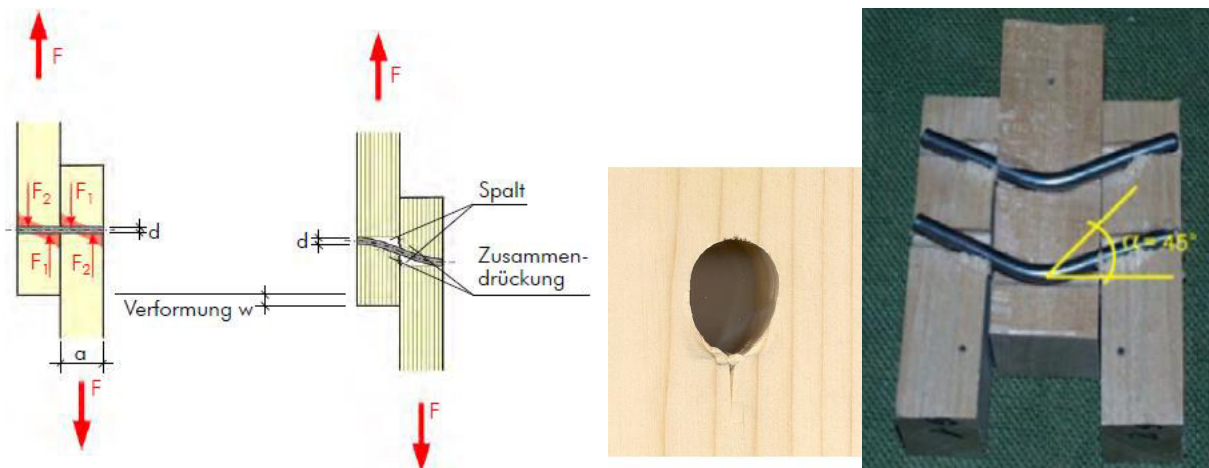


Abbildung 2-46: Kraftübertragung bei einer Holz-Holz-Stabdübelverbindung (links), Verformung des anliegenden Holzes durch Lochleibungsbeanspruchung (Mitte) und Ausbildung von Fließgelenken im Dübel (rechts) [21]

Große Dübelndurchmesser erlauben dabei zwar einerseits eine hohe Kraftübertragung durch große Fließmomente und Flächen, führen aber zu einem spröden Versagensbild, da das Holz auf Lochleibung wesentlich weniger Kraft aufnehmen kann als ein Dübel mit großem Durchmesser auf Abscheren, was folglich zur Bildung eines Fließmoments führt. Des Weiteren nimmt die ertragbare Lochleibungsspannung zu, je kleiner die verwendeten Dübel werden, was auf Größeneffekte zurückgeführt werden kann (Abbildung 2-47). Verbindungen mit kleinen Dübelndurchmessern verhalten sich somit deutlich duktiler als große, können aber aufgrund der geringen Fließmomente die vorhandene

maximale Lochleibungstragfähigkeit nur teilweise ausnutzen, was die Verbindung bei zu kleinen Durchmessern wiederum unwirtschaftlich macht.

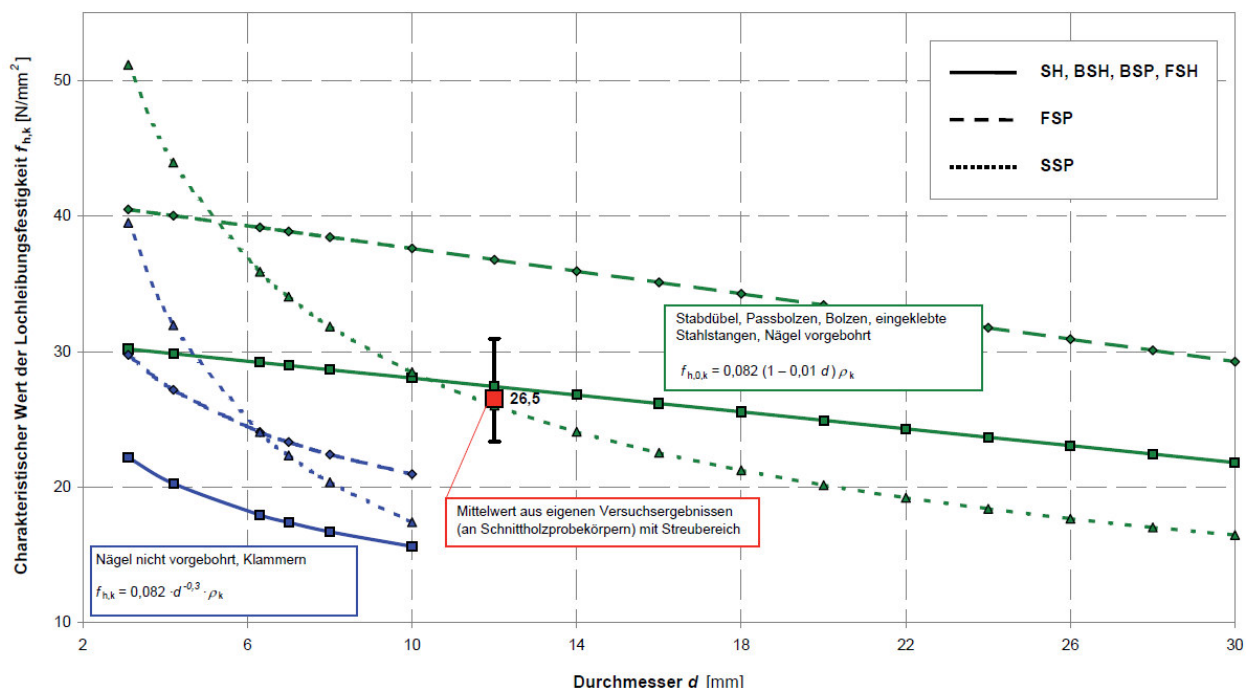


Abbildung 2-47: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers für verschiedene Verbindungsmittel bei einer Holzrohddichte von  $380 \text{ kg/m}^3$  und einer Plattendicke von  $19 \text{ mm}$  [21]

Neben dem Durchmesser hängt die Lochleibungsfestigkeit auch vom Winkel der Krafteinleitung zur Faser ab. Je größer dieser Winkel wird, desto niedriger wird die aufnehmbare Druckspannung. Aufgrund der stärker ausgeprägten Anisotropie wirkt sich die Abminderung der Lochleibungsfestigkeit bei Nadelhölzern stärker aus als bei Laubhölzern. Bei größeren Dübeldurchmessern ist dieser Effekt stärker ausgeprägt, bei Durchmessern kleiner gleich  $8 \text{ mm}$  ist dieser Effekt vernachlässigbar. Zusätzlich zur Tragfähigkeit auf Abscheren kann auch noch eine Kraftübertragung durch Reibung des Dübels am Holz (Seilwirkung) erreicht werden. Diese hängt stark von der Rauigkeit des Dübels ab und wird bei glatten Dübeln, welche in den meisten Fällen zum Einsatz kommen, wegen ihrer geringen Wirkung normalerweise vernachlässigt.

Die Optimierungsaufgabe bei der Konzeption von Stabdübelverbindungen besteht daher darin, einen Durchmesser zu wählen, welcher über ein ausreichend großes Fließmoment verfügt, um die gesamte zufolge Lochleibung aufnehmbare Kraft zu übertragen. Gleichzeitig sollte dieser auch „weich“ genug sein, um vor einem spröden Versagen der Verbindung ins Fließen zu kommen und so einen sicherheitstechnisch günstigeren Versagensmechanismus zu erreichen. In der Bemessung wird zwischen einer Vielzahl von Versagensmechanismen unterschieden, welche sich je nach Schnittigkeit, Holzdicke, Stabdübeldurchmesser und deren Verhältnissen zueinander unterscheiden. Maßgebend ist immer derjenige Mechanismus, welcher für den berechneten Fall die geringste Tragfähigkeit aufweist.

Die Tragfähigkeit einer Dübelverbindung wird üblicherweise anhand eines einzelnen Dübels bestimmt, welche dann unter Berücksichtigung einer, sich auf die Tragfähigkeit der Verbindung negativ auswirkenden Gruppenwirkung mit der Anzahl der Dübel in der Verbindung multipliziert wird. Der Einfluss dieser Gruppenwirkung hängt von der Anordnung der Dübel in der Verbindung ab. Sie besagt im Wesentlichen, dass Dübel, welche in Faserrichtung hintereinander liegen durch die Spaltwirkung aufgrund des Querzugs in Summe eine geringere Tragfähigkeit erreichen als die gleiche Anzahl einzeln wirkender Dübel. Je geringer die Dübelabstände, desto gravierender ist dieser Effekt. Lediglich bei einer Momentenbeanspruchung wird dieser Effekt i.d.R. vernachlässigt und der Nachweis mit dem maßgebend beanspruchten Einzeldübel geführt.



Stabdübelverbindungen können als Holz-Holz- oder Holz-Stahl-Verbindung ausgeführt werden und dabei einen ein- oder mehrschnittigen Aufbau aufweisen. Die Dübel selbst bestehen üblicherweise aus duktilem Stahl oder Hartholz und haben die Form runder, am Ende stumpf abgeschnittener Stifte (Abbildung 2-48, links).



Abbildung 2-48: Stabdübel aus Stahl und Hartholz (links), Passbolzen (Mitte) und mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung mit Passbolzensicherung, zur Übertragung großer Momente (rechts) [21]

Vor allem bei Verbindungen mit vier und mehr Scherfugen werden meistens eingeschlitzte Stahlbleche verwendet, da diese aufgrund ihrer hohen Tragfähigkeit und daraus resultierenden geringen Dicke nur zu geringen Querschnittsverlusten führen und somit keine Aufdopplungen am Querschnitt nötig sind. Zur Sicherung von Stabdübelverbindungen, insbesondere unter dynamischen Beanspruchungen wie Verkehrslasten auf Straßenbrücken, kommen Passbolzen zum Einsatz. Deren Aufbau und Wirkungsweise entspricht jener von Stabdübeln, lediglich an den Enden wird eine Beilagscheibe mit Mutter aufgebracht, um ein Verschieben in Achsrichtung des Verbindungsmittels zu verhindern (Abbildung 2-48, mitte, rechts). Aufgrund des Anpresswiderstands der Beilagscheibe kann bei Passbolzen eine zum Teil deutliche Tragfähigkeitserhöhung durch Ausnutzung der Seilwirkung erreicht werden.

### 2-3.3.3 Nägel

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [21] angeführten Literatur.

Nägel gehören wie Schrauben, Bolzen und Stabdübel zu den stiftförmigen Verbindungsmitteln und werden vorwiegend auf Abscheren beansprucht, wobei Nägel mit entsprechenden Eigenschaften hinsichtlich ihrer Profilierung auch auf Herausziehen beansprucht werden können. Meist erfolgt die Anwendung in Gruppen (Nagelbildern), wobei Nägel in großer Zahl ohne Vorbohren eingeschlagen werden.

Die Tragfähigkeit einer auf Abscheren beanspruchten Nagelverbindung ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Lochleibungsfestigkeit des Holzes und der Biegesteifigkeit der Nägel. Die Berechnung erfolgt gleich wie bei Stabdübelverbindungen anhand von Durchmesser- und Dickenverhältnissen (Abbildung 2-49).

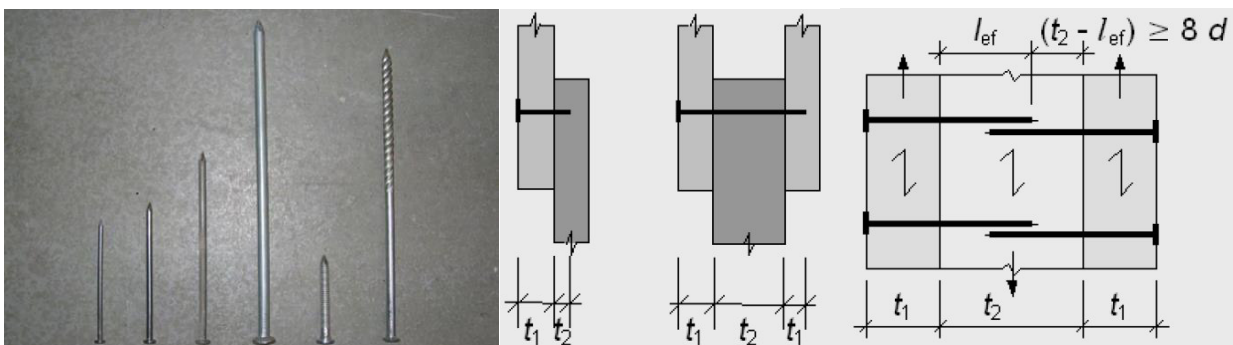


Abbildung 2-49: Nägel in Verschiedenen Ausführungen, Längen und Durchmessern (links), Schema ein- und zweiseitige Nagelverbindung (Mitte) und übergreifende Nägel (rechts) [21]

Um ein Aufspalten des Holzes zu verhindern, müssen gewisse Mindestholzdicken und Nagelabstände, welche vom jeweiligen Nageldurchmesser abhängen, eingehalten werden. Als zusätzliche Vorkehrung gegen Aufspalten werden Nägel entlang der Holzfasern versetzt eingeschlagen. Des Weiteren sind Mindesteinschlagtiefen einzuhalten, um eine gesicherte Kraftübertragung zu gewährleisten.

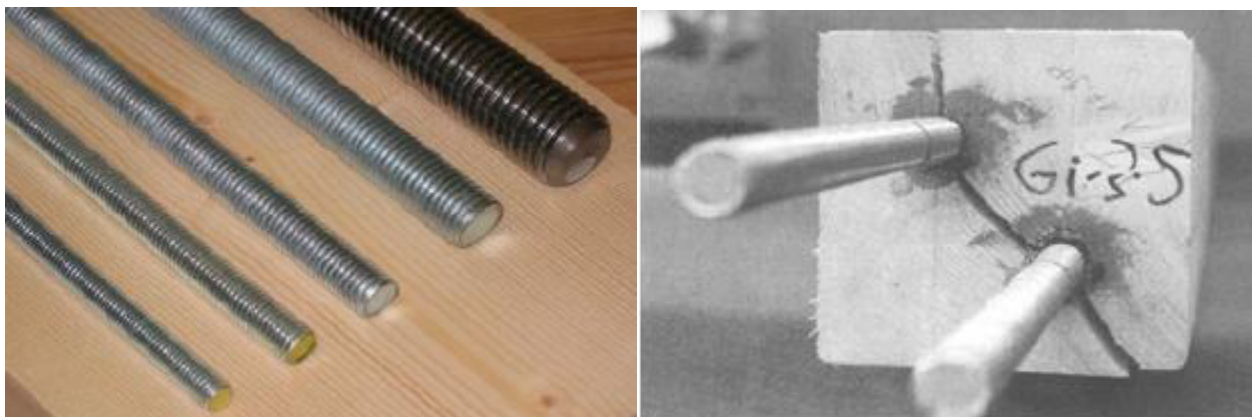
Bei den am häufigsten verwendeten Nägeln handelt es sich um glattschaftige Nägel mit Senkkopf, welche wegen ihrer geringen und unzuverlässigen Reibungseigenschaften nur auf Abscheren, nicht jedoch auf Zug beansprucht werden dürfen. Für Zugbeanspruchungen gibt es eigene Nägel mit rauer oder gerillter Oberfläche, welche eine höhere Reibung aktivieren können und so auch bei Holzfeuchteänderungen für eine sichere und kraftschlüssige Verankerung sorgen (Abbildung 2-49, links).

Meist werden Nagelverbindungen nicht vorgebohrt. Bei Holzarten mit erhöhter Spaltgefahr, wie beispielsweise Lärche, Eiche und Buche, ist dies jedoch dringend empfohlen. Neben einer Reduktion der Spaltgefahr verringert ein Vorbohren der Nagellöcher auch die erforderlichen Mindestabstände und ermöglicht so ein dichteres Nagelbild. Der Bohrlochdurchmesser sollte dabei etwa 85 bis 90% des Nageldurchmessers betragen. Werden ein oder mehrere Stahlbleche in einer Nagelverbindung verwendet, sind diese mit dem Nageldurchmesser vorzubohren.

### 2-3.3.4 Eingeklebte Gewindestangen

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [21] angeführten Literatur.

Eingeklebte Stangen gehören ebenfalls zu den stiftförmigen Verbindungsmitteln und sind in unterschiedlichen Ausführungsvarianten (z.B. Stahlbolzen mit metrischem Gewinde → Gewindestange, Betonrippenstähle, Stäbe in Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) oder Kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK)) mit verschiedensten Durchmessern verfügbar (Abbildung 2-50, links). Die folgende Erklärung bezieht sich auf eingeklebte Gewindestangen, da diese gegenwärtig am häufigsten eingesetzt werden. Sie können entweder axial oder auf Abscheren beansprucht werden und kommen in einem weiten Spektrum von Anwendungen zum Einsatz. Beispiele hierfür sind örtliche Verstärkungen zur Rissvermeidung, die Einleitung großer Kräfte in Holzbauteile und die Realisierung eingespannter Stützen. Weitere Einsatzbereiche sind die Schubverstärkung von Trägern, Durchbrüchen und Platten, eingespannte Stöße, Rahmenecken, steife Knotenpunkte in Fachwerkträgern und Holz-Beton Verbundelemente. Eingeklebte Gewindestangen stellen eine sehr steife Verbindung her, welche gleichzeitig einen guten Korrosionsschutz und einen hohen Brandwiderstand aufgrund der Dämmwirkung des Holzes aufweist.



**Abbildung 2-50: Gewindestangen unterschiedlicher Durchmesser (links), im Hirnholz eingeklebte Gewindestangen nach Spaltzugversagen (rechts) [21]**

Im Wesentlichen besteht eine Verbindung mit eingeklebten Gewindestangen aus drei Komponenten. Dem Holz, der Gewindestange und dem Klebstoff, der einen quasi-starren Verbund zwischen den beiden anderen Komponenten herstellt. Dabei sollte der Klebstoff stark genug sein, um selbst zu keiner Schwachstelle des Systems zu werden. Die Kraftübertragung vom Stahl in den Klebstoff erfolgt dabei durch eine mechanische Verzahnung der profilierten Stahloberfläche mit dem Klebstoff. Die Weiterleitung in das Holz erfolgt durch Adhäsion.

Die Kraftübertragung innerhalb der Klebefuge erzeugt eine lokale Schubbeanspruchung. Da Stahl einen deutlich höheren E-Modul als Holz quer zur Faserrichtung hat, kommt es in diesem Fall zu einer nahezu konstanten Verteilung der Schubspannung über die gesamte Einklebelänge. Die Tragfähigkeit der Verbindung ist dann direkt vom Durchmesser und der Einbindetiefe bzw. der Mantelfläche der Gewindestange und der Scherfestigkeit des Klebstoffes abhängig. Wird die Stahlstange jedoch längs der Faser eingeklebt, verläuft die Schubspannung nicht konstant.

Ersichtlich ist dies am Bruchverhalten. Bei einer Anordnung der Stahlstangen quer zur Faser kommt es üblicherweise zu einem Abscheren der Holzfaser an der Grenzfläche zwischen Holz und Klebstoff, sobald die lokalen Kapazitäten des Holzes erreicht sind. Bei Stahlstangen, die parallel zur Faser angeordnet sind, tritt selten ein Nettobruch im Holzteil auf. Häufig kommt es zu einem Aufspalten des Holzes zufolge Querzug (Abbildung 2-50, rechts) sowie einem Abscheren in der Grenzfläche zwischen Klebstoff und Holz oder einem Versagen der Stahlstange selbst. Zusammenfassend sind somit die folgenden Versagensarten für eine Bemessung zu berücksichtigen:

- Versagen des Holzes am Übergang zum Klebstoff
- Versagen der Kontaktfuge Holz/Klebstoff (Adhäsionsbruch)
- Versagen des Klebstoffes auf Abscheren in der Fuge
- Versagen der Kraftübertragung Stahl/Klebstoff (mechanische Verzahnung)
- Versagen des Stahls bei der Verzahnung auf Schub
- Nettobruch der Stahlstange

### 2-3.3.5 Eingeklebte Bleche

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [24] angeführten Literatur.

Während eingeklebte Gewindestangen bereits seit geraumer Zeit intensiv genutzt werden, handelt es sich bei eingeklebten Blechen um ein relativ neues Verbindungssystem. Deren Einsatz ist vor allem dort sinnvoll, wo hohe Lasten auf kleinem Raum übertragen werden müssen, da bei eingeklebten Stahlblechen deutlich kleinere Querschnittsschwächungen auftreten als bei Schrauben- oder Dübelverbindungen. Durch immer größer und höher werdende Gebäude aus tragenden Holzelementen nehmen auch die auftretenden Kräfte immer weiter zu, was der Entwicklung neuer Verbindungstypen zusätzlichen Auftrieb verschafft. Im Fall der eingeklebten Bleche gibt es bereits eine Reihe von Forschungsprojekten und Versuchsserien, in denen es unter anderem darum geht, welche Art von Blechen – gegenwärtig werden vorwiegend Lochbleche eingesetzt – am besten in Bezug auf Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität abschneidet. Die Anwendungsgebiete von eingeklebten Stahlblechen reichen von Holz-Holz über Holz-Metall bis hin zu Holz-Beton-Verbindungen, womit sich auch Verbundkonstruktionen ausführen lassen.

Im Weiteren wird auf das Holz-Stahl-Komposit-System (HSK-System), welches auf eingeklebten Lochblechen basiert, näher eingegangen. Dessen Grundgeometrie, Einbauzustände und Versagensmechanismen sind in Abbildung 2-51 dargestellt.

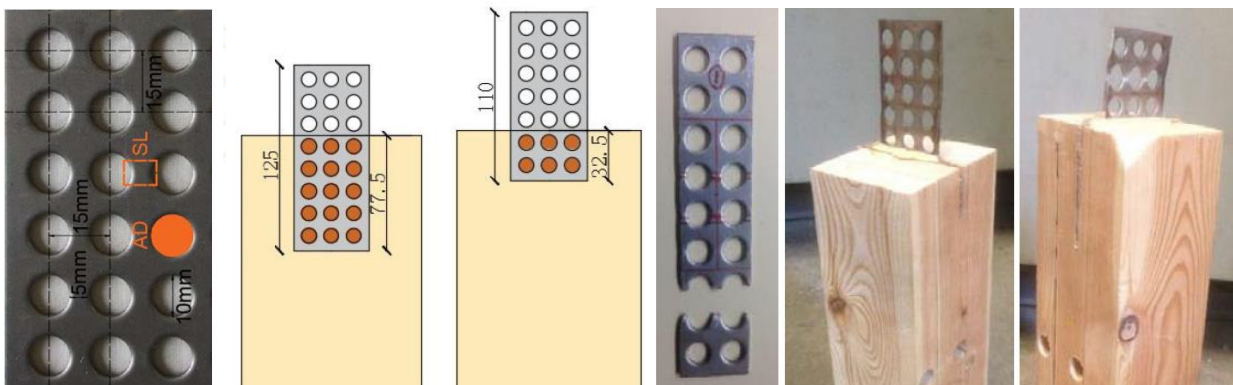


Abbildung 2-51: Geometrie Lochblech (links), Skizze zum Einbau in die Versuchskörper (Mitte) und Versagensmechanismen der Verbindung (rechts) [24]

Das HSK-System wurde speziell für höhere Gebäude aus Holz oder Hybridkonstruktionen entwickelt. Es sollte vor allem die abhebenden Kräfte aus Wind und Erdbeben, welche aufgrund der vergleichsweise geringen Masse von Holzbauten auftreten, übertragen. Diese führen zu hohen Zugkräften in der Konstruktion und müssen nach Durchleitung durch alle Bauteile und Verbindungen letztendlich auch im Fundament ausreichend verankert werden. Da diese Kräfte sehr groß werden können und vor allem bei Fassaden mit vielen Öffnungen über relativ kleine Querschnitte abgetragen werden müssen, sind klassische Verbindungssysteme, welche große Wandlängen zur Kraftübertragung benötigen, oft nicht zielführend.

Um den allgemeinen Verbindungsanforderungen gerecht zu werden, wurde deshalb ein Verbindungssystem aus eingeklebten Lochblechen entwickelt. Die Löcher stellen dabei einerseits einen besseren Verbund zwischen Stahl und Kleber her und gewährleisten andererseits, dass sich die Verbindung in extremen Belastungsfällen ausreichend duktil verhält. Als Material wird in diesem System Baustahl mit einer Dicke von 2,55 mm verwendet. Die Löcher haben jeweils 10 mm Durchmesser und befinden sich in beiden Richtungen in einem Achsabstand von 15 mm, wodurch zwischen den Löchern eine Restlänge von 5 mm resultiert.

Als Klebstoff werden meist Zweikomponentensysteme auf Polyurethan- oder Epoxidharzbasis verwendet. Der Einsatz von geklebten Verbindungen wird nur für die Nutzungsklassen NK1 und NK2 empfohlen. Die Holzfeuchtigkeit während des Klebevorgangs darf maximal 20% betragen, da ansonsten die Scherfestigkeit der Verbindung stark abnimmt. Der Temperaturbereich, auf welchen die Verbindung ausgelegt werden muss, ist laut Zulassung Z-9.1-778 [25] mit bis zu 60 °C definiert, was dem Temperaturverhalten des Klebstoffes eine bedeutende Rolle zuzuspricht.

Je nach Einbau und Lastwirkung können bei eingeklebten Blechen unterschiedliche Versagensformen auftreten. Grundsätzlich kann dabei der Bruch im Metall durch Überschreiten der plastischen Tragfähigkeit, im Holz durch Schubversagen oder im Klebstoff selbst auftreten. Im Bereich des Klebstoffes kann, gleich wie bei eingeklebten Gewindestangen, ein Bruch am Übergang zwischen Holz und Klebstoff, im Klebstoff selbst oder zwischen Metall und Klebstoff auftreten. Da alle Bruchmechanismen mit Ausnahme des Metallbruchs spröde erfolgen, ist bei der Bemessung darauf zu achten, dass immer letztgenannter auftritt. Dazu ist eine gewisse Überdimensionierung der Klebefläche nötig. Bei Schubbeanspruchungen treten die gleichen Versagensmechanismen auf, hier können die Löcher im Metall für genügend Duktilität sorgen, um ein ausreichendes plastisches Verformungspotenzial der Verbindung sicherzustellen. Die Tragfähigkeit der Verbindung ist dabei weitgehend unabhängig vom Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung des anliegenden Holzes.

### 2-3.3.6 Eingeklebte Rohrhülsen

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [26] angeführten Literatur.

Neben ebenen Blechen können auch Rohrhülsen als Verbinder eingeklebt werden. Diese bestehen aus wenigen Millimeter starken Stahlrohren, deren Oberfläche nachträglich bearbeitet wurde. Die Seite, welche ins Holz eingebracht wird, ist offen, während die andere Seite von einer aufgeschweißten Platte abgedeckt wird, in welcher sich eine Bohrung zum weiteren Anschluss der Verbindung mittels Schrauben oder Gewindestangen befindet.

An diesen Anschluss können andere Verbindungsteile je nach Erfordernis gerade oder im Winkel angeschlossen werden (Abbildung 2-52, Mitte rechts). Des Weiteren sind die Rohrhülsen in Längsrichtung eingeschnitten, um eine bessere Verteilung des Klebstoffs zu gewährleisten und die Bildung von Luftblasen zu verhindern (Abbildung 2-52, links und Mitte links).



*Abbildung 2-52: eingeklebte Rohrhülsen in verschiedenen Varianten (links), Schnitt durch Rohrhülse im Holz (Mitte links), Anschlussvariante im Winkel (Mitte rechts), Verbindung nach Versagen auf Holzbruch (rechts) [26]*

Großes Augenmerk wurde bei der Entwicklung dieses Systems auf die Geometrie und die Oberflächenbeschaffenheit gelegt. Diese reichen bei den getesteten Rohrhülsen von „glatt“ über „gerillt“ bis hin zu „gelocht“ und haben einen starken Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung. Die Kapazität der Verbindung selbst ist dabei sehr hoch und reicht bei einer einzelnen, 100 mm langen Rohrhülse von etwa 80 bis 130 kN auf axialen Zug. Werden Rohrhülsen in Gruppen angeordnet, müssen ausreichende Sicherheitsabstände eingehalten werden, um eine Abnahme der Verbindungstragfähigkeit zu verhindern. Das Versagen im Holz tritt entweder entlang der Rohrhülsen auf Schub oder nach den Rohrhülsen auf Zug auf (Abbildung 2-52, rechts).

Insgesamt betrachtet weisen eingeklebte Verbindungsmittel eine hohe Tragfähigkeit auf und ermöglichen je nach Einsatz einen signifikant höheren Ausnutzungsgrad als Schrauben und Stabdübel, da durch den vergleichsweise kompakten Verbindungsaufbau eine deutlich höhere Netto-Querschnittsfläche des Holzbauteils resultiert.

## 2-3.4 METALLE IN DER VERBINDUNGSTECHNIK

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [27] angeführten Literatur.

In der Verbindungstechnik im Holzbau kommen hauptsächlich Verbindungsmittel aus Stahl und Aluminium zum Einsatz. Am häufigsten verwendet wird Stahl wegen seiner hohen Festigkeit bei gleichzeitig hoher Steifigkeit und Duktilität. In den letzten Jahren kommt jedoch auch Aluminium, das zwar deutlich weicher, dafür aber auch wesentlich leichter ist, zum Einsatz. Einen Vergleich des Materialverhaltens beider Werkstoffe ist in Abbildung 2-53 in Form eines Spannungs-/Dehnungsdiagramms angeführt.

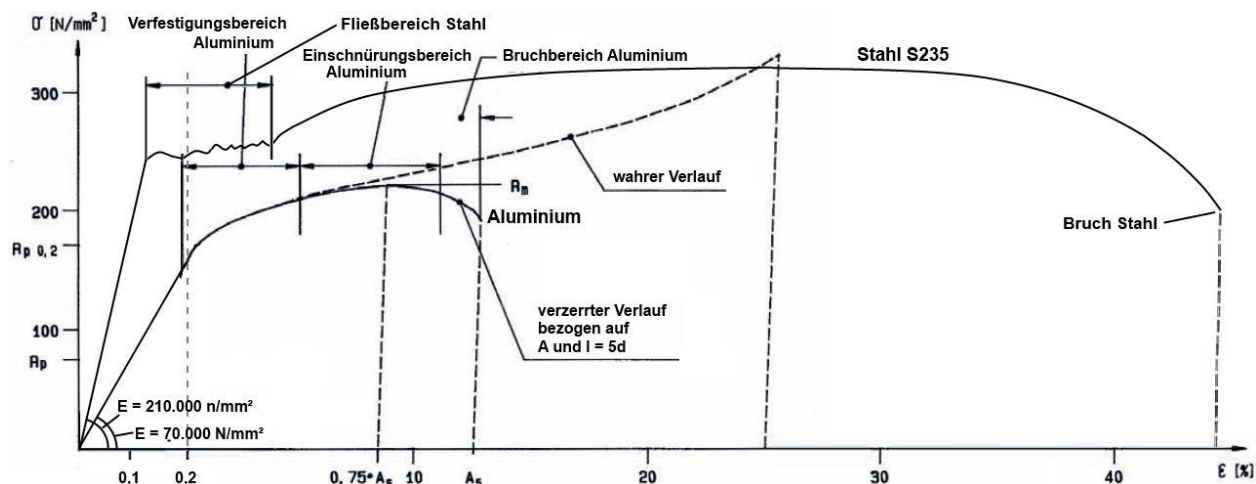


Abbildung 2-53: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Stahl und Aluminium im Vergleich, der Bereich unterhalb von 0,2 % Verformung ist dabei gestreckt, um den Steifigkeitsunterschied zwischen diesen beiden Materialien besser darstellen zu können [27]

Metallene Verbindungsmittel sind im Holzbau unabdingbar, um die allgemeinen Anforderungen an die Verbindungstechnik, namentlich Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität, zu gewährleisten. In Bezug auf Festigkeit und Steifigkeit sind dabei aus dem Materialverhalten von Holz keine Probleme zu erwarten, für die Duktilität müssen in den meisten Fällen jedoch die Verbindungsmittel herangezogen werden. Diese müssen somit ein duktileres Materialverhalten und gutmütige, sich deutlich ankündigende, Versagensformen besitzen und auch in einer Form verwendet werden, in der diese Eigenschaften auch zum Tragen kommen.

### 2-3.4.1 Stahl

Als Stahl bezeichnet man Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt von maximal 2,06 %. Dieser niedrige Kohlenstoffgehalt ermöglicht eine grundsätzliche Schmiedbarkeit derartiger Werkstoffe. Die üblicherweise im Bauwesen verwendeten Stähle (Baustähle) weisen einen Kohlenstoffgehalt von maximal 0,80 % auf, wodurch diese auch eine hohe Verformbarkeit im kalten Zustand bzw. Duktilität aufweisen. Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0,80 und 2,06 % finden als Werkzeugstahl Verwendung, alles über 2,06 % wird als Gusseisen bezeichnet und verhält sich vergleichsweise spröde. Für Stähle im Allgemeinen gilt, dass Festigkeit und Härte mit steigendem Kohlenstoffgehalt steigen, die Duktilität dadurch jedoch abnimmt.

Je nach Temperatur und Kohlenstoffgehalt stellen sich im Stahl unterschiedliche Gleichgewichtszustände im Gefüge ein, welche die Materialeigenschaften sehr stark beeinflussen. Diese sind unter der Annahme einer unendlich langsamen Abkühlung im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm dargestellt (Abbildung 2-54). Oberhalb der Liquiduslinie (ABCD) ist der Stahl dabei vollkommen flüssig, unterhalb der Soliduslinie (AEFC) vollkommen fest. Dazwischen liegt ein Gemisch aus flüssigen und festen Stahlbestandteilen vor. Für das Bauwesen interessant ist dabei in erster Linie der Bereich bis 0,8% Kohlenstoffgehalt.

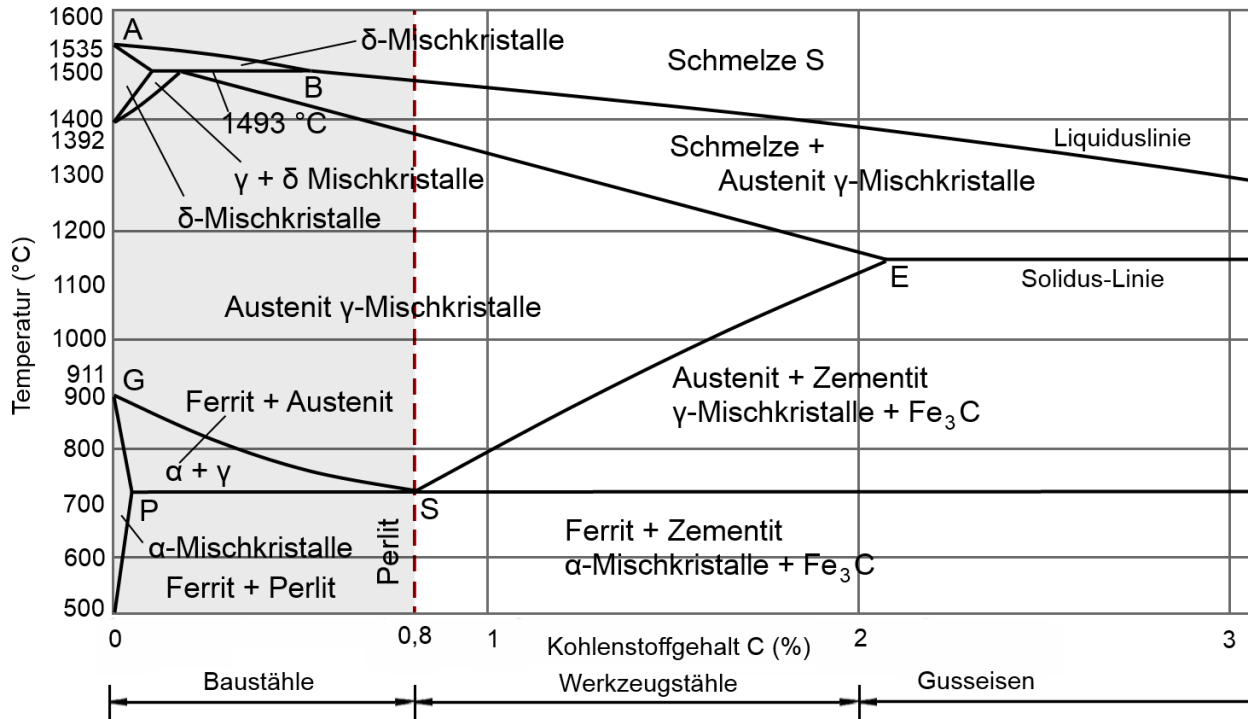


Abbildung 2-54: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm [27]

Neben Kohlenstoff können die Stahleigenschaften auch noch durch eine Vielzahl weiterer Legierungselemente verändert werden. Diese kommen vor allem bei Werkzeugstählen, Hochleistungsstählen und verschiedensten Hightech-Anwendungen zum Einsatz. Im Bauwesen wird in erster Linie Kohlenstoff als Legierungselement verwendet, für Baustähle mit speziellen Anforderungen (Korrosionsschutz, etc.) kommen noch weitere Legierungselemente dazu.

Stahl ist das klassische, im Bauwesen verwendete Metall und kommt auch in der Verbindungstechnik im Holzbau häufig zum Einsatz. Üblicherweise werden für Bleche Stähle der Güte S235 oder S355 verwendet, wie sie auch im Stahlbau zum Einsatz kommen. Für Schrauben, Bolzen und Gewindestangen kommen i.d.R. hochfeste Stähle zum Einsatz, deren Fließgrenze bei bis zu 1000 N/mm<sup>2</sup> und deren Streckgrenze bei bis zu 1200 N/mm<sup>2</sup> liegt.

Aufgrund der makroskopischen Isotropie des Baustoffs Stahl werden dessen Materialeigenschaften zumeist mittels einachsiger Zugversuche ermittelt, wobei eine Laststeigerung i.d.R. bis zum Bruch der Probe erfolgt. Zuerst tritt dabei eine linear-elastische Spannungs-Dehnungs-Beziehung auf, welche genau dem Hooke'schen Gesetz entspricht. Diese hält bis zum Erreichen der Fließgrenze an, danach beginnt im Falle eines duktilen Stahls das Fließplateau, innerhalb dessen es zu einer starken Verformung beruhend auf einer Neuordnung des Gefüges kommt, ohne dass die im Stahl wirkende Kraft wesentlich zunimmt.

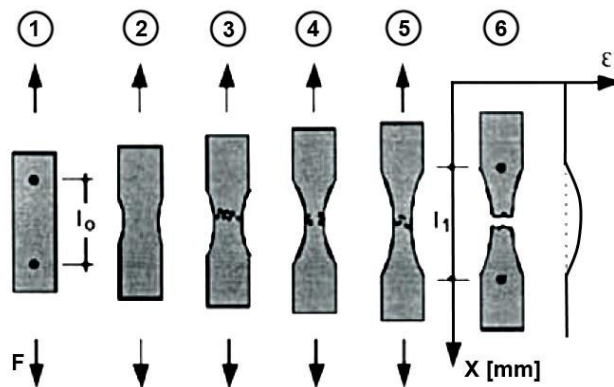


Abbildung 2-55: Festigkeitsermittlung im Zugversuch, Einschnürung der Stahlprobe [27]

Ist diese Neuordnung abgeschlossen, nimmt die Spannung im Stahl wieder zu. Gleichzeitig bildet sich aufgrund der großen Verformung eine Einschnürung aus, welche trotz zunehmender Spannung zu einer Abnahme der übertragbaren Kraft führt, bevor der verbleibende Querschnitt letztendlich reißt (Abbildung 2-55).

Mit einem E-Modul von ca. 210.000 N/mm<sup>2</sup> und einer Nennzugfestigkeit von 235 bis 1200 N/mm<sup>2</sup> ist Stahl ein Vielfaches steifer und tragfähiger als Holz, was zur Folge hat, dass in Holzverbindungen eingesetzte Stahlteile immer deutlich kleinere Abmessungen als die dazugehörigen Holzquerschnitte aufweisen. Dadurch lassen sich Stahl-Holzverbindungen mit vergleichsweise kleinen Querschnittsverlusten auf Seiten des Holzes umsetzen, was sich positiv auf die Querschnittsauslastung auswirkt. Stahlbauteile sollten dabei auf keinen Fall zu stark oder gedungen dimensioniert werden, da sie sonst im Versagensfall nicht plastifizieren können, bevor die Verbindung versagt. Das Plastizitätsverhalten selbst ist im Stahl sehr ausgeprägt und erlaubt große Längenänderungen und Verdrehungen, bevor die Verbindung endgültig versagt. Aufgrund der hauptsächlich statischen Natur von Lasten im Hochbau können Stahlbauteile auf einen hohen Ausnutzungsgrad hin dimensioniert werden. Ein Nachteil von Stahl, die vergleichsweise hohe Anfälligkeit bei Ermüdungswirksamer Beanspruchung, ist somit nur wenig relevant.

Nachteilig wirken sich im Stahl die hohe Dichte von 7850 kg/m<sup>3</sup> – vor allem bei massigen Bauteilen – und die hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Diese kann bei unsachgemäßer Ausführung zu einem schnellen Erhitzen und Versagen der Stahlverbindung im Brandfall führen, lange bevor die dazugehörigen Holzquerschnitte selbst gravierend geschwächt sind.

## 2-3.4.2 Aluminium

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [27] angeführten Literatur.

Aluminium gehört zu den Leichtmetallen und ist dementsprechend deutlich leichter, aber auch weniger tragfähig als Stahl. Aufgrund seiner guten Verarbeitbarkeit wird es zunehmend vor allem für komplexere Verbinder, welche eine umfangreiche Bearbeitung benötigen, verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ist höher als die von Stahl. Der Schmelzpunkt liegt mit 660° C deutlich unter dem von Stahl (1538° C). Bereits ab 100° C nimmt die Festigkeit von Aluminium deutlich ab, was ausreichende Brandschutzvorkehrungen beim Einsatz von Aluminiumverbindern voraussetzt. Die Wärmedehnzahl liegt bei  $24,6 \times 10^{-6}/K$ , was etwa dem zweieinhalbfachen der Wärmedehnung von Stahl entspricht. Aluminium ist weich, dehnbar und gut schweißbar sowie sehr korrosionsbeständig.

Die Zugfestigkeit von Aluminium variiert je nach Zusammensetzung der Legierung stark und reicht von ca. 90 N/mm<sup>2</sup> bei Reinaluminium (99 %), welche durch Kaltverformung auf bis zu 160 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden kann. Dabei geht jedoch sehr viel an erreichbarer Bruchdehnung verloren. Durch Zugabe verschiedener Legierungselemente können die Materialeigenschaften von Aluminium deutlich verändert werden. Die häufigsten Legierungselemente sind Kupfer, Magnesium und Silizium. Die Zugfestigkeit lässt sich so beispielsweise auf bis zu 660 N/mm<sup>2</sup> erhöhen. Tendenziell gilt dabei, je höher die Zugfestigkeit einer derartigen Aluminiumlegierung ist, desto spröder verhält sich das Material. Im Bauwesen eingesetzte Aluminiumlegierungen weisen Festigkeiten auf, welche etwas unter der von handelsüblichem S235-Baustahl liegen.

Das Verhältnis von Spannung und Dehnung folgt anfangs wie bei Stahl auch einem linear-elastischen Zusammenhang, wobei die Verformungen aufgrund der niedrigeren Materialsteifigkeit etwa dreimal so groß ausfallen. Das Fließplateau fehlt völlig und es kommt gleich nach Verlassen des linear-elastischen Bereichs zu einem langsamen Spannungsanstieg, allerdings unter deutlich geringerer Verformung als bei Stahl. Der Bruch erfolgt dann bei geringerer Dehnung und einer deutlich kleineren Querschnittseinschnürung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Aluminium verfügt daher über etwas weniger Tragfähigkeit und deutlich weniger Duktilität als Stahl, bei entsprechender Konstruktion sind aber immer noch ausreichende Verformungskapazitäten vorhanden, um ein sprödes Versagen der Verbindung zu verhindern.



Mit einem E-Modul von ca. 70.000 N/mm<sup>2</sup> und einer Zugfestigkeit von etwa 220 N/mm<sup>2</sup> ist das üblicherweise im Bauwesen verwendete Aluminium deutlich „weicher“ und etwas weniger tragfähig als Stahl. Die Dichte beträgt 2700 kg/m<sup>3</sup>. Als Faustregel können für den E-Modul und die Dichte etwa ein Drittel der Werte von Stahl angesetzt werden, während die Tragfähigkeit bei entsprechender Legierung nicht weit unter der von Stahl liegt. Somit stellt Aluminium eine leichte und dennoch tragfähige Alternative in der Verbindungstechnik dar. Vor allem beim Einsatz massiger Verbindungsteile sowie bei der Verwendung komplexer Geometrien, welche aus Aluminiumblöcken gefräst werden müssen, hat Aluminium dank des geringen Gewichts und der leichten Bearbeitbarkeit große Vorteile.

## 2-3.5 METALL-METALL VERBINDUNGEN

Da sich im Ingenieurholzbau eine immer stärkere Verlagerung der Produktion von der Baustelle ins Werk vollzieht, versucht man die holzseitigen Verbindungsmittel bereits in der Vorfertigung anzubringen, während die Bauteile selbst erst auf der Baustelle verbunden werden. Um dies schnell und effizient durchführen zu können, sind möglichst einfache und leistungsfähige Stahl-Stahl-Verbindungen gefordert.

Die Möglichkeiten, zwei Metallteile miteinander zu verbinden stammen in erster Linie aus dem Stahlbau. Dort ist eine kraftschlüssige und effiziente Fügetechnik praktisch seit Aufkommen des konstruktiven Ingenieurbaus im Zuge der industriellen Revolution von großer Bedeutung. Neben Nietverbindungen, die seit Jahrzehnten nicht mehr verwendet werden, kommen dabei heute hauptsächlich Schweiß- und Schraubverbindungen zum Einsatz. Seit Metall-Metall-Verbindungen auch im Holzbau eine immer größere Rolle spielen, haben sich dort jedoch auch eigene, teilweise von der Zimmerei inspirierte Verbindungen etabliert, welche im Stahlbau selbst völlig oder weitgehend unbekannt sind.

### 2-3.5.1 Stahlschrauben

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [28] angeführten Literatur.

Da das im Stahlbau durchaus beliebte Schweißen aufgrund der starken Wärmeentwicklung für Verbindungen im Holzbau nicht angewendet werden kann – und zudem auf der Baustelle selten zum Einsatz kommt – wird dieses übersprungen und stattdessen gleich auf die klassischen Stahlschrauben eingegangen. Diese gelten als das typische Verbindungsmittel im Stahlbau, sind seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz und unterliegen dementsprechend einer hohen Standardisierung hinsichtlich Herstellung, Montage Überwachung und Bemessung. Schraubendurchmesser und Festigkeiten sowie die Anwendungsbereiche sind genau definiert. Im Wesentlichen können Stahlschrauben zur Übertragung von Zug- und Querkräften verwendet werden, wobei die Querkraftübertragung ein-, zwei- oder mehrschnittig erfolgen kann.

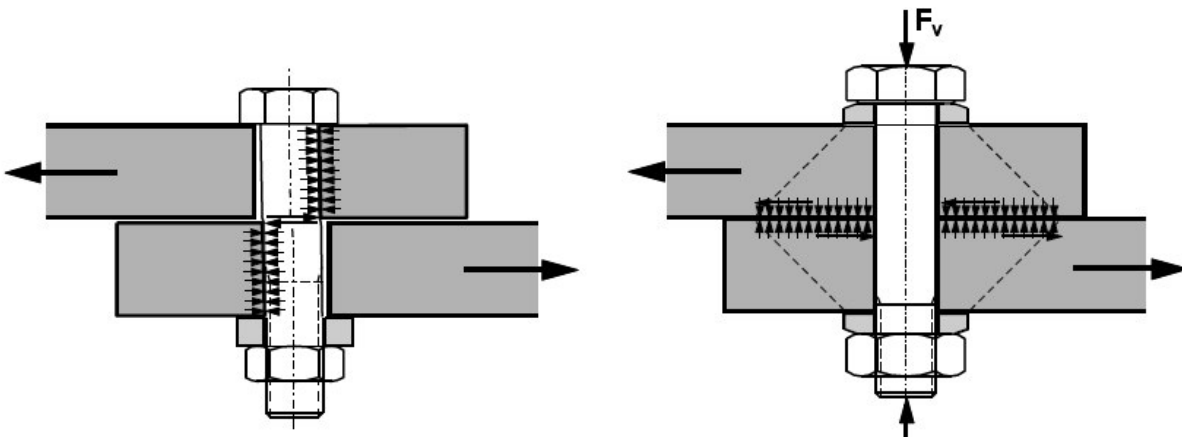


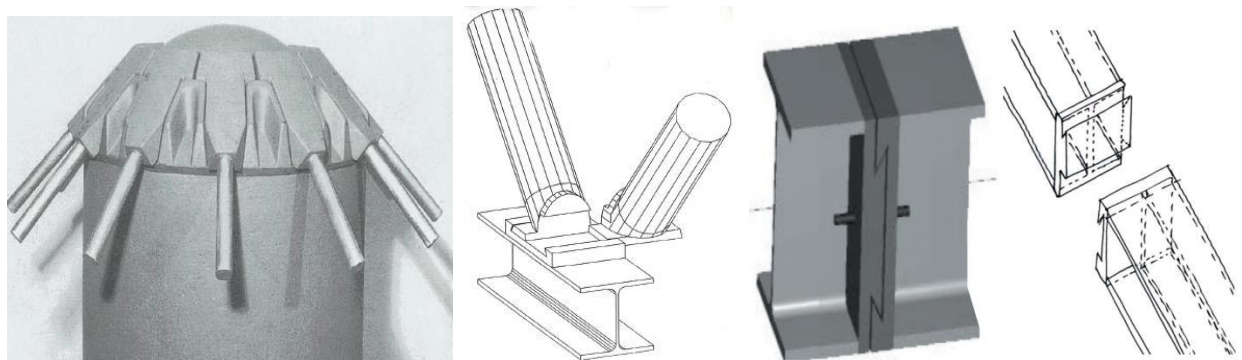
Abbildung 2-56: Scher-Lochleibungsverbindung (SL) (links) und gleitfest-vorgespannte Verbindung (GV) (rechts) [28]

Von der Wirkungsweise unterscheidet man Scher-Lochleibungsverbindungen, welche die auftretenden Beanspruchungen über Kontakt übertragen und gleitfest-vorgespannten Verbindungen, welche die Kräfte durch Reibung zwischen zusammengedrückten Stahlblechen übertragen (Abbildung 2-56). Bei nicht vorgespannten Schrauben kommt es bei Aufbringen der Belastung aufgrund der Einbautoleranzen anfangs zu geringen Verschiebungen, bis ein Kraftschluss der Fügebauteile hergestellt ist. Bleibt die Belastung aufrecht, treten keine weiteren Verformungen auf. Bei dynamischer Beanspruchung wird die Verwendung vorgespannter Schrauben empfohlen, da diese unter wechselnder Last keine Bewegungen innerhalb der Freiräume, die sich durch die Einbautoleranzen ergeben, ausführen können und somit deutlich resistenter gegen Ermüdungsversagen sind.

### 2-3.5.2 Pass- und Steckverbindungen

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [29] angeführten Literatur.

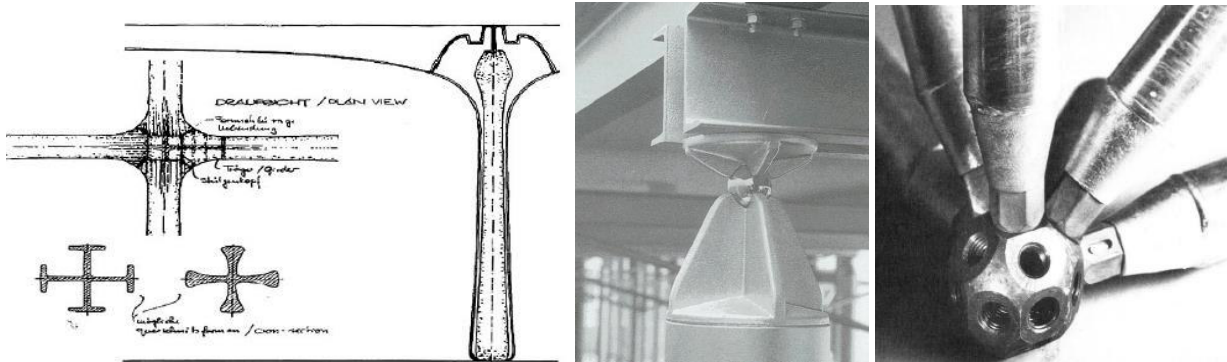
Steckverbindungen waren zu Anfangszeiten des Stahlbaus, als noch hauptsächlich Gusseisen verwendet wurde, weit verbreitet. Durch das Aufkommen von Schmiedestahl und Schraubverbindungen ging ihre Verwendung stark zurück. Seit einigen Jahren kommen Steckverbindungen jedoch langsam wieder vermehrt zum Einsatz. Steckverbindungen können in den verschiedensten Formen ausgebildet sein und eignen sich je nach Ausführung zur Übertragung von Druck, Zug, Querkraft und Moment. Im Laufe der Geschichte hat sich dabei eine Vielzahl verschiedener Verbindungen herausgebildet, von denen manche Konzeptstudien blieben, viele bei einzelnen Projekten zum Einsatz kamen und einige wenige tatsächlich im großen Stil eingesetzt wurden. Einen Überblick über ausgewählte Beispiele für Pass- und Steckverbindungen bietet Abbildung 2-57.



**Abbildung 2-57: Pylonkopf mit konischen Ankerköpfen (links), Steck- und Einschubverbindung von Fachwerkträger-Diagonalen (Mitte), Montagestoß für Fachwerkbinder durch Schwalbenschwanz (rechts) [29]**

Vor allem im Bereich der Fachwerkträger, wo man versucht, einen immer größeren Teil der Montage ins Werk zu verlagern, finden Steckverbindungen als Montagestoße eine immer breitere Anwendung. Das Einhängen von Fachwerkdialagonalen oder das Zusammenschieben von Trägerteilen mittels Schwalbenschwanz und nachfolgender Lagesicherung durch wenige Schrauben oder Bolzen lässt sich deutlich schneller und einfacher bewerkstelligen, als große Mengen von Schrauben zu montieren. Besonders wichtig ist hierbei jedoch die Gewährleistung einer ausreichenden Genauigkeit, da Steckverbindungen üblicherweise Passungen ohne Spiel sind und bereits kleine Ungenauigkeiten ein Zusammenbauen erschweren oder verunmöglichen können.

Wie die Beispiele in Abbildung 2-58 zeigen, wurden Steckverbindungen bereits in einer Vielzahl von Variationen und Einsatzmöglichkeiten ausprobiert. Viele dieser Konzepte wurden ausgearbeitet und geplant, einige davon wurden tatsächlich gebaut. Ihnen allen gemein ist, dass dabei versucht wird, eine möglichst direkte Kraftübertragung zu gewährleisten, welche sich in der Verbindung selbst durch eine Reduktion der Bauteile manifestiert. Vor allem biegesteif wirkende Verbindungen kommen dabei teilweise ohne jegliche Verbindungsmittel aus, es werden lediglich die speziell geformten Bauteile direkt aneinander gelegt bzw. ineinander verhakt.



**Abbildung 2-58:** Einhängesockel zur Herstellung eines steifen Rahmenecks (links), gelenkige Kugelsteckverbindung zur Druckkraftübertragung (Mitte), Raumfachwerk-Systemknoten (rechts) [29]

Gelenkige Verbindungen werden beispielsweise durch Kugeln oder Bolzen ausgebildet, welche im Falle einer reinen Druckübertragung keiner weiteren Sicherung bedürfen. Des Weiteren verfügen viele Steckverbindungen über eine Geometrie, die eine Selbstzentrierung der daran beteiligten Bauteile ermöglicht, was ebenfalls die Montagegeschwindigkeit erhöht.

Der wesentliche Vorteil bei Steckverbindungen liegt darin, dass sie sich im Gegensatz zu Schraubverbindungen deutlich schneller zusammenfügen lassen und so vor allem bei einer großen Anzahl von Bauteilen zu einer deutlichen Reduktion der Montagezeit führen. Schrauben und Bolzen werden dabei meist nur zum Fixieren der Bauteile, nicht aber zur planmäßigen Kraftübertragung verwendet.

## 2-4 STAND DER TECHNIK SYSTEMVERBINDER

---

Auf Basis der in den Abschnitten 2-1 bis 2-3 enthaltenen Überlegungen soll einleitend ein kurzes Resümee hinsichtlich des Bedarfs an Systemverbindern im Holzbau gezogen werden. Verbindungselemente spielen im Holzbau seit jeher eine zentrale Rolle. Angefangen bei zimmermannsmäßigen Holz-Holz-Verbindungen, welche schon seit Jahrhunderten zum Einsatz kommen, bis hin zu modernen Verbindungsmitteln aus Stahl und Klebeverbindungen. Wo auch immer Holzbauteile eingesetzt werden, müssen diese untereinander und mit Bauteilen aus anderen Baustoffen verbunden werden.

In den meisten Fällen geschieht dies heute zwischen verschiedenen Bauteilen, welche von einzelnen Latten und Brettern bis hin zu Brettschichtholzbindern und ganzen Wandelementen in Holzrahmen- oder Holz-Massivbauweise mit Brettspertholz reichen. Aufgrund des immer breiteren Einsatzes von Holz in immer neuen Anwendungen und Situationen nehmen auch die Belastungen und Ansprüche, welche auf den Baustoff und letztendlich auf die Verbindungen wirken, zu. Dies hat zur Entwicklung immer leistungsfähigerer Holzverbindungen geführt, welche immer größere Kräfte übertragen können.

Beim Einsatz in großflächigen Modul- und Raumzellenbauten können noch deutlich größere Kräfte als zwischen einzelnen konventionellen Bauteilen auftreten, da die hergestellten Baukörper meist größer und schwerer sind. Unter Berücksichtigung einer schnellen Montage sollten diese bereits durch einige wenige Verbindungsmittel sicher und dauerhaft aneinander gefügt werden können. Des Weiteren sollen diese Verbindungsmittel leicht zugänglich sein und im Idealfall die Verbindung von Raumzellen erlauben, ohne deren Innenräume zu betreten oder aufwändige Verkleidungsmaßnahmen im Innenbereich durchzuführen, welche die Verbindungsmittel verstecken.

Im Folgenden wird exemplarisch auf ausgewählte Systemverbinder und deren Funktionsweise eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf einer standardisierten Lösung für die Manipulation von Containern sowie auf ausgesuchten Systemverbindern, welche zur Fügung von Brettschicht- und Brettspertholzbauteilen eingesetzt werden.

### 2-4.1 TWISTLOCK – VERBINDER FÜR ÜBERSEECONTAINER

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [30] und [31] angeführten Literatur.

Überseecontainer entsprechen zwar nicht unbedingt der Definition einer bewohnbaren Raumzelle, aufgrund der an sie gestellten Anforderungen lassen sich aus ihnen jedoch wertvolle Erkenntnisse über den Einsatz großformatiger modularer Bauweisen und deren Verbindungselemente gewinnen. Durch die langen Transportwege und dabei oft erheblichen Belastungen müssen die dort verwendeten Verbindungselemente robust, tragfähig und wegen des häufigen Be- und Entladens der Schiffe schnell und einfach montiert und wieder entfernt werden können. Damit decken sich die Anforderungen an Überseecontainer mit jenen an die Raumzellenbauweise.

Überseecontainer verfügen über standardisierte Abmessungen von 2,44 m (8 Fuß) Breite und 2,59 m (8 Fuß, 6 Zoll) oder 2,90 m (9 Fuß, 6 Zoll) Höhe. Die Länge beträgt 6,10 m (20 Fuß) oder 12,20 m (40 Fuß). Diese Maße sind weltweit standardisiert und können auf Schiffe, Lastwagen und Züge verladen werden, was deren umfassenden Einsatz ermöglicht. Gleichzeitig sind die Container so ausgeführt, dass sie übereinander gestapelt und durch spezielle Verbindungsteile miteinander gekoppelt werden können. Dazu verfügt jeder Container in den Ecken über ein aufgeschweißtes Stahlgehäuse mit Langlöchern, in das die Verbinder gesteckt werden können (Abbildung 2-60, rechts). Die dabei übertragbaren Zugkräfte reichen zum Beispiel aus, um zwei übereinanderliegende, durch Twistlocks verbundene Container, gemeinsam hochzuheben und so schneller zu verladen (Abbildung 2-60, links).

Das Verbindungselement selbst besteht aus einem Gehäuse und einem drehbaren Bolzen, welcher durch eine Feder vorgespannt ist (Abbildung 2-59, links). Der Bolzen besitzt um 90° zueinander verdrehte Aufsätze an den Enden, welche starr mit dem Bolzen verbunden sind. Die innere Seite ist dabei flach ausgeführt, um ausreichend Fläche zur Kraftübertragung bereitzustellen und ein ungewolltes Öffnen der Verbindung zu verhindern.



Abbildung 2-59: Container mit Twistlock zusammgehängt (links), Versuchsaufbau zur Messung der Verbindungstragfähigkeit (rechts) [31]

Die äußere Seite ist konisch ausgeführt, sodass sich der Bolzen beim Aufstecken auf einen Container und beim Aufsetzen des nächsten Containers zur Seite dreht. Das Gehäuse ist dabei so beschaffen, dass die äußeren Teile genau in das Langloch des Gegenstücks am Container passen und das Gehäuse so fixieren. Der mittlere Teil des Gehäuses ist etwas dicker und dient der Druckübertragung zwischen den Containern sowie als Abstandhalter, welcher ebenfalls Platz für den Lösehebel schafft. Wird der obere Container nun weit genug abgesenkt, wird der Bolzen durch die Feder zurückgezogen und schnappt ein, was die Container aneinander fixiert. Die Öffnung der Verbindung erfolgt mit einem Hebel, welcher entweder manuell oder bei neueren Modellen automatisch betätigt werden kann.

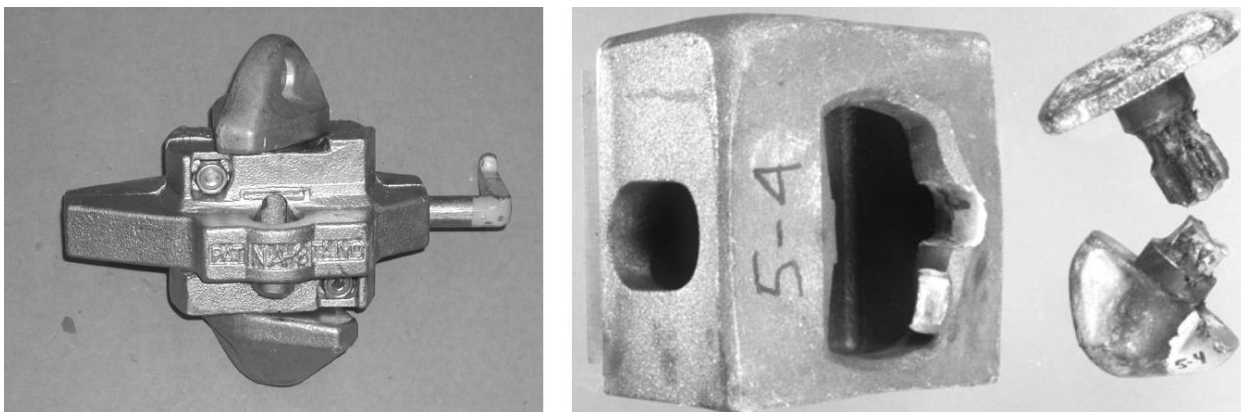


Abbildung 2-60: Intakte Ausführung eines Twistlocks (links), Twistlock nach Versagen auf Stahlbruch im Schaft und Abscheren im Gehäuse (rechts) [31]

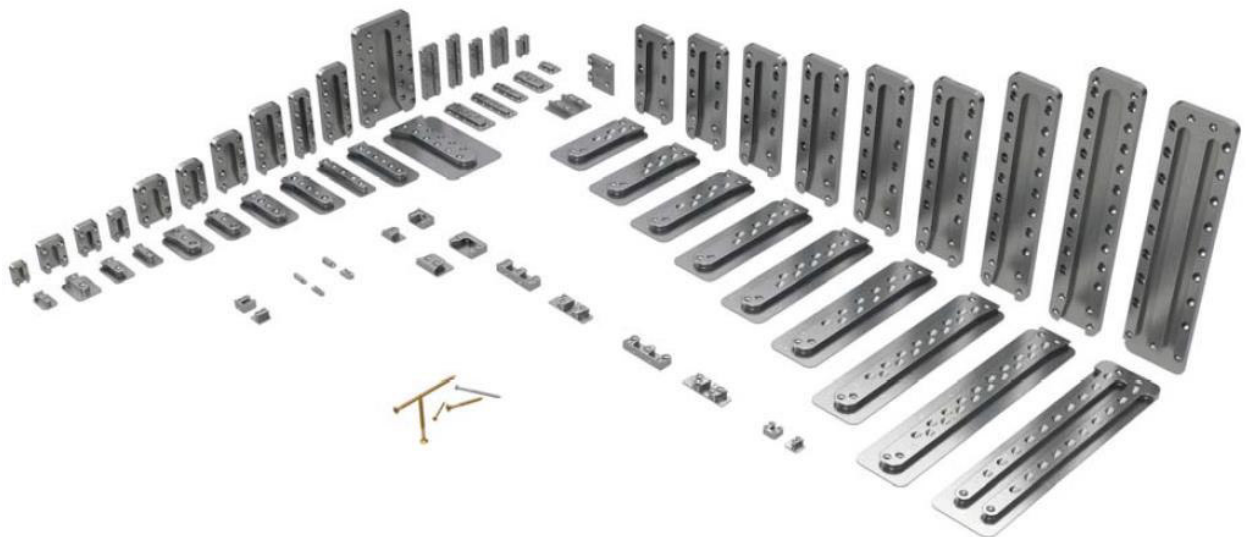
Containerverbinder übertragen als Punktlager alle Kräfte, die zwischen den Containern auftreten. Besonderes Augenmerk wird in den dazugehörigen Regelungen auf die Übertragung von Zug- und Schubkräften gelegt. Bei exzentrischen horizontalen Lasten tritt beispielsweise zwischen den Containern eine Schubkraft in Größe der Last auf, während der Momentenanteil durch Druck und Zug in vertikale Richtung abgetragen wird. Die wesentlichen Versagensmechanismen auf Zug sind Abscheren des Gehäuses und Stahlbruch im Bolzen (Abbildung 2-60, rechts).

Twistlock-Verbinder können einfach und schnell eingesetzt werden und sind in der Lage, große Kräfte aufzunehmen. Die Bruchlast des gesamten Verbindungsaufbaus (Containeranschlüsse und Twistlock) reicht von etwa 400 – 700 kN und hängt von der Art des Twistlocks und dessen Ausdehnungsmöglichkeiten ab. Kann sich der Verbindungsdübel im Twistlock nicht vollständig ausdehnen, geht die Tragfähigkeit der gesamten Verbindung jedoch drastisch zurück.

## 2-4.2 SHERPA – ANSCHLUSS VON BSH-BINDERN UND BSP-ELEMENTEN

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [32], [33] und [34] angeführten Literatur.

Ein exemplarisches Beispiel für den Einsatz von Systemverbindern im Ingenieurholzbau stellen die unter dem Namen Sherpa bekannten Holzverbinder dar. Im Wesentlichen handelt sich dabei um Aluminiumbauteile, welche im Werk mit den dazugehörigen Holzteilen verschraubt werden, so dass diese auf der Baustelle deutlich schneller und mit deutlich weniger Aufwand miteinander verbunden werden können. Eine grobe Übersicht über die verschiedenen, diesem System zugehörigen Verbindungen beinhaltet Abbildung 2-61.



*Abbildung 2-61: verschiedene Verbinder des Sherpa-Systems in unterschiedlichen Größen und Ausführungen [32]*

Die Sherpa-BSH-Verbinder dienen in erster Linie der Verbindung eines BSH-Trägers mit einem quer dazu verlaufenden Träger oder einer Stütze bzw. Wand. Die beiden Teile des Verbinders werden wie in Abbildung 2-62 dargestellt zuerst an die jeweiligen Bauteile geschraubt. Um Schubversagen bei hoher Belastung zu vermeiden, kann der betreffende Bauteil noch zusätzlich durch Schrauben gegen Querkraft verstärkt werden. Sind beide Verbindungsstücke montiert, müssen diese nur noch ineinander geschoben werden und bilden damit eine kraftschlüssige Verbindung, welche bis auf die Montagerichtung sofort in jede Richtung beanspruchbar ist. Das oft mit erheblichen Unannehmlichkeiten verbundene Zusammenschrauben der Verbindung vor Ort wird damit vermieden.

Mit den Sherpa-Verbindern können sowohl Normkräfte als auch Exzentrizitätsmomente und Querkräfte übertragen werden. Zwischen den beiden Metallteilen selbst erfolgt die Kraftübertragung auf Kontakt, wobei die genaue Spannungsverteilung von den jeweiligen angreifenden Lasten abhängt.



Abbildung 2-62: Sherpa-Brettschichtholzverbinder, Verbindungsaufbau und Bezeichnungen (links), Anordnung der Verbindungsteile und deren Verschraubung (rechts) [32] [33]

Die Kraftübertragung vom Verbinder ins Holz erfolgt über die Schrauben, welche durch ihre unterschiedliche Ausrichtung unterschiedliche Kräfte übertragen können. Die Schrauben selbst werden dabei immer auf Herausziehen beansprucht. Unterschieden wird zwischen den waagrecht eingebrachten Momentenschrauben und den Schrägschrauben (Abbildung 2-62). Vereinfacht gesagt werden über die Momentenschrauben alle Normalkräfte, egal ob aus einer Normalkraft- oder Momentenbeanspruchung, abgetragen. Über die Schrägschrauben erfolgt der Querkraftabtrag.

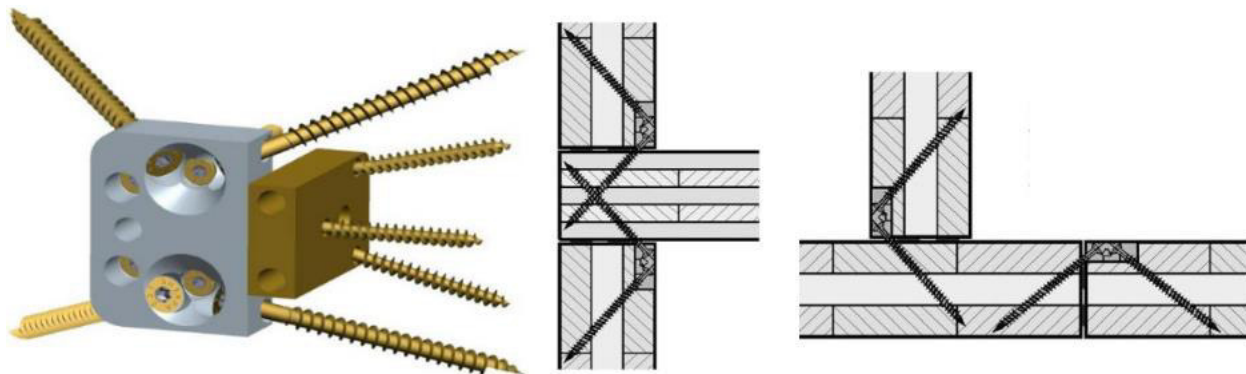


Abbildung 2-63: Sherpa-CLT-Connector (links) und Einsatz als Wand- und Deckenverbinder (rechts) [34] [35]

Ein weiteres Verbindungselement, das dieser Logik folgt, ist der sog. Sherpa-CLT-Connector. Dabei handelt es sich um ein aus einem Aluminiumblock gefrästes Verbindungsteil, welches Ansatzpunkte für Schrauben in zwei Hauptrichtungen aufweist (Abbildung 2-63, links). In eine Hauptrichtung wird der Verbinder bereits im Werk an einem BSP-Element festgeschraubt. Bei der Montage auf der Baustelle wird dann über Schrauben, welche durch Löcher in der entgegengesetzten Richtung eingeschraubt werden, die Verbindung mit dem benachbarten Bauteil hergestellt. Damit können beispielsweise Brettsperrholzwände und -decken, sowohl gerade als auch über Eck, miteinander verbunden werden (Abbildung 2-63, rechts). Zum einen erhöht das die wirksame Schraubenlänge im Holz deutlich und zum anderen wird die Anzahl der Schrauben, welche vor Ort eingebracht werden, reduziert, was wiederum den Bauablauf beschleunigt.

### 2-4.3 X-RAD VERBINDER

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [36] und [37] angeführten Literatur.

Beim X-RAD Verbinder handelt es sich um ein Verbindungssystem, das speziell zum Zusammenfügen von Brettsperrholzplatten entwickelt wurde. Im Wesentlichen besteht es aus einem Anschlussstück, das in einer Ecke der Brettsperrholzplatte angebracht wird und einem je nach Anschlusssituation verschieden ausgeformten Anschlussblech, das durch Stahlschrauben mit den einzelnen Anschlussstücken verbunden wird. Das Anschlussstück wird durch drei Schraubenpaare, welche in verschiedene Richtungen orientiert sind, mit dem Brettsperrholzelement verschraubt (Abbildung 2-64, links). Um das Anschlussstück

anbringen zu können, müssen die Ecken des Brettsperrholzelements zuerst abgeschrägt werden. Das Abschrägen der BSP-Platten und Anbringen der Anschlusssteile erfolgt im Werk. Auf der Baustelle werden dann die einzelnen Anschlusssteile durch verschieden ausgeführte Verbindungsbleche miteinander verbunden. Jedes Anschlusssteil verfügt dafür über zwei Anschlusslöcher in einer hervorstehenden Stahllasche, an welcher auf beiden Seiten Verbindungsbleche angebracht werden können.

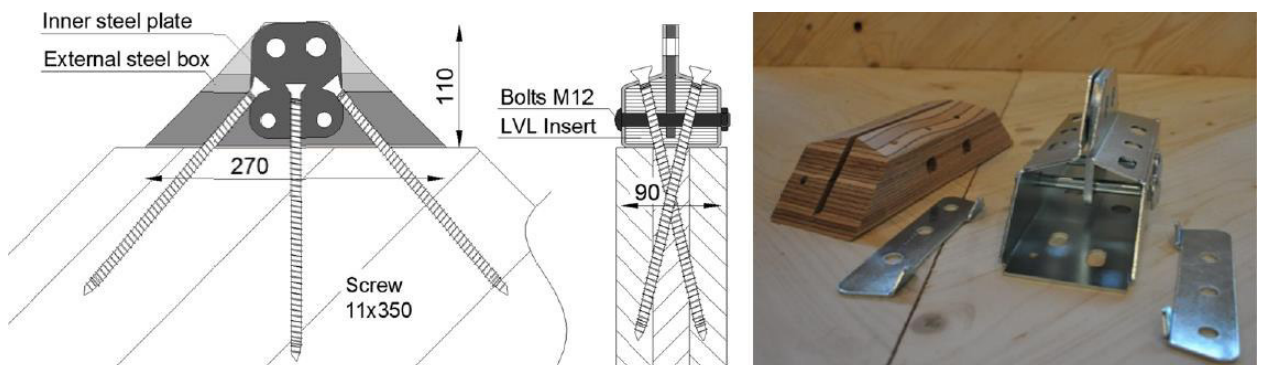
Es gibt spezielle Anschlussstücke zum Anschluss an horizontale Bauteile (Fundament, Decken), mit welcher die Verbindung verschraubt werden kann (Abbildung 2-64, Mitte). Damit wird der untere Anschluss der Konstruktion hergestellt. Für die Verbindung mehrerer, im rechten Winkel zueinander stehender BSP-Elemente gibt es abgewinkelte Verbindungsbleche (Abbildung 2-64, rechts). Diese können je nach Bedarf verschieden miteinander kombiniert werden, um unterschiedliche Verbindungsmöglichkeiten abzudecken. Durch die konzentrierte Kraftübertragung in den Eckpunkten der Brettsperrholzelemente kann die Anzahl der erforderlichen Verbindungen deutlich reduziert werden.



**Abbildung 2-64: X-RAD Verbinder (links,) Fundament-/Deckenanschluss (Mitte), dreidimensionaler Knoten (rechts) [36]**

Die Ansschlusselemente des X-RAD-Verbinders selbst bestehen aus einem Stahlgehäuse, einem Furnierschichtholzblock und einer Stahlplatte, welche durch Dübel mit dem Gehäuse verbunden ist (Abbildung 2-65). Der Furnierschichtholzblock befindet sich innerhalb des Metallgehäuses und besteht aus Holzarten mit einer vergleichsweise hohen Rohdichte (rund  $750 \text{ kg/m}^3$ ), um so eine möglichst hohe Krafteinleitung in die Schrauben über die nur kurz vorhandene Eindrehlänge zu ermöglichen. Die Schrauben selbst sind Vollgewindeschrauben, welche in verschiedenen Winkeln zueinander eingeschraubt werden. Pro Verbinder werden drei Schraubenpaare eingesetzt, wobei sich die Schrauben eines Schraubenpaares jeweils aus der Plattenebene überkreuzen, um eine allfällige mögliche Hirnholzverschraubung zu vermeiden und die Spaltzugwirkung der Schrauben zu verringern (Abbildung 2-65).

Durch die Schraubenanordnung im Winkel zueinander können sowohl Zug- als auch Schubkräfte effektiv übertragen werden. Im Verbinder selbst wird ein Großteil der Schraubenkräfte (ca. 75%) über den Furnierschichtholzblock übertragen. Der Rest erfolgt über die Schraubenköpfe direkt auf das Stahlblech. Die direkte Einleitung des Großteils der Schraubenkräfte in das Furnierschichtholz ermöglicht eine bessere Verteilung der inneren Kräfte und verhindert Spannungsspitzen an den Kontaktpunkten zwischen Schrauben und Stahlblech.



**Abbildung 2-65: Abmessungen und Einbauskizze des Verbinders (links), Einzelteile des Verbinders (rechts) [36]**



Die Kraftübertragung vom Furnierschichtholz in die zentrale Stahlplatte erfolgt über zwei Stahldübel, welche jeweils zwischen den drei Schraubenpaaren angeordnet sind. Von der zentralen Stahlplatte und dem Stahlgehäuse aus erfolgt die Kraftübertragung auf das nächste Element mittels Stahlschrauben und Zwischenblechen, welche je nach Knotengeometrie unterschiedliche Formen annehmen.

Der gesamte Aufbau ermöglicht eine relativ hohe Duktilität der Verbindung. Die Stahlteile wurden dabei so bemessen, dass sie bereits große plastische Verformungen aufweisen bevor die Schrauben Stahlbruch erleiden (spröder Versagensmechanismus). Dies ist insbesondere bei der Erdbbensicherheit der Verbindung nötig, auf welche in den durchgeführten Versuchsreihen besonderer Wert gelegt wurde. Neben der Verbindung von BSP-Elementen auf der Baustelle können die X-RAD Verbinder auch gleichzeitig als Angriffspunkte für Transport und Montage verwendet werden. Dies reduziert den Arbeitsaufwand auf der Baustelle auf das Einheben der Elemente und das Anbringen einiger weniger Stahlschrauben.

## 2-4.4 SPIDER CONNECTOR

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [38] angeführten Literatur.

Der SPIDER Connector ist ein Stahlverbindungselement bestehend aus einem vertikalen Schaft mit aufgeschweißten Stahlplatten als Kontaktflächen für Stützen und Kragarmen, welche durch Schrauben mit der anliegenden BSP-Platte verbunden werden (Abbildung 2-66, links). Dieser Verbinder wurde speziell für punktweise gelagerte Brettsperrholzplatten entwickelt. Da sich die Flachdeckenbauweise nicht nur im Betonbau, sondern auch im Holzbau zunehmender Beliebtheit erfreut, ergeben sich vor allem bei vielgeschossigen Holzbauten Querdruckprobleme im Stützenanschluss bei durchgehenden BSP-Elementen. Diese können zwar in einem gewissen Ausmaß durch Querdruckverstärkungen mittels Schrauben reduziert werden, die damit erreichbare Kraftübertragung reicht für den Einsatz in Hochhäusern jedoch vielfach nicht aus. Der SPIDER-Connector greift die in den Auflagerpunkten solcher punktgestützter Flachdecken auftretenden Probleme gleich in mehrerer Hinsicht auf, was aus den verschiedenen Kräften, die am Verbinder auftreten, ersichtlich wird (Abbildung 2-66, rechts).

Die Unterbrechung der Stütze wird durch Stahlplatten, welche durch ein Stahlrohr miteinander verbunden sind, abgefangen. Die obere Stahlplatte übernimmt die Auflagerkräfte der oberen Geschoße auf Kontakt aus der Stütze und leitet sie gemeinsam mit den Auflagerkräften des jeweiligen Geschoßes über die untere Stahlplatte ebenfalls auf Kontakt in die darunterliegende Stütze weiter. Somit entsteht aus den Lasten der oberen Geschoße keine zusätzliche Beanspruchung der Deckenplatte. Die Auflagerlasten der Decke selbst werden über Kontakt direkt an der Stütze sowie über eine Verschraubung der BSP-Platte mit den Kragarmen des Verbinders übertragen. Diese dienen dabei jedoch nicht nur als Auflager, sondern erhöhen durch ihre Stützwirkung und die Verschraubung auch die Querkrafttragfähigkeit und die Steifigkeit des Anschlusses. Dies wiederum führt gleichzeitig zu einer deutlich geringeren Durchbiegung der Decke und einer geringeren Schwingungsempfindlichkeit der Konstruktion.

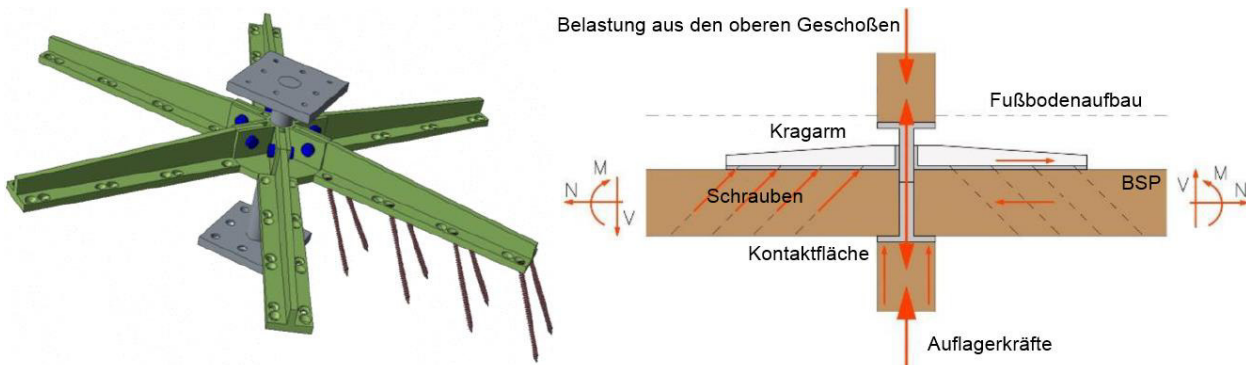


Abbildung 2-66: SPIDER Connector im 3D-Modell (links), Kraftfluss am Verbindungselement (rechts) [38]

Die Anordnung der Kragarme an der Oberseite der Decke erlaubt eine durchgehend freie Untersicht der Decke bis zur Stütze hin. An der Oberseite werden die Kragarme von der Fußbodenkonstruktion überdeckt, womit der Verbinder für Benutzer des Gebäudes unsichtbar bleibt.

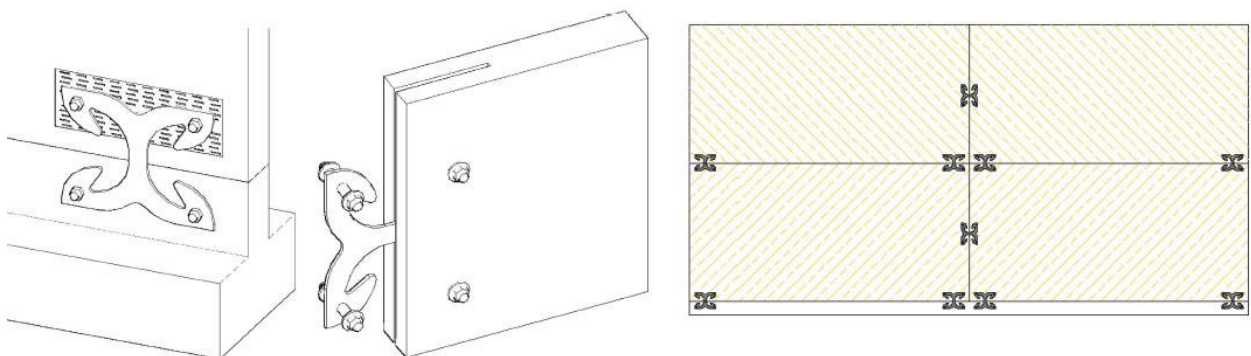
Das System wurde für einen Stützenabstand von 5 m entwickelt und geht von einer zweiteiligen Deckenkonstruktion mit wechselnder Orientierung der Haupttragrichtung aus. Die verwendeten BSP-Elemente weisen dabei eine Breite von 2,5 m auf, wobei ihre Mittelachsen jeweils direkt in den Stützen bzw. genau zwischen zwei Stützen liegen. Die Elemente, die auf den Stützen aufliegen, sind zwischen diesen direkt gespannt und ergeben in ihrer Haupttragrichtung einen Mehrfeldträger, während sie quer dazu frei auskragen. Zwischen diese Tragstreifen werden BSP-Platten eingehängt, deren Haupttragrichtung genau um 90° zu ersteren gedreht ist. Diese bilden somit Einfeldträger, die auf den Hauptträgern aufliegen. Das System funktioniert jedoch nur bei ausreichend steifen Auflagern, welche durch den Einsatz von SPIDER-Connectors gewährleistet werden können.

## 2-4.5 DISSIPATIVE CONNECTOR (X-BRACKET)

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [39] angeführten Literatur.

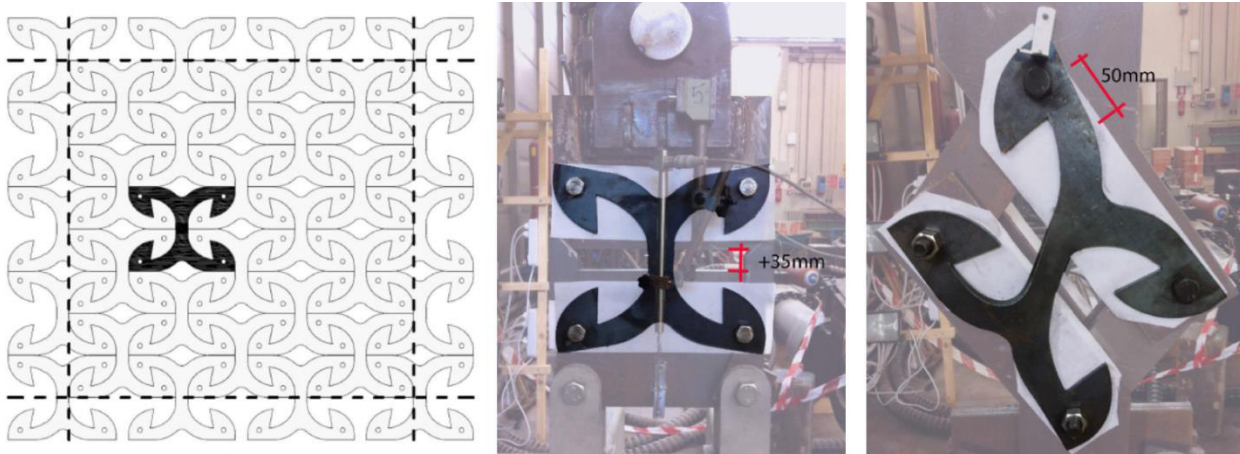
Der X-bracket Verbinder wurde speziell zur Abtragung von Erdbebenlasten entwickelt. Dafür sollte er ausreichende dissipative Kapazitäten aufweisen und auch bei hohen Lastwechselzahlen nicht versagen. Die Entwicklung eines solchen Verbinders ist vor allem deshalb interessant, da in der Holz-Massivbauweise mit Brettsperrholz einzig die Anschlusspunkte der Elemente untereinander dissipative Bereiche ausbilden können. Der X-bracket Verbinder wurde deshalb so ausgelegt, dass vor dem Bruch große plastische Verformungen auftreten.

Die Verbinder werden in den vertikalen Gebäudefugen auf halber Höhe und bei horizontalen Fugen am Rand der Elemente angebracht (Abbildung 2-67, rechts). Bei längeren BSP-Elementen werden in regelmäßigen Abständen über das ganze Element verteilt zusätzliche Verbinder angebracht. Der Verbinder selbst wird entweder außen auf das Element aufgeschraubt oder in einen Schlitz in der Elementachse versenkt (Abbildung 2-67, links und Mitte). Mögliche Anwendungen sind Fundamentanschlüsse sowie vertikale und horizontale Bauteilstöße. Zu beachten ist, dass der Verbinder nur die Kraft zwischen den Elementen überträgt, aber nicht für die Kraftüberleitung vom Holz in die Verbindung zuständig ist. Dazu bedarf es anderer, im oder am Holz liegender Verbindungsmittel, wie zum Beispiel Nagelbleche oder eingeklebte Bleche.



**Abbildung 2-67: X-bracket Verbinder als Fundamentanschluss (links), zur horizontalen Verbindung zweier Wände (Mitte), Anordnungsschema für X-bracket Verbinder (rechts) [39]**

Die X-bracket Verbinder bestehen aus einem 6 mm starken Stahlblech, das mittels Laser zurechtgeschnitten wird. Aufgrund der optimierten Formgestaltung entsteht dabei nur wenig Verschnitt (Abbildung 2-68, links). Die Form ist jedoch nicht nur auf die Produktion, sondern auch auf das Tragverhalten hin optimiert. So wurden Dicke und Geometrie in der Ebene zuerst mit Simulationen und dann mit Versuchen so lange optimiert, bis ein möglichst großer Bereich des Verbinders vor dem Bruch ins Fließen kommt.



**Abbildung 2-68: verschnittarme Herstellung aus Stahlplatte (links), Dehnung im axialen Zugversuch (Mitte), Verzerrung im Schubversuch (rechts) [39]**

Die Verformungskapazität des Verbinders wurde auf axialen Zug und auf Schub überprüft (Abbildung 2-68, Mitte und rechts). Dabei zeigt sich, dass der Verbinder in axialer Richtung problemlos eine plastische Verformung von 35 mm ertragen kann und sich auf Schub um bis zu 50 mm verzerren lässt, ohne dass ein Bruch auftritt. Des Weiteren wurden zyklische Belastungstests durchgeführt, um die Ermüdungsfestigkeit zu bestimmen, was ebenfalls wichtig für den Erdbebenfall ist.

Während der gesamten Entwicklungsphase wurden alle Versuche vor der Durchführung mit Finite-Elemente-Berechnungen simuliert. Die Ergebnisse der Simulation und der physischen Tests wurden dann jeweils verglichen und wiesen stets eine gute Übereinstimmung auf. Dies gilt auch für die Verformungsabschätzungen und das Beulverhalten des Verbinders. Die Tragfähigkeit eines Verbinders (5%-Quantile) beträgt etwa 17 kN auf axialen Zug und 25 kN auf Schub. Die große Stärke dieses Verbinders ist jedoch seine plastische Verformungskapazität.

## 2-5 VERBINDUNGSBEISPIELE AUS DEM MÖBELBAU

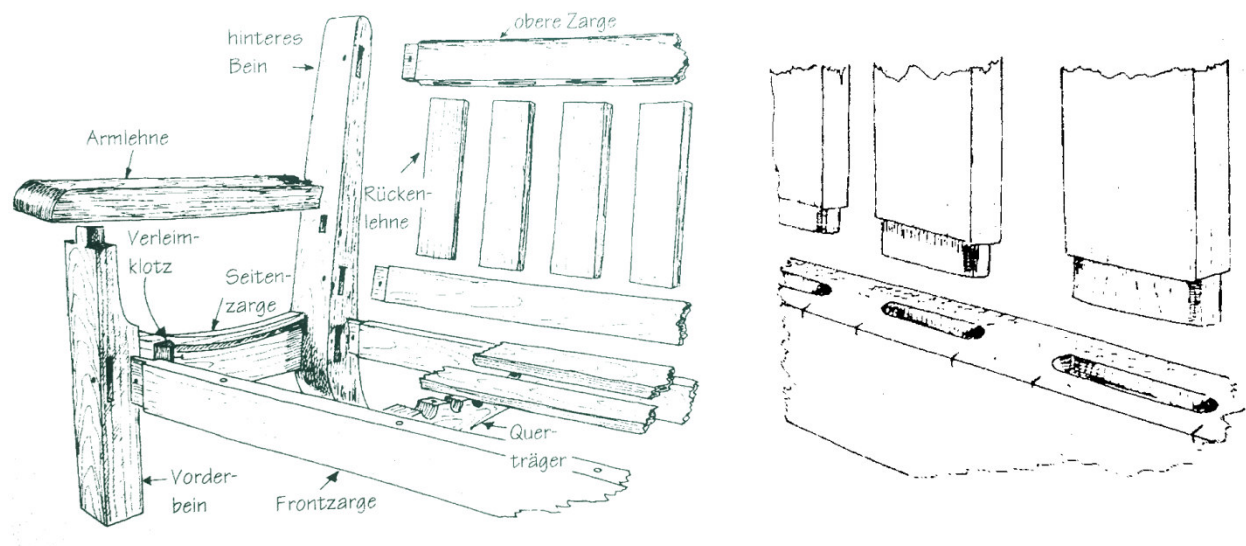
Im Möbelbau wird eine Vielzahl verschiedener Verbindungselemente verwendet. Diese nehmen im Vergleich zum ingenieurmäßigen Holzbau zwar meist nur geringe Kräfte auf, müssen aber wegen beengter Platzverhältnisse und geringer Materialstärken trotzdem oft hohe Anforderungen erfüllen. Außerdem soll ein schneller und unkomplizierter Zusammenbau mit möglichst wenig Werkzeugeinsatz und bei vielen Möbeln auch ein mehrmaliges Zerlegen und erneutes Zusammenbauen ohne bleibende Schäden an der Verbindung oder den anschließenden Bauteilen möglich sein. Durch ein Studium der Funktions- und Einsatzweise von Möbelverbindern sollten sich so Erkenntnisse gewinnen lassen, welche sich durch entsprechende Adaption und Größenskalierung der Verbindungselemente auch auf den Holzbau übertragen lassen können.

### 2-5.1 KLASSISCHE ZIMMERMANNSMÄSSIGE VERBINDUNGEN

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [40] angeführten Literatur.

Wie im konstruktiven Holzbau waren im Möbelbau die längste Zeit über zimmermannsmäßige Verbindungen gebräuchlich. Diese sind meist in ähnlicher Weise wie im Bauwesen ausgeführt, allerdings in deutlich kleinerem Maßstab. Wie in Abbildung 2-69 ersichtlich, handelt es sich bei diesen Verbindungen meist um Zapfenverbindungen verschiedenster Ausführungen, was aus dem gesamten Möbelstück eine Art Stecksystem macht.

Die meisten dieser Verbindungen sind durch das Zusammenstecken allein bereits tragfähig. Zur Lagesicherung bzw. um ein Auseinanderfallen des Möbels zu vermeiden, werden diese Verbindungen üblicherweise verleimt und zusätzlich noch durch Nägel gesichert. Damit ergibt sich eine quasi-starre Verbindung, welche die auftretenden Kräfte hauptsächlich über Flächenpressung und die Haftkraft des Leims überträgt.



**Abbildung 2-69: Zimmermannsmäßige Holzverbindungen im Möbelbau am Beispiel einer Bank (links) und Zapfenverbindung im Detail (rechts) [40]**

Neben der Ausbildung eines Zapfens an einem Bauteil und einer Nut am anderen kann auch ein loser Zapfen verwendet werden (Abbildung 2-70). Dieser besteht meist aus Sperrholz, um ein Aufspalten zufolge einer Beanspruchung quer zur Faserrichtung zu vermeiden und dient meist dazu, Hölzer über Eck zu verbinden. In dieses Sperrholzstück werden dann zwei Löcher gebohrt, wobei eines davon leicht versetzt angeordnet ist. Dann wird der lose Zapfen nach Aufbringen von Leim in die beiden Nuten

geschoben und durch Dübel mit dem Holz verbunden. Durch die versetzte Anordnung eines der Löcher im Zapfen wird die Verbindung zusammengespannt, was eine bessere Verleimung bewirkt.

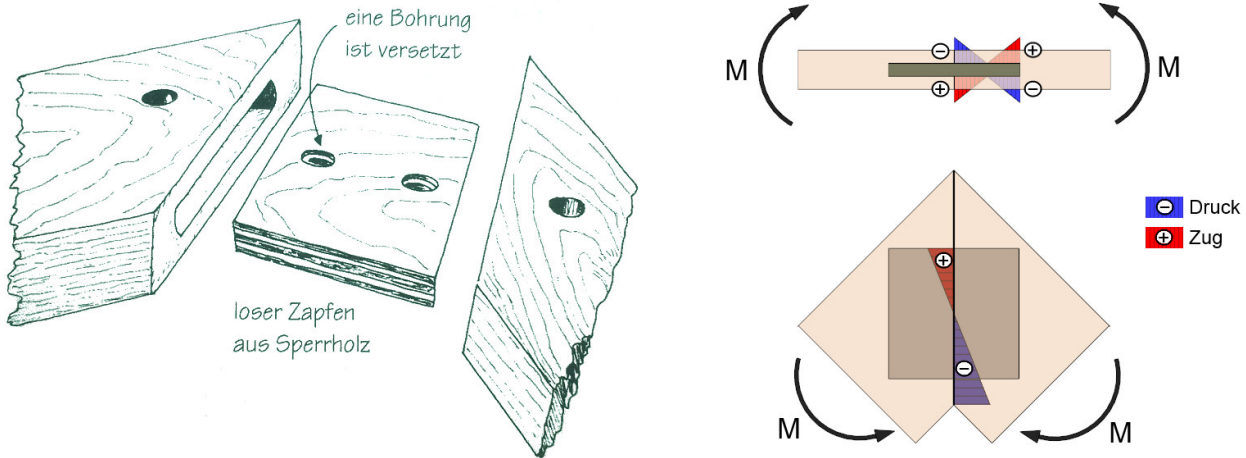


Abbildung 2-70: Gelehrte Verbindung und ihre Bestandteile (links), Kraftübertragung bei Momenteneinwirkung aus der Ebene (rechts oben) und in der Ebene (rechts unten) [40]

Die Verbindung kann für Eckverbindungen oder gerade Stöße verwendet werden. Die Druckübertragung erfolgt auf Kontakt, während Zug über die Verleimung entlang der Seitenflächen und durch Lochreibung im Dübel übertragen wird. Die Momentenübertragung in der Ebene erfolgt durch Druck auf die Kontaktflächen im Holz und Zug in einem Teil des Zapfens, welcher dann in weiterer Folge durch den Leim auf Schub weitergeleitet wird (Abbildung 2-70, rechts unten). Momente aus der Ebene werden über Flächenpressung an der Druckseite und Zugkräfte im Leim an der jeweils gegenüberliegenden Seite übertragen (Abbildung 2-70, rechts oben). An der Fuge zwischen den beiden zu verbindenden Bauteilen erfolgt die gesamte Kraftübertragung allein über den Querschnitt des losen Zapfens.

## 2-5.2 LÖSBARE METALLVERBINDUNGEN

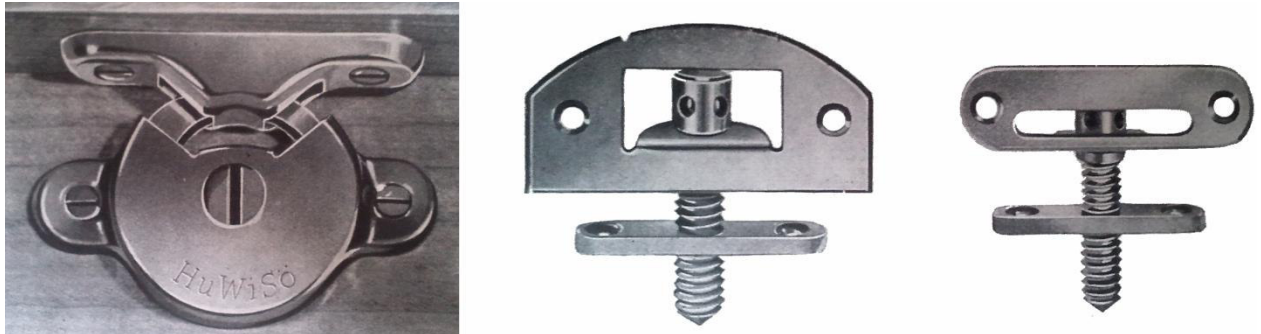
Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [41] angeführten Literatur.

Lösbare Verbindungen aus Metall im Möbelbau entsprechen in etwa den ingenieurmäßigen Verbindungen im Holzbau. Sie sind meist mit Schrauben am jeweiligen Möbelstück befestigt oder eingelassen und bestehen üblicherweise aus zwei Teilen. Diese werden bereits werkseitig an den einzelnen Bauteilen angebracht und müssen beim Zusammenbau des Möbelstücks nur mehr zusammenschraubt oder –gesteckt werden, um eine kraftschlüssige Verbindung zu erzeugen. Um ein schnelles Auf- und Abbauen zu ermöglichen, sind diese Beschläge meist so ausgeführt, dass sie mehrfach lös- und wieder zusammensetzbar sind.

Klassische Schrankbeschläge bestehen meist aus Eisen oder Messing. Ein Beispiel dafür ist der Schrankbeschlag mit Drehkeil mit der Bezeichnung HUWIL-Richteroth (Abbildung 2-71, links). Dieser besteht aus zwei Teilen, welche auf zwei im rechten Winkel zueinander stehende Oberflächen geschraubt werden. Einer dieser Teile beinhaltet ein Gehäuse mit einem Drehkeil, der andere ein Loch, welches genau den Maßen des Drehkeils entspricht. Sollen die beiden Bauteile miteinander verbunden werden, wird der Drehkeil durch eine Schraube am Gehäuse so lange verdreht, bis eine kraftschlüssige Verbindung entsteht.

Ein weiterer klassischer Beschlag ist die Berliner Schrankschraube (Abbildung 2-71, Mitte und links). Diese ist in verschiedenen Ausführungen gebräuchlich und wird in das Bauteil eingelassen und mit einer Platte verdeckt. Sie dient ebenfalls zum Verbinden rechtwinklig zueinander stehender Bauteile und besteht aus zwei Beschlagsblechen, welche durch eine Schraube miteinander verbunden werden. Die Beschlagsbleche werden dabei durch kleinere Schrauben mit den Bauteilen verschraubt, während die größere Schraube die Verbindung zwischen den beiden Beschlagshälften bildet.

Eine spezielle Art von Beschlägen stellen die Bodenträger dar (Abbildung 2-72, oben links und Mitte). Diese dienen als Auflager für Regalbretter und werden in den verschiedensten Ausformungen verwendet. Ihnen allen ist gemein, dass sie eine waagrechte Auflagerfläche aufweisen, welche je nach Ausführung über oder unter der Befestigung liegen kann.



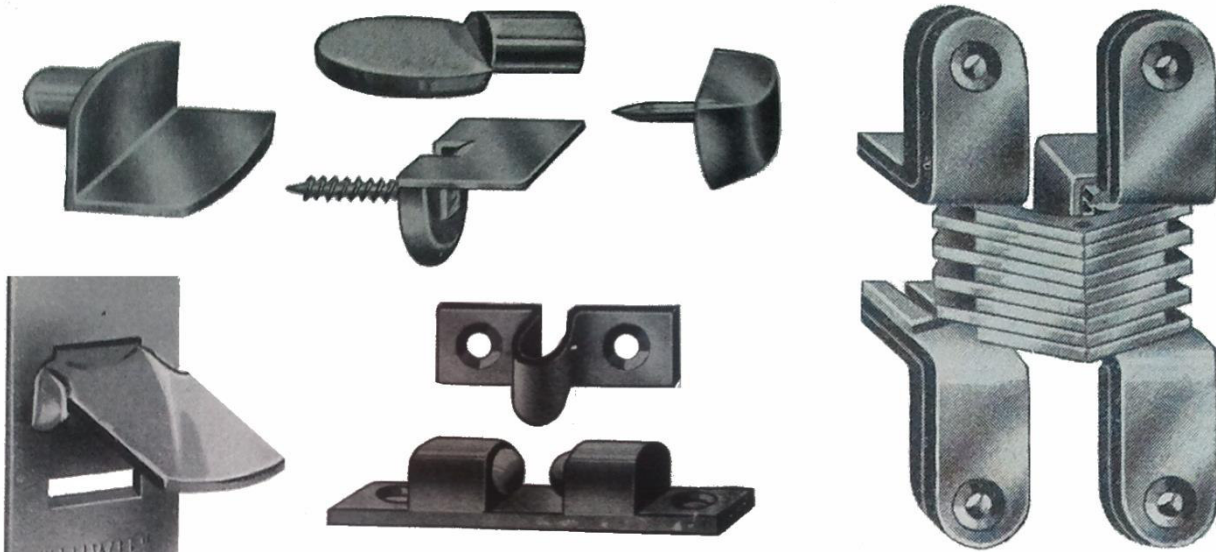
**Abbildung 2-71: Schrankbeschlag mit Drehkeil (links), Berliner Schrankschraube „Stern“ (Mitte) und „ideal“(rechts) [41]**

Die Befestigung selbst reicht von einfachen Steckverbindungen in vorgebohrte Löcher über Schrauben bis hin zu Stahlhaken, welche in einer entsprechenden Schiene eingehängt werden können (Abbildung 2-72, unten links). Als Belastung tritt bei Bodenträgern stets eine meist nach unten wirkende Normalkraft auf, welche im Bodenträger eine Querkraft und aufgrund der Entfernung des Kraftangriffspunkts vom Auflager auch ein Moment verursacht. Diese Kräfte werden bei gesteckten Verbindern über Druck bzw. Flächenpressung in das dazugehörige Bauteil übertragen. Im Fall der eingeschraubten Bodenträger erfolgt die Momentenabtragung über Druck auf die Bauteiloberfläche und Zug über die Schraube. Die Querkraft wird neben einem kleinen, möglichen Reibanteil vorwiegend über die Schraube auf Abscheren abgetragen.

Um geschlossene Türen in Position zu halten, kommen verschiedene Schnappmechanismen zum Einsatz. Einer davon ist der Doppelkugelschnapper (Abbildung 2-72, unten Mitte). Dieser besteht aus einem Gehäuse, in welchem zwei Kugeln gelagert sind, die durch Federn vorgespannt sind. Wird ein entsprechend geformter Türbeschlag zwischen die Kugeln geschoben, werden diese zuerst auseinandergedrückt, bevor sie sich bei einer Verschmälerung des Beschlags wieder zusammenbewegen und damit die Tür fixieren. Die übertragbaren Kräfte hängen von der Federsteifigkeit ab und werden üblicherweise gering gehalten, um ein leichtes Öffnen der Tür zu ermöglichen.

Scharniere gehören ebenfalls zu den Möbelbeschlägen und stellen um eine Achse vollständig drehbar gelagerte Verbindungspunkte dar. In einfachen Ausführungen besitzen sie einen Drehpunkt, welcher meist als Stift ausgeführt ist, um den sich die dazugehörigen Beschläge anordnen. Bei komplexeren Ausführungen bzw. Anwendungen, welche kein Hervorstehen des Scharniers erlauben, wird auf Scharniere mit doppeltem Drehpunkt zurückgegriffen.

Eines davon ist das Vici-Band (Abbildung 2-72, rechts), welches in den verschiedensten Ausführungsvarianten verwendet wird. Aufgrund der zwei vorhandenen Drehachsen und deren Abstand zum Lasteinleitungspunkt tritt bei dieser Gelenkvariante innerhalb des Beschlags ein deutlich größeres Moment als bei einfachen Gelenken auf.



**Abbildung 2-72: Bodenträger in verschiedener Ausführung (oben links und Mitte), Bodenträger in Stahlleitschiene (unten links), Doppelkugelschnapper (unten Mitte) und Vici-Band, unsichtbares Scharnier (rechts) [41]**

Abbildung 2-73 stellt eine grobe Übersicht über verschiedenste lösbare Metallverbindungen im Möbelbau dar. Dies sind beispielsweise Keilverbindungen, bei denen die beiden Verbindungsteile durch die Anpresswirkung eines Keils fixiert und zusammengehalten werden (Abbildung 2-73, links oben). Der Keil kann dabei gerade ausgeführt werden und aufgeschoben werden oder durch ein konisches Klemmrad realisiert werden, welches beim Andrehen die beiden Verbindungsteile aneinanderdrückt. Die Kraft wird dabei üblicherweise normal auf die Einschubrichtung des Keils übertragen, so dass dieser nicht auf Zug belastet und damit gelockert werden kann. [42]

Klassische Schraubenverbindungen bestehen aus Beschlägen, welche am Möbelstück befestigt oder darin versenkt werden und einer Schraube, welche diese beiden Beschlagsteile miteinander verbindet (Abbildung 2-73, rechts oben). Verschiedenste Ausführungsvarianten sind möglich, das Funktionsprinzip bleibt jedoch stets das Gleiche. Zuerst erfolgt die Kraftübertragung vom Bauteil in den Beschlag und von diesem dann weiter in die Verbindungsschraube. Insbesondere bei außenliegenden Winkelverbindungen treten dabei jedoch große Exzentrizitäten auf, welche unter Zugbelastung aufgrund der Nachgiebigkeit der Verbindung zu einem Klaffen der Bauteilfuge führen können. [42]

Schraubenverbindungen stellen eine sehr einfache Verbindungsart dar, welche im Wesentlichen aus einer Schraube und eventuell noch einem Schraubbolzen besteht (Abbildung 2-73, links unten). Zuerst wird einer der zu verbindenden Bauteile vorgebohrt. Diese Bohrung kann freigelassen oder mit einem Bolzen, direkt oder im rechten Winkel auf die Lochachse, verschraubt werden. Dann wird eine Schraube durch den anderen Verbindungsteil hindurch eingedreht, welche die Verbindung zusammenhält. Der Schraubenkopf ist dabei immer sichtbar. Die Kraftübertragung erfolgt bei Druck auf Kontakt der Holzflächen, bei Zug und Querkraft über die Schraube und bei Momenten über eine Kombination von Flächenpressung im Holz und Zug in der Schraube. [42]

Beschlagsverbindungen besitzen meist eine kompliziertere Geometrie und bestehen ebenfalls aus zwei Verbindungsteilen, welche dann durch Schraub- oder Steckverbindungen zusammengefügt werden (Abbildung 2-73, rechts unten). Sie können verschiedenste Formen annehmen und über eine große Varianz an Mechanismen miteinander verbunden sein. Funktionsweise und Kraftfluss sind dabei jedoch sehr ähnlich und erfolgen immer vom Bauteil in eine Verbindungshälfte und dann über eine Metallverbindung in die zweite Beschlagshälfte. Grundsätzlich können damit alle Schnittkräfte übertragen werden, wenn auch die Steifigkeiten je nach Belastungsrichtung sehr unterschiedlich sind. [42]

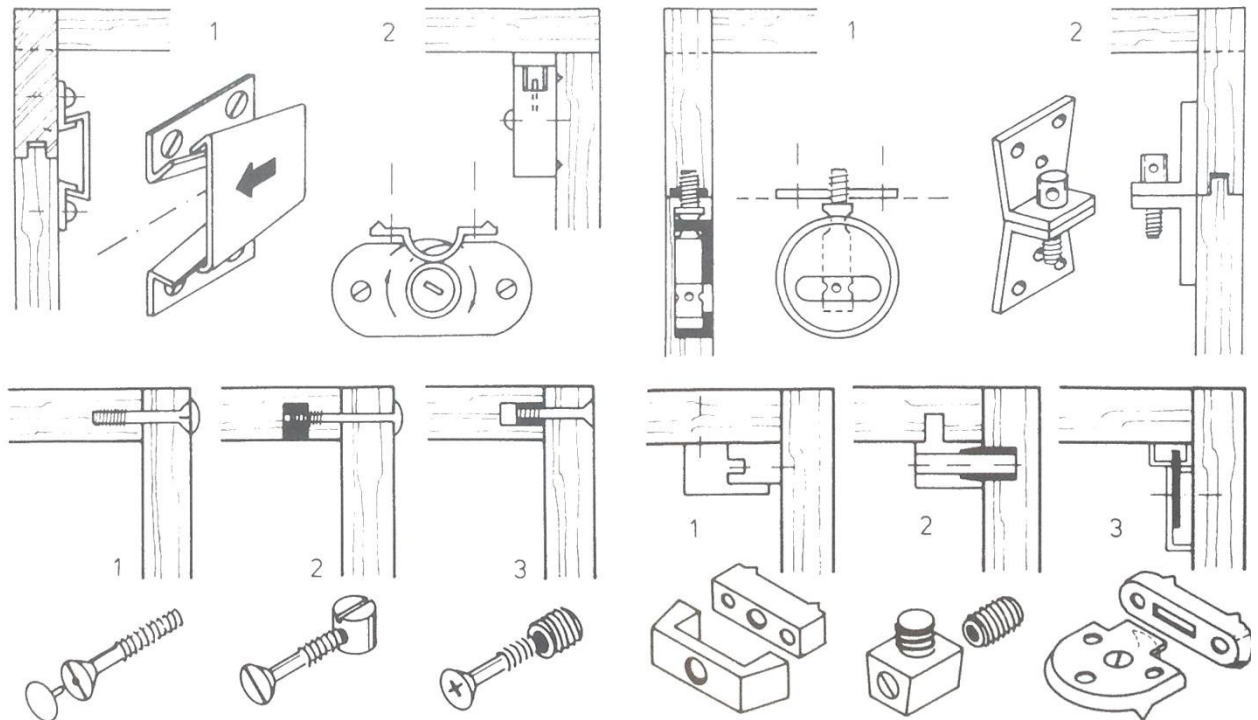


Abbildung 2-73: verschiedene lösbare Metallverbindungen in der Übersicht; Keilverbindungen (links oben), klassische Schraubverbindungen (rechts oben), Schraubverbindungen (links unten), Beschlagverbindungen (rechts unten) [42]

Bei den hier beschriebenen Verbindungen handelt es sich ausschließlich um konstruktive Verbindungen. Dies bedeutet, dass mit ihnen verbundene Möbel nicht zusätzlich verleimt oder verschraubt werden. Die Kraftübertragung erfolgt somit ausschließlich auf Flächenpressung zwischen den einzelnen Bauteilen und auf Zug, Querkraft und Moment über die Beschläge. Diese allein müssen gewährleisten, dass das Möbelstück sicher und stabil steht und dessen vollständige Funktionsfähigkeit gewährleistet ist.

### 2-5.3 SCHEULENBURG-VERBINDUNGSSYSTEME

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [43] angeführten Literatur.

Bei den Verbindungssystemen von Scheulenburg handelt es sich um innenliegende, aus verschiedenen Einzelteilen bestehende Verbindungssysteme, welche in verschiedenen Ausformungen angeboten werden. Üblicherweise übernimmt dabei ein Verbindungsteil die Kraftübertragung vom Bauteil in das Verbindungsmittel, während ein anderer die Kraft zum Verbindungsteil am zweiten Bauteil weiterleitet.

Die XS-Systeme bestehen aus Stahlhülsen, in die Madenschrauben gedreht werden, welche sich in die Bohrungen der Stahldübel fügen und diese so fixieren (Abbildung 2-74, links). Zuerst werden die zu verbindenden Bauteile vorgebohrt. Dann werden die verbindenden Bolzen eingeschoben und je nach Verbindungstyp entweder durch Madenschrauben fixiert (Abbildung 2-74, links) oder direkt mit einem der beiden Bauteile verschraubt (Abbildung 2-74, rechts). In Bohrungen im zweiten Bauteil werden Rohrhülsen eingebracht. Danach werden die beiden Bauteile zusammengesteckt und die Verbindung wird durch Madenschrauben, welche in Löcher der Stahlbolzen hineinreichen, fixiert. Von außen sind nach Herstellung der Verbindung nur mehr die Ansichtsflächen der Madenschrauben erkennbar, die restlichen Bestandteile befinden sich im Bauteilinneren. Die Kraftübertragung auf Zug und Querkraft erfolgt in diesen Verbindungen immer über die Verbindungsstifte, Druckkräfte werden auf Kontakt bzw. über Flächenpressung eingetragen.



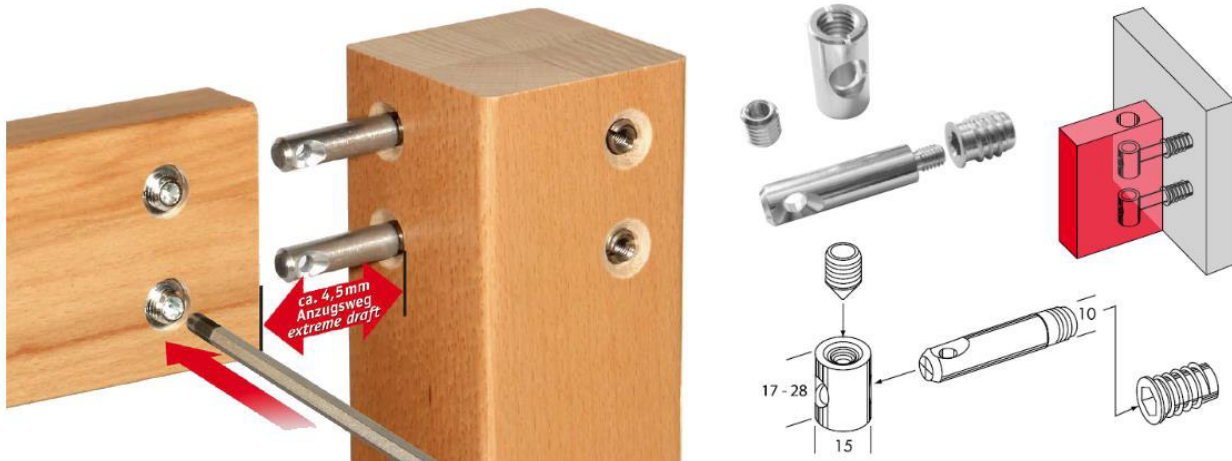


Abbildung 2-74: Verbindungssystem für Anschluss an eine Stütze (links), Bestandteile einer rechtwinkligen Verbindung (rechts) [43]

Schräge Anschlüsse beliebiger Winkel werden durch gelenkige Dübel ausgebildet. Die Fixierung erfolgt ebenfalls durch Madenschrauben, welche in Bohrungen in den Dübeln gedreht werden (Abbildung 2-75, links). Der Anschluss bleibt dabei gelenkig, bis die Fixierschrauben angezogen werden und der schräg angeschlossene Bauteil vollflächig am anderen Bauteil anliegt. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert auch das dazugehörige Beschlagsystem, welches im Wesentlichen aus den gleichen Bauteilen besteht. Die Bauteile werden dabei jedoch auf Abstand montiert, um ein Drehen der Verbindung um die Gelenksachse zu ermöglichen.

Eine weitere Verbindungsart stellt der Stützen-Tischplattenverbinder dar, welcher aus einer runden Stahlplatte und Dübeln besteht (Abbildung 2-75, Mitte und links). Die Stahlplatte wird in eine Runde Ausfräsung in der Tischplatte versenkt und verschraubt, die Dübel werden in der Stütze verankert. Die Verbindung der beiden Bauteile erfolgt durch Einhängen der Dübel in den Schlitzen der Stahlplatte, danach wird die Verbindung durch Anziehen von Schrauben auf der Tischfußseite fixiert. Alle diese Verbindungen sind so ausgelegt, dass jeweils nur die Löcher der Fixierschrauben sichtbar sind und sich der Rest der Verbindung im Inneren des Bauteils befindet.

Zugkräfte werden dabei über die Dübel und Beschläge direkt übertragen. Bei Momentenbeanspruchung wirkt der sich in der Druckzone befindende Teil der Kontaktfläche auf Druck, während die Verbindungsdübel auf Zug beansprucht werden. Querkräfte werden über die Verbindungsdübel auf Abscheren abgetragen.



Abbildung 2-75: Dübelverbindung mit Gelenken für schräge Anschlüsse (links), Stütze-Tischplattenverbindung (Mitte) und ihre Bestandteile (rechts) [43]

Daneben gibt es noch viele weitere, ähnlich geartete Verbindungstypen, die alle aus einer Kombination aus Stahldübeln, Hülsen und Madenschrauben bestehen. Das Ziel ist es dabei stets, eine möglichst starre und tragfähige Verbindung zu schaffen, welche von außen so wenig wie möglich sichtbar ist.

## 2-5.4 LAMELLO-VERBINDER

Die in diesem Kapitel vorgenommene Abhandlung beruht auf der unter [44] angeführten Literatur.

Von der Firma Lamello gibt es eine Vielzahl von Möbelverbindern. Der klassische Lamello-Möbelverbinder besteht aus einem gepressten Holzwerkstoff und wird in die zu verbindenden Bauteile eingeklebt. Die Form ist fischbauchartig und entspricht der kreissegmentförmigen Vertiefung, die im Holz entsteht, wenn ein rotierender Fräzkopf langsam abgesenkt wird (Abbildung 2-76, links). In diese wird Leim eingebracht, bevor der Verbinder hineingesteckt und die Bauteile dann verbunden werden. Nach dem Anziehen des Leims ergibt sich so eine starre Verbindung, welche allerdings nicht mehr zerstörungsfrei gelöst werden kann.

Die Kraftübertragung auf axialen Zug erfolgt zwischen Bauteil und Verbinder über die Leimfuge und dann weiter über den Verbinder, bevor die Kraft wieder über eine Leimfuge in das zweite Bauteil eingeleitet wird (Abbildung 2-76, Mitte links). Schub wird auf Druck über Flächenpressung und auf Zug über die Verleimung abgetragen, wobei die Verleimung ein Auseinanderklaffen der beiden Bauteile verhindert (Abbildung 2-76, Mitte rechts). Momente verursachen eine Druckkraft direkt zwischen den Bauteilen, während der Verbinder selbst wie eine Bewehrung den Zug aufnimmt und die beiden Bauteile damit zusammenhält (Abbildung 2-76, rechts).

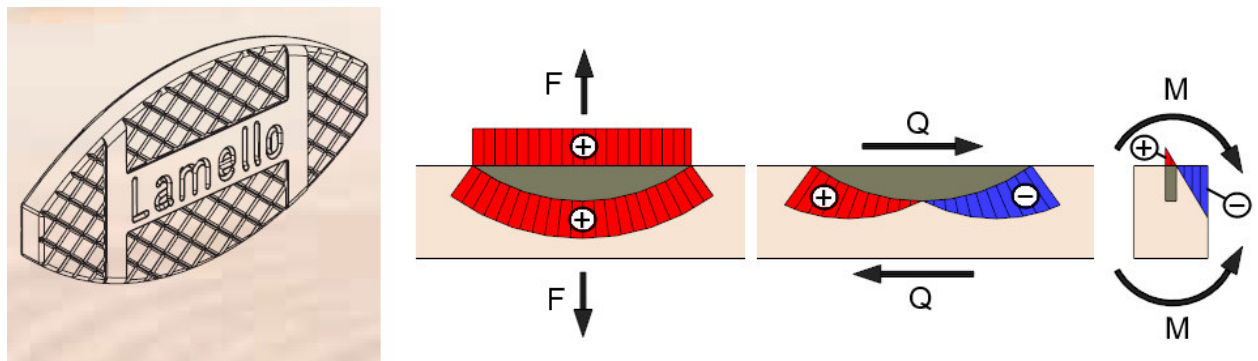


Abbildung 2-76: Lamello-Möbelverbinder (links), Spannung am Verbinder unter zentrischem Zug (Mitte links), Schub (Mitte rechts) und Moment (rechts) [44]

Die Möbelverbinder der Clamex-Produktreihe weisen eine ähnliche Form wie der Lamello-Verbinder auf, greifen jedoch auf einen anderen Kraftübertragungsmechanismus zurück. Die Vertiefung, in welche der Verbinder eingebracht wird, wird mit einem speziellen Fräzkopf hergestellt, welcher am Rand breiter als in der Mitte ist (Abbildung 2-77, rechts oben). Dadurch wird eine Nut erzeugt, welche normal auf die Drehrichtung des Fräzkopfes steht. Somit kann der jeweilige Verbindungsteil nur entlang der Nut in den Bauteil eingeschoben werden. In die beiden Bauteile kommen dabei jeweils verschiedene Verbindungsstücke, welche dann durch Verdrehen eines Hakens verbunden werden (Abbildung 2-77, links). Von außen sichtbar bleibt nur das Loch, durch welches der Haken angezogen wurde. Da diese Verbindung vollständig ohne Leim auskommt, ist sie jederzeit demontier- und wiederverwendbar.

Die Kraftübertragung auf axialen Zug vom Bauteil in den Verbinder erfolgt durch Flächenpressung der Dübelverbreiterung auf das darüber liegende Holz (Abbildung 2-77, unten Mitte links). Im Holz wird die Kraft über Rollschub in den restlichen Bauteil weitergeleitet. Im Verbinder erfolgt die Kraftübertragung durch einen Haken, welcher die beiden Verbinderhälften miteinander verbindet. Die Schubübertragung erfolgt auf Flächenpressung des unter bzw. über dem Verbinder liegenden Holzes (Abbildung 2-77, unten Mitte rechts). Im Verbinder selbst wird die Schubkraft über integrierte Schubknaggen übertragen. Die Momentenübertragung erfolgt wie auch beim klassischen Lamello-Verbinder über Druck im nebenliegenden Holz und Zug im Verbinder. Der Zug im Verbinder wird in diesem Fall jedoch durch Flächenpressung der Dübelverbreiterung in Form einer Druckkraft in das Bauteil eingetragen (Abbildung 2-77, unten rechts).

Somit erfolgt jegliche Kraftübertragung zwischen Bauteil und Verbinder auf Druck bzw. Flächenpressung, da aufgrund der fehlenden Verleimung keine Zugkräfte übertragen werden können. Die

Kraftübertragung im Verbinder selbst erfolgt stets über den Haken, der die beiden Verbinderhälften zusammenhält.

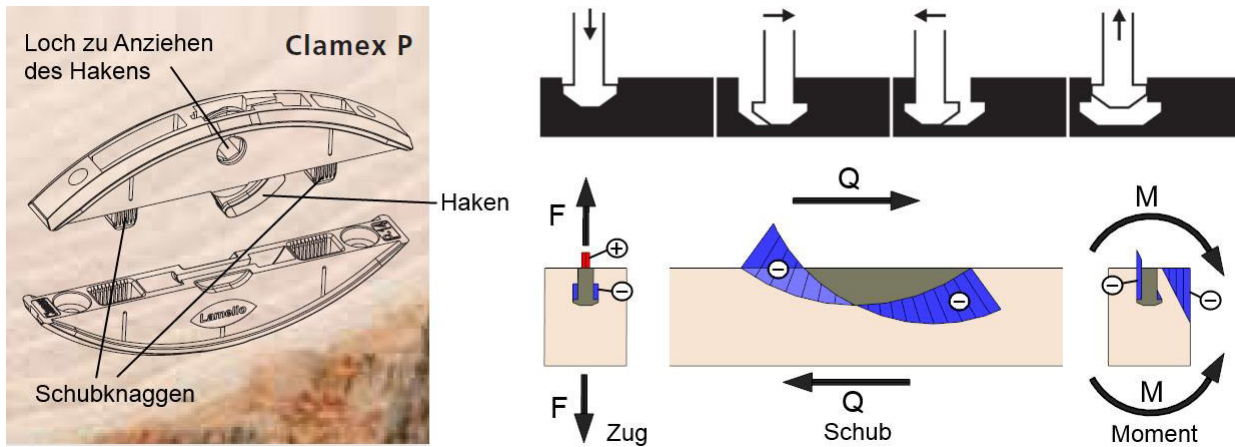


Abbildung 2-77: Clamex P-Verbinder, Systemzeichnung (links), Herstellung der Vertiefung für den Verbinder (rechts oben), Spannung am Verbinder (rechts) unter zentrischem Zug, Schub und Moment (unten rechts) [44]

Das Invis-Mx2-System ist eine magnetgetriebene Schraubverbindung, welche mit dem Ziel entwickelt wurde, die Optik eines Möbelstücks so wenig wie möglich zu beeinflussen. Die Verbindung besteht aus zwei Teilen, welche in vorgebohrte Löcher der zu verbindenden Bauteile gesteckt werden (Abbildung 2-78, links). Das kleinere Teil stellt dabei lediglich eine Mutter dar, in welche die im größeren Teil liegende Schraube gedreht wird. Das größere Teil besteht aus einem Gehäuse, in dem eine Schraube und deren magnetischer Antrieb untergebracht sind (Abbildung 2-78, Mitte). Um den Antrieb zu aktivieren, wird ein spezieller Aufsatz auf einen Akkuschauber aufgebracht und neben der anzuziehenden Verbindung platziert (Abbildung 2-78, rechts). Durch Drehen des Akkuschauber-Aufsatzes wird ein rotierendes Magnetfeld erzeugt, welches den magnetischen Antrieb im größeren Verbindungsteil ebenfalls in Rotation versetzt und die Schraube somit wie ein berührungsloses Zahnrad eindreht. Durch Richtungsänderung des Akkuschaubers kann die Schraube auch wieder herausgedreht werden, was die Verbindung zerleg- und wiederverwendbar macht. Von außen ist die Verbindung vollständig unsichtbar.

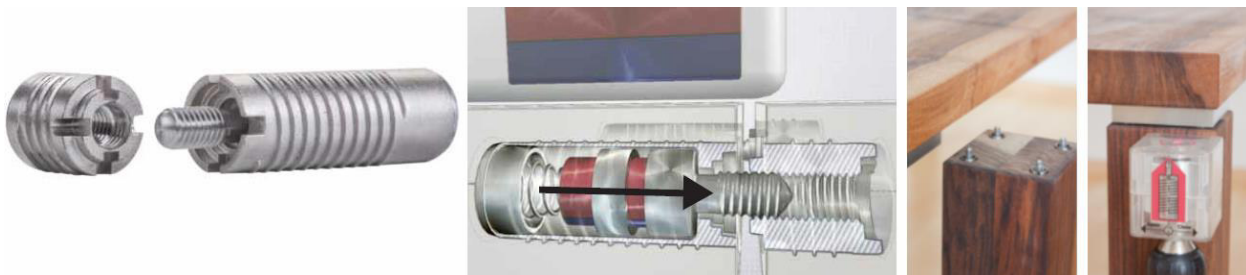


Abbildung 2-78: Invis-Mx2-System (links), magnetischer Spannmechanismus (Mitte), Anziehen der Schrauben durch einen nebenliegenden Akkuschauber mit speziellem Aufsatz (rechts) [44]

## 2-5.5 RESÜMEE AUS DEM MÖBELBAU

Wie im Ingenieurholzbau auch gibt es im Möbelbau eine Vielzahl verschiedener Verbindungen mit jeweils unterschiedlichen Kraftübertragungsmechanismen.

Die zimmermannsmäßigen Verbindungen im Möbelbau stellen, wie auch im Holzbau, Holz-Holz-Verbindungen dar, bei welchen die Kraftübertragung auf Kontakt erfolgt. Gegebenenfalls werden Schrauben oder Bolzen zur Lagesicherung eingesetzt. Im Gegensatz zum Ingenieurholzbau, wo Baustellenseitige Verleimung nur selten eingesetzt wird, kommen im Möbelbau auch geklebte Verbindungen häufig zum Einsatz, insbesondere, wenn biegesteife Ecken hergestellt werden sollten.

Lösbare Metallverbindungen bzw. Beschläge finden im Möbelbau häufig Anwendung, während Systeme solcher Art im Holzbau noch rar sind. Die Kraftübertragung bei Beschlägen erfolgt zuerst vom Bauteil auf die erste Beschlaghälfte, von dieser dann auf die zweite Beschlaghälfte und dann weiter ins zweite Bauteil. Mit diesem Kraftfluss und der werkseitigen Montage der Beschläge entsprechen diese Verbindungen bereits von der Art her dem, was von einem Holzbau-Systemverbinder verlangt wird.

Bei den Verbindungssystemen von Scheulenburg und dem Lamello-Verbinder handelt es sich um spezielle, innenliegende Möbelbau-Verbinder, bei welchen die Optik eine große Rolle spielt. Beim Scheulenburg-System erfolgt die Druckübertragung auf Kontakt und die Zugübertragung über Metallstifte. Biegemomente werden durch eine Kombination beider Mechanismen übertragen. Damit entspricht die Wirkungsweise weitgehend der einer Verbindung mit Holzbauschrauben. Beim Lamello-Verbinder erfolgt die Kraftübertragung vom Bauteil in den Verbinder immer über Flächenpressung, wobei sich der Spannungsverlauf entlang der Kontaktfläche je nach Krafrichtung unterschiedlich ausbildet. Dazu vergleichbare Systeme sind im Ingenieurholzbau zurzeit nicht gebräuchlich.

Es ergeben sich im Möbelbau somit je nach Verbindungstyp verschiedene Arten der Kraftübertragung, von denen einige auch im Ingenieurholzbau verwendet werden, während andere dort noch weitgehend unbekannt sind.

Zusammengefasst entsprechen die Anforderungen im Möbelbau weitgehend denen im Holzbau, mit dem Unterschied, dass die Bauteile im ingenieurmäßigen Holzbau viel größer sind und dementsprechend mehr Lasten übertragen werden müssen. Des Weiteren sind Standfestigkeit und Gebrauchstauglichkeit viel wichtiger, da Schäden aufgrund mangelhafter Konstruktionen im Holzbau deutlich größere und gefährlichere Ausmaße annehmen können bzw. höhere Auswirkungen haben als im Möbelbau. Die grundlegenden Kraftübertragungsmechanismen bleiben die gleichen, die Abmessungen der Verbindungen müssen jedoch deutlich hochskaliert werden, um die auftretenden Kräfte mit ausreichender Sicherheit übertragen zu können.

## 2-6 ANFORDERUNGEN AN EIN MODULARES VERBINDUNGSSYSTEM

---

Aus den verschiedenen, im Laufe dieses Kapitels betrachteten Bauweisen und Verbindungssystemen lassen sich nun allgemeine Anforderungen für ein modular aufgebautes Verbindungssystem ableiten. Dieses muss im Wesentlichen all das können, was gewöhnliche, nicht modulare Verbindungssysteme auch können, und zusätzlich dazu noch erhöhte Anforderungen an Montage und Kombinierbarkeit erfüllen. Um eine bessere Übersicht über die verschiedenen Einsatzbereiche einer solchen Verbindung und der dort auftretenden Kräfte zu erhalten, sind diese in Abbildung 2-79 überblicksmäßig dargestellt.

In einem Gebäude, welches unter Verwendung von Stützen, Trägern BSP-Platten und Raumzellen errichtet wird, kommt eine Vielzahl von Verbindungsstellen zusammen, in denen jeweils unterschiedliche Kräfte wirken. Die hier verwendeten Nummern beziehen sich dabei auf den jeweiligen betrachteten Punkt in Abbildung 2-79.

Im Fundamentanschluss von Stützen (1) treten bei der im Holzbau üblichen Ausführung als Pendelstütze lediglich Normalkräfte auf. Überwiegend ist dies Druck, unter speziellen Lastfallkombinationen kann aber auch Zug auftreten. Im Anschluss der Stütze an einen Träger (2) verhält es sich ähnlich, hier muss zusätzlich noch die Querpressung des Trägers berücksichtigt werden. Bei der Verbindung zwischen Stütze und Deckenplatte (3) wird in erster Linie Druck übertragen, hier liegen die Probleme jedoch eher im Bereich der Querpressung, der Rollschubfestigkeit und der Durchbiegung der Platte. Das Auflager der Stütze auf einer Deckenplatte oder einer Raumzelle (4) wird ebenfalls hauptsächlich auf zentrischen Druck beansprucht.

Der Anschluss eines Trägers an eine Wandscheibe (5) oder an einen Querträger wird in erster Linie auf Querkraft beansprucht, Normal- und Querkkräfte in Achsrichtung des Trägers können jedoch auch auftreten. Momente kommen in der Praxis zwar vor, werden aufgrund der geringen Steifigkeit der meisten Verbindungen jedoch selten in Rechnung gestellt. Für den Anschluss des Trägers an eine Raumzelle (6) ist die Situation im Prinzip dieselbe. Der Fundamentanschluss einer BSP-Wandscheibe (7) wird in erster Linie auf Druck und Schub in Plattenrichtung beansprucht. Zug und Schub quer zur Plattenrichtung können in bestimmten Lastfallkombinationen zwar auftreten, sind meist jedoch vergleichsweise gering. Für die horizontalen Verbindungsfugen von BSP-Elementen (8) verhält es sich ähnlich. Eckstöße oder Kreuzungen von BSP-Scheiben (9) werden in erster Linie auf Schub entlang der Stoßfuge und Zug bzw. Druck in Scheibenrichtung beansprucht. Für die vertikalen Fugen zwischen zwei BSP-Elementen (10) gilt in etwa das Gleiche.

Das Auflager einer BSP-Decke auf einer Wand (11) wird in erster Linie auf Querkraft aus Vertikallasten beansprucht, Normalkräfte in Plattenrichtung können jedoch genauso auftreten. Bei frei stehenden Wänden wie zum Beispiel einer Attika (12) treten sowohl Normalkräfte als auch Querkkräfte und Momente auf, welche vollständig von der Verbindung aufgenommen werden müssen. Der vertikale Anschluss einer BSP-Wandscheibe an eine Raumzelle (13) verhält sich im Wesentlichen gleich wie die Eckverbindung von Wandscheiben (9). Der horizontale Anschluss einer BSP-Wandscheibe an eine Raumzelle (14) wird in erster Linie auf Druck oder Zug beansprucht, Schub in und quer zur Scheibenebene müssen jedoch auch übertragen werden können.

Im Auflager der Deckenplatte auf einen Träger (15) wird die Auflagerkraft der Decke als Druck oder Zug abgetragen. Bei einer Verwendung der Decke zur Verteilung der Windlasten tritt auch Schub in Achsrichtung des Trägers auf. In der Fuge zwischen zwei Deckenplatten (16) treten, sofern diese für eine zweidimensionale Tragwirkung als horizontale Aussteifung gegen Windlasten verwendet werden, Schub und Druck bzw. Zugkräfte quer zur bzw. in der Plattenebene auf. Bei auskragenden Platten (17) treten sowohl Quer- und Normalkräfte als auch Momente auf, was hohe Anforderungen an die dort verwendete Verbindungstechnik zur Folge hat. Dasselbe gilt für den Längsstoß von Trägern (18), wobei hier etwa durch eine Anordnung des Stoßes nahe dem Momentennullpunkt Abhilfe geschaffen werden kann (Prinzip des Gerberträgers).

Der Fundamentanschluss von Raumzellen (19) wird in erster Linie auf Druck und Schub sowie bei entsprechenden Lastfällen auch auf Zug beansprucht. Gleichzeitig treten durch Windlasten Querkräfte auf, welche in das Fundament weitergeleitet werden müssen. Die Eckverbindungen von Raumzellen (20) selbst müssen Normalkräfte in alle Richtungen aufnehmen und in die angrenzenden Elemente weiterleiten können. Herausfordernd ist hier die Montage, insbesondere, wenn die Verbindung auf allen Seiten von Raumzellen umgeben ist. Die Verbindung von Raumzellen entlang ihrer Kontaktfugen (21) wird im Wesentlichen auf die gleichen Kräfte, jedoch in Linienform, beansprucht. Beim Anschluss einer Deckenplatte an eine Raumzelle (22) werden hauptsächlich Vertikalkräfte übertragen. Durch die Aussteifungswirkung der Deckenplatte gegenüber horizontalen Windlasten treten zusätzlich noch Quer- und Normalkräfte entlang der Fuge auf.

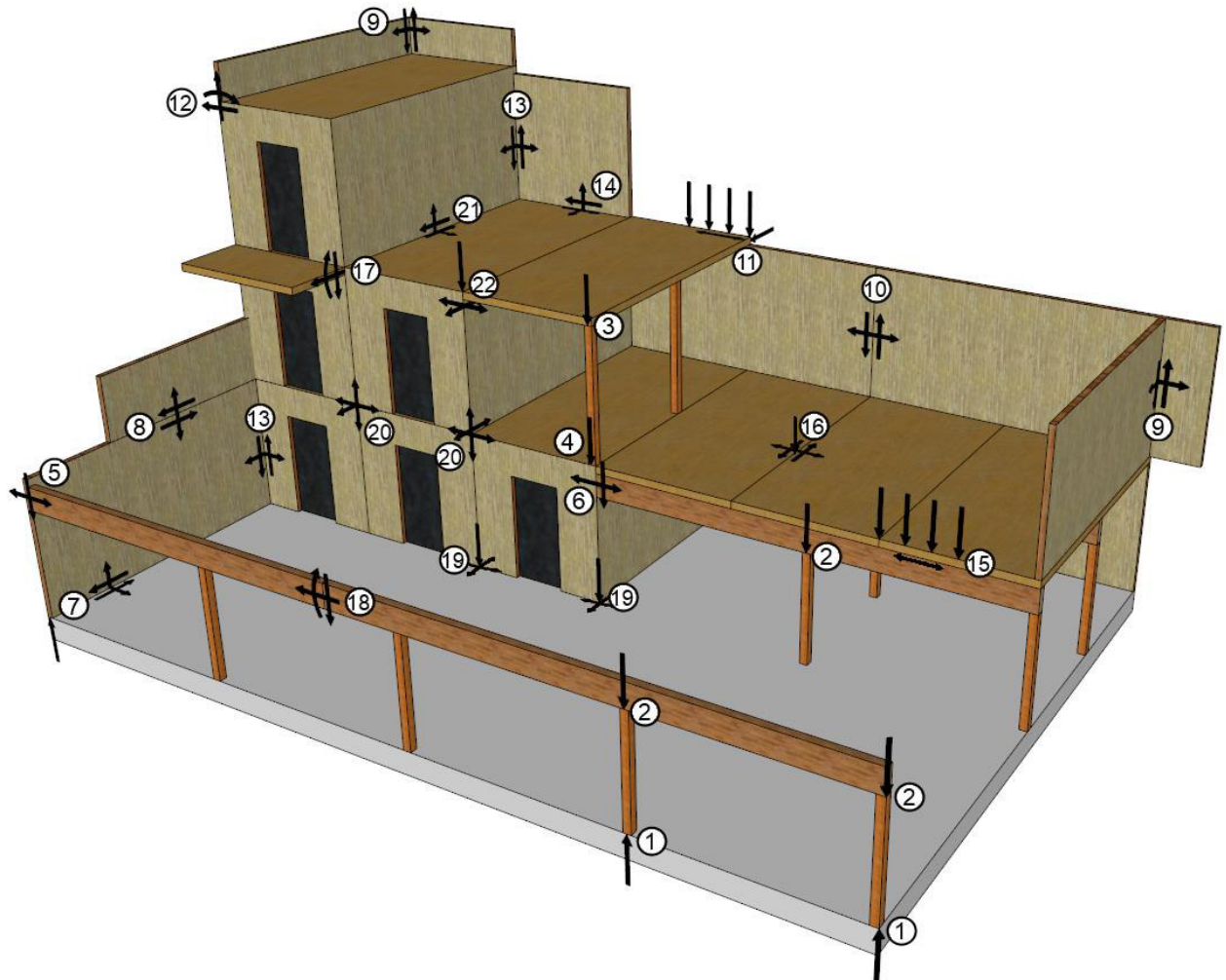


Abbildung 2-79: Übersicht über verschiedene Bauteilverbindungsunkte und die Kräfte, die in diesen auftreten

Trotz der vielen verschiedenen Bauteilkombinationen treten in den meisten Verbindungen ähnlich geartete Kräfte auf. Meist beschränken sie sich auf Druck- und Zugnormalkräfte, welche je nach Verbindungstyp in verschiedener Stärke auftreten. Momente kommen nur in den wenigsten Verbindungen vor. Somit sollte sich ein modulares Verbindungssystem in erster Linie auf die Übertragung von horizontalen und vertikalen Kräften sowie deren Kombinationen konzentrieren und so ausgeführt sein, dass seine Bestandteile auf genau diese Kräfte hin optimiert werden können.

Neben den üblichen Anforderungen an eine Verbindung – Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität – sind bei einem modularen Verbindungssystem noch weitere Punkte zu beachten (einige dieser Punkte wie Dauerhaftigkeit und Einfachheit gelten generell für alle Arten von Verbindungssystemen, andere sind speziell für modulare Verbindungssysteme von existenzieller Bedeutung):

### **Dauerhaftigkeit**

Die Verbindungen müssen alle Anforderungen über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes hinweg erfüllen. Außerdem sollten sie mehrmaliges Verbinden und Lösen unbeschadet überstehen und eventuell nach Abriss des Gebäudes wiederverwendet werden können. Auch dynamische Lasten, sofern vorhanden, sollten von der Verbindung über lange Zeit hinweg aufgenommen werden können, ohne dass es zu einem Ermüdungsbruch kommt.

### **Schnelle Montier- und Demontierbarkeit**

Um die Fertigung möglichst weit unter kontrollierte Werksbedingungen zu bringen und die Montagezeit zu verkürzen, sollen die Verbindungen zwischen den Bauteilen leicht gefügt und wieder gelöst werden können. Dazu ist ein zweiteiliger Verbindungsaufbau nötig, welcher aus einem Teil besteht, das bereits im Werk direkt mit dem Bauteil verbunden wird und einem Weiteren, das dann auf der Baustelle die beiden Verbindungsteile miteinander verbindet.

### **Beliebige Kombinierbarkeit der Verbindungsteile untereinander**

Um ein modulares Verbindungssystem zu realisieren bedarf es nicht nur zweier Verbindungsteile, die aufeinander abgestimmt sind, sondern eines ganzen Baukastens verschiedener Elemente, welche beliebig miteinander kombiniert werden können. Diese sollten eine Verbindung sowohl zwischen einzelnen Trägern, Decken und Stützen über Wandelemente bis hin zu großformatigen Bauteilen und Raumzellen ermöglichen.

### **Toleranzen**

Da Bauteile jeglicher Art immer gewisse Ungenauigkeiten aufweisen und selbst unter besten Produktionsbedingungen nie ihre exakten Abmessungen aufweisen, sind gewisse Ausgleichsmöglichkeiten in einem solchen Verbindungssystem unbedingt erforderlich. Im Idealfall sind die Verbindungselemente selbst zentrierend und so ausgeführt, dass Abweichungen in Lage und Winkel sofort augenscheinlich auffallen und durch wenige Handgriffe behoben werden können.

### **Einfachheit**

Trotz all dieser Anforderungen und umfassenden Anwendbarkeit des Systems sollte es von einem möglichst einfachen, klaren Grundgedanken geprägt sein. Komplizierte Geometrien und Verbindungsbeziehungen sowie die Verwechslung sich zu sehr ähnelnder Bauteile sollten möglichst vermieden werden, sodass die Verbindungen auch ohne große Fachkenntnis intuitiv richtig und schnell zusammengesetzt werden können.

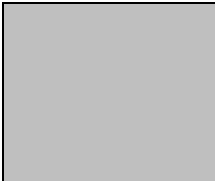

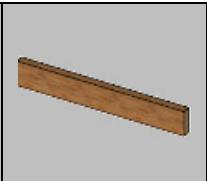
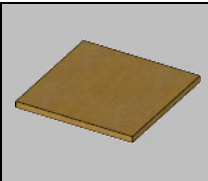
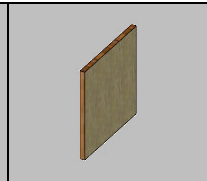
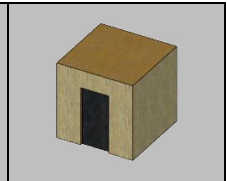
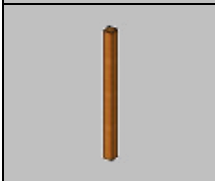
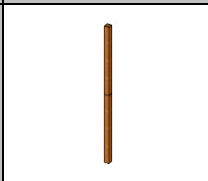


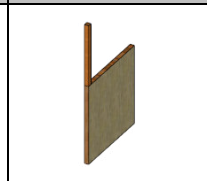
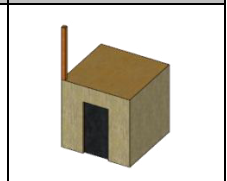
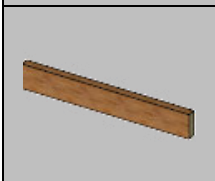
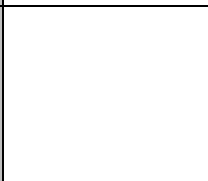


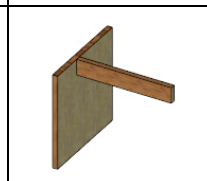
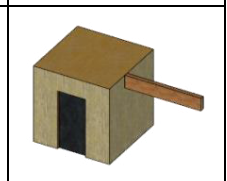
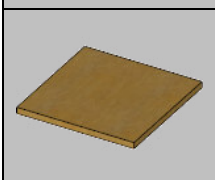





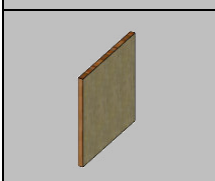



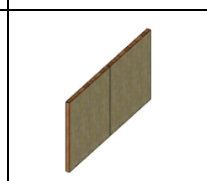
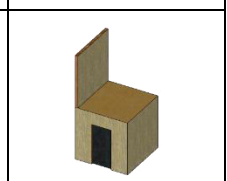
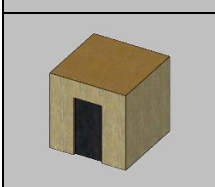
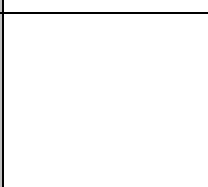
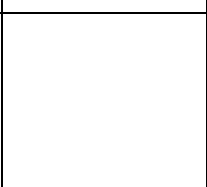
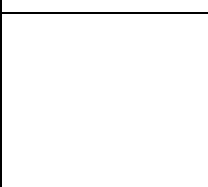
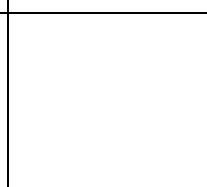

Das Bauwesen im Allgemeinen und der Holzbau im Speziellen sind von einer stetigen Automatisierung und Standardisierung geprägt, welche ursprünglich ausgehend von anderen Industriesparten eine immer größere Rolle spielen. Die Fertigung verlagert sich immer mehr von der Baustelle in die Fabrik und die Abmessungen sowie die Komplexität der einzelnen Bauteile nehmen zu. Das hat auch schwerwiegende Auswirkungen auf die Verbindungstechnik, welche auch diesen neuen Anforderungen gerecht werden muss. Da die wichtigsten Anforderungen an ein modulares Verbindungssystem, welches alles mit allem verbindet, nun bekannt sind, kann darauf basierend ein ebensolches System entwickelt werden.

# KAPITEL 3: ENTWICKLUNG EINES VERBINDUNGSBAUKASTENS

## 3-1 KOMBINATIONSVARIANTEN VERSCHIEDENER BAUTEILE

Bei der Verwendung verschiedenartiger Bauteile in einem Bauwerk tritt eine Vielzahl von möglichen Bauteilkombinationen auf. Diese sollten von einem ausgereiften Systemverbinder möglichst gut abgedeckt werden, um diesen möglichst universell einsetzbar zu machen und eine eigene Speziallösung für jeden einzelnen Verbindungsfall zu vermeiden. In der folgenden Matrix (Tabelle 3.1) sind die Kombinationsmöglichkeiten der fünf standardmäßigen Bauteile im Holzbau abgedeckt. Dies sind Träger, Stützen, Platten, Scheiben und Raumzellen.

*Tabelle 3.1: Kombinationsvarianten in Matrix-Darstellung*



Wird jedes Bauteil mit sich selbst und jedem anderen kombiniert, ergeben sich gemäß der Matrix-Aufstellung 25 Möglichkeiten. Durch die Symmetrie der Matrix reduziert sich diese Zahl auf 15 Möglichkeiten. Diese stellen jedoch nur allgemeine Verbindungsfälle dar, welche wiederum aus mehreren speziellen Verbindungsfällen bestehen.

Da es bei dieser großen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten sehr schwierig ist, einen Verbinder zu entwickeln, welcher Alles mit Allem verbindet, wird zuerst bei den am Häufigsten vorkommenden Verbindungsfällen angesetzt. Sind diese gelöst, wird die Anwendbarkeit auf weitere Bereiche überprüft und der Verbinder gegebenenfalls so adaptiert, dass diese Fälle in weiterer Folge dann auch abgedeckt werden können.

## 3-2 VARIANTENSTUDIE

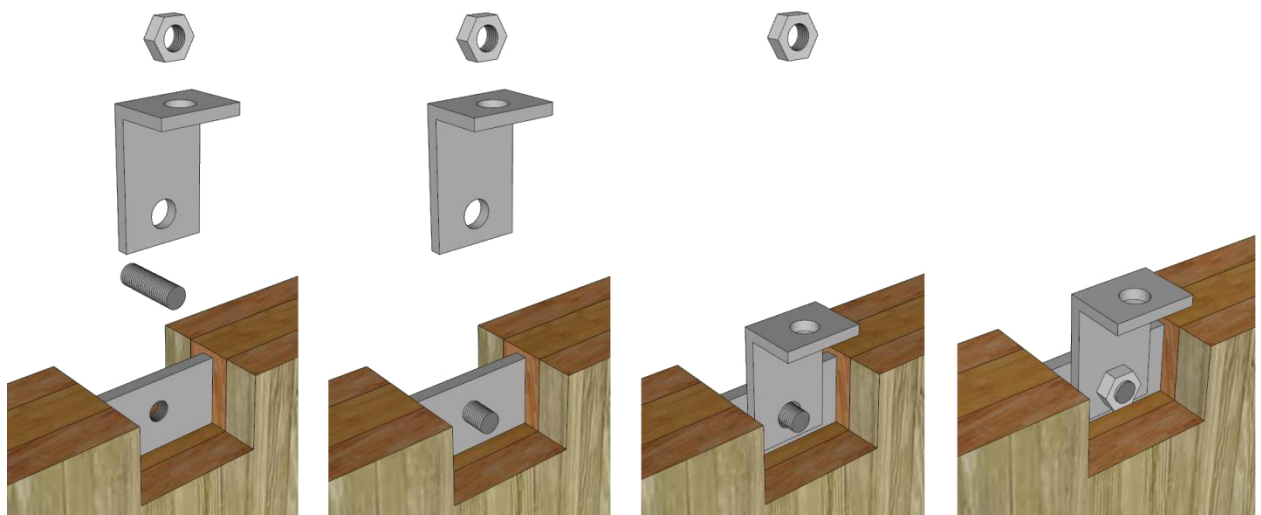
Um die optimale Lösung für ein universal einsetzbares Verbindungssystem zu finden, werden einzelne Varianten ausgearbeitet und dann miteinander verglichen, um deren Stärken und Schwächen herauszuarbeiten. Besonderer Wert wird dabei darauf gelegt, dass die Verbindung unter Erfüllung aller statischen Anforderungen mit möglichst wenigen verschiedenen Bauteilen auskommt und dabei trotzdem für möglichst viele unterschiedliche Verbindungsfälle geeignet ist. Eine möglichst schnelle und einfache Montage ohne Verwechslungsgefahr sowie die Möglichkeit des Toleranzausgleichs sind ebenfalls von großer Bedeutung.

### 3-2.1 VARIANTE 1: SCHRAUBEN UND STAHLWINKEL

Diese Variante stellt die „Low-Tech“-Lösung dar und verwendet lediglich Stahlbleche, Gewindestangen, Muttern und Winkel, um damit Verbindungen verschiedenster Art herzustellen.

Die Grundidee bei dieser Verbindung besteht darin, dass am Rand von jedem Brettsperrholzelement ein gleichartiges Verbindungsstück angebracht wird. Auf dieses werden dann je nach Verbindungsgeometrie verschiedene Winkelstücke geschraubt, welche die Verbindung zu den anliegenden Elementen herstellen. Das am Bauteil anliegende Verbindungsstück ist jeweils eine Stahlplatte, welche in das Brettsperrholzelement eingeklebt oder mit diesem verdübelt wird. Die Stahlplatte liegt dabei vollständig innerhalb der Geometrie des Brettsperrholzelements und wird erst durch eine lokale Aussparung in diesem Element sichtbar (Abbildung 3-1, links). In der Mitte der Platte befindet sich ein Loch mit Gewinde, in welches im Zuge der Montage eine Gewindestange geschraubt wird (Abbildung 3-1, Mitte links).

Auf diese Gewindestange werden dann Stahlwinkel mit einer Übermaßbohrung aufgesetzt, was einen gewissen Toleranzausgleich erlaubt (Abbildung 3-1, Mitte rechts). Dann wird der Stahlwinkel durch Muttern fixiert (Abbildung 3-1, rechts). Da die Gewindestange pro Anschlussblech das Anbringen von zwei Winkelblechen erlaubt, lässt sich jedes Brettsperrholzelement, das dem Stoß hinzugefügt wird, sofort befestigen. Es muss somit nicht erst gewartet werden, bis alle anzuschließenden Bauteile an ihren Plätzen sind, bevor die Verbindung statisch wirksam wird. Das erlaubt es auch, eine bestehende Verbindung später zu erweitern, ohne die bereits dort verbauten Verbindungsmittel lockern zu müssen.

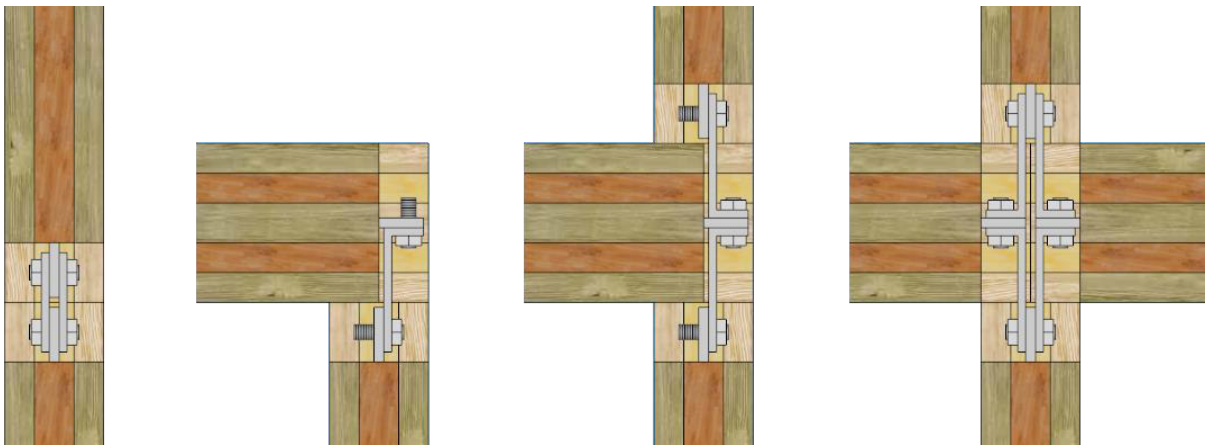


**Abbildung 3-1: Verbindungsbestandteile und Montageverlauf eines Verbindungswinkels**

Um Verbindungen verschiedenster Art ausführen zu können, gibt es neben dem am Bauteil montierten Anschlussblech noch eine geringe Zahl unterschiedlicher Verbindungsbleche. Diese erlauben es, die gängigsten Verbindungsfälle mit relativ geringem Aufwand ausführen zu können.

Im einfachsten Verbindungsfall werden zwei Wandelemente stumpf gestoßen und mit geraden Blechen, welche mit dem Anschlussblech verschraubt werden, miteinander verbunden (Abbildung 3-2, links). Im Falle eines Wand-Decken-Stoßes wird die Deckenplatte auf die Wandscheibe aufgelegt, und die Verbindung wird mithilfe eines Winkels hergestellt, welcher von außen mit den beiden Anschlussblechen verschraubt wird (Abbildung 3-2, Mitte links). Dieser Stoß kann nun durch Aufstellen einer darüber liegenden Wand, ohne die bestehende Verbindung lösen zu müssen, zu einem Deckenstoß mit durchlaufender Wand erweitert werden (Abbildung 3-2, Mitte rechts). Um einen Kreuzstoß zu bilden, werden die zwei dazugehörigen Deckenplatten jeweils halb auf die Wand aufgelegt und durch Winkel mit den jeweiligen Anschlussblechen verbunden. Dann wird die obere Wand aufgesetzt und ebenfalls durch Winkel mit den Anschlussblechen der Deckenplatten verbunden (Abbildung 3-2, rechts). Bei dieser Verbindung, an der insgesamt vier Brettsperrholzelemente beteiligt sind, lässt sich jedes Bauteil, sobald es seinen Platz eingenommen hat, durch die Verbindungsbleche sofort endgültig fixieren. Dadurch erreichen die Bestandteile der Verbindung bereits vor Fertigstellung des gesamten Knotens ihre Tragfähigkeit und müssen nicht durch zusätzliche Maßnahmen in Position gehalten werden.

Weitere Knoten, bis hin zu Raumzellen, lassen sich mit steigender Komplexität der Verbindungsstelle ebenfalls herstellen. Unter Einsatz entsprechend geformter Verbindungsteile ist das System nahezu unbegrenzt einsetzbar.



**Abbildung 3-2: Verschiedene Stoß-Varianten, einfacher Wandstoß (links), Wand-Decken-Stoß (Mitte links), Stoß durchlaufende Wand mit Decke (Mitte rechts) und Kreuzstoß Wand-Decke (rechts)**

Dieses Verbindungssystem greift auf sehr einfache, im Bauwesen durchaus geläufige Bestandteile zurück und erlaubt es, trotz seiner beschränkten Bauteilanzahl und immer gleicher Anschlussstellen, eine große Varianz von Verbindungsknoten herzustellen. Die bauteilseitigen Anschlüsse werden bereits im Werk angebracht, wodurch auf der Baustelle nur mehr Stahlwinkel angeschraubt werden müssen. Die Funktionsweise der Verbindung ist ebenfalls leicht zu verstehen, was Fehlern in der Montage entgegenwirkt. Durch die Verwendung von Schrauben als Verbindungsmittel ist eine Demontage des Verbindungsknotens jederzeit problemlos möglich.

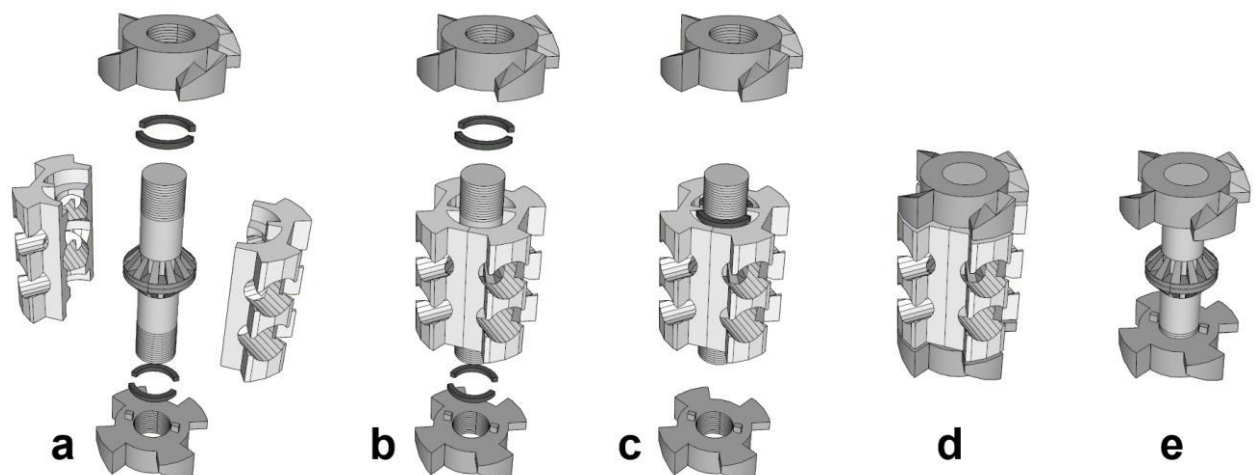
Nachteilig kann gesagt werden, dass die Verbindung durch Winkel wegen der Biegebeanspruchung der beteiligten Stahlbleche relativ nachgiebig ist. Des Weiteren benötigt die Montage durch das Eindrehen der Gewindestangen und Anbringen der Schrauben vergleichsweise viel Zeit. Des Weiteren ergeben die Aussparungen, in welchen sich die Verbindungselemente befinden, bei nicht ausreichender Verfüllung bauphysikalische Schwachpunkte im Sinne des Schall- und Brandschutzes.

### 3-2.2 VARIANTE 2: DREH-SCHNAPPVERBINDER MIT SCHRAUB-FIXIERUNG

Diese Variante entspricht der „High-Tech“-Lösung und ist dem Twistlock-Verbinder (genaue Beschreibung unter 2-4.1) aus der Hochsee-Schifffahrt nachempfunden. Sie beruht auf einem um die eigene Achse verdrehbaren Bolzen, welcher nach Einbringen des Verbindungsbauteils verkürzt wird, um so einen Kontakt herzustellen.

Die Verbindung besteht aus zwei Teilen: dem Anschlussstück, welches am Bauteil befestigt ist und immer die gleichen Innenabmessungen besitzt, und dem Verbinder selbst, der im Zuge der Montage in das Gehäuse eingebracht wird.

Das Grundprinzip des Verbinders entspricht dem des Twistlocks. Wie bei diesem auch ist der Hauptteil ein Bolzen mit großem Kopf, welcher drehbar in einem Gehäuse gelagert und mit einer Feder fixiert ist. Dieser Bolzen überträgt die auftretenden Kräfte direkt zwischen den beiden Anschlussteilen. Anders als beim Twistlock sind die Köpfe jedoch nicht mit dem Bolzen verschweißt, sondern durch jeweils gegenläufige Gewinde mit diesem verschraubt. Mit Hilfe eines Zahnkranzes in der Mitte des Dübels und einem entsprechenden Werkzeug lässt sich die Distanz der beiden Köpfe so verändern, dass die Verbindung nach dem Einbau auf Kontakt geht. Einen Überblick über den Aufbau und die Einzelteile des Verbinders gibt Abbildung 3-3.

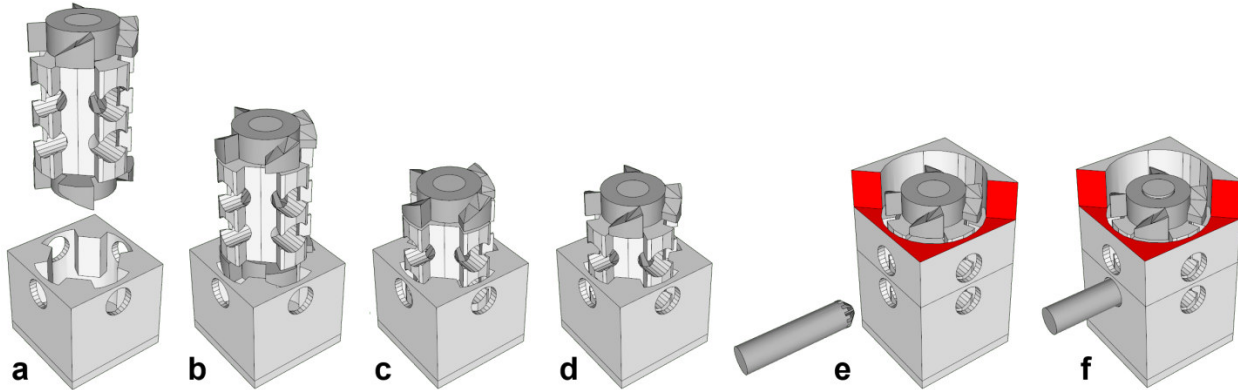


*Abbildung 3-3: Bestandteile des Verbinders als Explosionszeichnung (a), Verbinder mit zusammengesetztem Gehäuse (b), Verbinder mit eingebauten Federn (c), vollständig zusammengesetzter Verbinder (d) und für die Kraftübertragung wirksame Teile des Verbinders (e)*

Der Einbau der Verbindung selbst funktioniert folgendermaßen: Zuerst wird der Verbinder in das Anschlussstück, welches sich am ersten zu verbindenden Bauteil befindet, gesteckt. Dabei dreht sich der Bolzen, bedingt durch die Abschrägungen der Köpfe, um ca. eine Achteldrehung zur Seite, um so ein Hineinstecken des Verbinders zu ermöglichen. Sobald der Verbinder ausreichend tief im Anschlussstück versenkt ist, wird der Kopf von einer Feder zurückgedreht, wodurch der erste Teil der Verbindung nun auf Zug belastbar ist (Abbildung 3-4, b bis d). Um dieses Zurückdrehen zu ermöglichen, ist jedoch ein gewisser Abstand zwischen dem Kopf des Bolzens und der anliegenden Oberfläche des Anschlussstücks notwendig. Nun wird das zweite Bauteil, welches über ein identisches Anschlussstück verfügt, mit diesem auf die Verbindung gesetzt, wobei sich der Bolzen, bedingt durch die Abschrägungen am Kopf, wieder zur Seite dreht. Die eckige Form des Gehäuses verhindert hierbei, dass dieses sich verdreht, da ansonsten ein Rückdrehen des Kopfes mit Hilfe von Federn nicht möglich wäre.

Ist das zweite Bauteil vollständig aufgesetzt und der Kopf eingeschnappt, ist die Verbindung grundsätzlich in der Lage, Zugkräfte aufzunehmen (Abbildung 3-4, e). Da die Drehbewegung des Kopfes jedoch einen gewissen Luftspalt zwischen dem Kopf und der anliegenden Stahlplatte des Anschlussstücks erfordert, würde die Zugkraft erst nach einem Schlupf von einigen Millimetern wirksam werden. Daher

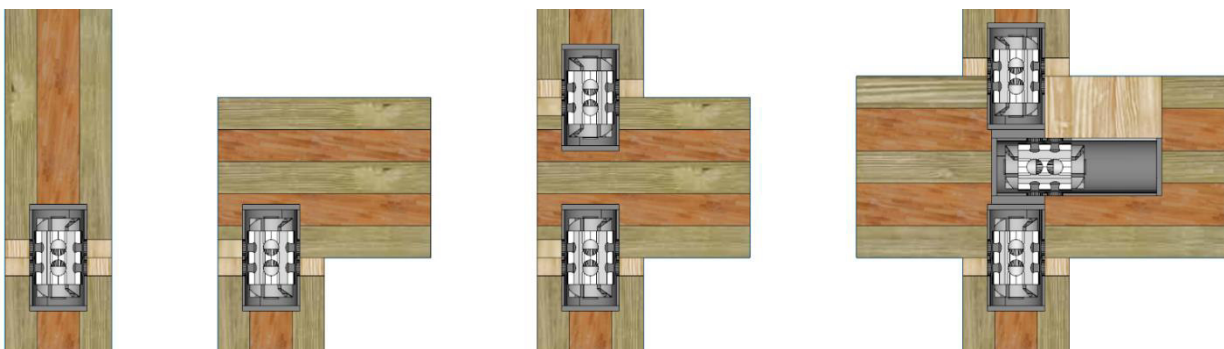
wird nach dem Versetzen der Verbindung der Bolzen mit einem Werkzeug mit Zahnkranz verdreht. Durch das gegenläufige Gewinde am Bolzenende werden die Köpfe somit näher aneinander gezogen. Dies wird so lange fortgesetzt, bis ein direkter Kontakt zwischen den Köpfen und dem Anschlussblech besteht, wodurch bei Belastung eine direkte Kraftübertragung ohne Schlupf ermöglicht wird (Abbildung 3-4, f).



**Abbildung 3-4: Montage des Verbinders, von links nach rechts; Verbinder und Anschlussblech (a), Verdrehen des Kopfes am Anfang des Einbringens der Verbindung (b), Hineinschieben des Verbinders mit maximal verdrehtem Kopf (c), Verbinder vollständig im Anschlussblech mit zurückgeschnapptem Kopf (d), Verbinder mit aufgesetztem zweiten Verbindungsteil und rückgedrehtem Kopf (e), mit Schlüssel angezogener Verbinder bereit zur schlupffreien Zugkraftaufnahme (f)**

Die Verbindung wirkt immer zwischen zwei direkt aneinander liegenden Bauteilen. Werden mehrere Bauteile miteinander verbunden, setzt sich der Knotenpunkt aus mehreren Verbindungselementen oder einer Kette dieser Elemente zusammen.

Den einfachsten Verbindungsfall stellt der gerade Wandstoß dar. Hier verfügt jede der beiden Wände über ein zentrisch angebrachtes Anschlussblech, in welches dann der Verbinder gesteckt wird, bevor die Verbindung mit dem Aufsetzen der oberen Wand geschlossen wird (Abbildung 3-5, links). Beim Wand-Decken-Stoß wird die Wand wie vorhin ausgeführt, während das Verbindungsstück in der Deckenplatte an der Unterseite angebracht ist, um diese so genau auf die Wandverbindung aufsetzen zu können (Abbildung 3-5, Mitte links). Wird nun auf die Decke eine weitere Wand aufgesetzt, benötigt die Decke auch an der Oberseite ein Anschlussblech, welches zur besseren Zugkraftübertragung zwischen den beiden Wänden gleich fix mit dem Anschlussblech an der Deckenunterseite verbunden werden kann (Abbildung 3-5, Mitte rechts). Der Kreuzstoß zwischen Wand und Decke erfordert drei Verbindungselemente. Das obere und das untere sind dabei ident ausgeführt und entsprechen den Anschlussblechen in den ersten drei Fällen, während das mittlere Element eine andere Form annimmt. Diese ist nötig, um nach Versetzen der beiden Deckenplatten auf die Wand den Verbinder in das Anschlussblech legen und dann hineinschieben zu können, um so eine feste Verbindung herzustellen (Abbildung 3-5, rechts). Das gleiche Prinzip wird bei allen vertikalen Wandstoßen angewandt, um so auch ein Verbinden von nebeneinanderliegenden Bauteilen zu ermöglichen.



**Abbildung 3-5: Verschiedene Stoß-Varianten, einfacher Wandstoß (links), Wand-Decken-Stoß (Mitte links), Stoß durchlaufende Wand mit Decke (Mitte rechts) und Kreuzstoß Wand-Decke (rechts)**

Weitere Knoten, bis hin zu Raumzellen, lassen sich mit steigender Komplexität der Verbindungsstelle ebenfalls herstellen. Unter Einsatz entsprechender Verbindungsanordnungen ist das System nahezu unbegrenzt einsetzbar.

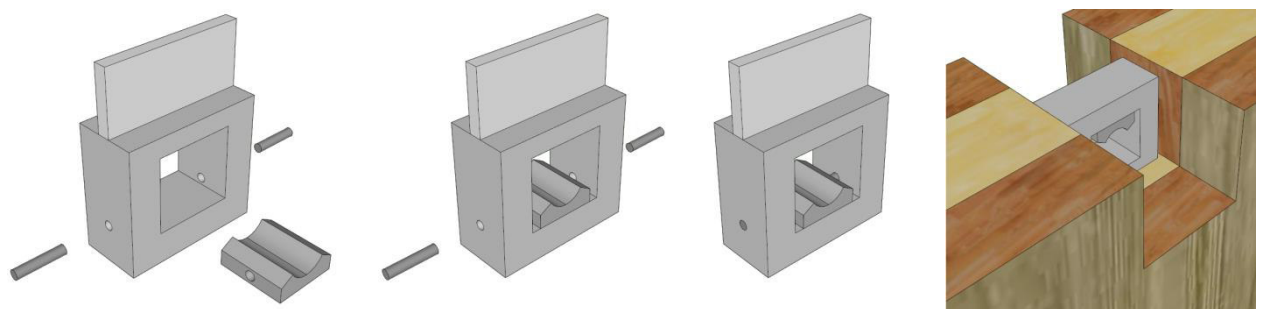
Dieses Verbindungssystem greift auf ein bewährtes Prinzip aus der Hochsee-Schifffahrt zurück, welches auf die Anforderungen im Bauwesen hin optimiert wurde. Trotz seiner beschränkten Bauteilanzahl und immer gleicher Anschlussstellen, welche je nach Art des Bauteils entweder an der Platten- oder Schmalseite der BSP-Elemente angebracht werden, kann damit eine große Varianz von Verbindungsknoten hergestellt werden. Die bauteilseitigen Anschlüsse werden bereits im Werk angebracht, wodurch auf der Baustelle nur mehr die Verbinder hineingesteckt und festgezogen werden müssen. Die Funktionsweise der Verbindung ist ebenfalls leicht zu verstehen, was Fehlern in der Montage zusätzlich entgegenwirkt.

Nachteilig ist anzumerken, dass die Verbindung bezogen auf die Aufgabe, welche sie zu erfüllen hat, aus sehr komplizierten und nur unter großem Aufwand herzustellenden Einzelteilen besteht. Die Wirtschaftlichkeit einer solchen Verbindung ist dementsprechend noch zu verifizieren. Des Weiteren können sich durch das automatische Einschnappen der Verbinder durch eine Federspannung Probleme bei der Demontage der Verbindung ergeben.

### 3-2.3 VARIANTE 3: EXZENTERFIXIERTER VERBINDER

Diese Variante kombiniert die technische Einfachheit der Verbindung mit einem möglichst schnellen und flexiblen Einsatz derselben. Die Kraft zwischen den beiden Verbindungshälften wird hierbei von einem Bolzen übertragen, welcher im Mittelteil exzentrisch ausgeführt ist und durch Verdrehen die Verbindung fixiert.

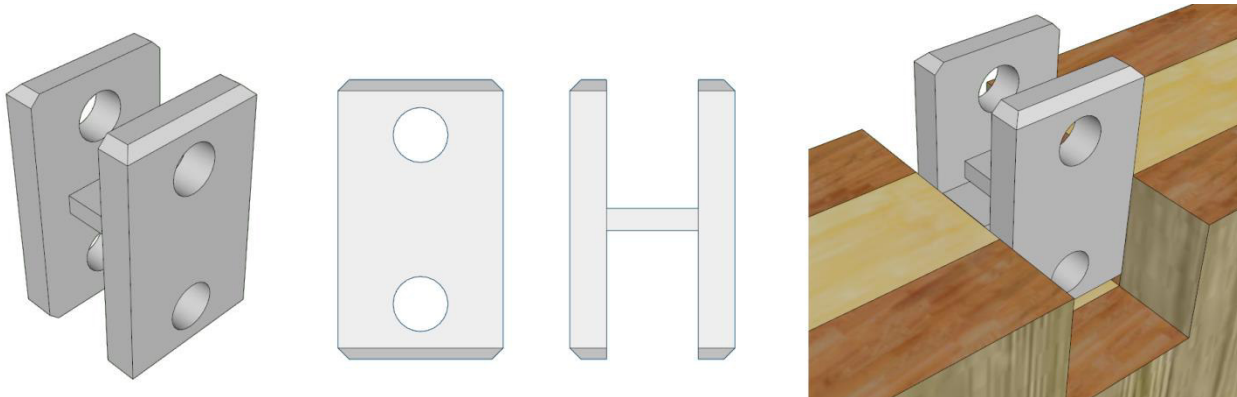
Die Verbindung selbst besteht aus drei verschiedenen Teilen: Dem Anschlussstück am Brettspertholzelement, dem Verbindungsstück und einem Bolzen, welcher die beiden anderen Teile miteinander verbindet. Der Anschlussstück ist bei jedem Brettspertholzelement ident und wird vollständig in diesem versenkt, wodurch bei Transport und Versatz keine abstehenden Teile vorhanden sind. Im Prinzip besteht es lediglich aus einem im Holz verankerten Stahlblech mit einem rechteckigen Loch, in welchem sich das Bolzenlager befindet. Dieses wiederum ist mit einem etwas kleineren Durchmesser als die Löcher im Verbindungsstück ausgeführt und ist in Blechebene verschieblich, wodurch eine gewisse Toleranz in diese Richtung ermöglicht wird. Um zu verhindern, dass das Bolzenlager herausfällt, wird es durch zwei kleinere Bolzen im Anschlussstück festgehalten (Abbildung 3-6).



*Abbildung 3-6: Anschlussstück; Einzelteile (links), Bolzenlager an Position (Mitte links), fertig zusammengesetztes Anschlussstück (Mitte rechts), im Bauteil eingebaut (180° zu den anderen Zeichnungen verdreht, rechts)*

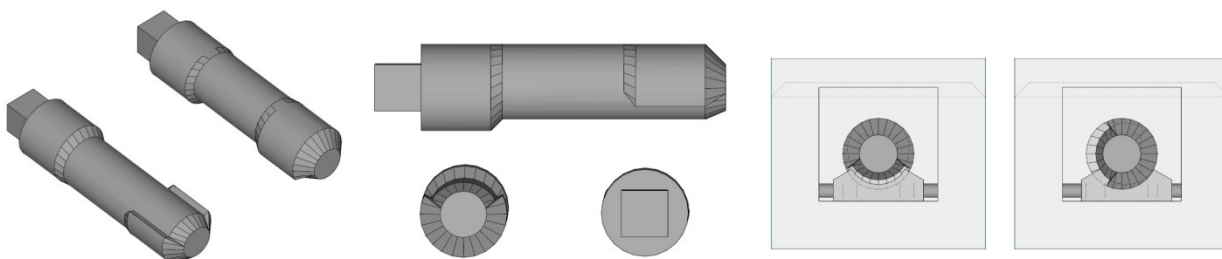
Das Standard-Verbindungsstück besteht aus zwei parallel zueinander stehenden Stahlblechen, welche jeweils oben und unten ein Loch aufweisen und durch einen Steg miteinander verbunden sind (Abbildung 3-7). Der Anschluss des Steges an die Stahlbleche kann durch Schweißen (falls geometrisch machbar) oder durch eine fixe Stahlschraubenverbindung erfolgen. Die Kraftübertragung in diesem Bauteil erfolgt auf Lochleibung direkt vom Bolzen auf das Stahlblech, und dann über dieses weiter in den zweiten Bolzen auf der anderen Seite der Verbindung. Der Steg selbst ist im Standard-Element vergleichsweise dünn ausgeführt und hat lediglich die Funktion, die beiden Stahlplatten in Position zu halten. Statisch

wirksame Kräfte werden über den Steg selbst nicht übertragen. Je nach Konfiguration wird das Verbindungsstück in verschiedenen Varianten ausgebildet.



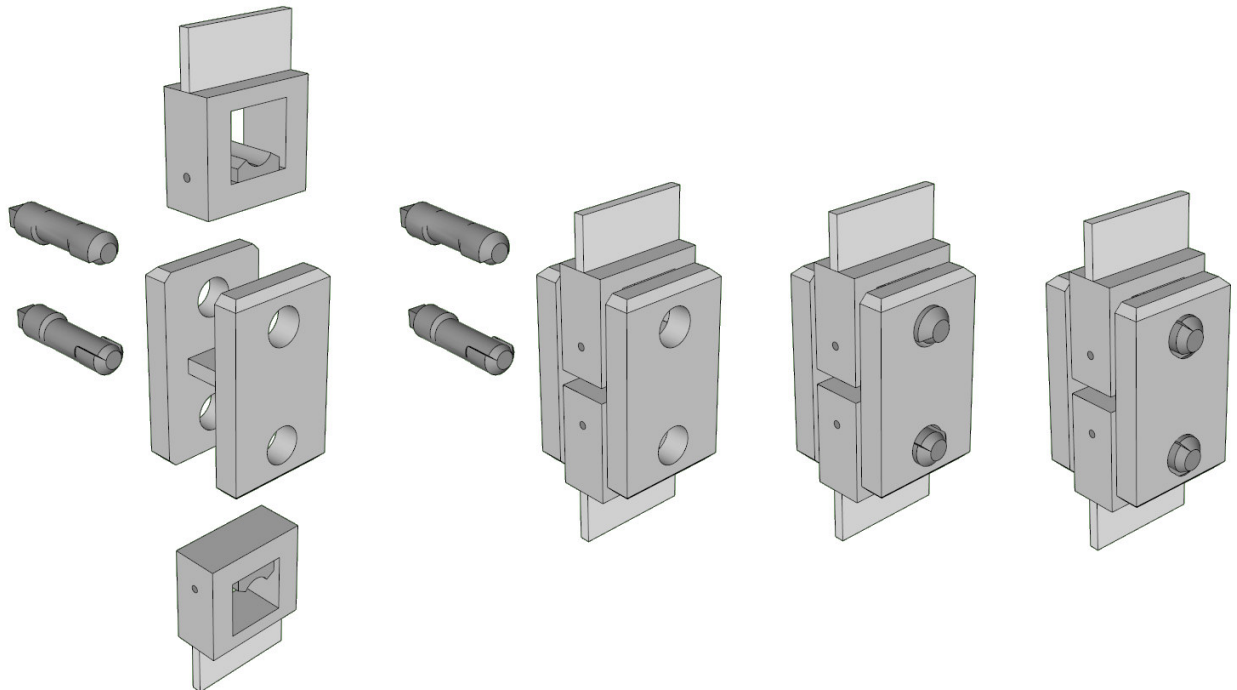
**Abbildung 3-7: Standard Verbindungsstück; in Axonometrie (links), Vorderansicht (Mitte links), Seitenansicht (Mitte rechts), auf Verbindungsstück aufgesetzt (rechts)**

Der Bolzen ist in einer speziellen, durch verschiedene Durchmesser gekennzeichneten, Geometrie ausgeführt und ermöglicht neben der Kraftübertragung zwischen den beiden Verbindungselementen auch die Fixierung der Verbindung. An der Spitze ist der Bolzen angefaßt, um ein leichteres Einfädeln zu ermöglichen. Die beiden äußeren Bereiche des Bolzens sind im gleichen Durchmesser wie die Löcher im Verbindungsstück ausgeführt. Ein Teil des Bereichs nach an der Spitze weist den gleichen Durchmesser wie der Mittelteil des Bolzens auf, um diesen auch problemlos durch das Anschlussstück führen zu können. Der Mittelteil des Bolzens ist im selben Durchmesser wie das Bolzenlager ausgeführt, um hier einen direkten Kontakt und somit eine möglichst gute Kraftübertragung zu ermöglichen. Die Achse des Mittelteils ist dabei geringfügig zur Achse des restlichen Bolzens verschoben, um so eine Exzentrizität zu erzeugen, welche verwendet wird, um die Verbindung im Zuge der Montage durch eine Drehbewegung zu fixieren (Abbildung 3-8).



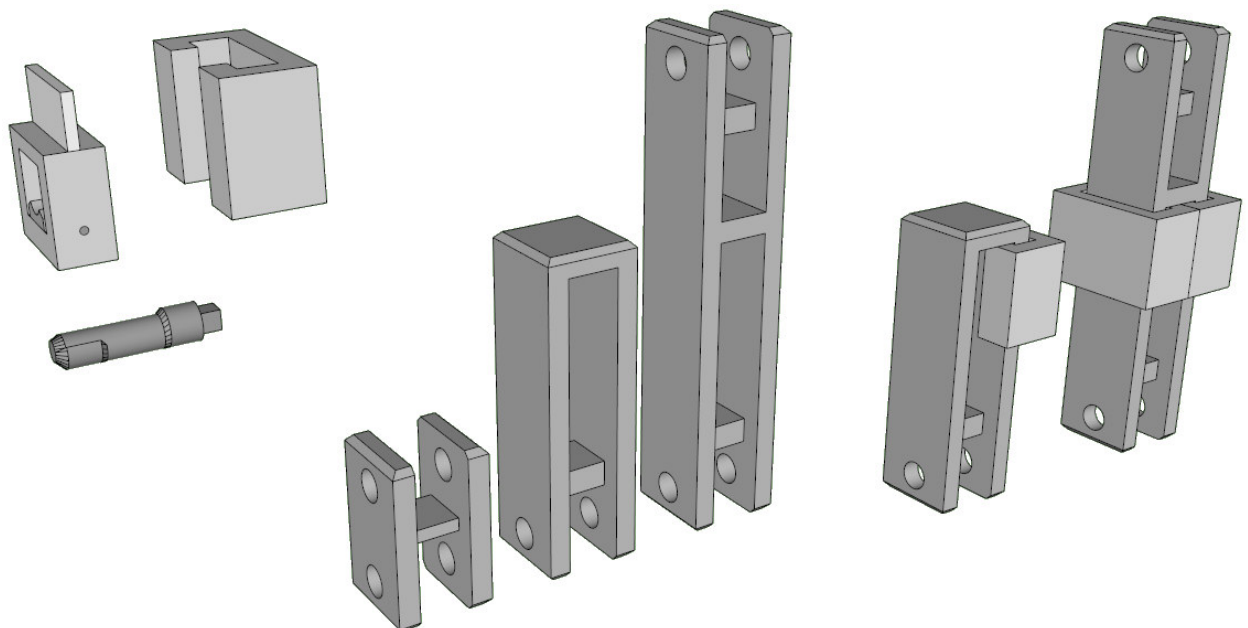
**Abbildung 3-8: Bolzen; Axonometrie um je 180° zueinander verdreht (links), Ansicht von der Seite, von vorne und von hinten (Mitte links), Bolzen im Anschlussstück in Einschubstellung (Mitte rechts), Bolzen im Anschlussstück in verdrehter Stellung (rechts)**

Die Montage der Verbindung erfolgt mit wenigen Handgriffen (Abbildung 3-9). Zuerst wird das Verbindungsstück in das untere Anschlussstück, welches sich am ersten Bauteil befindet, gesteckt und durch das Einbringen und Verdrehen des ersten Bolzens fixiert. Dann wird der zweite Bauteil so aufgesetzt, dass sich dessen Anschlussstück in das Verbindungsstück absenkt. Dabei können Ungenauigkeiten von wenigen Millimetern problemlos aufgenommen werden. Nun wird der zweite Bolzen eingeschoben und so weit verdreht, bis die Verbindung fixiert ist, was eine Kraftübertragung ohne Anfangsschlupf ermöglicht. Soll die Verbindung demontiert werden, werden die Bolzen einfach zurückgedreht, wodurch sich die Verbindung lockert und die Bolzen ohne großen Kraftaufwand entfernt werden können. Danach kann die Verbindung wieder auseinandergezogen und an einem anderen Ort erneut eingesetzt werden.



**Abbildung 3-9:** Montageablauf; *Verbindungsteile als Explosionszeichnung (links), Anschlusssteile und Verbindungsstück zusammengesetzt (Mitte links), Bolzen eingesetzt (Mitte rechts), Bolzen verdreht, Verbindung fixiert (rechts)*

Die Detailpunkte basieren immer auf dem gleichen Anschlusselement und greifen auf eine geringe Zahl verschiedener Verbindungselemente zurück, um eine große Zahl verschiedener Verbindungskonfigurationen zu bilden (Abbildung 3-10). Die Anschlussstücke sind in zwei Formen vorhanden, wobei die erste Variante bei Wandscheiben und die zweite bei Deckenplatten zum Einsatz kommt (Abbildung 3-10, links). Das Verbindungsstück gibt es in drei Varianten, welche je nach Verbindungskonfiguration zum Einsatz kommen (Abbildung 3-10, Mitte). Um Verbindungen zwischen Wand und Deckenelementen herzustellen, werden die entsprechenden Verbindungsstücke jeweils von oben durch die dazugehörigen Anschlussstücke geschoben (Abbildung 3-10, rechts).

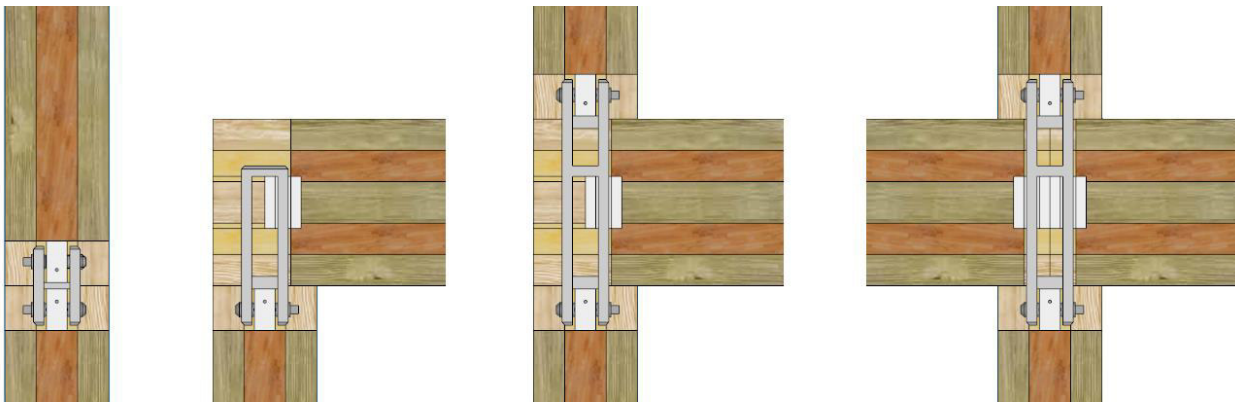


**Abbildung 3-10:** *Verbindungsbestandteile; Anschlussstücke und Bolzen (links), unterschiedliche Verbindungsstücke (Mitte), Verbindungsstücke mit Platten-Anschlusssteil (rechts)*



Den einfachsten Fall stellt der gerade Wandstoß dar (Abbildung 3-11, links). Bei diesem befinden sich an beiden Wandscheiben Anschlusssteile, in welche das Verbindungsstück gesteckt und dann mit Bolzen fixiert wird. Beim Wand-Deckenstoß kommen ein eigenes, in die Deckenplatte eingelassenes Anschlussstück und die erste Abwandlung des Verbindungsstücks zum Einsatz (Abbildung 3-11, Mitte links). Das Verbindungsstück wird dabei von oben durch das Anschlussstück der Deckenplatte in das Anschlussstück der Wandscheibe geschoben und dann dort fixiert. Beim Wand-Deckenstoß mit durchlaufender Wand werden die gleichen Anschlussstücke wie vorhin und die zweite Abwandlung des Verbindungsstücks verwendet (Abbildung 3-11, Mitte rechts). Dabei wird nach Versetzen der Deckenplatte das Verbindungsstück durch deren Anschlussstück geschoben und in das Anschlussstück der Wandscheibe gesteckt. Dann wird die obere Wandscheibe aufgesetzt und die Verbindung mit Bolzen fixiert. Der Wand-Decken-Kreuzstoß wird analog zum einseitigen Deckenstoß aufgebaut (Abbildung 3-11, rechts). Die Deckenplatten werden jeweils auf der Hälfte der darunterliegenden Wand aufgelegt, wobei deren Anschlusssteile genau gegenüber liegen. Dann wird das Verbindungsstück durch beide Anschlusssteile der Deckenplatten geschoben und in das Anschlussstück der Wand gesteckt. Danach folgen das Aufsetzen der oberen Wand und die Fixierung der Verbindung durch Bolzen.

Die Anschlusssteile in den Wandscheiben und Deckenplatten werden dabei immer gleich ausgebildet, während das Verbindungsstück je nach Deckenstärke immer unterschiedlich lang ist.



**Abbildung 3-11: Verbindungsdetails; einfacher Wandstoß (links), Wand-Decken-Stoß (Mitte links), Wand-Deckenstoß mit durchlaufender Wand (Mitte rechts), Wand-Decken-Kreuzstoß (rechts)**

Die Verbindung beruht auf einer Bolzenverbindung aus dem Stahlbau und kommt so mit einer relativ einfachen und leicht zu fertigenden Geometrie aus. Diese ermöglicht eine direkte Kraftübertragung ohne Umwege und somit eine hohe Materialausnutzung. Des Weiteren sind zur Herstellung verschiedenster Verbindungskonfigurationen nur wenige verschiedene Bauteile nötig. Die Montage erfolgt mit wenigen Handgriffen und damit deutlich schneller als bei Schraubverbindungen gleicher Kraftübertragungskapazität, während die Verbindung gleichzeitig Bauteilungenauigkeiten von wenigen Millimetern aufnehmen kann. Die Demontierbarkeit der Verbindung ist gegeben und jederzeit mit Hilfe des Versatzwerkzeugs möglich.

Als Nachteil kann angeführt werden, dass bei der Verbindung von Deckenplatten diese mit den in Abbildung 3-11 dargestellten Verbindungselementen nicht extra fixiert werden können, was den Deckenplatten eventuell eine geringe Bewegungsfreiheit in horizontale Richtung erlaubt. Des Weiteren ist unklar, ob die hier beschriebene Verbindung eine nennenswerte Schubübertragung ermöglicht oder dafür weitere, anders ausgeführte Verbindungselemente angebracht werden müssen.

---

## 3-3 VARIANTEN-AUSWAHL

---

Die Auswahl der letztendlich näher betrachteten Variante erfolgt nach den Gesichtspunkten, welche bereits unter den Anforderungen an die Verbindung (Anforderungen an ein modulares Verbindungssystem) festgelegt wurden.

Kurz zusammengefasst sind dies neben Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität noch Dauerhaftigkeit, schnelle Montier- und Demontierbarkeit, beliebige Kombinierbarkeit der Verbindungsbestandteile, Toleranzaufnahmefähigkeit und Einfachheit.

Die Dauerhaftigkeit kann bei ausreichendem Witterungsschutz bei allen Verbindungsvarianten angenommen werden. Eine im Vergleich zu konventionellen Schraubverbindungen schnelle Montier- und Demontierbarkeit ist bei allen drei Verbindungsvarianten gegeben, wobei hier Variante 1 aufgrund der verwendeten Stahlschrauben die meiste Montagezeit benötigt. Variante 2 lässt sich deutlich schneller montieren, allerdings gibt es aufgrund des automatischen Einschnappmechanismus Probleme in der Demontage. Variante 3 erlaubt aufgrund dessen, dass nur zwei Bolzen gesetzt und verdreht werden müssen, eine mindestens genauso schnelle Montage, ohne jedoch Probleme in der Demontage zu bereiten.

Die Kombinierbarkeit der Elemente ist bei allen drei Varianten gegeben. Bei Variante 1 ist der Anschluss immer an der gleichen Stelle gleich ausgeführt, dafür gibt es eine größere Zahl von Verbindungsstücken, welche jedoch teilweise zu relativ langen Wegen der Kraftübertragung führen. Variante 2 kommt mit einem einzigen Verbindungsstück aus, dafür müssen die Anschlusssteile jeweils an Verschiedenen Stellen im Bauteil und teilweise in geringfügig verschiedener Ausführung angesetzt werden. Variante 3 verwendet zwei Arten von Anschlusssteilen und mehrere verschiedene Verbindungsstücke, mit welchen sämtliche Konfigurationen abgedeckt werden können.

Die Aufnahme von Toleranzen ist bei allen Verbindungen möglich und spielt sich etwa in der gleichen Größenordnung ab. Die Einfachheit der Verbindung in Bezug auf die Komplexität der Bestandteile reicht von einfach für Variante 1 über etwas weniger einfach für Variante 3 bis hin zu relativ kompliziert für Variante 2.

Aus diesem Vergleich sowie einer ausführlichen Beratschlagung fällt die Wahl zur Weiterführung der Entwicklung des Verbindungssystems auf die Variante 3 (exzenterfixierter Verbinder). Diese wird nun in einem ersten Schritt händisch und dann mit einem RFEM-Modell berechnet und optimiert, bevor für die dann genau bekannten Verbindungsabmessungen Regeldetails entwickelt werden.

## 3-4 DIMENSIONIERUNG HANDRECHNUNG

---

Als erstes wird eine ungefähre Dimensionierung der Gesamtverbindung und ihrer Bestandteile vorgenommen. Dazu wird eine zu übertragende charakteristische Kraft von 100 kN angesetzt, welche von jedem Teil der Verbindung weitergeleitet werden muss. Als Material der Verbindungsteile wird Baustahl der Festigkeitsklasse S355 angenommen. Für die Schubtragfähigkeit des Klebstoffes in der in den Holzbauteilen eingeklebten Blechverbindung wird ein Mittelwert von 1,9 N/mm<sup>2</sup> angenommen (gemäß [45]). Für die Dimensionierung wird die Verbindung in eine Kette von Querschnitten, Biegeträgern und Lochlaibungen aufgespalten und Stück für Stück berechnet, wobei alle Spannungsnachweise in jedem Querschnitt erfüllt werden müssen.

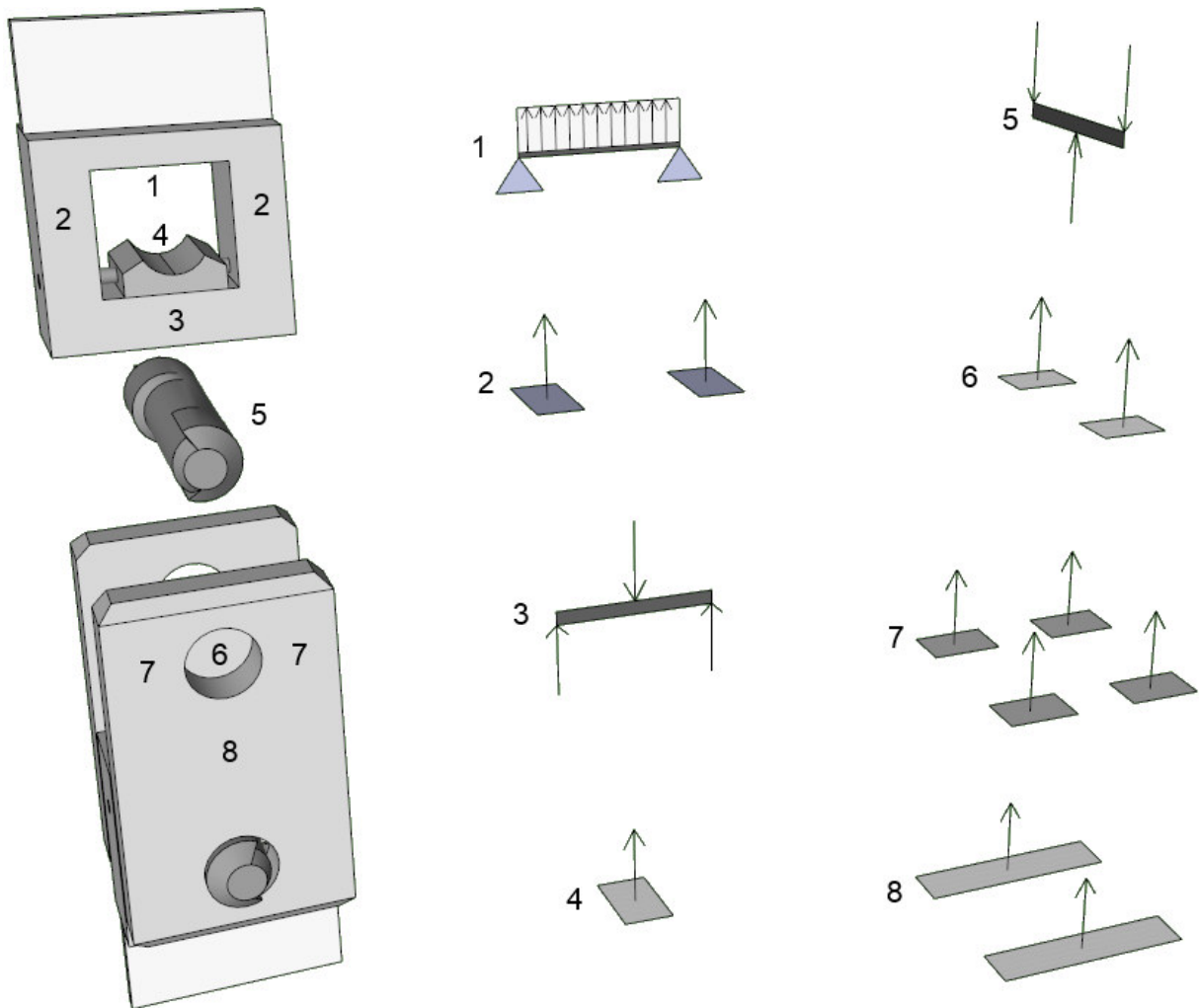
Der Kraftfluss erfolgt dabei durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Querschnitten (Abbildung 3-12), wobei einige davon maßgebend sind. Beginnend im Bauteil wird die Kraft zuerst vom Holz auf das eingeklebte Stahlblech übertragen. Von diesem erfolgt dann eine Kraftübertragung in den Anschlussteil des Verbinders. Da dieses in der Mitte ein Loch aufweist, und angenommen werden kann, dass die Kraft aus dem eingeklebten Stahlblech gleichmäßig über dessen Anschlusslänge verteilt ist, ergibt der obere Bereich des Anschlussteils somit einen Biegeträger mit Gleichlast (Abbildung 3-12, Nr. 1). Dieser kann als Extremwertbetrachtung entweder als Einfeldträger oder als eingespannter Träger gerechnet werden. In der Praxis wird das Ergebnis irgendwo zwischen diesen beiden Fällen liegen.

Ist die Kraft auf die Seite übertragen, wird sie nun vom dortigen Querschnitt, welcher sich in zwei gleich große Teile aufspaltet, weitergeleitet (Abbildung 3-12, Nr. 2). Hier kann von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung ausgegangen werden, weshalb lediglich ein Querschnittsnachweis unter konstanter Spannung geführt werden muss.

Als nächstes wird die Kraft von den beiden Querschnittsteilen wieder zurück in die Mitte geleitet. Hier ergibt sich ein Biegeträger mit einer Einzellast, bzw. unter Berücksichtigung der Lastausbreitung, einer teilweisen Streckenlast in der Mitte (Abbildung 3-12, Nr. 3). Von der Mitte dieses Biegeträgers aus wird die Kraft dann über Flächenpressung auf den Bolzen übertragen (Abbildung 3-12, Nr. 4). Hier ist für eine ausreichende Fläche zu sorgen.

Der Bolzen selbst wirkt in erster Linie als Biegeträger mit einer mittigen Auflast (Abbildung 3-12, Nr. 5). Das Abscheren wird aufgrund der „großen“ Exzentrizität der Lasteinleitung dabei nicht maßgebend. An den beiden Enden des Bolzens wird die Kraft dann über Lochleibung auf das Verbindungsstück übertragen (Abbildung 3-12, Nr. 6). Hier ist besonders auf die Form des Bolzens zu achten, welcher auf einer Seite kein vollständiges Aufliegen auf der Wandung des Loches erlaubt.

Im Anschlussteil wird die Kraft dann über den dortigen Stahlquerschnitt weitergeleitet. Dieser weist auf Höhe der Bohrung für den Bolzen die größte Schwächung auf, weshalb hier ein Spannungsnachweis auf Basis einer konstanten Spannungsverteilung zu führen ist (Abbildung 3-12, Nr. 7). Danach wird die Spannung über den vollständigen Stahlquerschnitt weitergeleitet (Abbildung 3-12, Nr. 8). Auf der anderen Seite des Verbinders erfolgt der gleiche Kraftverlauf noch einmal in umgekehrter Richtung.



**Abbildung 3-12: Kraftfluss im Systemverbinder, Stellen, an denen die maßgebenden Schnittgrößen auftreten**

An diesen Querschnitten werden nun Nachweise geführt, mit welchen deren minimale Dimensionen ermittelt werden. Auf Basis dieser kann dann ein genauer Plan des Verbinders erstellt werden, welcher in der Finite-Elemente-Berechnung eingesetzt und optimiert wird. Die Dimensionierung erfolgt unter dem Einsatz von Baustahl S355 mit einer Fließgrenze von  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$  (bzw.  $f_y = 355 \text{ MN/m}^2$ ) unter einer Einwirkung auf den Verbinder von  $100 \text{ kN}$  (bzw.  $0,1 \text{ MN}$ ). Für die Verklebung mit dem Bauteil ist bei Verwendung von Klebstoff mit einer mittleren Schubtragfähigkeit von  $1,9 \text{ N/mm}^2$  bei einem Sicherheitsbeiwert  $\gamma$  von  $1,5$  eine Klebefläche von  $787 \text{ cm}^2$  nötig, was bei beidseitiger Verklebung einer Blechgröße von  $394 \text{ cm}^2$  entspricht.

Die folgenden Nachweise werden immer in den Einheiten Meganewton (MN) und Meter (m) sowie den sich daraus abzuleitenden Einheiten (MNm, MN/m<sup>2</sup>) geführt.

### 3-4.1 QUERSCHNITT 1

Querschnitt 1 stellt sich wie in Abbildung 3-13 skizziert dar.

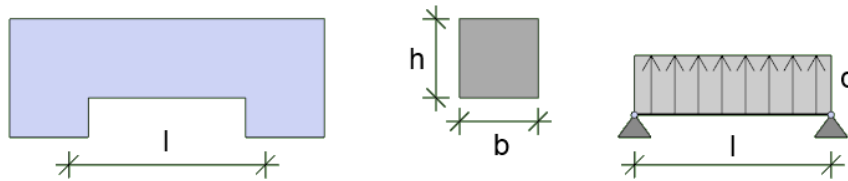


Abbildung 3-13: Lage von Querschnitt 1 im Bauteil als Ansicht (links), wirksamer Biegeträger-Querschnitt (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Auf das obere Ende des Anschlusssteils wirkt eine Gleichlast von  $q = 1,250 \text{ MN/m}$  (100 kN auf die Verbinderbreite von 8 cm aufgeteilt) aus der Verklebung mit dem Bauteil, welche sich über die gesamte Breite des Verbinders erstreckt. Mit der vorhandenen freien Spannweite von 4 cm über das Loch des Verbinders inklusive einer Auflagerbreite von 0,5 cm auf beiden Seiten ergibt sich eine Spannweite des „Trägers“ von  $l = 5 \text{ cm}$ . Das im „Träger“ wirkende Biegemoment  $M$  berechnet sich wie folgt:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{1,25 \cdot 0,05^2}{8} = 0,00039 \text{ MNm} \quad (3.1)$$

Das Widerstandsmoment  $W$ , welches der „Träger“ mit der Höhe  $h = 2 \text{ cm}$  und der Breite  $b = 2 \text{ cm}$  aufnehmen kann, ergibt sich zu:

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,02 \cdot 0,02^2}{6} = 0,00000133 \text{ m}^4 \quad (3.2)$$

Die maximale Spannung  $\sigma$ , welche zufolge des Biegemoments  $M$  im „Träger“ auftritt, ergibt sich zu:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0,00039}{0,00000133} = 293 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.3)$$

Somit ist der Biegenachweis bei einer „Trägerhöhe“ von 2 cm im oberen Bereich des Anschlusssteils erfüllt.

### 3-4.2 QUERSCHNITT 2

Querschnitt 2 stellt sich wie in Abbildung 3-14 skizziert dar.

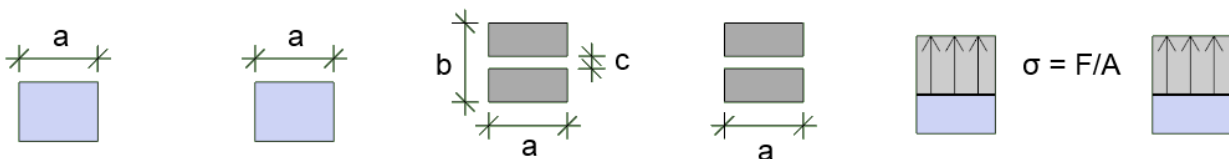


Abbildung 3-14: Querschnitt 2 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Normalkraft-Übertragung (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

In der vertikalen Verbindung von oberem und unterem Riegel des Anschlusssteils wirkt die Zugbelastung  $F = 100 \text{ kN}$ , aufgeteilt auf zwei gleich große Querschnitte mit den Abmessungen  $a = 2 \text{ cm}$  und  $b = 2 \text{ cm}$  als Normalspannung über die gesamte Querschnittsfläche. Zu beachten ist hier, dass im unteren Bereich des Anschlusssteils durch die Festhaltung des Bolzenlagers ein Querschnittsverlust auftritt, welcher die Breite der vorhandenen Fläche um  $c = 0,32 \text{ cm}$  verringert. Die hier wirkende Normalspannung  $\sigma$  ergibt sich zu:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{2 \cdot (a \cdot (b - c))} = \frac{0,1}{2 \cdot (0,02 \cdot (0,02 - 0,0032))} = 148,8 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.4)$$

Der vorhandene Nettoquerschnitt ist somit ausreichend.

### 3-4.3 QUERSCHNITT 3

Querschnitt 3 stellt sich wie in Abbildung 3-15 skizziert dar.

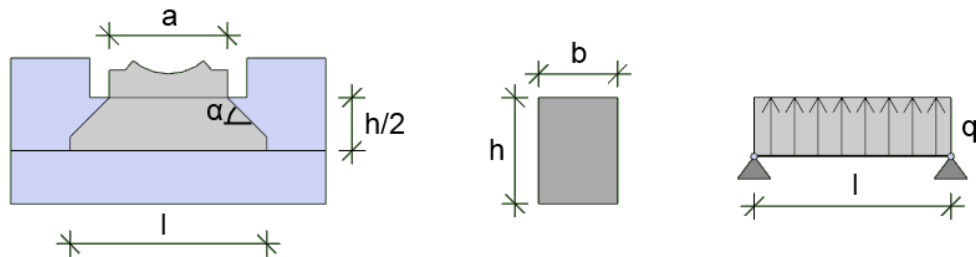


Abbildung 3-15: Querschnitt 3 in Ansicht mit Lastausbreitungsbereich (links), wirksamer Querschnitt zur Biegemoment-Aufnahme (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Im Bereich des unteren Riegels wirkt das System wie ein Biegeträger mit der Länge  $l = 5$  cm, welche sich aus der freien Länge des „Trägers“ von 4 cm und einer Auflagerbreite von jeweils 0,5 cm zusammensetzt. Die Belastung von 100 kN greift streng konservativ gerechnet genau in der Mitte des Trägers als Einzellast an. Berücksichtigt man jedoch die Auflagerbreite von  $a = 3$  cm und einen Lastausbreitungswinkel von  $\alpha = 45^\circ$ , so ergibt sich bei einer Trägerhöhe von  $h = 2,7$  cm die Lasteinleitungslänge  $l_q$  folgendermaßen:

$$l_q = a + 2 * \frac{h}{2} * \tan(\alpha) = 0,03 + 2 * \frac{0,027}{2} * \tan(45) = 0,0527 \text{ m} > l = 0,05 \text{ m} \quad (3.5)$$

Da die Lastausbreitungslänge  $l_q$  größer als die Länge  $l$  des Trägers ist, wird die Lastausbreitung auf die Trägerlänge begrenzt und es gilt  $l_q = l = 0,05$  cm. Die am „Träger“ wirkende Gleichlast ergibt sich somit zu  $q = 2,0$  MN/m (100 kN aufgeteilt auf die Trägerlänge von 5 cm). Das am „Träger“ wirkende Biegemoment beträgt somit:

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{2,0 * 0,05^2}{8} = 0,000625 \text{ MNm} \quad (3.6)$$

Das Widerstandsmoment  $W$  des „Trägers“ mit einer Breite von  $b = 2$  cm und einer Höhe von  $h = 2,7$  cm ergibt sich zu:

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,02 * 0,027^2}{6} = 0,00000243 \text{ m}^4 \quad (3.7)$$

Die maximale Spannung  $\sigma$ , welche zufolge des Biegemoments  $M$  im „Träger“ auftritt, ergibt sich zu:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0,000625}{0,00000243} = 257 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.8)$$

Somit ist der Biegenachweis bei einer „Trägerhöhe“ von 2,7 cm im unteren Bereich des Anschlussteils erfüllt.

### 3-4.4 QUERSCHNITT 4

Querschnitt 4 stellt sich wie in Abbildung 3-16 skizziert dar.

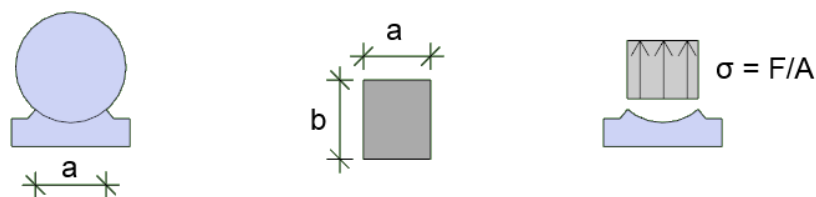


Abbildung 3-16: Querschnitt 4 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt der Kontaktfläche (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Vom unteren Riegel ausgehend erfolgt die Kraftübertragung vom Bolzenlager auf den Bolzen über Lochleibung bzw. Flächenpressung. Über die dort vorhandene Fläche mit den Abmessungen  $a = 1,7$  cm

und  $b = 2,0 \text{ cm}$  muss somit die angreifende Kraft von  $F = 100 \text{ kN}$  übertragen werden. Dies führt zu einer Spannung  $\sigma$  von:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{a \cdot b} = \frac{0,1}{0,017 \cdot 0,02} = 294 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.9)$$

Die Kontaktfläche  $A$  ist somit ausreichend groß dimensioniert.

### 3-4.5 QUERSCHNITT 5

Querschnitt 5 stellt sich wie in Abbildung 3-17 skizziert dar.

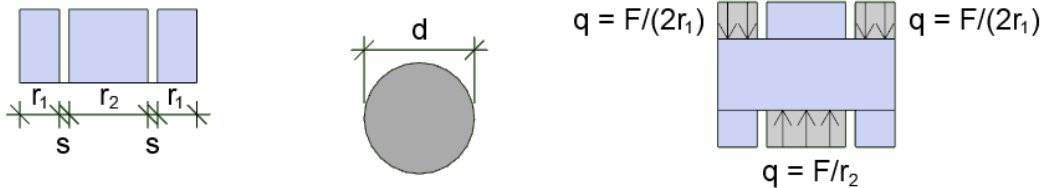


Abbildung 3-17: Querschnitt 5 mit Auflagerlängen in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Abtragung des Biegemoments (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Der Bolzen, welcher Anschlussstück und Verbindungsstück miteinander verbindet, wirkt wie ein Einfeldträger, welcher an beiden Enden auf einer Länge von  $r_1 = 1 \text{ cm}$  gelagert ist und in der Mitte über einer Länge von  $r_2 = 2 \text{ cm}$  gehalten wird. Zwischen diesen Lagern bleibt aufgrund des Toleranzausgleichs des Verbinders auf beiden Seiten ein Abstand von  $s = 0,25 \text{ cm}$ . Die Angreifende Kraft von  $F = 100 \text{ kN}$  wird vom Mittelaufleger, wo diese als Linienlast angreift, in die beiden Endaufleger übertragen und verursacht folgendes Biegemoment  $M$  im Bolzen:

$$M = \frac{F}{8} * (2r_1 + r_2 + 4s) = \frac{0,1}{8} * (2 * 0,01 + 0,02 + 4 * 0,0025) = 0,000625 \text{ MNm} \quad (3.10)$$

Der Bolzen verfügt im Randbereich über einen Durchmesser von  $d_a = 3,0 \text{ cm}$ . Der mittlere und aufgrund des kleineren Durchmessers von  $d = 2,8 \text{ cm}$  maßgebende Teil des Bolzen hat ein Widerstandsmoment  $W$  von:

$$W = \frac{\pi}{32} * d^3 = \frac{\pi}{32} * 0,028^3 = 0,000002155 \text{ m}^4 \quad (3.11)$$

Die maximale Spannung  $\sigma$ , welche zufolge des Biegemoments  $M$  im Bolzen auftritt, ergibt sich zu:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{0,000625}{0,000002155} = 290 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.12)$$

Somit ist der Biegenachweis bei einem Bolzendurchmesser von  $3,0 \text{ cm}$  im Randbereich (bzw.  $2,8 \text{ cm}$  im mittleren Bereich) erfüllt.

### 3-4.6 QUERSCHNITT 6

Querschnitt 6 stellt sich wie in Abbildung 3-18 skizziert dar.

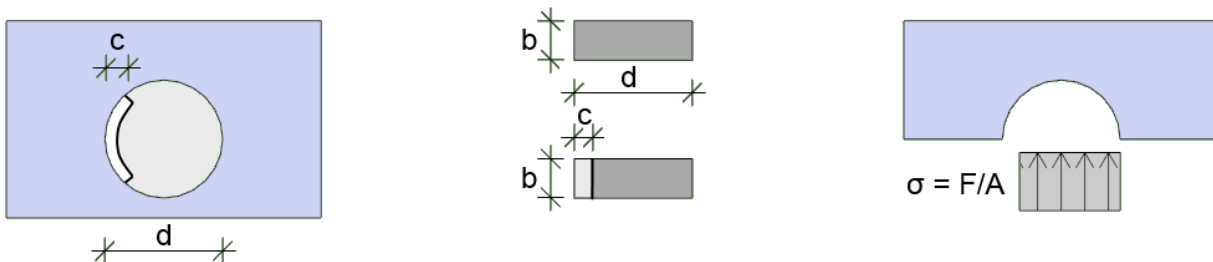


Abbildung 3-18: Querschnitt 6 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt der Kontaktfläche (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Zwischen Bolzen und Anschlusssteil erfolgt die Kraftübertragung über Lochleibung bzw. Flächenpressung vom Bolzen auf das Verbindungsstück. Je die Hälfte der Kraft von 100 kN wird dabei auf einer Seite des Bolzens übertragen. Der Durchmesser des Bolzens an dieser Stelle beträgt  $d = 3$  cm, die Blechbreite, über welche der Kontakt erfolgt, beträgt  $b = 1$  cm. Zu beachten ist hier, dass eine Seite des Bolzens eine Ausnehmung aufweist und somit nicht an allen Seiten an der Wandung des Lochs anliegt. Dies reduziert den Auflager-Durchmesser auf der maßgebenden Seite um etwa  $c = 0,6$  cm. Auf dieser Seite, an welcher die Hälfte der Kraft ( $F/2 = 50$  kN) auftritt, ergibt sich somit eine Kontaktspannung  $\sigma$  von:

$$\sigma = \frac{F/2}{A} = \frac{F/2}{b \cdot (d-c)} = \frac{0,1/2}{0,01 \cdot (0,03 - 0,006)} = 208 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.13)$$

Die vorhandene Kontaktfläche zwischen Bolzen und Verbindungsstück ist somit ausreichend groß.

### 3-4.7 QUERSCHNITT 7

Querschnitt 7 stellt sich wie in Abbildung 3-19 skizziert dar.

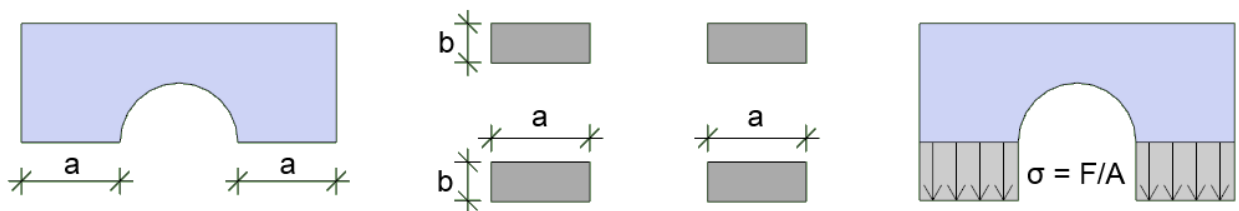


Abbildung 3-19: Querschnitt 7 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Normalkraftübertragung (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Nach der Übertragung ins Verbindungsstück wird die Belastung von  $F = 100$  kN jeweils an beiden Seiten des Bolzenlochs vorbeigeleitet. Die hier vorhandenen vier identischen Querschnittsteile haben jeweils Abmessungen von  $a = 2,5$  cm und  $b = 1$  cm. Hier wird eine gleichmäßige Spannungsverteilung angenommen, welche in folgender Größe  $\sigma$  auftritt:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{4 \cdot a \cdot b} = \frac{0,1}{4 \cdot 0,025 \cdot 0,01} = 100 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.14)$$

Die vorhandene Nettofläche des Verbindungsstücks ist somit ausreichend.

### 3-4.8 QUERSCHNITT 8

Querschnitt 8 stellt sich wie in Abbildung 3-20 skizziert dar.

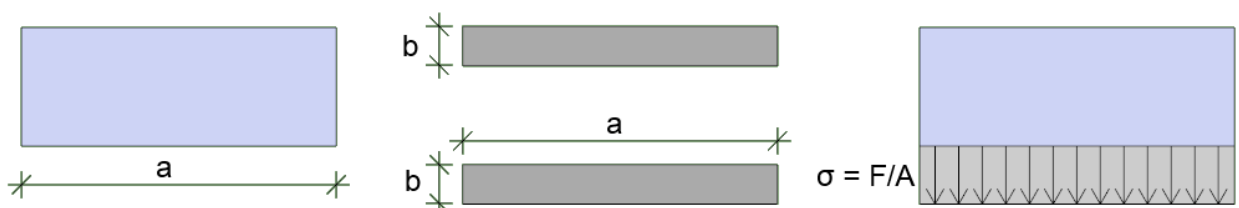


Abbildung 3-20: Querschnitt 8 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Normalkraftübertragung (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts)

Nach dem Nettoquerschnitt im Bereich des Bolzenlochs erfolgt die Weiterleitung der Kraft  $F = 100$  kN durch den Vollquerschnitt des Verbindungsstücks. Dieser weist an jeder Seite Abmessungen von  $a = 8$  cm und  $b = 1$  cm auf. Die vorhandene Spannung  $\sigma$  ergibt sich somit zu:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{2 \cdot a \cdot b} = \frac{0,1}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,01} = 62,5 \text{ MN/m}^2 < f_y = 355 \text{ MN/m}^2 \quad (3.15)$$

Die vorhandene Querschnittsfläche des Verbindungsstücks ist somit ausreichend.



### 3-4.9 ABMESSUNGEN AUS HANDRECHNUNG

Die in 3-4.1 bis 3-4.8 durchgeführte Berechnung gibt die Bauteilabmessungen, an denen die erste Berechnung durchgeführt wird, vor. Aus den Grundlagen der Stahlbau-Bemessung ergibt sich ein Mindest-Randabstand in der Größe des 1,2-fachen Dübel-Durchmessers zum Blechrand [28]. Bei einem Durchmesser von 3,0 cm sind dies 3,6 cm, was zu einer Gesamtlänge des Verbinders von 7,2 cm führt. Diese ist mit der angenommenen Verbinderbreite von 8,0 cm eingehalten, kann sich durch nachfolgende Optimierungsmaßnahmen jedoch noch deutlich verändern. Eine Übersicht über die wesentlichen Abmessungen des Verbinders für den Beginn der FE-Berechnung finden sich in Abbildung 3-21.

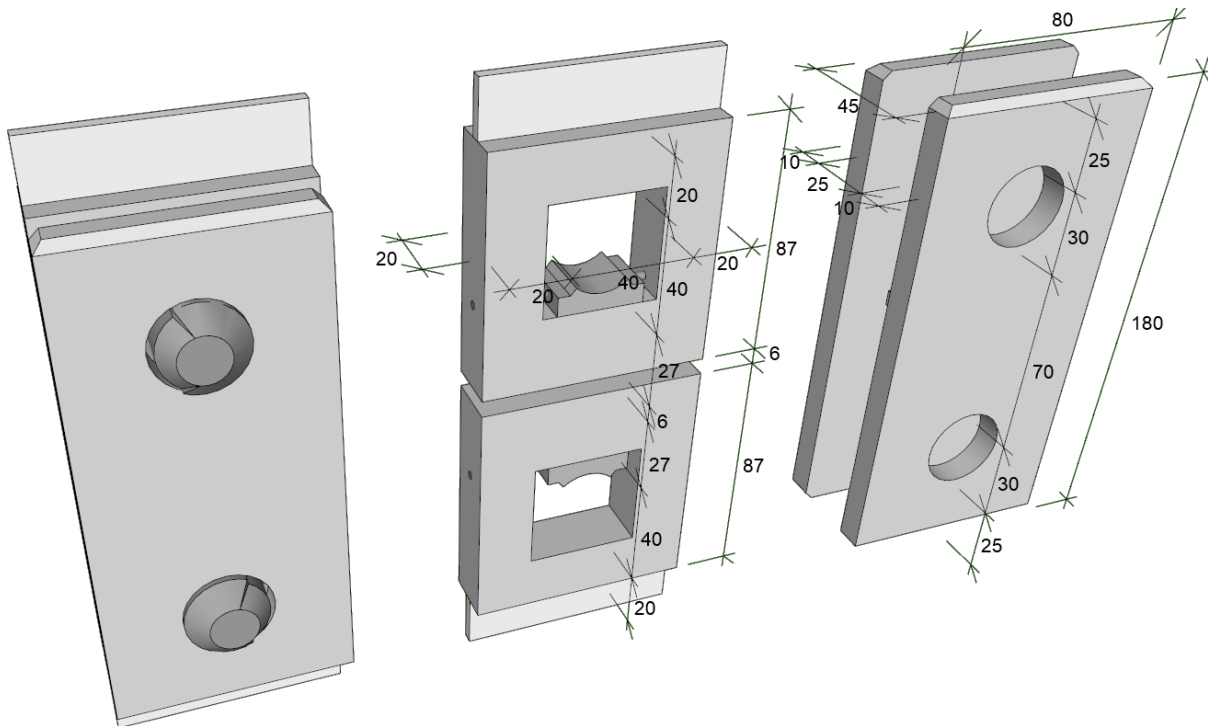


Abbildung 3-21: Verbinder-Geometrie für den Beginn der FE-Berechnungen, Maße in mm

Die Gesamtabmessungen des Verbindungselements inklusive der Anschlusssteile ergeben somit 8,0 x 4,5 x 18,0 cm, womit der Verbinder immer noch bei allen gebräuchlichen Wandstärken einsetzbar bleibt. Für die Anschlusssteile ergibt dies ein Gewicht von je ca. 870 g, für die Bolzen je ca. 270g und für das Verbindungsstück ca. 2050 g. Das Gesamtgewicht der Verbindung beträgt somit ca. 4,3 kg.

## 3-5 FINITE ELEMENTE BERECHNUNG

---

Nachdem der Verbinder mit Hilfe einer vereinfachten Handrechnung grob vordimensioniert wurde, wird nun eine genaue Berechnung am Computermodell durchgeführt. Zum Einsatz kommt dabei die Finite-Elemente-Software RFEM 5.12.02. Aufgrund der geringen Abmessungen des Verbinders wird das Programm auf die Einheit Millimeter umgestellt.

Zur Berechnung wird ein 3D-Modell des Verbinders erstellt. Der Verbinder selbst wird wegen seiner gedrunenen Abmessungen als Volumsmodell eingegeben. Ab der zweiten Variante wird zur besseren Kraftverteilung zusätzlich noch ein Teil des Anschlussblechs hinzugefügt, welches als Fläche simuliert wird. Das FE-Netz wird auf Drei- und Vierecke mit Generierung gleicher Quadrate eingestellt. Um genauere Ergebnisse zu erhalten, werden in einzelnen Teilbereichen der Verbindung (Bolzen, Bolzenlager, Kontaktvolumen) Netzverdichtungen angebracht. Als Material wird Baustahl der Güte S355 verwendet, welcher als isotrop-linear-elastisches Material eingegeben wird. In diesem Kapitel (3-5) werden alle Berechnungen linear-elastisch, ohne Berücksichtigung von maximaler Tragfähigkeit und Fließverhalten des Materials, durchgeführt.

Ab der zweiten Variante kommen zur Erreichung eines realitätsnäheren Tragverhaltens Kontaktvolumen zum Einsatz. Diese nehmen die Stelle der zwischen den einzelnen Verbindungsbestandteilen vorhandenen Kontaktflächen ein und regeln die Kraftübertragung zwischen jeweils zwei gegenüberliegenden Flächen. Dabei werden die Kräfte direkt von der ersten zur zweiten Kontaktfläche weitergeleitet, ohne dass es innerhalb des Kontakts zu einer Lastverteilung kommt. Als Dicke werden, unter Berücksichtigung auf die Netzweite des FE-Netzes, jeweils 2 mm eingegeben. Das Kontaktvolumen wird auf Ausfall bei Zug sowie starre Reibung mit einem Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,2$  eingestellt. Damit nimmt das Kontaktvolumen das Verhalten zweier aneinander grenzender Stahlkörper an, welche Druck vollständig, Schub nur im Rahmen von Reibung und Zug gar nicht zu ihrem jeweiligen Nachbarn übertragen können.

Zur Ergebnisdarstellung wird die Vergleichsspannung nach „von Mises“ verwendet, da diese einen schnellen und einfachen Überblick über die Materialausnutzung im Verbinder ermöglicht. Eine separate Darstellung der einzelnen Normal- und Schubspannungen liefert zwar mehr Information über den genauen Kraftfluss im Bauteil, erschwert es jedoch, den Verlauf der Gesamtausnutzung über den Querschnitt zu erfassen, da die Ergebnisse der einzelnen Spannungsbilder dafür zuerst überlagert werden müssen. Zur Bauteiloptimierung ist die Vergleichsspannung ausreichend, da es letztendlich darum geht, niedrig beanspruchte Bereiche abzuschwächen und hoch beanspruchte Bereiche zu verstärken, um so eine möglichst hohe Ausnutzung möglichst großer Bereiche des Bauteils zu erreichen.

### 3-5.1 ERSTE VARIANTE MIT ABMESSUNGEN AUS HANDRECHNUNG

Diese Berechnung erfolgt an den Abmessungen, welche in der Handrechnung ermittelt wurden. Da die Verbindung symmetrisch ist, wird für den Anfang nur eine Hälfte simuliert (Abbildung 3-22). Zuerst werden die einzelnen Bestandteile gemäß den Abmessungen aus der Handrechnung eingegeben (Abbildung 3-22, links) und dann zu einer Verbindungskette zusammengefügt (Abbildung 3-22, rechts). Die Belastung wird dabei als Gleichlast, welche am oberen Rand des Anschlussteils angreift, angesetzt. Die 100 kN werden auf eine Länge von 8 cm aufgeteilt, was zu einer Linienlast von 1250 kN/m führt. Die Lagerung des Systems wird mit einem, entlang der Freischnittlinie angeordneten Symmetrielager realisiert. Als Elementgröße werden in der ersten Berechnung 5 mm angesetzt.

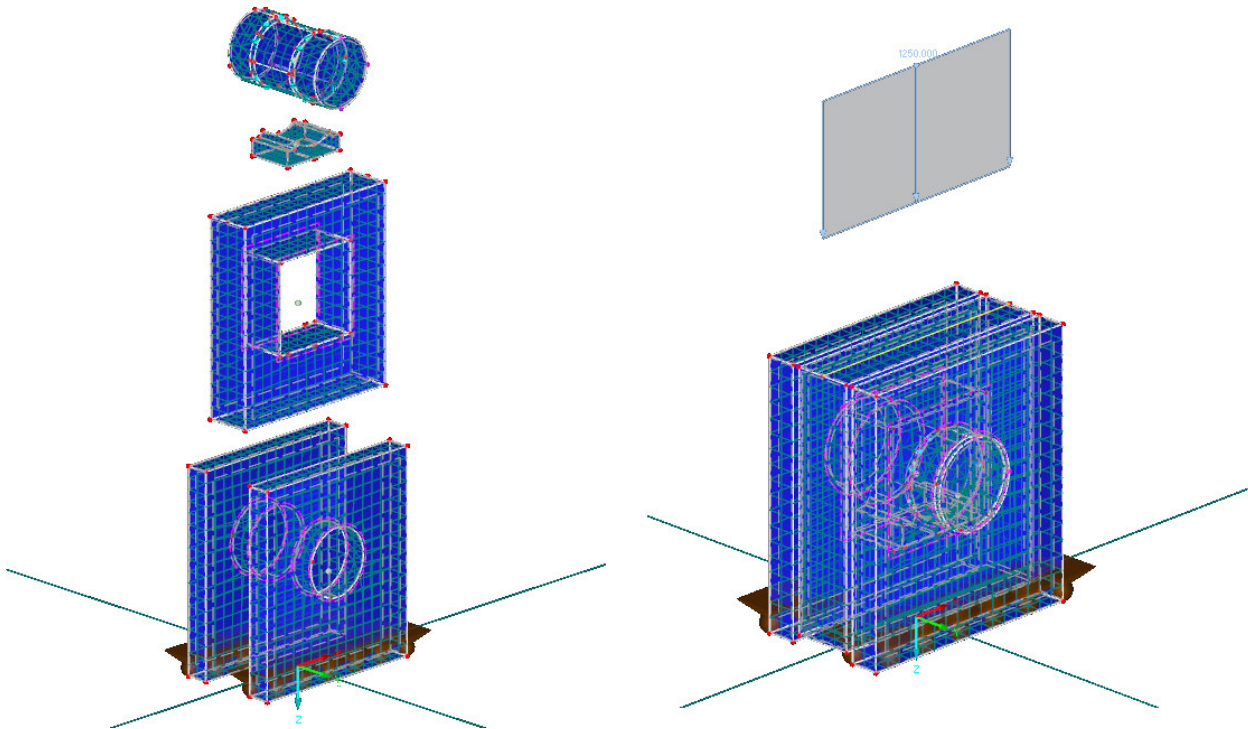
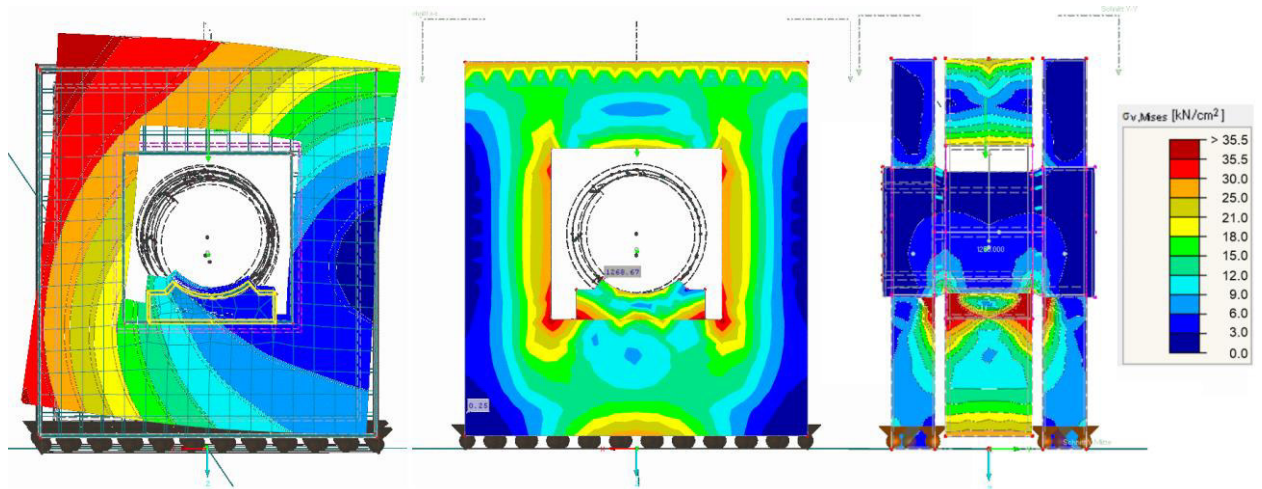


Abbildung 3-22: Erstes FE-Modell einer Hälfte der Verbindung, Bestandteile (links) und zusammengesetztes Modell (rechts)

In dieser ersten Berechnung zeigt sich, dass sich trotz der sehr gedungenen Geometrie Spannungszustände einstellen, welche weitgehend denen aus Biegeträgern und Zugstäben unter konstanter Linien- bzw. Flächenlast entsprechen (Abbildung 3-23, Mitte). Wie aus dieser Abbildung hervor geht, wird die maximal zulässige Vergleichsspannung von 355 N/mm<sup>2</sup> dabei nur an wenigen Stellen überschritten. Lediglich an einigen Kanten kommt es zu großen, diesen Nennwert überschreitenden, Spannungsspitzen. Der Spannungsverlauf im Verbindungsbolzen wird in dieser Berechnung stark von den Erwartungen abweichend ausgegeben. Da in diesem Modell keine Kontaktflächen realisiert sind, kommt es zu keinem Ausfall der unteren, äußeren Bolzenlager auf Zug, was wiederum zur Folge hat, dass die Kräfte direkt vom unteren mittleren in die unteren äußeren Bolzenlager weitergeleitet werden und der gesamte obere Teil des Bolzens kaum Belastung erfährt (Abbildung 3-23, rechts). Durch das Einfügen von Kontaktflächen für die weitere Berechnung lässt sich dieses Problem leicht beheben.

Die Verformungsfigur mit einer maximalen Verformung von 0,33 mm entspricht ebenfalls weitgehend den Erwartungen, aufgrund der exzentrischen Lagerung des Bolzen-Mittelteils tritt jedoch einseitig eine asymmetrische, schiefe Verformung auf (Abbildung 3-23, links). Diese exzentrische Lagerung ergibt sich dadurch, dass die beiden Verbindungskomponenten zwar in der gleichen Achse liegen, der Mittelteil des Verbindungsbolzens jedoch einen kleineren Durchmesser aufweist. Beim Einschieben des Bolzens liegt der Mittelpunkt des Mittelteils einen Millimeter über dem Mittelpunkt der Außenteile, wodurch die

Verbindung in diesem Zustand vollkommen symmetrisch ist. Durch das Verdrehen des Bolzens, welches die Verbindung fixiert, wandert dessen Mittelteil zur Seite, was dann diese Exzentrizität verursacht. Dadurch wiederum erfolgt die Kraftweiterleitung vom Anschlussteil in den Bolzen nicht mittig, was zu einem Verdrehen des Anschlussteils führt.



**Abbildung 3-23:** Verformungsfigur Anschlussteil (links) Spannungsverläufe in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Die Spannungsverteilung entspricht somit weitgehend den Erwartungen. Die höchsten Spannungen treten in den auf Biegung beanspruchten Teilen auf, während die Spannungen in den vorwiegend zugbeanspruchten Teilen vergleichsweise gering sind – hier besteht durchaus noch die Möglichkeit, Material einzusparen und die Verbindung kleiner und kompakter zu machen. Die Schiefstellung, die sich durch die Exzentrizität ergibt, kann sich im realen Bauteil zwar durch die Behinderung der horizontalen Verformung aufgrund der dortigen Lagerungsbedingungen nicht ausbilden. Für weitere Berechnungen wird sie dennoch durch entsprechende Adaption des Versuchsaufbaus ausgeschaltet. Es sollte jedoch bedacht werden, dass durch Ausnutzung des Toleranzausgleichs der Verbindung durchaus solche und größere Exzentrizitäten auftreten können, welche dann ebenfalls vom Verbinder aufgenommen werden müssen.

### 3-5.2 ZWEITE VARIANTE MIT ADAPTIERTEM MODELL UND VERÄNDERTER GEOMETRIE

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus den Ergebnissen der ersten Berechnung wird nun das Modell für die zweite Berechnung erstellt. Dieses sollte eine bessere Übereinstimmung mit der Realität aufweisen und zudem einen ersten Optimierungsansatz hinsichtlich einer besseren Materialausnutzung beinhalten.

Als erstes werden dafür die Achsen der beiden Verbindungsteile um einen Millimeter zueinander verschoben (Abbildung 3-24, rechts). Das macht eine einzelne Verbindungshälfte zwar asymmetrisch, die beiden Anschlusssteile der vollständigen Verbindung liegen jedoch immer noch genau übereinander und lediglich das Verbindungsstück ist leicht abgerückt. Diese Konfiguration erlaubt es, die zu übertragende Kraft mittig vom Anschlusssteil in den Bolzen zu bringen, und von diesem dann weiter in die Außenteile zu leiten. Diese weisen zwar eine geringe Exzentrizität auf, die Auswirkungen dieser sind jedoch deutlich geringer als bei einer exzentrischen Krafteinleitung in das Anschlusssteil.

Um die Kontaktkräfte zwischen dem Bolzen und den Verbindungsteilen realistisch simulieren zu können, werden zwischen dem Bolzen und den angrenzenden Bauteilen (Bolzenlager in der Mitte und Verbindungsstück an beiden Enden des Bolzens) Kontaktvolumen eingefügt, welche im ersten Absatz von 3-5 genauer beschrieben sind.

Um die Krafteinleitung in das Anschlusssteil realistischer zu simulieren, wird an dieses noch ein 7 cm langer Streifen des Lochblechs mit einer Stärke von 6 mm angebracht, an dessen Ende die Kraft angreift (Abbildung 3-24, links). Dadurch wird die Lastverteilungswirkung des Anschlussblechs besser berücksichtigt. Die Flächenlagerung in der Mitte des Verbindungsteils bleibt unverändert.

Da sich die vorwiegend auf Zug beanspruchten Bauteile als stark überdimensioniert herausgestellt haben, wird die Breite des Verbinders von 8 cm auf 7 cm reduziert, was zu einer etwas kompakteren Bauweise sowie zu einer Gewichts- und Materialersparnis führt. Die Linienlast am Ende des Lochblechs wird von 1250 kN/m auf 1428,6 kN/m erhöht, um trotz der geringeren Lastangriffslänge wieder auf die Gesamtbelastung von 100 kN zu kommen.

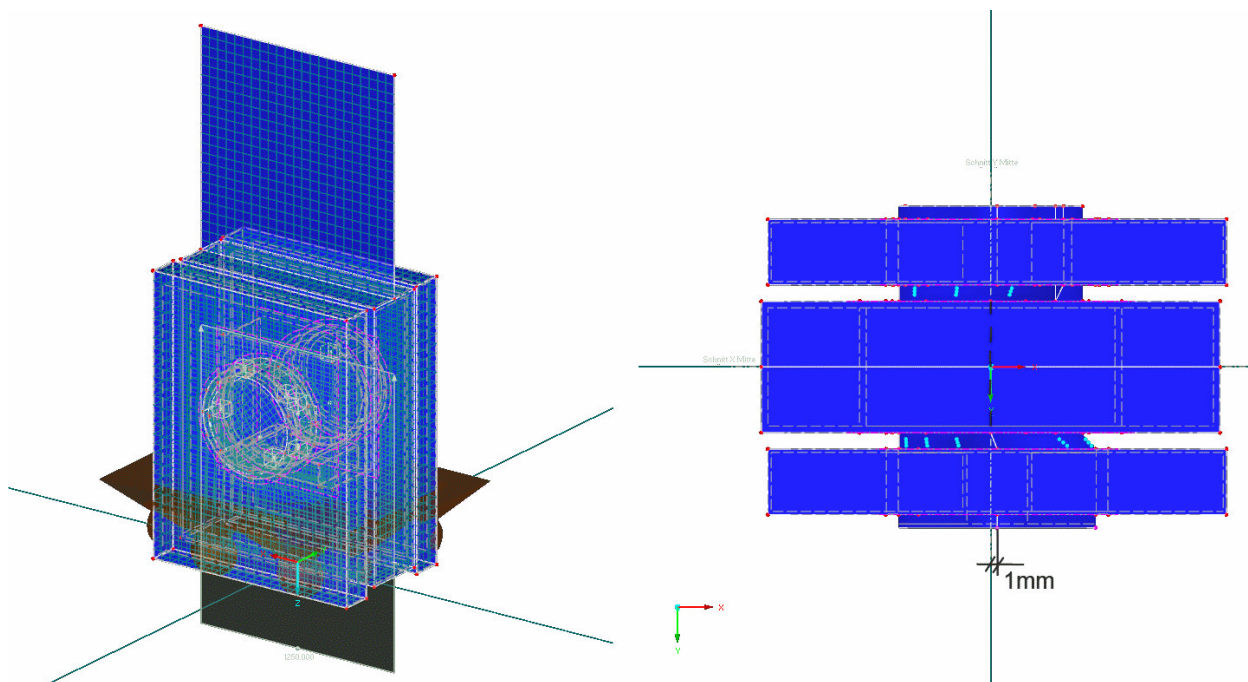


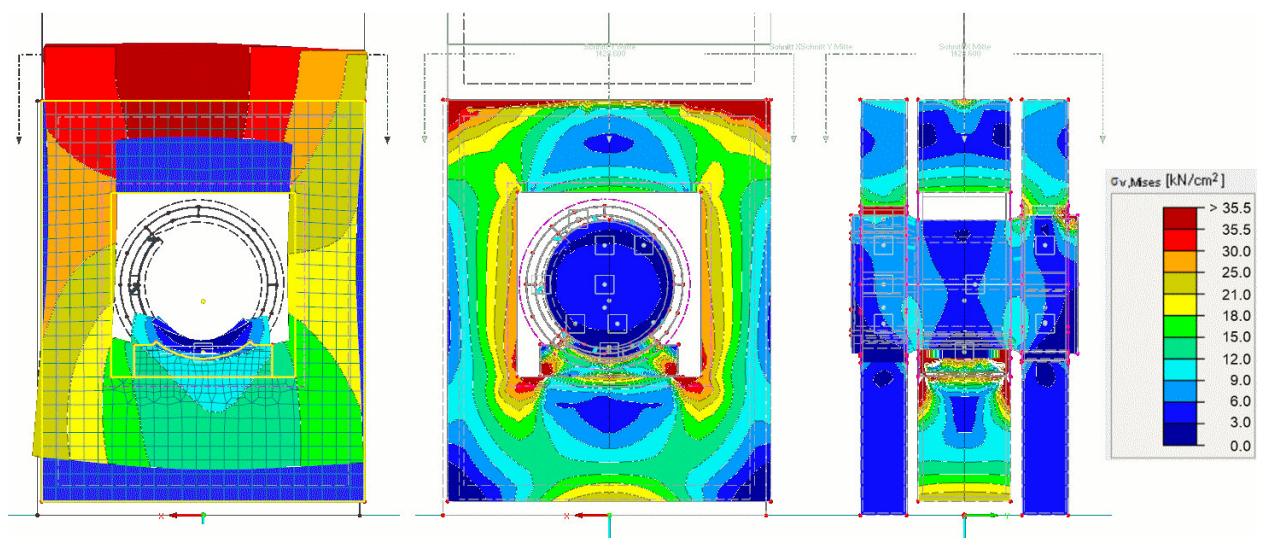
Abbildung 3-24: Adaptiertes Modell der Verbindung (links), die Achsen der beiden Verbindungsteile sind leicht versetzt, um der Exzentrizität des Verbindungsbolzens entgegen zu wirken (rechts)

Als Elementgröße werden nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

In der Spannungsverteilung am Schnitt durch das Anschlussteil (Abbildung 3-25, Mitte), erkennt man deutlich die Biegeträgerwirkung des oberen und unteren Riegels. Des Weiteren ist die Spannung in den Vertikalverbindungen an der Lochseite deutlich höher als an der Außenseite, was auf die Einspannwirkung der Riegel zurückzuführen ist. Die Spannungsverteilung ist weitgehend symmetrisch und liegt für den größten Teil des Elements unter der Stahlfestigkeit von 355 N/mm<sup>2</sup>. Lediglich an den Anschlussstellen des Lochblechs am oberen Ende des Anschlussteils sowie an den Innenecken des Bolzenlagers kommt es zu lokalen Spannungsüberschreitungen.

Im Schnitt quer dazu (Abbildung 3-25, rechts) zeigt sich, dass die Spannungsspitzen hauptsächlich am Bauteilrand auftreten, während im inneren Bereich vergleichsweise geringe Spannungen herrschen. Die Spannungen im Bolzen sind relativ gering, es lässt sich jedoch eine gewisse Stützwirkung zwischen dem Mittelaufleger und den oberen Enden der Lochleibungsfläche ausmachen, welche annähernd wie eine Scherfläche wirkt und den größten Teil der Kräfte vom Anschlussteil zum Verbindungsstück hin mittels einer direkten Lastweiterleitung überträgt.

Das Verformungsverhalten des Verbinders ist durch die zentrale Lagerung des Bolzens am Verbindungsteil nun deutlich symmetrischer (Abbildung 3-25, links). Es gibt zwar immer noch eine geringe Schiefstellung des Anschlussteils, diese ist im Vergleich zur vertikalen Verformung jedoch vernachlässigbar klein. Des Weiteren ist die maximale Verformung am Anschlussteil mit 0,24 mm um ca. ein Viertel kleiner als in der ersten Variante.



**Abbildung 3-25: Verformungsfigur des Anschlussteils (links), Van-Mises-Spannungen im Verbinder in Breiten- (Mitte) und Dickenrichtung (rechts)**

In dieser Konfiguration zeigt sich durch die Vermeidung der Exzentrizität im Anschlussteil ein deutlich günstigeres Tragverhalten. Die Spannungsverteilung und die Verformung des Trägers verlaufen weitgehend symmetrisch und bewegen sich abgesehen von einzelnen Spannungsspitzen weitgehend im zulässigen Bereich.

Der Achsversatz zwischen Anschlussteil und Verbindungsstück lässt sich in der praktischen Ausführung dadurch realisieren, dass das Verbindungsstück am ersten Anschlussteil durch entsprechende Hilfen genau eingepasst wird und über eine Markierung verfügt, welche die Drehrichtung zum Fixieren eindeutig festlegt. Der zweite Bauteil wird dann darauf gesetzt und ebenfalls in die vorgegebene Drehrichtung fixiert, wodurch ein weitgehend symmetrischer Kraftfluss gewährleistet wird.

### 3-5.3 GEGENÜBERSTELLUNG HALBER UND GANZER VERBINDER

Die bisherigen Simulationen wurden jeweils an einer Verbinderhälfte durchgeführt, was bei symmetrischen Verbindungen unter symmetrischer Belastung auch zu exakten Ergebnissen führt. Aufgrund des Exzenters am Bolzen ist die betrachtete Verbindung jedoch nicht mehr vollkommen symmetrisch, und es kommt trotz der im zweiten Versuch unternommenen Anpassungen zu einer leicht asymmetrischen Spannungsverteilung und Verformungsfigur. Die Asymmetrie ist zwar nur sehr schwach ausgeprägt und sollte kein Problem in Bezug auf Tragfähigkeit und Verformungsverhalten darstellen. Zu Kontrollzwecken wird jedoch trotzdem einmal der gesamte Verbinder simuliert und dem halben Verbinder gegenüber gestellt, um zu überprüfen, ob die weitere Optimierung an einer einzelnen Verbinderhälfte durchgeführt werden kann.

Beide Volummodelle werden gleichzeitig berechnet (Abbildung 3-26, links). Um die ganze Verbindung zu erhalten, wird dabei die halbe Verbindung nach unten gespiegelt. Der Kraftangriff erfolgt bei beiden Verbindungen am Rand des oberen Lochblechs. Die Lagerung bleibt in der Verbinderhälfte unverändert, der ganze Verbinder wird am Ende des unteren Blechs allseitig eingespannt gelagert.

An der Verformungsfigur (Abbildung 3-26, rechts) zeigt sich in beiden Modellen ein grundsätzlich gleiches Verhalten. Die Verformung an der gesamten Verbindung ist an deren Blechende mit 0,69 mm ungefähr doppelt so groß wie am Blechende der Verbinderhälfte mit 0,31 mm, was sich aus der Verbindungskette ergibt. Die Richtung der Verformung ist für beide Modelle gleich. Es kommt zu einem weitgehend vertikalen Auseinanderziehen des Verbinders, welches sich hauptsächlich aus der Biegeverformung des Anschlusssteils speist. Das Verbindungsteil selbst weist nur geringe Verformungsunterschiede auf und wird durch die Durchbiegung des Bolzens am oberen und unteren Ende leicht auseinandergedrückt. Auch hier ist die sowohl die Form als auch die Größe der Verformung bei beiden Modellen weitgehend identisch.

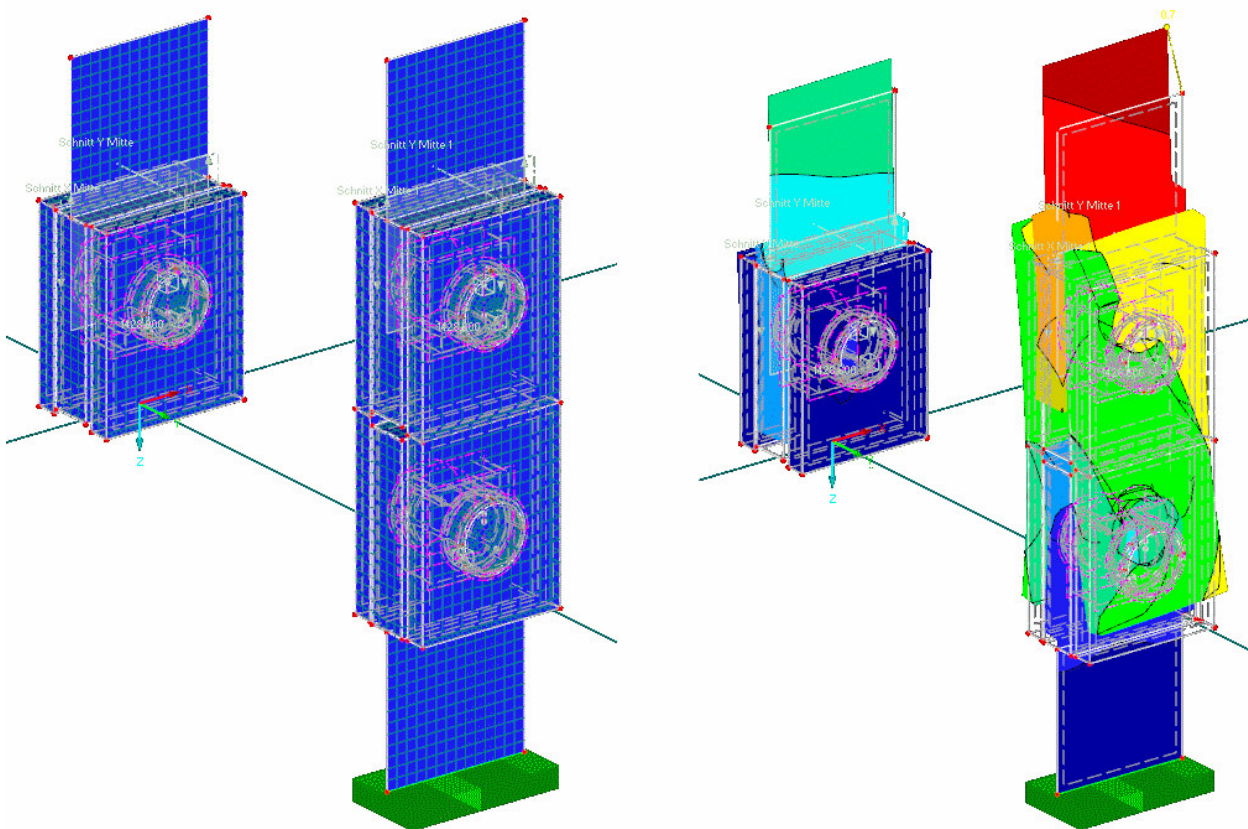
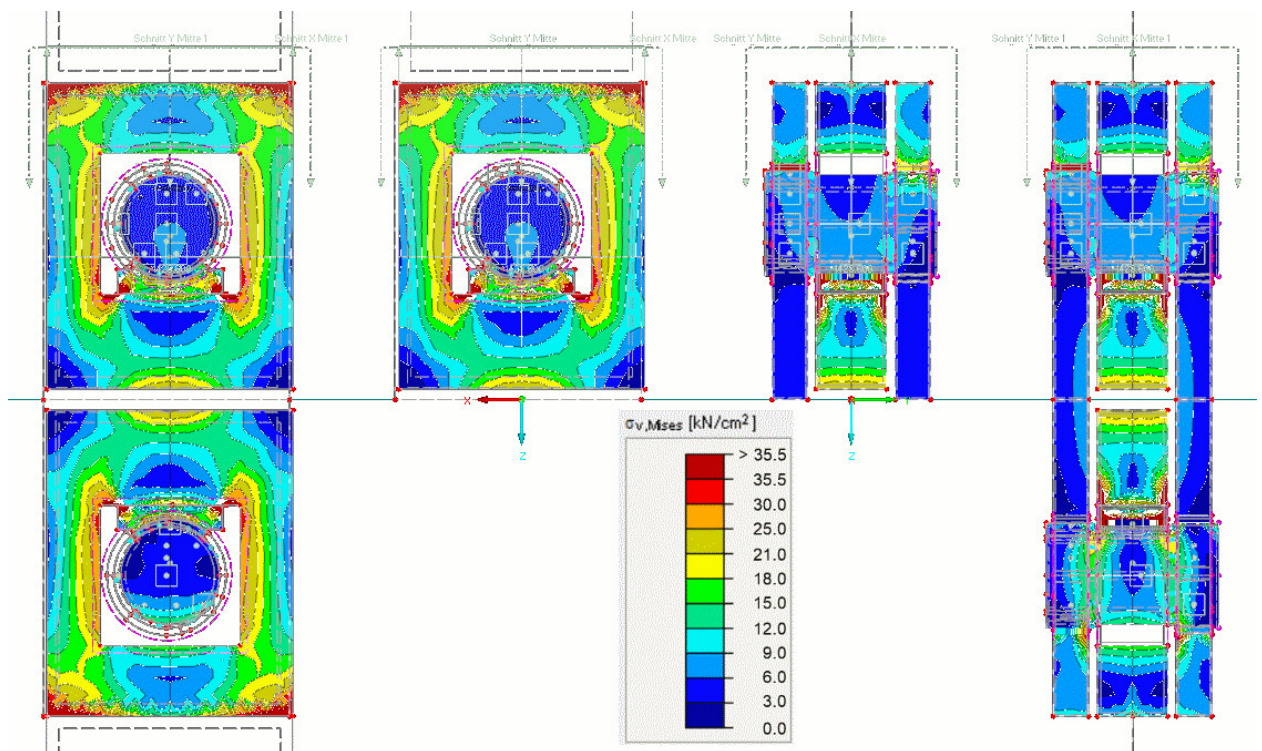


Abbildung 3-26: Volummodell halber und ganzer Verbinder (links) und dazugehörige Verformungsfigur (rechts)

Da durch die gleichzeitige Berechnung eines halben und eines ganzen Verbinders der Rechenaufwand im Vergleich zu einer einzelnen Verbinderhälfte deutlich größer ist, wird das FE-Netz für beide zu gegenüberstellenden Modelle (einmal ganzer und einmal halber Verbinder) etwas grobmaschiger mit einer Elementlänge von 5 mm generiert. Die Netzverdichtungen für Bolzen, Bolzenlager und Kontaktvolumen werden mit einer Elementlänge von 3 mm definiert.

Der Spannungsverlauf der Van-Mises-Spannung in x-Richtung ist in beiden Varianten ident (Abbildung 3-27, links). Verteilung und Größe der Spannung sind in der oberen Hälfte des Verbinders jeweils gleich. Die Spannungsverteilung in der unteren Hälfte des Verbinders entspricht exakt der Spiegelung der Spannungsverteilung in der oberen Verbinderhälfte.

In y-Richtung des Verbinders ist der Spannungsverlauf in der oberen Verbinderhälfte ident, in der unteren gibt es jedoch kleine Abweichungen (Abbildung 3-27, rechts). Diese betreffen in erster Linie den Bolzen, welcher hier entlang der Scherfläche höher belastet ist als in der oberen Verbinderhälfte. Ein Grund für diese höhere Auslastung konnte nach eingehender Betrachtung jedoch nicht gefunden werden. In allen übrigen Bauteilen entspricht die Spannungsverteilung in der unteren Hälfte weitgehend der Spannungsverteilung in der oberen Hälfte.



**Abbildung 3-27: Van-Mises-Spannungsverlauf in x-Richtung des ganzen und halben Verbinders (links), Spannungsverlauf in y-Richtung des ganzen und halben Verbinders (rechts)**

Der Vergleich zeigt, dass sich halber und ganzer Verbinder in Bezug auf ihr Spannungs- und Verformungsverhalten weitgehend gleich verhalten. Da die Auslastung des Bolzens, welcher als einziger Bauteile größere Unterschiede in der Spannungsverteilung zwischen oberer und unterer Verbinderhälfte aufweist, weit unter dessen maximaler Tragfähigkeit liegt, geht von diesem keine Gefahr für die Stabilität und Tragfähigkeit des Verbinders aus. Somit kann die weitere Optimierung an einer Verbinderhälfte durchgeführt werden, was den Modellierungs- und Berechnungsaufwand im Vergleich zum ganzen Verbinder deutlich reduziert.



### 3-5.4 DRITTE VARIANTE MIT ABGESCHRÄGTEN INNENECKEN IM ANSCHLUSSTEIL

Da ein großer Teil der Verformung aus der Biegung des oberen Riegels resultiert, wird dieser nun durch abgeschrägte Innenecken verstärkt, welche zudem auch die Spannungskonzentrationen an diesen Ecken reduzieren (Abbildung 3-28). Die Abschrägungen werden mit einer Seitenlänge von jeweils einem Zentimeter ausgeführt, wodurch es zu keiner Verringerung der Beweglichkeit des Bolzens beim Einbau in die Verbindung kommt. Die äußere Geometrie des Verbinders mit einer Breite von 7 cm und einer Höhe der Vebinderhälfte von 9 cm bleibt unverändert, ebenso der Bolzen und das Bolzenlager.

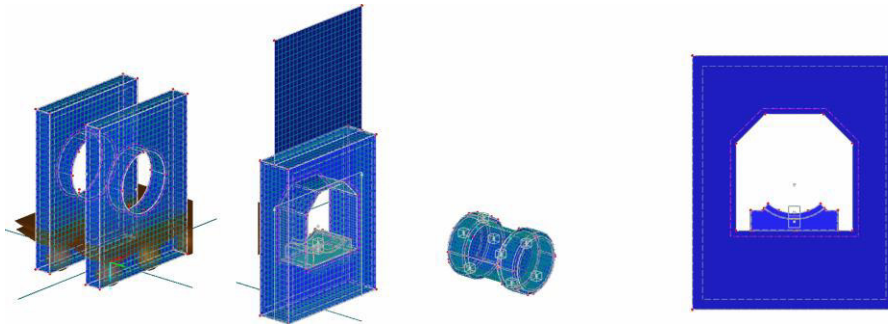


Abbildung 3-28: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit abgeschrägten Innenecken im Aufriss (rechts)

Als Elementgröße werden nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Größe der Verformung bleibt mit 0,27 mm fast gleich wie in Variante 2, für die Gesamtverdrehung des Anschlussteils gilt das gleiche (Abbildung 3-29, links). Allerdings fällt durch den steiferen Querschnitt aufgrund der Eckverstärkung die Biegeverformung im oberen Riegel deutlich schwächer aus. Dieser weist im belasteten Zustand jedoch eine größere Schiefstellung und eine Horizontalverformung in die entgegengesetzte Richtung auf. Der untere Riegel verformt sich durch die Verstärkung des oberen Riegels etwas asymmetrischer. Die Spannungsverteilung im Anschlussteil in x-Richtung bleibt im unteren Bereich gleich, während es in der Nähe der abgeschrägten Ecken zu einer leichten Entlastung des Materials kommt (Abbildung 3-29, Mitte). In y-Richtung ergeben sich durch die Eckverstärkung keine nennenswerten Änderungen (Abbildung 3-29, rechts).

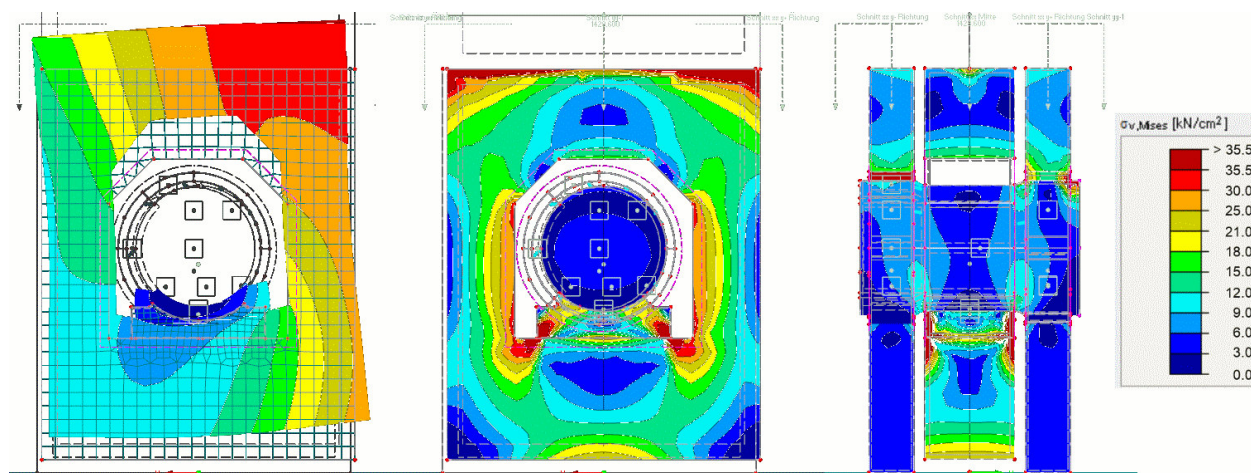
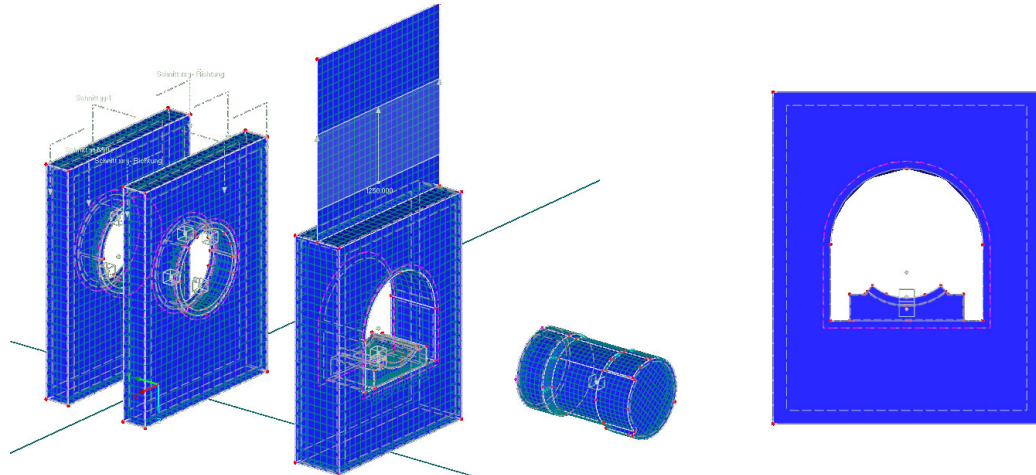


Abbildung 3-29: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y Richtung (rechts)

Die Abschrägung in den Innenecken versteift somit das Anschlussteil und reduziert die Spannungen in dessen oberen Eckbereichen. Die Spannungsspitzen im Bereich des Bolzenauflagers bleiben vorhanden.

### 3-5.5 VIERTE VARIANTE MIT AUSTRUNDUNG IM ANSCHLUSSTEIL

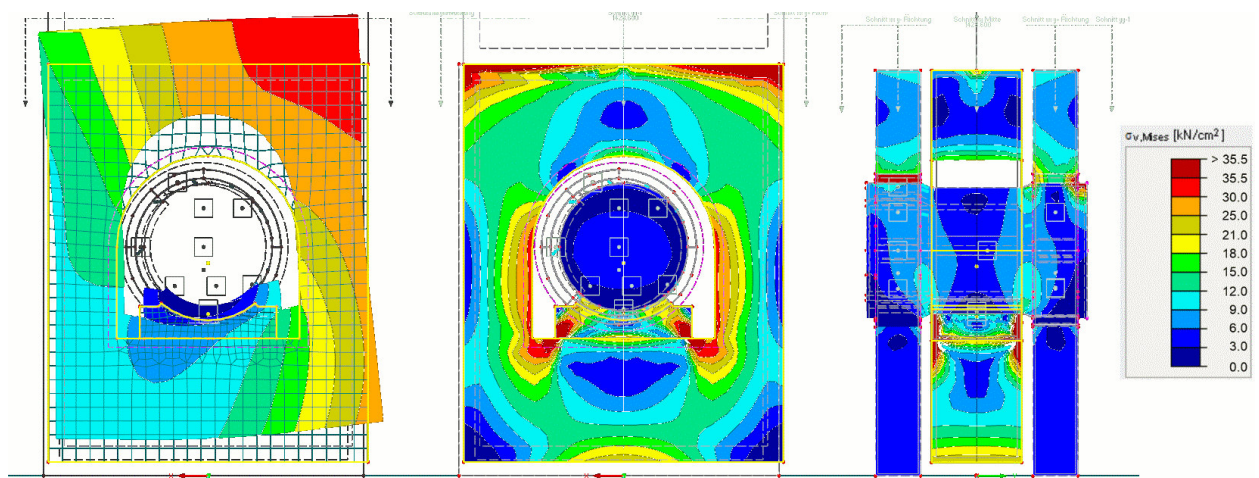
Da die Abschrägung im Anschlusssteil dessen oberen Riegel deutlich versteift, wird diese nun durch eine Ausrundung ersetzt (Abbildung 3-30). Dies sollte den Versteifungseffekt noch deutlich verstärken, wodurch dann in weiterer Folge der obere Riegel schlanker ausgeführt werden kann, um die Verbindung material- und platzsparender ausführen zu können. Die äußere Geometrie des Verbinders und seine restlichen Bestandteile bleiben unverändert.



**Abbildung 3-30: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlusssteil mit Ausrundung im Aufriss (rechts)**

Als Elementgröße werden 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Verformungsfigur mit einer maximalen Verformung von 0,26 mm entspricht weitgehend jener von Variante 3 (Abbildung 3-31, links). Der Riegel verhält sich etwas steifer, wodurch dessen Durchbiegung etwas geringer ausfällt. Auch die vertikalen Verbindungsteile werden durch die Ausrundung leicht verstärkt, wodurch deren Horizontalverformung in geringem Maße verringert wird. Die Spannungsverteilung in x-Richtung bleibt weitgehend gleich, im Bereich der Ausrundung kommt es zu einer weiteren Reduktion der anliegenden Spannung (Abbildung 3-31, Mitte). In y-Richtung bleibt die Spannungsverteilung unverändert (Abbildung 3-31, rechts).



**Abbildung 3-31: Verformungsfigur Anschlusssteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)**

Das Anschlusssteil wird durch die Ausrundung somit weiter verstärkt, während der Einfluss auf die restlichen Verbindungsbestandteile vernachlässigbar klein bleibt.

### 3-5.6 FÜNFTE VARIANTE MIT REDUZIERTER OBERER RIEGELHÖHE IM ANSCHLUSSTEIL

Da der obere Riegel im Anschlussteil durch die Ausrundung deutlich verstärkt wurde, wird nun die Riegelhöhe um 5 mm reduziert (Abbildung 3-32). Das reduziert die Steifigkeit des Riegels zwar deutlich, der verbleibende Querschnitt sollte jedoch immer noch ausreichender sein, um die auftretenden Kräfte aufzunehmen. Das Verbindungsteil wird an der Oberseite ebenfalls um 5 mm gekürzt, sodass beide Verbindungsbestandteile weiterhin die gleiche Höhe aufweisen. Somit nimmt die Höhe der Verbindung um 5 mm pro Seite ab, während die inneren Abmessungen unverändert bleiben.

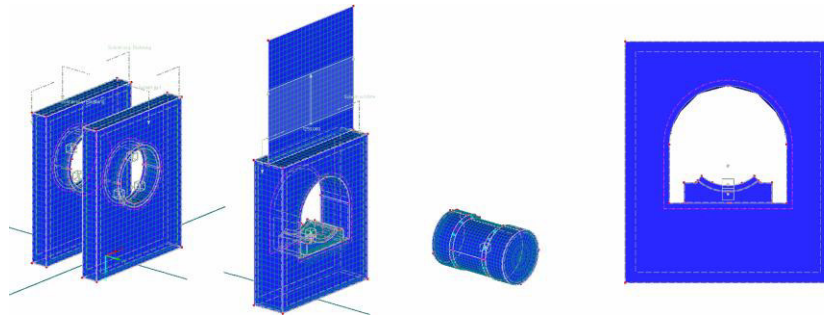


Abbildung 3-32: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit Ausrundung in niedrigerer Ausführung im Aufriss (rechts)

Als Elementgröße nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Verformungsfigur mit einer maximalen Verformung von 0,26 mm bleibt weitgehend gleich. Es kommt lediglich zu einer etwas stärkeren Durchbiegung des oberen Riegels und einer etwas schwächeren horizontalen Auslenkung des Anschlusssteils (Abbildung 3-33, links). Die Spannungsverteilung in x-Richtung bleibt im unteren Bereich des Anschlusssteils gleich, während es im oberen Bereich zu einer geringen Erhöhung der Spannungen kommt (Abbildung 3-33, Mitte). In y-Richtung treten im unteren Bereich keine Änderungen auf, während es durch die Verringerung der Bauteilhöhe im oberen Bereich des Anschlusssteils sowie des Verbindungsstücks zu einer Spannungserhöhung kommt (Abbildung 3-33, rechts). Auf den Bolzen haben diese Änderungen keine Auswirkung.

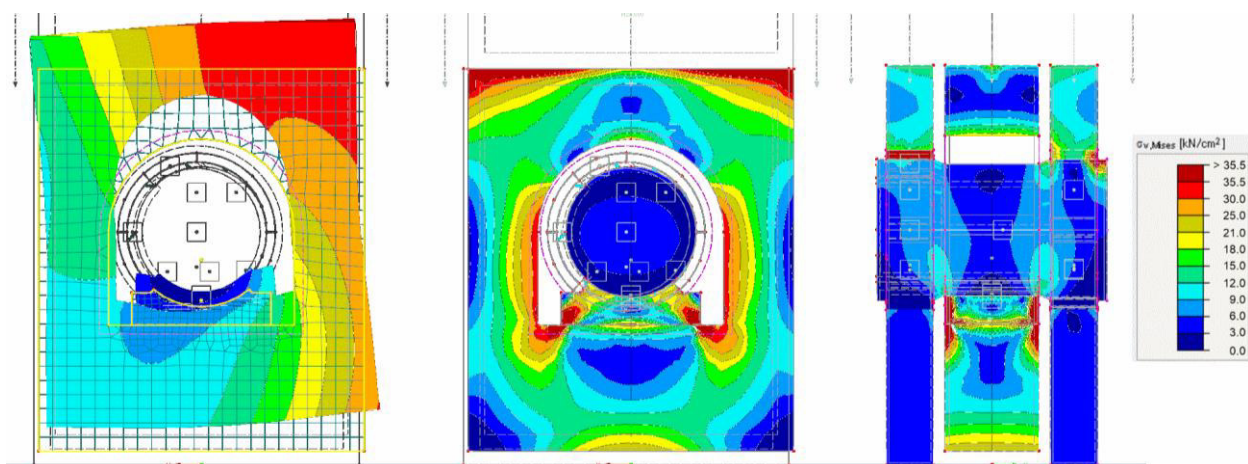
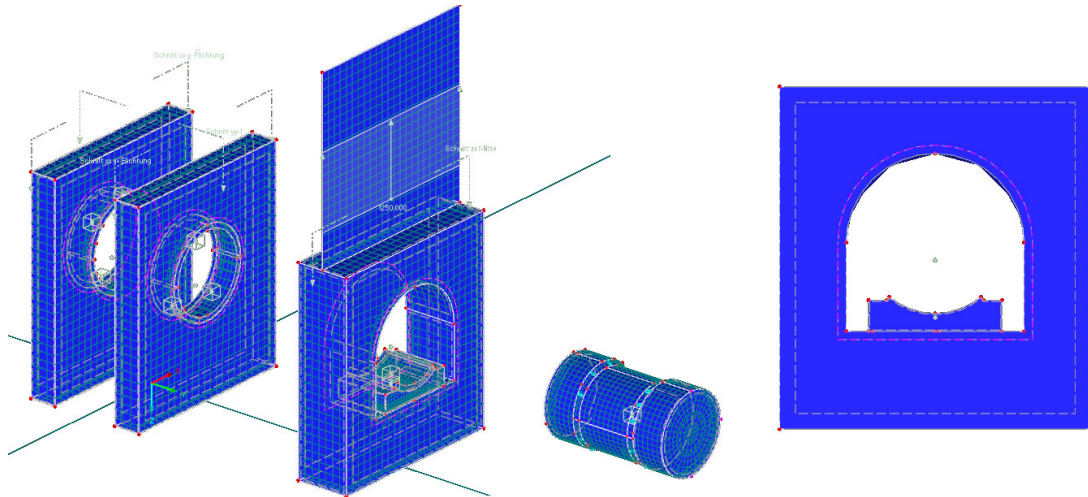


Abbildung 3-33: Verformungsfigur Anschlusssteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Die Änderungen, die sich aus der Reduktion der Riegelhöhe im oberen Bereich ergeben sind relativ gering. Lediglich die Durchbiegung im Anschlusssteil und die Spannungen im oberen Bereich des Anschlusssteils und des Verbindungsstücks nehmen etwas zu. Diese Maßnahme kann daher ohne weitere Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Verbindung durchgeführt werden.

### 3-5.7 SECHSTE VARIANTE MIT REDUZIERTER UNTERER RIEGELHÖHE IM ANSCHLUSSTEIL

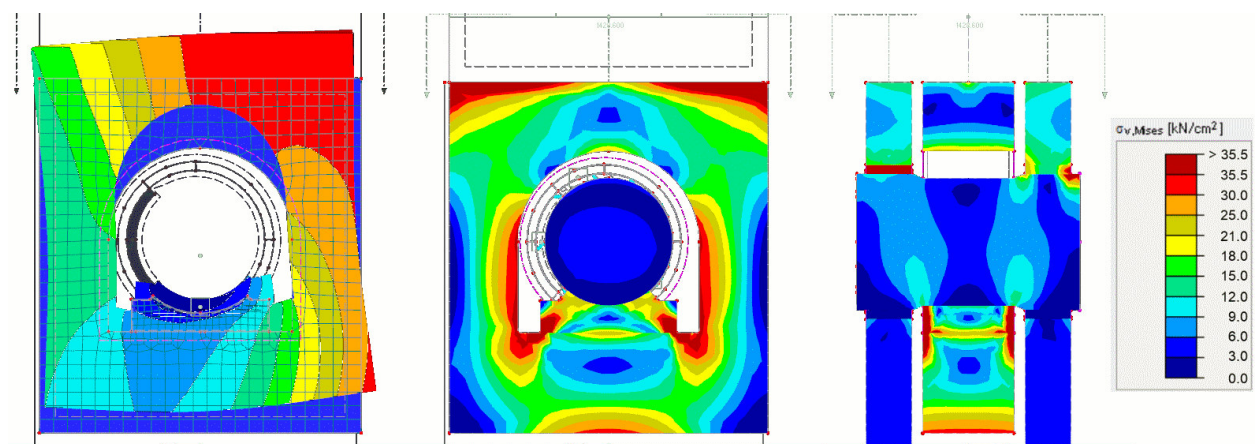
Da sich die Reduktion der oberen Riegelhöhe nur gering auswirkt, wird nun auch die untere Riegelhöhe um 5 mm reduziert. Dies macht die Verbindung kompakter und reduziert die Steifigkeitsunterschiede zwischen den vertikalen Teilen des Anschlusssteils und dessen unterem Riegel (Abbildung 3-34).



**Abbildung 3-34: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlusssteil mit Ausrundung in niedrigerer Ausführung im Aufriss (rechts)**

Als Elementgröße werden 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Verformung im oberen Bereich fällt mit 0,27 mm weitgehend gleich aus, während die Durchbiegung im unteren Riegel bedingt durch den geringeren Querschnitt zunimmt (Abbildung 3-35, links). Die Spannungen in x-Richtung im oberen Bereich bleiben gleich, während sie im unteren Riegel bedingt durch die Querschnittsabnahme zunehmen (Abbildung 3-35, Mitte). Die Spannungen in y-Richtung bleiben im oberen Bereich und im Verbindungsstück unverändert, lediglich im unteren Riegel kommt es zu einer Erhöhung der Spannungen (Abbildung 3-35, rechts). Für die Spannung im Bolzen ergeben sich keine Änderungen.



**Abbildung 3-35: Verformungsfigur Anschlusssteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)**

An der Gesamtverformung sowie an der qualitativen Spannungsverteilung im gesamten Verbinder ändert sich durch die Reduktion des unteren Riegels nicht viel. Lediglich dessen Durchbiegung sowie die dortigen Spannungen nehmen etwas zu.

### 3-5.8 SIEBENTE VARIANTE MIT SCHMÄLEREM VERBINDUNGSSTÜCK

Da das Verbindungsstück immer nur vergleichsweise gering belastet ist, wird dessen Breite nun von 7 cm auf 6 cm reduziert. Die Dicke sowie die Geometrie der restlichen Verbindung bleiben dabei unverändert (Abbildung 3-36).

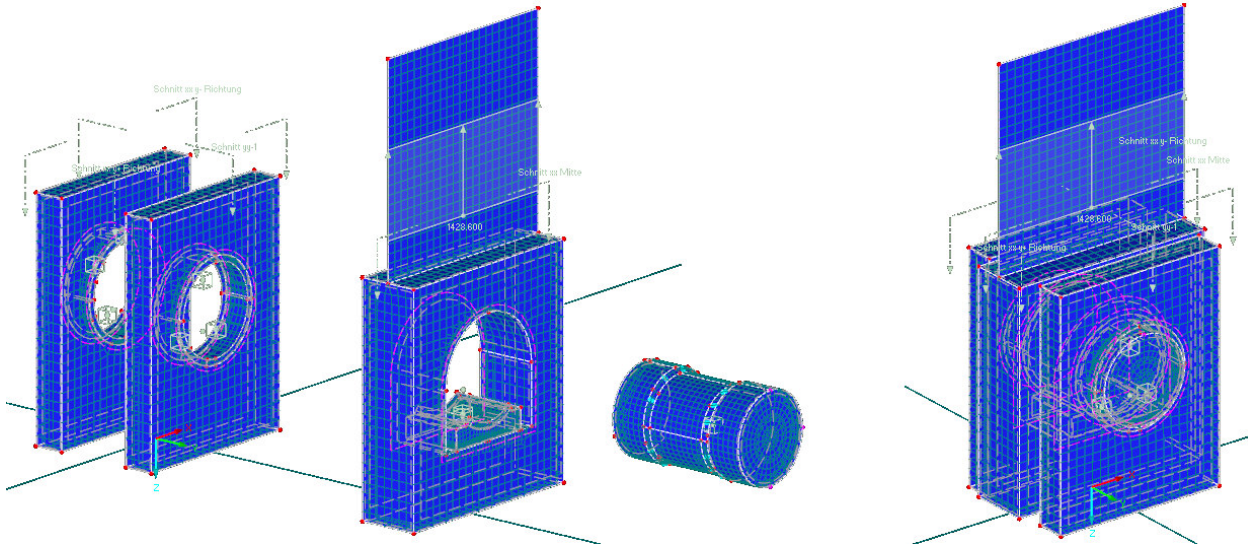


Abbildung 3-36: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und zusammengesetzte Verbindungshälfte mit schmalerem Verbindungsstück (rechts)

Als Elementgröße nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

An der Verformungsfigur mit einer maximalen Verformung von 0,28 mm ändert sich durch die Reduktion des Verbindungsstücks nicht viel, lediglich die Schiefstellung des oberen Riegels nimmt geringfügig zu (Abbildung 3-37, links). Die Spannung im Anschlussteil bleibt von der Reduktion des Verbindungsstücks unbeeinflusst (Abbildung 3-37, Mitte), während es im Verbindungsstück selbst zu einer leichten Erhöhung der Spannungen kommt.

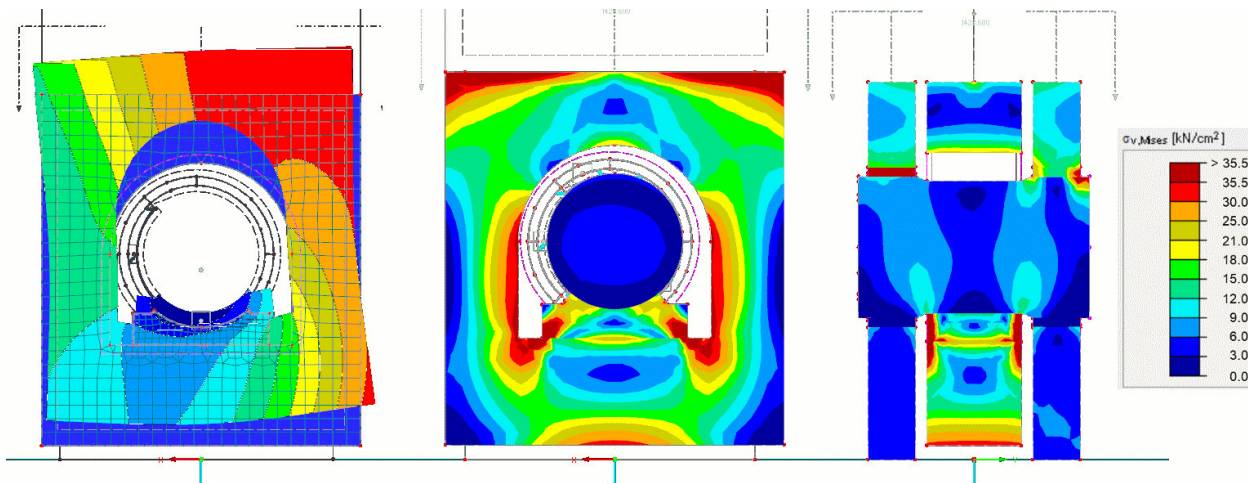


Abbildung 3-37: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Die Reduktion der Breite des Verbindungsstücks hat auf die Spannungsverteilung in der Verbindung wenig Einfluss, allerdings kommt es dadurch zu einer etwas größeren Schiefstellung des Anschlussteils.

### 3-5.9 ACHTE VARIANTE MIT ABGESCHRÄGTEN INNENECKEN UND DÜNNEREM OBEREN RIEGEL

Da das Verformungsverhalten mit zunehmender Versteifung des oberen Riegels asymmetrischer wird, wird nun versucht, durch eine Rückkehr zum lediglich eckverstärkten Riegel in abgeschwächter Form, ein gleichmäßigeres Verformungsverhalten zu erreichen. Der obere Riegel wird dabei von 2 cm auf 1,5 cm reduziert, während die restliche Geometrie gleich wie bei der ersten Variante mit abgeschrägten Ecken bleibt (Abbildung 3-38).

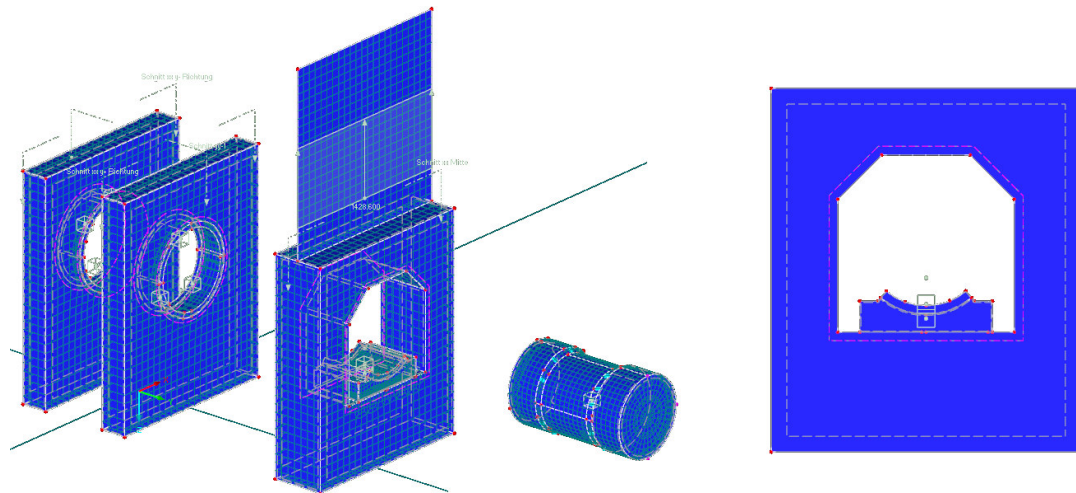


Abbildung 3-38: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit abgeschwächtem oberem Riegel (rechts)

Als Elementgröße nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die horizontale Auslenkung reduziert sich leicht, während die Schiefstellung des oberen Riegels weitgehend gleich bleibt (Abbildung 3-39, links). An der Gesamtverformung von 0,26 mm treten kaum Änderungen auf. Die Spannungsverteilung in x-Richtung (Abbildung 3-39, Mitte) und in y-Richtung (Abbildung 3-39, rechts) bleibt im unteren Bereich des Verbinders gleich, während es im Bereich des oberen Riegels aufgrund des geringeren Querschnitts zu einer Spannungserhöhung kommt.

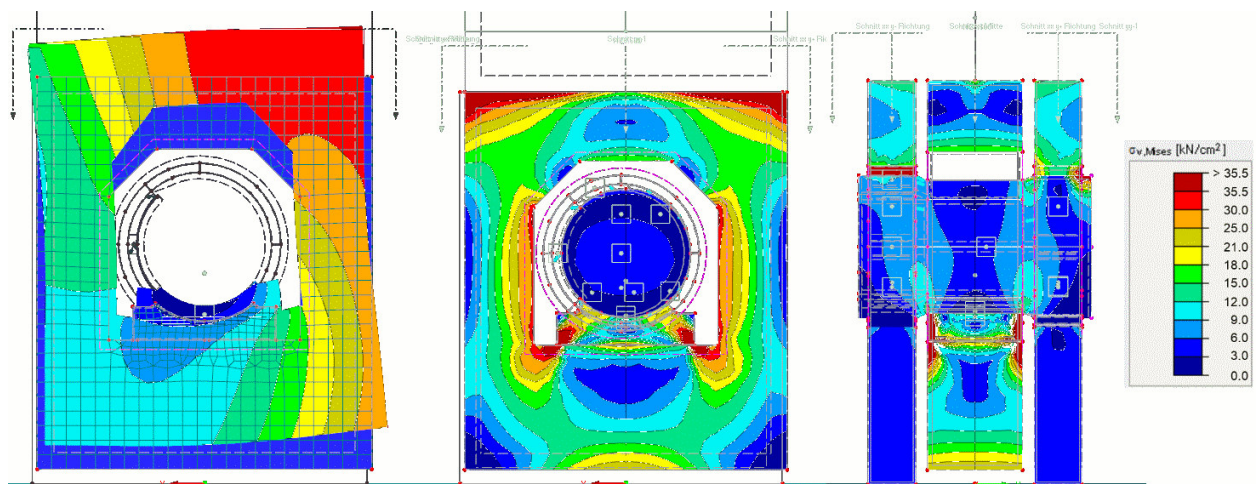


Abbildung 3-39: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Somit verhält sich diese Variante etwas günstiger als die Varianten mit dickerem oberem Riegel, es tritt jedoch immer noch eine gewisse Schiefstellung auf.

### 3-5.10 NEUNTE VARIANTE MIT LEICHT VERSTÄRKTER VERTIKALVERBINDUNG

In diesem Versuch wird die Auswirkung einer Verstärkung des Vertikalen Bereichs im Anschlussteil, welcher oberen und unteren Riegel miteinander verbindet, untersucht. Dieser wird nach innen um 1 mm verstärkt, wodurch das Loch im Anschlussteil zwar etwas kleiner wird, aber immer noch ausreichend Platz zur Toleranzaufnahme vorhanden ist (Abbildung 3-40). Der Riegel wird ebenfalls um 1 mm verstärkt. An den äußeren Abmessungen ändert sich durch diese Adaption nichts.

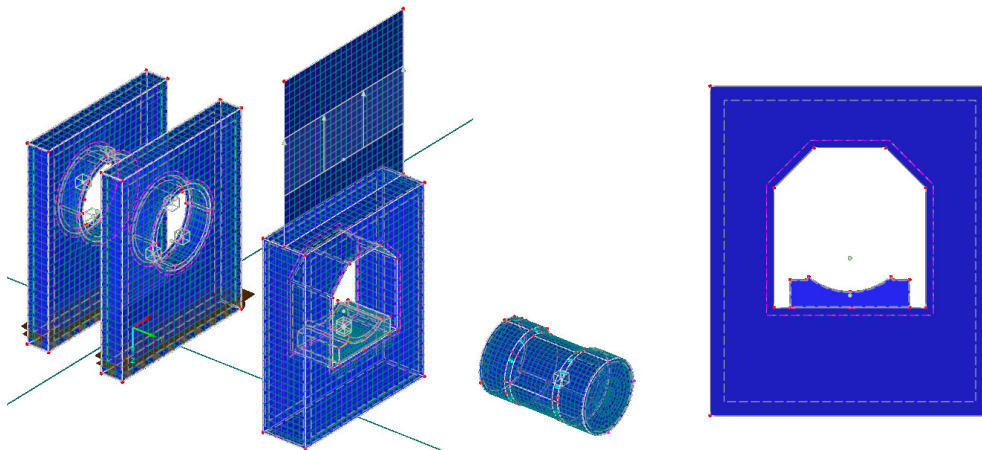


Abbildung 3-40: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit leicht verstärkter Vertikalverbindung (rechts)

Als Elementgröße nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Verformung wird durch die Verstärkung der Vertikalverbindung bei einem Maximalwert von 0,26 mm etwas kleiner, die Schiefstellung bleibt jedoch gleich (Abbildung 3-41, links). Durch die höhere Steifigkeit der Vertikalverbindung nimmt bedingt durch deren Einspannwirkung auch die Durchbiegung der beiden Riegel ab. Die Spannungsverteilung in x-Richtung ändert sich dahingehend, dass die Spannungen in der Vertikalverbindung und im oberen Riegel geringfügig abnehmen, während die Spannung im unteren Riegel gleich bleibt (Abbildung 3-41, Mitte). In y-Richtung ergeben sich keine wesentlichen Änderungen (Abbildung 3-41, rechts).

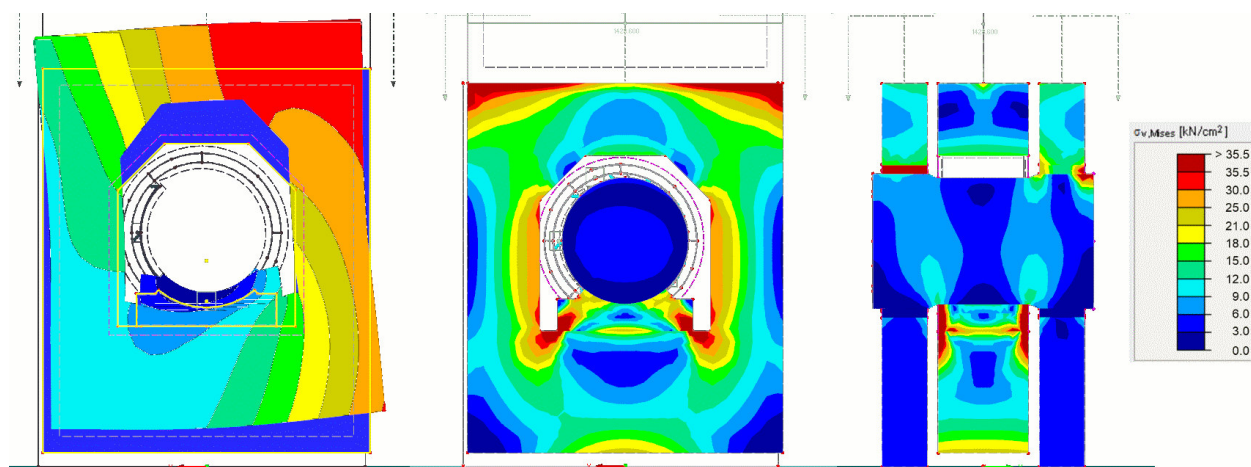


Abbildung 3-41: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Die Verstärkung der Vertikalverbindung führt somit zu einer Versteifung des Verbinders, ohne viel an der Gesamtverformung zu ändern.

### 3-5.11 ZEHNTE VARIANTE MIT VERRINGERTER ECKABSCHRÄGUNG

Nachdem die Einführung der Eckabschrägung zu starken Veränderungen des Verformungsverhaltens geführt hat, wird diese nun reduziert, um dem ursprünglichen Verformungsverhalten des Riegels ohne Eckabschrägung näher zu kommen.

Zu diesem Zweck wird die Größe der Eckabschrägung sukzessive reduziert, zuerst von 1,0 cm auf 0,8 cm und dann in 0,2 cm-Schritten weiter, bis keine Eckabschrägung mehr vorhanden ist.

Als Elementgröße nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

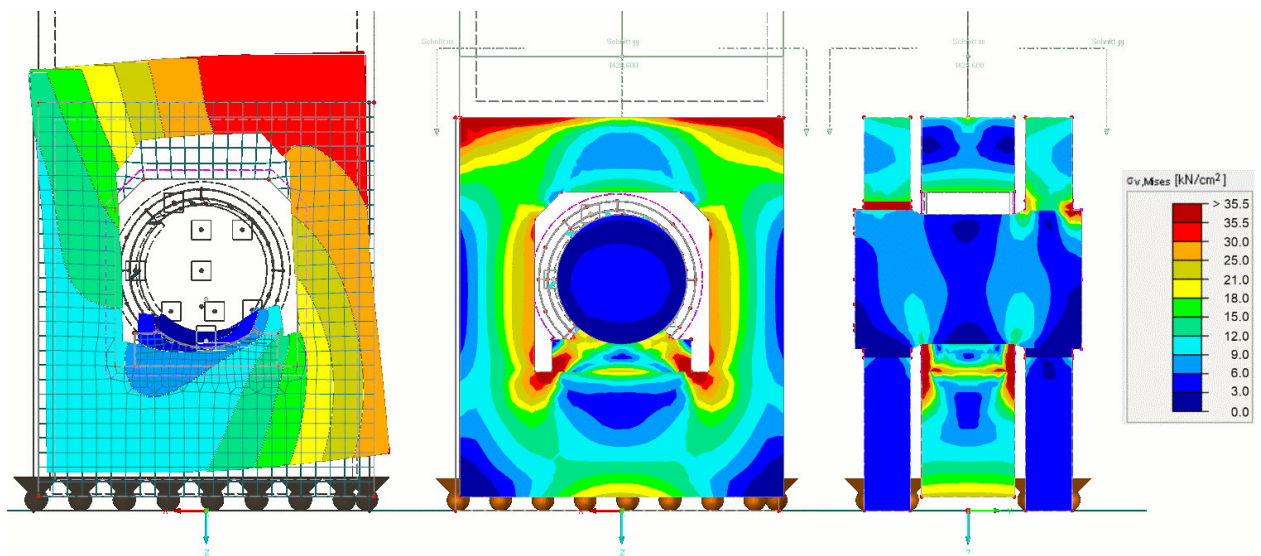


Abbildung 3-42: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Dabei zeigt sich jedoch kaum ein Einfluss auf das Verformungsverhalten (Abbildung 3-42, links). Die maximale Verformung schwankt in geringem Maße um 0,26 mm. Bei verringerter Eckabschrägung erhöhen sich die Spannungen im oberen Riegel leicht (Abbildung 3-42, Mitte und rechts). Die Schiefstellung des Anschlussteils bleibt weitgehend unverändert erhalten.



### 3-5.12 VARIANZ DER EXZENTRIZITÄT

Da die Form des Anchlusssteils laut den vorhergegangenen Versuchen kaum eine Auswirkung auf die Schiefstellung des Anschlusssteils hat, wird nun die Exzentrizität der Verbindung variiert. Dazu wird das Verbindungsstück so lange seitlich verschoben, bis die Schiefstellung des Anschlusssteils weitgehend verschwunden ist.

Als Basis hierfür wird die Verbindungsgeometrie aus Variante fünf genommen, in welcher das Loch im Anschlusssteil oben ausgerundet ist.

Als Elementgröße nun 3 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 2 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Je nach Exzentrizität ändert sich dabei die Verformungsfigur, während die Größe der Verformung weitgehend gleich bleibt. Sind die Mittelachsen von Verbinder und Anschlusssteil in einer Linie, beträgt die maximale Verformung 0,25 mm. Es kommt zu einer stärkeren Vertikalverformung auf der linken Seite, also dort, wo der Abstand zwischen Bolzenauflager und Lochrand im Anschlusssteil größer ist (Abbildung 3-43, links).

Wird das Verbindungsstück um 0,5 mm nach links verschoben, daher der Abstand zum linken Lochrand verringert, verhält sich die Verformung weitgehend symmetrisch und es kommt nur zu einer sehr geringen Schiefstellung. Die maximale Verformung beträgt dann 0,22 mm (Abbildung 3-43, Mitte). Wird diese Verschiebung auf 1,0 mm erhöht, so wie dies bei den vorangegangenen Berechnungen der Fall war, liegt das Bolzenauflager nun zentrisch im Loch des Anschlusssteils. In diese Fall kommt es zu einer stärkeren Verformung im rechten Bereich des Anschlusssteils. Die maximale Verformung beträgt dann 0,26 mm (Abbildung 3-43, rechts).

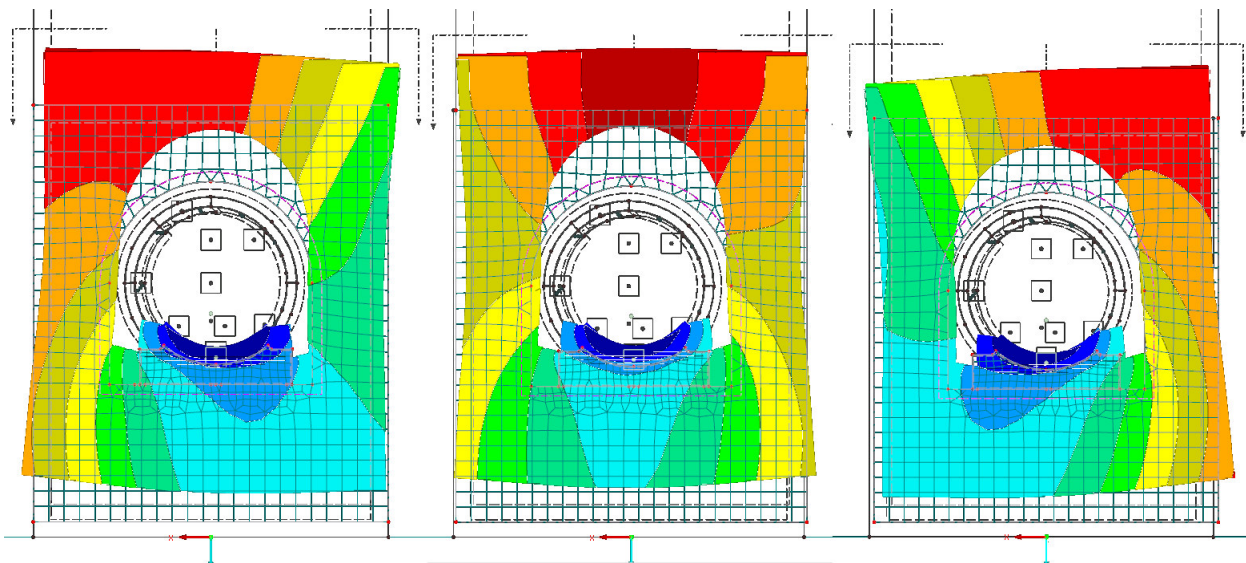
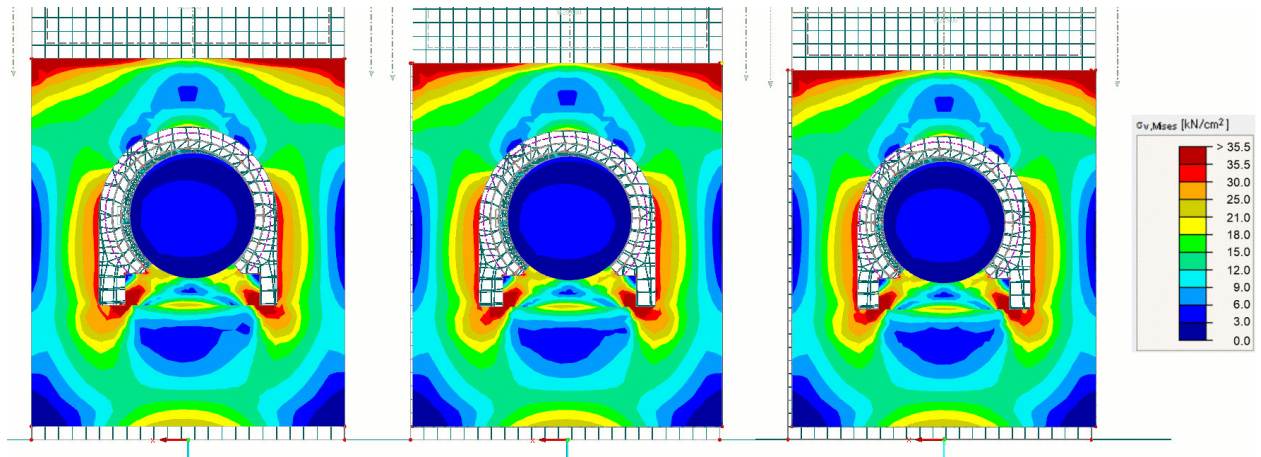


Abbildung 3-43: Verformungen bei Varianz der Exzentrizität, Verbinder und Anschlusssteil in einer Achse (links), um 0,5 mm verschoben (Mitte) und um 1,0 mm verschoben (rechts)

Die Spannungsverteilung im Anschlusssteil ändert sich bei geringer Varianz der Exzentrizität kaum (Abbildung 3-44). Im oberen Bereich bleibt die Spannungsverteilung in den drei betrachteten Fällen gleich. Kleine Änderungen ergeben sich im Bereich des unteren Riegels. Hier sind die Spannungen am linken Lochrand bei einer im Vergleich zum Anschlusssteil exzentrischen Lagerung des Bolzens etwas größer als bei einer zentrischen Lagerung, was zu einer leichten Asymmetrie der Spannungsverteilung für diesen Fall führt. Bei geringen Exzentrizitäten hat dies jedoch kaum eine Auswirkung.



**Abbildung 3-44:** Van-Mises-Spannung bei Varianz der Exzentrizität, Verbinder und Anschlussteil in einer Achse (links), um 0,5 mm verschoben (Mitte) und um ,01 mm verschoben (rechts)

Um die Auswirkung extremer Exzentrizitäten auf den Verbinder zu bestimmen, wird dieser in Stellungen mit verschieden großer Exzentrizität berechnet. Begonnen wird dabei mit der maximalen Verschiebung des Verbindungsstück nach rechts. Dies entspricht einem Achsversatz von Anschlussteil und Verbindungsstück von 3,0 mm, wobei das Verbindungsstück um 3,0 mm nach rechts versetzt ist. Von dort beginnend wird das Verbindungsstück um jeweils 1 Millimeter nach links verschoben, bis eine Verschiebung des Verbindungsstücks um 4,0 mm von der Mittelachse erreicht ist.

Die maximale Verformung beträgt bei einer Abweichung von -3,0 mm 0,70 mm, bei -2,0 mm 0,50 mm, bei -1,0 mm 0,36 mm, bei 0,0 mm 0,26 mm, bei 0,5 mm 0,22 mm, bei 1,0 mm 0,26 mm, bei 2,0 mm 0,40 mm, bei 3,0 mm 0,61 mm und bei 4,0 mm 0,86 mm. Somit ergibt die Verformungsfigur bei der Varianz der Exzentrizität ein eindeutiges und nachvollziehbares Bild. Dabei gilt: Je größer der Abstand des Bolzenlagers zu einer Seite des Lochrandes im Anschlussteil ist, desto größer ist die dort auftretende Vertikalverformung und damit auch die Schiefstellung des Anschlussteils in diese Richtung (Abbildung 3-45). Nimmt die Exzentrizität ab, so nimmt auch die Schiefstellung ab. Aufgrund der Bolzengeometrie wird eine gerade Lage des Anschlussteils jedoch nicht bei einer Exzentrizität von 0,0 mm erreicht, sondern knapp neben der Mittellage, bei einer Achsabweichung von 0,5 mm.

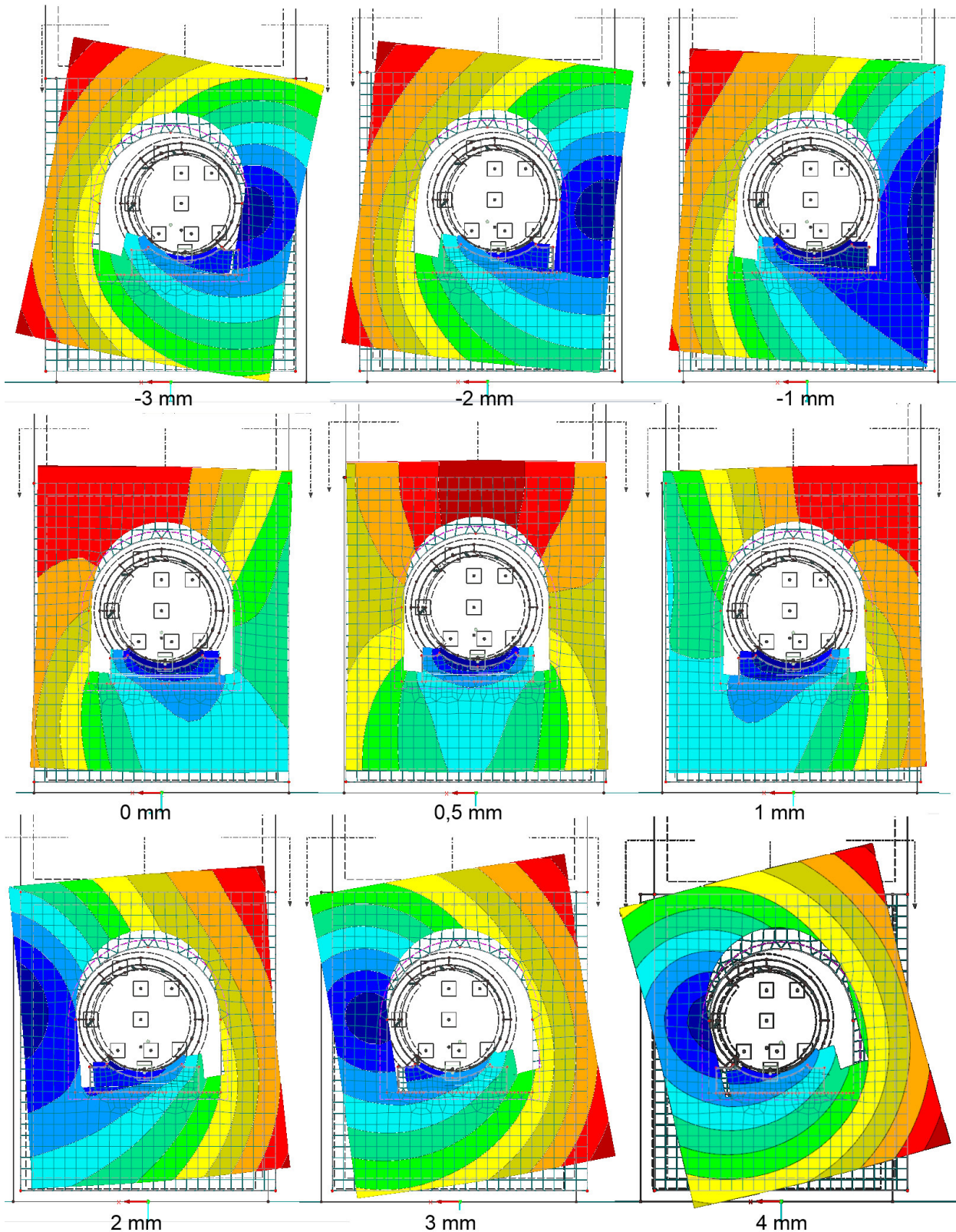


Abbildung 3-45: Verformungsverhalten unter sich ändernder Exzentrizität, Vergrößerungsfaktor 20, bei Exzentrizität 0,0 mm sind die Achsen von Anlussteil und Verbindungsstück in einer Linie, die Werte unter den Bildern geben an, um wie viel das Verbindungsstück zum Anlussteil verschoben ist (rechts -, links +)

Die Änderungen des Spannungsverlaufs im Anlussteil aufgrund der Exzentrizität sind gering. Im Bereich des oberen Riegels tritt immer ein weitgehend gleicher Verlauf auf, wodurch der Einfluss der

Exzentrizität auf das anschließende Lochblech gering ist. Im unteren Bereich kommt es je nach Größe und Lage der Exzentrizität zu einer leichten Verschiebung des Spannungsverlaufs. Dabei ist die Spannung auf der Seite des Bolzenauflagers, welche einen größeren Abstand zum Lochrand aufweist, etwas größer (Abbildung 3-46).

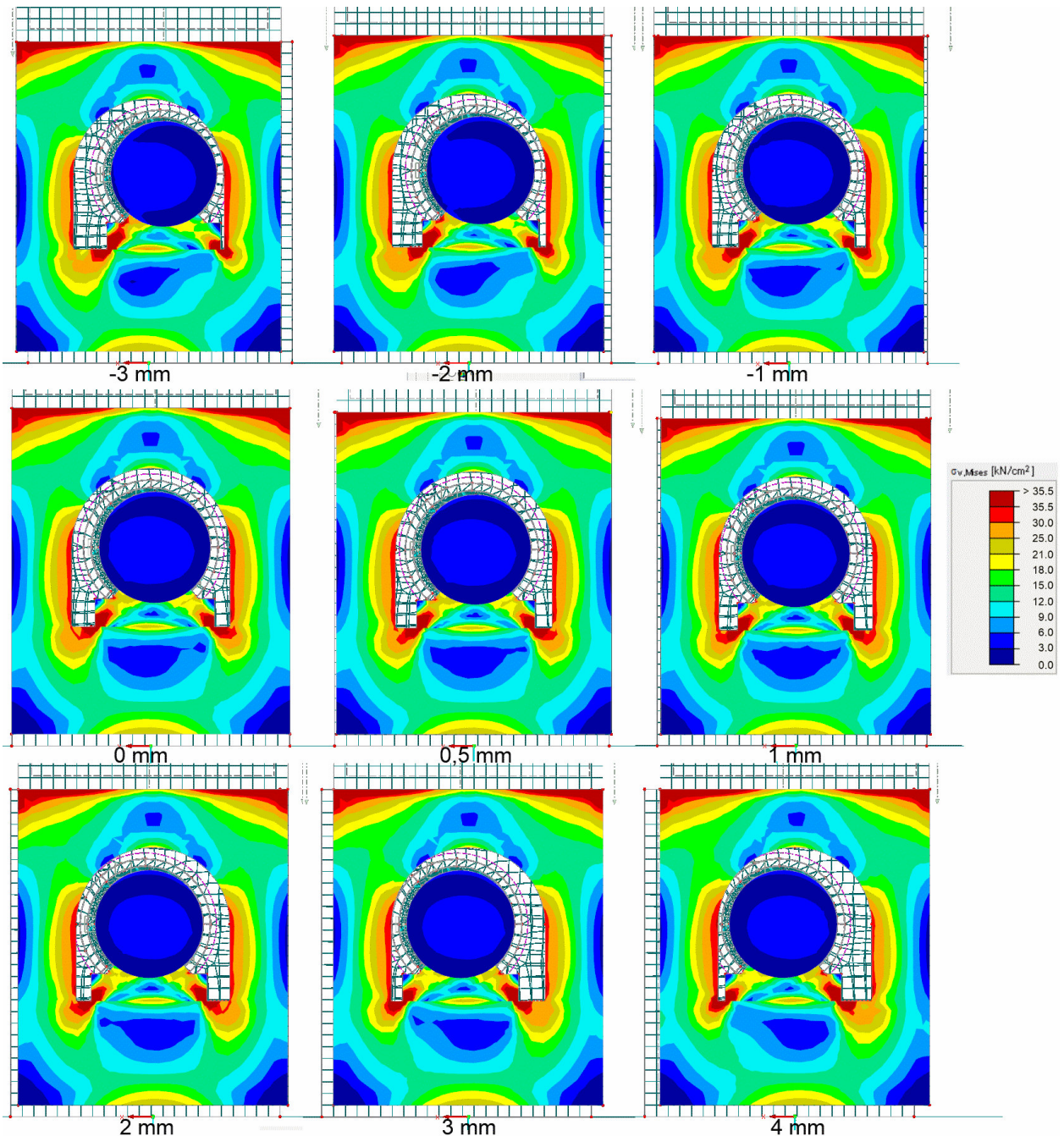


Abbildung 3-46: Van-Mises-Spannungen unter sich ändernder Exzentrizität, Vergrößerungsfaktor 20, bei Exzentrizität 0,0 mm sind die Achsen von Anschlussstück und Verbindungsstück in einer Linie, die Werte unter den Bildern geben an, um wie viel das Verbindungsstück zum Anschlussstück verschoben ist (rechts -, links +)

Aus dieser Untersuchung ergibt sich, dass eine Verschiebung des Verbindungsstücks um 0,5 mm nach links zu einer fast ausschließlich vertikalen Verformung des Anschlussstücks ohne Verdrehung führt. Daher wird für die weitere, genauere Betrachtung mit dieser Exzentrizität weitergerechnet.

### 3-5.13 GENAUERE BETRACHTUNG DER GEWÄHLTEN VARIANTE

Da die rotatorischen Verformungsanteile bei einer Exzentrizität des Verbindungsstücks zum Anschlusssteil von 0,5 mm am geringsten resultieren, wird nun mit dieser weitergerechnet (Abbildung 3-47). Die Geometrie der Verbindung mit der Ausrundung im Loch des Anschlusssteils (Variante 5) bleibt dabei erhalten. Als erstes wird eine Berechnung mit einer feineren FE-Netz-Einstellung durchgeführt.

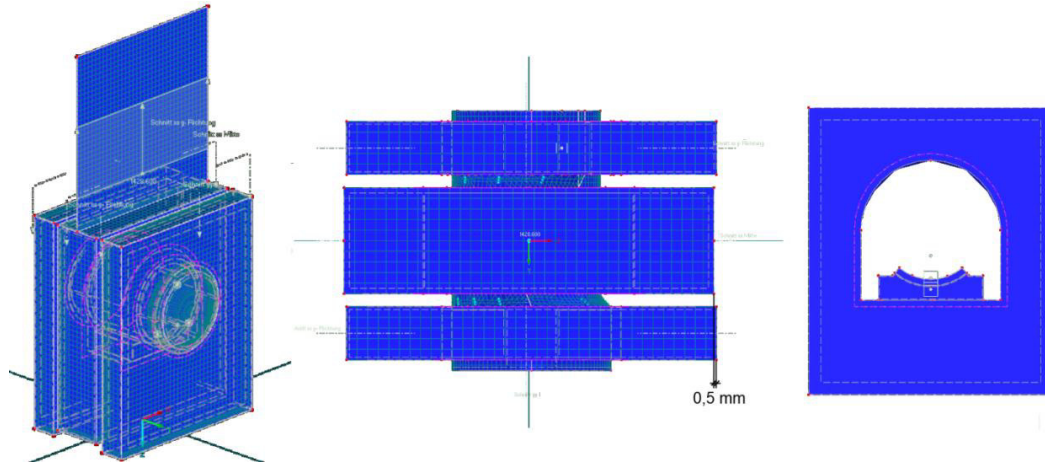


Abbildung 3-47: Verbindungsteil mit genauem FE-Netz (links), Ansicht von oben mit Achsversatz (Mitte) und Geometrie des Anschlusssteils (rechts)

Als Elementgröße 2 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 1 mm eingesetzt, um für die Übergangsbereiche zwischen Bolzen und den angrenzenden Bauteilen exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Größe der Verformung bewegt sich mit 0,25 mm im gleichen Bereich wie bei den Berechnungen mit geringerer FE-Netzauflösung, allerdings kommt es trotz gleicher Geometrie und gleichem Achsversatz von 0,5 mm zu einer größeren Schiefstellung des Anschlusssteils (Abbildung 3-48, links). Nimmt man die Ergebnisse aus der Exzentervarianz-Studie in Abschnitt 3-5.12 als Vergleich, liegt die erhaltene Schiefstellung zwischen der Schiefstellung bei einem Achsversatz von 0,5 mm und 1,0 mm.

Die Größe und Verteilung der Van-Mises-Spannung in x-Richtung bleibt weitgehend gleich, lediglich im Bolzen und im unteren Bereich des Anschlusssteils kommt es zu kleinen Änderungen (Abbildung 3-48, Mitte). Im unteren Bereich des Bolzens und im Bolzenauflager kommt es zu einer Spannungserhöhung. In y-Richtung treten im größten Teil der Verbindung im Vergleich zur Berechnung mit geringerer Netzauflösung kaum Spannungsänderungen auf (Abbildung 3-48, rechts). Lediglich im Bolzen kommt es zu einer leichten Spannungserhöhung.

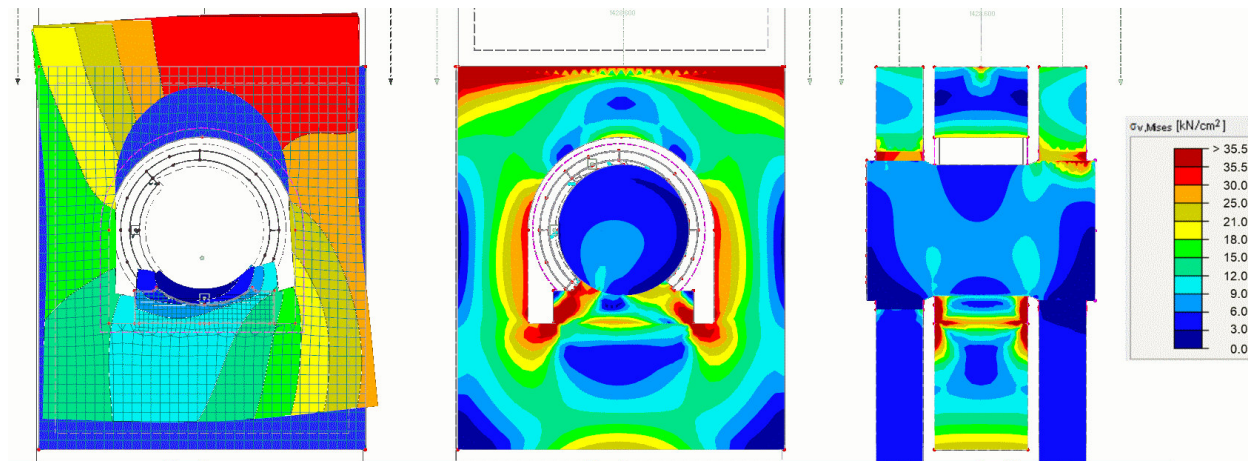


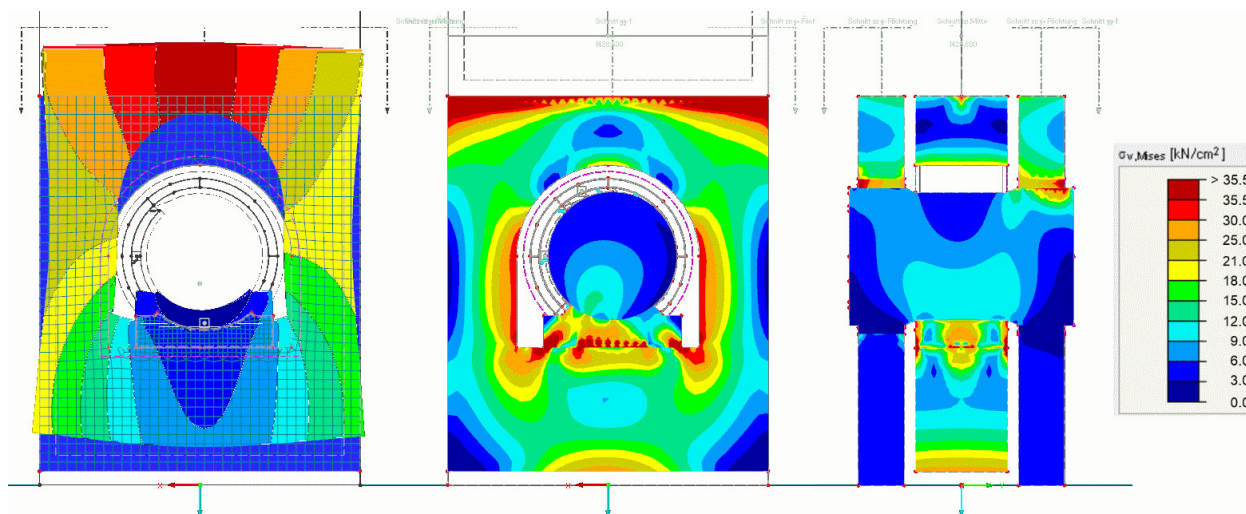
Abbildung 3-48: Verformungsfigur Anschlusssteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

In Bezug auf die Spannungen ergeben sich durch die genauere Berechnung kaum Änderungen, es kommt lediglich zu einer leichten Spannungserhöhung im Bolzen sowie im unteren Bereich des Anschlussteils. Die Auswirkungen auf die Verformungsfigur fallen hier deutlich größer aus, was sich in einer größeren Schiefstellung des Anschlussteils als in der Berechnung mit größeren FE-Elementen äußert.

Daher wird der Achsversatz in einer weiteren Berechnung auf 0,0 mm reduziert, um der so entstandenen Schiefstellung entgegenzuwirken. Die Netzweite der FE-Elemente wird dabei nicht verändert.

Dabei ergibt sich eine weitgehend symmetrische Verformungsfigur, welche nur eine sehr geringe Schiefstellung aufweist (Abbildung 3-49, links). Die Größe der Verformung, gemessen an den beiden oberen Randpunkten des Anschlussteils, fällt mit 19 mm etwas geringer aus.

Die Spannungsverteilung im oberen Bereich des Anschlussteils bleibt weitgehend gleich. Im Bolzen kommt es zu einer Spannungserhöhung, während die Spannungsverteilung im Bolzenlager und im unteren Riegel des Anschlussteils etwas asymmetrischer ausfällt (Abbildung 3-49, Mitte). Des Weiteren kommt es zu einer höheren Spannungskonzentration in der Mitte des Bolzenlagers. In y-Richtung setzt sich die leichte Erhöhung der Spannung im Bolzen und in der Mitte des Bolzenlagers fort, während die Spannungsverteilung in den restlichen Bauteilen gleich bleibt (Abbildung 3-49, rechts).



**Abbildung 3-49: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)**

Bei genauere Berechnung ändern sich die Größe der Verformung und die Spannungsverteilung in der Verbindung zwar kaum, die Verformungsfigur variiert jedoch deutlich. Wird mit einer Netzweite von 2 mm und einer stellenweisen Verdichtung auf 1 mm gerechnet, ergibt sich für den Fall, dass die Mittelachsen von Anschlussteil und Verbindungsstück in einer Linie liegen, das Verformungsbild mit der geringsten Verdrehung. Es kommt in diesem Fall zwar zu einer leicht asymmetrischen Spannungsverteilung, die Verformung selbst bleibt jedoch weitgehend symmetrisch. Des Weiteren entspricht diese Konfiguration auch der am leichtesten einzubauenden, da die beiden Bauteile direkt zentrisch ineinander gesteckt werden können.

### 3-5.14 WEITERE NETZVERFEINERUNG ZUR BEURTEILUNG DES VERFORMUNGSVERHALTENS

Da sich das Verformungsverhalten insbesondere in Bezug auf die Schiefstellung des Anschlusssteils je nach Netzgröße stark ändert, wird nun eine weitere, noch genauere Berechnung durchgeführt. Dafür wird das Netz auf eine reguläre Netzweite von 1,2 mm eingestellt und der Bolzen, das Bolzenlager sowie alle Kontaktvolumen auf 0,6 mm verdichtet (Abbildung 3-50).

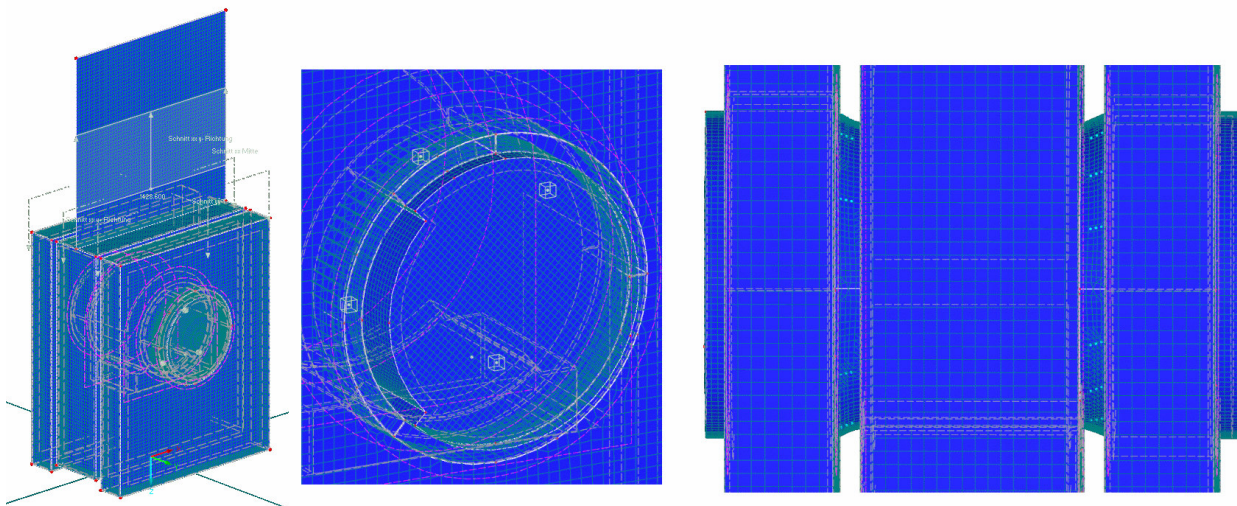


Abbildung 3-50: FE-Netz der Verbindung, gesamter Verbinder (links), Detail Bolzenende (Mitte) und Detail des Bolzenbereichs von oben gesehen (rechts)

Als Elementgröße werden 1,2 mm verwendet. In den Kontaktvolumen und im Bolzen werden Netzverdichtungen auf 0,6 mm eingesetzt, um exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Die Größe der Verformung bleibt in diesem Fall mit 0,25 mm weitgehend gleich, allerdings kommt es zu einer größeren Schiefstellung des Anschlusssteils als in der Berechnung mit größerer Netzweite (Abbildung 3-51, links). Die Spannungsverteilung in x-Richtung im oberen Bereich des Anschlusssteils bleibt gleich wie in der vorherigen Berechnung. Die Spannungen im Bolzen und im Anschlusssteil sind geringer und entsprechen weitgehend der Verteilung bei der Berechnung mit 3 mm Elementgröße und Verdichtungen auf 2mm (Abbildung 3-51, Mitte). Auch die Spannungsverteilung in y-Richtung entspricht weitgehend der aus dieser Berechnung (Abbildung 3-51, rechts).

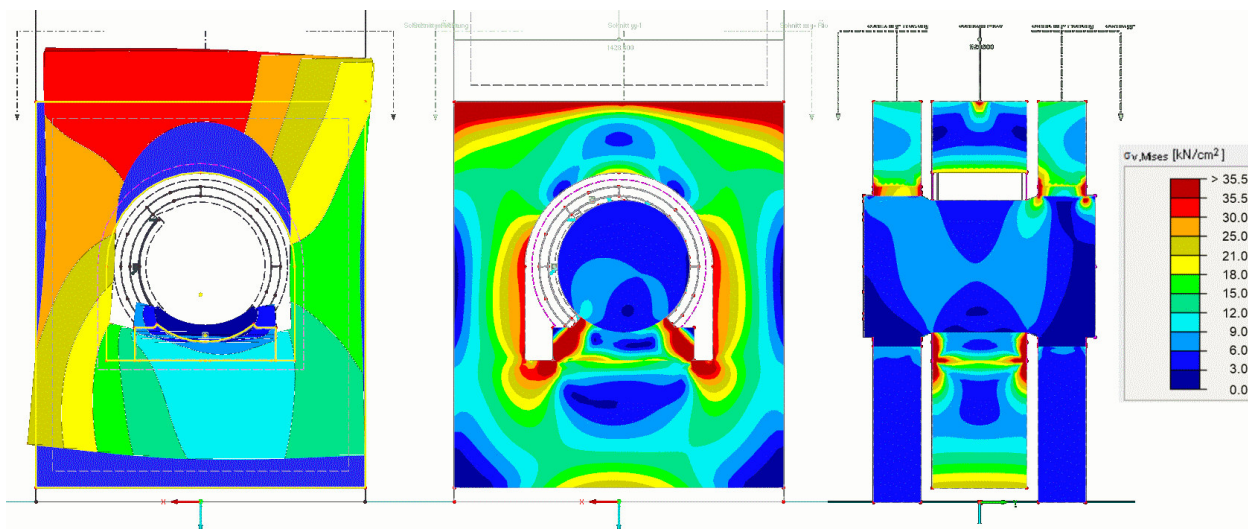


Abbildung 3-51: Verformungsfigur Anschlusssteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts)

Die Ergebnisse dieser Berechnung unterscheiden sich in Bezug auf Verformungsfigur und Spannungsverteilung leicht von der zuvor berechneten Variante mit einer Netzweite von 2 mm und Netzverdichtungen auf 1 mm. Sie decken sich jedoch weitgehend mit jenen aus der „ungenaueren“ Berechnung mit einer Netzweite von 3 mm und einer stellenweisen Netzverdichtung auf 2 mm.

Da die Rechenzeit mit dieser Netzweite mehrere Stunden beträgt und große Datenmengen generiert, ohne jedoch zu deutlich unterschiedlichen Ergebnisse zu führen, werden keine weiteren Berechnungen auf dieser Genauigkeitsstufe durchgeführt.

### 3-5.15 BERECHNUNG MIT HORIZONTALER FESTHALTUNG DES LOCHBLECHS

Da die Verdrehung des Anschlussstücks je nach Netzweite variiert und somit schwer realistisch einzuschätzen ist, und eine Verdrehung des Anschlussstücks aufgrund der Verklebung mit dem anschließendem Holzbauteil ohnehin nicht möglich ist, wird das Anschlussblech durch ein Auflager horizontal festgehalten. Die Festhaltung ist frei verdrehbar und in alle Richtungen bis auf die x-Richtung verschieblich (Abbildung 3-52, links).

Die Auflagerkräfte im Lochblech entsprechen dem Verlauf, welcher bei einer Momentenaufnahme entsteht. (Abbildung 3-52, Mitte, rechts). Die dabei auftretenden Kräfte sind jedoch relativ gering und betragen aufsummiert in etwa 1 kN in beide Richtungen. Der Verlauf ist dabei bei beiden angewandten Berechnungsgenauigkeiten (3 mm und 2 mm Netzweite) weitgehend gleich, lediglich im unteren Bereich nahe dem Anschluss zum Verbinder kommt es zu Abweichungen.

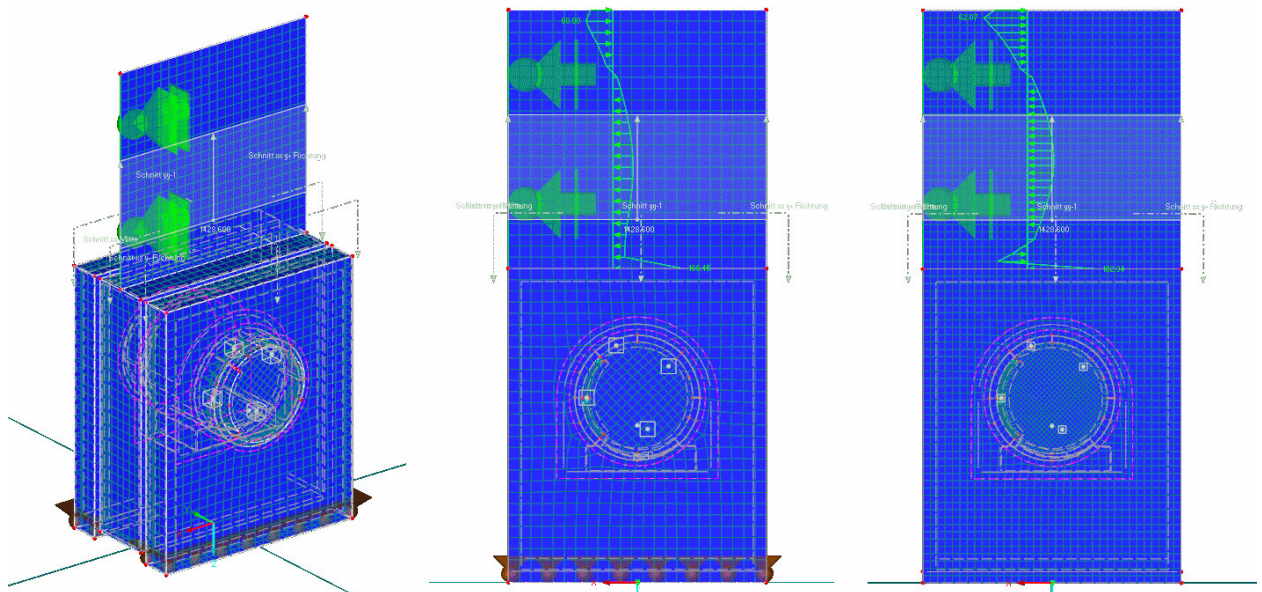


Abbildung 3-52: Anschlussstück mit Festhaltung des Lochblechs (links), horizontale Auflagerkräfte im Lochblech bei Netzweite 3 mm (Mitte) und Netzweite 2 mm (rechts)

Durch die Festhaltung des Lochblechs kommt es zu einer fast symmetrischen Verformungsfigur, die nur eine minimale Schiefstellung aufweist (Abbildung 3-53, links). Die maximale Verformung beträgt 0,22 mm. Die Spannungsverteilung in beiden Schnitten verläuft weitgehend symmetrisch und wird von der Festhaltung kaum beeinflusst (Abbildung 3-53, Mitte, rechts).



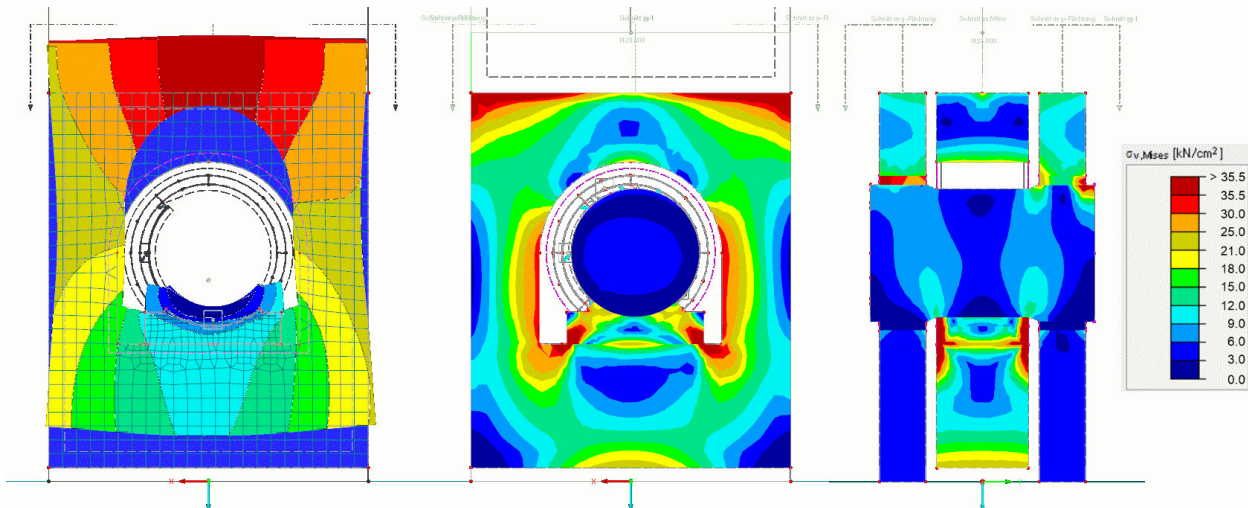


Abbildung 3-53: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), Netzweite 3 mm

Eine Verfeinerung des FE-Netzes ändert weder an der Verformungsfigur noch an der Spannungsverteilung wesentliches (Abbildung 3-54). Beides entspricht weitgehend den Ergebnissen aus der Berechnung mit größerer Elementlänge sowie den Ergebnissen aus der Berechnung ohne Festhaltung. Lediglich die Größe der maximalen Verformung nimmt geringfügig auf 0,19 mm ab.

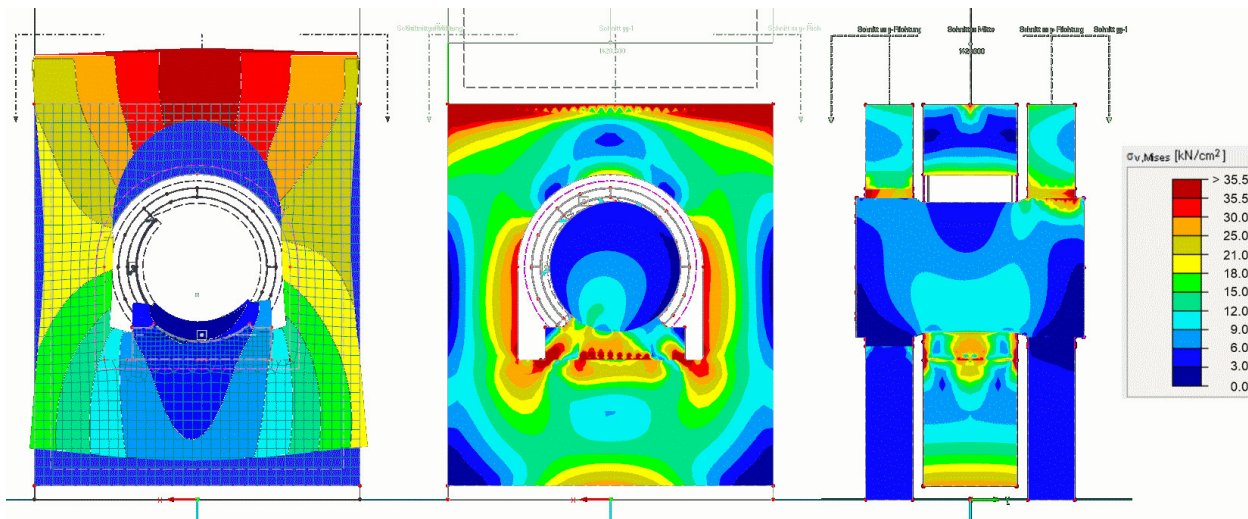


Abbildung 3-54: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), Netzweite 2 mm

Am stärksten wirkt sich die Festhaltung auf die Verformungsfigur aus, welche dadurch deutlich symmetrischer wird. Auf die Spannungsverteilung im Verbinder hat die Festhaltung kaum Auswirkungen. Durch die Behinderung der horizontalen Verschieblichkeit kommt es zwar zu einer zusätzlichen Auflagerreaktion in horizontaler Richtung, diese fällt jedoch im Vergleich zur vertikal wirkenden Belastung sehr gering aus.

Für die weitere Berechnung wird daher die horizontale Festhaltung des Lochblechs beibehalten.

### 3-6 ARBEITSLINIE DES VERBINDERS

Nachdem die Geometrie des Verbinders feststeht, erfolgen die Berechnungen zur Erstellung einer Arbeitslinie des Verbinders. Die dabei zur Verwendung kommenden Abmessungen sind in Abbildung 3-55 dargestellt. Sie unterscheiden sich nur geringfügig von den Abmessungen zu Beginn der FE-Berechnung und betragen 70 mm für die Breite, 45 mm für die Dicke und 170 mm für die Höhe. Der Bolzendurchmesser wird bei 30 mm belassen.

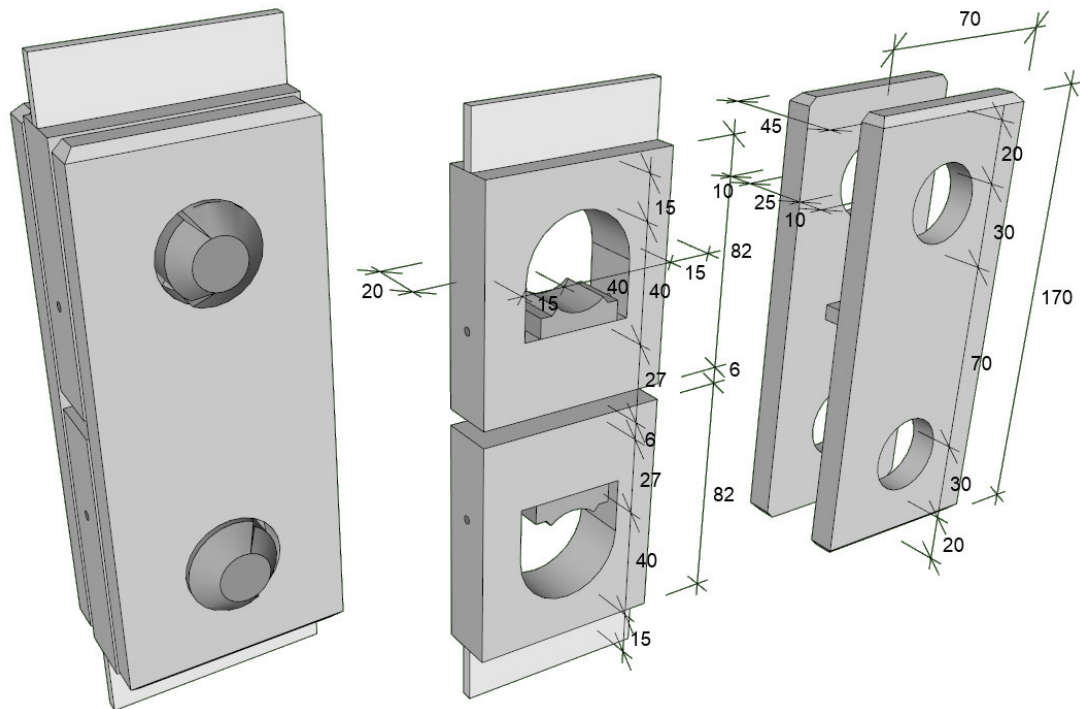


Abbildung 3-55: Abmessungen des Verbinders, mit denen in die Fließberechnung gegangen wird

Um das Materialverhalten des Stahls möglichst realistisch zu simulieren, wird die Stahlarbeitslinie als nichtlinear-elastisches Material, welches ab einer Dehnung von 15% ohne Laststeigerung weiter fließt, eingegeben (Abbildung 3-56, gewählt: Linie für S355). Dieses Materialverhalten wird für alle Bestandteile der Verbindung, ausgenommen der Kontaktvolumen, angenommen. Diese werden linear-elastisch simuliert.

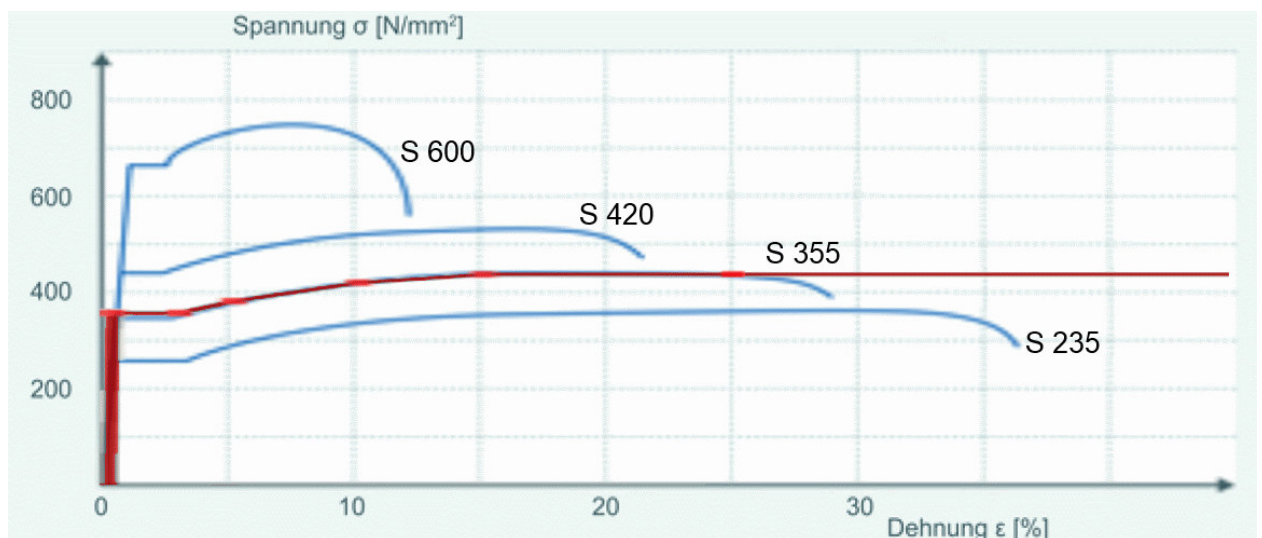


Abbildung 3-56: S355-Arbeitslinie, anhand derer die Berechnung mit Stahlfließen durchgeführt wird [46]

Die Spannungsspitzen aus der linear-elastischen Berechnung bauen sich unter Berücksichtigung des Fließverhaltens des Stahls in einer ersten Berechnung jedoch nur geringfügig ab. Vor allem im Bereich des Bolzenauflagers bleiben diese erhalten. Hier kommt es in den Randbereichen zu Spannungsspitzen, welche in der Fließberechnung zu einem Ausbeulen des Materials im Übergangsbereich zwischen Bolzenauflager und Anschlussstück führen (Abbildung 3-57). Im restlichen Verbinder bleiben die Spannungen vergleichsweise gering.

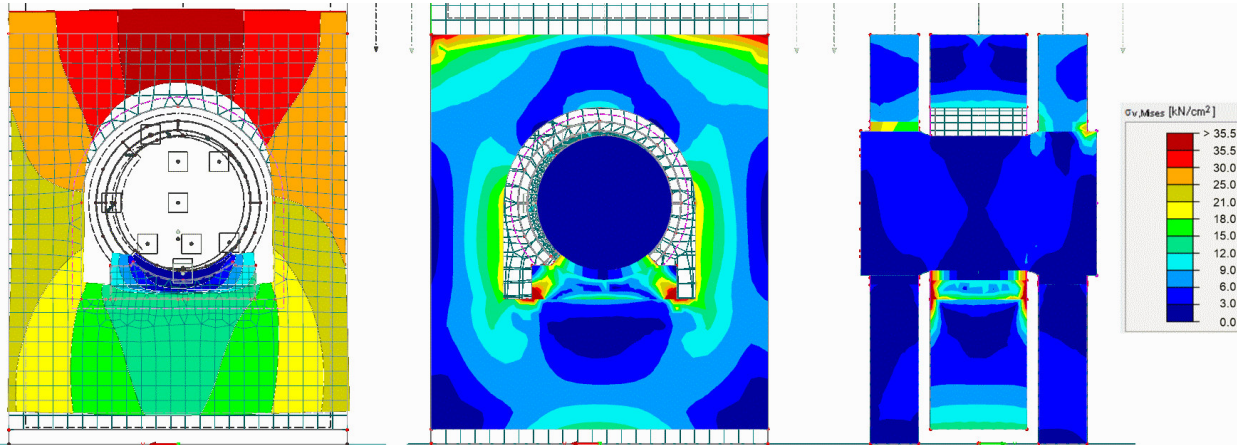


Abbildung 3-57: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), mit gleicher Geometrie wie linear-elastische Berechnung bei 60 kN Belastung

Da das Bolzenauflager in dieser Simulation am höchsten beansprucht wird, wird dessen Höhe variiert, um den daraus resultierenden Einfluss auf die Spannungsverteilung zu ermitteln. Hierbei zeigt sich, dass die Bereiche, welche unter extremer Spannung stehen, umso größer sind, je dünner das Bolzenlager wird (Abbildung 3-58). Dies trifft sowohl auf die Spannungskonzentration in x-Richtung als auch y-Richtung zu.

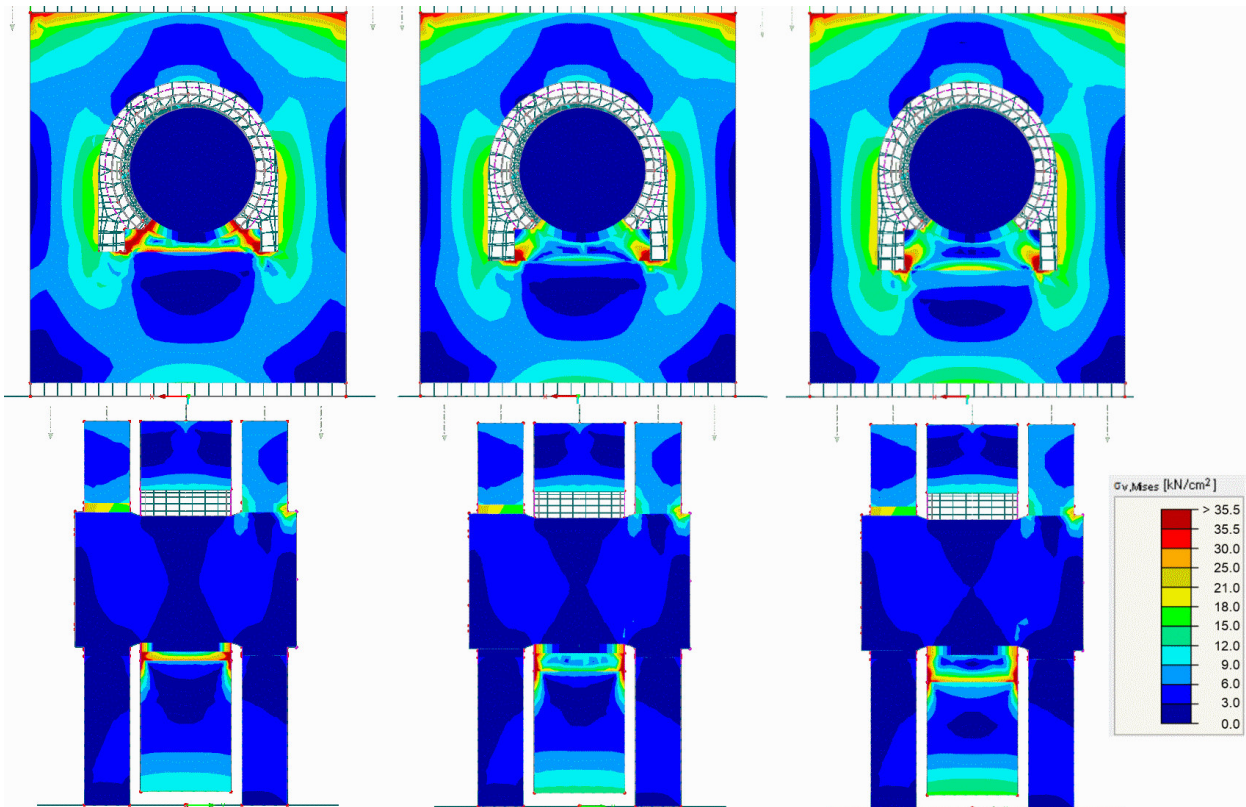
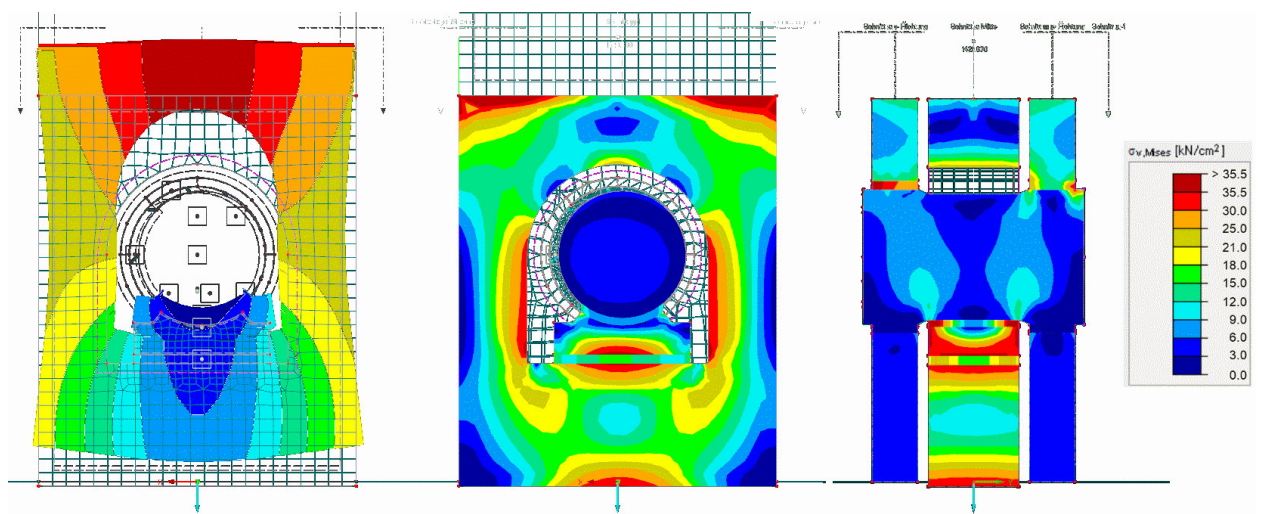


Abbildung 3-58: Spannungsverteilung in x-Richtung (oben) und y-Richtung (unten), bei Bolzenlager mit 4 mm (links), 6 mm (Mitte) und 8 mm (rechts) Stärke

Da die Geometrie des Bolzenlagers einen derart großen Einfluss auf die lokale Spannungsverteilung hat, wird dieses nun genauer betrachtet. Dabei zeigt sich, dass durch die bis hierhin verwendete Modellierung das Bolzenlager durch die Kontaktfläche zwischen Bolzen und Bolzenlager verkleinert wird, da diese innerhalb der Geometrie des Bolzenlagers liegt. Wie die Varianz der Stärke des Bolzenlagers zeigt, führt eine solche Schwächung zu einer erhöhten Spannungskonzentration im Bolzenlager und dem anschließenden Bereich des Anlussteils. Des Weiteren liegt das Bolzenlager in diesem Modell direkt am Anlussteil auf, was dort zu einer nicht kontrollierbaren Kraftübertragung führt.

Daher wird das Berechnungsmodell dahingehend verändert, dass das Bolzenlager in seinen realen Proportionen und unter realistischen Lagerungsbedingungen abgebildet wird. Dazu wird zuerst die vollständige Geometrie des Bolzenlagers eingegeben. Der Kontakt zwischen Bolzenlager und Bolzen wird oben auf das Bolzenlager aufgesetzt, um hier kein Material wegzunehmen. Der Kontakt zwischen Bolzenlager und Anlussteil wird unten am Bolzenlager angebracht, um auch hier kein Material zu entfernen. Beide Kontakte werden auf Ausfall bei Zug und einen Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,2$  eingestellt. Um die daraus resultierende Höhenänderung zu kompensieren, wird das Anlussteil um 4 mm höher als in der Realität ausgeführt. Diese Ungenauigkeit hat jedoch nur marginale Auswirkungen auf das Ergebnis.

Nun treten deutliche Änderungen in Verformungsfigur und Spannungsverteilung auf. Während das Bolzenlager in der Mitte stark nach unten gedrückt wird, heben seine Ränder ab, da sie keine Zugkräfte aufnehmen können (Abbildung 3-59, links) Die Gesamtverformung bleibt mit 0,22 mm gleich groß. In x-Richtung verschwinden die Spannungsspitzen an den Rändern des Bolzenlagers und stattdessen bildet sich eine dem Biegetragverhalten ähnliche Spannungsverteilung heraus, welche ihr Maximum in der Mitte des Bolzenlagers hat (Abbildung 3-59). In y-Richtung treten zwar immer noch Spannungsspitzen in den Randbereichen des Bolzenlagers auf, diese werden durch die Fließberechnung nun jedoch deutlich besser verteilt (Abbildung 3-59, rechts).



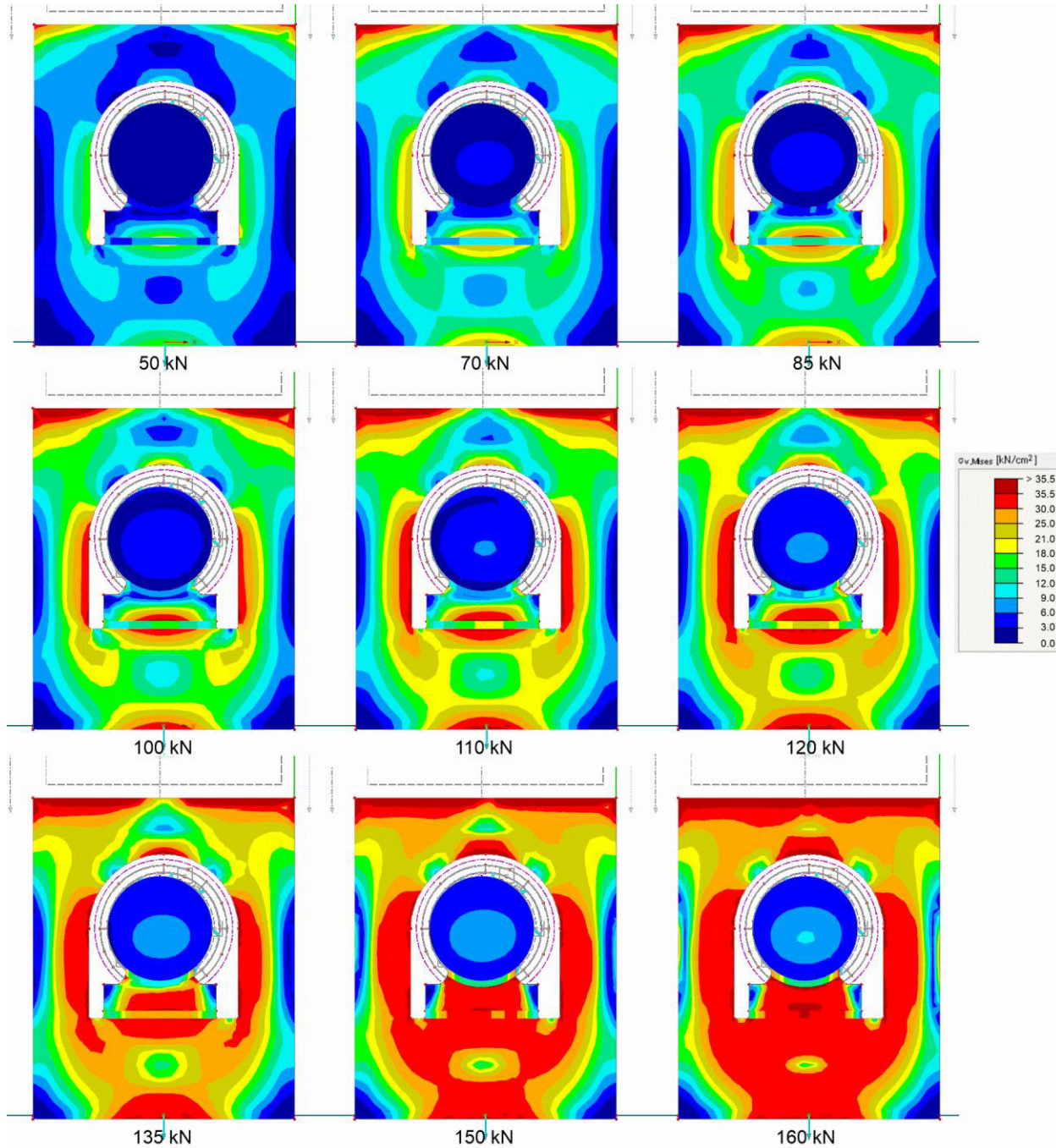
**Abbildung 3-59:** Verformungsfigur Anschlusssteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), mit angepasster Geometrie bei einer Belastung von 100 kN

Da diese Konfiguration die plausibelsten Ergebnisse liefert, wird damit die Arbeitslinie erstellt. Zur Berechnung dieser wird der Verbinder mit einer schrittweise ansteigenden Belastung beansprucht und das Ergebnis je Lastschritt in einem Diagramm eingetragen. Dies wird zuerst in groben Schritten durchgeführt, welche dann an den signifikanten Stellen verdichtet werden, um den „realen“ Verlauf möglichst gut abzubilden.

Zur Berechnung wird auf Grund der langen Rechenzeit ein vergleichsweise grobes FE-Netz mit einer Elementgröße von 3 mm verwendet, welches in den Kontaktvolumen, im Bolzen und im Bolzenlager auf 2 mm verdichtet wird.

Die Spannungsverteilung ausgewählter Belastungsstufen ist in Abbildung 3-60 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Spannung von Laststufe zu Laststufe zunimmt. Während anfangs noch das gesamte

Anschlussstiel im elastischen Bereich ist, gehen ab ca. 70 kN langsam einzelne Bereiche in den plastischen Bereich über, was einen ersten, kaum erkennbaren Knick in der Arbeitslinie hinterlässt (Abbildung 3-62). Ab etwa 100 kN folgen größere Bereiche, vor allem in der Nähe des Bolzenlagers, nach, was zu einem über dem elastischen Niveau liegenden Anstieg der Verformung führt. Ab etwa 135 kN gehen zusätzlich große Bereiche der Vertikalverbindung und des unteren Riegels in den plastischen Zustand über, was die Gesamtverformung noch einmal deutlich erhöht.



**Abbildung 3-60: Spannungverteilung im Anschlussstiel unter verschieden hoher Belastung**

Um ein möglichst umfassendes Bild des Verformungsverhaltens des Verbinders zu erhalten, wird die Verformung an verschiedenen Punkten betrachtet. Dies sollte es ermöglichen, zu bestimmen, bei welchen Lasten die einzelnen Verbindungssteile jeweils zu fließen beginnen. Eine Übersicht über die betrachteten Punkte gibt Abbildung 3-61.

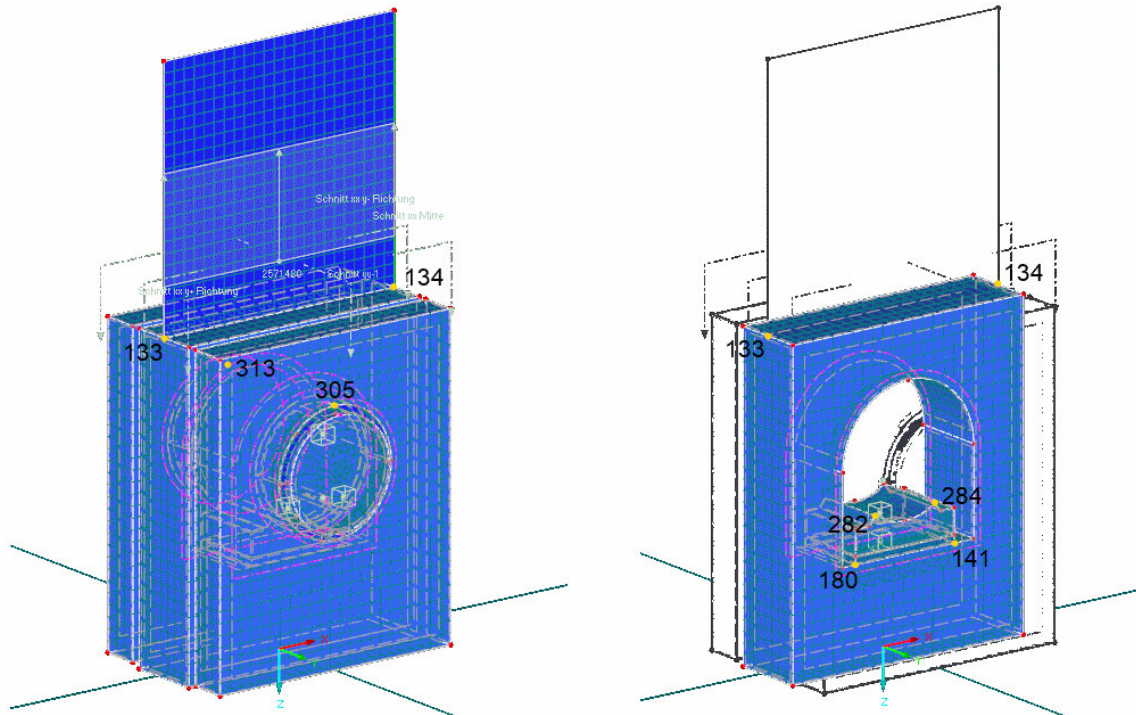


Abbildung 3-61: Punkte, an denen die Verformung betrachtet wird

Nach Berechnung einiger Laststufen ergibt sich aus dem Verlauf der Knotenverformungen die Arbeitslinie wie in Abbildung 3-62 dargestellt. Wie zu erwarten, beginnt diese mit einem linear-elastischen Teil, welcher an den verschiedenen Messpunkten bei unterschiedlichen Lasten in den plastischen Bereich übergeht. Erste Abweichungen vom linear-elastischen Verhalten zeigen sich bei etwa 80 kN ein und nehmen ab ca. 100 kN zu. Zu starken plastischen Verformungen kommt es ab einer Belastung von ca. 140 kN. Ein großflächiges Plastifizieren des Verbinders mit extremer Verformungszunahme tritt ab ca. 170 kN auf. Knapp darüber wird ein vollständiges Versagen des Verbinders erwartet.

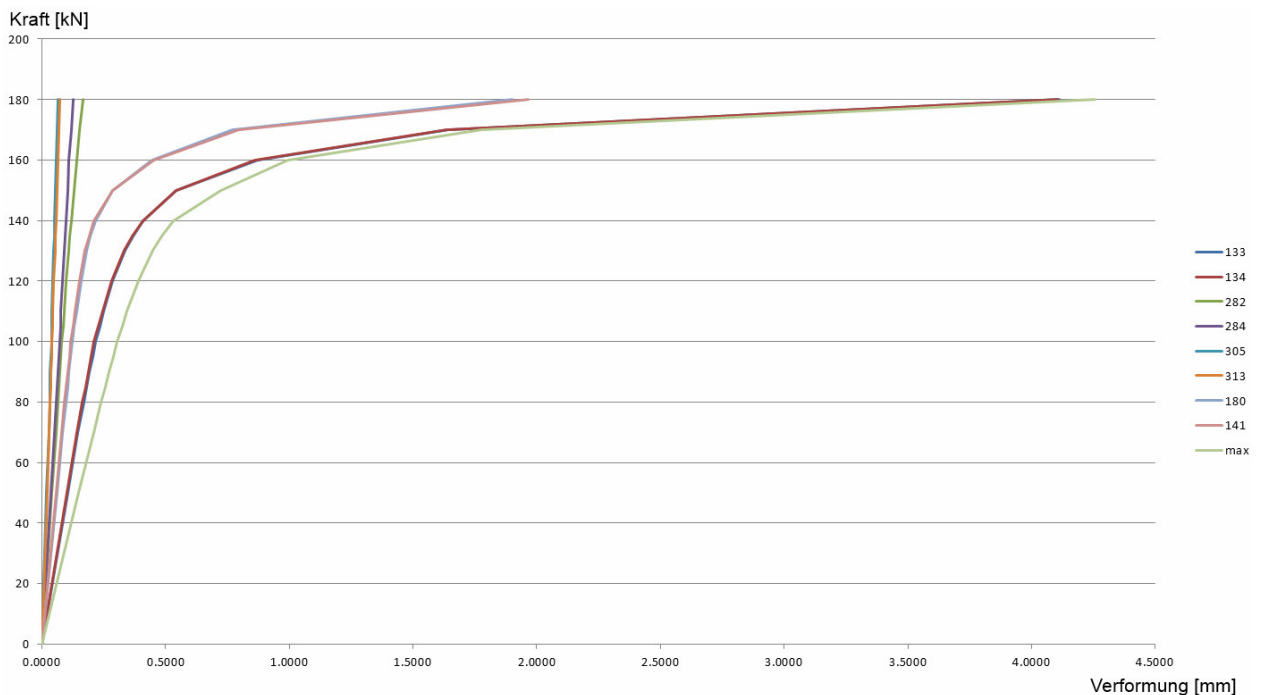


Abbildung 3-62: Arbeitslinie für verschiedene Punkte des Verbinders

Die aus der Fließberechnung erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass der Verbinder die geforderte Last von 100 kN problemlos aufnehmen kann. Des Weiteren treten unter 100 kN kaum plastische Verformungen auf, was einen sicheren Einsatz sowie mehrmaliges Ein- und Ausbauen des Verbinders ermöglicht.

Um die Tragfähigkeit des Verbinders zu begrenzen und ein vorzeitiges Versagen der Verbindung in der Klebefuge zu verhindern, kann der Verbinder an einzelnen Stellen noch gezielt geschwächt werden. Dies wird jedoch aufgrund des dazu nötigen Rechenaufwands im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr behandelt und stellt einen ersten Ausblick hinsichtlich weiterer Arbeiten zu diesem Thema dar.

## **3-7 ERKENNTNISSE AUS DER BERECHNUNG**

---

In der Arbeitslinie des Verbinders zeigt sich, dass dieser die geforderte Last von 100 kN problemlos aufnehmen kann. Auch das Verformungsverhalten, welches große plastische Verformungen vor dem Versagen der Verbindung hervorruft, entspricht dem geforderten Verlauf.

Die Versagenslast könnte eventuell noch verringert werden, um ein Versagen der Verbindung im Stahlteil auch mit weniger Klebefläche zu erreichen, was einer weiteren Optimierung des Verbinders bedarf.

Der Verbinder entspricht somit den an ihn gestellten Erwartungen. Die in diesem Kapitel optimierte Geometrie kann zur Herstellung eines Prototyps verwendet werden, an dem dann Zugversuche durchgeführt werden können.

# KAPITEL 4: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 4-1 ZUSAMMENFASSUNG

Bevor auf die Verbindungstechnik im Holzbau eingegangen wurde, wurde eine umfassende Recherche im angrenzenden Themenbereich durchgeführt. Um die Grundlagen heraus zu arbeiten, wurde zuerst auf den Holzbau im Allgemeinen und die Holzmassivbauweise im Speziellen eingegangen. Danach erfolgte ein kurzer Abriss über die Baugeschichte mit Fokus auf während dieser eingesetzte, vorgefertigte Bauelemente sowie die dabei verwendete Verbindungstechnik.

Danach wurde kurz die im Holzbau gebräuchliche Verbindungstechnik beleuchtet, um darzulegen, mit welcher Fügetechnik man es auf der Baustelle meist zu tun hat. Von dieser „standardmäßigen“ Verbindungstechnik ausgehend wurde der Bogen dann weiter zu bereits im Einsatz befindlichen Systemverbindern gespannt. Dabei wurden nicht nur für den Holzbau entwickelte Systeme betrachtet, sondern beispielsweise auch solche aus dem Stahlbau, dem Möbelbau und der Hochseeschifffahrt.

In der Recherche hat sich gezeigt, dass es zwar viele verschiedene Ansätze zur systematischen Fügung von Bauteilen gibt, diese aber vor allem im bautechnischen Bereich noch wenig ausgereift und ganzheitlich einsetzbar sind. Daher wurden Anforderungen definiert, welche ein solches modular aufgebautes Verbindungssystem neben den üblichen Anforderungen wie Tragfähigkeit, Steifigkeit und Duktilität noch erfüllen muss, um eine möglichst breite Anwendung desselben zu ermöglichen.

Basierend auf dieser Anforderungsliste wurden drei verschiedene Varianten eines Verbindungssystems erarbeitet. Dabei wurde vor allem darauf geachtet, dass die Verbindung schnell montier- und demontierbar ist und mit einer möglichst kleinen Zahl von Verbindungsmitteln eine möglichst große Zahl von Verbindungssituationen abgebildet werden kann.

Aus diesen Varianten wurde dann die unter allen betrachteten Gesichtspunkten am besten geeignete Variante ausgewählt. Diese besteht aus einem Anschlussstück, welches direkt am Bauteil angebracht ist, einem Verbindungsstück, welches zwischen den Anschlussstücken der beiden angrenzenden Bauteile liegt und einem Bolzen, welcher diese Teile miteinander verbindet. Der Bolzen weist dabei ein exzentrisches Mittelstück auf, welches die Verbindung durch Verdrehen um ca. 90° fixiert und damit einen Kraftschluss ohne vorherigen Schlupf sowie eine schnelle und einfache Montage ermöglicht.

Diese Verbindung wurde dann in einer Handrechnung grob auf eine Last von 100 kN vordimensioniert, was bereits eine relativ genaue Einschätzung der Bauteilabmessungen ermöglichte. Mit diesen Abmessungen wurde dann eine umfangreiche Serie von FE-Berechnungen gestartet.

Dabei wurde die Geometrie zuerst mit Hilfe einer linear-elastischen Berechnung optimiert und an die internen Kraftflüsse angepasst. Dabei wurde versucht, über den gesamten Verbinder hinweg eine möglichst hohe Materialausnutzung unter der gegebenen Zielbelastung von 100 kN zu erreichen. Danach wurde mit Hilfe einer genaueren Berechnung, welche das Fließverhalten des Materials berücksichtigt, eine Arbeitslinie des Verbinders erstellt.

In dieser ist klar ersichtlich, dass sich der Verbinder bis zu den angepeilten 100 kN weitgehend elastisch verhält. Darüber kommt es zu ersten plastischen Verformungen, welche ab 140 kN auf weite Bereiche des Verbinders übergreifen und ab 170 kN extrem zunehmen. Damit ist gewährleistet, dass der Verbinder die



geforderte Last ohne Probleme aufnehmen kann und gleichzeitig ein plastisches Versagensverhalten aufweist, wie es in der Verbindungstechnik üblicherweise gewünscht wird.

Aus den Ergebnissen dieser Berechnungen wurde dann die Geometrie eines möglichen Prototyps definiert, an welchem eine Prüfserie durchgeführt werden kann.

## 4-2 AUSBLICK

---

Um die Funktionsfähigkeit der Verbindung zu überprüfen, sollten als nächster Schritt Prüfungen an einer Kleinserie durchgeführt werden. Deren Ergebnisse werden dann mit der FE-Berechnung verglichen, um eine bessere Grundlage für die nachfolgenden Optimierungen und Weiterentwicklungen zu erhalten.

Damit sollte bewiesen werden, dass das Grundelement des hier entwickelten Systems problemlos alle geforderten Kräfte aufnehmen kann und auf eine für die gesamte Verbindungskette günstige Weise versagt.

Dann wird zuerst das Basis-Verbindungselement weiter optimiert. Dabei sollte die Tragfähigkeit des Verbindungsstücks, welches bis jetzt deutlich stärker als das Anschlussstück ist, so weit verringert werden, dass dieses bei knapp über 100 kN zu fließen beginnt und bereits bei einer deutlich niedrigeren Last versagt, als dies beim derzeitigen Anschlussstück der Fall ist.

Dies würde es ermöglichen, das Anschlussstück deutlich besser mit dem Bauteil zu verbinden und die Lasteinleitung in das anliegende Brettsperrholzelement stark vereinfachen. Der Versagensmechanismus wird dadurch in das Verbindungsstück verschoben, dessen Tragfähigkeit sich durch seine „freie“ Lage innerhalb der Verbindung sehr genau bestimmen lässt.

Ist die Geometrie des Verbindungsstücks hinreichend genau berechnet, sollte es wieder einem praktischen Versuch unterzogen werden, um einen Vergleich zur Berechnung zu erhalten. Da nun das Verbindungsstück bei deutlich geringeren Lasten als das Anschlussstück versagen sollte, lassen sich möglicherweise mit lediglich zwei Anschlussstücken mehrere Verbindungsstücke testen.

Neben den reinen Zugversuchen kann auch getestet werden, welche Aufnahmefähigkeiten für Horizontal- bzw. Schublasten der Verbinder besitzt. Sind diese sehr gering, wird ein weiterer Verbinder zur Schubübertragung entwickelt und getestet, um die Grundelemente des Verbindungssystems zu komplettieren.

Sind diese Tests abgeschlossen, verfügt man über das Basis-Set dieses Verbindungssystems, mit welchem sich der einfachste Verbindungsfall, der stumpfe Stoß von zwei Brettsperrholzelementen, realisieren lässt. Diese Konfiguration wird nun als Basis für den Aufbau eines umfassenden Verbindungssystems genommen, mit welchem Stück für Stück die gängigsten Verbindungsfälle abgedeckt werden. Dazu zählen Wand-Deckenstöße mit endender oder durchgehender Wand oder Decke sowie Eckstöße. Auch horizontale Bauteilstöße und Anschlüsse von Stützen und Trägern sollten betrachtet werden.

Ist das System dann für die gängigsten Kombinationen flächiger Brettsperrholzelemente erweitert, sollte eine Lösung zur Anwendung in der Raumzellenbauweise gefunden werden. Dazu werden Erweiterungen für das Verbindungssystem in der Art geplant, dass zuerst die Raumzellen durch die vorhin entwickelten Verbinder zusammengefügt werden. Dann erfolgt die Baustellenmontage der Raumzelle an den gleichen Punkten, was eine genaue Kontrolle über den internen Kraftfluss ermöglicht.

Somit wird die gesamte tragende Struktur eines Gebäudes, egal ob es aus flächigen oder räumlichen Elementen besteht, vom gleichen Verbindungssystem abgedeckt. Dieses kann nun noch zusätzlich erweitert werden, beispielsweise mit Anschlussmöglichkeiten für Stiegenläufe, Balkone und Fassadenelemente.

Das Ziel ist es letztendlich, den gesamten Bauablauf stark zu vereinfachen und zu beschleunigen. Mithilfe einer parallel dazu erfolgenden Modularisierung im Haustechnikbereich und dem stärkeren Einsatz der Raumzellenbauweise soll ein Baukastensystem für Gebäude verschiedenster Art entstehen, welches die

Möglichkeit bietet, aus standardisierten Bauteilen innerhalb kurzer Zeit in großem Maßstab günstige, aber trotzdem hohen Qualitätsansprüchen genügende Gebäude zu errichten. Dies alles sollte natürlich auf sozial, ökologisch und ökonomisch nachhaltige Weise erfolgen, trotz Massenfertigung keine Monotonie aufkommen lassen und eine leichte, nachträgliche Adaptierbarkeit der Gebäude für zukünftige Bedürfnisse ermöglichen.



# ANHANG A VERZEICHNISSE

## A-1 Literaturverzeichnis

1. **Augustin, Blaß, Bogensberger, Ebner, Ferk, Fontana, Frangi, Hamm, Jöbstl, Moosbrugger, Richter, Schickhofer, Thiel, Traetta, Uibel.** *BSPhandbuch*. Graz : Verlag der Technischen Universität Graz, 2010. 978-3-85125-109-8.
2. **Cziesielski, E.** *Hölzerne Dachflächentragwerke. Holzbautaschenbuch*. 1974, 7.
3. **G. Dröge, K.-H. Stoy.** *Grundzüge des neuzeitlichen Holzbaues*. Berlin : Ernst, 1981.
4. **Lischke, Norbert.** *Zur Anisotropie von Verbundwerkstoffen am Beispiel von Brettlagenholz*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1985. 318149805X; 9783181498057.
5. *Entwurfsgrundlagen und Konstruktionsprinzipien von Holzstegen [Design principles and construction principles of pedestrian timber bridges]. 21. Fortbildungskurs der Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung (SAH) "Brücken und Stege aus Holz". Steurer, A.* Zürich : s.n., 1989.
6. **Schickhofer, Gerhard.** *Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten, flächenhaften Holzstrukturen [Rigid and Flexible Composite Action of Laminated Timber Structures]*. Graz : s.n., 1994.
7. **R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel.** *Cross laminated timber (CLT): overview and development*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2016.
8. **Gerhard Schickhofer, Andreas Ringhofer, Markus Tripolt.** *1. Klagenfurter Holzbau-Fachtagung*. Klagenfurt, Graz : Klagenfurter Messe Betriebsgesellschaft mbH, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2014. ISBN: 978-3-200-03730-4.
9. **Brandner, Reinhard.** *Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): State-of-the-Art Report*.
10. *A Status Report from the CLT Hot Spot in Europe/Austria.* **G. Schickhofer, G. Flatscher, K. Ganster, R.Sieder, S. Zimmer.**
11. **Organization, Austrian Standards.** *ÖNORM EN 14080: 2013 08 01*. 2013.
12. **Institute, Austrian Standards.** *ÖNORM EN 16351; Holzbauwerke, Brettsperrholz, Anforderungen*.
13. **CEN.** Eurocode 5 EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part -1-: General - Common rules and rules for buildings. [NORM]. Brussels, Belgium : European Committee for Standardization, 2004.
14. **Bogensberger, Thomas.** *Holzbau 2 Studienblätter, BSP Scheibe, Steifigkeiten, Festigkeiten, Beispiel*. Graz : s.n., 2016.
15. **Lahner, Stefan.** *Brandverhalten von Brettsperrholz (BSP)*. 2009.
16. **Gerald Staib, Andreas Dörrhöfer, Markus Rosenthal.** *Element + Systeme*. München : s.n., 2008. 978-3-7643-8655-9.
17. **Barankay, Tina.** *Modulare Bauformen – Trend oder Zukunftsmodell? Detail*. 2016.
18. *Vorfertigung, warum eigentlich?* **Schlüter, Christian.** Berlin : s.n., 2016.
19. **Caroline Uittenbroek, Will Macht.** *Sustainable Containers: Cost-Effective Student Housing*. 2009.
20. **Otto Kapfinger, Ulrich Wieler.** *Riess Wood<sup>3</sup>, Modulare Holzbausysteme*. Wien : SpringerWienNewYork, 2007. 978-3-211-32771-5.

21. **Schickhofer, Gerhard.** *Holzbau - Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz.* Graz : s.n., 2009.
22. **Flatscher, Georg, et al., et al.** *Zusammenfassende und weiterführende Arbeiten zum Verhalten von BSP-Tragwerken bei der Beanspruchungssituation Erdbeben.* holz.bau forschungs gmbh. Graz : holz.bau forschungs gmbh, 2013. Report.
23. **Hüttmann, Simone.** BefestigungsFuchs.de. [Online] 10. März 2017. [Zitat vom: 10. März 2018.] <http://www.befestigungsfuchs.de/blog/wissensreihe-terrassenschraube-material-und-aufbau/>.
24. *High-capacity-hold-down for tall timber buildings.* **Xiaoyue Zhang, Marjan Popovski, Thomas Tannert.** Wien : s.n., 2016.
25. **Jelec, Blazenca.** *Untersuchungen zugbeanspruchter faserparallel eingeklebter Bleche in Furnierschichtholz aus Buche.* 2016.
26. *In Holz Eingeklebte Verbindungsmittelle aus Metall.* **Leander Bathon, Oliver Bletz.** 2008.
27. **P. Maydl, J. Tritthart.** *Baustofflehre GL Vorlesung.* Graz : s.n., 2013.
28. **Unterweger, Harald.** *Stahlbau GL.* Graz : s.n., 2012.
29. **Heukelbach, Bernd.** *Steckverbindungen.* Essen : s.n., 2001.
30. **Eric Murdoch, David Tozer.** *A Masters Guide to Container Securing.* 2012.
31. **H. S. Lew, Fahim Sadek, Erik D. Anderson.** *Strength Evaluation of Connectors for Intermodal Containers.* 2000.
32. **Manfred Augustin, Georg Flatscher.** *Nachweisführung für SHERPA-Verbindungen auf Basis des SHERPA-Handbuchs.*
33. **GmbH, SHERPA Connection Systems.** *Montageanleitung XS-XXL-Serie.*
34. **Anton Kraler, Josef Kögl, Roland Maderebner, Michael Flach.** *Sherpa-CLT-Connector for Cross Laminated Timber (CLT) Elements.*
35. **Roland Maderebner, Josef Kögl.** *Systemverbinder für Holzflächenelemente aus Brettspertholz.*
36. **A. Polastri, R. Brandner, D. Casagrande.** *Experimental Analysis of a new connection system for CLT structures.*
37. **Andrea Polastri, Albino Angeli.** *AN INNOVATIVE CONNECTION SYSTEM FOR CLT STRUCTURES: EXPERIMENTAL – NUMERICAL ANALYSIS.* 2014.
38. **Philipp Zingerle, Roland Maderebner, Michael Flach.** *System solutions for point-supported wooden flat slabs.* 2016.
39. **Roberto Scotta, Luca Marchi, Davide Trutalli, Luca Pozza.** *A Dissipative Connector for CLT Buildings: Concept, Design and Testing.* 2016.
40. **Buchmann, George.** *Gartenmöbel aus Holz selber Bauen.* Augsburg : Augustus-Verlag, 1993. 3-8043-0219-X.
41. **Hans Winkelmann, Ellen Kappel, Max Droll, Carl Friedrich Hügel.** *Das Möbelfachbuch.* Hamburg : Ferdinand Holzmann Verlag, 1956.
42. **Pracht, Klaus.** *Massivholz-Möbel selber bauen.* Augsburg : Augustus Verlag, 1993. 3-8043-0195-9.
43. **Scheulenburg, V.M.V.** *Produktkatalog 2016 2017.* Rinteln, Deutschland : s.n.
44. **Verbindungstechnik, Lamello AG.** *Lamello Katalog 2017/2018.*
45. **Bathon, Leander.** *Starre und Duktile Klebeverbindungen für BSP-Anwendungen.* 2015.
46. **GmbH, Institut Feuerverzinken.** *Arbeitsblätter Feuerverzinken, B.3 Höherfeste Stähle.* Düsseldorf : s.n., 2016.

47. **Bachmann, Hugo.** *Erdbebensicherung von Bauwerken*. 2. Zürich : Birkhäuser Verlag, 2002. 3-7643-6941-8.
48. *Influence of Openings on Shear Capacity of Wooden Walls*. **Dujic, Bruno, Klobcar, Simona and Zarnic, Roko.** Bled : CIB-W18/40-15-6, 2007. Proceedings of the 40th CIB-W18.
49. **Systems, Sherpa Connection.** *Simply Ingenious*.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Übersicht über die verschiedenen Holzbauweisen und ihre Entwicklung bzw. Kombination [1] .....	3
Abbildung 2-2: allgemeiner Aufbau von Brettsperrholz mit (links) und ohne Fugen (rechts) [1].....	5
Abbildung 2-3: Entwicklung Brettsperrholz, zeitlicher Verlauf von Innovationsschritten und Produktionsmenge [9] [10].....	6
Abbildung 2-4: Verwendung von BSP-Elementen in tragender und aussteifender Funktion [1] .....	7
Abbildung 2-5: verschiedene Querschnittsformen und Anwendungen von Brettsperrholz [1] .....	7
Abbildung 2-6: Einsatzmöglichkeiten von BSP, z.B. als Kleintafeln, Großtafeln und Raumzellen [1].	8
Abbildung 2-7: Formen von Faltungen, welche auch in BSP ausgeführt werden können [1] .....	8
Abbildung 2-8: Einteilung der Holzwerkstoffe nach Zerlegungsgrad und Orientierung des Ausgangsprodukts [1].....	9
Abbildung 2-9: Übersicht über die einzelnen Herstellungsschritte von Brettsperrholz .....	10
Abbildung 2-10: Rissbildung bei BSP unter niedriger Luftfeuchte mit (links) und ohne (rechts) Seitenverklebung [1] .....	11
Abbildung 2-11: Beleimung von BSP-Elementen an einzelnen Lamellen (links) und über die gesamte Fläche (rechts) [1] .....	11
Abbildung 2-12: Hauptrichtungen, in welche Holz unterschiedliche Eigenschaften aufweist [1].....	13
Abbildung 2-13: Normal- und Schubspannungsverlauf einer 5-schichtigen BSP-Platte zufolge einer Plattenbiegebeanspruchung [1] .....	14
Abbildung 2-14: Schubabtragung im BSP, Mechanismus 1 „Schub“ (links) und Mechanismus 2 „Torsion“ (rechts) [14] .....	14
Abbildung 2-15: Abbrandkurven von Brettsperrholz mit brandbeständigem und nicht brandbeständigem Klebstoff [15].....	15
Abbildung 2-16: Jurte als Beispiel für frühe transportable Behausung, Tragkonstruktion (links) und mit Textilien bespannt (rechts) [16] .....	16
Abbildung 2-17: Zikkurat von Ur, 2100 v. Chr., errichtet aus Ziegeln [16] .....	17
Abbildung 2-18: handwerkliche Vorfertigung von Bauteilen am Beispiel Fachwerkhaus (links) und Bezeichnung seiner Bestandteile (rechts) [16] .....	18
Abbildung 2-19: traditionelles japanisches Haus, Grundriss (links) und Einblick (rechts) [16].....	18
Abbildung 2-20: Kristallpalast in London, Innenansicht (links) und Dachbereich von außen (rechts) [16] .....	19
Abbildung 2-21: Bogardus Factory, New York 1848, (links), Schokoladenfabrik Noisel-sur-Marne 1872, (Mitte) und Schnitt Kornmühle 1840 (rechts) [16] .....	19
Abbildung 2-22: Versetzen eines Hennebique-Hauses als erste Beton-Raumzelle 1896 (links), „Unit Structural Concrete Method“ 1916, Fertigteil-Skelettbau-System für Industrie- und später auch Wohnbauten (rechts) [16].....	20

Abbildung 2-23: Siedlung Westhausen, Frankfurt am Main, Fertigteilebauten aus Leichtbeton (links), dazugehörige Systemskizze mit Plattenunterteilungen und Schnitt, „System Stadtrat Ernst May“ (rechts) [16] .....	20
Abbildung 2-24: System des fabrizierten Fachwerks (Fafa), Holzrahmen mit Bimsbetonhohlstein-Ausfachung, Einbringen der Steine (links), Haus einen Tag vor Fertigstellung (Mitte), fertiges Haus (rechts) [16] .....	21
Abbildung 2-25: Errichtung eines Hauses der „General Panel Corporation“ (links), möglicher Grundriss mit dem „Packaged House“-System (rechts) [16] .....	22
Abbildung 2-26: Baukastensystem MAXI, 1961, für weitgespannte Hallen (links), Bauteile des MERO-Systems, 1940 (Mitte) und geodätische Kuppel des US-Pavillons auf der Weltausstellung in Montreal 1967 (rechts) [16] .....	22
Abbildung 2-27: Siedlung „Les Arcades du Lac“, Saint-Quentin-Yvelines 1982 (links), SCDS in Palo Alto 1965, Kombination verschiedener Subsysteme, die alle miteinander kompatibel sind (rechts) [16] .....	23
Abbildung 2-28: Wohnexperiment Genter Straße, München 1972 (links) und verwendete Konstruktion als Rohbau (rechts) [16] .....	24
Abbildung 2-29: tragender Rahmen mit Aussteifungsdiagonalen und Bodenkonstruktion (links), Typen von Raumzellen: offene Zelle (Mitte oben), zweiseitig offen (oben rechts), einseitig offen (Mitte unten) und Vollzelle (unten rechts) [16] .....	28
Abbildung 2-30: Einsatz der Betonraumzellenbauweise für das Habitat 67, Montreal (oben) und dabei verwendete Bauteile (rechts), Ausschalen einer Raumzelle (links), montagefertige Raumzelle (Mitte) [16] .....	29
Abbildung 2-31: Versetzen von Holz-Raumzellen (links), Schnitt durch Wohnhaus in Massivholz-Raumzellenbauweise (Mitte), drehbarer Wohnwürfel als Holzraumzelle (rechts) [16].....	30
Abbildung 2-32: Container im Bauzustand (links), Blick in den Innenhof des Studentenheims (rechts) [19] .....	31
Abbildung 2-33: Fertigung der Raumzellen im Werk (links) und Montage auf der Baustelle (rechts) [20] .....	32
Abbildung 2-34: Montage der Raumzellen (links), aus Raumzellen zusammengesetztes Gebäude vor dem Innenausbau (rechts) [20] .....	33
Abbildung 2-35: Einteilung der am häufigsten im Holzbau verwendeten Verbindungen bzw. Verbindungsmittel [21] .....	34
Abbildung 2-36: gerades Blatt (links), gerades Blatt mit Zapfen (Mitte) und schräges Hakenblatt (rechts) [21] .....	35
Abbildung 2-37: Eck- und Winkelverbindungen, Scherblatt (links), kammförmiges Eckblatt (Mitte) und schwalbenschwanzförmiges Blatt mit Brust (rechts) [21].....	35
Abbildung 2-38: einfacher Versatz mit Zapfen (links), Fersenversatz (Mitte) und doppelter Versatz (rechts) [21] .....	36
Abbildung 2-39: Aufklauungen im Dachstuhlbereich, Sparrenkerbe (links) und Wiener Kastl (rechts) [21] .....	36
Abbildung 2-40: Ganzkamm (links), Kreuzkamm (Mitte) und schwalbenschwanzförmiger Kamm (rechts) [21] .....	37
Abbildung 2-41: Zugstoß mit Hartholzdübel (links) und anliegende Spannungen am Hartholzdübel (rechts) [21] .....	37
Abbildung 2-42: schematische Darstellung einer ingenieurmäßigen Holzverbindung als Kette von Kraftübertragungs-mechanismen zwischen verschiedenen Materialien .....	38

Abbildung 2-43: Holzbauschrauben mit Vollgewinde (links), Teilgewinde (Mitte) und verschiedene Durchmesser einer Vollgewinde-Holzbauschraube(rechts) [21] ..... 40

Abbildung 2-44: Versagen von Holzbauschrauben auf Hineindrücken, Ausknicken im Kopfbereich (links) und Kopfdurchziehen von Schrauben (rechts) [21] ..... 40

Abbildung 2-45: Schraubentypen und übliche Schraubenspitzen, von links nach rechts: Sechskant-Holzschraube, Selbstbohrende Holzbauschraube mit Teil- oder Vollgewinde, Selbstbohrende Schraubenstangen [21], Schraubenspitze mit Schneidkerbe [23]..... 41

Abbildung 2-46: Kraftübertragung bei einer Holz-Holz-Stabdübelverbindung (links), Verformung des anliegenden Holzes durch Lochleibungsbeanspruchung (Mitte) und Ausbildung von Fließgelenken im Dübel (rechts) [21] ..... 42

Abbildung 2-47: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers für verschiedene Verbindungsmittel bei einer Holzrohddichte von 380 kg/m<sup>3</sup> und einer Plattendicke von 19 mm [21]... 43

Abbildung 2-48: Stabdübel aus Stahl und Hartholz (links), Passbolzen (Mitte) und mehrschnittige Stahl-Holz-Stabdübelverbindung mit Passbolzensicherung, zur Übertragung großer Momente (rechts) [21] ..... 44

Abbildung 2-49: Nägel in Verschiedenen Ausführungen, Längen und Durchmessern (links), Schema ein- und zweischnittige Nagelverbindung (Mitte) und übergreifende Nägel (rechts) [21] ..... 44

Abbildung 2-50: Gewindestangen unterschiedlicher Durchmesser (links), im Hirnholz eingeklebte Gewindestangen nach Spaltzugversagen (rechts) [21] ..... 45

Abbildung 2-51: Geometrie Lochblech (links), Skizze zum Einbau in die Versuchskörper (Mitte) und Versagensmechanismen der Verbindung (rechts) [24] ..... 46

Abbildung 2-52: eingeklebte Rohrhülsen in verschiedenen Varianten (links), Schnitt durch Rohrhülse im Holz (Mitte links), Anschlussvariante im Winkel (Mitte rechts), Verbindung nach Versagen auf Holzbruch (rechts) [26] ..... 48

Abbildung 2-53: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Stahl und Aluminium im Vergleich, der Bereich unterhalb von 0,2 % Verformung ist dabei gestreckt, um den Steifigkeitsunterschied zwischen diesen beiden Materialien besser darstellen zu können [27] ..... 49

Abbildung 2-54: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm [27] ..... 50

Abbildung 2-55: Festigkeitsermittlung im Zugversuch, Einschnürung der Stahlprobe [27] ..... 50

Abbildung 2-56: Scher-Lochleibungsverbindung (SL) (links) und gleitfest-vorgespannte Verbindung (GV) (rechts) [28]..... 52

Abbildung 2-57: Pylonkopf mit konischen Ankerköpfen (links), Steck- und Einschubverbindung von Fachwerkträger-Diagonalen (Mitte), Montagestoß für Fachwerkbinder durch Schwalbenschwanz (rechts) [29] ..... 53

Abbildung 2-58: Einhängerbinder zur Herstellung eines steifen Rahmenecks (links), gelenkige Kugelsteckverbindung zur Druckkraftübertragung (Mitte), Raumfachwerk-Systemknoten (rechts) [29] ..... 54

Abbildung 2-59: Container mit Twistlock zusammengehängt (links), Versuchsaufbau zur Messung der Verbindungstragfähigkeit (rechts) [31] ..... 56

Abbildung 2-60: Intakte Ausführung eines Twistlocks (links), Twistlock nach Versagen auf Stahlbruch im Schaft und Abscheren im Gehäuse (rechts) [31] ..... 56

Abbildung 2-61: verschiedene Verbinder des Sherpa-Systems in unterschiedlichen Größen und Ausführungen [32] ..... 57

Abbildung 2-62: Sherpa-Brettschichtholzverbinder, Verbindungsaufbau und Bezeichnungen (links), Anordnung der Verbindungssteile und deren Verschraubung(rechts) [32] [33]..... 58



Abbildung 2-63: Sherpa-CLT-Connector (links) und Einsatz als Wand- und Deckenverbinder (rechts) [34] [35].....	58
Abbildung 2-64: X-RAD Verbinder (links,) Fundament-/Deckenanschluss (Mitte), dreidimensionaler Knoten (rechts) [36] .....	59
Abbildung 2-65: Abmessungen und Einbauskinne des Verbinders (links), Einzelteile des Verbinders (rechts) [36] .....	59
Abbildung 2-66: SPIDER Connector im 3D-Modell (links), Kraftfluss am Verbindungselement (rechts) [38] .....	60
Abbildung 2-67: X-bracket Verbinder als Fundamentanschluss (links), zur horizontalen Verbindung zweier Wände (Mitte), Anordnungsschema für X-bracket Verbinder (rechts) [39].....	61
Abbildung 2-68: verschnittarme Herstellung aus Stahlplatte (links), Dehnung im axialen Zugversuch (Mitte), Verzerrung im Schubversuch (rechts) [39] .....	62
Abbildung 2-69: Zimmermannsmäßige Holzverbindungen im Möbelbau am Beispiel einer Bank (links) und Zapfenverbindung im Detail (rechts) [40] .....	63
Abbildung 2-70: Gekehrte Verbindung und ihre Bestandteile (links), Kraftübertragung bei Momenteneinwirkung aus der Ebene (rechts oben) und in der Ebene (rechts unten) [40] .....	64
Abbildung 2-71: Schrankbeschlag mit Drehkeil (links), Berliner Schrankschraube „ Stern“ (Mitte) und „ideal“(rechts) [41].....	65
Abbildung 2-72: Bodenträger in verschiedener Ausführung (oben links und Mitte), Bodenträger in Stahlleitschiene (unten links), Doppelkugelschnapper (unten Mitte) und Vici-Band, unsichtbares Scharnier (rechts) [41].....	66
Abbildung 2-73: verschiedene lösbare Metallverbindungen in der Übersicht; Keilverbindungen (links oben), klassische Schraubverbindungen (rechts oben), Schraubverbindungen (links unten), Beschlagverbindungen (rechts unten) [42].....	67
Abbildung 2-74: Verbindungssystem für Anschluss an eine Stütze (links), Bestandteile einer rechtwinkeligen Verbindung (rechts) [43] .....	68
Abbildung 2-75: Dübelverbindung mit Gelenken für schräge Anschlüsse (links), Stütze-Tischplattenverbindung (Mitte) und ihre Bestandteile (rechts) [43] .....	68
Abbildung 2-76: Lamello-Möbelverbinder (links), Spannung am Verbinder unter zentrischem Zug (Mitte links), Schub (Mitte rechts) und Moment (rechts) [44].....	69
Abbildung 2-77: Clamex P-Verbinder, Systemzeichnung (links), Herstellung der Vertiefung für den Verbinder (rechts oben), Spannung am Verbinder (rechts) unter zentrischem Zug, Schub und Moment (unten rechts) [44] .....	70
Abbildung 2-78: Invis-Mx2-System (links), magnetischer Spannmechanismus (Mitte), Anziehen der Schrauben durch einen nebenliegenden Akkuschauber mit speziellem Aufsatz (rechts) [44] .....	70
Abbildung 2-79: Übersicht über verschiedene Bauteilverbindungspunkte und die Kräfte, die in diesen auftreten.....	73
Abbildung 3-1: Verbindungsbestandteile und Montageverlauf eines Verbindungswinkels .....	77
Abbildung 3-2: Verschiedene Stoß-Varianten, einfacher Wandstoß (links), Wand-Decken-Stoß (Mitte links), Stoß durchlaufende Wand mit Decke (Mitte rechts) und Kreuzstoß Wand-Decke (rechts) .....	78
Abbildung 3-3: Bestandteile des Verbinders als Explosionszeichnung (a), Verbinder mit zusammengesetztem Gehäuse (b), Verbinder mit eingebauten Federn (c), vollständig zusammengesetzter Verbinder (d) und für die Kraftübertragung wirksame Teile des Verbinders (e)..	79
Abbildung 3-4: Montage des Verbinders, von links nach rechts; Verbinder und Anschlussteil (a), Verdrehen des Kopfes am Anfang des Einbringens der Verbindung (b), Hineinschieben des Verbinders mit maximal verdrehtem Kopf (c), Verbinder vollständig im Anschlussteil mit	

zurückgeschnapptem Kopf (d), Verbinder mit aufgesetztem zweiten Verbindungsteil und rückgedrehtem Kopf (e), mit Schlüssel angezogener Verbinder bereit zur schlupf-freien Zugkraftaufnahme (f) ..... 80

Abbildung 3-5: Verschiedene Stoß-Varianten, einfacher Wandstoß (links), Wand-Decken-Stoß (Mitte links), Stoß durchlaufende Wand mit Decke (Mitte rechts) und Kreuzstoß Wand-Decke (rechts) ..... 80

Abbildung 3-6: Anschlussteil; Einzelteile (links), Bolzenlager an Position (Mitte links), fertig zusammengesetztes Anschlussteil (Mitte rechts), im Bauteil eingebaut (180° zu den anderen Zeichnungen verdreht, rechts) ..... 81

Abbildung 3-7: Standard Verbindungsstück; in Axonometrie (links), Vorderansicht (Mitte links), Seitenansicht (mitte rechts), auf Verbindungsstück aufgesetzt (rechts) ..... 82

Abbildung 3-8: Bolzen; Axonometrie um je 180° zueinander verdreht (links), Ansicht von der Seite, von vorne und von hinten (Mitte links), Bolzen im Anschlussteil in Einschubstellung (Mitte rechts), Bolzen im Anschlussteil in verdrehter Stellung (rechts) ..... 82

Abbildung 3-9: Montageablauf; Verbindungsteile als Explosionszeichnung (links), Anschlussteile und Verbindungsstück zusammengesetzt (Mitte links), Bolzen eingesetzt (Mitte rechts), Bolzen verdreht, Verbindung fixiert (rechts) ..... 83

Abbildung 3-10: Verbindungsbestandteile; Anschlussstücke und Bolzen (links), unterschiedliche Verbindungsstücke (Mitte), Verbindungsstücke mit Platten-Anschluss (rechts) ..... 83

Abbildung 3-11: Verbindungsdetails; einfacher Wandstoß (links), Wand-Decken-Stoß (Mitte links), Wand-Deckenstoß mit durchlaufender Wand (Mitte rechts), Wand-Decken-Kreuzstoß (rechts) ..... 84

Abbildung 3-12: Kraftfluss im Systemverbinder, Stellen, an denen die maßgebenden Schnittgrößen auftreten ..... 87

Abbildung 3-13: Lage von Querschnitt 1 im Bauteil als Ansicht (links), wirksamer Biegeträger-Querschnitt (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 88

Abbildung 3-14: Querschnitt 2 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Normalkraft-Übertragung (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 88

Abbildung 3-15: Querschnitt 3 in Ansicht mit Lastausbreitungsbereich (links), wirksamer Querschnitt zur Biegemoment-Aufnahme (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 89

Abbildung 3-16: Querschnitt 4 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt der Kontaktfläche (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 89

Abbildung 3-17: Querschnitt 5 mit Auflagerlängen in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Abtragung des Biegemoments (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 90

Abbildung 3-18: Querschnitt 6 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt der Kontaktfläche (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 90

Abbildung 3-19: Querschnitt 7 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Normalkraftübertragung (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 91

Abbildung 3-20: Querschnitt 8 in Ansicht (links), wirksamer Querschnitt zur Normalkraftübertragung (Mitte) und Ersatzsystem mit Belastung (rechts) ..... 91

Abbildung 3-21: Verbinder-Geometrie für den Beginn der FE-Berechnungen, Maße in mm ..... 92

Abbildung 3-22: Erstes FE-Modell einer Hälfte der Verbindung, Bestandteile (links) und zusammengesetztes Modell (rechts) ..... 94

Abbildung 3-23: Verformungsfigur Anschlussteil (links) Spannungsverläufe in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts) ..... 95

Abbildung 3-24: Adaptiertes Modell der Verbindung (links), die Achsen der beiden Verbindungsteile sind leicht Versetzt, um der Exzentrizität des Verbindungsbolzens entgegen zu wirken (rechts) ..... 96

Abbildung 3-25: Verformungsfigur des Anschlussteils (links), Van-Mises-Spannungen im Verbinder in Breiten- (Mitte) und Dickenrichtung (rechts) .....	97
Abbildung 3-26: Volumsmodell halber und ganzer Verbinder (links) und dazugehörige Verformungsfigur (rechts).....	98
Abbildung 3-27: Van-Mises-Spannungsverlauf in x-Richtung des ganzen und halben Verbinders (links), Spannungsverlauf in y-Richtung des ganzen und halben Verbinders (rechts).....	99
Abbildung 3-28: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit abgeschrägten Innenecken im Aufriss (rechts) .....	100
Abbildung 3-29: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y Richtung (rechts) .....	100
Abbildung 3-30: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit Ausrundung im Aufriss (rechts).....	101
Abbildung 3-31: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	101
Abbildung 3-32: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit Ausrundung in niedrigerer Ausführung im Aufriss (rechts) .....	102
Abbildung 3-33: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	102
Abbildung 3-34: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit Ausrundung in niedrigerer Ausführung im Aufriss (rechts) .....	103
Abbildung 3-35: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	103
Abbildung 3-36: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und zusammengesetzte Verbindungshälfte mit schmalerem Verbindungsstück (rechts) .....	104
Abbildung 3-37: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	104
Abbildung 3-38: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit abgeschwächtem oberem Riegel (rechts) .....	105
Abbildung 3-39: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	105
Abbildung 3-40: Modell der Verbindungs-Bestandteile (links) und Anschlussteil mit leicht verstärkter Vertikalverbindung (rechts) .....	106
Abbildung 3-41: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	106
Abbildung 3-42: Verformungsfigur Anschlussteil (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	107
Abbildung 3-43: Verformungen bei Varianz der Exzentrizität, Verbinder und Anschlussteil in einer Achse (links), um 0,5 mm verschoben (Mitte) und um 1,0 mm verschoben (rechts) .....	108
Abbildung 3-44: Van-Mises-Spannung bei Varianz der Exzentrizität, Verbinder und Anschlussteil in einer Achse (links), um 0,5 mm verschoben (Mitte) und um ,01 mm verschoben (rechts) .....	109
Abbildung 3-45: Verformungsverhalten unter sich ändernder Exzentrizität, Vergrößerungsfaktor 20, bei Exzentrizität 0,0 mm sind die Achsen von Anschlussteil und Verbindungsstück in einer Linie, die Werte unter den Bildern geben an, um wie viel das Verbindungsstück zum Anschlussteil verschoben ist (rechts -, links +).....	110
Abbildung 3-46: Van-Mises-Spannungen unter sich ändernder Exzentrizität, Vergrößerungsfaktor 20, bei Exzentrizität 0,0 mm sind die Achsen von Anschlussteil und Verbindungsstück in einer Linie, die	

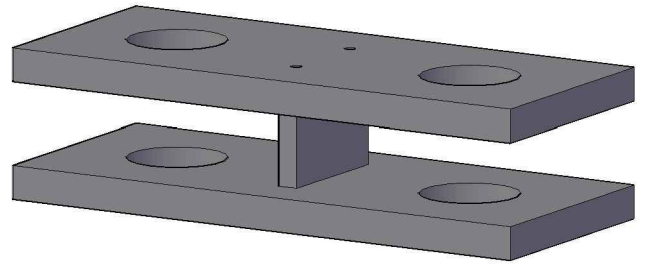
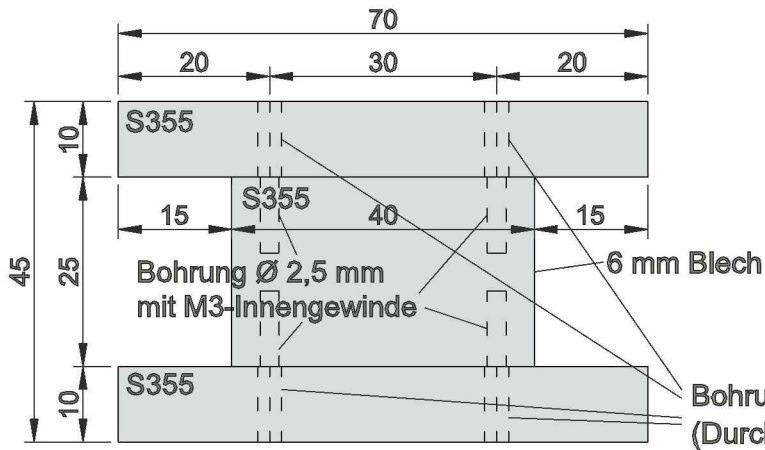
Werte unter den Bildern geben an, um wie viel das Verbindungsstück zum Anschlussstück verschoben ist (rechts -, links +).....	111
Abbildung 3-47: Verbindungsteil mit genauem FE-Netz (links), Ansicht von oben mit Achsversatz (Mitte) und Geometrie des Anschlussstücks (rechts).....	112
Abbildung 3-48: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	112
Abbildung 3-49: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	113
Abbildung 3-50: FE-Netz der Verbindung, gesamter Verbinder (links), Detail Bolzenende (Mitte) und Detail des Bolzenbereichs von oben gesehen (rechts).....	114
Abbildung 3-51: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts).....	114
Abbildung 3-52: Anschlussstück mit Festhaltung des Lochblechs (links), horizontale Auflagerkräfte im Lochblech bei Netzweite 3 mm (Mitte) und Netzweite 2 mm (rechts).....	115
Abbildung 3-53: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), Netzweite 3 mm.....	116
Abbildung 3-54: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), Netzweite 2 mm.....	116
Abbildung 3-55: Abmessungen des Verbinders, mit denen in die Fließberechnung gegangen wird..	117
Abbildung 3-56: S355-Arbeitslinie, anhand derer die Berechnung mit Stahlfließen durchgeführt wird [46].....	117
Abbildung 3-57: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), mit gleicher Geometrie wie linear-elastische Berechnung bei 60 kN Belastung.....	118
Abbildung 3-58: Spannungsverteilung in x-Richtung (oben) und y-Richtung (unten), bei Bolzenlager mit 4 mm (links), 6 mm (Mitte) und 8 mm (rechts) Stärke.....	118
Abbildung 3-59: Verformungsfigur Anschlussstück (links), Spannungsverteilung in x-Richtung (Mitte) und in y-Richtung (rechts), mit angepasster Geometrie bei einer Belastung von 100 kN.....	119
Abbildung 3-60: Spannungsverteilung im Anschlussstück unter verschieden hoher Belastung.....	120
Abbildung 3-61: Punkte, an denen die Verformung betrachtet wird.....	121
Abbildung 3-62: Arbeitslinie für verschiedene Punkte des Verbinders.....	121

### A-3 Tabellenverzeichnis

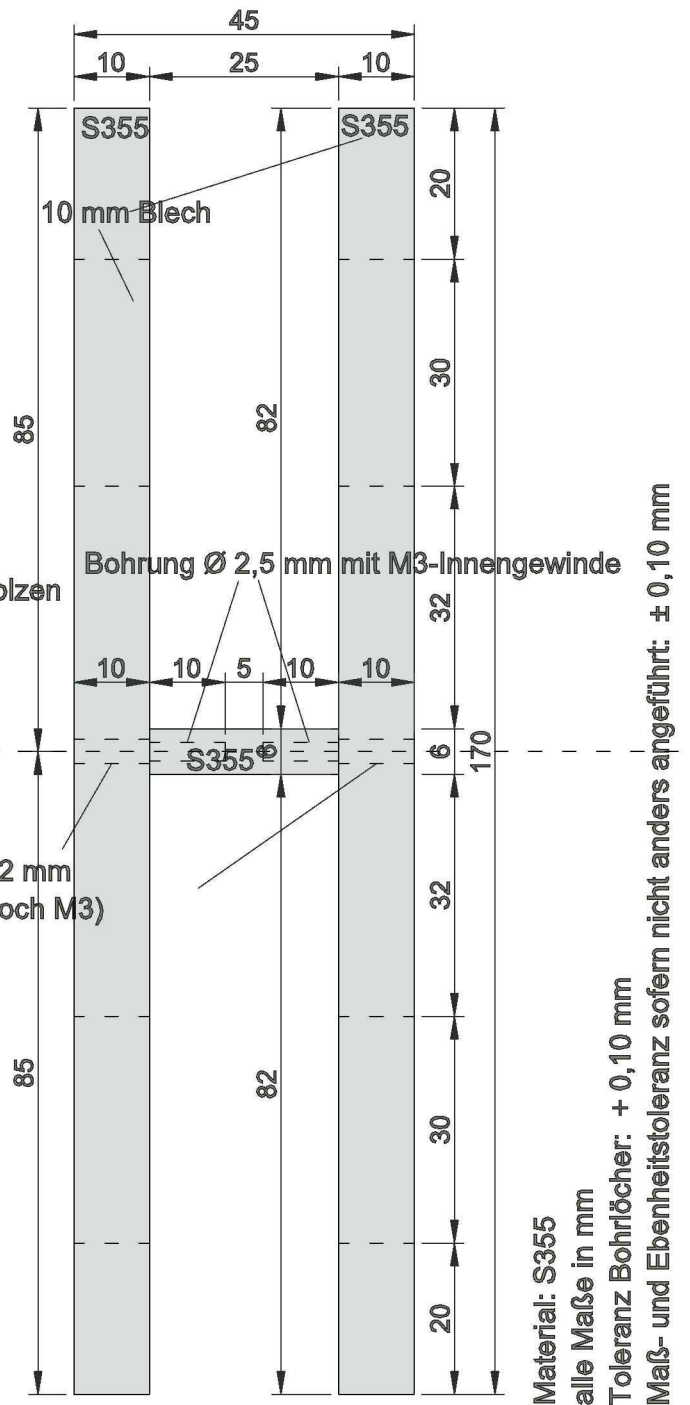
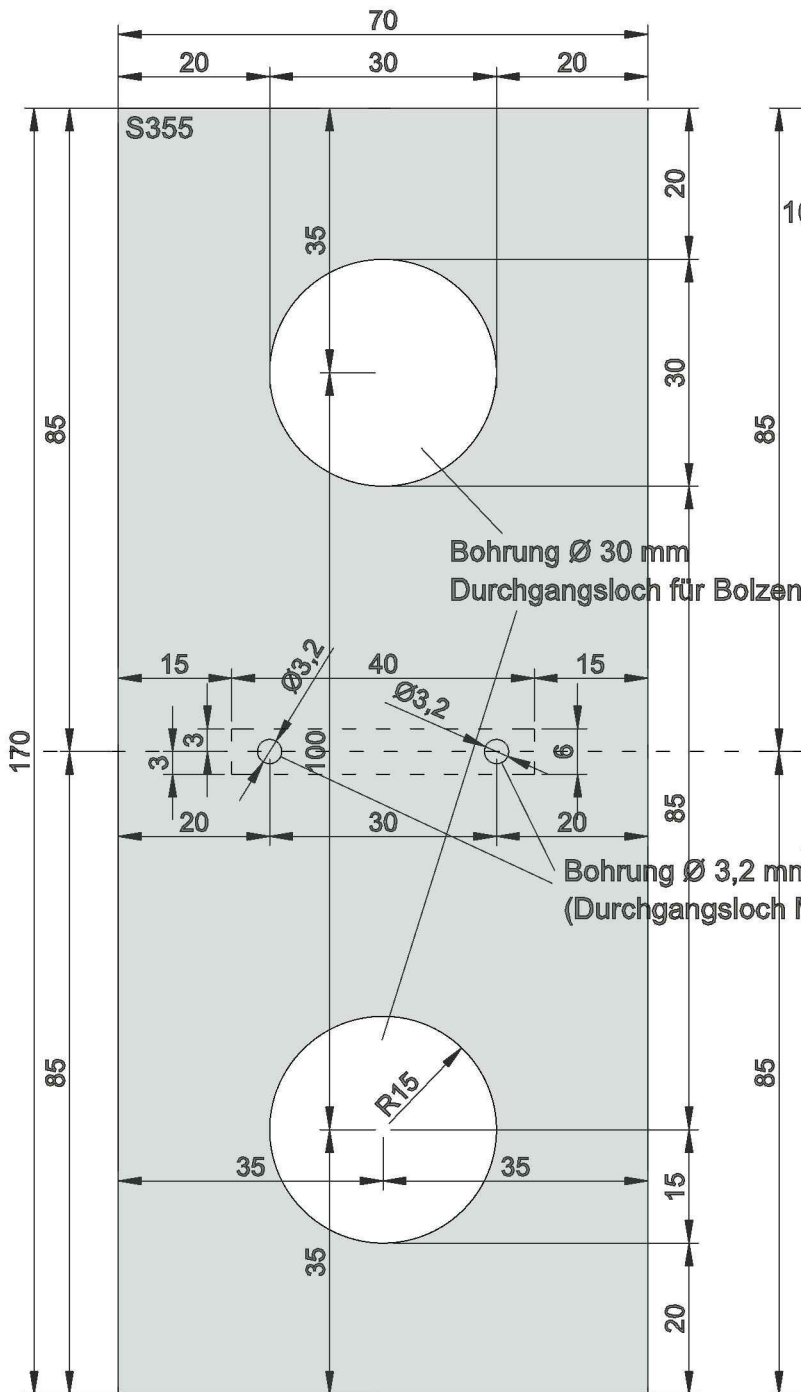
Tabelle 2.1: Vorfertigungsgrad verschiedener Bauweisen [16].....	26
Tabelle 3.1: Kombinationsvarianten in Matrix-Darstellung.....	75

## **ANHANG B DIVERSE ANDERE ANHÄNGE**

In diesem Anhang befinden sich die Fertigungspläne für den Prototyp des Verbinders.



Axonometrie Verbindungssück



Material: S355  
alle Maße in mm  
Toleranz Bohrlöcher: + 0,10 mm  
Maß- und Ebenheitstoleranz sofern nicht anders angeführt:  $\pm$  0,10 mm

## BSP-Verbinder Prototyp

Anzahl: 1 Stk

Planinhalt:  
Verbindungsstück zusammengesetzt

Plannummer:  
1

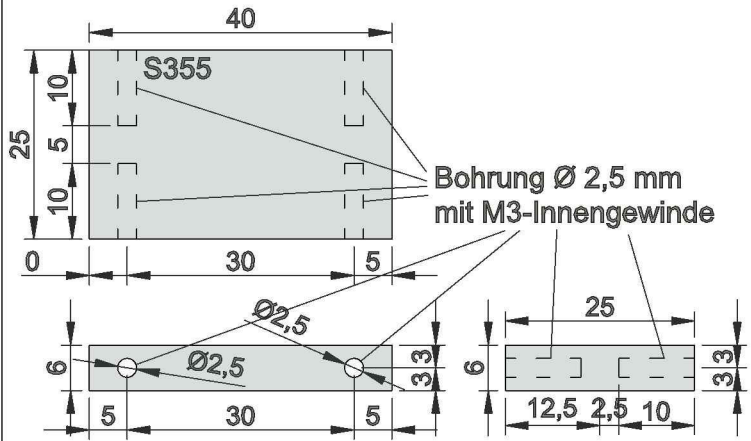
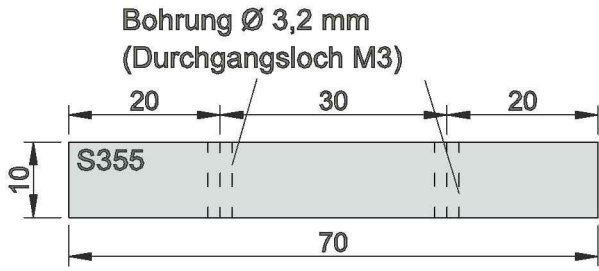
Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

Erstellungsdatum:  
14.02.2018

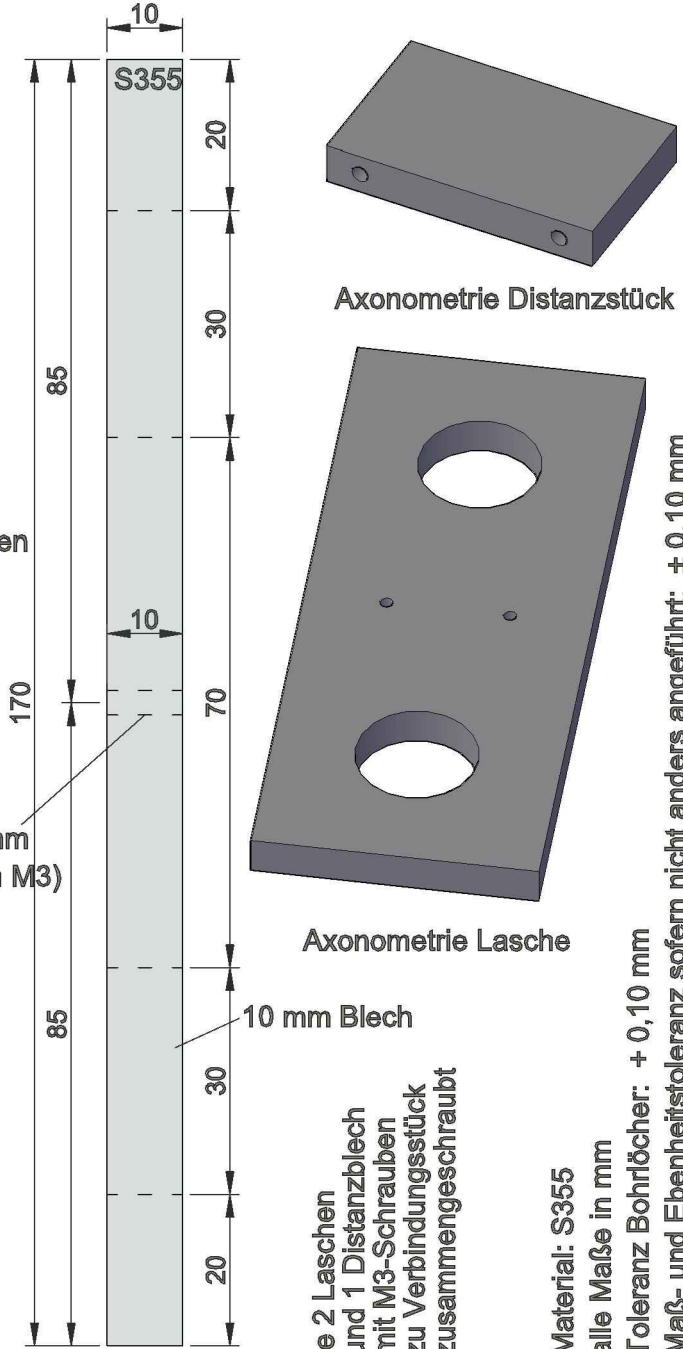
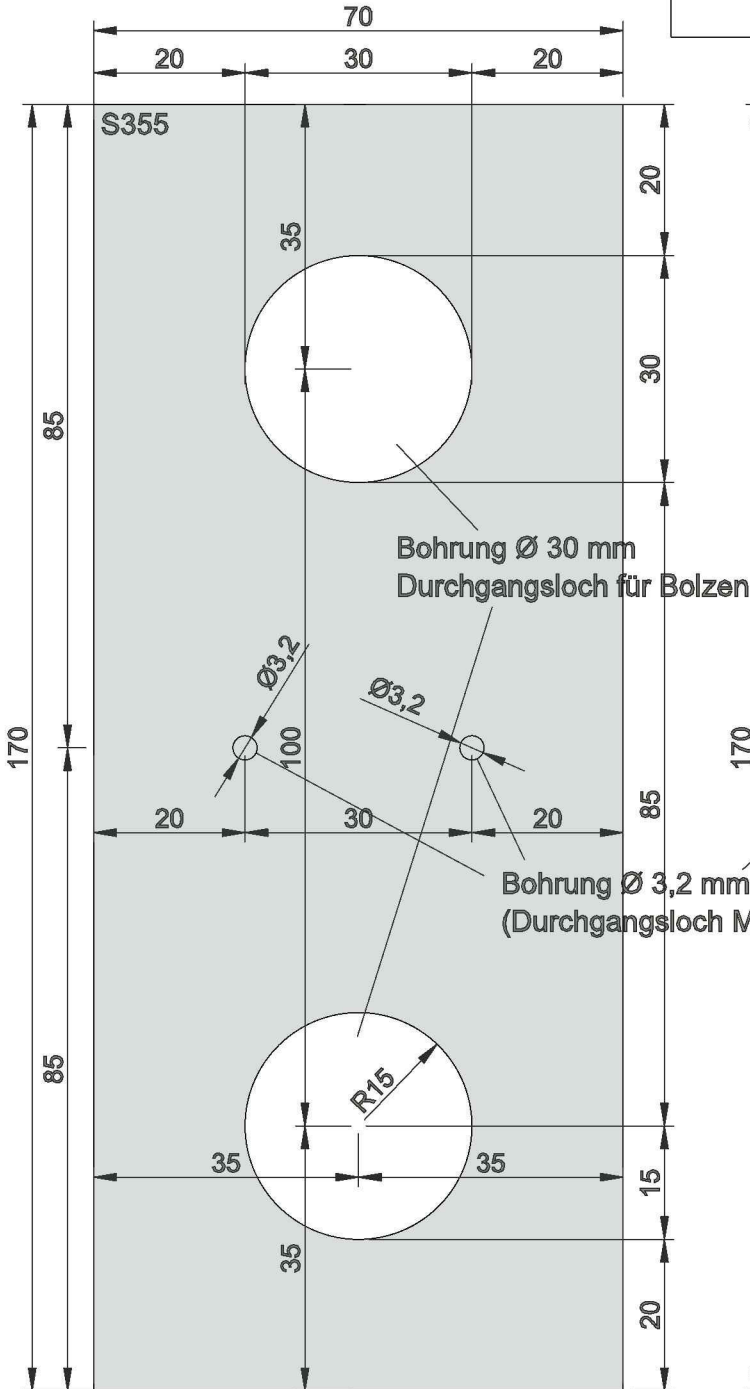
Maßstab:  
1:1

Planverfasser:  
Florian Prettnner | 01231979

### Verbindungsstück Lasche



### Verbindungsstück Distanzblech



## BSP-Verbinder Prototyp

Anzahl: -

Planinhalt:  
Verbindungsstück Einzelteile

Plannummer:  
2

Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

Erstellungsdatum:  
14.02.2018

Maßstab:  
1:1

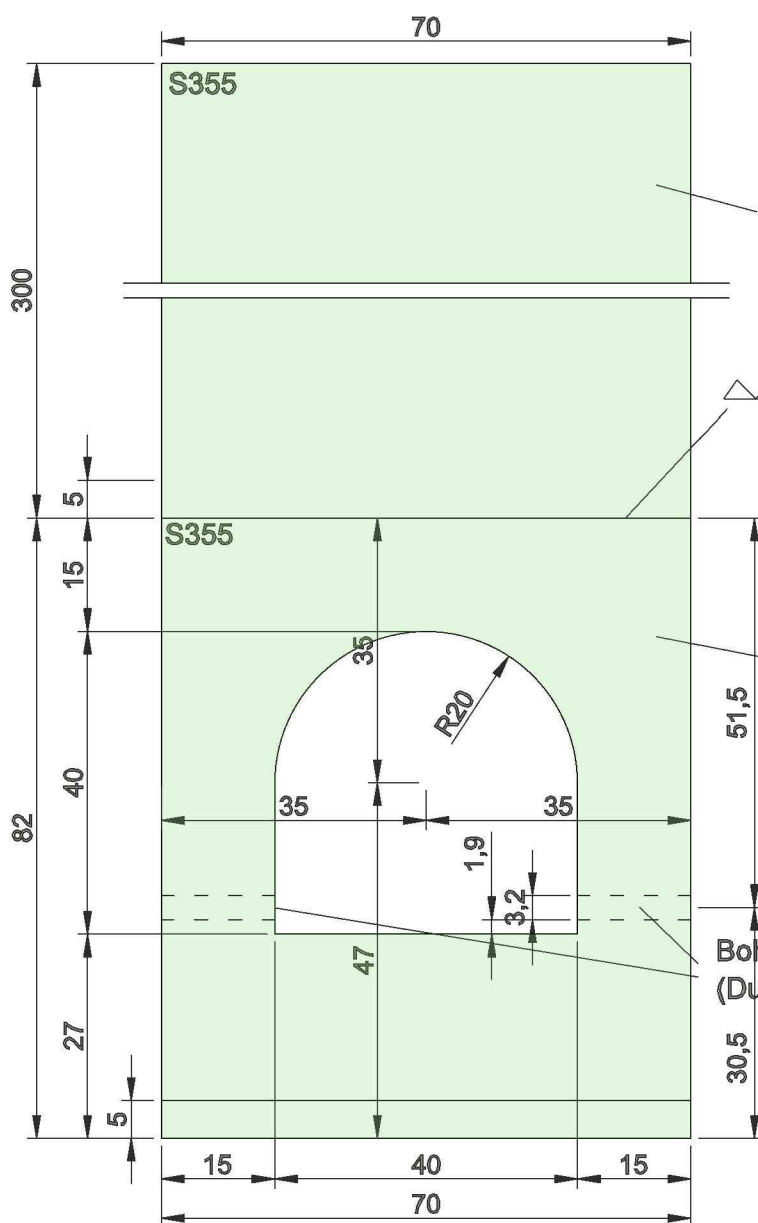
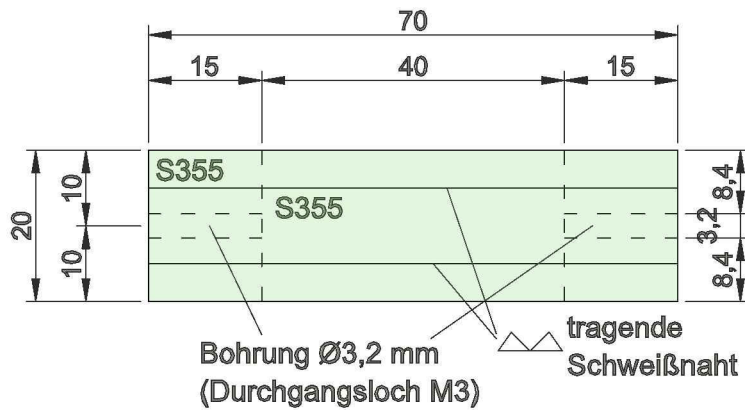
Planverfasser:  
Florian Prettner | 01231979

Material: S355

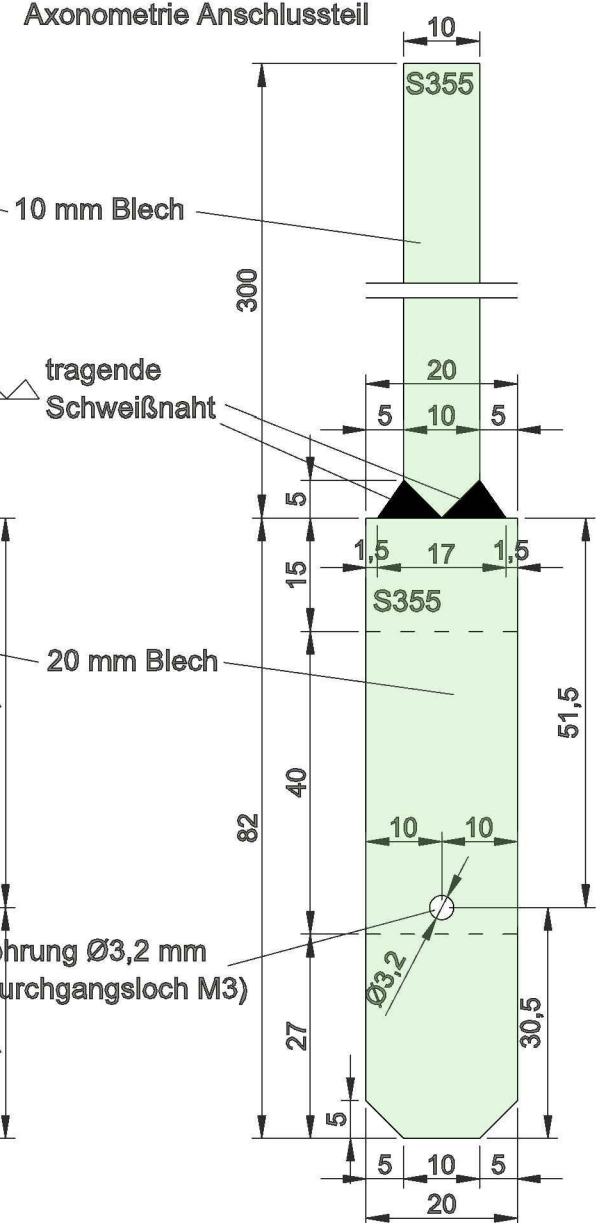
alle Maße in mm

Toleranz Bohrlöcher: + 0,10 mm

Maß- und Ebenheitstoleranz sofern nicht anders  
angeführt: ± 0,10 mm



Axonometrie Anschlussteil



## BSP-Verbinder Prototyp

Anzahl: 2 Stk

Planinhalt:  
Anschlussteil

Plannummer:  
3

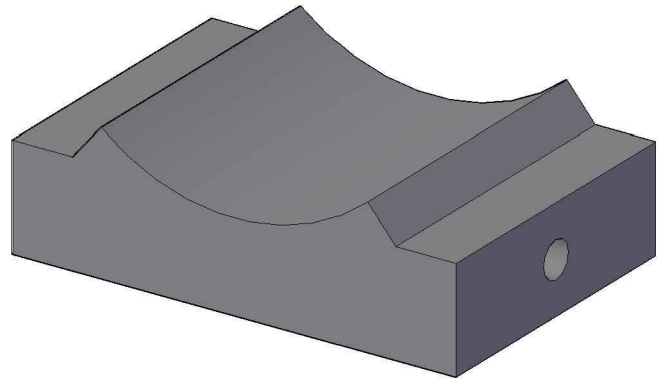
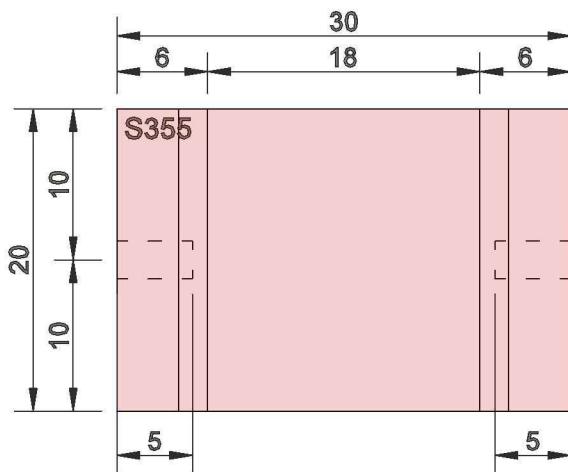
Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

Erstellungsdatum:  
14.02.2018

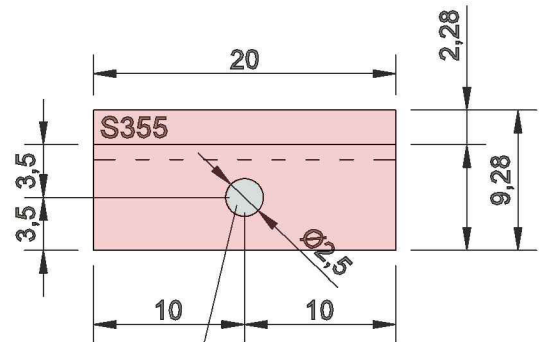
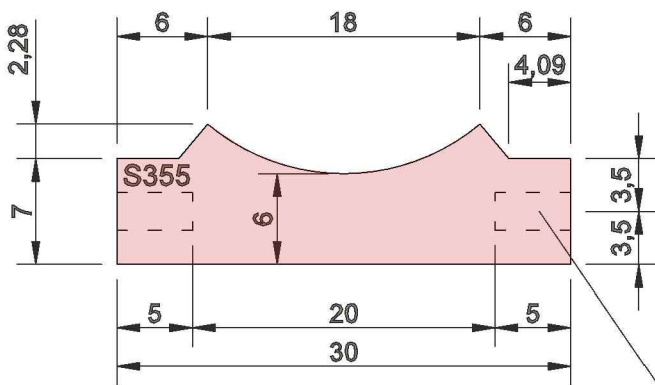
Maßstab:  
1:1

Planverfasser:  
Florian Prettnner | 01231979

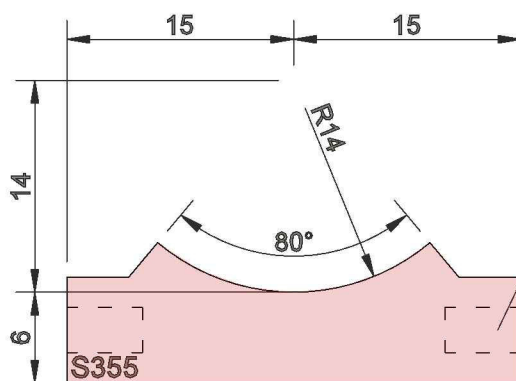




Axonometrie Bolzenlager



Bohrung  $\varnothing$  2,5 mm mit M3-Innengewinde



Material: S355

alle Maße in mm

Toleranz Bohrlöcher: + 0,10 mm

Maß- und Ebenheitstoleranz sofern nicht anders angeführt:  $\pm$  0,10 mm

**BSP-Verbinder Prototyp**

Anzahl: 2 Stk

Planinhalt:  
Bolzenlager

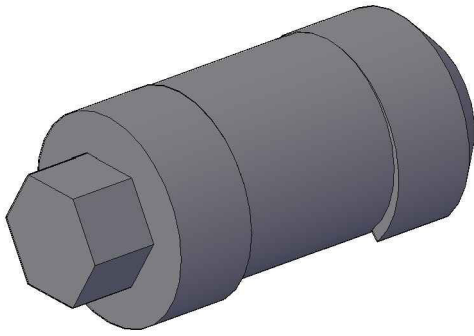
Plannummer:  
4

Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

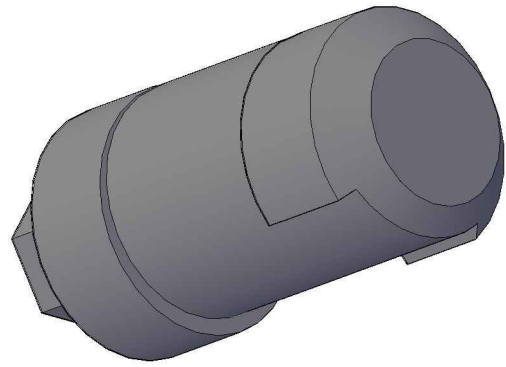
Erstellungsdatum:  
14.02.2018

Maßstab:  
2:1

Planverfasser:  
Florian Prettnner | 01231979

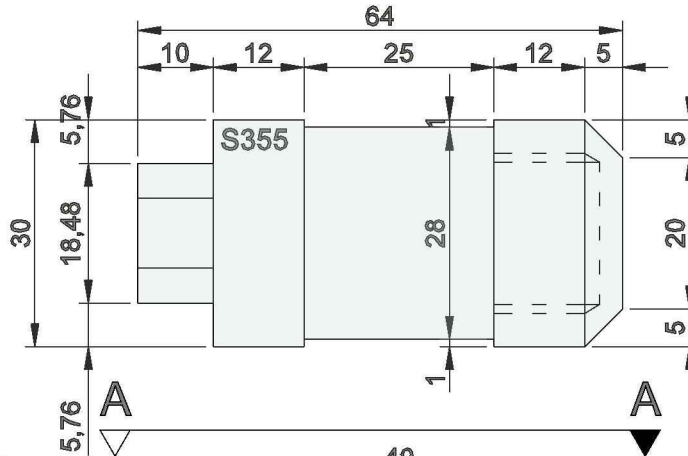


Axonometrie Bolzen von schräg oben

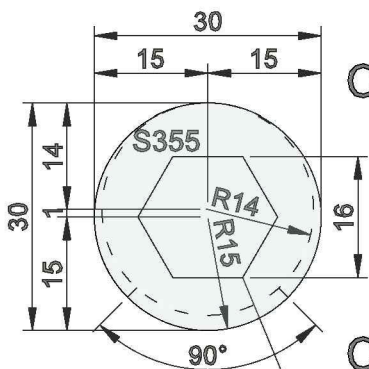


Axonometrie Bolzen von schräg unten

Draufsicht A-A (von oben)

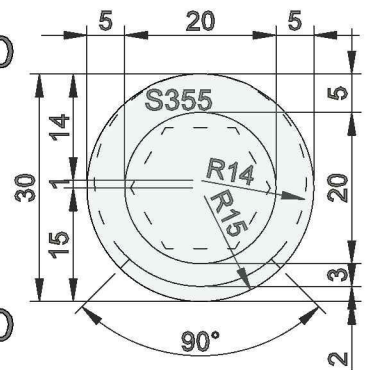


Ansicht C-C (von links)



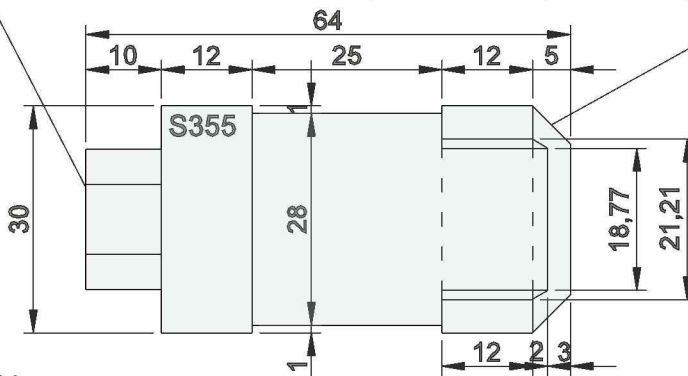
Ansatzpunkt für Schlüssel mit Schlüsselweite 16 mm (M10-Schlüssel)

Ansicht D-D (von rechts)



Spitze abgefaßt, um Bolzen leichter einbringen zu können

Untersicht B-B (von unten)



Material: S355  
 alle Maße in mm  
 Toleranz Bohrlöcher: + 0,10 mm  
 Maß- und Ebenheitstoleranz sofern nicht anders angeführt: ± 0,10 mm

BSP-Verbinder Prototyp

Anzahl: 2 Stk

Planinhalt:  
Bolzen

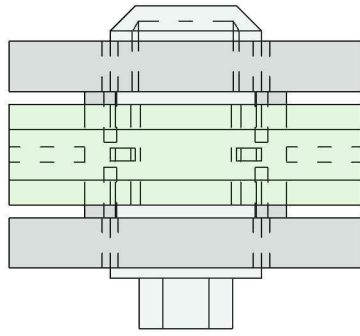
Plannummer:  
5

Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

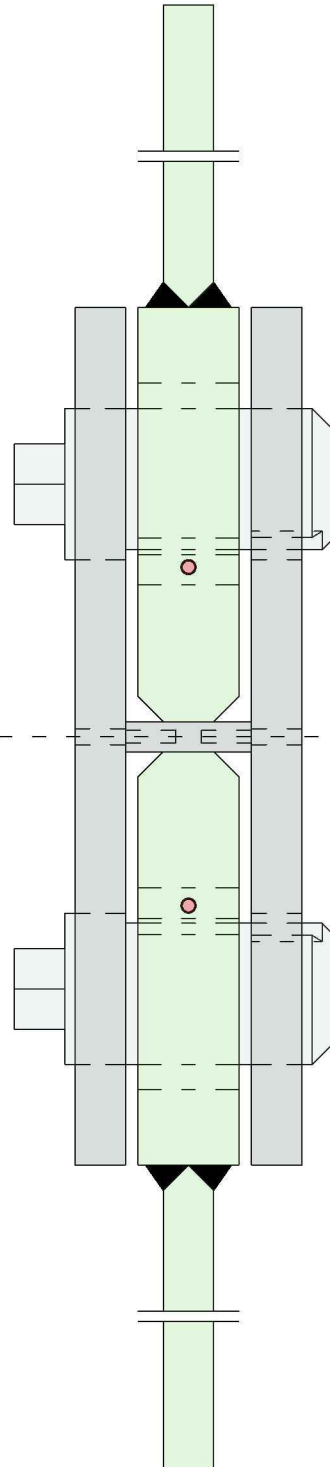
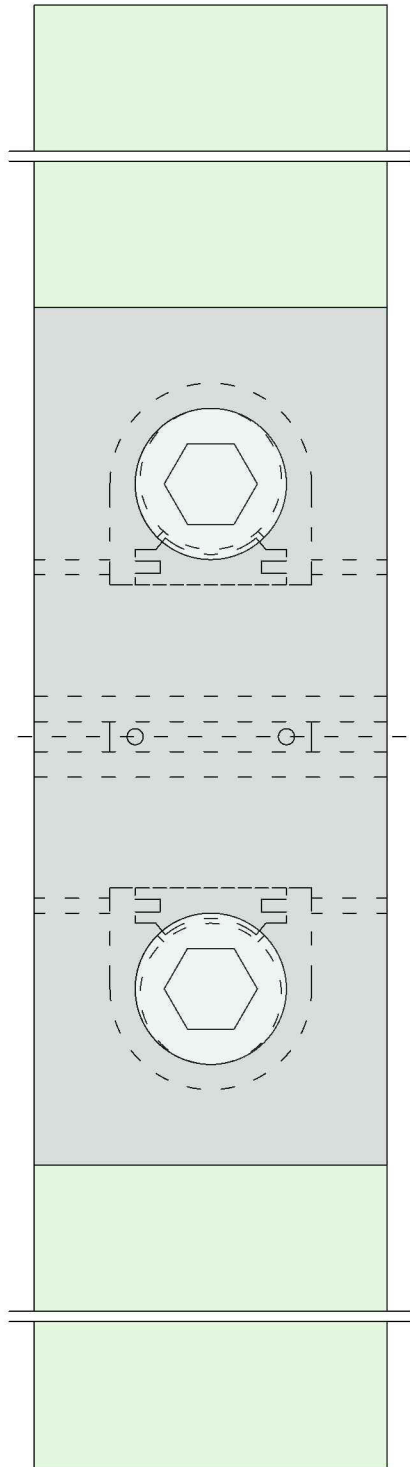
Erstellungsdatum:  
14.02.2018

Maßstab:  
1:1

Planverfasser:  
Florian Prettner | 01231979



- Anschlusssteil
- Verbindungsstück
- Bolzenlager
- Bolzen



## BSP-Verbinder Prototyp

Anzahl: -

Planinhalt:  
Verbinder zusammengesetzt

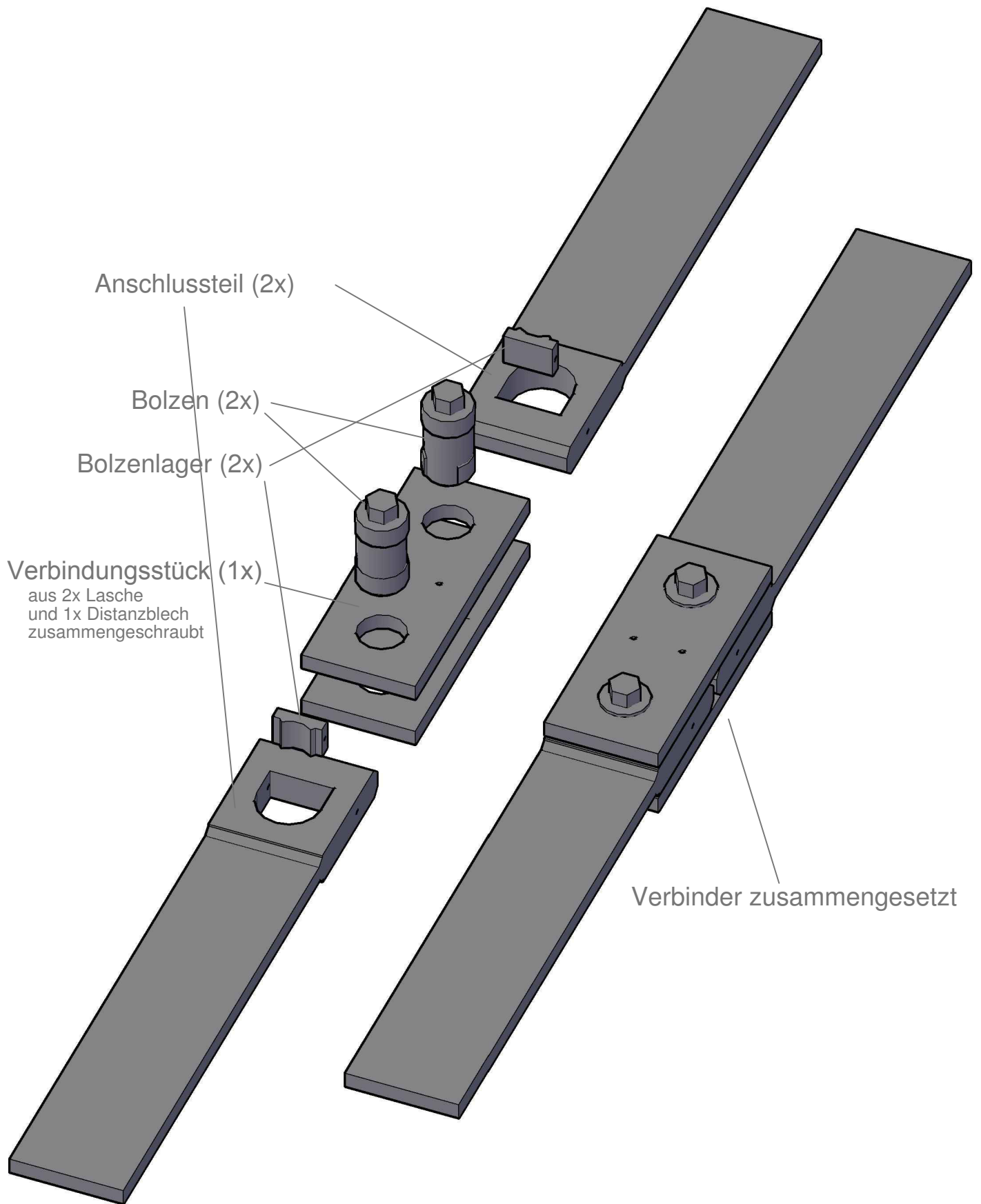
Plannummer:  
6

Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

Erstellungsdatum:  
14.02.2018

Maßstab:  
1:1,5

Planverfasser:  
Florian Prettner | 01231979



## BSP-Verbinder Prototyp

Anzahl: -

Planinhalt:  
Verbinder in Axonometrie

Plannummer:  
7

Betreuer:  
DI Andreas Ringhofer / DI Konstantin Ganster

Erstellungsdatum:  
14.02.2018

Maßstab:  
-

Planverfasser:  
Florian Prettnner | 01231979

Dies ist eine Veröffentlichung des

**FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl