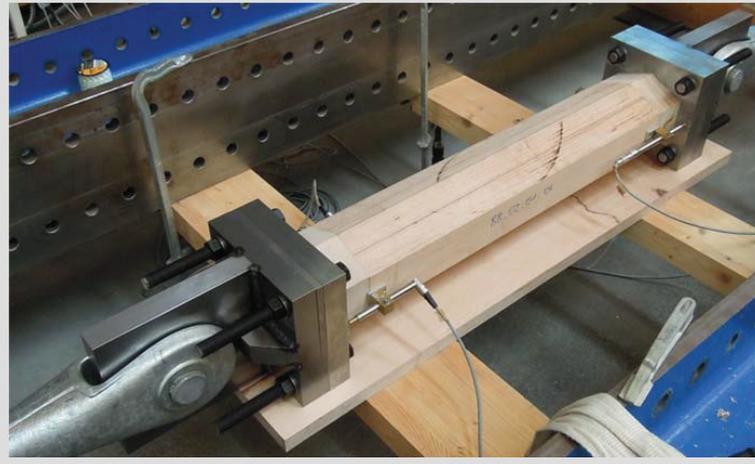


Optimierung von axial beanspruchten Hirnholz- Schraubverbindungen in Hartlaubholz

M-4-7/2017



Lothar Koppauer
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Technische Universität Graz



Lothar Koppauer, BSc.

Optimierung von axial beanspruchten Hirnholz- Schraubverbindungen in Hartlaubholz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Bauwesen

Eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer
Ass.Prof. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner
Institut für Holzbau und Holztechnologie
Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Ringhofer
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, August 2017

EIDESSTÄTTLICHE 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 meinen Betreuern Reinhard Brandner und Andreas Ringhofer bedanken, die es mir ermöglichten dieses spannende Thema zu bearbeiten. Durch deren zeitgerechte und professionelle Betreuung war es mir möglich, diese Arbeit sehr zielführend zu verfassen. Professor Schickhofer möchte ich danke, der bei mir, durch seine Lehrveranstaltungen, seit der ersten Vorlesung das Interesse an dem Baustoff Holz geweckt hat. Für die Unterstützung während der Versuche gilt mein besonderer Dank Bernd Heissenberger, der mir stets zur Seite stand bei der Versuchsplanung- und Durchführung. Des Weiteren möchte ich dem gesamten Team des Holzbauinstituts danken, die mir mit Input und Tipps jederzeit weitergeholfen haben. Das sehr angenehme Arbeitsklima am Holzbauinstitut kann ich nur lobend hervorheben.

Bei den teilnehmenden Firmen des Forschungsprojekts FFG BRIDGE 1 Projekt „hardwood SCREWS“ möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, Teil dieses Projekts sein zu dürfen. Besonderer Dank gilt dabei der Firma Pollmeier Massivholzbau GmbH & Co.KG für die Bereitstellung der Buchenvollholz- und BauBuchenträger und der Firma Schmid Schrauben Hainfeld GmbH für die Bereitstellung der Schrauben, sowie der Landeskammer für Land- und Forstwirtschaft Steiermark für die finanzielle Beteiligung an diesem Projekt. Ich möchte mich auch bei Mathias Pöll für die Vorarbeit und die Entwicklung der Schraube Prototyp P 1 bedanken, die bei sämtlichen Versuchen in dieser Arbeit zum Einsatz kam und deren optimierter Einsatz Ziel dieser Arbeit war.

Der größte Dank gilt meinen Eltern Gerhard und Anneliese, die mir dieses Studium ermöglichten und die mir auch in schwereren Zeiten geholfen haben, die Motivation daran nicht zu verlieren. Auch meinem Bruder Herwig möchte ich dafür danken, dass er mir während des Studiums einige hilfreiche Tipps geben konnte und immer mit Rat zur Seite stand. Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meinen Freunden und Studienkollegen bedanken, die die Studienzeit für mich unvergesslich gemacht haben. Vor allem den „Baumeistern“ möchte ich für die lustige gemeinsame Zeit und die gegenseitige Hilfe danken.

Kurzfassung

Da bei Verwendung von Laubhölzern aufgrund ihrer höheren mechanischen Kenngrößen die benötigten Querschnitte für Tragkonstruktionen deutlich kleiner ausfallen als bei Verwendung von Nadelhölzern, ist auch das Volumen, das für Verbindungen bzw. zur Verankerung und Platzierung von Verbindungsmitteln zur Verfügung steht, deutlich eingeschränkt. Ziel dieser Arbeit ist es daher zu untersuchen, ob es möglich ist, einen leistungsfähigen Anschluss von auf Zug parallel zur Faser beanspruchten Stäben mit in Hirnholz eingebrachten Schrauben, die auf Herausziehen belastet werden, auszubilden. Dazu wird ein zuvor speziell für Hartlaubholz entwickelter Schraubenprototyp verwendet. Durch eine FE-Studie wird zunächst untersucht, wie sich verschiedene Schraubenanordnungen auf die Querspannungen im Anschlussbereich, induziert durch die axiale Beanspruchung der Schraubengruppe, auswirken und ob hier eine Optimierung im Sinne einer kaskadenförmigen Gewindeabstufung der Schrauben möglich ist. Es werden Einschraub- und Ausziehversuche vorgestellt, die zum Ziel haben, die benötigten Mindest- und Randabstände für Hirnholzverbindungen in Buchenvollholz und im Hartlaubholz-Furnierwerkstoff BauBuche zu finden. Im Rahmen der Hauptversuche werden mit den erhaltenen Mindest- und Randabständen in drei Prüfkonfigurationen Ausziehversuche an gleichmäßig eingebrachten und kaskadenförmig abgestuften Schraubengruppen bestehend aus 19 Schrauben in Buchenvollholz und BauBuche durchgeführt. Dabei kann eine Leistungssteigerung des Anschlusses festgestellt werden, wenn die Schrauben untereinander kaskadenförmig abgestuft werden.

Abstract

The comparatively high mechanical properties of hardwood lead to reduced cross-sections of hardwood constructions and therefore the volume available for fasteners is more limited than when using spruce. The aim of this thesis is to investigate if it is possible to create an efficient connection for tensile stressed timber members with end-grain joints composed by axially loaded self-tapping screws. For this connection a screw prototype is used that has been optimized for the application in hardwood. First, an FE-study shows the different states of tensile stresses perpendicular to grain in the joint area in case of different screw arrangements and axial load conditions. This study should examine if there is a positive influence on the occurrence of tensile stresses perpendicular to grain if the screw threads are graded cascadingly. Furthermore the results of screwing-in and withdrawal tests are shown and discussed, which give information about the required minimum spacings between the screws and to the timber's edges for beech and "BauBuche" (LVL made of beech). At last, withdrawal tests with groups of 19 screws in beech and "BauBuche" are carried out in three test setups, which investigate if the connection can bear more load if the screws are graded cascadingly. These tests show an increase in efficiency for cascadingly graded screws in comparison to equally imbedded ones.

Inhaltsverzeichnis

KAPITEL 1: MOTIVATION UND ZIEL	1
1-1 MOTIVATION UND ZIEL	1
KAPITEL 2: LITERATURRECHERCHE	3
2-1 HOLZBAUSCHRAUBEN	3
2-2 ANFORDERUNGEN AN VERBINDUNGEN	4
2-2.1 Tragvermögen.....	5
2-2.1.1 Effektive Verbindungsmittellanzahl	5
2-2.1.2 Wirkungsgrad	6
2-2.2 Steifigkeit	6
2-2.3 Duktilität.....	7
2-3 VERSAGENSMECHANISMEN.....	9
2-3.1 Ausziehen der Schraube	10
2-3.2 Stahlbruch der Schraube.....	11
2-3.3 Aufspalten.....	12
2-3.3.1 Mindestabstände	12
2-3.3.2 Randabstände.....	14
2-4 KRAFTVERTEILUNG.....	15
2-4.1 Kraftverteilung entlang der Schraube.....	15
2-4.2 Spaltkräfte.....	17
2-4.3 Kaskadenförmige Abstufung	21
2-5 FE SIMULATION.....	22
2-6 ZIEL DER ARBEIT	26
KAPITEL 3: FE-SIMULATION	28
3-1 MODELLBILDUNG	28
3-1.1 Einzelschraube.....	30
3-1.2 Kaskadenförmige Abstufungen	31
3-1.2.1 Gewindeabstufung	32
3-1.2.2 Parabelförmige Abstufung.....	36
3-1.2.3 Abstandsvariationen	38
3-1.3 Vergleich mit Vollgewindeschrauben	40
3-1.4 Kraftverteilung der Schrauben.....	42

3-2	CONCLUSIO DER FE-SIMULATIONEN.....	46
KAPITEL 4: EINSCHRAUBVERSUCHE		48
4-1	PRÜFKONZEPT	48
4-2	MATERIAL.....	48
4-3	METHODE.....	48
4-4	RESULTATE DER EINSCHRAUBTESTS	50
KAPITEL 5: VORVERSUCHE.....		54
5-1	PRÜFKONZEPT	54
5-2	MATERIAL.....	54
5-3	METHODE.....	54
5-3.1	Bestimmung der Rohdichte.....	57
5-3.2	Bestimmung der Holzfeuchte	58
5-3.3	Bestimmung von K_{ser}	58
5-3.4	Berechnung von f_{ax}	59
5-3.5	Abschätzung von f_{ax} mit dem Modell von Hübner [16].....	59
5-4	RESULTATE DER VORVERSUCHE	59
5-4.1	Prüfkonfiguration 1	59
5-4.2	Prüfkonfiguration 2.....	61
5-4.3	Prüfkonfiguration 3.....	63
5-5	ZUSAMMENFASSUNG DER VORVERSUCHE.....	65
KAPITEL 6: GRUPPENVERSUCHE		67
6-1	PRÜFKONZEPT	67
6-2	MATERIAL.....	67
6-3	METHODE.....	67
6-3.1	Vorbemessung	71
6-3.1.1	Stahlzugtragfähigkeit f_{tens}	71
6-3.1.2	Ausziehwidestand R_{ax}	71
6-3.1.3	Nettoquerschnittstragfähigkeit F_{netto}	72
6-3.1.4	Ergebnisse der Vorbemessung	72
6-4	RESULTATE DER HAUPTVERSUCHE	73
6-4.1	Prüfkonfiguration 1	74
6-4.2	Prüfkonfiguration 2.....	76

6-4.3	Prüfkonfiguration 3	78
KAPITEL 7: ZUSAMMENFASSUNG UND CONCLUSIO		80
7-1	ZUSAMMENFASSUNG	80
7-2	CONCLUSIO UND AUSBLICK.....	84
ANHANG A VERZEICHNISSE		I
A-1	Literaturverzeichnis	I
ANHANG B HAUPTVERSUCHE.....		IV
ANHANG C PLÄNE		XIV

KAPITEL 1: MOTIVATION UND ZIEL

1-1 MOTIVATION UND ZIEL

Heutzutage werden zugbeanspruchte Anschlüsse in weitgespannten Fachwerkstrukturen im modernen Ingenieurholzbau häufig mittels Stahl-Holz-Schraubenverbindungen ausgebildet. Für Bauteile in Fichtenholz erfolgt dies aufgrund der spezifischen mechanischen und physikalischen Kenngrößen Zugfestigkeit und Rohdichte standardmäßig in Form von Schrägverschraubungen. Die Entwicklung von sehr widerstandsfähigen Holzwerkstoffen, bestehend aus geklebten Hartlaubholzurnieren (z.B. BauBuche), und die damit einhergehende signifikante Reduktion der benötigten Querschnittsdimensionen bei gleicher Tragfähigkeit erfordert ein Umdenken in der Detailausbildung. Um für die vergleichsweise geringen Querschnittsabmessungen eine effiziente Verbindungslösung zu finden, ist ein viel versprechender Ansatz, die Schrauben nicht schräg zur Faser einzubringen, sondern gerade in faserparalleler Ausrichtung im Hirnholz zu situieren. So könnten z.B. gelenkige Stahlverbindungen in Fachwerken mit Hilfe von Hirnholzverschraubungen an Zugstreben angeschlossen werden. Vorteile dieser Detailausbildung sind deutlich geringere Mindestabstände quer zur Faser als in Faserrichtung und die Möglichkeit des Vorsehens einer nahezu beliebig langen Einschraublänge. Zudem kommt es bei faserparallelen Hirnholzverschraubungen zu einer weitaus geringeren Schwächung des Nettoquerschnittes, als es bei Schrägschraubverbindungen der Fall ist.

Um den Vergleich der benötigten Querschnittsgeometrien zu verdeutlichen, ist in Abbildung 1-1 ausgehend von Vollholz C24 nach EN 338 [1] (Bauholz normaler Festigkeit), die Materialeinsparung bei der Verwendung der Holzwerkstoffe Brettschichtholz aus Nadelholz GL28 nach EN 14080 [2], Furnierschichtholz Fichte und BauBuche GL70 nach [3] dargestellt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen: (vgl. [4])

- Verwendung in der Nutzungsklasse 1
- Klasse der Lasteinwirkungsdauer: mittel
- gleichbleibende Höhe des Querschnitts von 300 mm
- Berechnung nach EN 1995-1-1 [5]

Betrachtet man den notwendigen Querschnitt bei einer Zugbeanspruchung parallel zur Faser (Zugfestigkeit $f_{t,0}$), wird deutlich, wie klein jener der BauBuche GL70 im Vergleich zur Fichte ist, um dieselbe Kraft übertragen zu können. Für so einen kleinen Querschnitt eine geeignete leistungsfähige und wirtschaftlich sinnvolle Verbindungslösung zu finden, stellt dementsprechend eine große Herausforderung dar.

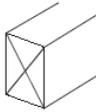
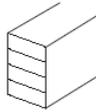
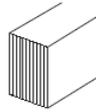
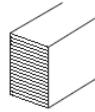
Werkstoffe	Vollholz C24	BSH GL28	FSH Fichte	BauBuche GL70
maßgebende Eigenschaften				
Biegung f_m	 200/100%	 154/77%	 92/46%	 57/29%
Schub f_v	 200/100%	 240/120%	 112/56%	 104/52%
Druck $\parallel f_{c,o}$	 200/100%	 152/76%	 102/51%	 56/28%
Zug $\parallel f_{t,o}$	 200/100%	 129/64%	 68/34%	 44/22%
E-Modul E_{mean}	 200/100%	 175/87%	 159/80%	 132/66%
Erforderliche Breite in mm bei gleicher Beanspruchung % Materialverbrauch				

Abbildung 1-1 Vergleich benötigter Querschnittsbreiten [4]

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Hirnholzanschluss mit faserparallel eingebrachten Schrauben in Hartlaubhölzern zu optimieren. Dabei soll eine von Pöll in [6] entwickelte Schraube, die für eine solche Anwendung optimiert wurde, zum Einsatz kommen. Da zurzeit bei Verwendung von Hartlaubholz für die Applizierung von Schrauben vorgebohrt werden muss, was einen zusätzlichen Arbeitsschritt darstellt, soll zudem untersucht werden, ob es möglich ist, durch den Einsatz der entwickelten Hartlaubholzschraube diesen Anschluss ohne vorheriges Vorbohren herstellen zu können.

Ein zu überprüfender Optimierungsansatz schlägt für Hirnholzverschraubungen eine kaskadenförmige Abstufung der im Querschnitt eingebrachten Schrauben vor. Mit Hilfe einer FE-Simulation und Ausziehversuchen soll untersucht werden, ob dadurch eine Leistungssteigerung der Verbindung erzielt werden kann. Der Fokus hierbei liegt vor allem auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad der Verbindung und dass der Versagensmechanismus Aufspalten weitgehend ausgeschlossen werden kann.

KAPITEL 2: LITERATURRECHERCHE

2-1 HOLZBAUSCHRAUBEN

Holzbauschrauben stellen ein sehr leistungsfähiges Verbindungsmittel dar, das sehr flexibel und wirtschaftlich zum Einsatz kommen kann. In letzter Zeit wurde sehr viel Forschung betrieben, um die Einsatzmöglichkeiten von Holzbauschrauben zu erweitern.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einsatz von Holzbauschrauben in Hartlaubholz. Zu Beginn werden einige Begriffe definiert, die im Zusammenhang mit Holzbauschrauben auftreten. Außerdem wird die von Pöll in [6] entwickelte Prototyp-Schraube P 1 kurz vorgestellt, die in der weiteren Arbeit auch für die Versuche herangezogen wird.

Holzbauschrauben können als Verbindungsmittel entweder auf Abscheren (quer zur Schraube) oder axial (in Richtung der Schraubenachse) beansprucht werden. Bei Hirnholzverschraubungen werden Holzbauschrauben auf Herausziehen, also axial, beansprucht und daher liegt der Fokus dieser Arbeit auch auf der axialen Belastung. Eine Holzbauschraube besteht im Wesentlichen aus einem Schraubenkopf inkl. Antrieb, einem Schaft, einem Schraubengewinde und einer Schraubenspitze. Schrauben lassen sich in Teilgewinde- und Vollgewindeschrauben unterscheiden. In Abbildung 2-1 ist eine Teilgewindeschraube dargestellt, charakterisiert durch ein Gewinde, das nur über einen Teilbereich der gesamten Schraubenlänge reicht. Bei Vollgewindeschrauben reicht das Gewinde vom Kopf der Schraube bis zur Spitze. Die Gewindelänge l_g wird von der Spitze bis zum Gewindeende gemessen. Für die effektiv wirksame Gewindelänge wird l_{tip} , also die Schraubenspitze, von der Gewindelänge abgezogen. Dies ist für die Berechnung der Ausziehfestigkeit von Schrauben wichtig, da die Schraubenspitze keinen Widerstand gegen das Herausziehen leisten kann. Die Ausziehfestigkeit, sowie die anderen Versagensmechanismen werden in Abschnitt 2-3 näher behandelt. Unter der Einbindetiefe l_{emb} versteht man die Tiefe, wie weit der Gewindebeginn kopfseitig im Material versenkt ist. Bei Verwendung von Vollgewindeschrauben wird zur Schaffung einer Einbindetiefe auf die gewünschte Tiefe l_{emb} mit dem Gewindeaußendurchmesser der Schraube vorgebohrt. Ein Verdichter kann sich hinter der Spitze im Gewinde befinden, um bei selbstbohrenden Schrauben das Bohrmaterial zu verdichten, um so den Eindrehwiderstand zu reduzieren. Der Reibschaff hat die Funktion den Freilauf des Schaftbereiches sicherzustellen, sodass eine Minderung des Eindrehwiderstandes erreicht wird. [6]

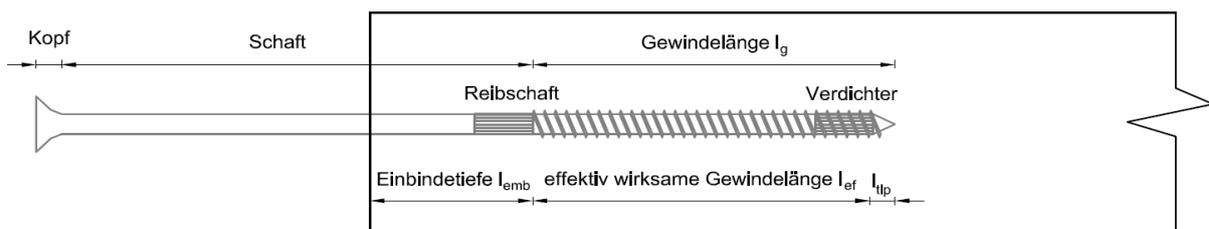


Abbildung 2-1 Bezeichnungen an Holzbauschrauben



Abbildung 2-2 Prototyp P 1

Beim Prototyp P 1 handelt es sich um eine Teilgewindeschraube mit einer Vollspitze, einem Verdichter unmittelbar nach der Spitze sowie einem am Übergang Gewinde zu Schaft, wobei letzterer an dieser Position als Ersatz für den Reibschaff eingesetzt wird. Die Schraube wurde für den Einsatz in Hartlaubholz entwickelt. Im Vergleich zu anderen Schrauben hat die Schraube P 1 einen gegenüber herkömmlichen Schrauben und im Verhältnis zum Außendurchmesser größeren Kerndurchmesser. Parameter wie Ganghöhe p und projizierte Gewindetiefe s wurden hingegen von einer ebenfalls sehr leistungsfähigen Referenzschraube übernommen. Unter der Ganghöhe p versteht man den Abstand der Gewindeflanken und unter der projizierten Gewindetiefe s den Normalabstand vom Schraubenschaft zur Flankenspitze; siehe Abbildung 2-3. Durch den größeren Kerndurchmesser besitzt die Schraube mehr Querschnittsfläche und bietet in Folge einen deutlich höheren Torsionswiderstand, als wesentliche Größe für die selbstbohrende Applikation, sowie einen deutlich höheren Widerstand gegen ein (Stahl-)Zugversagen der Schraube selbst. Es ist in der Folge und entgegen gegenwärtig herkömmlicher Holzbauschrauben möglich, diese zuverlässig ohne Vorbohren in Laubholz zu applizieren. Für detaillierte Angaben zu P 1 sei an dieser Stelle auf [6] verwiesen

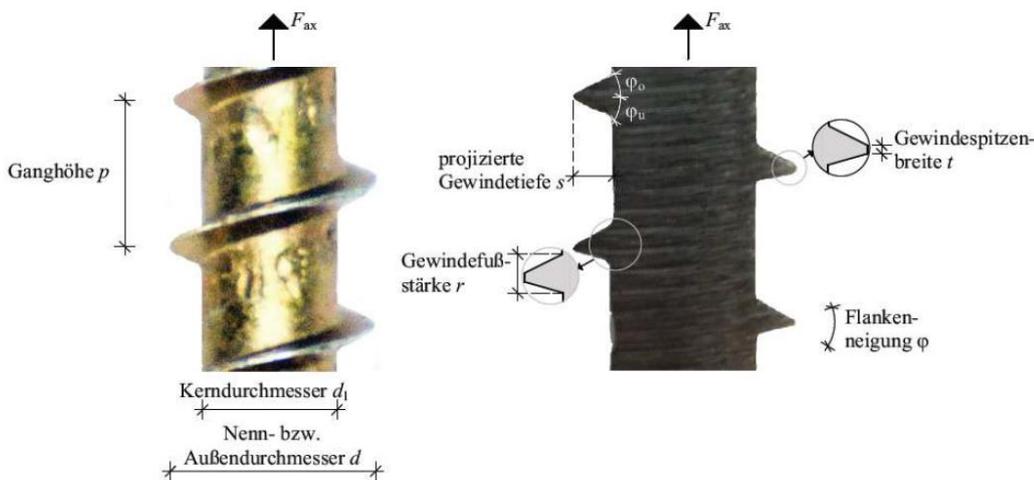


Abbildung 2-3 Geometrieparameter des Gewindes [6]

2-2 ANFORDERUNGEN AN VERBINDUNGEN

Es wird nun eingangs allgemein auf die Anforderungen an Verbindungen im Holzbau eingegangen und speziell auch auf die Besonderheiten von Hirnholzverschraubungen hingewiesen.

Jede Verbindung im Holzbau wird nach den drei Kriterien Tragvermögen, Steifigkeit und Duktilität bewertet. Obwohl alle drei Kriterien von Bedeutung sind, steht meist das Tragvermögen der Verbindung im Vordergrund. Die Steifigkeit der Verbindung wird näher betrachtet, wenn sich wie z.B. bei Fachwerken viele Knoten in einem Tragwerk befinden, wohingegen dem Thema Duktilität oft nur wenig

Aufmerksamkeit geschenkt wird. Auch die ÖNORM EN 19951-1 (kurz: Eurocode 5 oder EC 5) [5] behandelt das Thema Duktilität von Verbindungen nur am Rande im Rahmen von vereinzelt Anmerkungen. Dabei sollte aufgrund der weitgehend spröden Holzversagensarten bei Biegezug- und Schubbelastung und auch im Sinne einer möglichen Kraftumlagerung der Duktilität mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Um optimale Verbindungen zu planen, sollten alle drei Kriterien mit Augenmerk auf das Gesamttragwerk bei der Ausbildung der Verbindung beachtet werden, da sich das Verhalten der einzelnen Knoten auf das Gesamttragwerk auswirkt. Grundsätzliches Ziel jeder Verbindung sollte es sein, ein hohes Tragvermögen, eine hohe Steifigkeit und eine hohe Duktilität zu erreichen. Im Weiteren werden die drei Kriterien näher betrachtet. (Vgl. mit [7] & [8])

2-2.1 TRAGVERMÖGEN

Über das Tragvermögen wird der Widerstand der Verbindung gegenüber äußeren Belastungen angegeben, wobei diese näher definieren muss in Art der Belastung, Richtung, Belastungsgeschwindigkeit, Einwirkungsdauer, etc. Das Tragvermögen wird über den Wert R_k angegeben. Bei dem sogenannten charakteristischen Tragwiderstand handelt es sich in der Regel um einen 5%-Fraktilwert, der z. B. mittels Auswertung von Versuchen bestimmt wird. Bei diesen Versuchen wird der Widerstand R_u (u für „ultimate“), den die einzelnen Versuchskörper maximal aufbringen können, bestimmt, in dem diese bis zum Versagen belastet werden. Zu den wichtigsten Einflussparametern zählen hier: (aus [7])

- Holzart, Holzrohichte und Ausmaß vorhandener Strukturstörungen, wie Äste, Schrägfasrigkeit, Schwindrisse usw.,
- Eigenschaften der Verbindungsmittel: bei stiftförmigen Verbindungsmitteln z. B. die Bruchfestigkeit, die Fließgrenze sowie der Verschiebungsmodul K ,
- Herstellungsqualität: bei stiftförmigen Verbindungsmitteln die Passungsgenauigkeit, bei Verklebung die Einhaltung verfahrenstechnischer Anforderungen.

Die Zuverlässigkeit des im Versuch ermittelten 5%-Fraktilwertes hängt somit entscheidend von der Entnahme repräsentativer Stichproben (bzw. der Herstellung der Holzverbindungen) zur bestmöglichen Abbildung wesentlicher Verteilungscharakteristika, z. B. in Hinblick der Lage, der Streuung und der Form ausgewählter Parameter, sowie von dem Stichprobenumfang ab.

Da eine Holzverbindung aus verschiedenen Gründen versagen kann, ist für jede Verbindung eine Versagensanalyse durchzuführen und der jeweilige maßgebende Versagensmechanismus zur Bestimmung des Tragvermögens zu ermitteln. Mit der Kenntnis der einzelnen Versagensmechanismen kann man Verbindungen auch dahingehend steuern, dass sich ein gewünschter Versagensmechanismus einstellt. Welche Versagensmechanismen bei Hirnholzverschraubungen auftreten können und wie diese abgeschätzt werden können wird in Abschnitt 2-3 näher erläutert.

2-2.1.1 Effektive Verbindungsmittelanzahl

Für Verbindungen ist es zum einen wichtig zu wissen wieviel Last ein einzelnes Verbindungsmittel übertragen kann, zum anderen aber auch wie viel Last die ganze Gruppe übertragen kann. Demnach muss hier auch die Gruppenwirkung berücksichtigt werden. Wegen unvermeidbarer Ungenauigkeiten in der Verbindungsherstellung kann es z. B. zu unplanmäßig ungleichmäßigen Beanspruchungen einzelner Schrauben kommen. Dadurch erreicht der erzielbare Widerstand der Verbindung nicht die Summe der Widerstände der einzelnen Schrauben. Unter anderem um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde

die effektive Verbindungsmittelanzahl n_{ef} eingeführt, welche die Summe der Einzelwiderstände abmindert.

$$R_{ges} = n_{ef} \cdot R \quad (2.1)$$

R_{ges} ... Gesamtwiderstand [kN]

n_{ef} ... effektiv wirksame Verbindungsmittelanzahl [-]

R ... Einzelwiderstand eines Verbindungsmittels [kN]

Laut ÖNORM EN 1995-1-1 [5] wird zur Bemessung einer Verbindung mit einer Schraubengruppe, die in Schaftrichtung durch eine Kraftkomponente beansprucht wird, n_{ef} über Gl. (2.2) berechnet.

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (2.2)$$

2-2.1.2 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η beschreibt das Verhältnis der Tragwiderstände des Bauteils mit der Verbindung zur Tragfähigkeit des Bauteils ohne Verbindung. Hierbei kann sich der Wirkungsgrad entweder auf die Tragfähigkeit des Bruttoquerschnittes oder des Nettoquerschnittes (Reduktion in Folge des Einbringens der Anschlussteile inkl. Verbindungsmittel) beziehen. Der Wirkungsgrad ist ein wichtiger Parameter, um eine Verbindung bewerten zu können und sollte dementsprechend so hoch wie möglich liegen. Durch unvermeidbare Querschnittsschwächungen bei Verwendung von mechanischen Verbindungsmitteln, hält der geschwächte Nettoquerschnitt im Verbindungsbereich im Vergleich zum ungeschwächten Bruttoquerschnitt weniger aus. Daher ist es auch meistens nicht sinnvoll, bei der Bauteilbemessung den Ausnutzungsgrad voll auszuschöpfen, da der Nettoquerschnitt im Verbindungsbereich unter Umständen die Last dann nicht übertragen kann. Bei den meisten Verbindungen liegt der Wirkungsgrad unter 1,0. Nur bei Klebeverbindungen lässt sich ein Wert von 1,0 erreichen. (Vgl. [8])

2-2.2 STEIFIGKEIT

Die Steifigkeit einer Verbindung beschreibt den Widerstand gegenüber Verformungen bei mechanischer Belastung. Die Steifigkeit der einzelnen Verbindungen beeinflusst die Gesamtverformung von Bauwerken und ist vor allem bei Verformungsberechnungen, bei der Berechnung statisch unbestimmter Systemen, stabilitätsgefährdeter Bauteile und allg. beim Berechnen nach Theorie II. Ordnung von Bedeutung. Bei statisch unbestimmten Systemen ziehen hohe Steifigkeiten in den Verbindungen Kräfte an, was dazu führt, dass überproportional Kraft über die Verbindung übertragen werden muss, was bei Verbindungen mit geringen Wirkungsgraden kontraproduktiv ist. Weisen Verbindungen jedoch zu geringe Steifigkeiten auf, kann das zu großen Verformungen oder Durchbiegungen führen, die das Erscheinungsbild beeinträchtigen oder zu Schäden an Sekundärkonstruktionen führen können.

Bei Verbindungen mit axial beanspruchten Holzbauschrauben handelt es sich laut [8] um „steife“ Verbindungen. Mit Hilfe von Verschiebungsmodulen lassen sich Aussagen über die Nachgiebigkeit, Kehrwert der Steifigkeit, von Verbindungsmittel treffen. Die Verschiebungsmodule K_{ser} und K_u stellen die Verformungscharakteristik eines einzelnen Verbindungsmittels dar. K_{ser} gilt hierbei für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und K_u für den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Bei K_u handelt es sich um keinen richtigen Steifigkeitswert, sondern um einen Rechenwert, der für die Belastung im Grenzbereich der Tragfähigkeit angesetzt wird. Diese Verschiebungsmodule werden über Kraft-Weg Diagramme aus Versuchsdaten ermittelt.

Für Holzbauschrauben finden sich in den Zulassungen (hier ein Beispiel aus [9]) Anleitungen zur Berechnung von K_{ser} in Abhängigkeit von Gewindeaußendurchmesser der Schraube d und der effektiven Gewindelänge l_{ef} der Schraube im Holzbauteil. In [9] wird die Berechnung von K_{ser} unabhängig vom Winkel α angegeben, welcher für rein axiale Beanspruchungen des Verbindungsmittels definiert ist als Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung.

$$K_{\text{ser}} = 780 \cdot d^{0,2} \cdot l_{\text{ef}}^{0,4} \quad (2.3)$$

K_{ser} ... Verschiebungsmodul [N/mm]

d ... Außendurchmesser der Schraube [mm]

l_{ef} ... effektiv wirksame Gewindelänge [mm]

Will man die Gesamtsteifigkeit einer Verbindung ermitteln, muss berücksichtigt werden, ob es sich um ein seriell oder paralleles Zusammenwirken der einzelnen Verbindungsmittel handelt. Werden die Verbindungsmittel parallel zur Kraftübertragung angeordnet, wird die Verbindung steifer, werden die Verbindungsmittel in Krafrichtung hintereinander angeordnet, wird die Verbindung weicher. Bei paralleler Wirkung werden die jeweiligen Verschiebungsmodule der Verbindungsmittel aufaddiert, bei serieller Wirkung berechnet sich die Gesamtsteifigkeit über Gl. (2.4).

$$\frac{1}{K_{\text{ges}}} = \sum_1^i \frac{1}{K_i} \quad (2.4)$$

2-2.3 DUKTILITÄT

Die Duktilität beschreibt das plastische Verformungsvermögen von Verbindungen. Da Holz in den meisten Beanspruchungsrichtungen ein quasi sprödes Bruchverhalten besitzt, kann plastische Verformung weitgehend nur über die entsprechende Ausführung der Verbindung bzw. dem einzelnen Verbindungsmittel erreicht werden, was im Allgemeinen über die Verwendung von metallischen Verbindungsmitteln mit entsprechend gewählter Festigkeitsklasse und Güte gewährleistet werden kann. Ziel jeder Verbindung muss es sein, dass sich Versagen als Folge bereits beobachtbarer größerer Verformungen ankündigt und nicht schlagartig geschieht. Auch im Sinne von möglichen Lastumlagerungen ist ein Verformungsvermögen der Verbindung anzustreben. Abbildung 2-4 zeigt anhand eines Last-Verschiebungsdiagrammes das Verhalten eines optimalen Verbindungsmittels, bei dem der Bruch erst nach einer größeren plastischen Verformung auftritt und nicht spröde schon im elastischen Bereich. Das darin gezeigte, statische Duktilitätsmaß ist das Verhältnis aus plastischer Verformung w_u zu elastischer Verformung w_y , welches das Verformungsverhalten einer Verbindung beschreibt. In Abbildung 2-4 sind auch die in Abschnitt 2-2.2 beschriebenen Verschiebungsmodule K_{ser} und K_u eingezeichnet.

Stoßausbildung besonderes Augenmerk geschenkt werden. Als Optimierung von Verbindungen mit Hirnholzverschraubungen in Bezug auf Duktilität schlägt Obermayr in [12] vor, eine Kette mit einem versagensrelevanten duktilen Kettenglied zu konstruieren. Die Idee dahinter ist, dass man zwei spröde Hirnholzverschraubungen mit einer duktilen Stahlverbindung schließt. Diese Verbindung könnte zum Beispiel, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, eine Bolzenverbindung sein. Wenn die Verbindungskette so ausgelegt wird, dass die Stahlverbindung mit ausreichender Zuverlässigkeit vor dem möglichen Versagen der Hirnholzanschlüsse im Sinne einer Bemessung mittels „Überlastfaktor“, zum Fließen kommt, könnte die gesamte plastische Verformung von diesem Glied übernommen werden.

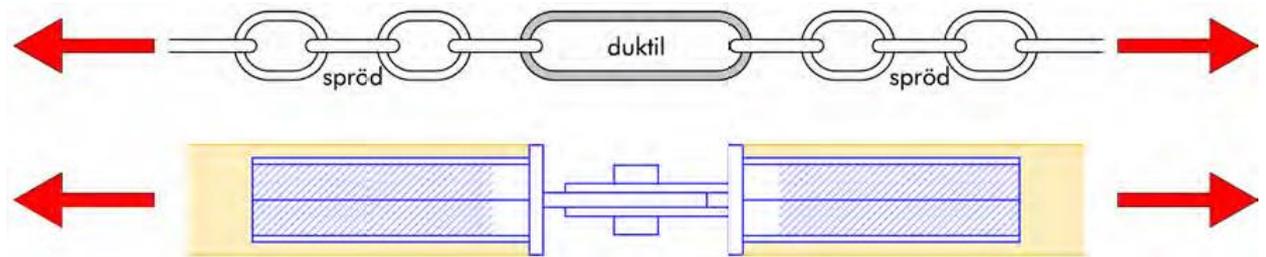


Abbildung 2-5 Prinzip der duktilen Kette [12]

2-3 VERSAGENSMECHANISMEN

Um die zuvor getätigten Überlegungen in ein konkreteres Konzept zu gießen, gilt es, zuerst mögliche Versagensszenarien der Hirnholzverschraubung als solche aufzuzeigen und zu diskutieren. Folgende Versagensmechanismen kommen hierbei in Frage:

- **Ausziehen der Schraube → Holzversagen**
- **Stahlbruch der Schraube → Stahlversagen**
- **Aufspalten → Holzversagen**
- **Kopfdurchziehen → Holzversagen**
- **Stabilitätsversagen der Schraube bei axialer Druckbeanspruchung → Stahlversagen**
- **Herausscheren des durch einen Teil der Schraubengruppe umschlossenen Holzvolumens oder mehrerer Holzvolumina (z.B. Linienscheren) in Folge Netto-Zugversagen längs zur Faser gemeinsam mit Schubversagen → Holzversagen**
- **Herausscheren des durch die Schraubengruppe umschlossenen Holzvolumens in Folge Netto-Zugversagen längs zur Faser gemeinsam mit Schubversagen → Holzversagen**
- **Zug- bzw. Druckversagen des Tragelementes aus Holz bzw. Holzwerkstoff im Netto-Querschnitt (im Bereich des Anschlusses) bzw. im Brutto-Querschnitt (in Folge lokaler Schwächung durch Holzmerkmale, etc., oder Stabilitätsversagen) → Holzversagen**

Da für diese Arbeit der Fokus auf axial zugbeanspruchte Hirnholzverschraubungen mit außenliegendem Stahlblech zur Lasteinleitung liegt, sind nicht alle angeführten Versagensarten maßgebend. Betrachtet man eine Einzelschraube sind die ersten beiden Versagensmechanismen von Interesse; diese werden im Weiteren näher ausgeführt. Die beiden Versagensmechanismen Ausziehen und Stahlbruch der Schraube hängen bei gegebener Materialwahl für die Tragelemente aus Holz bzw. Holzwerkstoff über die Wahl der im Holz eingebrachten effektiven Gewindelänge sowie den Materialeigenschaften des Schraubenstahls und der gewählten Gewindegeometrie zusammen. Wenn beide Versagensmechanismen maßgebend werden können, kann man über die Wahl der Gewindelänge den Versagensmechanismus steuern. Ab einer gewissen Gewindelänge kommt es bei Überschreitung der axialen Tragfähigkeit der Schraube zu

einem Schraubenbruch. Verkürzt man die Länge des Gewindes wird es auf Grund der kleineren vorhandenen Scherfläche zu einem Herausziehen der Schraube aus dem Holzbauteil kommen. Der Versagensmechanismus Kopfdurchziehen kann aufgrund der außenliegenden Stahlplatte ausgeschlossen werden. Da die Schrauben bei den hier untersuchten Hirnholzverschraubungen auf Zug belastet werden, kann auch der Versagensmechanismus Stabilitätsversagen der Schraube bei Druckbeanspruchung ausgeschlossen werden.

Betrachtet man eine ganze Schraubengruppe, ist im zu betrachtenden Fall vor allem der Versagensmechanismus Aufspalten des zwischen den Schrauben liegenden Holzteils maßgebend. Dieser kann hauptsächlich durch die richtige Wahl der Schraubenabstände bzw. durch eine entsprechende Einbindung des Gewindes verhindert werden. Ein Versagen des Nettoquerschnittes bei Zuganschlüssen, die mit Hirnholzverschraubungen ausgebildet werden, kann vor allem dadurch verhindert werden, dass bei der Bauteilbemessung die Querschnittsreserven nicht voll ausgelastet werden. Somit können die Reserven für den geschwächten Nettoquerschnitt herangezogen werden. Aufgrund der axialen Beanspruchung der Schrauben, kann ein Linienscherversagen bzw. ein Blockscherversagen weitgehend ausgeschlossen werden. Bei Ausziehversuchen von Hirnholzverschraubungen, die in [13] in Birken-Brettschichtholz durchgeführt wurden, kam es jedoch vor, dass ein zwischen den Schrauben liegendes Holzvolumen aus dem Querschnitt herausgezogen wurde, siehe Abbildung 2-6. Diese Versagensart kann ebenfalls mit der richtigen Wahl der Schraubenabstände verhindert werden

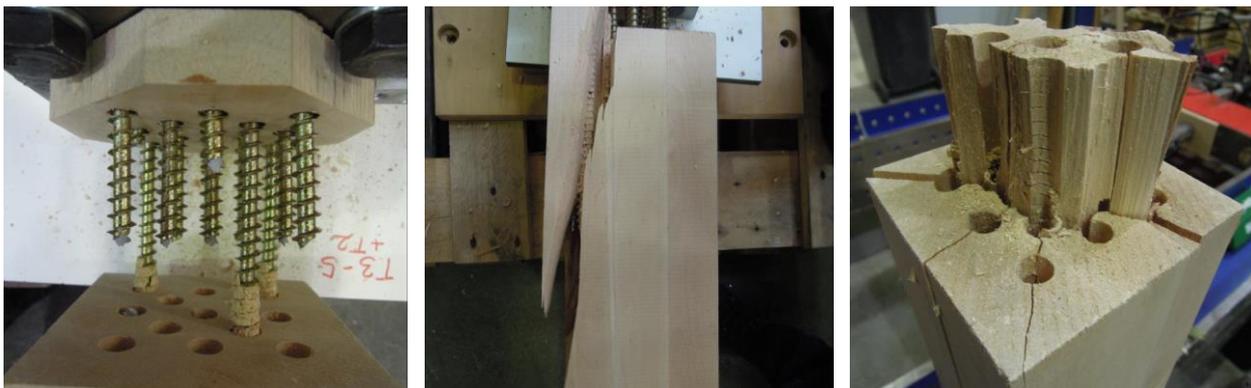


Abbildung 2-6 Versagensarten: links: Kombination Schraubenbruch und Ausziehen der Schraube; Mitte: Aufspalten; rechts: Aufspalten und Ausziehen eines zwischen den Schrauben liegenden Holzvolumens [14]

Im Folgenden wird auf die Versagensmechanismen Ausziehen der Schraube, Stahlbruch der Schraube und Aufspalten näher eingegangen.

2-3.1 AUSZIEHEN DER SCHRAUBE

Beim Ausziehen der Schraube kommt es zu einem Scherversagen des Holzes entlang des verankerten Gewindes der Schraube. Es wird also die Schraube samt dem zwischen dem Gewinde liegenden Holz aus dem Tragelement gezogen. Die Ausziehfestigkeit berechnet sich aus dem Quotienten des maximalen Ausziehwiderstandes und der Scherfläche, definiert als Mantelfläche des ins Holz eingebetteten Gewindes. Die Mantelfläche wird als Zylinder mit dem Außendurchmesser der Schraube d und der effektiven Länge l_{ef} berechnet. Die Bereiche der Spitze und falls vorhanden des Reibschafes sind für die Berechnung der Mantelfläche in der Regel nicht zu berücksichtigen. Wird die Spitze abgezogen, ist der

Längeneinfluss der Schraube linear, wird sie nicht abgezogen, wie z.B. in [15], ist die Länge im Modell mit einer Potenz versehen und der Längeneinfluss dadurch nicht-linear.

Für die Abschätzung der Schraubentragfähigkeit von herkömmlichen Holzbauschrauben bei Applizierung in Hartlaubhölzern hat Hübner [16] ca. 2.600 Schraubenausziehprüfungen in Buchen-, Eschen und Robinien-Brettschichtholz mit einem Rohdichtebereich von 550 kg/m³ bis 920 kg/m³ durchgeführt. Auf Grundlage dieser Ausziehprüfungen wurde Gl. (2.5) entwickelt. Bei diesem Modell wird die Spitze zur Berechnung der Mantelfläche nicht berücksichtigt.

$$R_{ax,mean} = 2,31 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{1,06} \cdot \rho_k^{1,59} \cdot d^{0,585} \begin{cases} 1 - 5,72 \cdot 10^{-3} (30 - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.5)$$

$R_{ax,mean}$... Mittelwert des Ausziehwiderstandes [N]
 l_{ef} ... effektive Einschraublänge [mm]
 ρ_k ... charakteristische Rohdichte [kg/m³]
 d ... Schraubendurchmesser [mm]
 α ... Einschraubwinkel [°]

$$R_{ax,k} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,66} \begin{cases} 1 - 0,01(30 - \alpha) & \text{für } 0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ \\ 1 & \text{für } 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.6)$$

$R_{ax,k}$... charakteristischer Ausziehwiderstand [N]

Die Gl. (2.6) ist von Gl. (2.5) abgeleitet und gerundet. Setzt man Gl. (2.5) oder Gl. (2.6) mit der Tragfähigkeit der Schraube auf Stahlbruch gleich, kann so die effektive Schraubenlänge bestimmt werden, ab der es zu einem Schraubenbruch kommt.

Diese Gleichungen gelten jedoch nur für quasi-statische Kurzzeitbelastungen von 90 ± 30 Sekunden. Um einen Langzeiteinfluss zu berücksichtigen, schlägt Hübner in Anlehnung an [17], die Langzeittests in Nadelholz durchführten, vor, eine Einbindetiefe von mindestens 2 d bei in Faserrichtung eingebrachten Schrauben einzuhalten.

2-3.2 STAHLBRUCH DER SCHRAUBE

Der Stahlbruch der Schraube ist jener Mechanismus, der sich am genauesten abschätzen lässt, da der Werkstoff Stahl im Vergleich zum natürlichen Werkstoff Holz deutlich geringere Streuungen bei den Festigkeitswerten aufweist. Das liegt vor allem daran, dass es sich bei Stahl um einen viel homogeneren und technisch modifizierten bzw. mit spezifischen Eigenschaften erzeugten, künstlichen Werkstoff handelt. Um die Tragfähigkeit der Schraube auf Stahlbruch, $f_{tens,k}$ zu berechnen, werden in der Regel die Werte in den jeweiligen Zulassungen der Schraubenhersteller herangezogen. Der Bemessungswert der Tragfähigkeit berechnet sich dann nach Gl (2.7):

$$F_{ax,Stahl,Rd} = \frac{f_{tens,k}}{\gamma_{M2}} \quad (2.7)$$

$F_{ax,Stahl,Rd}$... Bemessungswert für den Stahlzugwiderstand
 $f_{tens,k}$... charakteristischer Wert des Stahlzugwiderstandes
 γ_{M2} ... Teilsicherheitsbeiwert

Bei dem mit Gl. (2.7) berechneten Wert handelt es sich wie bereits erwähnt um einen Bemessungswert. Für Laborversuche wird die Schraubentragfähigkeit mittels Zugprüfungen für die verwendete Schraubencharge ermittelt.

2-3.3 AUFSPALTEN

Bei diesem Versagensmechanismus spaltet das Holz auf Grund von zu hohen Querspannungen auf. Durch die Schrauben entstehen im Holz beim Applizieren und bei Belastung auf Herausziehen durch die Gewindeflanken lokale Druckkräfte. Aus diesen lokalen Druckkräften resultieren dann bei der Kraftumlenkung im Holz Querspannungen, die zu einem Aufspalten führen. Auf die Entstehung und Verteilung der Spaltkräfte wird in Abschnitt 2-4.2 noch genauer eingegangen.

Zum Aufspalten kann es bei Holz entweder durch lokale Querschnittsschwächungen, wie zum Beispiel durch lokale Schrägfasern, oder durch eine falsche Wahl von Mindestabständen kommen. Durch zu klein gewählte Mindestabstände zwischen den Schrauben oder zum Bauteilrand wird ein Aufspalten begünstigt, während mit größeren Abständen die Spaltneigung sinkt. Daher werden nachfolgend die Mindest- und Randabstände noch eingehender besprochen.

Im Zuge der Vorversuche für [12] wurde festgestellt, dass eine größere Einbindetiefe l_{emb} der Schraube bei axial beanspruchten Hirnholzverschraubungen die Wahrscheinlichkeit für das Aufspalten reduzieren kann. Bei [12] wurde daher eine Einbindetiefe von 50 mm gewählt, was dort bei einer Verwendung von Schrauben mit einem Außendurchmesser von 10 mm den fünffachen Gewindeaußendurchmesser entsprach.

In [6] konnte mit Hilfe von Einschraub- und Ausziehversuchen mit Messschrauben 0° zur Faser in Buchenvollholz und Pollmeier BauBuche festgestellt werden, dass die auftretenden Spaltkräfte beim Eindrehen der Schrauben um den Faktor Zwei bis Vier höher liegen als die Spaltkräfte beim Ausziehen der Schraube. Außerdem zeigte sich bei Langzeitversuchen mit Messschrauben, dass sich die Spaltkräfte, die durch das Eindrehen entstehen, rasch abbauen. Bereits 5 min nach Eindrehen der Schrauben waren 12 bis 18 % der Spaltkräfte in den Versuchen abgebaut.

2-3.3.1 Mindestabstände

Für in Hirnholz situierte Holzbauschrauben findet man in der ÖNORM EN 1995-1-1 [5] keine Angaben für Mindestabstände, da dort nur Verschraubungen mit einem Winkel α größer als 30° geregelt sind. Per Definition der ÖNORM handelt es sich bei den Abständen für Hirnholzverschraubungen um Abstände quer zur Faser und somit müsste folglich ein Mindestabstand von $a_2 = 5 d$ eingehalten werden.

Untersuchungen von Gehri [18] mit eingeklebten Ankern in Fichtenholz zeigten, dass ein Mindestabstand von $5 d$ zwischen den Ankern eingehalten werden muss, um eine gegenseitige Beeinflussung auszuschließen. Wird der Abstand kleiner gewählt, sinkt die Ausziehtragfähigkeit, wohingegen sie ab einem Mindestabstand von $5 d$ konstant bleibt. Somit wird der Wert aus der ÖNORM für eingeklebte Anker in Fichtenholz bestätigt. Da dieser Abstand, bei einem Wirkungsgrad für eingeklebte Anker von gerade einmal 40 %, aber zu unwirtschaftlich ist, schlägt Gehri vor, mit einem Faktor k_{red} die Abminderung der Ausziehtragfähigkeit im Rahmen der Bemessung in Kauf zu nehmen und die Abstände zu verringern. Somit können mit kleineren Abständen in Summe leistungsstärkere Anschlüsse konzipiert werden.

$$k_{\text{red}} = \left(\frac{a}{5d} \right)^{0,35} \quad \text{für } a/d \leq 5 \quad (2.8)$$

- k_{red} ... Reduktionsfaktor [-]
 a ... Ankerabstand [mm]
 d ... Außen- bzw. Nenndurchmesser [mm]

Abbildung 2-7 zeigt den optimalen Ankerabstand, um leistungsfähige Anschlüsse zu entwickeln. Es wird vorgeschlagen, einen Abstand von $2,6 d$ bis $3,3 d$ zu wählen. Bei diesem Diagramm handelt es sich um eine Orientierungshilfe für eingeklebte Anker, aber die grundlegende Aussage kann auch für Schraubengruppen herangezogen werden. Im Vergleich zu Schrauben kann bei eingeklebten Ankern ein Teil der Querkzugspannungen durch die Verklebung aufgenommen werden. Je enger die Anker nebeneinander gesetzt werden, desto mehr Anker können gesetzt werden und desto mehr Kraft kann über die Anker übertragen werden. Der Holzquerschnitt wird jedoch bei einer größeren Anzahl an Ankern stärker geschwächt und kann somit weniger Kraft übertragen. Außerdem lassen sich die Anker nicht beliebig eng nebeneinander setzen, da bei zu kleinen Abständen die Ausziehtragfähigkeit stark abnimmt und es leicht zum Aufspalten des Holzquerschnittes kommen kann. Die Optimierung solcher Verbindungen muss also dahin gehen, jene Abstände zu finden, bei denen es zu keinen bzw. vertretbaren Abminderungen der übertragbaren Kraft kommt und es möglich ist, genügend Verbindungsmittel einbringen zu können, um eine wirtschaftlich sinnvolle Verbindung zu konzipieren.

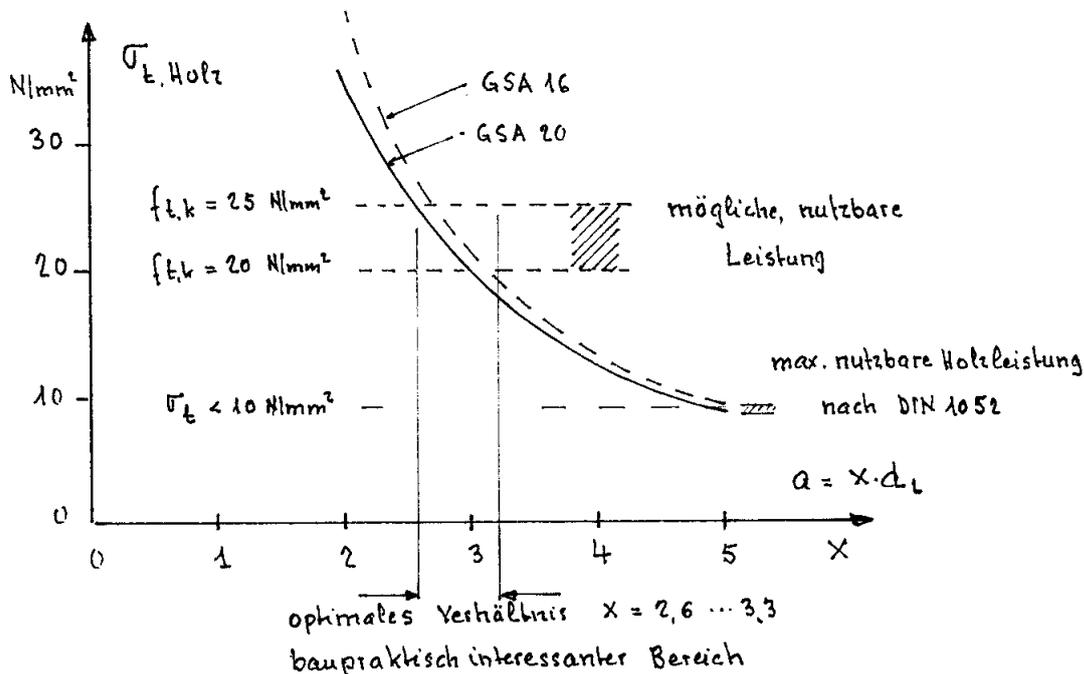


Abbildung 2-7 Leistungssteigerung in Funktion des Ankerabstandes $a = X \cdot d$ [10]

Plüss [19] untersuchte verschiedene Schraubenabstände von in die Schmalseite von Brettsperrholz aus Fichtenholz applizierten Schraubengruppen. Das Brettsperrholz bestand dabei aus orthogonal verklebten Brettlagen. Im Zuge dieser Arbeit wurden auch Verschraubungen in der Schmalfläche im Hirnholz durchgeführt. Bei diesen faserparallelen Verschraubungen wurde festgestellt, dass ein Abstand von zumindest $2,5 d$ (in [19] als $a_{1,p}$ bezeichnet) ausreicht, um die maximale Last auf die Schraube aufbringen zu können.

In [12] wurden Hirnholzverschraubungen mit Vollgewindeschrauben in Birkenholz durchgeführt. Dort wurde ein versetztes Schraubenbild gewählt, bei dem die Schrauben einen diagonalen Abstand untereinander von $2,1 d$ aufwiesen. Mit der richtigen Wahl der effektiven Gewindelänge und Einbindetiefe traten hier die Versagensmechanismen Ausziehen und Schraubenbruch vor dem Versagensmechanismus Aufspalten auf.

Ergänzend zu [12] wurde in [13] versucht, den maximal möglichen Wirkungsgrad für Verschraubungen in Hirnholz in Birkenbrettschichtholz zu ermitteln. Bei den zunächst durchgeführten Einzelschraubenversuchen versagte bei einer Querschnittsfläche von $2,5 d \times 2,5 d$ das Holz in 10 % der Fälle auf Aufspalten. Bei Querschnittsflächen von $3,5 d \times 3,5 d$ bzw. $5 d \times 5 d$ konnte kein Aufspalten mehr festgestellt werden. Für die Gruppenversuche wurde, wie bei Obermayr [12], ein versetztes Schraubenbild mit einem Schraubenabstand von $2,1 d$ gewählt. Hierbei kam es bei einem Viertel der Prüfungen zu einem nicht angestrebten Aufspalten des Holzes. Um ein Aufspalten ausschließen zu können, muss der Schraubenabstand demnach größer gewählt werden.

2-3.3.2 Randabstände

Die ÖNORM [5] gibt keine Randabstände für in Hirnholz applizierte Schrauben an. Den Überlegungen in Abschnitt 2-3.3.1 folgend, müsste der Randabstand $a_{2,CG}$ quer zur Faser von $4 d$ eingehalten werden.

Um die Randabstände in Fichtenholz zu untersuchen, wurden von Gattermig [20] Versuche mit Schrauben mit einem nominellen Gewindeaußendurchmesser von 6 mm unter Variation des Einschraubwinkels durchgeführt. Die Randabstände wurden dabei zwischen $0,5 d$ und $7,5 d$ variiert. Wie Abbildung 2-8 für 0° zur Faser eingebrachter Schrauben zeigt, kommt es bei der Wahl eines Randabstandes von $0,5 d$ zu einem signifikanten Abfall der Bruchkraft. Während ab einem Randabstand von $1 d$ keine signifikante Änderung der aufnehmbaren Kraft, weder im Median noch bei den unteren Whiskern, zu erkennen ist.

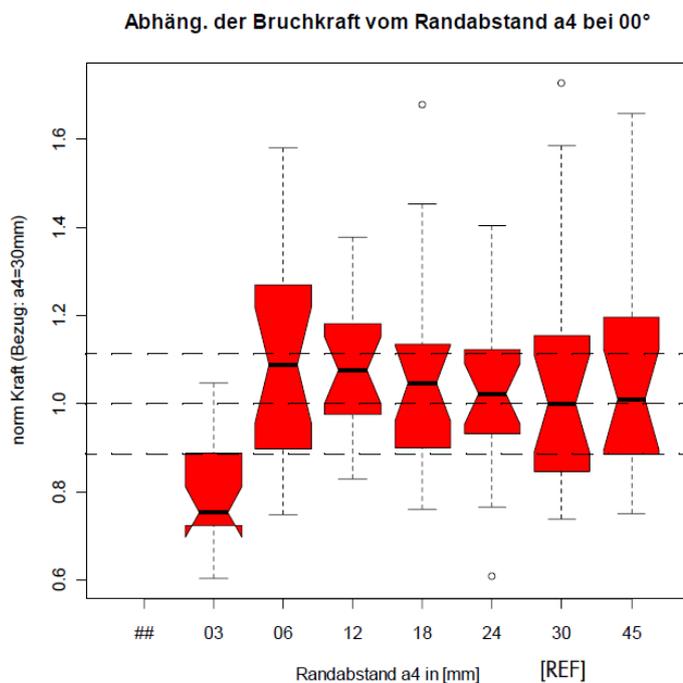


Abbildung 2-8 *Abhängigkeit der Bruchkraft vom Randabstand der Schrauben bei Applikation und Beanspruchung 0° zur Faser [12]*

Für Laubhölzer liegen keine systematischen Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Randabstände für 0° zur Faser eingebrachter Schrauben vor. Obermayr wählte in [12] für die durchgeführten Ausziehversuche 0° zur Faser in Birkenbrettschichtholz einen Randabstand von $2d$.

2-4 KRAFTVERTEILUNG

Es wird nun näher auf die Kraftverteilung entlang der Schraubenachse und die Verteilung der Spaltkräfte eingegangen. Bei einer Krafteinleitung parallel zur Faser, wie bei Hirnholzverschraubungen, ist generell auf Grund stetiger Kraftübertragung zwischen Schraube und Holz ein relativ günstiger Kraftfluss möglich. Die Verwendung einer großen Anzahl an Verbindungsmittel ist laut [21] anzustreben, um geringe Dehnungsspitzen zu erhalten.

2-4.1 KRAFTVERTEILUNG ENTLANG DER SCHRAUBE

Zur Untersuchung der Kraftverteilung entlang einer Schraube bei axialer Belastung wurden in [22] Ausziehversuche von selbstbohrenden Schrauben in Fichtenholz durchgeführt. Dabei wurden mit Hilfe von Dehnmessstreifen, die am Schraubengewinde angebracht waren, während der Belastung auf Herausziehen die Dehnungen entlang der Schraubenachse gemessen, um so Rückschlüsse auf die Kraftverteilung ziehen zu können. Bei der Auswertung der Messdaten wurde ferner in zwei verschiedene Lastniveaus unterschieden, einmal 30 % von F_{max} im linear-elastischen Bereich und einmal 90 % von F_{max} im nicht-linearen Bereich. Für die Versuche wurde die wirksame Gewindelänge l_{ef} zwischen 60 und 240 mm und der Einschraubwinkel α der Schraube mit 0° , 45° und 90° variiert. Abbildung 2-9 zeigt die Versuchsergebnisse für die Einschraubwinkel 0° , 45° und 90° . Es lässt sich jeweils ein deutlich nicht-linearer Kraftverlauf entlang der effektiven Gewindelänge l_{ef} feststellen. Die Autoren kamen zu der Erkenntnis, dass die Einbindetiefe und der Einschraubwinkel α (mit Ausnahme von $\alpha = 90$ bei 90 % von F_{max}) nur vernachlässigbar kleine Auswirkungen auf die qualitativen Spannungsverläufe zu scheinen haben.

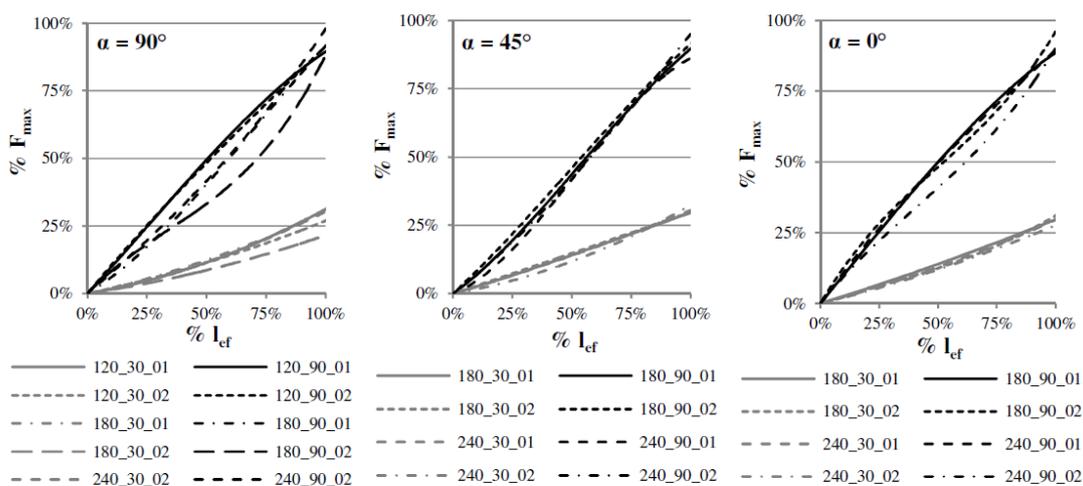


Abbildung 2-9 Kraftverteilung von F_{ax} in Abhängigkeit von α ; polynomische Regressionsgraphen der gemessenen Werte [22]

Die Ergebnisse der gemessenen Kraftverteilung wurden anschließend mit dem Modell von Volkerson [23] für den linear-elastischen schubnachgiebigen Verbund verglichen; siehe Gl. (2.9). Dabei wurden nur die Ergebnisse auf dem Lastniveau 30 % von F_{\max} herangezogen, da die Schrauben dabei im linear-elastischen Bereich belastet wurden.

$$N_{ax}(x) = F_{ax} \cdot \frac{\sinh(\omega \cdot x)}{\sinh(\omega \cdot l_{ef})} \quad (2.9)$$

$$\text{mit } \omega^2 = \frac{G}{t} \cdot \pi \cdot d_c \cdot \left(\frac{1}{(EA)_{st}} + \frac{1}{(EA)_w} \right)$$

- $N_{ax} \dots$ Kraft entlang der Schraubenachse [kN]
- $F_{ax} \dots$ Belastung in Schraubenrichtung [kN]
- $l_{ef} \dots$ effektiv wirksame Gewindelänge [mm]
- $G \dots$ Schubmodul der Scherfläche [N/mm²]
- $t \dots$ Dicke der Scherfläche [mm]
- $d_c \dots$ Kerndurchmesser [mm]
- $A_{st} \dots$ Stahlfläche [mm²]
- $A_w \dots$ Holzfläche [mm²]

Die Wahl der Einflussfläche A_w im Holz hat einen großen Einfluss auf den Verlauf der berechneten Kraft N_{ax} nach Gl. (2.9). Es wurden dafür zwei Berechnungsansätze gewählt, die laut Autoren auf Beobachtung von Ausziehversuchen beruhen. Für den ersten Ansatz wurden zur Berechnung von A_w die minimalen Abstände ermittelt ($a_{w,1}$, $b_{w,1}$), die notwendig sind, um ein Versagen auf Herausziehen von axial beanspruchten Schrauben zu erreichen. Bei dem zweiten Ansatz wurden die maximal möglichen Abstände ($a_{w,2}$, $b_{w,2}$) herangezogen, was der gesamten zur Verfügung stehenden Holzfläche der Versuchskörper entspricht. Die Bezeichnungen sind in Abbildung 2-10 sowie Gl (2.10) bis Gl (2.13) dargestellt. Mit dem zweiten Ansatz für die Ermittlung der Holzeinflussfläche A_w für die Berechnung von N_{ax} nach Gl. (2.9) konnte eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten festgestellt werden.

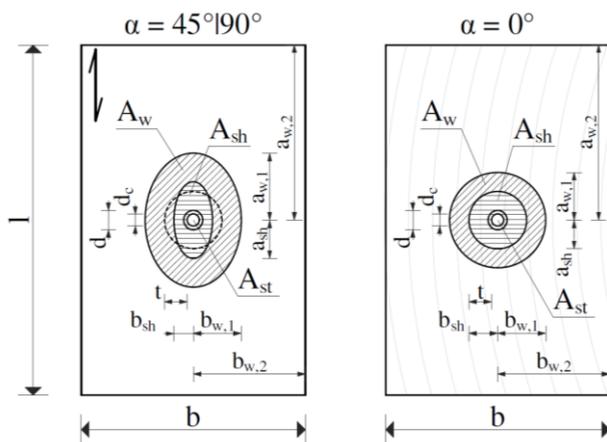


Abbildung 2-10 Angenommene Geometrieparameter für die Berechnung von $N_{ax}(x)$ [22]

$$\alpha = 90^\circ | 45^\circ : a_w = \frac{a_1}{2} = 3,5d; b_w = \frac{a_2}{2} = 2,5 \div 3,5d \quad (2.10)$$

$$\alpha = 0^\circ : a_w = b_w = 2,5d \quad (2.11)$$

$$\alpha = 90^\circ | 45^\circ : a_{sh} = 3d : b_{sh} = 1,5d \quad (2.12)$$

$$\alpha = 0^\circ : a_{sh} = b_{sh} = 1,5d \quad (2.13)$$

Pöll führte in [6] eine FE-Simulation mit dem Programm RFEM durch, um den Berechnungsansatz von Volkerson [23] zu überprüfen. Dabei wurde eine Schraube mit einem Außendurchmesser $d = 8$ mm und einer effektive Gewindelänge $l_{ef} = 50$ mm mit einem umgebenden Holzzylinder, der einen radialen Abstand von $3d = 24$ mm aufwies, modelliert. Belastet wurde die Schraube mit 15 kN. Abbildung 2-11 stellt den Spannungsverlauf entlang der Schraube dar. Es lässt sich deutlich der nicht-lineare Verlauf erkennen, bei dem im vorderen Teil des Schraubengewindes in Relation mehr Kraft übertragen wird als im weiter innen liegenden Gewindeteil.

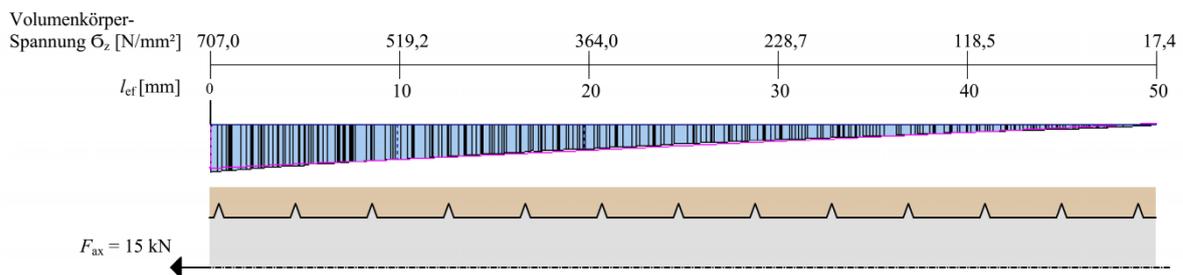


Abbildung 2-11 Berechneter Kraftverlauf entlang einer Schraube [6]

In Abbildung 2-12 ist auch der Vergleich mit Volkerson [23] dargestellt, wobei eine gute Übereinstimmung der Differentialgleichung mit dem Spannungsverlauf aus der FE-Studie festzustellen ist.

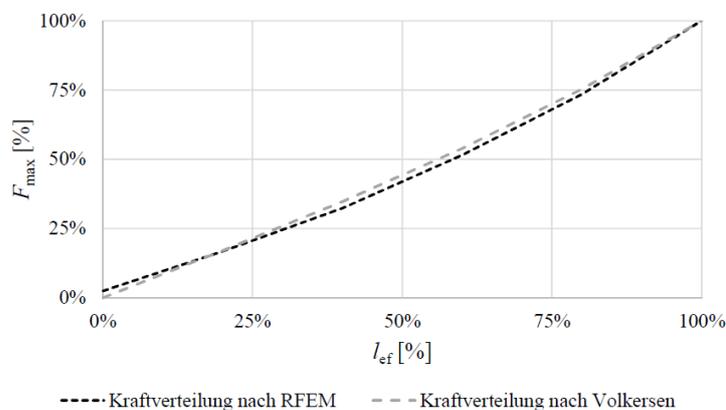


Abbildung 2-12 Vergleich RFEM Berechnung mit Gl. (2.9) [6]

2-4.2 SPALTKRÄFTE

Es wird nun ein mechanisches Modell von Enders-Comberg [24] vorgestellt, das für eingedrehte Gewindestangen 0° zur Faser entwickelt wurde, jedoch aufgrund derselben Verbundwirkung im Holz auch für Schrauben gilt. Mit dem Modell lassen sich resultierende Spaltkräfte aus axialer Belastung erklären und in Bezug auf die übertragene Kraft quantitativ abschätzen. Das Modell kann auch herangezogen werden, um Verstärkungsmaßnahmen gegen Aufspalten (sog. Spaltbewehrungen) zu bemessen. Unter Spaltbewehrung versteht man z. B. zusätzliche Schrauben, die quer zu den applizierten

Schrauben eingebracht werden. Diese sollen die entstehenden Spaltkräfte aufnehmen und so ein Aufspalten bzw. das in Folge beobachtbare Klaffen der Spaltfugen verhindern.

Das Modell betrachtet zunächst nur eine einzelne Gewindeflanke und es wird jene horizontale Kraft bestimmt, die benötigt wird, um ein „Herausrutschen des Keils“ zu verhindern. Die horizontale Kraft entspricht dann dem Spaltanteil.

Das Modell basiert auf einem linear-elastischen Ansatz und es werden dabei folgende Annahmen getroffen: (aus [24] übernommen)

- Es wird von einer idealisierten Gewindeflanke ausgegangen, die in das angrenzende Holz hineinragt
- Das Holz „drückt“ sich rechtwinkelig zur Ausrichtung der Kontaktfläche mit der Kraft N ab.
- Die Reibkraft H wirkt einem Abrutschen in der Kontaktfuge entgegen.
- Die Spaltkraft X wird horizontal wirkend angenommen.

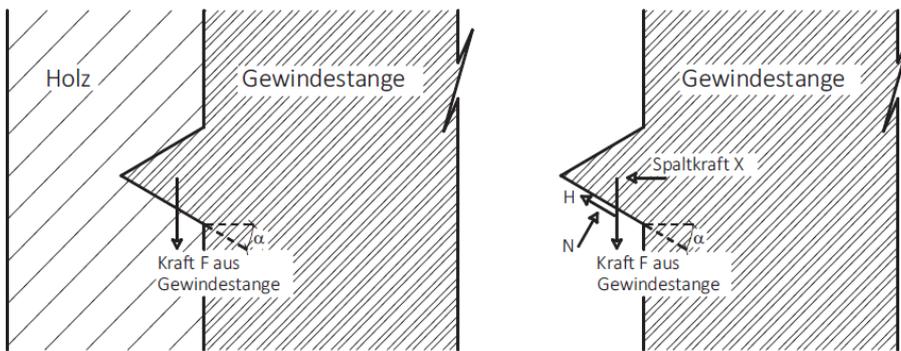


Abbildung 2-13 2 D Modellannahmen [14]

Aus der Summe der horizontalen und vertikalen Kräfte und der Haftbedingung $H = \mu_0 \cdot N$ ergibt sich dann:

$$X = F \cdot \frac{(\sin \alpha - \mu_0 \cdot \cos \alpha)}{(\cos \alpha + \mu_0 \cdot \sin \alpha)} \quad (2.14)$$

X ... Spaltkraft X

F ... Kraft F aus Gewindestange

α ... Flankenwinkel (hier mit $\alpha = 30^\circ$ gewählt)

μ_0 ... Reibungsbeiwert (hier mit $\mu_0 = 0,3$ gewählt)

Mit den gewählten Annahmen führt das zu der Spaltkraft X :

$$X = F \cdot 0,24 \quad (2.15)$$

Wenn man das Modell auf einen dreidimensionalen Fall überträgt, würde das bedeuten, dass die Summe aller in radialer Richtung auftretenden Spaltkräfte 0,24-mal der axialen Gewindestangenkraft F entspricht. Laut Enders-Comberg [25] kann man bei Verwendung von Brettsperrholzprodukten annehmen, dass nur der Spaltanteil, der rechtwinkelig zur Faser (X_{\perp}) auftritt, ein Spalten hervorruft, da durch die Sperrwirkung der Querlage das Auftreten einer Spaltkraft in Faserrichtung (X_{\parallel}) verhindert wird. Im

Modell wird daher bei Verwendung von Brettsperrholzprodukten nur die Hälfte der Kraft als Spaltkraft angesetzt.

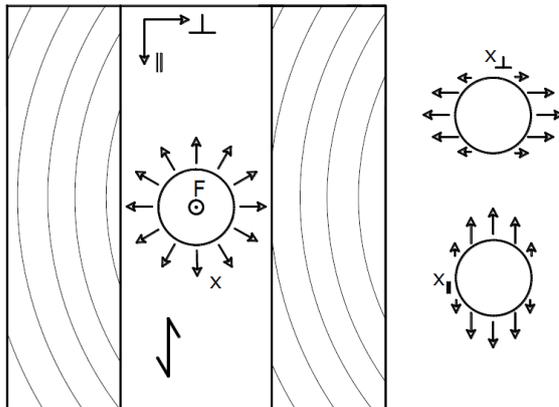


Abbildung 2-14 Aufteilung der Spaltkräfte [24]

In Folge der Anschlusszentrizität muss ein weiterer Spaltkraftanteil berücksichtigt werden, vgl. Abbildung 2-15. In Folge der Anschlusszentrizität e bildet sich ein Moment M_{actio} , dem ein Moment M_{reactio} entgegen wirken muss. Dieses Moment M_{reactio} ergibt sich aus den rechtwinkelig zur Stabachse wirkenden Kräften. Vereinfachend wird angenommen, dass nur im äußeren Bereich die Zugkraft ($F_{\text{Spalten},\perp,M}$) aufgenommen wird und sich die Kontaktdruckkraft dreiecksförmig über Länge $L/2$ verteilt. Somit kommt es in diesem Bereich zu einer Überdrückung, die der Spaltkraft $F_{\text{Spalten},\perp,V}$ entgegen wirkt. Der Abstand a gibt hier die Position der Spaltbewehrung an. An dieser Stelle treten die größtmöglichen Spaltkräfte auf.

$$M_{\text{actio}} = \frac{F}{4} \cdot e \quad (2.16)$$

$$M_{\text{reactio}} = F_{\text{Spalten},\perp,M} \cdot b \quad (2.17)$$

Da M_{actio} in oberer und unterer Längslage wirkt, ergibt sich:

$$\rightarrow F_{\text{Spalten},\perp,M} = 2 \cdot \frac{F}{4} \cdot \frac{e}{b} \quad (2.18)$$

$$\text{mit } e = 0,5 \cdot (h_L + h_Q - d) \text{ und } b = \frac{5}{6} \cdot L - a \quad (2.19)$$

Wegen der Überdrückung im inneren Bereich wird zur Berechnung der Gesamtspaltkräfte für den Spaltkraftanteil $F_{\text{Spalten},\perp,V}$ nur die Hälfte angesetzt. Für die Gesamtspaltkraft, die eine Spaltbewehrung aufnehmen müsste, gilt:

$$F_{\text{Spalten},\perp,k} = 0,5 \cdot F_{\text{Spalten},\perp,V} + F_{\text{Spalten},\perp,M} \quad (2.20)$$

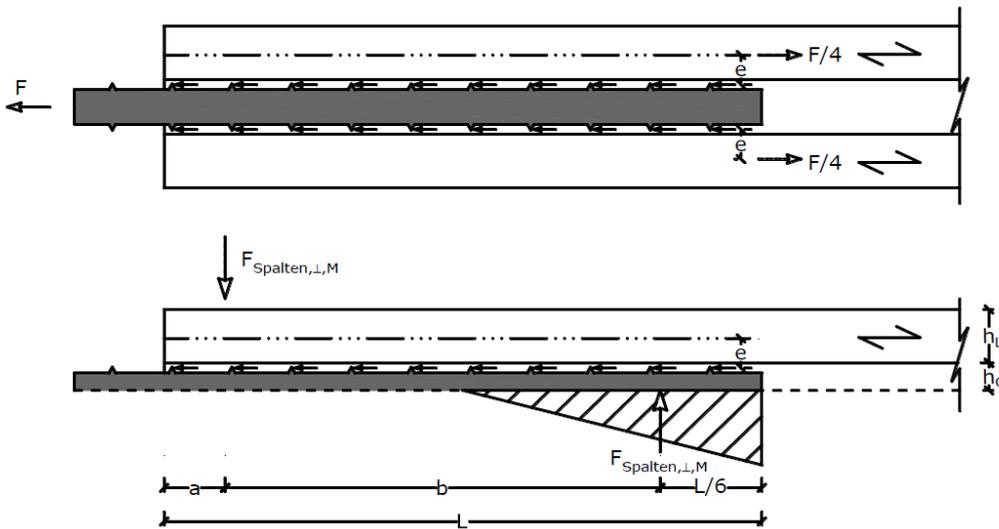


Abbildung 2-15 Anschlusszentrizität [24]

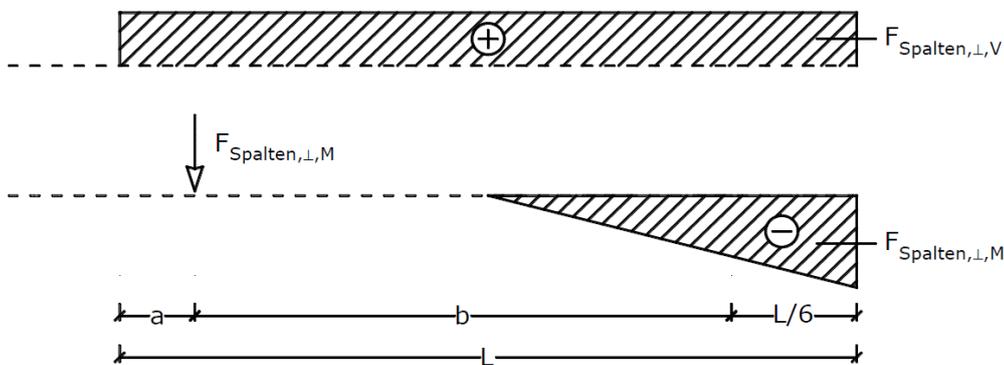


Abbildung 2-16 Idealisierte Spannungen rechtwinklig zur Faser [24]

Zur Absicherung des Modells wurden in [24] auch Versuche mit Messschrauben durchgeführt. Dabei wurde ein Furnierschichtholz-Probekörper der Länge nach aufgetrennt und mit fünf Messschrauben, die die auftretenden Spaltkräfte messen sollen, zusammengehalten. Dazwischen wurde eine Gewindestange mit einem Durchmesser von 16 mm und einer effektive Gewindelänge von $l_{ef} = 200$ mm eingebracht, die dann axial belastet wurde. Die Messschrauben wurden mit Dehnmessstreifen ausgestattet und jeweils mit 250 N vorgespannt. Über die Dehnung der Messschrauben lassen sich dann die auftretenden Spaltkräfte während der Belastung der Gewindestange berechnen. Die Messschrauben waren so angeordnet, dass sie die Spaltkräfte kontinuierlich bis zu einer Tiefe von 144 mm messen konnten.

In Abbildung 2-17 ist das Ergebnis und der Aufbau eines solchen Messschraubenversuchs exemplarisch dargestellt. Position 1 ist dabei die Messschraube am Bauteilende und Position 5 die Messschraube die sich zur Bauteilmitte hin befindet. In dem Diagramm sind in grau alle auftretenden Spaltkräfte aufsummiert. Es zeigt sich, dass ca. die Hälfte der Spaltkräfte am Zugstabende auftreten (und somit auch nur in diesem Bereich eine Spaltbewehrung Sinn macht). Bei einer axialen Belastung von 60 kN in diesem Versuch beträgt der Spaltkraftanteil ca. 7 %. Es wird jedoch angemerkt, dass der Spaltkraftanteil keinen linearen Verlauf aufweist und im Traglastbereich (von hier 90 kN) etwas über 7 % liegen würde, da sich mit zunehmender axialer Belastung ein progressiver Verlauf einstellt. Um die Messschrauben nicht zu beschädigen, wurde die Belastung nicht bis zum Versagen gesteigert. Generell zeigte sich, dass bei den Versuchen der Spaltkraftanteil ca. 10 % der Gewindekraft F beträgt.

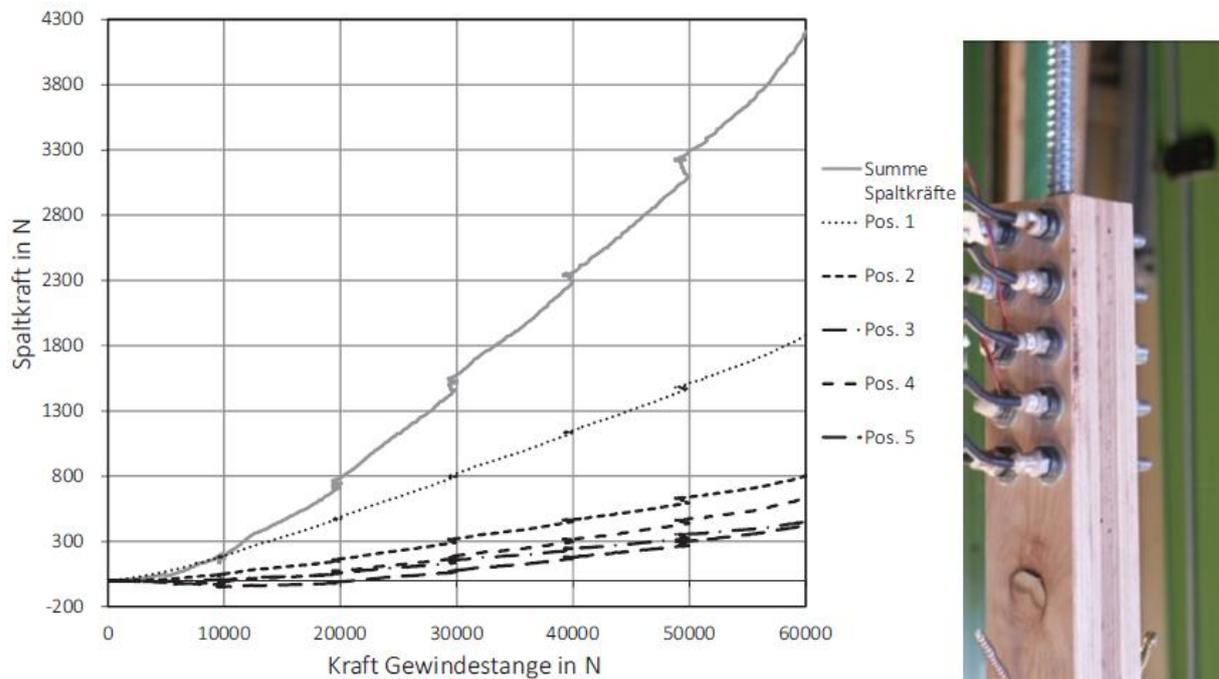


Abbildung 2-17 Spaltkräfte eines Messschraubenversuchs mit eingebrachter Gewindestange ($\varnothing 16 \text{ mm}$ und $l_{\text{ef}} = 200 \text{ mm}$) [24]

2-4.3 KASKADENFÖRMIGE ABSTUFUNG

In [12] wurde untersucht, ob es durch eine kaskadenförmige Abstufung der Schraubenlängen möglich ist, eine bessere Kraftverteilung entlang des Bauteils zu erzielen und somit eine höhere Ausziehtragfähigkeit zu erreichen. Bei den Gruppenversuchen mit 13 Vollgewindeschrauben in Birkensichtholz wurden dabei die inneren Schrauben in der Mitte länger ($l_{\text{ef}} = 240 \text{ mm}$) als die äußeren Schrauben ($l_{\text{ef}} = 170 \text{ mm}$) gewählt; siehe Abbildung 2-18. Es wurde jedoch nur ein Versuch mit dieser Prüfkongfiguration durchgeführt und dabei konnte keine Verbesserung gegenüber der Bestückung mit identen Eindringtiefen der Schrauben festgestellt werden. Aufgrund dieses einzigen Versuches konnte keine Aussage über die Kraftverteilung getroffen werden.

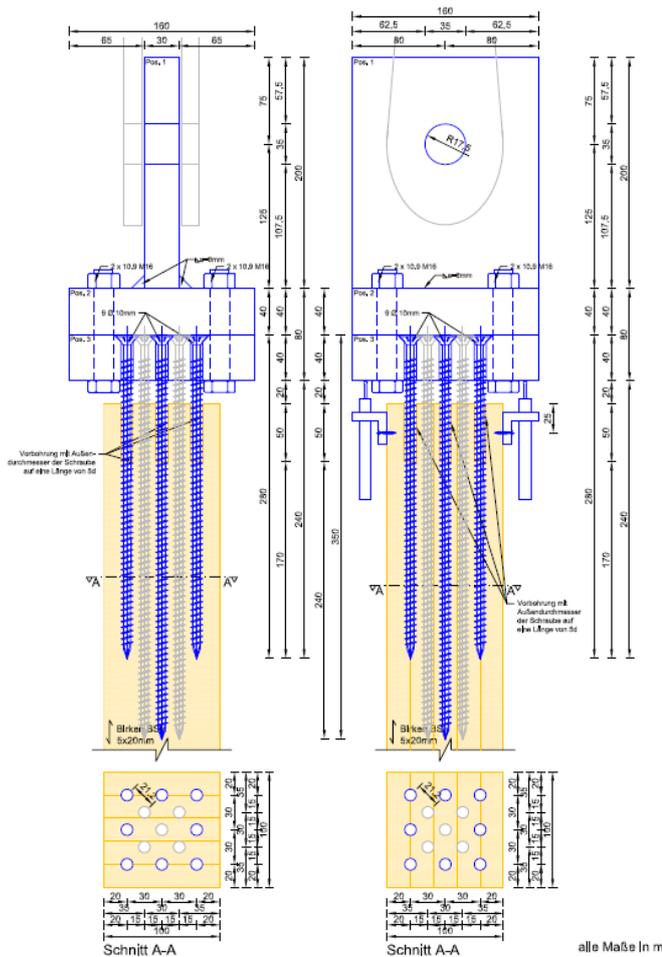


Abbildung 2-18 kaskadenförmige Abstufung [12]

2-5 FE SIMULATION

In letzter Zeit wurden mehrere Simulationen mit Finite Elemente-Programmen zu Verbindungen in Holz durchgeführt. Hier werden nun kurz zwei Finite Elemente-Simulationen vorgestellt, die Einblick in die diesbezügliche Vorgehensweise geben sollen. Die FE-Simulation von Uibel [26] beschreibt die Vorgangsweise bei der Modellierung einer Schraubengruppe und jene von Mahlknecht [27] stellt eine mögliche Modellierung unter Verwendung des Programms RFEM von Dlubal vor.

Uibel führte in [26] eine numerische Untersuchung zum Spaltverhalten von Nadelholz mit Hilfe des Programms ANSYS durch. Dabei wurde der Rissfortschritt während des Einschraubvorgangs simuliert und mit Messschraubenversuchen verglichen und kalibriert. Die Belastung der Schraube auf das Holz wurde mit einer Ersatzlastfunktion simuliert. Da bei der vorliegenden Arbeit der Fokus auf den Belastungszustand des Holzes bei Ausziehen und nicht bei Einbringen der Schrauben liegt, wird hier nur auf die Modellbildung der Simulation eingegangen und nicht auf die Belastungsfunktion selbst.

Zunächst wurde die Belastung für eine Einzelschraube, die 90° zur Faser in der Mitte des Holzträgers eingeschraubt wird, simuliert. Abbildung 2-19 zeigt schematisch das diesbezügliche FE-Modell. Der Holzträger wurde in der Mitte geteilt und als Volumenelement mit der halben Breite modelliert. Um die Querzugtragfähigkeit abzubilden, wurden an der Schnittkante nicht-lineare Federelemente angeordnet, die ab Überschreiten einer Grenzverformung u_{gr} den Übergang zwischen elastischen und plastischen

Materialverhalten berücksichtigen. Die Auflager wurden in einem ausreichend großen Abstand zu der eingebrachten Schraube angebracht, damit es zu keiner Beeinflussung der Auflager auf die Querkzugsspannungen kommen konnte. Die Belastung der Schraube setzte an der Schnittkante mit dem Randabstand $a_{1,c}$ vom Bauteilrand aus als Ersatzlastfunktion an. Die Netzfeinheit des FE-Netzes wurde für den Bereich um die Schraube herum deutlich kleiner gewählt als für den Rest des Bauteils, da es sich bei dem Bereich in der Nähe der Schraube um den maßgebenden Bereich für die Bestimmung der Querkzugspannung handelt. Für dieses Modell wurde die Netzweite um die Schraube mit 1 mm gewählt (in Abbildung 2-19 nur schematisch dargestellt).

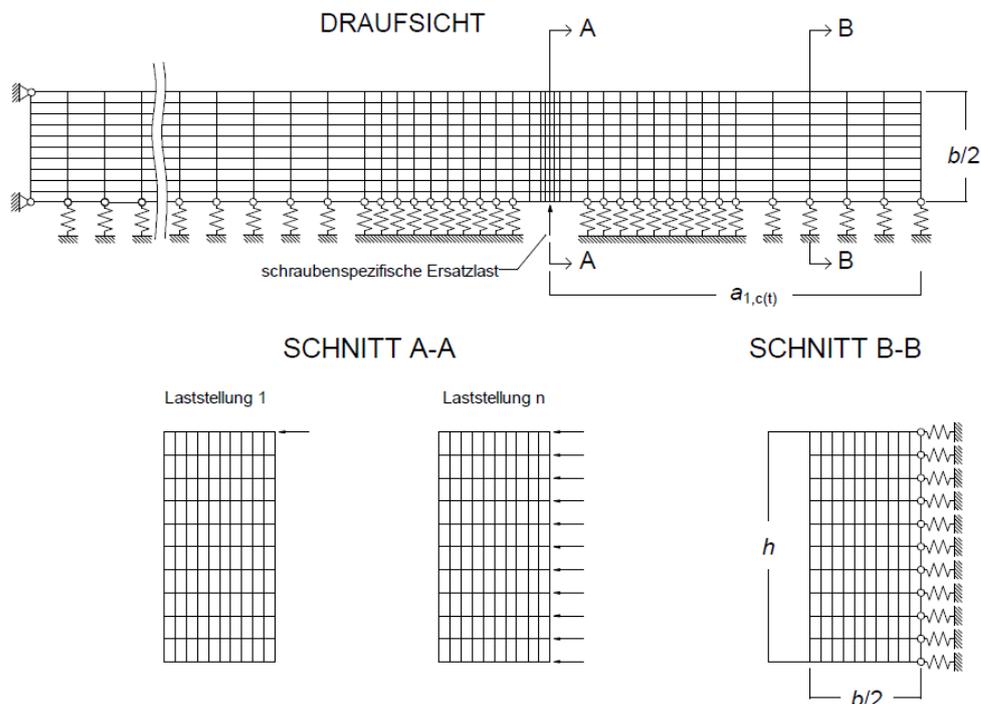


Abbildung 2-19 Schematische Darstellung des FE-Modells [26]

Im nächsten Schritt wurde das Modell für Verbindungen mit mehreren parallel versetzten Schraubenreihen erweitert. Abbildung 2-20 stellt das Gesamtmodell einer Verbindung mit drei Schraubenreihen dar. Wegen der hohen Netzfeinheit und der damit verbundenen hohen Rechenleistung bei Betrachtung des Gesamtsystems, wurden mehrere Teilmodelle für jeweils eine Schraubenreihe bzw. eine Rissebene einzeln modelliert. Da der mittlere Winkel γ zwischen Schraubenachse und Jahrringtangente für die einzelnen Schraubenreihen variieren kann, ist es jedoch eventuell nötig, auch bei symmetrischer Schraubenanordnung jedes Teilmodell einzeln zu betrachten.

Für die Rissebenen 1 und 3, also die äußeren Holzbereiche, beträgt die Breite des Holzträgers den Randabstand $a_{2,c}$ und für die Rissebene 2 den Rand- und Zwischenabstand $a_{2,c} + a_2$. Die Betrachtung der Teilmodelle setzt voraus, dass sich die einzelnen Schraubenreihen bzw. Rissebenen nicht gegenseitig beeinflussen. Davon kann nur ausgegangen werden, wenn das Risswachstum der Schraubenreihen begrenzt ist und es zu keinem Aufspalten des Holzträgers kommt. Die Belastung der Schrauben wurde wieder als Ersatzlastfunktion in der Rissebene angesetzt. Wie im vorherigen Modell wurde die Querkzugtragfähigkeit mit nicht-linearen Federelementen simuliert. Auf die genaue Modellierung der Federelemente wird hier nicht eingegangen.

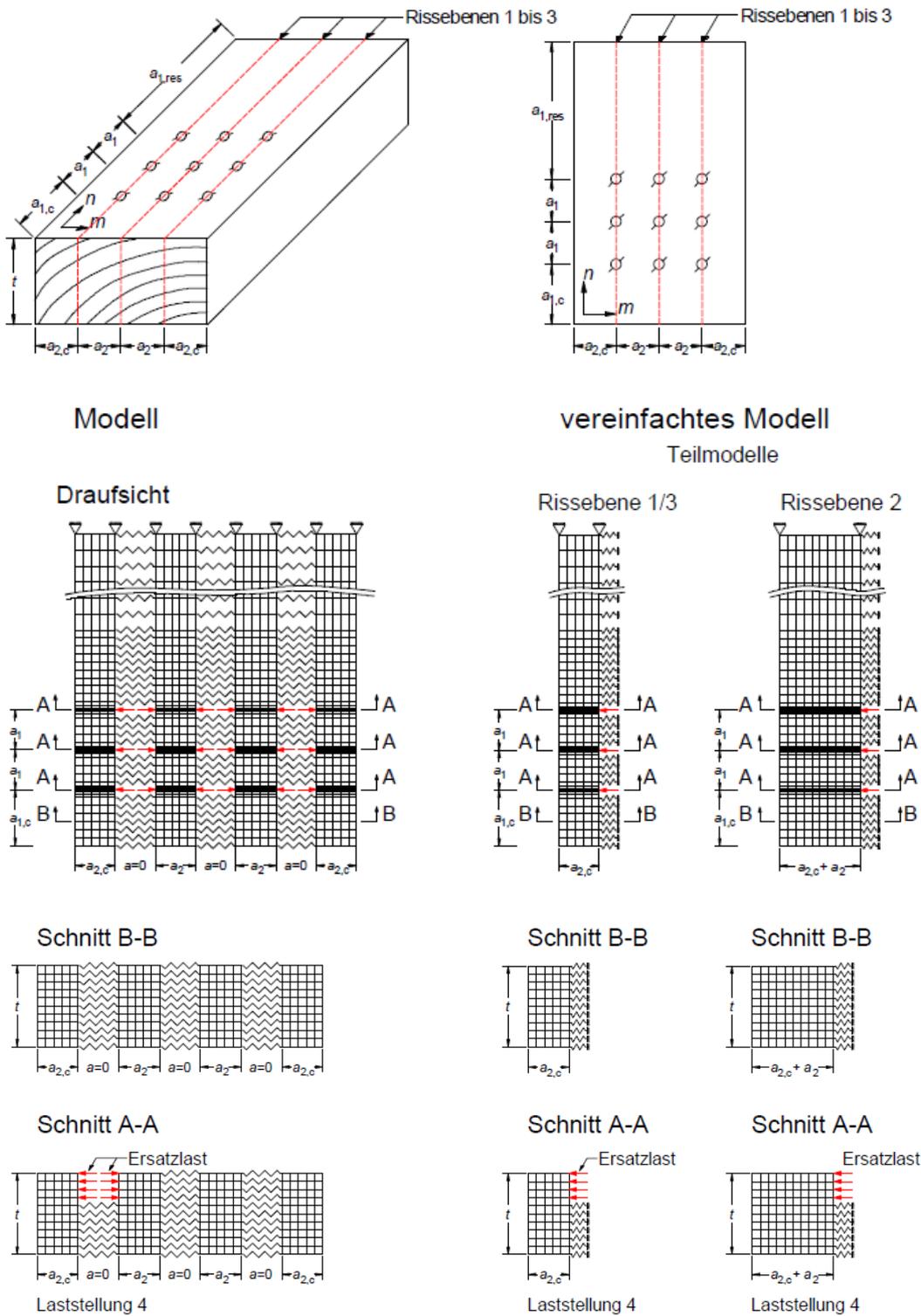


Abbildung 2-20 FE-Modell für mehrere Schraubenreihen [14]

Mahlknecht führte in [27] eine FE Simulation mit der Softwareapplikation RFEM durch. Dabei wurde ein Versuch mit einer Schraubengruppe bestehend aus 25 Schrauben die 90° zur Faser eingebracht sind mit einem 2D Modell simuliert; siehe Abbildung 2-21. Als Teilsystem wurde eine Schraubenreihe mit fünf Schrauben gewählt. Die Axialkraft setzte hierbei als Einzellast an jeder Schraube an, womit die Schrauben auf Herausziehen belastet wurden. Die Schrauben wurden mit Hilfe von Liniengelenken so mit dem Holz verbunden, dass nur über die oberen, belasteten Gewindeflanken Kraft übertragen werden konnte, während über die unteren Gewindeflanken und den Schraubenschaft keine Kraftübertragung möglich war. Der Holzkörper selbst wurde im Modell als orthotrope Platte definiert. Er wurde horizontal frei und nur mit einer Lagerungsplatte mit Hilfe von nicht-linearen Federelementen verbunden, die nur auf Druck einen Widerstand leisten und auf Zug ausfallen. Im Bereich der Schrauben wurde unter Verwendung der Funktion Netzverdichtung, das FE-Netz feiner gewählt. Betrachtet wurde dabei der Querspannungszustand im Holz bei variierenden Einbindetiefen der Schrauben. Hier waren nur qualitative Betrachtungen und Vergleiche möglich. Für quantitative Spannungswerte müsste das Modell ähnlich wie bei [26] mit nicht-linearen Federn erweitert werden, die das Holzverhalten in Querrichtung abbilden können, was mit RFEM so nicht möglich ist.

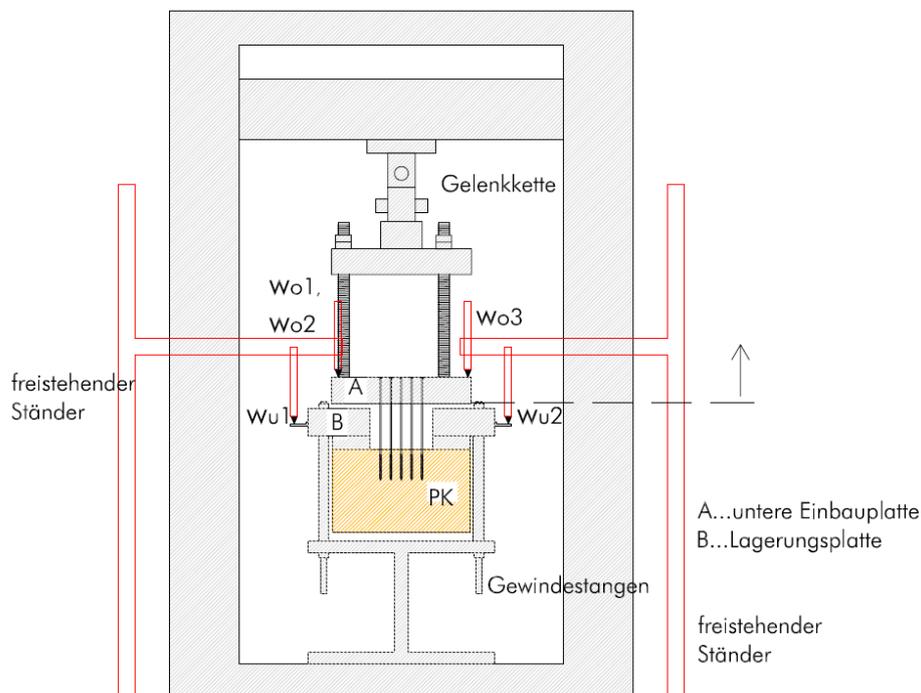


Abbildung 2-21 Versuchsaufbau [27]

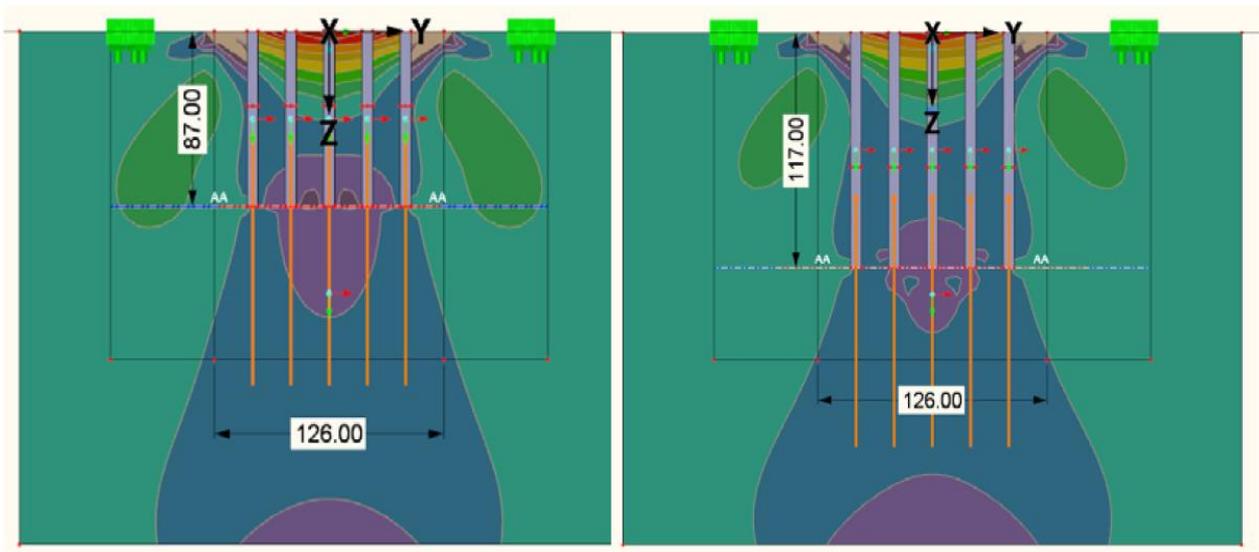


Abbildung 2-22 RFEM Modell [27] links: mit Einbindetiefe $2d$; rechts: mit Einbindetiefe $7d$

2-6 ZIEL DER ARBEIT

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass eine Hirnholzverschraubung in Hartlaubhölzern eine Möglichkeit darstellt, auf den im Vergleich zur Fichte kleineren Querschnitten eine leistungsfähige und ebenbürtige Verbindung ausführen zu können. Ziel der Arbeit ist es nun, eine solche Verbindung für Buchenvollholz und BauBuche zu optimieren. Dabei soll die von Pöll in [6] für Hartlaubhölzer entwickelte Schraube Prototyp P 1 zum Einsatz kommen. Die These von Obermayr [12], durch eine kaskadenförmige Schraubenabstufung eine bessere Kraftübertragung erreichen zu können, soll hier noch einmal aufgegriffen und für die Anwendung der Teilgewindeschraube P 1 untersucht werden.

Augenmerk soll in dieser Arbeit vor allem auf folgende Punkte gelegt werden:

- Untersuchung einer kaskadenförmigen Krafteinleitung und deren Auswirkung auf den Spannungszustand im Holz;
- Definition von Mindest- und Randabständen für Hirnholzverschraubungen in Buchenvollholz und BauBuche;
- Vermeidung der Versagensart Aufspalten;
- Erzielung eines möglichst hohen Wirkungsgrades der Verbindung.

Daraus ergibt sich die weitere Gliederung der Arbeit:

In Kapitel 3 wird eine FE-Simulation vorgestellt, welche die Auswirkungen einer kaskadenförmigen Krafteinleitung, bei der die Schrauben unterschiedlich tief im Holz eingebracht werden, auf den Spannungszustand im Holz analysiert.

In Kapitel 4 werden Einschraubtests vorgestellt und diskutiert, die dazu dienen, die benötigte Querschnittsfläche pro Schraube abschätzen zu können.

Die in Kapitel 5 vorgestellten Versuche dienen zur Bestimmung der Mindest- und Randabstände für Buchenvollholz und BauBuche bei einer Hirnholzverschraubung, sprich 0° zur Faser.

Die Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel werden für die Planung und Durchführung der Hauptversuche in Kapitel 6 herangezogen und darin deren Ergebnisse erläutert.

Im letzten Kapitel 7 werden die wichtigsten Erkenntnisse noch einmal zusammenfassend dargestellt und diskutiert, ob die vorgestellten Optimierungen zu einer wirtschaftlichen Verbindungslösung führen.

KAPITEL 3: FE-SIMULATION

3-1 MODELLBILDUNG

Als Voruntersuchung für die späteren Versuche wurde eine FE Simulation durchgeführt, um den Einfluss und die Auswirkungen einer kaskadenförmigen Einleitung der Kräfte durch in der Tiefe zueinander versetzte, wirksame Verankerung der Schrauben abzuschätzen. Für die FE-Simulation wurde das Programm RFEM 5.04 der Firma Dlubal verwendet. Anhand einer 2D-Simulation wurde ein axialer Zugversuch einer Schraubengruppe im Hirnholz mit verschiedenen, zueinander abgestuften Schraubenlängen und Anordnungen simuliert und deren Auswirkungen auf die Querspannungen analysiert. Es wurde ein Holzquerschnitt mit den Abmessungen 120 mm x 120 mm aus dem Material BauBuche der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG gewählt und dafür die Materialkennwerte aus [28] eingegeben. Als Schraube wurde der von Pöll [6] entwickelte Prototyp 1 (P 1) mit einem Außendurchmesser von 8 mm und einer Gewindelänge von 100 mm verwendet. Das Gewinde wurde dabei sehr vereinfacht mit gleichschenkeligen Dreiecken modelliert. Da es das Ziel der Arbeit war, einen möglichst hohen Wirkungsgrad bezogen auf den Netto- sowie dem Bruttoquerschnitt zu erzielen, wurde für die FE-Simulation die Schraubenanzahl so gewählt, dass sich Holzversagen als maßgeblicher Versagensmechanismus einstellt. Es wurden 36 Schrauben in einem 6 x 6 Raster angesetzt, wobei jede davon im Mittel max. 36 kN (Versagensmechanismus Stahlbruch) übertragen kann. Die ganze Schraubengruppe kann somit in Summe um ca. 40 % mehr Kraft übertragen als der Nettoquerschnitt auf Basis der mittleren Zugtragfähigkeit. Wie in [26] vorgeschlagen, wurde für die 2D-Simulation ein vereinfachtes Teilmodell gewählt, bei dem ein Holzstreifen mit der Breite des Schraubenabstandes a_2 betrachtet wird. Der Streifen enthält 6 Schrauben, durch deren Achse der Schnitt geführt wird; siehe Abbildung 3-1. Die Dicke der Schraube wurde hierfür flächenäquivalent auf einen Rechteckquerschnitt umgerechnet.

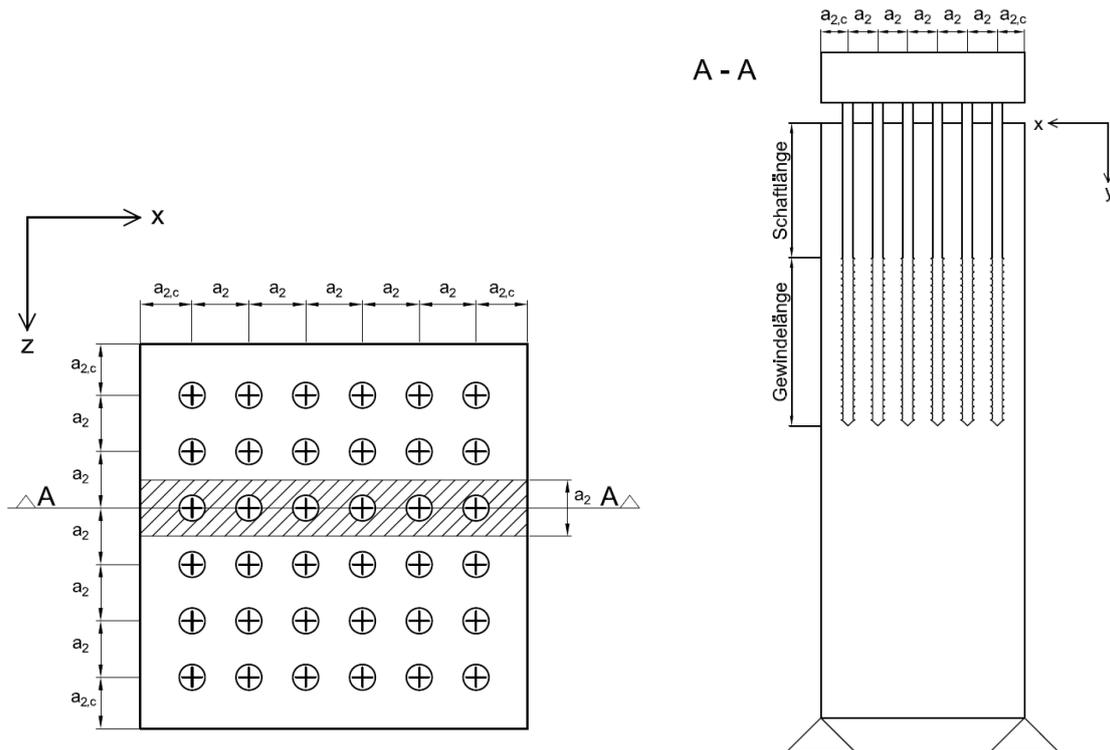


Abbildung 3-1 Vereinfachtes 2D Modell: links: Schraubenbild mit betrachteten Holzstreifen für Teilmodell; rechts: Teilmodell für FE-Simulation (Schnitt durch Holzstreifen in Schraubenachse)

Der Bauteil wird an der Unterseite fest in x-, y- und z-Richtung gelagert und ist so lange gewählt, dass sich die Auflagerkräfte nicht auf die Spannungen in der Nähe der Schraubengruppe auswirken. Die 6 Schrauben sind durch eine Stahlplatte gehalten, an der die Belastung, welche auf die maximale Tragfähigkeit des Nettoholzquerschnittes ausgelegt ist, als Linienlast angreift. Die Stahlplatte wurde zunächst mit 70 mm Höhe angesetzt, um eine sehr steife Lasteinleitungsplatte zu modellieren. Später wurde noch, um den Einfluss der Biegesteifigkeit einer praxisüblich dicken Stahlplatte zu bewerten, eine 35 mm starke Stahlplatte modelliert. Durch diese Maßnahme änderten sich die Querspannungen jedoch nur sehr geringfügig, in einem Bereich von unter 0,5 %. Die Lagerung der Schrauben im Holz wurde mit Hilfe von Liniengelenken so modelliert, dass nur über die oberen Flanken des Gewindes Kraft übertragen werden kann, also über jene Flanken, die bei einer Herausziehkraft druckbeansprucht werden. Das FE-Netz wurde für die Schrauben und den Übergangsbereich zwischen Schrauben und Holz auf 1 mm Netzweite eingestellt, für den restlichen Holzbereich wurde ein 2 mm feines Netz gewählt. Als Referenzmodell wurde zunächst ein Grundmodell entwickelt, bei dem alle Schrauben die gleiche Länge aufweisen. Als Randabstand $a_{2,c}$ wurden $2d$ und als Abstand zwischen den Schrauben a_2 wurden $2,2d$ gewählt. Die Einbindetiefe wurde mit 80 mm als ausreichend betrachtet, sodass an der Hirnholzfläche selbst keine Querspannungen mehr auftraten. Um die einzelnen Modelle einfacher vergleichbar zu machen, wurden zwischen den Schrauben (L1 – L7) und in den Schraubenachsen (Schraube 1 – Schraube 6) Längsschnitte gelegt. Mit deren Hilfe lassen sich die Spannungs- und Verformungsverläufe der verschiedenen Modelle entlang der Schnittachse vergleichen. Aus Symmetriegründen werden weiterführend jeweils nur die Schnitte L1 – L4 und die Schrauben 1 – 3 verglichen.

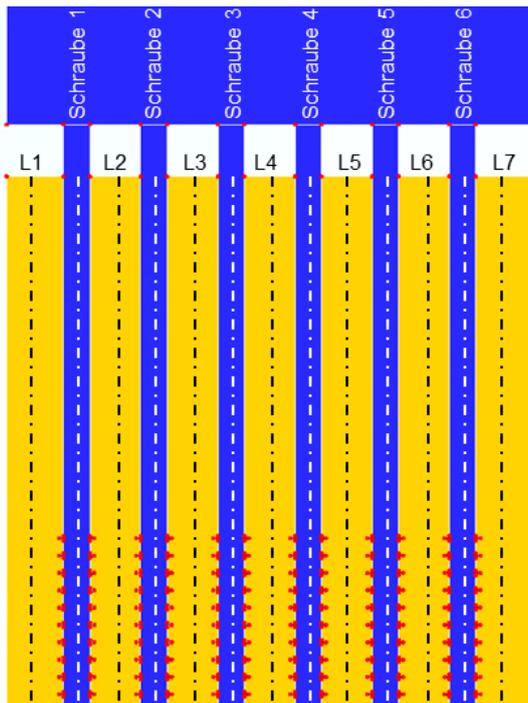


Abbildung 3-2 *Schnittbezeichnungen: die Längsschnitte im Holz werden mittig zwischen den Schrauben geführt; die Längsschnitte durch die Schrauben verlaufen in Schraubenachse und haben ihren Ursprung bei der Holzoberkante*

3-1.1 EINZELSCHRAUBE

Zunächst wurde eine Schraube aus dem System herausgeschnitten und diese, wie in [26], für sich alleine betrachtet. Zur Simulation der äußeren Schrauben 1 und 6 wurde ein Holz mit Randabstand $2d$ modelliert, für jene der inneren Schrauben 2 bis 5 eines mit Randabstand $1,1d$, was der Hälfte von a_2 entspricht. Zum Vergleich wurde die Einzelschraube auch jeweils als Vollgewindeschraube mit den Gewindeabmessungen des Prototyps P 1 modelliert. Die Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 zeigen die Spannungsverläufe im Holz und entlang der Schraubenachse für die Teil- und Vollgewindeschrauben P 1. Es wird deutlich, dass die größten Querkzugspannungen immer am oberen Gewindeteil zu beobachten sind, was auch mit dem Spaltkraftmodell aus [25] übereinstimmt, welches besagt, dass die größten Spaltkräfte im oberen Gewindedrittel auftreten. Bei den Modellen mit einem Randabstand von $1,1d$ lässt sich ein sägezahnartiger Spannungsverlauf feststellen. Die verwendete Software hat bei so dünnen Holzquerschnitten anscheinend Probleme, die Spannungsverläufe zu glätten. Beträgsmäßig sind die bei einem Randabstand von $2d$ auftretenden Spannungsspitzen beim Prototyp P 1 und der Vollgewindeschraube gleich groß. Beim Randabstand von $1,1d$ liegen die Spannungsspitzen des Prototyps P 1 deutlich höher. Aufgrund des sägezahnartigen Verlaufes ist die Aussagekraft jedoch fraglich. Betrachtet man die Spannungen entlang der Schraubenachse, zeigt sich bei beiden Schrauben der bekannt nicht-lineare Verlauf entlang des Gewindes und beim Prototyp ein konstanter Kraftverlauf entlang des Schaftes.

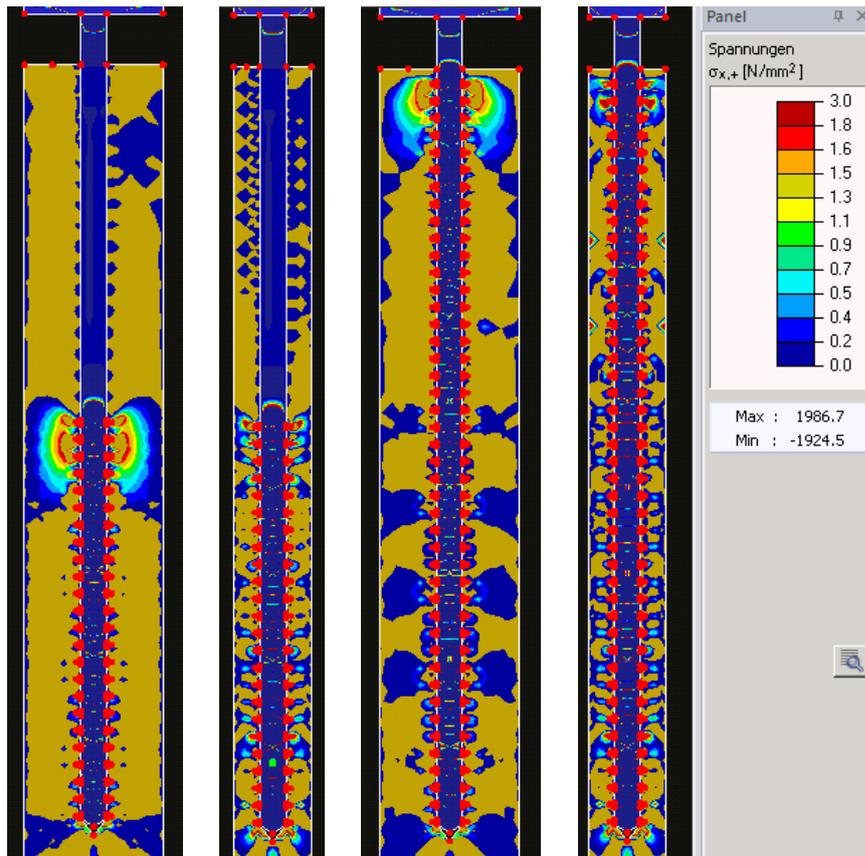


Abbildung 3-3 Einzelschrauben (von links nach rechts): TG_2d, TG_1,1d, VG_2d, VG_1,1d

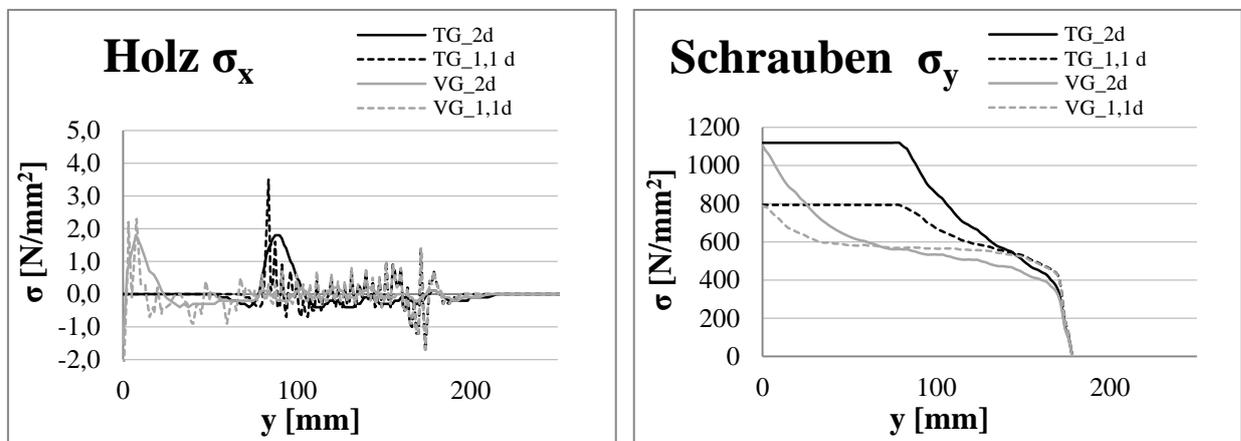


Abbildung 3-4 Einzelschrauben: Spannungsverläufe

3-1.2 KASKADENFÖRMIGE ABSTUFUNGEN

Da das Modell als plausibel bewertet wurde, konnte daher für die ganze Schraubengruppe ein Grundmodell als Referenz definiert und mit der Analyse von kaskadenförmigen Abstufungen begonnen werden.

3-1.2.1 Gewindeabstufung

Eine erste Überlegung war es, die Schraubengewinde im Holz so weit abzustufen, dass sich die resultierenden Querkzugspannungen der einzelnen Schrauben gegenseitig nicht beeinflussen damit jede Schraube wie eine Einzelschraube wirken kann. Dabei wurde die Länge der Schrauben so gewählt, dass sich die Schraubenlängen um die Gewindelänge von 100 mm zuzüglich 40 mm ($5d$) unterscheiden. Da die Querkzugspannungen im Holz am oberen Teil des Gewindes am größten sind, wurden die 40 mm zusätzlich als Längsabstand bis zur nächsten seitlich versetzten Schraubenspitze gewählt, um genügend unbeanspruchtes Holz zu gewährleisten. In Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 sind das Grundsystem und die drei untersuchten Systeme mit den dazugehörigen Querkzugspannungsverläufen abgebildet. Für das System 1 wurden die Schrauben 1 und 6 am längsten gewählt und zur Mitte hin jeweils um 140 mm kürzer werdend abgestuft. Schrauben 3 und 4 haben dabei die gleiche Länge. Bei System 2 sind die Schrauben 2 und 5 am längsten, Schrauben 1 und 6 um 140 mm kürzer und die Schrauben 3 und 4 in der Mitte die kürzesten. System 3 hat die längsten Schrauben in der Mitte und ist nach außen hin abgestuft, mit den kürzesten Schrauben am Rand. Als Einbindetiefe für die kürzesten Schrauben wurden jeweils 50 mm gewählt.

Betrachtet man die Abbildung 3-6 sieht man deutlich, dass die Querkzugspannungen im oberen Bereich des Schraubengewindes am größten sind und die eng nebeneinander liegenden Schrauben zu einem großen querkzugbeanspruchten Bereich führen. In der Abbildung 3-8 sind für die Systeme die Spannungsverläufe für die Längsschnitte L1 bis L4 quer zur Holzachse und für die Schrauben entlang der Schraubenachse dargestellt. Die Spannungsspitzen in den Schnitten L1 bis L4 treten alle auf derselben Höhe auf und sind am Rand und in der Mitte etwas kleiner als bei den Schnitten L2 und L3. Bei Betrachtung der Spannungsverläufe der Schrauben fällt auf, dass die äußere Schraube aufgrund des größeren Einflussbereiches am meisten belastet wird.

Durch die Abstufungen lassen sich die Querkzugspannungen in einigen Schnitten zwar reduzieren, jedoch besitzt jedes der drei untersuchten Systeme mindestens einen Schnitt bei dem die Querkzugspannungen im Vergleich zum Grundsystem (System ohne Abstufungen) zunehmen. Bei System 1 lässt sich feststellen, dass durch die kürzeren Schrauben in der Mitte die Querkzugspannungen in den äußeren und inneren Schnitten L1 und L4 etwas geringer als im Grundsystem ausfallen, jedoch große Spannungsspitzen in den Schnitten L2 und L3 auftreten. Im Schnitt L2 verdoppeln sich die Querkzugsspannungen nahezu. In Abbildung 3-5 und Abbildung 3-7 sieht man auch den Grund dafür: es kommt zu großen querkzugbeanspruchten Bereichen zwischen den Schrauben 1 und 6 und den Schrauben 2 und 5, die sich aus Exzentrizitätsmomenten ergeben. Da die ganze Schraubengruppe sehr weit auseinander über den Querschnitt verteilt ist, greifen die übertragenen Kräfte zwischen Schraubengewinde und Holz an unterschiedlichen Stellen an; die dadurch resultierenden Momente führen zu größeren Spannungen im Querschnitt als beim Referenzsystem. Betrachtet man die Spannungen entlang der Schraubenachse, fällt bei diesem System auf, dass die Schrauben alle in etwa gleichmäßig beansprucht werden. Da die längeren Schrauben aufgrund ihres längeren Schaftes (Gewindelänge bleibt gleich) und folglich geringerer Steifigkeit weniger Kräfte „anziehen“ und diese bei System 1 am Rand angeordnet sind, kommt es zu dieser gleichmäßigen Beanspruchung.

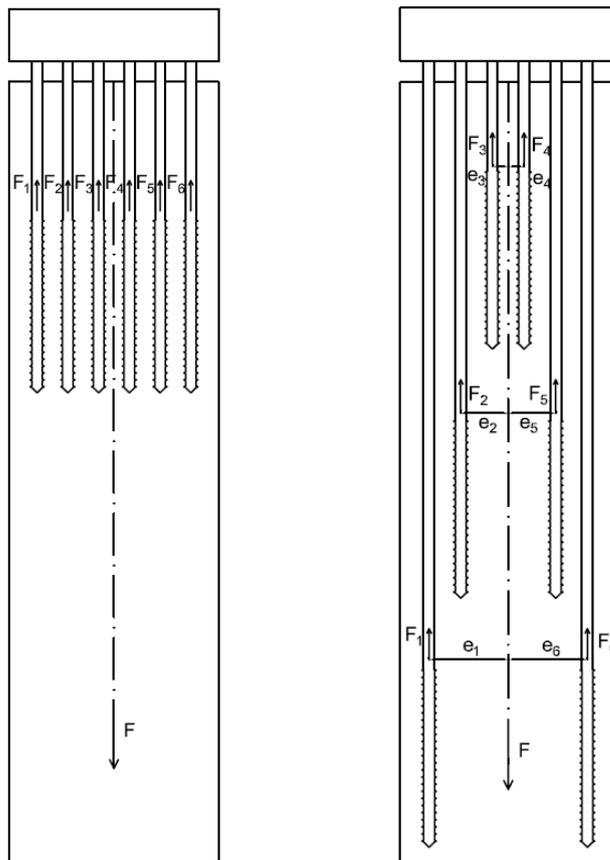


Abbildung 3-5 Entstehung von Exzentrizitätsmomenten bei System 1 im Vergleich zum Grundsystem

System 2 führt in den Schnitten L1 und L2 zu ähnlich großen Querkzugspannungen wie beim Grundsystem. In den Schnitten L3 und L4 vergrößern sich die Querkzugspannungen, was wiederum an den unterschiedlichen Angriffspunkten der übertragenen Kräfte liegt. In Abbildung 3-7 lässt sich ein großer querkzugsbeanspruchter Bereich zwischen den Schrauben 2 und 5 feststellen. Somit stellt dieses System keine Verbesserung im Vergleich zum Referenzsystem dar.

Auch System 3 weist im Vergleich zum Grundsystem in den Schnitten L1 und L2 größere Querkzugspannungsspitzen auf. Dem gegenüber stehen jedoch kleinere Querkzugspannungen in den mittleren Schnitten L3 und L4. Durch die Abstufung mit den längsten Schrauben in Bauteilmitte, tragen die mittleren Schrauben 3 und 4, die beim Grundsystem schon am wenigsten belastet werden, noch weniger Last ab und die äußeren Schrauben müssen mehr Last übernehmen. Durch die höhere Belastung der äußeren Schrauben steigen auch bei der Beanspruchung auf Herausziehen dort lokal die resultierenden Querkzugspannungen im Holzquerschnitt.

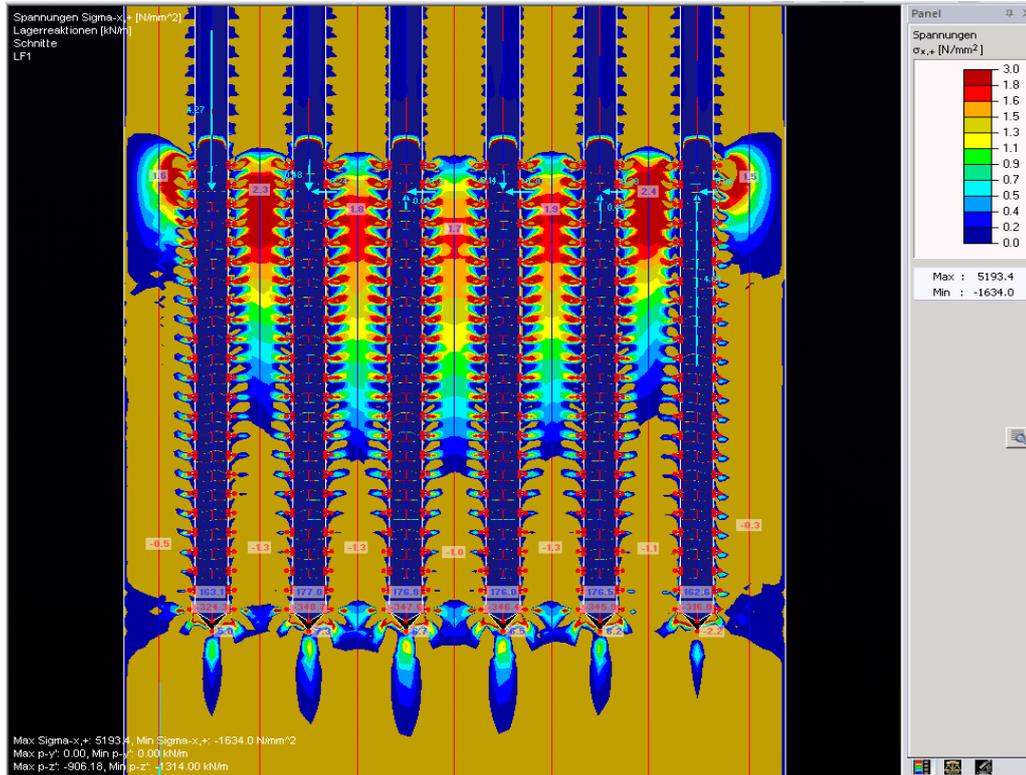


Abbildung 3-6 Querzugspannungen am Grundsystem

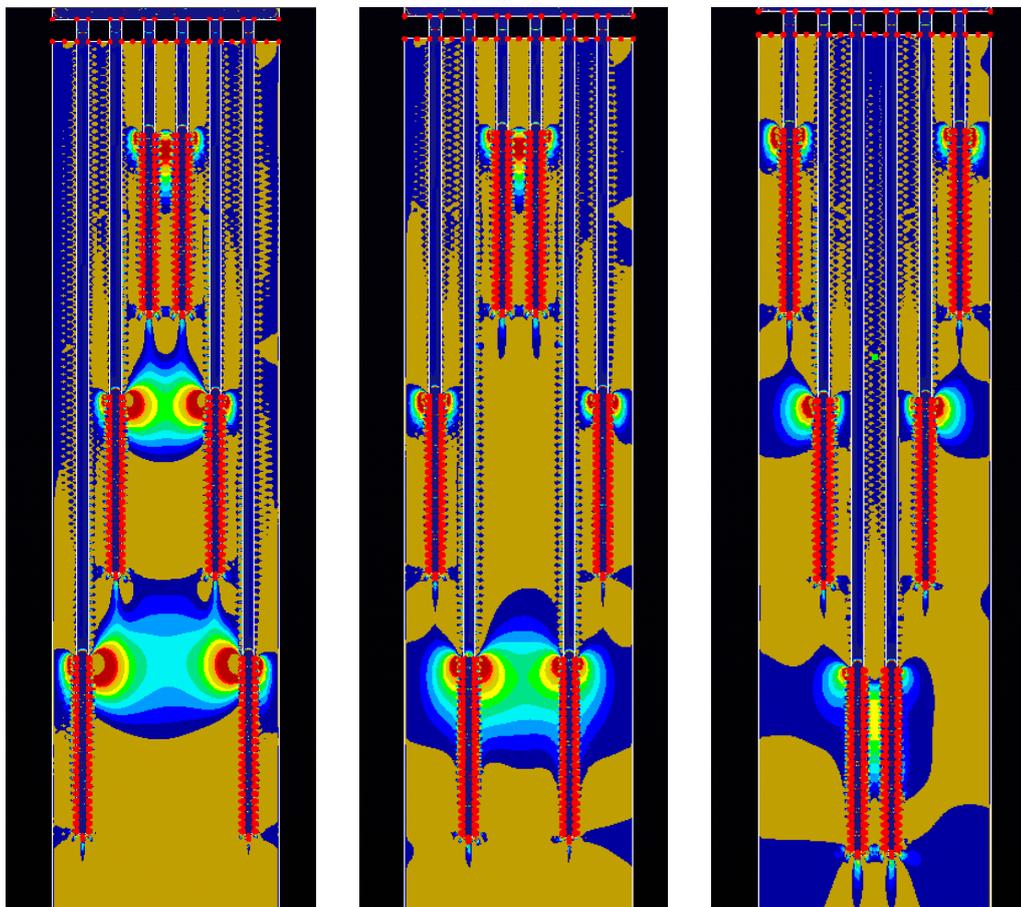


Abbildung 3-7 Querzugspannungen bei den untersuchten Variationen: links: System 1; Mitte: System 2; rechts: System 3 (Spannungsskala ident mit Abbildung 3-6)

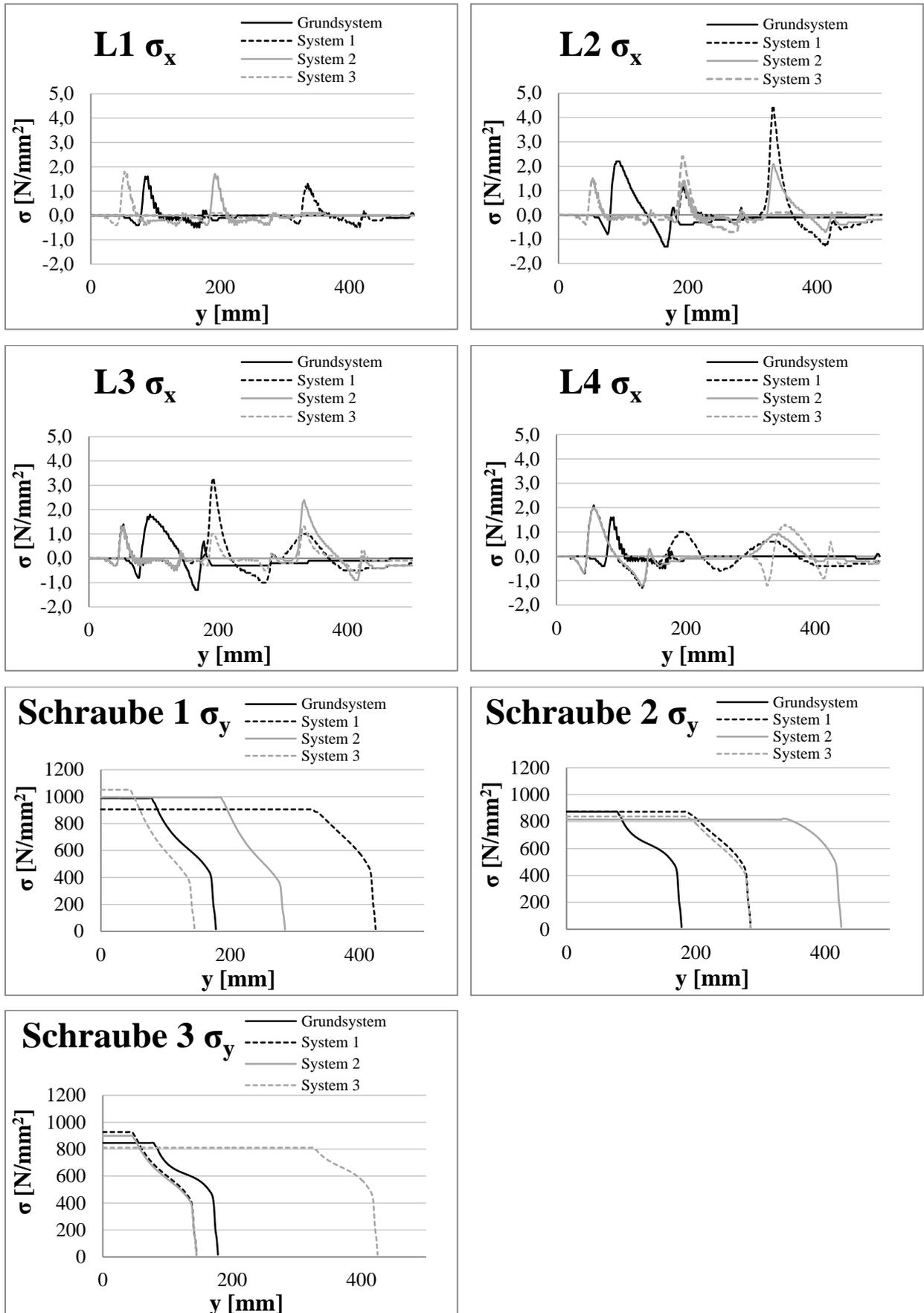


Abbildung 3-8 Vergleich der Spannungsverläufe der betrachteten System 1-3 mit dem Grundsystem

3-1.2.2 Parabelförmige Abstufung

Da durch die untersuchten Gewindeabstufungen nicht die gewünschte Verringerung der Querkzugspannungen im gesamten Querschnitt erreicht werden konnte, war die Überlegung bei System 4 zu versuchen, die Schraubenabstufung dem Kraftfluss im Querschnitt anzupassen. Hierfür wurde eine parabelförmige Abstufung im Sinne eines Druckbogens gewählt, bei der die Schrauben zur Mitte hin länger werden. Zwischen Schraube 1 und Schraube 2 beträgt die Längenabstufung $\frac{1}{3}$ des Schraubengewindes (34 mm) und zwischen Schraube 2 und Schraube 3 $\frac{1}{6}$ des Schraubengewindes (17 mm). Wie in Abbildung 3-9 ersichtlich, lässt sich dadurch der querkzugbeanspruchte Bereich etwas über den Querschnitt verteilen und die Schraubengewinde im oberen Bereich, bei dem die größten Querkzugspannungen auftreten, bekommen so mehr Fläche, um diese im Querschnitt abzubauen. Wie bei System 3 werden die äußeren Schrauben im Vergleich zum Referenzsystem stärker belastet; daraus resultieren um 20 % größere Spannungsspitzen im äußersten Schnitt L1. Diese sind jedoch betragsmäßig kleiner, als die größten auftretenden Spannungen des Grundsystems im Schnitt L2. In den Schnittebenen L2 bis L4 lässt sich durch die parabelförmige Abstufung eine Verringerung der Querkzugbeanspruchung um über 35 % feststellen.

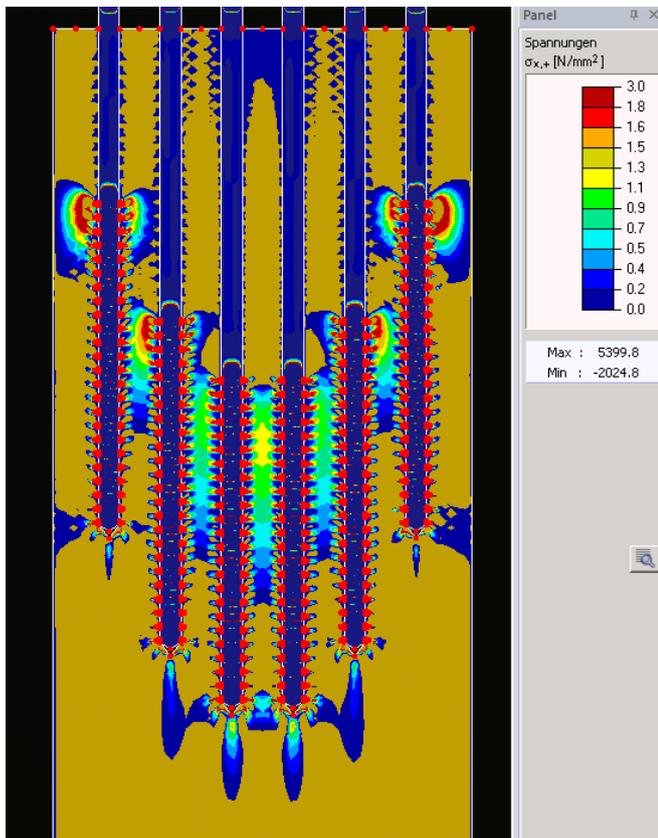


Abbildung 3-9 System 4: Parabelförmige Abstufung

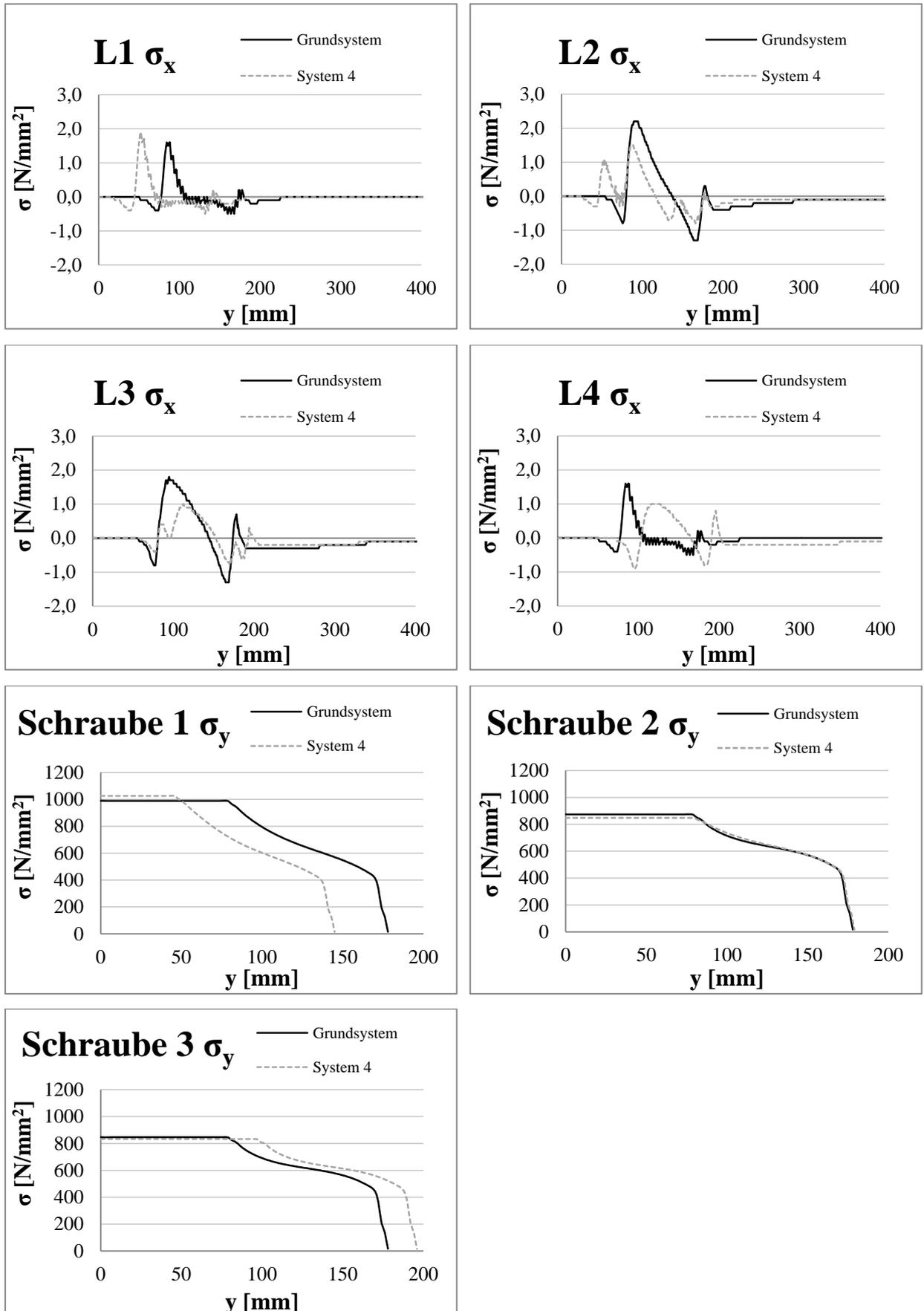


Abbildung 3-10 Vergleich der Spannungsverläufe der parabelförmige Abstufung mit dem Grundsystem

3-1.2.3 Abstandsvariationen

Um den Einfluss der gewählten Abstände bewerten zu können, wurden für die parabelförmige Abstufung noch die Rand- und Zwischenabstände für den gegebenen Querschnitt variiert. Dabei wurden für System 4.1 die Schraubenabstände a_2 mit $2,5 d$ und die Randabstände $a_{2,c}$ mit $1,2 d$ und für System 4.2 die Schraubenabstände a_2 mit $2 d$ und die Randabstände $a_{2,c}$ mit $2,5 d$ gewählt. Betrachtet man die Ergebnisse in Abbildung 3-11, sieht man, wie stark sich die Wahl der Abstände auf die Querzugsspannungen auswirkt. Bei System 4.1 verringern sich die Querzugsspannungen zwischen den Schrauben um mehr als 40 %, während sich die Spannungen am Rand im Schnitt L1 verdoppeln. Aufgrund des schmalen Randbereiches ergibt sich wieder ein sägezahnartiger Spannungsverlauf. Bei System 4.2 lässt sich genau das Gegenteil beobachten. Durch den engeren Schraubenabstand steigen die Querzugsspannungen zwischen den Schrauben um mehr als das Doppelte an und am Rand sinken die Spannungen um 15 %. Mit dem Randabstand von $2,5 d$ von System 4.2 sind die Querzugsspannungen im Schnitt L1 auf demselben Niveau wie bei dem Grundsystem mit Randabstand $2 d$.

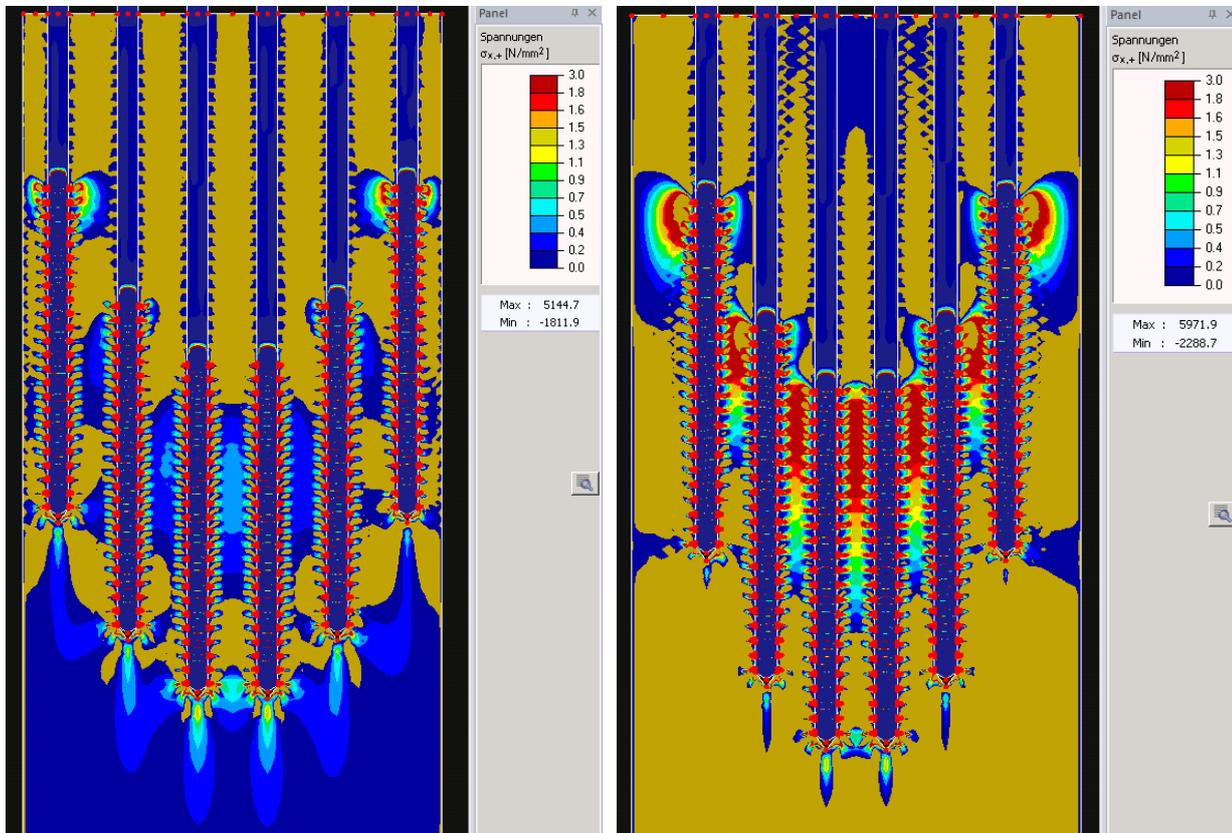


Abbildung 3-11 links: System 4.1; rechts: System 4.2

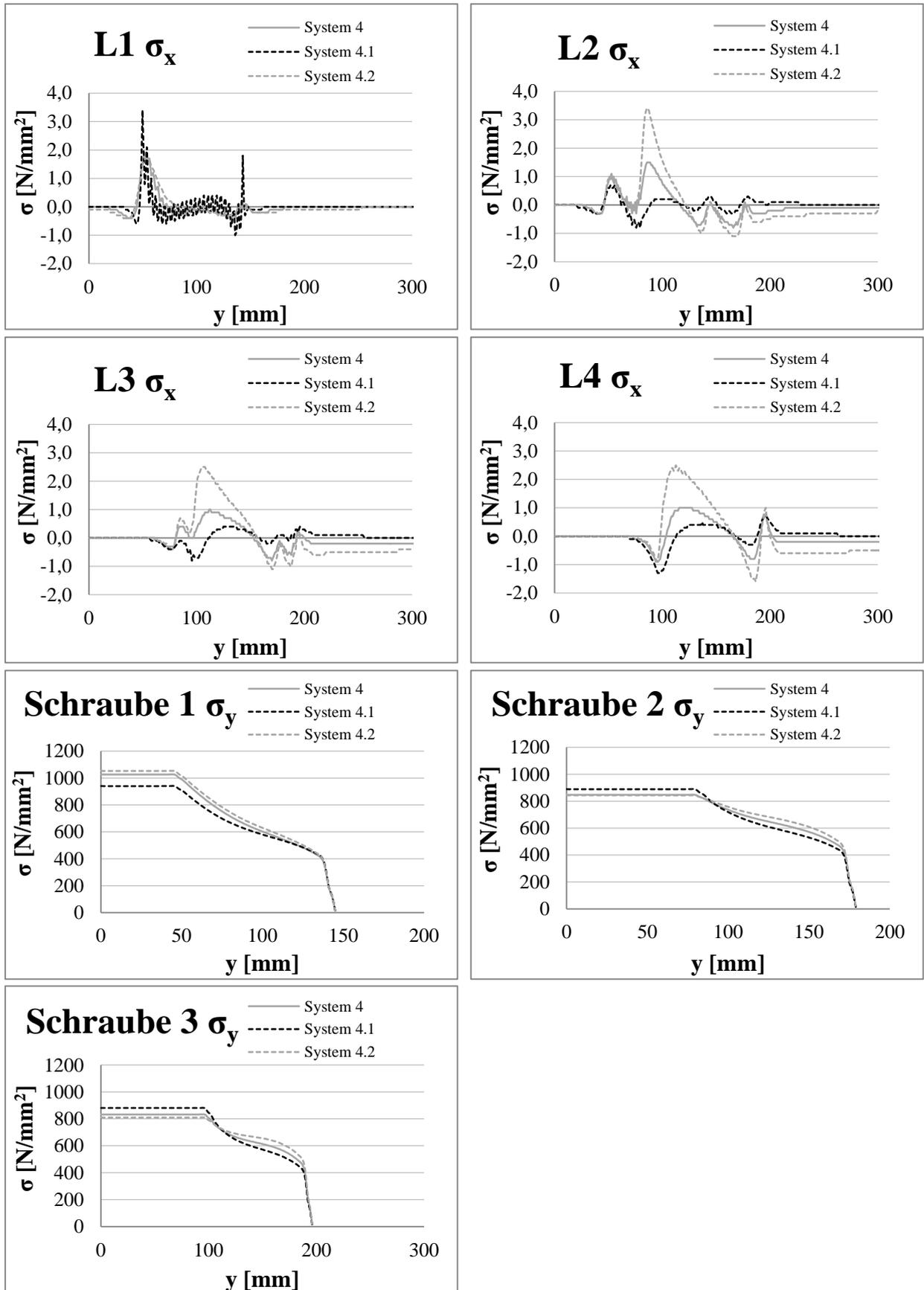


Abbildung 3-12 Spannungverläufe in Folge Abstandsvariation

3-1.3 VERGLEICH MIT VOLLGEWINDESCHRAUBEN

Zum Abschluss wurde das System 4 noch mit Vollgewinde- statt mit Teilgewindeschrauben modelliert. Im Vergleich zum System mit Teilgewindeschrauben treten am Rand etwas geringere Spannungsspitzen auf. Im Schnitt L2 zeigen sich deutlich kleinere Querszugsbeanspruchungen. Während im Schnitt L3 die Querszugsspannungen betragsmäßig etwa gleich groß sind, wird der mittlere Bereich im Schnitt L4 durch die Vollgewindeschrauben stärker beansprucht. Generell lässt sich feststellen, dass sich bei den Vollgewindeschrauben die Querszugsspannungen gleichmäßiger über den Querschnitt verteilen, da die Kraft über eine längere Gewindelänge übertragen wird.

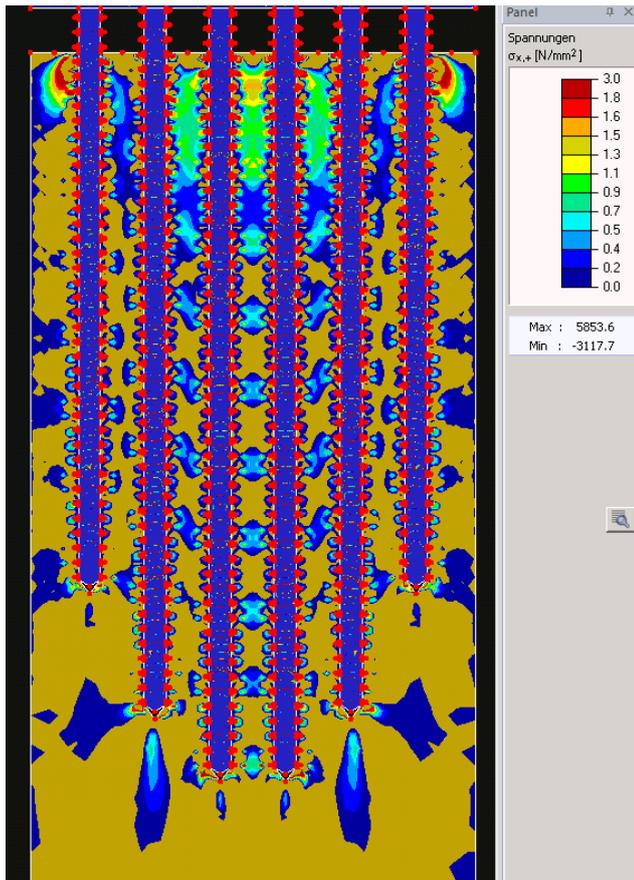


Abbildung 3-13 System mit Vollgewindeschrauben

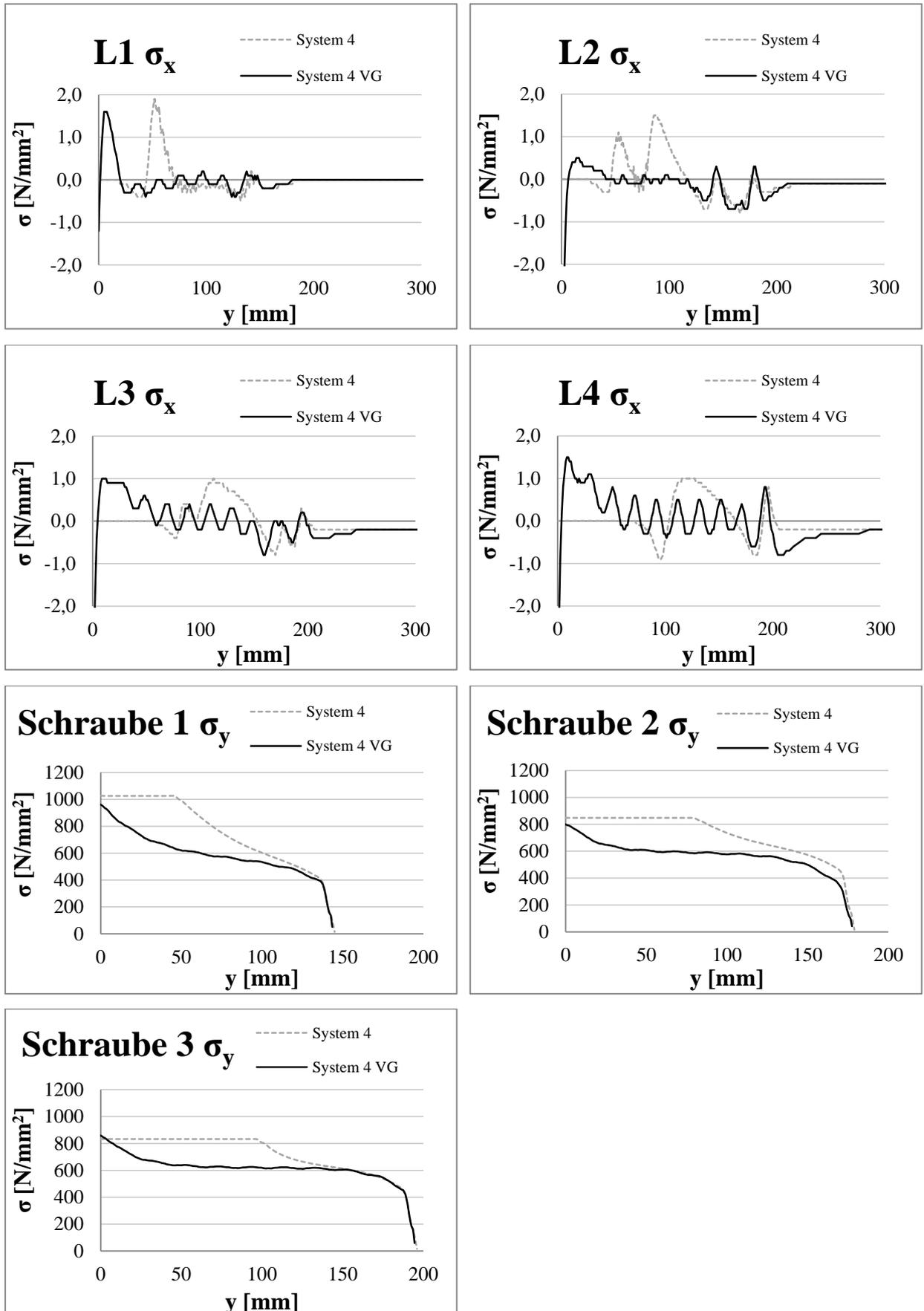


Abbildung 3-14 Vergleich der Spannungsverläufe zwischen Teilgewinde- und Vollgewindeschrauben

3-1.4 KRAFTVERTEILUNG DER SCHRAUBEN

Zur Verdeutlichung, dass die Schrauben einer Schraubengruppe nicht alle gleichmäßig belastet werden, wird für das Grundsystem und System 4 in Tabelle 3-1 angegeben, wie viel Prozent der Gesamtkraft die einzelnen Schrauben tragen. Die äußeren Schrauben werden auf Grund der größeren Einflussbreite stärker belastet. Durch die Längenabstufung und die damit einhergehende größere Steifigkeit der äußeren Schrauben steigert sich bei System 4 die Belastung dieser noch etwas.

Tabelle 3-1 Kraftverteilung

System	Schraube 1 [%]	Schraube 2 [%]	Schraube 3 [%]	Schraube 4 [%]	Schraube 5 [%]	Schraube 6 [%]
Grundsystem	18,3	16,1	15,6	15,6	16,1	18,3
System 4	19,0	15,7	15,4	15,4	15,7	19,0

Um die Kraftverteilung zwischen äußeren und inneren Schrauben in Abhängigkeit der Schraubenabstände zu untersuchen, wurden eine Schraubengruppe bestehend aus drei Schrauben modelliert, bei der die Schraubenabstände a_2 zwischen $2,5 d$, $5 d$, $7,5 d$ und $10 d$ variierten. Der Randabstand $a_{2,c}$ wurde dabei konstant mit $10 d$ gewählt, die Gesamtbelastung entsprach in jedem System 100 kN und für jeden Schraubenabstand wurde ein System mit Teilgewindeschrauben und eines mit Vollgewindeschrauben, bei der die Gewindelänge der Teilgewindeschrauben entsprach, betrachtet. In Abbildung 3-15 ist das Modell für den Schraubenabstand $a_2 = 2,5 d$ dargestellt. Die Schnitte durch die Schrauben sind gleich wie in Abbildung 3-2 gezeigt, durch die Schraubenachse gelegt und beginnen bei der Holzoberkante.

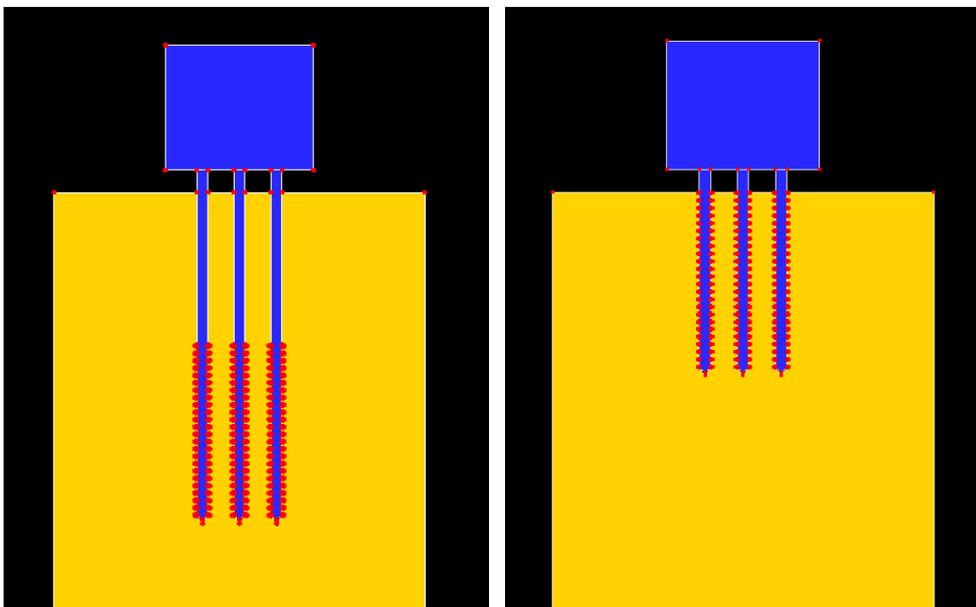


Abbildung 3-15 Modell der 3er Schraubengruppe mit $a_2 = 2,5 d$: links: Teilgewindeschrauben; rechts: Vollgewindeschrauben

In Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17 sind die Spannungsverläufe der inneren und äußeren Schrauben für die verschiedenen Schraubenabstände dargestellt. TG steht dabei für Teilgewindeschrauben und VG für Vollgewindeschrauben. Es lässt sich erkennen, dass mit größer werdendem Schraubenabstand a_2 die

Schrauben gleichmäßig belastet werden. Bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 10 d$ erfahren die äußeren und inneren Schrauben annähernd dieselbe Belastung.

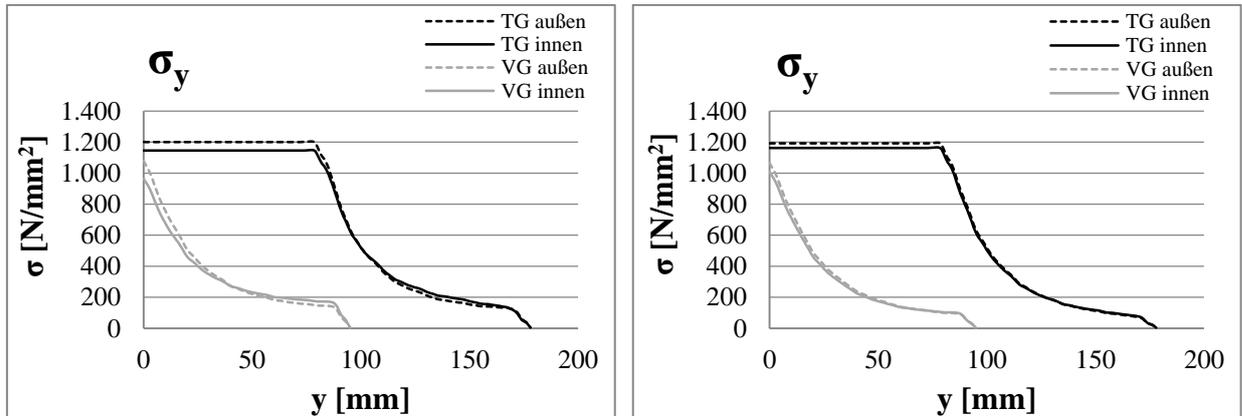


Abbildung 3-16 links: Schraubenabstand $a_2 = 2,5 d$; rechts: Schraubenabstand $a_2 = 5 d$

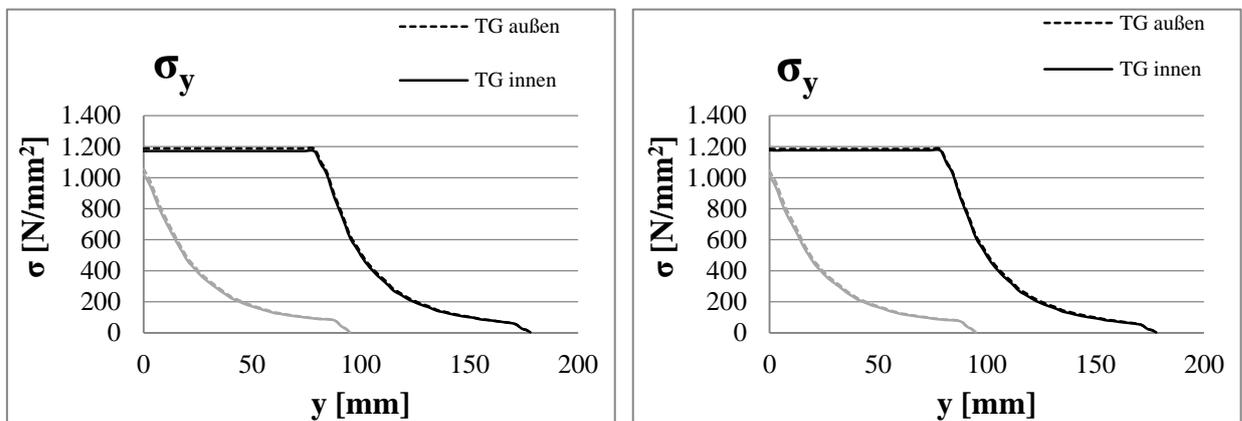


Abbildung 3-17 links: Schraubenabstand $a_2 = 7,5 d$; rechts: Schraubenabstand $a_2 = 10 d$

In Abbildung 3-18 sind die Spannungen der äußeren und inneren Schrauben für die einzelnen Schraubenabstände gegenüber gestellt. Dabei lässt sich feststellen, dass es bei Vollgewindeschrauben zu einer ungleichmäßigeren Belastung als bei Teilgewindeschrauben kommt. Vor allem bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 2,5 d$ sind die Spannungen der inneren Schraube um über 10 % geringer.

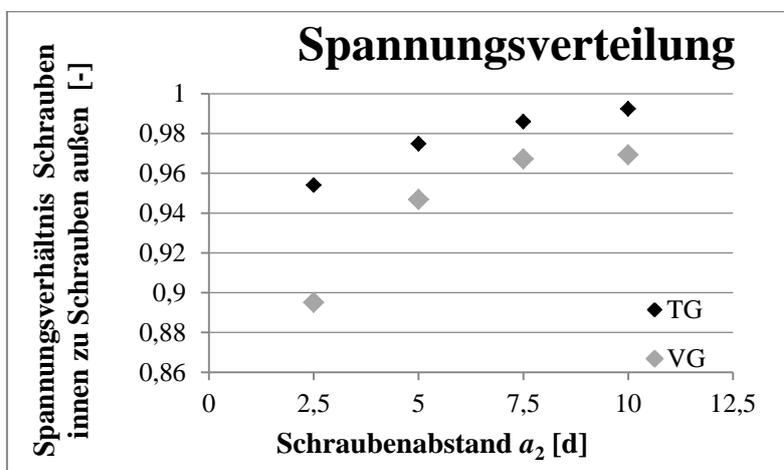


Abbildung 3-18 Spannungsverteilung zwischen inneren und äußeren Schrauben bei unterschiedlichen Schraubenabständen a_2

Betrachtet man die Verformungen in Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20, fällt auf, dass die Verformungen der inneren Schrauben im Gewindebereich größer sind, als jene der äußeren Schrauben, obwohl die inneren Schrauben weniger Kraft abtragen. Durch die steife Kopplungsplatte sind die Verformungen der inneren und äußeren Schrauben an der Holzoberkante gleich groß. Die größere Verformung der inneren Schrauben lässt sich nur durch die größere Holzverformung in Bauteilmitte erklären, siehe Verformungsbild in Abbildung 3-21.

Auch hier lässt sich feststellen, dass die Verformungsunterschiede der inneren und äußeren Schrauben mit größer werdenden Schraubenabständen kleiner werden und die Schrauben bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 10 d$ annähernd dieselbe Verformung aufweisen.

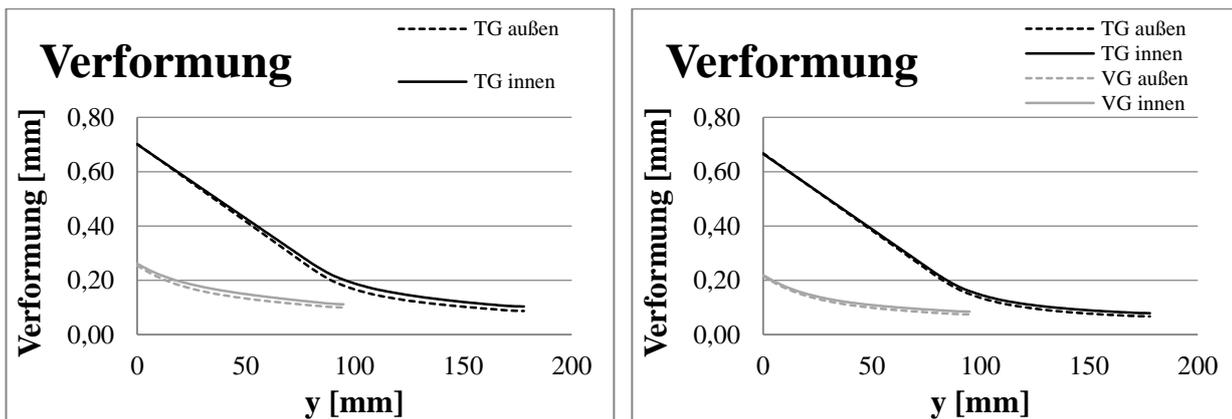


Abbildung 3-19 links: Schraubenabstand $a_2 = 2,5 d$; rechts: Schraubenabstand $a_2 = 5 d$

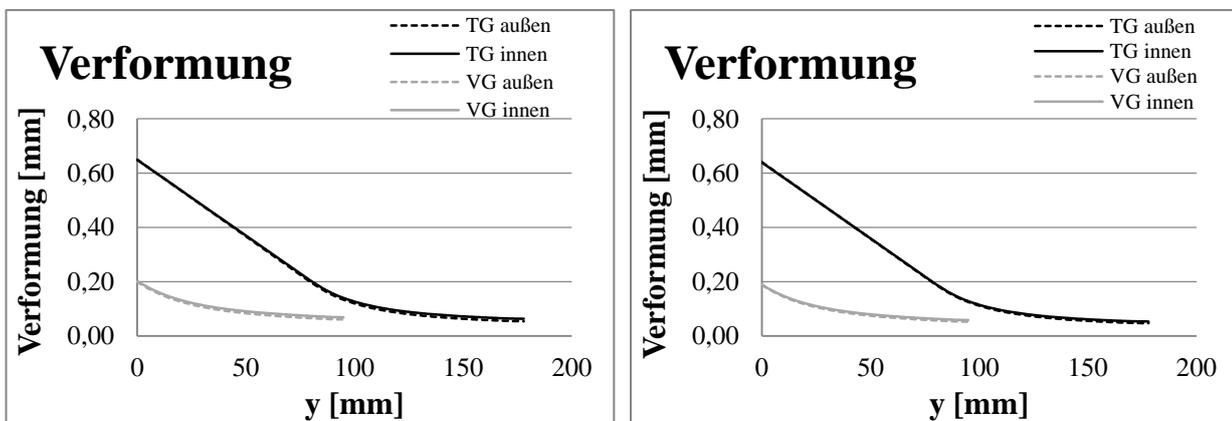


Abbildung 3-20 links: Schraubenabstand $a_2 = 7,5 d$; rechts: Schraubenabstand $a_2 = 10 d$

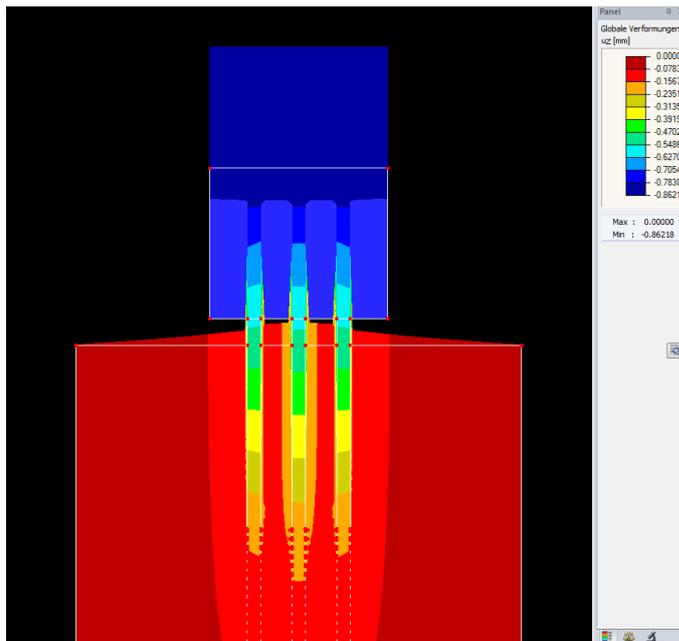


Abbildung 3-21 Verformungsbild bei $a_2 = 2,5 d$

In Abbildung 3-22 sind die Verformungen der inneren und äußeren Schrauben gegenübergestellt. Für die Teilgewindeschrauben wurden dabei zwei Punkte betrachtet, einer an der Holzoberkante (Schaftende) und einer beim Gewindeende. Für die Vollgewindeschraube wurde nur ein Punkt an der Holzoberkante betrachtet. Durch die Kopplungsplatte sind die Verformungen der äußeren und inneren Schrauben an der Holzoberkante bei Teilgewinde- und Vollgewindeschrauben annähernd gleich. Betrachtet man das Verhältnis zwischen innerer und äußerer Teilgewindeschraube am Gewindeende, sieht man einen deutlichen Verformungsunterschied bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 2,5 d$ der bei einem Schraubenabstand $a_2 = 10 d$ nicht mehr auftritt.

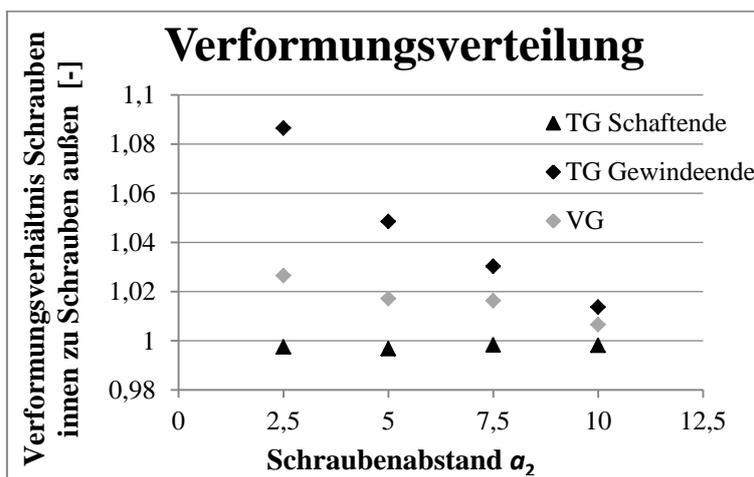


Abbildung 3-22 Verformungsverteilung zwischen inneren und äußeren Schrauben bei unterschiedlichen Schraubenabständen a_2

Die bisherigen Modelle wurden jeweils mit einem linear-elastischen Materialverhalten der Schrauben simuliert. Da die äußeren Schrauben vor den inneren Schrauben ihren maximalen Traglastwiderstand erreichen, stellt sich die Frage, ob es durch Lastumlagerungen möglich ist, dass alle Schrauben gleichmäßig auf deren maximalen Traglastniveau belastet werden können, bevor es zu einem Versagen

kommt und somit $n = n_{ef}$ vorausgesetzt werden kann. Um das zu überprüfen, wurden die in Kapitel 5 durchgeführten Vorversuche mit einem Schraubenabstand von $a_2 = 3d$ simuliert, bei denen drei Schrauben auf Ausziehen belastet werden und Ausziehen der Schraube den maßgebenden Versagensmechanismus darstellt, siehe Abbildung 3-23. Dazu wurde für die Schrauben ein bilineares elastisch-plastisches Materialmodell angesetzt, bei dem es auf dem Lastniveau, bei dem die Schraube anfängt, auf Ausziehen zu versagen, zu einem Plastizieren der Schrauben kommt. Als Steigung für den elastischen Bereich wird der E-Modul für Stahl angesetzt, siehe Abbildung 3-23.

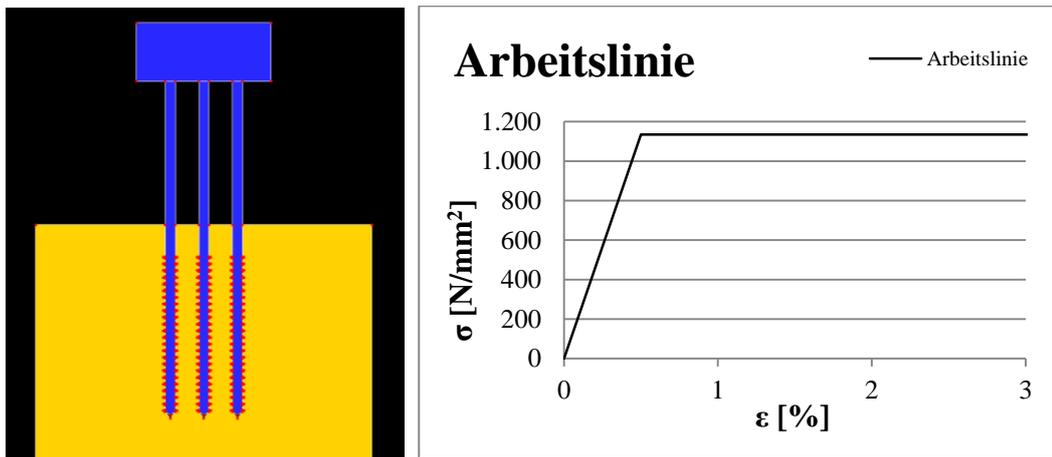


Abbildung 3-23 links: Modell für Vorversuche mit plastischer Berechnung; rechts: bilinearer elastisch-plastisches Materialmodell

Laut dieser Berechnung reicht das plastische Verformungsvermögen aus, damit es zu einer gleichmäßigen Belastung der inneren und äußeren Schrauben auf deren maximalen Traglastniveau kommt. In Abbildung 3-24 sind die Spannungs- und Verformungsverläufe der Berechnung dargestellt. Hier sieht man, dass die Spannungen entlang der Schraubenachse nahezu gleich verlaufen und im Schaftbereich betragsmäßig gleich groß sind. Somit kann hier $n = n_{ef}$ angesetzt werden.

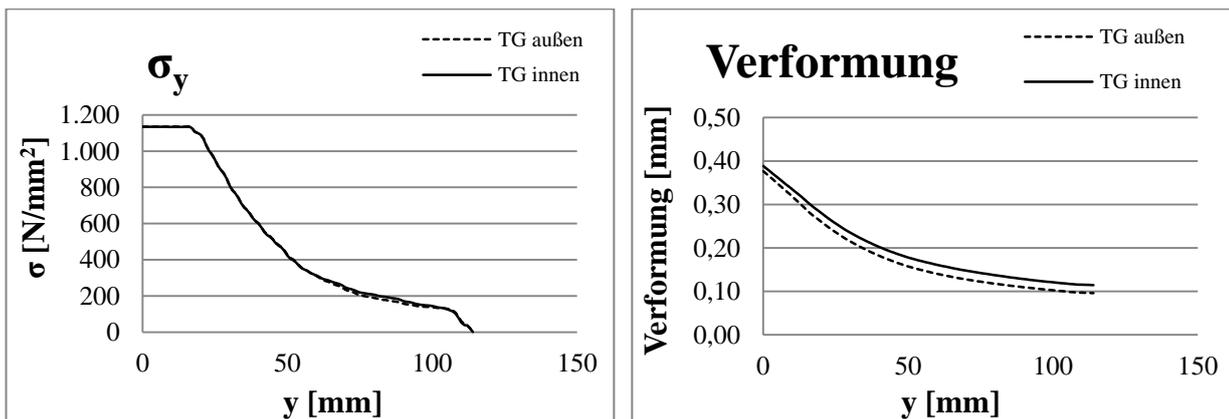


Abbildung 3-24 Spannungen und Verformungen der Schrauben bei plastischer Berechnung

3-2 CONCLUSIO DER FE-SIMULATIONEN

Da durch die gewindeversetzten Abstufungen aufgrund der Exzentrizitätsmomente keine Reduktion der Querspannungen erzielt werden konnte, wurde eine dem Kraftfluss im Querschnitt angepasste parabelförmige Schraubenabstufung, im Sinne eines Druckbogens, entwickelt. Diese reduziert die

Querzugspannungen zwischen den Schrauben deutlich, führt jedoch zu leicht erhöhten Querzugspannungen im Randbereich des Holzquerschnittes. Da diese betragsmäßig aber unterhalb der maximal auftretenden Spannungen im Referenzsystem liegen, stellt diese Abstufung rechnerisch eine Verbesserung dar. Durch die Abstandsvariation wurde deutlich, wie stark sich die Spannungen durch die Abstände verändern. Für den simulierten Querschnitt stellen die anfangs gewählten Abstände $a_2 = 2,2 d$ und $a_{2,c} = 2 d$ die beste Variante dar. Für die Wahl eines anderen Querschnitts sollten die Zwischen- und Randabstände nicht mehr kleiner gewählt werden. Es sollte eher angedacht werden, etwas größere Zwischenabstände zu wählen, da die Querzugspannungen bei $a_2 = 2,5 d$ um mehr als 40 % geringer ausfallen als bei $a_2 = 2,2 d$. Um der größeren Belastung am Rand des Holzquerschnittes durch die parabelförmige Abstufung zu begegnen, sollte der Randabstand etwas größer gewählt werden, da sich gezeigt hat, dass durch $a_{2,c} = 2,5 d$ bei parabelförmiger Abstufung in etwa dieselben Randspannungen auftreten, wie bei gleichmäßig eingebundenen Schrauben mit einem Randabstand $a_{2,c} = 2 d$. Durch die FE-Simulationen lässt sich insgesamt eine Verbesserung des Querspannungszustandes bei parabelförmiger Abstufung feststellen was auf eine geringere Spaltneigung und damit einhergehend höhere Traglast bei dieser Schraubenanordnung schließen lässt.

KAPITEL 4: EINSCHRAUBVERSUCHE

4-1 PRÜFKONZEPT

Um für die weiteren Versuche Rand- und Zwischenabstände abzuschätzen, wurden zunächst Einschraubtests mit Einzelschrauben in kleinen Querschnitten durchgeführt, bei denen überprüft wurde, bei welchen Querschnittdimensionen das Holz bereits beim Eindrehen der Schraube aufspaltet. Diese Prüfungen sind durch Beobachtungen, welche im Rahmen der Untersuchungen in [6] getätigt wurden, motiviert. Dabei wurden für die beiden Belastungszustände, dem Applizieren (Eindrehen der Schraube) und dem Herausziehen, die dabei jeweils entstehenden Querkräfte im Holz an diskreten Punkten entlang der effektiven Gewindelänge bestimmt. Aus diesen Untersuchungen ging hervor, dass das Applizieren zu deutlich höheren Querkräften führt als das Herausziehen.

Ausgehend von den Ergebnissen aus den Einschraubprüfungen mit Einzelschrauben wurden noch Einschraubversuche mit Schraubengruppen durchgeführt, um zu überprüfen, ob das Einschrauben bei sehr kleinen Abständen zwischen den Schrauben ohne Aufspalten möglich ist und ob aus den zuvor gewonnenen Mindeststrandabständen Mindestzwischenabstände ableitbar sind.

4-2 MATERIAL

Als Ausgangsmaterial wurden die von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG zur Verfügung gestellten Träger aus Buchen-Vollholz und BauBuche verwendet. Für die Einschraubversuche wurden die Probekörper nicht zuvor in der Klimakammer gelagert und hatten daher eine Holzfeuchte von etwa 7 bis 8 %, was baupraktisch betrachtet einem konservativen Zustand entspricht, da trockenes Holz eher zum Spalten neigt als feuchtes. Als Schraube kam die Teilgewindeschraube, der Prototyp 1 (P 1) von Pöll [6], mit einem Außendurchmesser von 8 mm, einer Gewindelänge von 100 mm und einem Verdichter an beiden Enden des Gewindes zum Einsatz, vgl. Abbildung 2-2.

4-3 METHODE

Für die Einschraubtests wurden Einzelschrauben des P 1 zentrisch in quadratische Querschnitte mit einer Länge von 200 mm aus Buche und BauBuche mit und ohne Vorbohren 0° zur Faser eingeschraubt. Zunächst wurden nur schon einmal verwendete Schrauben des P 1 verwendet und ohne Vorbohren 120 mm eingeschraubt; also genau so weit, dass der obere Verdichter komplett im Holz versenkt war. Die Querschnittsabmessungen variierten dabei von $3 d \times 3 d$ bis $7,5 d \times 7,5 d$ (24 mm x 24 mm bis 60 mm x 60 mm). Um die Schrauben möglichst gerade und zentrisch in den Holzquerschnitt zu schrauben, wurde für jeden Holzquerschnitt ein Holzwinkel als Führungslehre angefertigt.

Ziel der Einschraubtests war es, herauszufinden, ab welchen Querschnittsabmessungen es beim Einschrauben zu keinem Aufspalten mehr kommt. Daher wurde, sobald ein Querschnitt einmal aufspaltete, dieser nicht weitergeprüft, sondern gleich der nächstgrößere Querschnitt (Änderung in der

Seitenlänge um jeweils $0,5 d$) untersucht. Dieser Ablauf wurde solange wiederholt bis fünf hintereinander geprüfte Probekörper gleicher Querschnittsdimension kein Aufspalten mehr aufwiesen. Danach wurde mit neuen Schrauben noch der nächstkleinere Querschnitt untersucht, um zu überprüfen, ob der kleinere Holzquerschnitt mit neuen Schrauben, mit intakter Beschichtung und somit geringerem Eindrehwiderstand, im Vergleich zu gebrauchten Schrauben auch aufspaltet. Für die Versuche mit Vorbohren wurde in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen. Ausgehend von Querschnittsabmessungen von $4,5 d \times 4,5 d$ wurden immer kleiner werdende Querschnitte untersucht, bis es zu einem Aufspalten beim Eindrehen kommt. Vorgebohrt wurde 120 mm tief mit dem Kerndurchmesser von 6 mm und es wurden zunächst schon einmal verwendete Schrauben eingedreht. Auch hier wurde festgelegt, dass fünf hintereinander geprüfte Probekörper gleicher Querschnittsdimension kein Aufspalten zeigen durften. Zum Vergleich wurden neue Schrauben im nächstkleineren Querschnitt getestet. Die Probekörper für die Versuche mit Vorbohren variierten zwischen $2 d \times 2 d$ und $4,5 d \times 4,5 d$.



Abbildung 4-1 links: Versuchsaufbau zum Einschrauben inkl. Winkel als Einschraublehre; rechts: aufgespaltene Körper aus Buche und BauBuche

Zusätzlich zu den Einschraubversuchen mit Einzelschrauben wurden in BauBuche 0° Grad zur Faser Einschraubversuche mit Schraubengruppen bestehend aus neun Schrauben mit einem Schraubenabstand a_2 von $2 d$ und unter Variation des Randabstandes $a_{2,c}$ von $1,5 d$ und $2 d$ durchgeführt. Es wurden jeweils fünf Probekörper mit einer Abmessung von $7 d \times 7 d$ (56 mm x 56 mm) für den Randabstand $1,5 d$ und fünf Probekörper mit einer Abmessung von $8 d \times 8 d$ (64 mm x 64 mm) für den Randabstand $2 d$ hergestellt und vorgebohrt. Die Schrauben wurden, wie in Abbildung 4-2 ersichtlich, in vorgegebener Reihenfolge eingedreht. Bei zwei Probekörpern mit der Abmessung $7 d \times 7 d$ wurde die Reihenfolge nicht eingehalten und die Schrauben der Reihe nach von unten nach oben eingeschraubt.



Abbildung 4-2 links: Probekörper mit Randabstand $2 d$ und Probekörper mit Randabstand $1,5 d$; rechts: Einschraubreihenfolge



Abbildung 4-3 links: eingeschraubte Schraubengruppen; rechts: aufgespaltener Probekörper

4-4 RESULTATE DER EINSCHRAUBTESTS

In Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der Einschraubtests getrennt für Buche und BauBuche dargestellt. Für die Einschraubtests wurde dokumentiert, bei welcher Tiefe beim Eindrehen der Schraube ein Aufspalten des Holzes beobachtet wurde. Dabei wurde unterschieden, ob die Probe bereits kurz nach dem Eindrehen der Schraubenspitze, nach dem Einbringen des ersten Verdichters oder erst beim Gewindeende nach Einbringen des zweiten Verdichters aufspaltete. Zusätzlich wurde differenziert, ob die Buche radial (quer zu den Jahrringen) oder tangential (in Jahrringrichtung) bzw. die BauBuche innerhalb bzw. zwischen den Furnierlagen in der Klebefuge oder quer zur Furnierlage aufspaltete. In Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 sind die Verteilung der erzielten Einschraubtiefen bis zum Aufspalten und die Art des Aufspaltens, prozentuell bezogen auf die aufgespaltenen Körper, angegeben. Bei den Versuchen ohne Vorbohren war deutlich zu erkennen, dass wenn es zu einem Spalten kommt, es meistens beim Einbringen des ersten Verdichters oder kurz danach geschah. Die Buche spaltete fast nur in radialer Richtung auf. Die BauBuche spaltete bei kleineren Querschnitten in Furnierrichtung auf, bei größeren Querschnitten spalteten die Körper in Furnierrichtung sowie quer dazu auf.

Bei der Buche konnte bei Applizierung ohne Vorbohren ab einem Querschnitt von $5,5 d \times 5,5 d$ mit bereits gebrauchten Schrauben bzw. bei einem Querschnitt von $5 d \times 5 d$ mit neuen Schrauben kein Aufspalten mehr beobachtet werden. Hier war ein Unterschied zwischen neuen und gebrauchten Schrauben erkennbar, was auf die noch intakte Beschichtung und damit, auf Grund geringerer Reibung, verbundenem kleineren Eindrehmoment der neuen Schrauben zurückzuführen sein dürfte. Die BauBuche wies erst bei einem Querschnitt von $7,5 d \times 7,5 d$ kein Aufspalten mehr auf. Hier war kein Unterschied zwischen neuen und schon einmal gebrauchten Schrauben erkennbar.

Bei den Versuchen, bei denen mit dem Kerndurchmesser von 6 mm vorgebohrt wurde, kam es zu keinem Aufspalten ab Querschnitten aus Buche mit den Abmessungen $2,5 d \times 2,5 d$ bzw. bei Querschnitten aus BauBuche ab $4 d \times 4 d$.

Tabelle 4-1 Auswertung Einschraubtests Buche 0° zur Faser

Vorbohren ¹⁾	Schrauben ²⁾	Querschnitt	Anzahl	AFSP ³⁾ [%]	SS ⁴⁾ [%]	VD ⁵⁾ [%]	GE ⁶⁾ [%]	r ⁷⁾ [%]	t ⁸⁾ [%]
V	GS	2 d x 2 d	1	100	100	0	0	0	100
V	NS	2 d x 2 d	1	100	0	100	0	100	0
V	GS	2,5 d x 2,5 d	5	0	0	0	0	0	0
V	GS	3 d x 3 d	2	0	0	0	0	0	0
OV	GS	3 d x 3 d	2	100	0	100	0	50	50
V	GS	3,5 d x 3,5 d	2	0	0	0	0	0	0
OV	GS	3,5 d x 3,5 d	1	100	0	100	0	100	0
V	GS	4 d x 4 d	2	0	0	0	0	0	0
OV	GS	4 d x 4 d	1	100	0	0	0	100	0
OV	GS	4,5 d x 4,5 d	1	0	0	0	0	0	0
OV	NS	4,5 d x 4,5 d	2	100	0	0	0	100	0
OV	GS	5 d x 5 d	2	100	0	50	50	100	0
OV	NS	5 d x 5 d	5	0	0	0	0	0	0
OV	GS	5,5 d x 5,5 d	5	0	0	0	0	0	0

¹⁾ V...Vorbohren; OV...ohne Vorbohren

²⁾ GS...gebrauchte Schrauben, NS...neue Schrauben

³⁾ AFSP...Aufspalten

⁴⁾ Aufspalten bei Eindrehen der Schraubenspitze

⁵⁾ Aufspalten nach Einbringen des ersten Verdichters

⁶⁾ Aufspalten beim Eindrehen des Gewindeendes (zweiter Verdichter)

⁷⁾ radiales Aufspalten

⁸⁾ tangenciales Aufspalten

Tabelle 4-2 Auswertung Einschraubtests BauBuche 0° zur Faser

Vorbohren ¹⁾	Schrauben ²⁾	Querschnitt	Anzahl	AFSP ³⁾ [%]	SS ⁴⁾ [%]	VD ⁵⁾ [%]	GE ⁶⁾ [%]	FR ⁷⁾ [%]	Q ⁸⁾ [%]
OV	GS	3 d x 3 d	1	100	100	0	0	0	1
V	GS	3,5 d x 3,5 d	2	50	0	100	0	100	0
V	NS	3,5 d x 3,5 d	2	100	0	100	0	100	
OV	NS	3,5 d x 3,5 d	1	100	0	100	0	100	0
V	GS	4 d x 4 d	5	0	0	0	0	0	0
OV	GS	4 d x 4 d	1	100	0	100	0	0	100
V	GS	4,5 d x 4,5 d	2	0	0	0	0	0	0
OV	GS	4,5 d x 4,5 d	2	100	0	100	0	100	0
OV	GS	5 d x 5 d	2	100	0	100	0	100	0
OV	GS	5,5 d x 5,5 d	2	50	0	100	0	0	100
OV	GS	6 d x 6 d	2	100	0	100	0	0	2
OV	NS	6 d x 6 d	2	100	0	100	0	50	50
OV	GS	6,5 d x 6,5 d	5	20	0	100	0	0	100
OV	NS	6,5 d x 6,5 d	3	67	0	50	50	0	100
OV	GS	7 d x 7 d	6	17	0	100	0	100	0
OV	NS	7 d x 7 d	2	100	0	50	50	50	50
OV	GS	7,5 d x 7,5 d	4	0	0	0	0	0	0
OV	NS	7,5 d x 7,5 d	4	0	0	0	0	0	0

¹⁾ V...Vorbohren; OV...ohne Vorbohren

⁵⁾ Aufspalten nach Einbringen des ersten Verdichters

²⁾ GS...gebrauchte Schrauben, NS...neue Schrauben

⁶⁾ Aufspalten beim Eindrehen des Gewindeendes (zweiter Verdichter)

³⁾ AFSP...Aufspalten

⁷⁾ Aufspalten in Furnierichtung

⁴⁾ Aufspalten bei Eindrehen der Schraubenspitze

⁸⁾ Aufspalten quer zu den Furnierlagen

In Tabelle 4-3 ist das Ergebnis der Einschraubtests noch einmal zusammenfassend dargestellt. Es lässt sich daraus schließen, dass sich die benötigten Abstände zwischen Applizierung mit Vorbohrung und Applizierung ohne Vorbohrung etwa um den Faktor Zwei unterscheiden. Um einen wirtschaftlich sinnvollen Hirnholzanschluss mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad für die weiteren Versuche herzustellen, muss somit vorgebohrt werden.

Tabelle 4-3 Benötigter Querschnitt

Holz	Ohne Vorbohren	Mit Vorbohren
Buche	5 d x 5 d	2,5 d x 2,5 d
BauBuche	7,5 d x 7,5 d	4 d x 4 d

Aufgrund dieser Erkenntnis wurde für die Einschraubversuche einer ganzen Schraubengruppe in BauBuche vorgebohrt appliziert und der Abstand etwas kleiner gewählt, um die gegenseitige Beeinflussung zwischen den Schrauben beim Eindrehen zu untersuchen. Bei den fünf geprüften Proben mit Zwischen- und Randabstand von 2 d wurde kein Aufspalten bemerkt. Dies ist insofern erstaunlich, weil so jeder Schraube deutlich weniger als die Fläche von 4 d x 4 d, die laut den Einschraubtests mit Einzelschrauben benötigt wird, zur Verfügung steht. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die zeitversetzte und in vorgegebener Reihenfolge stattfindende Einbringung der Schrauben sein. Somit hat

das Holz nach jeder eingebrachten Schraube etwas Zeit die durch das Eindrehen erzeugten Spaltkräfte abzubauen. Zudem wird das Holzvolumen zwischen den Schrauben von beiden Seiten auf Druck quer zur Faser beansprucht. Bei den Probekörpern mit einem Randabstand von $1,5 d$ spalteten alle fünf Proben zum Rand hin mindestens einmal auf. Das lässt den Schluss zu, dass für BauBuche ein Randabstand von mindestens $2 d$ eingehalten werden muss. Hier war kein Unterschied zwischen dem versetzten Einbringen nach vorgegebener Reihenfolge und der Reihe nach eingedrehten Schrauben feststellbar, da alle geprüften Querschnitte aufspalteten.

Tabelle 4-4 *Einschraubtest Gruppe*

Querschnitt	Schrauben	Randabstand $a_{2,c}$	Schraubenabstand a_2	Anzahl	Aufspalten [%]
<i>7 d x 7 d</i>	9	<i>1,5 d</i>	<i>2 d</i>	5	100
8 d x 8 d	9	2 d	2 d	5	0

Auch wenn es technisch möglich ist, die Schrauben so eng nebeneinander zu setzen, ist es wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll, da die neun Schrauben, bei Versagen auf Schraubenbruch schon um 30 % mehr Kraft übertragen könnten, als der Nettoquerschnitt rechnerisch maximal zulässt. Für die vorliegenden Querschnittsdimensionen würden 7 Schrauben ausreichen, um die rechnerische Tragfähigkeit des Nettoquerschnitts zu erreichen. Der Besetzungsgrad durch die Schrauben im Querschnitt entspricht dann 9 %.

KAPITEL 5: VORVERSUCHE

5-1 PRÜFKONZEPT

Um die Rand- und Schraubenabstände (Zwischenabstände) zu ermitteln, bei denen es im Mittel zu keinem Abfall der Ausziehtragfähigkeit der einzelnen Schrauben kommt, wurden Ausziehversuche mit Schraubengruppen bestehend aus drei Schrauben 0° Grad zur Faser in Buche und BauBuche durchgeführt. Die so ermittelten Abstände dienen als Basis für die später durchgeführten Gruppenversuche. Zusätzlich wurden auch die Nachgiebigkeit dieser Schraubverbindung sowie die Holzfeuchte und die Rohdichte der geprüften Probekörper bestimmt.

5-2 MATERIAL

Als Ausgangsmaterial wurden wieder die von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG zur Verfügung gestellten Träger aus Buchen-Vollholz und BauBuche verwendet. Es wurden 10 Träger Buchenvollholz und 20 Träger BauBuche jeweils mit einer Länge von 3 m für die Probekörper benötigt. Die Probekörper wurden nach dem Zuschneiden auf die zu prüfenden Abmessungen so sortiert, dass pro Serie von jedem Träger ein Probekörper stammt, um die Streuung der Rohdichte der Träger, als Indikator für die Ausziehkenngößen und die Variabilität der Holzeigenschaften, in jeder Serie gleichermaßen zu berücksichtigen. Die Probekörper wurden für einige Wochen in der Klimakammer gelagert und stichprobenartig die Holzfeuchte mit einem Holzfeuchtemessgerät der Type Gann Hydromette gemessen. Der zuvor für die Einschraubtests verwendete Prototyp P 1 kam wieder als Schraube zum Einsatz. Da bei dieser Schraube mit einer Gewindelänge von 100 mm die Ausziehfestigkeit unter der Stahlzugfestigkeit liegt, konnte für die Ausziehversuche ein Schraubenbruch ausgeschlossen werden.

5-3 METHODE

Für die Durchführung der Ausziehversuche wurde die Universalprüfmaschine `lignum_uni_275` verwendet, die über eine vertikal bewegliche Traverse und eine maximale Prüfkraft von 275 kN auf Zug und Druck verfügt. Die Versuche wurden als Pull-Pull-Versuche ausgeführt. Dazu wurden an die Versuchskörper oben (drei Prüfschrauben) und unten (vier Gegenschrauben) mit insgesamt sieben Schrauben vorgefertigte Stahlschienen unter Variation der Schraubenabstände montiert, um den Versuchskörper in die Prüfmaschine einspannen zu können. Die untere Stahlschiene wurde dabei in die Führungsschiene der Prüfmaschine eingefädelt. Die obere Stahlschiene wurde in eine Zuglasche, welche gelenkig mit der Prüfmaschine verbunden war, eingeschoben. Für die Unterseite wurden vier Schrauben mit einem Rand- und Zwischenabstand von $4d$ mit Vorbohrung angebracht, die zur Verankerung dienen und an der Oberseite, an der das Versagen auftreten sollte, drei Schrauben mit variierenden Abständen. Die Schrauben wurden je nach Prüfserie entweder über die gesamte Gewindelänge von 100 mm oder, mit einer Einbindetiefe von $2d$, 116 mm im Holz versenkt. Um einen gleichmäßigen Abstand zwischen Schrauben und Stahlschienen zu gewährleisten, wurden an beiden Seiten zwischen den Stahlschienen

Distanzhölzer angebracht und die Schrauben mit einem Drehmomentenschlüssel mit mindestens 20 kNm angezogen. Damit wurde sichergestellt, dass alle Schrauben gleichmäßig angezogen waren und somit bei der Prüfung von Beginn an der Lastabtragung mitwirkten. Zusätzlich wurden zur Bestimmung von K_{ser} vier induktive Wegaufnehmer während des Prüfungsvorganges angebracht, welche die lokale Verformung maßen. Zwei davon setzten links und rechts an der Zuglasche auf und zwei links und rechts auf Stahlwinkel, die an die Versuchskörper angeschraubt wurden. Die Prüfmaschine zog während des Prüfungsvorgangs solange an der oberen Stahlschiene an, bis es zu einem Versagen auf Ausziehen der Schrauben kam. Als Prüfgeschwindigkeit wurde 1,3 mm/min gewählt, damit ein Versagen innerhalb von 300 ± 120 sec auftrat.

Die Versuche wurden in drei verschiedene Prüfkonfigurationen mit jeweils mehreren Abstandsvariationen unterschieden. In Prüfkonfiguration 1 wurden die verschiedenen Abstände in Buchenvollholz untersucht, in Prüfkonfiguration 2 die Abstände in BauBuche, wenn die Schrauben in Richtung der Furnierlagen und in Prüfkonfiguration 3 in BauBuche, wenn die Schrauben im rechten Winkel zu den Furnierlagen versetzt waren. Die Unterscheidung zwischen Prüfkonfiguration 2 und 3 wurde getroffen, da verschiedene Ergebnisse bei unterschiedlicher Orientierung zu den Furnierlagen zu erwarten waren. In Tabelle 5-1 und Abbildung 5-2 sind die Querschnittsabmessungen für die Prüfkonfigurationen zusammengefasst. Aufgrund der vorhandenen Träger als Ausgangsmaterial variierten die Höhen der Versuchsquerschnitte der drei Prüfkonfigurationen geringfügig. Für die Prüfkonfiguration 3 wurden zwei Träger blockverklebt und dann in der Mitte geteilt, um die gewünschten Abmessungen zu erhalten. Durch den Hobelvorgang der geklebten Träger verkleinerte sich die Probekörperhöhe von 80 mm auf 75 mm im Vergleich zu Prüfkonfiguration 2.

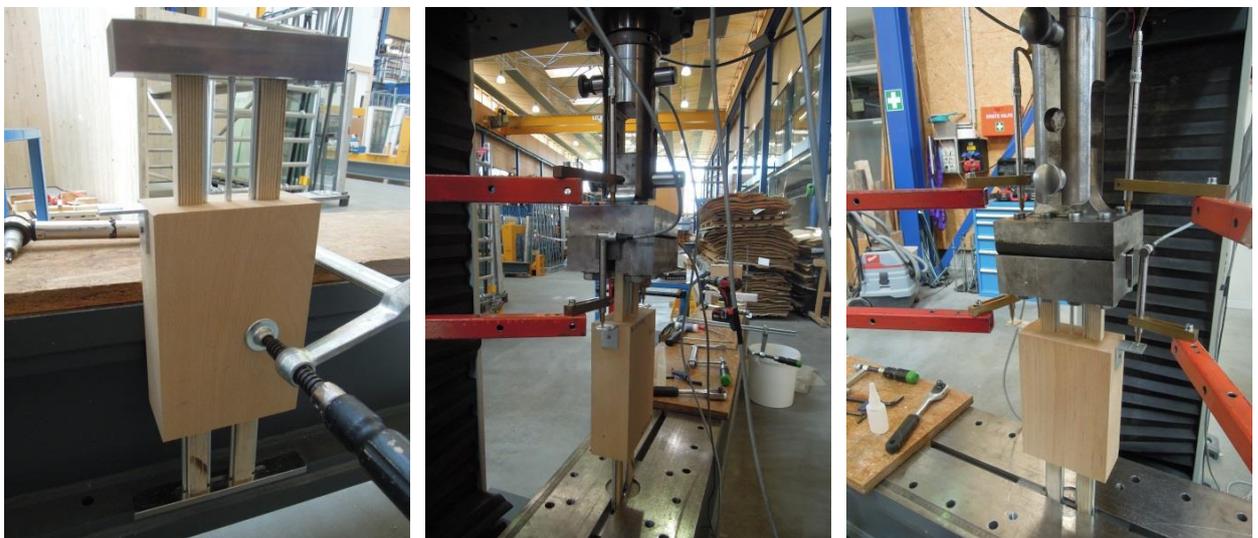
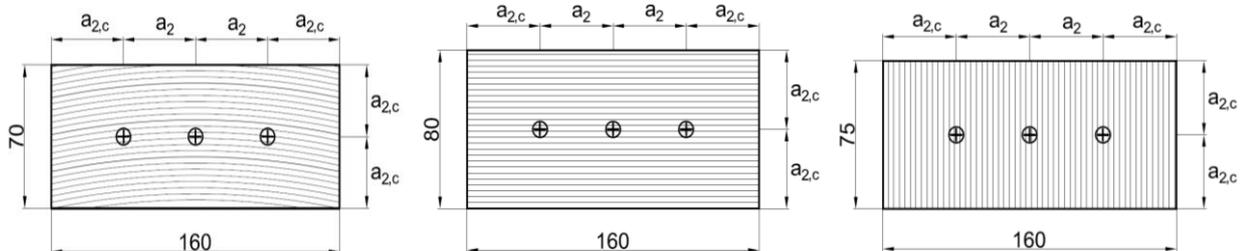


Abbildung 5-1 Versuchsaufbau: links: fertiger Probekörper mit angeschraubter Stahlschienen und Stahlwinkel inkl. Distanzhölzer zur Gewährleistung einer konstanten Einschraubtiefe; Mitte und rechts: eingespannter Probekörper mit angebrachten Wegaufnehmern

Tabelle 5-1 Querschnittsabmessungen

Prüfkonfiguration	Holz	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]
1	Buche	245	160	70
2	BauBuche	245	160	80
3	BauBuche	245	160	75


Abbildung 5-2 Versuchsquerschnitte: links: Buche Konfiguration 1; Mitte: BauBuche Konfiguration 2; rechts: BauBuche Konfiguration 3; Maße in [mm]

Zusätzlich wurden für die Prüfkonfiguration 1 und 3 für jeweils eine Prüfserie der Holzquerschnitt an der Oberseite verschmälert, um neben den Zwischenabständen auch eine Aussage über den Einfluss der Randabstände treffen zu können. Die Unterseite konnte aufgrund des für die vier Schrauben benötigten Platzes nicht verschmälert werden. Für die Serie 1_05 der Prüfkonfiguration 1 wurde $a_{2,c}$ mit $1,5 d$ gewählt und über eine Länge von 100 mm der Querschnitt verkleinert, für die Serie 3_08 der Prüfkonfiguration 3 wurde $a_{2,c}$ mit $3 d$ gewählt und über eine Länge von 116 mm (mit $2 d$ Einbindetiefe) der Querschnitt verkleinert. Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen diese Querschnitte.

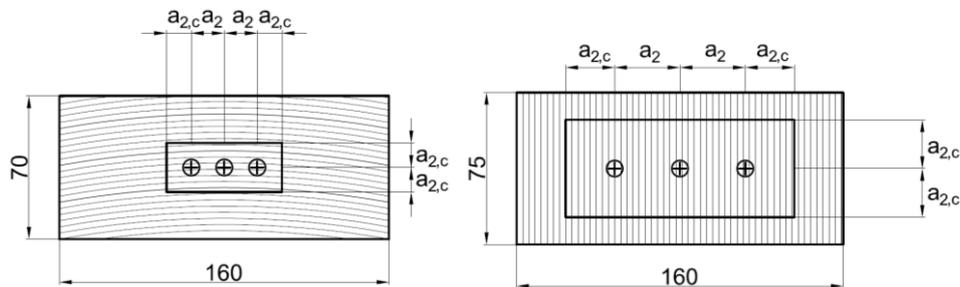

Abbildung 5-3 Querschnitte mit verkleinerten Randabständen: links: Prüfkonfiguration 1_05, rechts: Prüfkonfiguration 3_08; Maße in [mm]

Abbildung 5-4 links: vorbereiteter Prüfkörper, Serie 1_05, rechts: Prüfkonfiguration, Serie 3_08

Die Ergebnisse der zuvor durchgeführten Einschraubtests dienen als Grundlage für die gewählten Rand- und Zwischenabstände für diese Prüfserien. Tabelle 5-2 gibt die einzelnen Prüfserien mit den Rand- und Zwischenabständen wieder. Da festgestellt wurde, dass die Ausziehfestigkeit bei einer Schraubenanordnung im rechten Winkel zu den Furnierlagen bei der BauBuche niedriger liegt, wurden mehrere Serien der Prüfkfiguration 3 durchgeführt und davon ausgegangen, dass bei gleichen Schraubenabständen, die Schraubenanordnung in Furnierrichtung versetzt (Prüfkfiguration 2), eine vergleichbare bzw. bessere Ausziehfestigkeit aufweist. Es waren noch mehrere Serien zur Untersuchung von Schrauben, die ohne Vorbohren appliziert werden, geplant; da aber bereits bei Serie 1_07 in Buche bei Zwischenabständen von $5 d$ ein hoher Abfall der Ausziehfestigkeit feststellbar war, wurden diese nicht weiter geprüft und die Versuche auf vorgebohrte Schrauben beschränkt. Der Grund dafür sind abermals wirtschaftliche Überlegungen hinsichtlich des Nutzungsgrades des Bruttoquerschnittes von über Hirnholzverschraubungen angeschlossener Stäbe sowie in Hinblick auf die Überlegungen, derartige Anschlüsse zusammen mit Stahl-Stahl-Montagelösungen bereits im Werk vorzumontieren. Somit spielt der zusätzliche Aufwand einer Vorbohrung eine geringe Rolle und ist in Hinblick auf die Führung der nachfolgend zu applizierenden Schrauben durchaus als Vorteil zu sehen.

Tabelle 5-2 Zusammenfassung der Prüfkfigurationen

Prüfserie	a_2 ¹⁾	$a_{2,c}$ ²⁾	l_{emb} ³⁾	Vorbohren ⁴⁾	Anzahl
1_01	$3 d$	$7 d 4,4 d$	–	VO	10
1_02	$2 d$	$8 d 4,4 d$	–	VO	10
1_03	$2 d$	$8 d 4,4 d$	$2 d$	VO	10
1_05	$2 d$	$1,5 d$	–	VO	10
1_07	$5 d$	$5 d 4,4 d$	–	OV	5
2_01	$3 d$	$7 d 5 d$	–	VO	5
2_02	$2 d$	$8 d 5 d$	–	VO	10
3_01	$3 d$	$7 d 4,7 d$	–	VO	5
3_02	$2 d$	$8 d 4,7 d$	–	VO	6
3_03	$4 d$	$6 d 4,7 d$	–	VO	6
3_05	$4 d$	$6 d 4,7 d$	$2 d$	VO	10
3_06	$5 d$	$5 d 4,7 d$	–	VO	5
3_08	$4 d$	$3 d$	$2 d$	VO	10

¹⁾ a_2 ... Schraubenabstand quer zur Faser

²⁾ $a_{2,c}$... Randabstand quer zur Faser

³⁾ l_{emb} ... Einbindetiefe

⁴⁾ V...Vorbohren; OV...ohne Vorbohren

5-3.1 BESTIMMUNG DER ROHDICHTE

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden die Prüfkörper vor den Versuchen mit einer Standwaage gewogen und mit Hilfe eines Messschiebers abgemessen. Mit Gl. (5.1) berechnet sich über die Masse m und das Volumen V die Rohdichte ρ .

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{b \cdot l \cdot h} \quad (5.1)$$

$\rho \dots$	Rohdichte [kg/m ³]
$m \dots$	Masse des Prüfkörpers [g]
$V \dots$	Volumen des Prüfkörpers [m ³]
$b \dots$	Breite des Prüfkörpers [m]
$l \dots$	Länge des Prüfkörpers [m]
$h \dots$	Höhe des Prüfkörpers [m]

5-3.2 BESTIMMUNG DER HOLZFEUCHTE

Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgte mit Hilfe der Darrmethode in Anlehnung an die ÖNORM EN 13183 [29] für alle Probekörper, bei der in der Nähe des Versagensbereichs nach den Prüfungen eine Darrprobe entnommen wurde. Mit Hilfe von Gl. (5.2) lässt sich dann die Holzfeuchte berechnen.

$$u = \frac{m_w}{m_0} = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (5.2)$$

$u \dots$	Holzfeuchte bei Prüfungsdurchführung [%]
$m_w \dots$	Wassermenge [g]
$m_0 \dots$	Holzmasse darrtrocken [g]
$m_u \dots$	Masse der Probe unter Prüfbedingungen [g]

5-3.3 BESTIMMUNG VON K_{SER}

Die Kenngröße K_{ser} gibt die Steigung der Kraft-Weg-Beziehung im linear-elastischem Bereich an und lässt sich mittels Gl. (5.3) bestimmen. Für den Weg muss der Nettoweg der Schraubengewinde der oberen drei Schrauben im Pull-Pull-Versuch bestimmt werden; siehe Gl. (5.4). Dafür wird die Differenz aus dem Mittelwert der Wegaufnehmer die am Stahl oben aufsetzen, dem Mittelwert der Wegaufnehmer die am Holz aufsetzen und der Stahldehnung des Schraubenschafts gebildet. K_{ser} wird dann über eine Regressionsanalyse bestimmt, bei der ein Bereich zwischen 10 % und 40 % der Maximalkraft so gewählt wird, dass die lineare Regressionsanalyse eine Korrelation von $\geq 0,999$ ergibt.

$$K_{ser} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\Delta F}{\Delta W_{netto}} = \frac{F_2 - F_1}{W_{netto,2} - W_{netto,1}} \quad (5.3)$$

$$\text{Mit } w_{netto} = w_{Stahl} - w_{Holz} - w_{Stahldehnung} \quad (5.4)$$

$K_{ser} \dots$	Verschiebungsmodul [N/mm]
$F \dots$	Kraft [kN]
$\Delta W_{netto} \dots$	Nettoweg der Schraubengruppe [mm]
$w_{Stahl} \dots$	Mittelwert der Verformungen jener Wegaufnehmer, die am Stahl aufsetzen [mm]
$w_{Holz} \dots$	Mittelwert der Verformungen jener Wegaufnehmer, die am Holz aufsetzen [mm]
$w_{Stahldehnung} \dots$	Dehnung des freien Schraubenschafts [mm]

5-3.4 BERECHNUNG VON f_{ax}

Die Ausziehfestigkeit wurde wie in [13] als Mantelfestigkeit nach folgender Gleichung berechnet:

$$f_{ax,exp,1} = \frac{F_{ax,exp,n}}{n \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \pi} \quad (5.5)$$

$f_{ax,exp,1} \dots$	Ausziehfestigkeit der Prüfung in [kN/mm ²]
$F_{ax,exp,n} \dots$	Maximal gemessene Prüfkraft [kN]
$n \dots$	Anzahl der Schrauben [-]
$d \dots$	Nenndurchmesser der Schraube [mm]
$l_{ef} \dots$	effektive Länge der Schraube im Holz, abzüglich der Länge der Schraubenspitze [mm]

5-3.5 ABSCHÄTZUNG VON f_{ax} MIT DEM MODELL VON HÜBNER [16]

Zur Abschätzung der Ausziehfestigkeit f_{ax} und zum Vergleich mit den Prüfergebnissen wurde die Gl. (2.5) von Hübner [16] herangezogen und wie in Gl. (5.5) die Ausziehfestigkeit als Mantelfestigkeit berechnet. Für die Rohdichte wurde der Mittelwert der jeweiligen Prüfserie herangezogen.

5-4 RESULTATE DER VORVERSUCHE

Hier werden nachfolgend die Ergebnisse der Vorversuche für jede der drei Prüfkfigurationen dargestellt.

5-4.1 PRÜFKONFIGURATION 1

In Tabelle 5-3 sind die Ergebnisse der Vorversuche für Prüfkfiguration 1 zusammengefasst. Zusätzlich sind dort auch die Festigkeits- und Steifigkeitswerte der, von Pöll in [6] durchgeführten, Ausziehversuche von Einzelschrauben mit dem Prototyp P 1 bei Prüfung 0° zur Faser in Buchenvollholz angeführt. Diese dienen als Referenz, um die Ausziehfestigkeit der Schraubengruppe bewerten zu können, da es das Ziel der Voruntersuchung ist, jenen Schraubenabstand zu bestimmen, bei dem es, im Vergleich zur Einzelschraube, zu keinem Abfall der Ausziehtragfähigkeit kommt. Die Vergleiche zwischen den einzelnen Serien konzentrieren sich auf Vergleiche der Mittelwerte der einzelnen Parameter.

Wie schon zuvor erwähnt, wurden für die Serie 1_07 die Schrauben ohne Vorbohren appliziert. Da hier im Vergleich zur Einzelschraube, selbst bei einem Schraubenabstand $a_2 = 5 d$, die Ausziehfestigkeit um 20 % geringer ausfällt, wurden weitere Versuche ohne Vorbohren nicht durchgeführt.

Betrachtet man die Serien 1_01 und 1_03, lässt sich feststellen, dass bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 3 d$ bzw. $a_2 = 2 d$ mit einer Einbindtiefe von $l_{emb} = 2 d$ in etwa die selbe Ausziehfestigkeit erreicht wird, wie bei den Referenzversuchen mit Einzelschrauben. Bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 2 d$ ohne Einbindtiefe (Serien 1_02 und 1_05) liegt die Ausziehfestigkeit um 8 % niedriger als bei den Referenzversuchen.

Die Proben der Serien 1_01 und 1_02 versagten allesamt auf Herausziehen und zum Versagenszeitpunkt bildeten sich leichte Spaltrisse um und zwischen den Schrauben; siehe Abbildung 5-5. Bei Serie 1_03 spalteten zwei Probekörper über die gesamte Länge auf, was auf einen zu kleinen Abstand zwischen der Schraubenspitzen der oberen und unteren Schrauben zurückzuführen sein könnte; siehe Abbildung 5-6. Die restlichen Probekörper der Serie wiesen das selbe Versagensbild wie Serie 1_01 und 1_02 auf. Der

gewählte Randabstand von $a_{2,c} = 1,5 d$ der Serie 1_05 reichte nicht aus, da alle zehn Probekörper mindestens an einer Stelle auf Aufspalten versagten.

Tabelle 5-3 Vorversuche Ergebnisse Prüfkfiguration 1

Prüfserie	P 1 [6] ¹⁾	1_02	1_03	1_05	1_01	1_07
Vorbohren ²⁾	V	V	V	V	V	OV
a_2	–	$2 d$	$2 d$	$2 d$	$3 d$	$5 d$
$a_{2,c}$	$5 d 4,4 d$	$8 d 4,4 d$	$8 d 4,4 d$	$1,5 d$	$7 d 4,4 d$	$5 d 4,4 d$
l_{emb}	–	–	$2 d$	–	–	–
n [-]	22	10	10	10	10	5
u_{mean} [%]	9,3	9,8	9,8	10,2	9,8	10,0
ρ_{mean} [kg/m ³]	742	708	705	716	708	717
COV [%]	7,7	5,9	6,9	6,4	6,6	2,3
$f_{ax,mean}$ [N/mm ²]	11,3	10,4	11,1	10,3	10,8	9,0
COV [%]	16,9	10,4	11,1	10,6	9,0	12,1
Differenz ³⁾ [%]	–	–8,0	–1,8	–8,8	–4,4	–20,4
$f_{ax,mean,Hübner}$ [16] [N/mm ²]	12,7	11,6	11,6	11,9	11,9	11,9
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	117,3 ⁴⁾	97,8	106,1	97,5	95,6	118,6
COV [%]	8,7	6,9	5,9	17,8	7,9	29,1
Differenz ³⁾ [%]	–	–16,6	–9,5	–16,9	–18,5	+1,1

¹⁾ Ausziehversuche einer Einzelschraube mit P 1 in Buche 0° zur Faser aus [6] mit $l_{ef} = 50$ mm

²⁾ V...Vorbohren; OV...ohne Vorbohren

³⁾ Differenz bezogen auf Werte der Einzelschraube P 1 [6]

⁴⁾ K_{ser} aus [6] mit $n = 3$ multipliziert

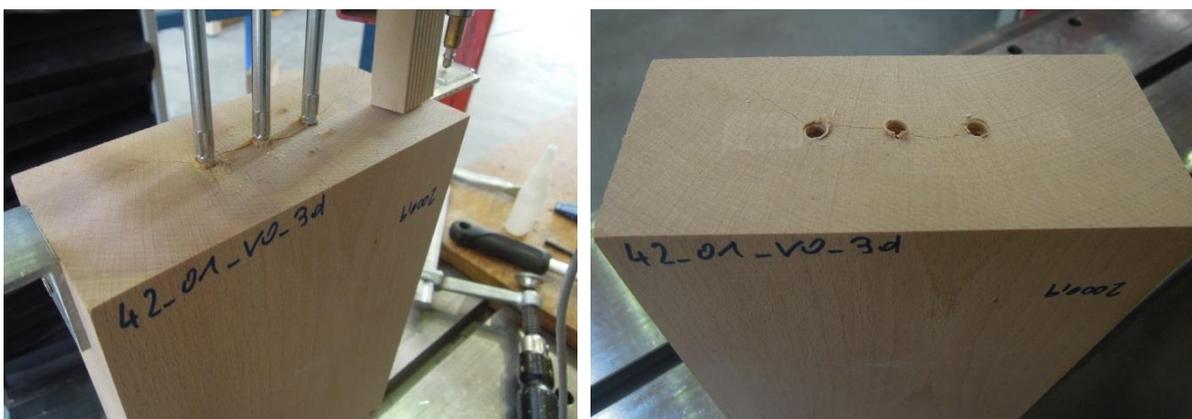


Abbildung 5-5 Versagen auf Ausziehen mit Rissen zwischen den Schrauben

Die über die Formel von Hübner [16] berechnete Ausziehfestigkeit berücksichtigt nicht die veränderte Geometrie des Prototypens P 1 und überschätzt so die Ausziehfestigkeit um 6 – 15 %. Dies wurde in [6] bereits festgestellt, worin im Gegensatz zu jener des P 1 die Ausziehfestigkeit der dort verwendeten

Referenzschraube 0° zur Faser eine gute Übereinstimmung mit dem mittels der Formel von Hübner [16] bestimmten Wert aufwiesen.

Durch die Einbindetiefe von $2d$ ist ein Anstieg von K_{ser} um 8 % im Vergleich zu den Serien ohne Einbindetiefe feststellbar. Zwischen den Schraubenabständen $a_2 = 2d$ und $a_2 = 3d$ lässt sich kein signifikanter Unterschied von K_{ser} feststellen. Werden die Schrauben ohne Vorbohren appliziert, wird die Verbindung steifer und K_{ser} liegt hier im Bereich von K_{ser} der Einzelschraube. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass nur 5 Versuche ohne Vorbohren durchgeführt wurden und deren ermittelte Werte für K_{ser} eine hohe Schwankung aufweisen.

Anmerkung: In der Prüfkonfiguration 1 waren zwei Träger dabei, die eine um 10–15 % geringere Rohdichte als die restlichen Träger aufwiesen. Da jedoch für jede Serie (bis auf 1_07) Probekörper dieser Träger verwendet wurden, streut die Rohdichte in allen Serien im selben Ausmaß.

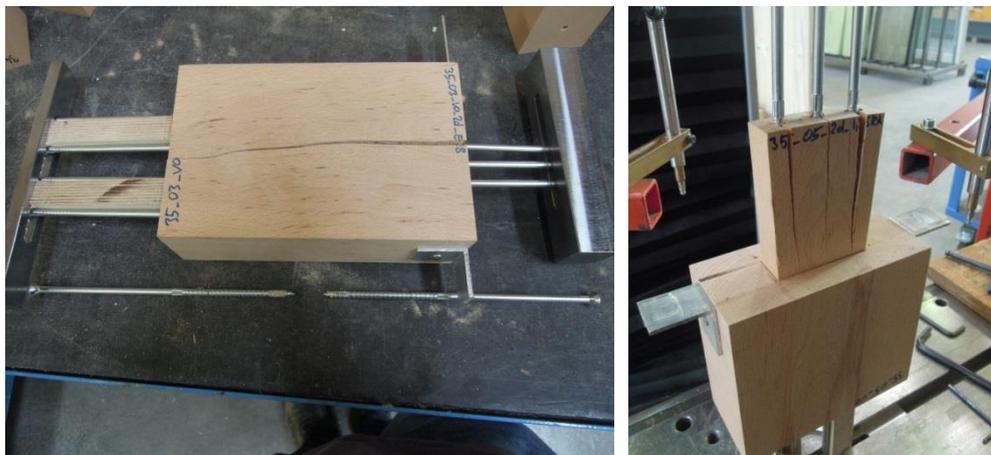


Abbildung 5-6 links: Aufgespaltener Körper der Serie 1_03, Abstand der Schraubenspitzen zu kurz gewählt; rechts: Aufgespaltener Körper der Serie 1_05

5-4.2 PRÜFKONFIGURATION 2

Tabelle 5-4 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse für Prüfkonfiguration 2. Auch für BauBuche führte Pöll [6] Ausziehversuche von Einzelschrauben 0° zur Faser durch. Diese dienen als Referenz für die Prüfkonfigurationen 2 und 3. Mit Prüfkonfiguration 2 wurden lediglich zwei Serien geprüft, da bei einem Abstand $a_2 = 3d$ (Serie 1_01) schon dieselbe Ausziehfestigkeit wie bei den Einzelschraubenversuchen festgestellt wurde. Bei einer Reduktion von a_2 auf $2d$ sinkt die Ausziehfestigkeit um ca. 8 %.

Alle Versuchskörper versagten auf Herausziehen und zum Versagenszeitpunkt spalteten die Probekörper in den Furnierlagen zwischen den Schrauben auf. Im Vergleich zu Prüfkonfiguration 1 mit Buchenvollholz fällt auf, dass die Streuungen der Rohdichte und der Ausziehfestigkeit aufgrund des homogenen Materials geringer ausfallen.

Tabelle 5-4 Vorversuche Ergebnisse Prüfkonfiguration 2

Prüfserie	P 1 [6] ¹⁾	2_02	2_01
Vorbohren ²⁾	V	V	V
a_2	5 d	2 d	3 d
$a_{2,c}$	–	8 d 5 d	7 d 5 d
l_{emb}	–	–	–
n [-]	22 13	10	5
u_{mean} [%]	7,6	7,9	7,8
ρ_{mean} [kg/m ³]	832	812	812
COV [%]	1,7	1,9	1,8
$f_{ax,mean}$ [N/mm ²]	14,0	12,9	13,9
COV [%]	6,2	7,3	4,1
Differenz ³⁾ [%]	–	-7,9	-0,7
$f_{ax,mean,Hübner}$ [16] [N/mm ²]	15,2	14,5	14,5
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	111,9 ⁴⁾	95,3	85,3
COV [%]	7,1	6,4	9,8
Differenz ³⁾ [%]	–	-14,8	-23,8

¹⁾ Ausziehversuche einer Einzelschraube mit P 1 in BauBuche 0° zur Faser aus [6] mit $l_{ef} = 50$ mm

²⁾ V...Vorbohren; OV...ohne Vorbohren

³⁾ Differenz bezogen auf Werte der Einzelschraube P 1 [6]

⁴⁾ K_{ser} aus [6] mit $n = 3$ multipliziert


Abbildung 5-7 Versagensbild: links bei Serie 2_01; rechts bei Serie 2_02

Anmerkung: Für die Ausziehversuche der Prüfkongfiguration 1 mit Buchenvollholz wurde eine Stahlschiene verwendet, mit der man verschiedene Abstände im Rastermaß $1 d$ prüfen kann. Durch die Führung in der Mitte der Stahlschiene ist die Lagerungsfläche der Schraubenköpfe stark limitiert. Bei den Versuchen der Serie 2_01 mit BauBuche war die Steifigkeit der Stahlschiene erster Bauart sowie auch ihr Widerstand zusammen mit den Schraubenköpfen nicht mehr ausreichend, um den hohen Prüfkraften zu widerstehen; die Köpfe der Schrauben wurden dabei in die Schiene gezogen und beide Bauteile hochgradig plastisch verformt, siehe Abbildung 5-8. Daher mussten für die weiteren Versuche mit BauBuche für jede Abstandskonfiguration eine eigene Stahlschiene angefertigt werden (Stahlschienen zweiter Bauart), um den Schraubenköpfen eine größtmögliche Auflagerfläche zu bieten. Die Versuche der Serie 2_01 wurde noch mit der Stahlschiene erster Bauart, mit der Führung in der Mitte, fertig geprüft. Durch das Hineinziehen der Schrauben und dem damit verbundenen Steifigkeitsverlust liegen die K_{ser} Werte tiefer als bei Serie 2_02, welche mit den Schienen zweiter Bauart geprüft wurde.



Abbildung 5-8 Serie 2_01: Schrauben in Stahlschiene gezogen

5-4.3 PRÜFKONFIGURATION 3

In Tabelle 5-5 sind wieder die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Im Vergleich zur Prüfkongfiguration 2 zeigten sich bei gleichen Schraubenabständen von $a_2 = 2 d$ und $a_2 = 3 d$ (Serien 3_01 und 3_02) rund 15 bis 20 % geringere Ausziehfestigkeiten und bezogen auf die Referenzversuche mit Einzelschrauben um über 20 % geringere Werte. Auch bei einem Abstand von $a_2 = 4 d$ der Serie 3_03 ist die Ausziehfestigkeit um 11 % geringer als jene der Referenzversuche. Mit einer Einbindetiefe von $l_{emb} = 2 d$ bei einem Schraubenabstand von $4 d$ lässt sich ein ähnlicher, etwas geringerer Auszieh Widerstand wie bei den Referenzversuchen feststellen. Dasselbe gilt auch für einen Schraubenabstand $a_2 = 5 d$. Die Versuche der Serie 3_08 zeigten, dass ein Randabstand von $a_{2,c} = 3 d$ ausreicht, da nahezu dieselbe Ausziehfestigkeit festgestellt wurde wie bei Serie 3_05.

Bei Zwischenabständen von $a_2 = 2 d$ und $a_2 = 3 d$ bildeten sich zum Versagenszeitpunkt Risse zwischen den Schrauben im rechten Winkel zu den Furnierlagen, ab $a_2 = 4 d$ konnten augenscheinlich keine Risse mehr festgestellt werden. Bei der Serie 3_08 mit reduziertem Querschnitt und Randabstand $a_{2,c} = 3 d$ spaltete einer von zehn Probekörpern auf (siehe Abbildung 5-9). Für die Serien 3_03 bis 3_08 liegt die Abweichung der Ausziehfestigkeit im Vergleich zu Hübner [16] im Bereich von 6 bis 17 %.

Tabelle 5-5 Vorversuche Ergebnisse Prüfkonfiguration 3

Prüfserie	P 1 [6] ¹⁾	3_02	3_01	3_03	3_05	3_08	3_06
Vorbohren ²⁾	V	V	V	V	V	V	V
a_2	$5 d$	$2 d$	$3 d$	$4 d$	$4 d$	$4 d$	$5 d$
$a_{2,c}$	–	$8 d 4,7 d$	$7 d 4,7 d$	$6 d 4,7 d$	$6 d 4,7 d$	$3 d$	$5 d 4,7 d$
l_{emb}	–	–	–	–	$2 d$	$2 d$	–
n [-]	22 13	10	5	6	10	10	5
u_{mean} [%]	7,6	7,9	7,9	7,8	7,8	8,0	7,9
ρ_{mean} [kg/m ³]	832	812	821	823	816	812	817
COV [%]	1,7	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
$f_{ax,mean}$ [N/mm ²]	14,0	10,9	11,0	12,4	13,3	13,2	13,6
COV [%]	6,2	7,2	5,1	6,2	5,8	4,4	3,4
Differenz ³⁾ [%]	–	–22,1	–21,4	–11,4	–5,0	–5,7	–2,9
$f_{ax,mean,Hübner}$ [16][N/mm ²]	15,2	14,4	14,8	14,8	14,6	14,5	14,4
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	111,9 ⁴⁾	91,8	124,5	103,6	138,7	252,6	111,8
COV [%]	7,1	7,2	9,8	10,7	10,7	36,6	5,6
Differenz ³⁾ [%]	–	–18,0	+11,3	–7,4	+23,9	+125,7	–0,1

¹⁾ Ausziehversuche einer Einzelschraube mit P 1 in BauBuche 0° zur Faser aus [6] mit $l_{ef} = 50$ mm

²⁾ V...Vorbohren; OV...ohne Vorbohren

³⁾ Differenz bezogen auf Werte der Einzelschraube P 1 [6]

⁴⁾ K_{ser} aus [6] mit $n = 3$ multipliziert



Abbildung 5-9 Versagensbilder: links: Serie 3_01 mit augenscheinlich kaum sichtbaren Rissen zwischen den Schrauben; Mitte: Serie 3_03 Ausziehen ohne augenscheinlich sichtbare Risse; rechts: Serie 3_08 Aufspalten des Probekörpers

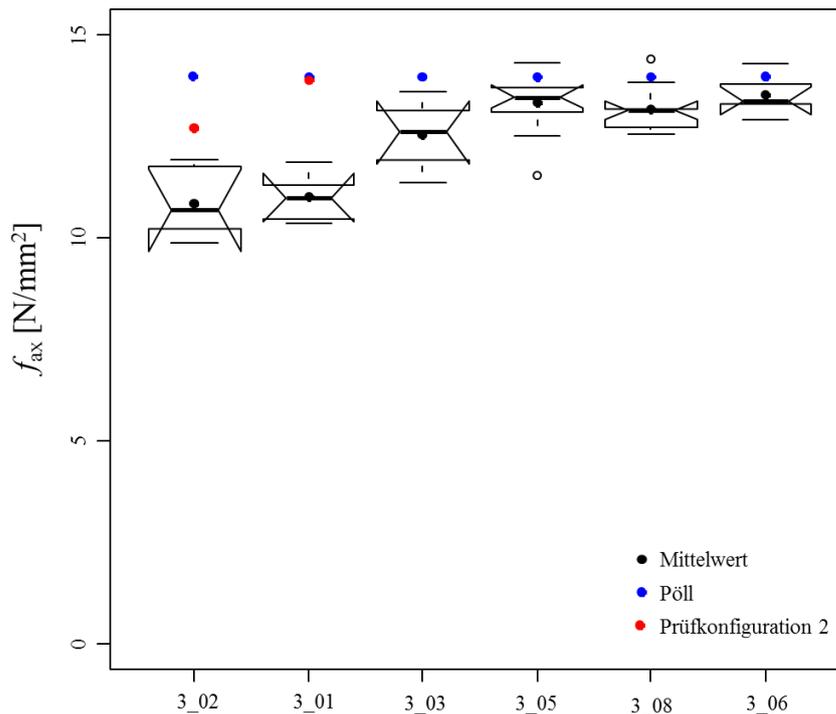


Abbildung 5-10 Boxplot: f_{ax} Prüfkonfiguration 3, sowie Vergleich mit $f_{ax,mean}$ Prüfkonfiguration 2 und $f_{ax,mean}$ [1]

Durch die Einbindtiefe von $l_{emb} = 2d$ lässt sich wieder ein Anstieg von K_{ser} bemerken. Bei der Serie 3_08 liegen die Werte von K_{ser} um über 100 % höher als bei den anderen Serien. Auch die Streuung liegt hier bei fast 40 %. Warum dies so ist, lässt sich gegenwärtig noch nicht erklären. Die Kraft-Weg-Diagramme weisen bei dieser Versuchsreihe eine viel steilere Kurve auf. Die Wegaufnehmer setzten bei dieser Serie tiefer auf, da der Holzquerschnitt im oberen Bereich reduziert wurde und wegen der Distanzhölzer weiter oben kein Platz für die angeschraubten Winkel vorhanden war. Die Dehnung des Holzes im oberen Teil des Probekörpers wurde jedoch bei der Berechnung von K_{ser} berücksichtigt.

5-5 ZUSAMMENFASSUNG DER VORVERSUCHE

Die Versuche zeigten, dass für Verschraubungen 0° zur Faser im Hirnholz für Buchenvollholz mindestens ein Schraubenabstand $a_2 = 2d$ mit einer Einbindtiefe von $2d$ bzw. mindestens ein Abstand von $a_2 = 3d$ ohne Einbindung gewählt werden sollte. Der untersuchte Randabstand von $a_{2,c} = 1,5d$ reicht aufgrund von auftretenden Aufspalterscheinungen zum Rand nicht aus und sollte auf jeden Fall größer gewählt werden. Für Hirnholzverschraubungen bei denen die Schrauben ohne Vorbohren appliziert werden, muss der Schraubenabstand mehr als $5d$ betragen, damit es zu keinem Abfall der Ausziehtragfähigkeit kommt. In Hinblick auf einen wirtschaftlichen Hirnholzanschluss wird dieser Abstand als zu groß bewertet.

Bei einer Hirnholzverschraubung 0° zur Faser in BauBuche muss bei der Schraubenanordnung die Orientierung zu den Furnierlagen beachtet werden. Bei Schrauben, die in Richtung der Furnierlagen versetzt sind, reicht ein Schraubenabstand von $a_2 = 3d$ aus (Prüfkonfiguration 2), während bei Schrauben die normal zu den Furnierlagen versetzt sind (Prüfkonfiguration 3), a_2 mindestens $4d$ mit Einbindtiefe $2d$ oder mindestens $5d$ ohne Einbindtiefe betragen sollte. Ein Randabstand von $a_{2,c} = 3d$ wird als ausreichend angesehen. Tabelle 5-6 fasst abschließend die benötigten Mindestabstände die sich aus den Vorversuchen ergeben zusammen.

Tabelle 5-6 Zusammenfassung Vorversuche: Mindestabstände

Material	a_2	$a_{2,c}$	l_{emb}
Buche	$2 d$	$>1,5 d$	$2 d$
	$3 d$	$>1,5 d$	–
BB in Furnierrichtung	$3 d$	$3 d$	–
BB quer zur Furnierrichtung	$4 d$	$3 d$	$2 d$
	$5 d$	$3 d$	–

Es konnte durch den Vergleich der ermittelten Werte für K_{ser} bei Prüfkonfiguration 1 und 3 festgestellt werden, dass durch eine Einbindetiefe von $2 d$ die Verbindung im Vergleich zu Verbindungen ohne Einbindetiefe steifer wird. Aufgrund der Ergebnisse von Prüfkonfiguration 1 lässt sich annehmen, dass die Verbindung steifer wird, wenn die Schrauben ohne Vorbohren appliziert werden.

KAPITEL 6: GRUPPENVERSUCHE

6-1 PRÜFKONZEPT

Auf Grundlage von Prüfungen von axial beanspruchten Schraubengruppen sollte nun geklärt werden, ob sich die in Abschnitt 3-1.2.2 diskutierte, parabelförmige Schraubenabstufung der FE-Simulation positiv auf die Spaltneigung bzw. die Ausziehtragfähigkeit des Holzes auswirkt. Eine Schraubengruppe bestand dabei aus 19 Schrauben, wurde 0° zur Faser eingeschraubt und als Schraubenabstände wurden dabei die aus den Vorversuchen erhaltenen Abstände gewählt. Es wurde eine Prüfkongfiguration in Buche und zwei Prüfkongfigurationen in BauBuche untersucht. Für die zweite Prüfkongfiguration der BauBuche wurde zudem der Einfluss quer eingeklebter Furnierlagen zwischen den Schrauben als mögliche Querbewehrung und zur möglichen Erhöhung der Ausziehtragfähigkeit analysiert. Motiviert war diese Prüfkongfiguration durch Enders-Comberg, der in [24] ebenfalls Querlagen zur Aufnahme eines Teils der Spaltkräfte bei Gewindestangen 0° zur Faser in BauBuche untersuchte.

6-2 MATERIAL

Als Ausgangsmaterial wurden wieder die von der Firma Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellten Träger aus Buchen-Vollholz und BauBuche verwendet. Aufgrund der großen benötigten Querschnittsfläche mussten die Träger vor dem Zuschneiden zuerst blockverklebt werden, da die Buchenträger nur eine Höhe von 70 mm bzw. die BauBuchenträger nur eine Höhe von 80 mm aufwiesen, vgl. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2. Die fertig geklebten und zugeschnittenen Probekörper wurden danach für einige Wochen in der Klimakammer gelagert. Als Schraube wurde wieder der Prototyp P 1 verwendet.

6-3 METHODE

Die Gruppenversuche wurden mit der Zugprüfmaschine lignum_z_850 durchgeführt, welche eine maximale Zugkraft von 850 kN aufbringen kann. Pro Schraubengruppe wurden 19 Schrauben verwendet, welche spiegelgleich auf beiden Seiten der Probekörper appliziert wurden. Für die drei Prüfkongfigurationen wurden die in Abbildung 6-1 dargestellten Querschnitte gewählt. Es wurde ein möglichst kompaktes Schraubenbild verwendet, bei dem die Schraubenreihen versetzt sind und die Schraubenabstände a_2 schräg eingehalten werden. Um einen gleichen Randabstand für die gesamte Schraubengruppe zu erhalten, wurde ein sechseckiger Querschnitt festgelegt, bei dem alle äußeren Schrauben einen Randabstand von $a_{2,c} = 3 d$ aufwiesen. Als Schraubenabstand wurde für die Prüfkongfiguration 1 in Buche und Prüfkongfiguration 3 in BauBuche $a_2 = 3 d$ gewählt. Für Prüfkongfiguration 2 wurde aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche in Furnierichtung ebenfalls $a_{2,f} = 3 d$ gewählt und für den Schraubenabstand quer zur Furnierichtung $a_{2,q} = 4 d$. Die Schrauben wurden dabei in der in Abbildung 6-2 dargestellten, vorgegebenen Reihenfolge eingedreht, um dem Holz etwas Zeit zu geben, die durch das Applizieren entstehenden Spaltkräfte abzubauen. Anschließend

wurden sie in derselben Reihenfolge mit einem Drehmomentschlüssel mit 40 Nm angezogen. Die Länge der Probekörper betrug bei allen drei Prüfkongfigurationen 750 mm. Für die Prüfkongfiguration 3 wurden Querlagen zwischen den Schraubenreihen eingeklebt, um zu untersuchen, ob sich dadurch die Ausziehfestigkeit erhöht und so ein Schraubenabstand quer zu den Furnierlagen von $a_{2,q} = 3 d$ ausreicht. Dazu wurden aus den BauBuche-Trägern 12 mm bzw. 18 mm starke Streifen geschnitten und dazwischen 3 mm dünne Buchenfurnierlagen orthogonal eingeklebt.

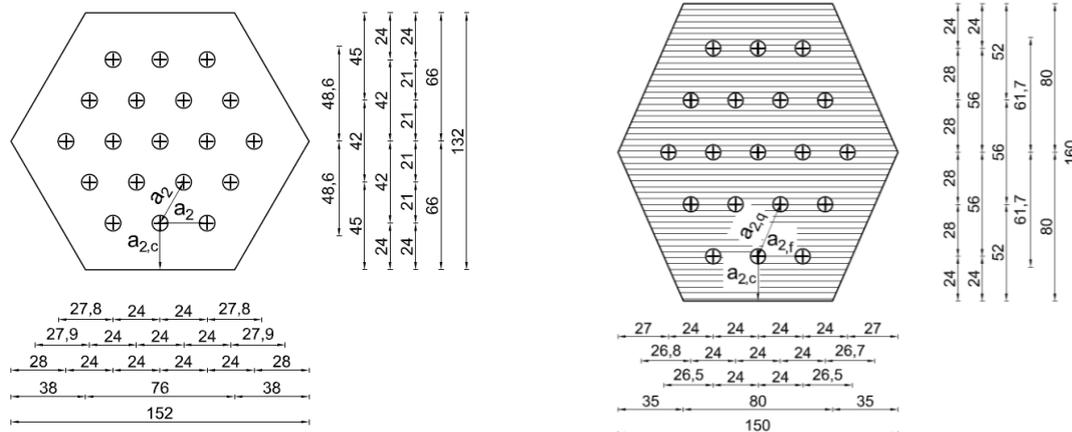


Abbildung 6-1 links: Querschnitt Prüfkongfiguration 1 und 3, rechts: Querschnitt Prüfkongfiguration 2; Maße in [mm]

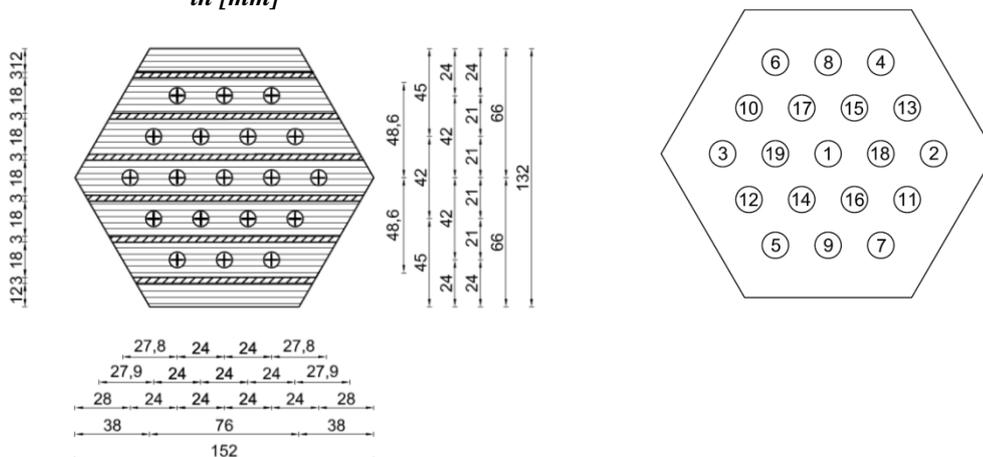


Abbildung 6-2 links: Anordnung der Querlagen für Prüfkongfiguration 3, Maße in [mm]; rechts: Eindreihfolge

Der Versuchsaufbau wurde dabei ähnlich wie bei den in Obermayr [12] durchgeführten Zugversuchen an Hirnholzverschraubungen in Birkenbrettschichtholz gewählt. Die Probekörper wurden an beiden Seiten mit den Schrauben mit Hilfe von Distanzhaltern an Stahlplatten fixiert. Diese Stahlplatten wurden beidseitig mit vier Gewindestangen an Zuglaschen angeschlossen und doppelt gelenkig (\rightarrow Gelenkkette) mit der Prüfmaschine verbunden, damit es zu keinen Zwängungen während des Prüfvorgangs kommen und somit ein bestmöglicher axialer Lasteintrag stattfinden kann. Ein eingebauter Zugstab mit zwei Gabelköpfen auf beiden Seiten diente hier als horizontales und vertikales Gelenk. Für die Bestimmung von K_{ser} wurden vier induktive Wegaufnehmer an den Probekörpern angebracht und bei ca. 50 % der zuvor abgeschätzten Bruchlast entfernt, um sie so vor Beschädigung zu schützen. In ANHANG C sind sämtliche Pläne der benötigten Stahlteile, sowie detaillierte Pläne zum Versuchsaufbau angeführt.

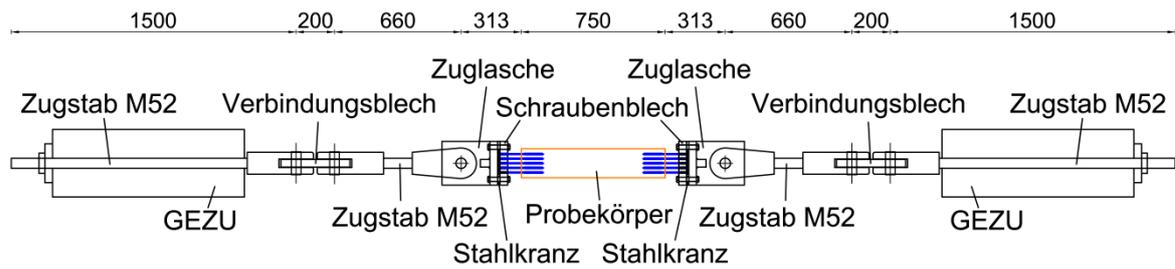


Abbildung 6-3 Versuchsaufbau: Prüfkette

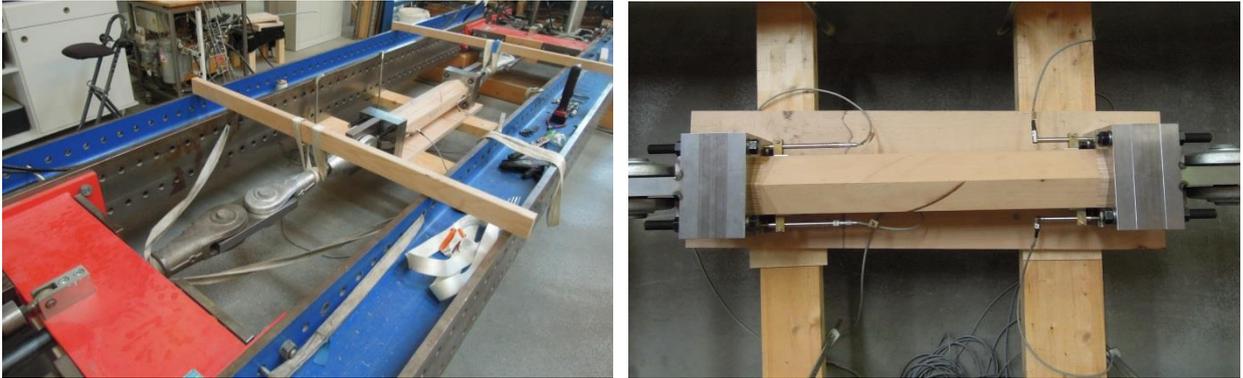


Abbildung 6-4 Versuchsaufbau: links gesamte Prüfkette; rechts: eingebauter Probekörper der Serie BU_01_02 mit angebrachten Wegaufnehmern

Für die Prüfkonzfigurationen 1 und 2 wurden jeweils sechs Probekörper geprüft, bei denen alle Schrauben gleich weit im Holz eingebracht wurden und weitere sechs Probekörper mit einer parabelförmigen Abstufung der Einbindetiefe. Um diese Abstufung zu ermöglichen, wurden verschiedene lange Formrohre mit Senkungen für die Schrauben hergestellt. Da durch die Formrohre ein Abstand zwischen den beiden Stahlplatten entstand, kam ein Stahlkranz zum Einsatz, der diesen Abstand überbrückte und eine möglichst steife Verbindung gewährleistete. Die zuvor angedachte Variante, Hüllrohre für die vier Gewindestangen zu verwenden, die als Abstandhalter zwischen den Stahl-Kopplungsplatten fungieren, wurde in Hinblick auf die dafür notwendigen Blechstärken zur Einhaltung einer Durchbiegungstoleranz von 1 mm verworfen. Dies fußt auf einer Berechnung mit RFEM und der Beobachtung, dass die vier Hüllrohre alleinig wie ein gelenkiger Anschluss wirken würden. Im Gegensatz dazu lässt sich mit dem steifen Stahlkranz, welcher einen großflächigen Kontakt zwischen den Kopplungsplatten sicherstellt, weitgehend eine Einspannwirkung erzielen. Um nicht mehrere Schraubenbleche zu benötigen, wurden auch für die gleichmäßige Gewindeabstufung kurze Formrohre mit Senkungen in Kombination mit einem in der Stärke entsprechend reduzierten Stahlkranz verwendet. In Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 sind die beiden Abstufungen der Schrauben dargestellt.

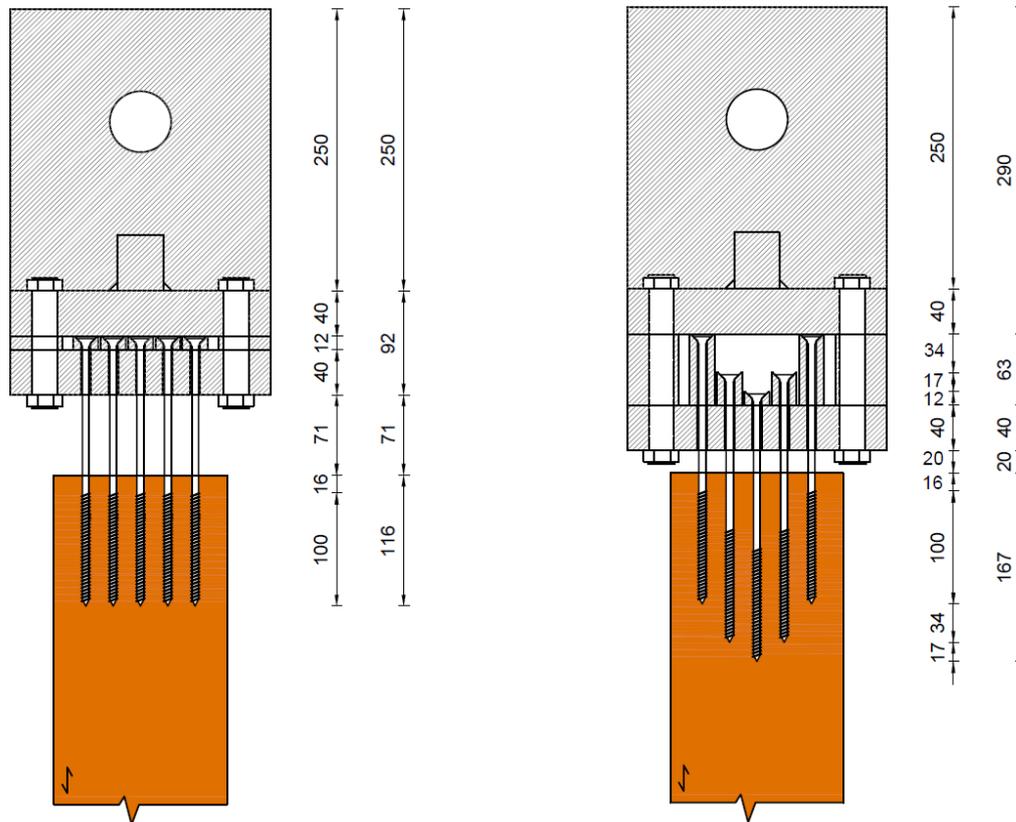


Abbildung 6-5 Versuchsaufbau: links: konstante Einbindetiefe; rechts: parabelförmige Abstufung der Einbindetiefe



Abbildung 6-6 Stahlkranz und Distanzhülsen: links: Serie BU_01_01 (konstante Einbindetiefe); rechts: Serie BU_01_02 (parabelförmige Abstufung der Einbindetiefe)

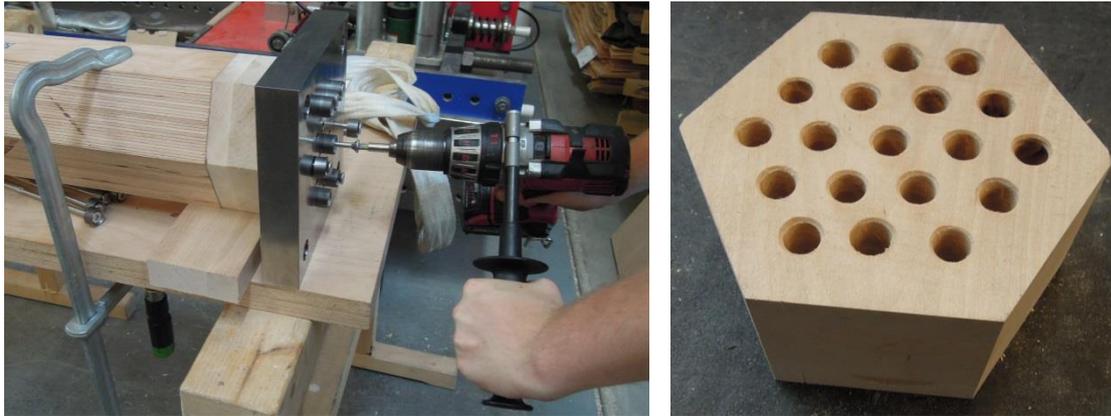


Abbildung 6-7 links: Eindrehen der Schrauben in vorgegebener Reihenfolge (Serie BB_02_01); rechts: Distanzhalter für Serien mit konstanter Einbindetiefe

Tabelle 6-1 Gruppenversuche Übersicht

Prüfserie	Material	a_2	$a_{2,c}$	l_{emb}	Länge [mm]	n [-]	Anordnung
1_01	BU	$3 d$	$3 d$	$2 d$	750	6	gleichmäßig
1_02	BU	$3 d$	$3 d$	$2 d$	750	6	abgestuft
2_01	BB	$3 d 4 d$	$3 d$	$2 d$	750	6	gleichmäßig
2_02	BB	$3 d 4 d$	$3 d$	$2 d$	750	6	abgestuft
3_01	BB _q ¹⁾	$3 d$	$3 d$	$2 d$	750	6	abgestuft

¹⁾BauBuche mit eingeklebten Querlagen zwischen den Schrauben

6-3.1 VORBEMESSUNG

Für die Vorbemessung der Versuchsquerschnitte wurden für die Stahlzugfestigkeit und den Auszieh Widerstand der Schraubengruppe $n = n_{ef}$ angenommen. Sämtliche Randbedingungen (Querschnitt, Einschraublänge, Gewindelänge, Stahlgüte, etc.) wurden so ausgelegt, dass das Ausziehen der Schrauben den maßgebenden Versagensmechanismus darstellt.

6-3.1.1 Stahlzugtragfähigkeit f_{tens}

Pöll ermittelte in [6] die maximale Zugtragfähigkeit f_{tens} einer Einzelschraube für den Prototyp P 1 mit 36 kN. Daraus lässt sich mit Gl. (6.1) die maximal aufnehmbare Kraft der ganzen Schraubengruppe ermitteln.

$$f_{tens,mean,n} = f_{tens,mean,1} \cdot n \quad (6.1)$$

$f_{tens,mean,n} \dots$ maximal aufnehmbare Kraft der Schraubengruppe bis zum Schraubenbruch [kN]

$f_{tens,mean,1} \dots$ maximale Zugtragfähigkeit einer Schraube [kN]

$n \dots$ Anzahl der Schrauben [-]

6-3.1.2 Auszieh Widerstand R_{ax}

Da sich gezeigt hat, dass die von Hübner in [16] aufgestellte Formel den Auszieh Widerstand des Prototypen 1 bei faserparalleler Verschraubung in Hartlaubholz überschätzt, wurde R_{ax} für die Vorbemessung über f_{ax} einer Einzelschraube aus [6] berechnet.

$$R_{ax,mean} = f_{ax,mean} \cdot n \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \pi \quad (6.2)$$

$R_{ax,mean}$...	Ausziehtragfähigkeit [kN]
$f_{ax,mean}$...	mittlere Ausziehfestigkeit [N/mm ²]
d ...	Durchmesser einer Schraube [mm]
l_{ef} ...	effektive Gewindelänge [mm]
n ...	Anzahl der Schrauben [-]

6-3.1.3 Nettoquerschnittstragfähigkeit F_{netto}

Die Berechnung der Nettoquerschnittstragfähigkeit erfolgte nach Gl. (6.3). Für die Buche wurde $f_{t,0,mean}$ mit 50 N/mm² und für die BauBuche mit 72,8 N/mm² (Umrechnung von Bemessungswert aus [28] auf Mittelwert nach G. (6.4) mit COV = 0,1) angenommen. Bei der Berechnung der Nettotragfähigkeit der Prüfkfiguration 3 mussten zusätzlich zu den Schrauben die Querlagen von der Querschnittsfläche abgezogen werden, da diese in Zugrichtung kaum Kräfte abtragen können. Es ergibt sich:

$$F_{netto} = A_{netto} \cdot f_{t,0,mean} \quad (6.3)$$

F_{netto} ...	Nettoquerschnittstragfähigkeit [N]
A_{netto} ...	Nettoquerschnitt [mm ²]
$f_{t,0,mean}$...	Mittelwert der Zugfestigkeit [N/mm ²]

$$f_{t,0,mean} = \frac{f_{05}}{(1 - 1,645 \cdot COV)} \quad (6.4)$$

$f_{t,0,mean}$...	Mittelwert der Zugfestigkeit [N/mm ²]
f_{05} ...	Bemessungswert [N/mm ²]
COV ...	Variationskoeffizient [-]

6-3.1.4 Ergebnisse der Vorbemessung

In Tabelle 6-2 sind die Ergebnisse der Vorbemessung und der Wirkungsgrad η bezogen auf den Brutto- und Nettoquerschnitt dargestellt. Für die Prüfkfiguration 3 mit den eingeklebten Querlagen wurde der Wirkungsgrad bezogen auf den Bruttoquerschnitt auf zwei verschiedene Varianten berechnet. Bei der ersten Variante wurden die Querlagen für die Berechnung der Querschnittsfläche abgezogen, da diese in Zugrichtung keine Kraft abtragen können, bei der zweiten Variante wurde die gesamte Querschnittsfläche angesetzt, so als würden keine Querlagen vorhanden sein. Diese Unterscheidung ist daher wichtig, da die Querlagen nur für die Verbindung eingeklebt wurden und sich sonst durch die Schwächung des Bruttoquerschnitts rechnerisch ein zu hoher Wirkungsgrad ergeben würde.

Tabelle 6-2 Vorbemessung der Gruppenversuche

Prüfserie	d [mm]	l_{ef} [mm]	l_{emb} [mm]	n [-]	F_s [kN]	R_{ax} [kN]	F_{netto} [kN]	F_{brutto} [kN]	η_{brutto} ¹⁾ [-]	η_{netto} ²⁾ [-]
1_01	8	91,2	16	19	684	492	697	745	0,66	0,71
1_02	8	91,2	16 50 67	19	684	492	697	745	0,66	0,71
2_01	8	91,2	16	19	684	610	1085	1145	0,53	0,56
2_02	8	91,2	16 50 67	19	684	610	1085	1145	0,53	0,56
3_01	8	91,2	16 50 67	19	684	610	737 ³⁾	796 ³⁾ 927 ⁴⁾	0,77 ³⁾ 0,66 ⁴⁾	0,83

¹⁾ Wirkungsgrad bezogen auf den Bruttoquerschnitt

²⁾ Wirkungsgrad bezogen auf den Nettoquerschnitt

³⁾ Abzug der Querlagen für die Tragfähigkeit des Querschnitts

⁴⁾ Bruttotragfähigkeit ohne eingeklebter Querlagen

6-4 RESULTATE DER HAUPTVERSUCHE

Die Bestimmung der Rohdichte, Holzfeuchte und dem Verschiebungsmodul erfolgte gleich wie in den Vorversuchen (siehe Abschnitte 5-3.1, 5-3.2, 5-3.3). Im Anhang ist jeder Prüfkörper mit den erhobenen Werten und dem zugehörigen Bruchbild dargestellt. Der K_{ser} wurde für beide Verbindungsseiten (Ost und West) bestimmt und ist hier als Mittelwert dargestellt. Da bei den Versuchen immer nur eine Verbindung (Ost oder West) versagte, handelt es sich um rechtszensierte Daten, da davon auszugehen ist, dass die zweite Verbindungsseite noch mehr Belastung standgehalten hätte. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden die Daten wahrscheinlichkeitstheoretisch aufbereitet. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Es handelt sich um eine serielle Kette;
- es wird eine Lognormalverteilung der Prüfdaten angenommen;
- Äquikorrelation = 0,7 laut [30].

In diesem Kapitel sind die statistisch aufbereiteten Werte für den $R_{ax,mean}$ in Tabelle 6-3, Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 dargestellt. Im Anhang findet sich zusätzlich zu diesen (im Anhang mit $R_{ax,mean,seriell}$ bezeichnet), die auf den direkten Prüfwerten basierenden Werte $R_{ax,mean}$. Die Mediane $R_{ax,50}$ sind in diesem Kapitel sowie im Anhang auf Basis der reinen Prüfwerte ermittelt da hier das Hauptaugenmerk auf einen relativen Vergleich der Mediane einzelner Prüfserien liegt und ein entsprechender Einfluss auf die Relativbetrachtungen aufgrund der Zensierung als vernachlässigbar eingestuft wird.

6-4.1 PRÜFKONFIGURATION 1

In Tabelle 6-3 sind die Ergebnisse der Prüfkfiguration 1 zusammenfassend dargestellt, σ_{ax} gibt dabei die Mantelspannung einer Schraube zum Bruchzeitpunkt an. Durch die parabelförmige Abstufung (1_02) lässt sich im Mittel eine Steigerung der axialen Traglast um etwa 8 % gegenüber der Serie 1_01 mit konstanter Einbindetiefe feststellen. Der Wert der Vorbemessung wird dennoch nicht ganz erreicht. Mit der parabelförmigen Abstufung wird im Mittel ein Wert von $n_{ef} / n = 0,94$ und ein Wirkungsgrad von $\eta_{brutto} = 0,62$ bzw. $\eta_{netto} = 0,66$ erzielt.

Tabelle 6-3 Ergebnisse Prüfkfiguration 1

	Prüfserie 1_01	Prüfserie 1_02
a_2	3 d	3 d
$a_{2,c}$	3 d	3 d
l_{emb}	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d
n [-]	6	6
u_{mean} [%]	9,5	9,3
ρ_{mean} [kg/m ³]	700	699
COV [%]	4,4	3,9
$R_{ax,mean}^{1)}$ [kN]	425,7	461,2
$R_{ax,50}^{2)}$ [kN]	404,9	545,4
$\sigma_{ax,l,mean}^{1)}$ [N/mm ²]	9,8	10,6
COV ¹⁾ [%]	9,3	8,2
Differenz [%]	–	+8,5
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	552	1.452
COV [%]	3,2	15,4
Differenz [%]	–	+263,0
$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,57	0,62
$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,61	0,66
$n_{ef,mean} / n$ [-]	0,87	0,94

¹⁾ unzensiert, mittels MLE für rechts-zensierte Daten

²⁾ rechts-zensiert

Bei den Versuchen spalteten alle Probekörper bis auf einen der Serie 1_01 mindestens einmal auf. Die Spaltrisse waren fast alle in radialer Richtung orientiert und bei einigen Probekörpern öffnete sich die Klebefuge zwischen den beiden verklebten Stäben in der Mitte des Prüfkörpers. Im ANHANG B sind sämtliche Bruchbilder der einzelnen Serien dargestellt. Bei den Probekörpern der Serie 1_02 bildeten sich bei drei von sechs Probekörpern die Spaltrisse zwischen den äußeren Schrauben aus, die gleich tief im Holz eingebunden waren, während sich zwischen den Schrauben, welche verschieden weit eingebunden waren, keine Risse bildeten; siehe Abbildung 6-8. Bei zwei der zwölf Probekörper sind Schrauben während des Prüfvorgangs gebrochen.

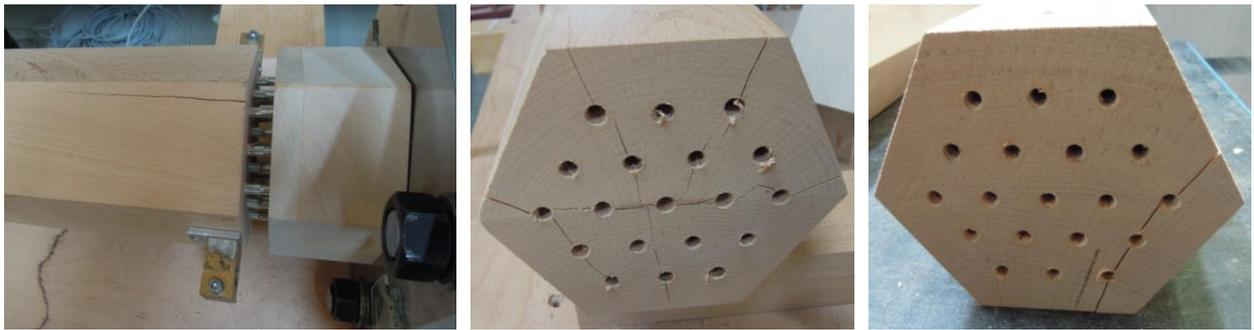


Abbildung 6-8 Versagensbilder: links: Prüfkörper nach Versagen (BU_01_01_04); Mitte: Versagen bei konstanter Einbindetiefe (BU_01_01_06); rechts: Versagen bei parabelförmiger Abstufung der Einbindetiefe (BU_01_02_02)

Die Verbindung wird durch die parabelförmige Abstufung um einiges steifer. Im Vergleich zu einer konstanten Einbindetiefe liegt der K_{ser} bei parabelförmiger Abstufung fast um den Faktor drei höher. Die Werte für K_{ser} der Serie 1_01 streuten in einem sehr kleinen Bereich (COV = 3,2 %), während die Werte für K_{ser} der Serie 1_02 im Vergleich eine deutlich größere Streuung aufweisen (COV = 15,4 %).

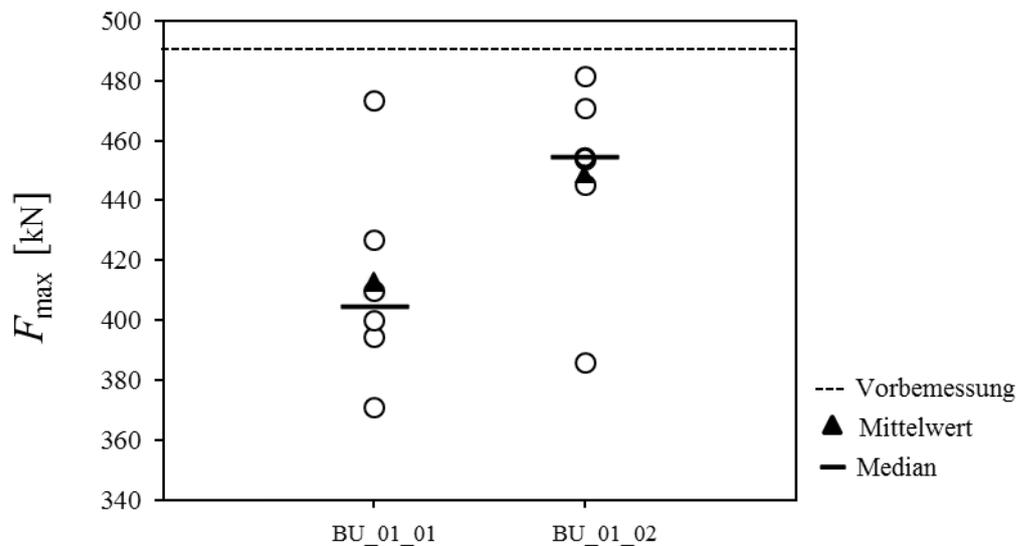


Abbildung 6-9 Gemessene maximale Kräfte der Prüfkonfiguration 1

In Abbildung 6-9 ist für jeden Probekörper der erreichte Wert F_{max} als Punkt dargestellt. Dabei handelt es sich um die zensierten gemessenen Werte (selbiges gilt für Abbildung 6-11 und Abbildung 6-13). Zwischen den Minimal- und Maximalwerten beider Serien zeigt sich eine Bandbreite von rund 100 kN. Bei Serie 1_01 ist ein extremes Prüfergebnis im oberen Datenbereich auffällig, wohingegen bei der Serie 1_02 ein extrem tiefes Prüfergebnis beobachtet werden kann. Aufgrund der geringen Prüfumfänge je Serie und da kein augenscheinlicher Grund gefunden wurde, welche diese beiden Prüfergebnisse als nicht repräsentativ für die beiden Serien erscheinen lassen würde, wurde beschlossen beide Prüfwerte in den Betrachtungen miteinzubeziehen. Da der arithmetische Mittelwert, als bester Schätzer für den Erwartungswert, allerdings sehr sensibel auf Extremwerte, im Besonderen bei geringen Prüfumfängen, reagiert, wird zur Beurteilung der Wirksamkeit einer parabelförmigen gegenüber der gleichmäßigen Einbindung der Hirnholzverschraubung auch ein Vergleich zwischen den Medianen beider Serien vorgenommen. Hierbei zeigt sich, dass die Differenz zwischen den beiden Prüferien deutlich größer und zu rund 12 % ausfällt.

6-4.2 PRÜFKONFIGURATION 2

In Tabelle 6-4 sind die Ergebnisse der Prüfkongfiguration zusammenfassend dargestellt. Auch bei der Prüfkongfiguration 2 lässt sich eine Steigerung des axialen Traglastwiderstandes um etwa 4 % bei Verwendung einer parabelförmigen Abstufung feststellen. Der Vergleich der Mediane liefert bei dieser Prüfkongfiguration dieselben Ergebnisse. Jedoch liegen beide Serien um ca. 20 % unter den erwarteten Ergebnissen der Vorbemessung. Mit der parabelförmigen Abstufung wird im Mittel ein Wert von $n_{ef,mean} / n = 0,80$ und ein Wirkungsgrad von $\eta_{brutto} = 0,43$ bzw. $\eta_{netto} = 0,45$ erzielt.

Tabelle 6-4 Ergebnisse Prüfkongfiguration 2

Prüfserie	2_01	2_02
a_2	3 d 4 d	3 d 4 d
$a_{2,c}$	3 d	3 d
l_{emb}	2 d	2 d 6,25 d 8,4 d
n [-]	6	6
u_{mean} [%]	6,9	7,0
ρ_{mean} [kg/m ³]	832	822
COV [%]	1,6	0,9
$R_{ax,mean}^{1)}$ [kN]	469,1	488,4
$R_{ax,50}^{2)}$ [kN]	454,5	476,2
$\sigma_{ax,l,mean}^{1)}$ [N/mm ²]	10,8	11,2
COV ¹⁾ [%]	4,9	4,8
Differenz [%]	–	+4,1
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	566	1.102
COV [%]	2,6	18,7
Differenz [%]	–	+194,7
$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,41	0,43
$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,43	0,45
$n_{ef,mean} / n$ [-]	0,77	0,80

¹⁾ unzensiert, mittels MLE für rechts-zensierte Daten

²⁾ rechts-zensiert

Auch bei Prüfkongfiguration 2 in BauBuche zeigt sich, dass die Verbindung durch Einsatz einer parabelförmigen Abstufung steifer wird. Der mittlere Wert für K_{ser} (COV = 18,7 %) der Serie 2_02 liegt um den Faktor zwei höher als jener der Serie 2_01 (COV = 2,6 %).

Sämtliche Probekörper spalteten mindestens einmal auf. Bei der Serie 2_01 waren die Risse hauptsächlich in Furnierrichtung (kleinerer Abstand als quer zur Furnierrichtung), bei der Serie 2_02 bildeten sich die Risse tendenziell zwischen jenen Schrauben, welche gleich tief im Holz eingebunden waren (auch quer zu den Furnierlagen), siehe Abbildung 6-10. Die hohe Spaltneigung lässt darauf schließen, dass die in den Vorversuchen ermittelten Mindestabstände nicht ausreichend waren. Bei vier Probekörpern ist jeweils eine Schraube während des Prüfvorgangs gebrochen, bei zwei Probekörpern sind mehrere Schrauben gebrochen, siehe Anhang B, Tabelle 7-8 und Tabelle 7-10.



Abbildung 6-10 Versagensbilder: links: Prüfkörper nach Versagen (BB_02_01_05); Mitte: Versagen bei konstanter Einbindetiefe (BB_02_01_05); rechts: Versagen bei parabelförmige Abstufung der Einbindetiefe (BB_02_02_05) (roter Kreis signalisiert Schraubenbruch)

In Abbildung 6-11 sind die einzelnen Werte von F_{\max} für die Prüfkfiguration 2 als Punkte dargestellt. Die Werte der Serie 2_01 und 2_02 weisen hier eine Bandbreite von etwa 50 kN auf.

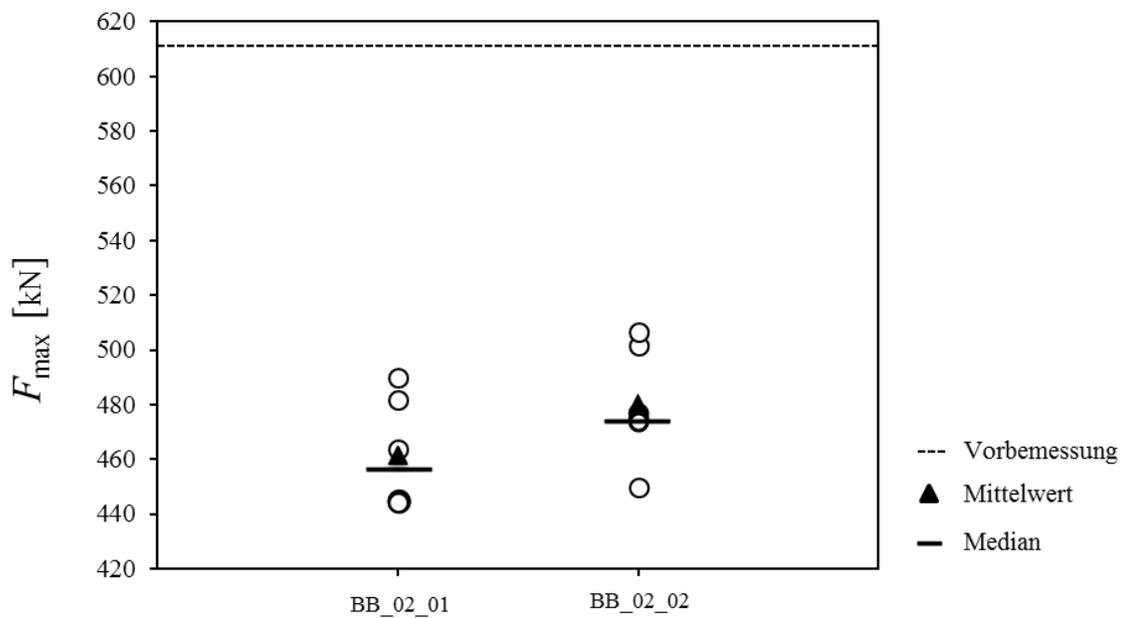


Abbildung 6-11 Gemessene maximale Kräfte der Prüfkfiguration 2

6-4.3 PRÜFKONFIGURATION 3

Aufgrund der beobachteten Leistungssteigerung durch die parabelförmige Abstufung bei Prüfkonfiguration 1 und 2 wurde die Prüfkonfiguration 3 ausschließlich mit abgestufter Schraubenbestückung geprüft. Im Vergleich zur Prüfkonfiguration 2 wurden zwischen den Schraubenreihen Querlagen eingeklebt und die Schraubenabstände quer zur Furnierrichtung $a_{2,q}$ auf $3 d$ reduziert. Tabelle 6-5 fasst die Ergebnisse der Prüfkonfiguration 3 zusammen.

Tabelle 6-5 Ergebnisse Prüfkonfiguration 3

Prüfserie	3_01
a_2	$3 d$
$a_{2,c}$	$3 d$
l_{emb}	$2 d \mid 6,25 d \mid 8,4 d$
n [-]	6
u_{mean} [%]	8,7
ρ_{mean} [kg/m ³]	837
COV [%]	1,1
$R_{ax,mean}$ ¹⁾ [kN]	437,7
$R_{ax,50}$ ²⁾ [kN]	430,8
$f_{ax,1,mean}$ ¹⁾ [N/mm ²]	10,1
COV ¹⁾ [%]	3,1
$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	914
COV [%]	27,3
$\eta_{brutto,mean}$ [-]	$0,55$ ³⁾ \mid $0,47$ ⁴⁾
$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,59
$n_{ef,mean} / n$ [-]	0,72

¹⁾ unzensiert, mittels MLE für rechts-zensierte Daten

²⁾ rechts-zensiert

³⁾ Abzug der Querlagen für die Tragfähigkeit des Querschnitts

⁴⁾ Bruttotragfähigkeit ohne eingeklebter Querlagen

Die axiale Traglast der Prüfkonfiguration 3 liegt im Mittel um 28 % unter der berechneten Ausziehfestigkeit der Vorbemessung. Als Ursache für die geringe axiale Traglast, welche noch tiefer ausfällt als bei Prüfkonfiguration 2, wird ein zu geringer Schraubenabstand quer zur Furnierrichtung $a_{2,q} = 3 d$ vermutet. Es wird ein Wert von $n_{ef,mean} / n = 0,72$ und ein Wirkungsgrad von $\eta_{brutto} = 0,55/0,47$ bzw. $\eta_{netto} = 0,59$ erreicht. Die Unterscheidung des Wirkungsgrades η_{brutto} bezogen auf den Bruttoquerschnitt, wird vorgenommen, da es durch die eingeklebten Querlagen zu einer Schwächung des Bruttoquerschnittes kommt, die Querlagen aber nur angeordnet werden, um die Verbindung zu stärken. Würde man hier keine Unterscheidung zwischen Querschnittstragfähigkeit mit eingeklebten Querlagen und ohne eingeklebten Querlagen treffen, würde rechnerisch ein zu großer Wirkungsgrad vorgetäuscht werden.



Abbildung 6-12 Versagensbilder: links: Prüfkörper nach Versagen (BBq_03_01_01); rechts: Versagen bei parabelförmiger Abstufung der Einbindetiefe (BBq_03_01_05) – Risse zwischen den eingeklebten Querlagen

Auch bei Prüfkonfiguration 3 konnte bei sämtlichen Probekörpern ein Aufspalten beobachtet werden. Die eingeklebten Querlagen verhinderten zwar das Aufspalten quer zur Furnierrichtung, jedoch spalteten die Probekörper zwischen den eingeklebten Querlagen in Furnierrichtung auf, siehe Abbildung 6-12. Bei zwei Probekörpern wurden zudem Schraubenbrüche festgestellt.

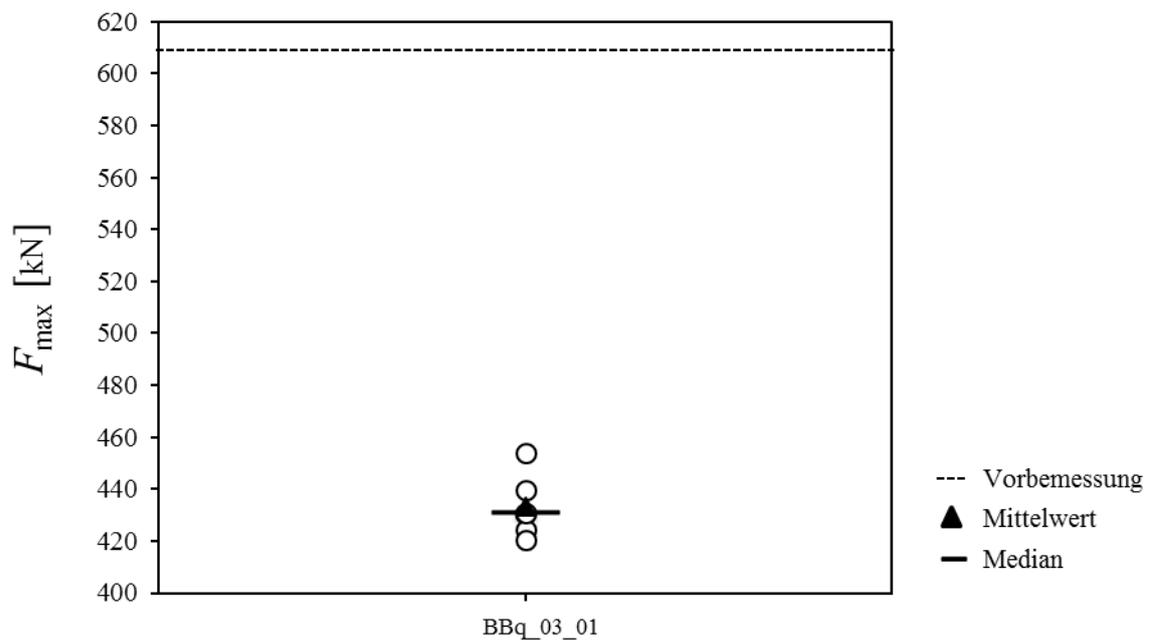


Abbildung 6-13 Gemessene maximale Kräfte der Prüfkonfiguration 3

Im Vergleich zur Serie 2_02, bei der die Schrauben ebenfalls parabelförmig in BauBuche eingebracht wurden, liegt K_{ser} um 18 % niedriger

KAPITEL 7: ZUSAMMENFASSUNG UND CONCLUSSIO

7-1 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorgestellte FE-Studie und die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Versuche werden hier zusammenfassend noch einmal dargestellt und diskutiert.

Bei der FE-Studie wurde zunächst eine Einzelschraube modelliert und das Modell auf Plausibilität überprüft. Danach wurde das Modell auf eine Schraubengruppe bestehend aus sechs Teilgewindeschrauben erweitert, bei dem zunächst als Referenzmodell alle Schrauben gleichmäßig im Querschnitt verteilt wurden. Für die Schraubengruppe wurden ferner verschiedene Abstufungen der Gewinde im Holz modelliert und deren Auswirkung auf die Querzugspannungen betrachtet. Mit dem Programm RFEM von der Firma Dlubal lassen sich die Querzugsspannungen der einzelnen Systeme nur qualitativ miteinander vergleichen. Für quantitative Querzugsspannungswerte müsste das Holzmodell wie in [26] mit nicht-linearen Federn erweitert werden, die das Materialverhalten von Holz in Querrichtung simulieren, was mit RFEM in dieser Form nur schwer zu realisieren ist.

Die FE-Studie hat gezeigt, dass mit einer um die ganze Gewindelänge versetzten Abstufung der Schraubengewinde keine Verbesserung des Querzugspannungszustands erreicht werden kann. Da die Spaltkräfte im oberen Drittel der Schraubengewinde am größten sind, war die Idee dahinter, durch eine komplette Gewindeabstufung jedem Schraubengewinde genug Fläche zu geben, damit es wie eine Einzelschraube wirken kann. Aufgrund der weit auseinander liegenden Kraftangriffspunkte der einzelnen Schrauben, kommt es jedoch zu Exzentrizitätsmomenten, die in weiterer Folge die Querzugsspannungen zwischen den Schrauben erhöhen.

Eine parabelförmige Abstufung der Schraubengewinde im Sinne eines Druckbogens ergibt laut FE-Studie deutlich geringere Querzugspannungen zwischen den inneren Schrauben. Durch die unterschiedlichen Kraftangriffspunkte wachsen die Querzugsspannungen im äußeren Querschnittsbereich im Vergleich zum Referenzmodell leicht an, bleiben jedoch betragsmäßig unter den maximalen Querzugsspannungen des Referenzmodells, welche dort in der Mitte auftreten. In Abbildung 7-1 sind die zwei Systeme noch einmal gegenübergestellt. Es lässt sich im Sinne einer Verminderung ein in Summe verbesserter Querzugspannungszustand im Querschnitt bei einer parabelförmigen Verteilung feststellen.

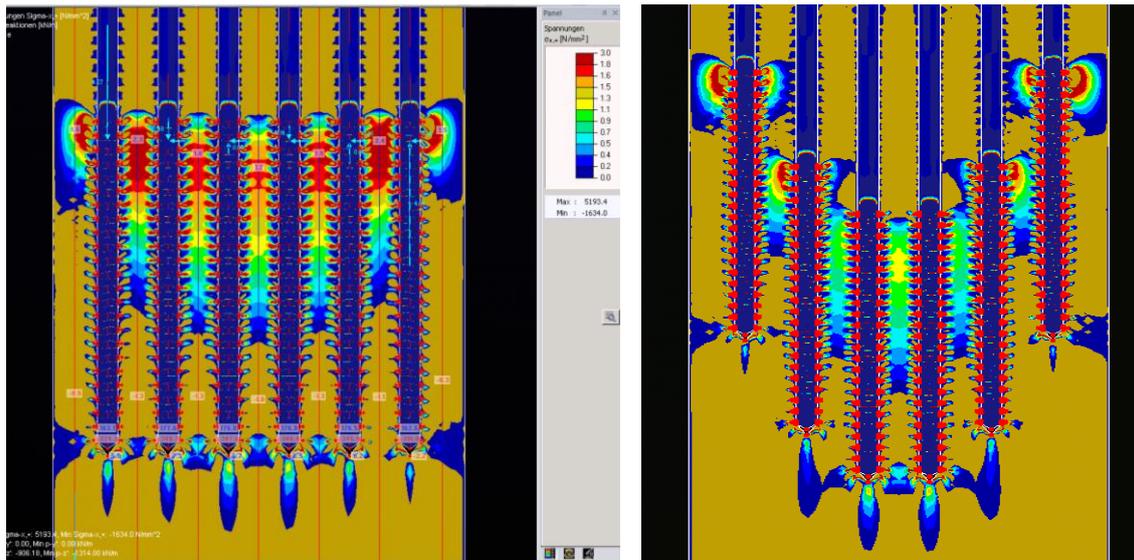


Abbildung 7-1 Vergleich: links: ohne Abstufung, rechts: mit parabelförmiger Abstufung (gleiche Spannungsskala)

Um die parabelförmige Gewindeabstufung in den Hauptversuchen prüfen zu können, wurden Einschraubversuche und Vorversuche mit dem Prototyp P 1 durchgeführt, um Rand- und Schraubenabstände zu finden, bei denen es zu keinem Aufspalten und keinem Abfall der Ausziehtragfähigkeit im Vergleich zu einer Einzelschraube kommt.

Zur Orientierung wurden zunächst Einschraubversuche durchgeführt, deren Ziel es war, jene Holzquerschnittsfläche zu finden, die eine einzelne Schraube benötigt, damit es während des Eindrehens der Schraube zu keinem Aufspalten kommt. Es wurde angenommen, wenn man einer Schraube in einer Schraubengruppe die so ermittelte Querschnittsfläche zuteilt, dann kann so bei der gesamten Gruppe ein Aufspalten vermieden und zudem die volle Tragfähigkeit auf Herausziehen bei jeder Schraube in der Gruppe generiert werden. Diese Annahme wurde getroffen, da laut [6] die Spaltkräfte während des Eindrehens einer Schraube in etwa dreimal so groß sind, als bei einer auf Ausziehen beanspruchten Schraube. Die Einschraubversuche wurden in Buche und BauBuche mit und ohne Vorbohren durchgeführt. Die Ergebnisse der Einschraubversuche sind in Tabelle 7-1 zusammenfassend dargestellt.

Abschließend wurden noch Schraubengruppen bestehend aus neun Schrauben in BauBuche mit Vorbohren eingeschraubt. Dabei stellte sich heraus, dass es bei einem Rand- und Schraubenabstand von $2 d$ keine Aufspalterscheinungen ersichtlich waren, obwohl so jeder Schraube weniger Querschnittsfläche zugeordnet werden kann als die zuvor mit Einzelschrauben ermittelten Querschnittsfläche von $4 d \times 4 d$. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die zeitversetzte und in vorgegebener Reihenfolge stattfindende Einbringung der Schrauben sein. Somit hatte das Holz nach jeder applizierten Schraube etwas Zeit, die durch das Eindrehen erzeugten Spaltkräfte abzubauen.

Tabelle 7-1 Einschraubversuche: Benötigter Querschnitt

Holz	Ohne Vorbohren	Mit Vorbohren
Buche	$5 d \times 5 d$	$2,5 d \times 2,5 d$
BauBuche	$7,5 d \times 7,5 d$	$4 d \times 4 d$

Die erhaltenen Abstände der Einschraubversuche wurden als Basis für die Vorversuche herangezogen, bei denen Ausziehprüfungen an Schraubengruppen bestehend aus drei Schrauben in Buchenvollholz und BauBuche durchgeführt wurden. Als Referenz für die Ausziehfestigkeit dienten dabei die von Pöll in [6] durchgeführten Ausziehversuche mit Einzelschrauben (Prototyp P 1). Ziel der Vorversuche war es, jene Mindestabstände zu definieren, bei denen es zu keinem Abfall der Ausziehfestigkeit im Vergleich zu den Referenzversuchen kommt. Geplant waren hier auch Versuche ohne Vorbohren. Da jedoch selbst bei einem Schraubenabstand von $a_2 = 5 d$ ein Abfall der Ausziehfestigkeit um 20% festgestellt wurde, beschränkte man sich auf Versuche mit Vorbohren. In Tabelle 7-2 sind die erhaltenen Mindestabstände der Vorversuche zusammengefasst und den Mindestabständen aus den Einschraubversuchen gegenübergestellt. Für die BauBuche ist es wichtig, eine Unterscheidung zu treffen, ob die Schrauben in Furnierrichtung oder quer dazu versetzt sind. Quer zur Furnierrichtung müssen größere Abstände eingehalten werden, um dieselbe Ausziehfestigkeit zu erreichen, als in Furnierrichtung. Der mittels der Einschraubversuche für Buche bestimmte Randabstand reichte bei den Vorversuchen nicht aus, da bei einem Randabstand von $a_{2,c} = 1,5 d$ sämtliche geprüften Probekörper aufspalteten, wohingegen bei den Einschraubversuchen $1,25 d$ ausreichten. Die Schraubenabstände der Einschraubversuche von Einzelschrauben stimmen relativ gut mit den ermittelten Abständen der Vorversuche überein. Bei den Vorversuchen wurde für die BauBuche zudem ein Randabstand von $a_{2,c} = 3 d$ als ausreichend ermittelt. Der Vergleich der Versuche zeigt, dass es zwar möglich ist, eine Schraubengruppe 0° zur Faser in BauBuche ohne Aufspalten mit dem Schraubenabstand $a_2 = 2 d$ einzudrehen, jedoch kommt es bei diesem Abstand (vor allem quer zur Furnierrichtung) zu einem signifikanten Abfall der Ausziehfestigkeit. Hier stellt sich die Frage, ob die Spaltkräfte, die beim Applizieren der Schraube entstehen, so wie in [6] mit Messschraubenversuchen festgestellt, wirklich größer sind als jene Spaltkräfte, die beim Herausziehen der Schrauben entstehen. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Prüfungen in [6] als „push-pull“ Konfiguration und jene der Vorversuche im Rahmen dieser Arbeit als „pull-pull“ Konfiguration durchgeführt wurden. Es lässt sich vermuten, dass die Reibungskraft, welche den Spaltkräften im Falle der „Push-pull“ Konfiguration entgegenwirkt, zu einer Unterschätzung der Spaltkraft, wie sie bei einer „freien Oberfläche“ in der „pull-pull“ Konfiguration gegeben ist, führt.

Tabelle 7-2 Zusammenfassung Vorversuche und Einschraubversuche: Mindestabstände

Material	Ausziehversuche „pull-pull“			Einschraubversuche			
	Vorversuche			Einzelschraube ¹⁾		Schraubengruppe ²⁾	
	a_2	$a_{2,c}$	l_{emb}	a_2	$a_{2,c}$	a_2	$a_{2,c}$
Buche	$2 d$	$>1,5 d$	$2 d$	$2,5 d$	$1,25 d$	–	–
	$3 d$	$>1,5 d$	–	$2,5 d$	$1,25 d$	–	–
BB in Furnierrichtung	$3 d$	$3 d$	–	$4 d$	$2 d$	$2 d$	$2 d$
BB quer zur Furnierrichtung	$4 d$	$3 d$	$2 d$	$4 d$	$2 d$	$2 d$	$2 d$
	$5 d$	$3 d$	–	$4 d$	$2 d$	$2 d$	$2 d$

¹⁾ abgeleitete Rand- und Schraubenabstände aus der benötigten Querschnittsfläche der Einzelschrauben im Rahmen der Einschraubversuche

²⁾ Rand- und Schraubenabstände aus den Einschraubversuchen von Schraubengruppen

Die Ausziehversuche an den Schraubengruppen mit je 19 Schrauben je Anschlussseite haben gezeigt, dass mit Hilfe einer parabelförmigen Abstufung im Mittel eine Leistungssteigerung der Verbindung um 8 % bei Buchenvollholz und um 4 % bei BauBuche im Vergleich zu Gruppen mit konstanter Einbindetiefe möglich ist. Diese Steigerung geht mit einer deutlich höheren Steifigkeit der Verbindung einher. So liegt der K_{ser} bei einer parabelförmigen Abstufung im Vergleich zu einer gleichmäßigen

Schraubenanordnung um den Faktor zwei bis drei höher. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass es sehr rasch zu einer Kraftumlagerung von den äußeren Schrauben, die bei der parabelförmigen Abstufung mehr Belastung erfahren, zu den weiter innenliegenden Schrauben kommt. Betrachtet man hierzu vergleichend die Kraft-Weg-Diagramme der Probekörper BU_01_01_01 (konstante Einbindetiefe) und BU_01_02_01 (parabelförmige Abstufung) in Abbildung 7-2, lässt sich ein nahezu linearer Verlauf bei konstanter Einbindetiefe und ein deutlich steilerer aber bereits sehr früher nicht-linearer Verlauf bei parabelförmiger Abstufung feststellen, der auf eine Kraftumlagerung schließen lässt. Der Verlauf ist nur bis zu 250 kN erfasst, da bei diesem Lastniveau die Wegaufnehmer bei den Versuchen entfernt wurden, um sie vor einer Beschädigung zu schützen.

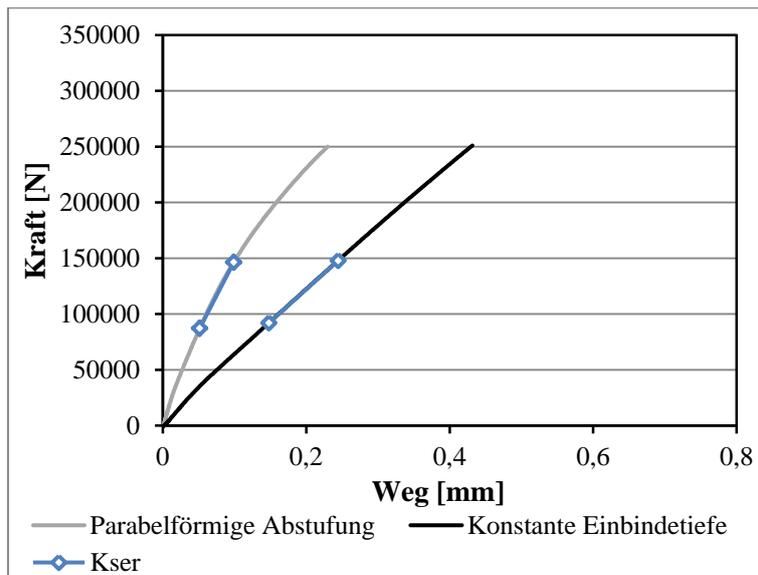


Abbildung 7-2 Kraft-Weg-Diagramm: Vergleich BU_01_01_01 und BU_01_02_01

Bei den Gruppenversuchen konnte für die Buche ein gutes Ergebnis erzielt werden. Mit $n_{ef,mean} / n = 0,94$ und einem Wirkungsgrad von $\eta_{mean} = 0,62$ bezogen auf die Bruttoquerschnittstragfähigkeit bei einer parabelförmigen Schraubenabstufung, kann die Hirnholzverschraubung für Buchenvollholz als eine zufriedenstellende Verbindungslösung angesehen werden. Zum Vergleich: In [13] wurde bei Ausziehversuchen von Schraubengruppen in Birkenschichtholz im Mittel ein Wert von $n_{ef,mean} / n = 0,92$ und ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,54$ bezogen auf die Bruttoquerschnittstragfähigkeit ermittelt. Dabei wurden 13 Probekörper geprüft und der maßgebende Versagensmechanismus war dabei Schraubenbruch.

Bei einem Viertel der in dieser Arbeit untersuchten Probekörper kam es zu einem unerwünschten Aufspalten. Da der Wirkungsgrad bei Hirnholzverschraubungen in Hartlaubhölzern generell niedrig liegt, ist zu erwähnen, dass dieselbe Verbindung im gleichen Querschnitt in Nadelholz bei gleichen geometrischen Bedingungen aufgrund geringerer Zugfestigkeit des Nadelholzes einen weitaus höheren Wirkungsgrad aufweisen würde. (Vgl. [13])

Bei der BauBuche konnte ein frühzeitiges Aufspalten bei den Gruppenausziehversuchen nicht verhindert werden. Der erreichte Wirkungsgrad von $\eta_{mean} = 0,43$ bezogen auf die Bruttoquerschnittstragfähigkeit und $n_{ef,mean} / n = 0,8$ bei einer parabelförmigen Schraubenabstufung werden als zu niedrig eingestuft, um die erwünschte Verbindungslösung darzustellen.

Auch die eingeklebten Querlagen der Prüfkonfiguration 3 konnten ein Spalten nur bedingt verhindern. So wurde zwar ein Spalten quer zu den Furnierlagen unterbunden, jedoch spalteten alle Probekörper in

Furnierrichtung zwischen den Schrauben auf. Ein Wert von $n_{ef} / n = 0,72$ der Prüfkonfiguration 3 wird als sehr unwirtschaftlich bewertet. In Tabelle 7-3 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7-3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Hauptversuche

Material	Buche		BauBuche		BauBuche _q
	gleichmäßig	parabelförmig	gleichmäßig	parabelförmig	parabelförmig
$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,57	0,62	0,41	0,43	0,55 ¹⁾ 0,47 ²⁾
$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,61	0,66	0,43	0,45	0,59
$n_{ef,mean} / n$ [-]	0,87	0,94	0,77	0,80	0,72

¹⁾ Abzug der Querlagen für die Tragfähigkeit des Querschnitts

²⁾ Bruttotragfähigkeit ohne eingeklebter Querlagen

7-2 CONCLUSIO UND AUSBLICK

Die durchgeführten Ausziehversuche haben gezeigt, dass Hirnholzverschraubungen in Buchenvollholz und BauBuche nur mit vorherigem Vorbohren zur Generierung einer entsprechenden Leistungsfähigkeit realisierbar sind. Mit den Schraubenabständen, die ohne Vorbohren notwendig wären (größer als $5d$), lässt sich kein wirtschaftlich sinnvoller Anschluss ausbilden.

Für Buchenvollholz stellen Hirnholzanschlüsse, die mit Hilfe von Verschraubungen 0° zur Faser konstruiert werden, durchaus eine sinnvolle Verbindungslösung dar. Um den Versagensmechanismus Aufspalten ausschließen zu können, müssten jedoch die Rand- und Schraubenabstände und auch eventuell die Einbindetiefe l_{emb} größer als in den Hauptversuchen gewählt werden. Hier wären weitere Versuchsreihen notwendig, um diese Parameter noch zu optimieren. Durch größere Schraubenabstände würde der Wirkungsgrad η bezogen auf die Bruttoquerschnittstragfähigkeit jedoch unter 0,6 sinken. Zudem ist auch darauf hinzuweisen, dass es sich bei den bisherigen Untersuchungen um statische Kurzzeitbeanspruchungen handelt. Das Langzeitverhalten von Schrauben und Schraubengruppen appliziert in Hirnholz bedarf einer entsprechenden Abklärung.

Die BauBuche weist bei Schrauben, die 0° zur Faser eingebracht werden, eine sehr große Spaltneigung auf. Der Wirkungsgrad bezogen auf die Bruttoquerschnittstragfähigkeit bei Hirnholzverschraubungen lag bei den Gruppenversuchen unter 0,5. Um ein frühzeitiges Aufspalten zu verhindern, müssten die Schraubenabstände größer gewählt werden, was mit einem noch geringeren Wirkungsgrad einhergehen würde. Sollten Hirnholzverschraubungen für BauBuche dennoch zur Anwendung kommen, könnte angedacht werden, ähnlich wie von Gehri in [18] für eingeklebte Anker gezeigt, einen Reduktionsfaktor k_{red} in Abhängigkeit des gewählten Schraubenabstandes für die Bemessung zu verwenden, siehe Gl. (2.8). Hier müssten Gruppenversuche durchgeführt werden, um den Abfall der Schraubenabstände entsprechend quantifizieren zu können.

Die parabelförmige Schraubenabstufung hat sowohl bei der Buche als auch bei der BauBuche im Mittel eine Leistungssteigerung der Ausziehtragfähigkeit bewirkt. Durch die ungleichmäßige Einbringung der Schrauben steigt auch der Verschiebungsmodul deutlich an (Faktor zwei bis drei). Somit verliert eine schon sehr steife Verbindung noch zusätzlich Verformungspotential. Hier ist die Frage die sich stellt, ob die geringe Leistungssteigerung (4 - 8%), bei einem doch deutlich höheren Fertigungsaufwand und einem kleineren Bruchverformungsvermögen baupraktisch relevant ist. Da es bei den Hauptversuchen bei einigen Prüfkörpern bei parabelförmiger Abstufung zu Spaltrissen zwischen den äußeren Schrauben, die

gleich tief eingebunden waren, gekommen ist, wäre ein möglicher Optimierungsansatz, die äußeren Schrauben untereinander auch noch abzustufen, sodass alle benachbarten Schrauben unterschiedliche Einbindetiefen aufweisen.

ANHANG A VERZEICHNISSE

A-1 Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 338: 2016, „Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen“.
- [2] ÖNORM EN 14080: 2013, „Holzbauwerke-Brettschichtholz und Balkenschichtholz-Anforderungen“.
- [3] ETA-14/0354:2015, „Brettschichtholz aus Laubholz-Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke“.
- [4] „Pollmeier,“ [Online]. Available: <https://www.pollmeier.com/de/>. [Zugriff am Oktober 2016].
- [5] ÖNORM EN 1995-1-1:2009, „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten“.
- [6] M. Pöll, „Entwicklung einer Hartlaubholzschraube: Optimierung der Gewindegeometrie für die Beanspruchung auf Herausziehen,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2017, Masterarbeit.
- [7] E. Gehri, „Grundlagen der Verbindungstechnik,“ ETH Zürich, SAH Kurs, 1993.
- [8] G. Schickhofer, „Holzbau Nachweisführungen für Konstruktionen in Holz,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2009, Vorlesungsskript.
- [9] ETA-11/0190, Europäische Technische Zulassung, 2016.
- [10] E. Gehri, „Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen,“ 16. Internationales Holzbau-Forum 10, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland, 2010.
- [11] G. Flatscher, „Evaluation and approximation of timber connection properties for displacement-based analysis of CLT wall systems,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2017, Dissertation.
- [12] I. Obermayr, „Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2014, Masterarbeit.
- [13] M. Grabner und A. Ringhofer, „Untersuchungen zum Tragverhalten von leistungsfähigen Hirnholzanschlüssen in Laubholz,“ 20. Internationales Holzbau-Forum 2014, TU Graz, 2014,

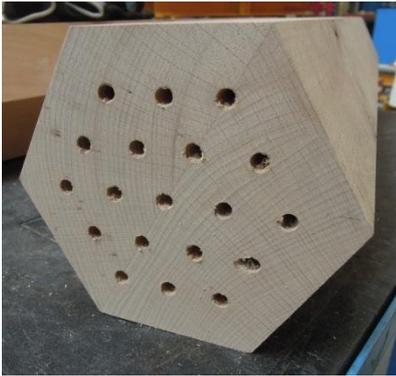
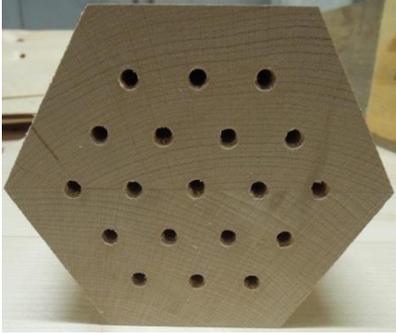
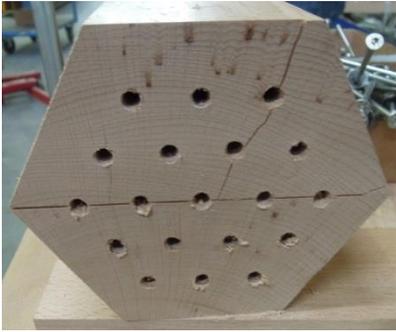
Forschungsbericht.

- [14] M. Grabner und A. Ringhofer, „Untersuchungen zum Tragverhalten von leistungsfähigen Hirnholzanschlüssen in Laubholz,“ 20. Internationales Holzbau-Forum 2014, TU Graz, 2014, Präsentation.
- [15] H. Blaß, I. Bejtka und T. Uibel, „Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde,“ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2006; Forschungsbericht.
- [16] U. Hübner, „Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2013, Dissertation.
- [17] G. Schickhofer und G. Pirnbacher, *Zeitabhängige Entwicklung der Traglast und des Kriechverhaltens von axial beanspruchten, selbstbohrenden Holzschrauben*, holz.bau forschung gmbh, Graz, 2012, Forschungsbericht.
- [18] E. Gehri, „Eingeklebte Anker – Anforderungen und Umsetzungen,“ 15. Internationales Holzbau-Forum 09, Garmisch-Partenkirchen, Deutschland, 2009.
- [19] Y. Plüss, „Prüftechnische Ermittlung des Tragvermögens von Schraubengruppen in der BSP-Schmalfläche,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2014, Masterarbeit.
- [20] W. Gaternig, „Untersuchung der Randabstände bei selbstbohrenden Holzschrauben,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2010, Masterprojekt.
- [21] E. Gehri, „Leistungsfähige Anschlüsse parallel zur Faser Anforderungen und technische Lösungen,“ 6. Grazer Holzbau-Fachtagung, 2007.
- [22] A. Ringhofer und G. Schickhofer, „Investigations Concerning the Force Distribution along Axially Loaded Self-tapping Screws,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2014, Forschungsbericht.
- [23] O. Volkerson, „Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen,“ Hamburg, 1953.
- [24] M. Enders-Comberg, „Spaltverhalten und Verstärkungsmaßnahmen von Anschlüssen mit axial beanspruchten Gewindestangen,“ 20. Internationales Holzbau-Forum, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014, Forschungsbericht.
- [25] M. Enders-Comberg, „Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus,“ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015, Dissertation.
- [26] T. Uibel, „Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben,“ Karlsruher

- Institut für Technologie (KIT), 2012, Dissertation.
- [27] U. Mahlknecht, „Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen im Vollholz und Brettsperholz,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2011, Masterarbeit.
- [28] H. J. Blaß und J. Streib, *Baubuche-Bemessungshandbuch*, Creuzburg, 2016, Bemessungshandbuch.
- [29] ÖNORM EN 13183-1:2004, „Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren“.
- [30] R. Brandner, K. Bratulic und A. Ringhofer, „Serial correlation of withdrawal properties from axially-loaded self-tapping screws,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2015, Conference Paper.
- [31] „Besista,“ [Online]. Available: www.besista.com. [Zugriff am Mai 2017].
- [32] G. Schickhofer, „Formelsammlung für Holzbau,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2015, Formelsammlung.
- [33] H. Unterweger, „Stahlbau GI,“ Stahlbauinstitut, TU Graz, 2012, Vorlesungsskript.
- [34] P. Jablonkay, „Schrauben auf Ausziehen,“ ETH Zürich, 1999, Diplomarbeit.
- [35] S. Plieschounig, „Ausziehverhalten axial beanspruchter Schraubengruppen,“ Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2010, Masterarbeit.
- [36] H. Krenn, „Selbstbohrende Holzschrauben in hoch beanspruchten Bereichen,“ holz.bau forschungsgmbh, TU Graz, 2009, Abschlussbericht.

ANHANG B HAUPTVERSUCHE

Tabelle 7-4 Serie 01_01

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BU_01_01_01	Kraft [kN]	395	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,1	
	Rohdichte [kg/m ³]	703	
	Holzfeuchte [%]	9,7	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	582 / 538	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Keine Aufspalterscheinungen	
BU_01_01_02	Kraft [kN]	410	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,4	
	Rohdichte [kg/m ³]	695	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	558 / 527	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP zum Rand (leicht)	
BU_01_01_03	Kraft [kN]	473	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	749	
	Holzfeuchte [%]	9,8	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	571 / 534	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP radial und Öffnung der Klebefuge	

¹⁾ Werte Ost / West

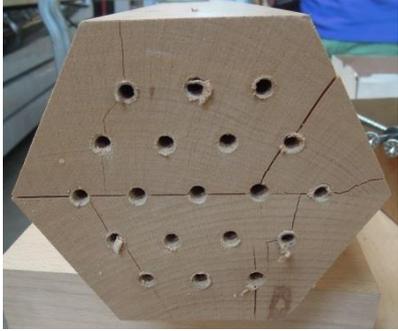
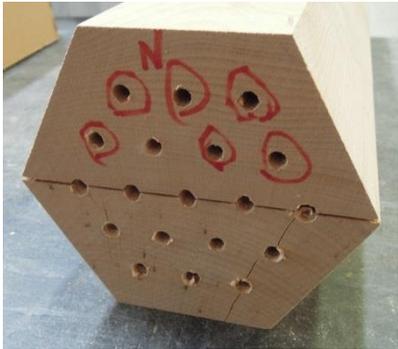
Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BU_01_01_04	Kraft [kN]	371	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	8,5	
	Rohdichte [kg/m ³]	654	
	Holzfeuchte [%]	9,4	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	554 /532	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP radial	
BU_01_01_05	Kraft [kN]	427	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,8	
	Rohdichte [kg/m ³]	723	
	Holzfeuchte [%]	9,2	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	574 /548	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP radial und Klebefuge	
BU_01_01_06	Kraft [kN]	400	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	675	
	Holzfeuchte [%]	9,4	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	553 /560	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP radial	

¹⁾ Werte Ost / West

Tabelle 7-5 Zusammenfassung Serie 01_01

Zusammenfassung			
$R_{ax,mean,Prüfungen}$ [kN]	412,7	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	554,2
$R_{ax,mean,seriell}$ [kN]	425,7	COV [%]	3,2
$f_{ax,1,mean}$ [N/mm ²]	9,5	$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,57
$R_{ax,50}$ [kN]	405,0	$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,61
COV [%]	8,5	$n_{ef,mean}$ [-]	0,87

Tabelle 7-6 Serie 01_02

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BU_01_02_01	Kraft [kN]	454	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,4	
	Rohdichte [kg/m ³]	668	
	Holzfeuchte [%]	9,4	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.258 / 1.405	
	Anmerkungen	Versagen Ost, Klebefuge offen, AFSP radial	
BU_01_02_02	Kraft [kN]	445	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	715	
	Holzfeuchte [%]	9,2	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.033 / 1.489	
	Anmerkungen	Versagen Ost, radiales AFSP (bei gleich tiefen Schrauben)	
BU_01_02_03	Kraft [kN]	471	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,8	
	Rohdichte [kg/m ³]	748	
	Holzfeuchte [%]	9,3	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.147 / 1.486	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP radial, Klebefuge offen, 6 Schrauben gebrochen	

¹⁾ Werte Ost / West

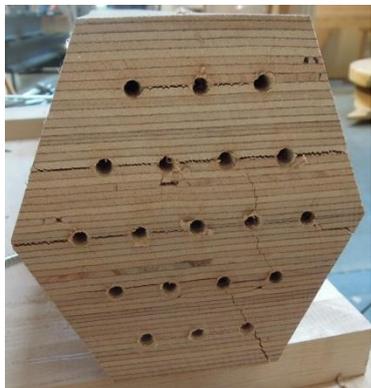
Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BU_01_02_04	Kraft [kN]	455	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,4	
	Rohdichte [kg/m ³]	674	
	Holzfeuchte [%]	9,6	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.720/ 1.722	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP radial und tangential	
BU_01_02_05	Kraft [kN]	386	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	8,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	686	
	Holzfeuchte [%]	9,5	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.591 / 1.570	
	Anmerkungen	Versagen Ost, radiales AFSP, Klebefuge offen	
BU_01_02_06	Kraft [kN]	482	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	706	
	Holzfeuchte [%]	8,9	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.505 / 1.495	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP radial, Klebefuge offen, 3 Schrauben gebrochen	

¹⁾ Werte Ost / West

Tabelle 7-7 Zusammenfassung Serie 01_02

Zusammenfassung			
$R_{ax,mean,Prüfungen}$ [kN]	448,8	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	1.452
$R_{ax,mean,stat.seriell}$ [kN]	461,2	COV [%]	15,4
$f_{ax,1,mean}$ [N/mm ²]	10,3	$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,62
$R_{ax,50}$ [kN]	454,4	$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,66
COV [%]	7,5	$n_{ef,mean}$ [-]	0,94

Tabelle 7-8 Serie 02_01

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BB_02_01_01	Kraft [kN]	445	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	822	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	575 / 580	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung und quer	
BB_02_01_02	Kraft [kN]	444	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	816	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	579 / 590	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung	
BB_02_01_03	Kraft [kN]	464	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,6	
	Rohdichte [kg/m ³]	839	
	Holzfeuchte [%]	6,8	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	558 / 571	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in Furnierrichtung und quer	

¹⁾Werte Ost / West

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BB_02_01_04	Kraft [kN]	490	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,3	
	Rohdichte [kg/m ³]	845	
	Holzfeuchte [%]	6,9	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	543 / 555	
Anmerkungen	Versagen West, 9 Schrauben gerissen, Prüfkörper 6 mm tiefer, AFSP in Furnierrichtung		
BB_02_01_05	Kraft [kN]	445	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,2	
	Rohdichte [kg/m ³]	821	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	555 / 577	
Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung		
BB_02_01_06	Kraft [kN]	482	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,1	
	Rohdichte [kg/m ³]	847	
	Holzfeuchte [%]	6,9	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	561 / 552	
Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung und quer (leicht)		

¹⁾Werte Ost / West

Tabelle 7-9 Zusammenfassung Serie 02_01

Zusammenfassung			
$R_{ax,mean,Prüfungen}$ [kN]	461,6	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	566
$R_{ax,mean,seriell}$ [kN]	469,1	COV [%]	2,6
$f_{ax,1,mean}$ [N/mm ²]	10,6	$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,41
$R_{ax,50}$ [kN]	455	$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,43
COV [%]	4,4	$n_{ef,mean}$ [-]	0,77

Tabelle 7-10 Serie 02_02

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BB_02_02_01	Kraft [kN]	502	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,5	
	Rohdichte [kg/m ³]	824	
	Holzfeuchte [%]	6,9	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	838 / 1.044	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung und quer (leicht)	
BB_02_02_02	Kraft [kN]	507	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,6	
	Rohdichte [kg/m ³]	830	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.439 / 1.329	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung (oben und unten) und quer (leicht)	
BB_02_02_03	Kraft [kN]	477	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	11,0	
	Rohdichte [kg/m ³]	818	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.233 / 935	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in Furnierrichtung & quer, („rundherum“), 1 Schraubenbruch	

¹⁾Werte Ost / West

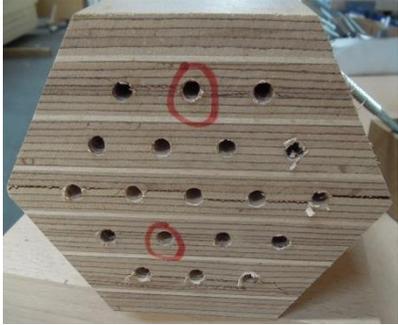
Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BB_02_02_04	Kraft [kN]	475	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	809	
	Holzfeuchte [%]	6,9	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	950 / 1.025	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierrichtung und quer, 1 Schraubenbruch	
BB_02_02_05	Kraft [kN]	474	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	825	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	868 / 956	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in und quer zur Furnierrichtung, 1 Schraubenbruch	
BB_02_02_06	Kraft [kN]	450	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,3	
	Rohdichte [kg/m ³]	825	
	Holzfeuchte [%]	7,0	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	1.290 / 1.312	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in und quer zur Furnierrichtung	

¹⁾Werte Ost / West

Tabelle 7-11 Zusammenfassung Serie 02_02

Zusammenfassung			
$R_{ax,mean,Prüfungen}$ [kN]	480,7	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	1.102
$R_{ax,mean,seriell}$ [kN]	488,4	COV [%]	18,7
$f_{ax,1,mean}$ [N/mm ²]	11,0	$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,43
$R_{ax,50}$ [kN]	476,2	$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,45
COV [%]	4,3	$n_{ef,mean}$ [-]	0,80

Tabelle 7-12 Prüfkonfiguration 03_01

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BB _q _03_01_01	Kraft [kN]	430,7	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	835	
	Holzfeuchte [%]	8,7	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	768 / 879	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierichtung zw. Querlagen, 2 Schraubenbrüche	
BB _q _03_01_02	Kraft [kN]	424	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,8	
	Rohdichte [kg/m ³]	825	
	Holzfeuchte [%]	8,7	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	773 / 930	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierichtung zw. Querlagen (oben/unten)	
BB _q _03_01_03	Kraft [kN]	420	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,7	
	Rohdichte [kg/m ³]	840	
	Holzfeuchte [%]	8,6	
	$K_{ser}^{1)}$ [kN/mm]	968 / 1.316	
	Anmerkungen	Versagen Ost, AFSP in Furnierichtung zw. Querlagen	

¹⁾Werte Ost / West

Probekörper	Beschreibung		Bruchbild
BB _{q_03_01_04}	Kraft [kN]	454	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,4	
	Rohdichte [kg/m ³]	843	
	Holzfeuchte [%]	8,6	
	K_{ser}^{D} [kN/mm]	743 / 678	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in Furnierrichtung zw. Querlagen	
BB _{q_03_01_05}	Kraft [kN]	440	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	10,1	
	Rohdichte [kg/m ³]	852	
	Holzfeuchte [%]	8,6	
	K_{ser}^{D} [kN/mm]	715 / 675	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in Furnierrichtung zw. Querlagen	
BB _{q_03_01_06}	Kraft [kN]	431	
	$f_{ax,1}$ [N/mm ²]	9,9	
	Rohdichte [kg/m ³]	830	
	Holzfeuchte [%]	8,7	
	K_{ser}^{D} [kN/mm]	1.325 / 1.199	
	Anmerkungen	Versagen West, AFSP in Furnierrichtung zw. Querlagen, 1 Schraubenbruch	

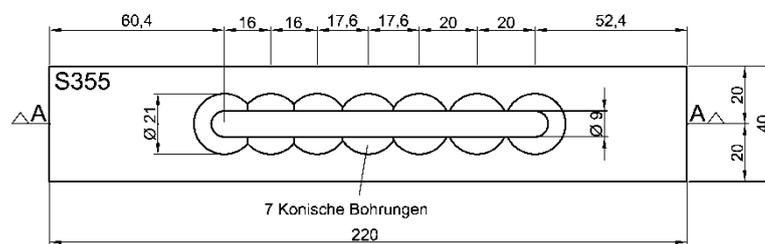
¹⁾Werte Ost / West

Tabelle 7-13 Zusammenfassung Serie 03_01

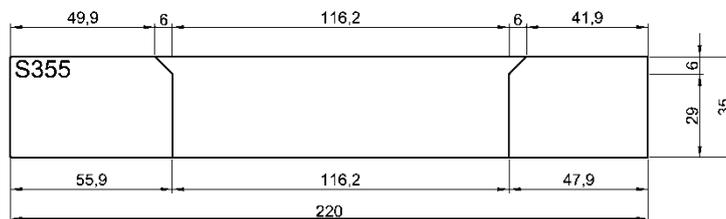
Zusammenfassung			
$R_{ax,mean,Prüfungen}$ [kN]	433,3	$K_{ser,mean}$ [kN/mm]	914,1
$R_{ax,mean,seriell}$ [kN]	437,7	COV [%]	27,3
$f_{ax,1,mean}$ [N/mm ²]	9,9	$\eta_{brutto,mean}$ [-]	0,55 / 0,47
$R_{ax,50}$ [kN]	430,8	$\eta_{netto,mean}$ [-]	0,59
COV [%]	2,8	$n_{ef,mean}$ [-]	0,72

ANHANG C PLÄNE

Schraubenblech 1 S355



Schnitt A-A

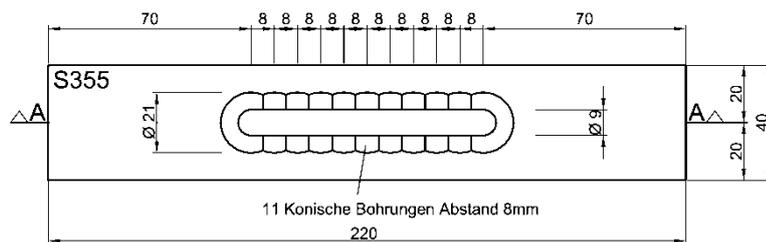


Toleranzen Bohrlöcher: +0,10 mm
Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: ±0,10 mm
alle Maße in mm

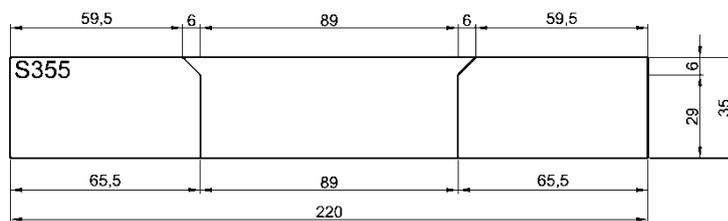
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Schraubenblech 1	Plannummer: 1	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 07.02.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

Schraubenblech 2 S355



Schnitt A-A



Toleranzen Bohrlöcher: +0,10 mm

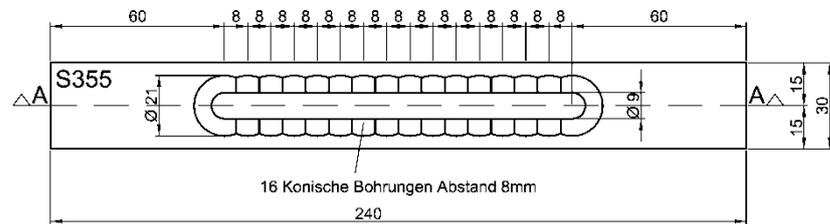
Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: $\pm 0,10$ mm

alle Maße in mm

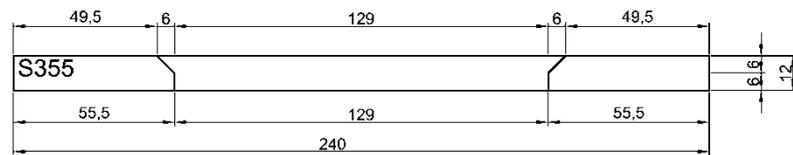
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Schraubenblech 2	Plannummer: 2	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 07.02.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

Schraubenblech 3 S355



Schnitt A-A

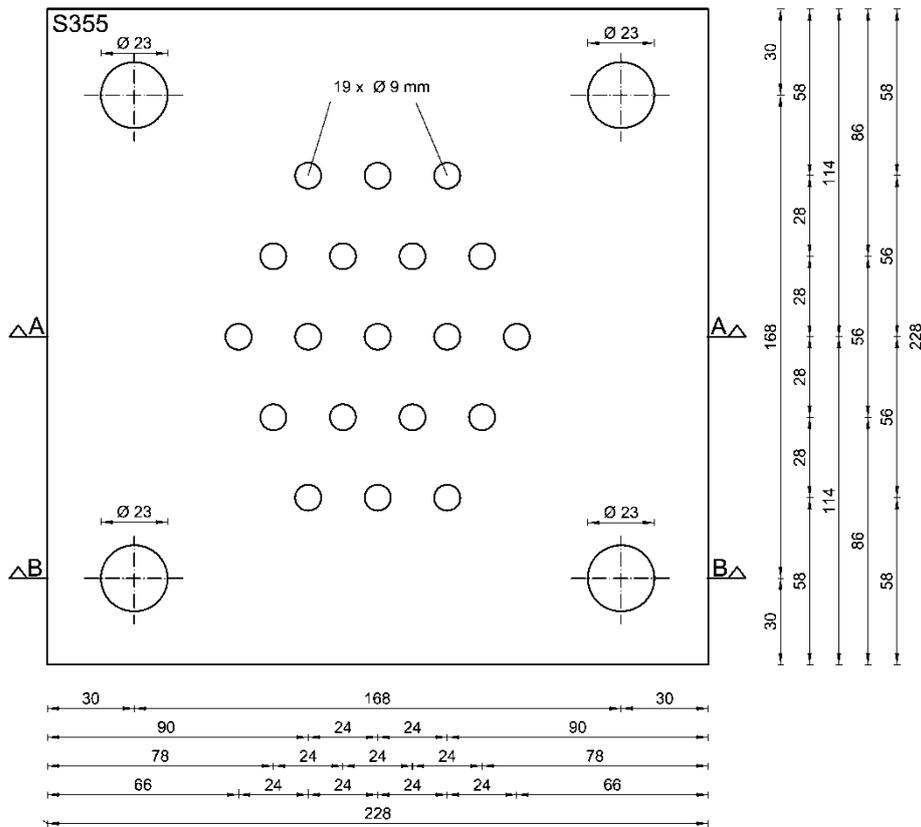


Toleranzen Bohrlöcher: +0,10 mm
 Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: ±0,10 mm
 alle Maße in mm

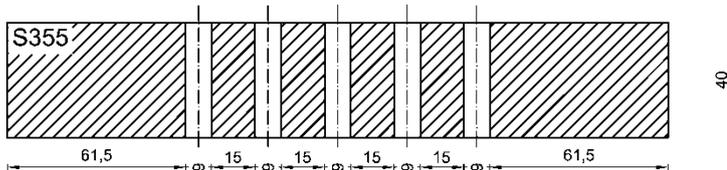
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Schraubenblech 3	Plannummer: 3	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 07.02.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

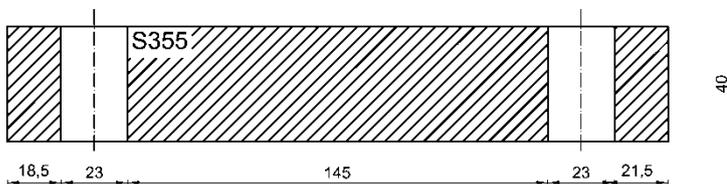
2 x Schraubenblech 1 S355



Schnitt A-A



Schnitt B-B



Toleranzen Bohrlöcher: $+0,10 \text{ mm}$

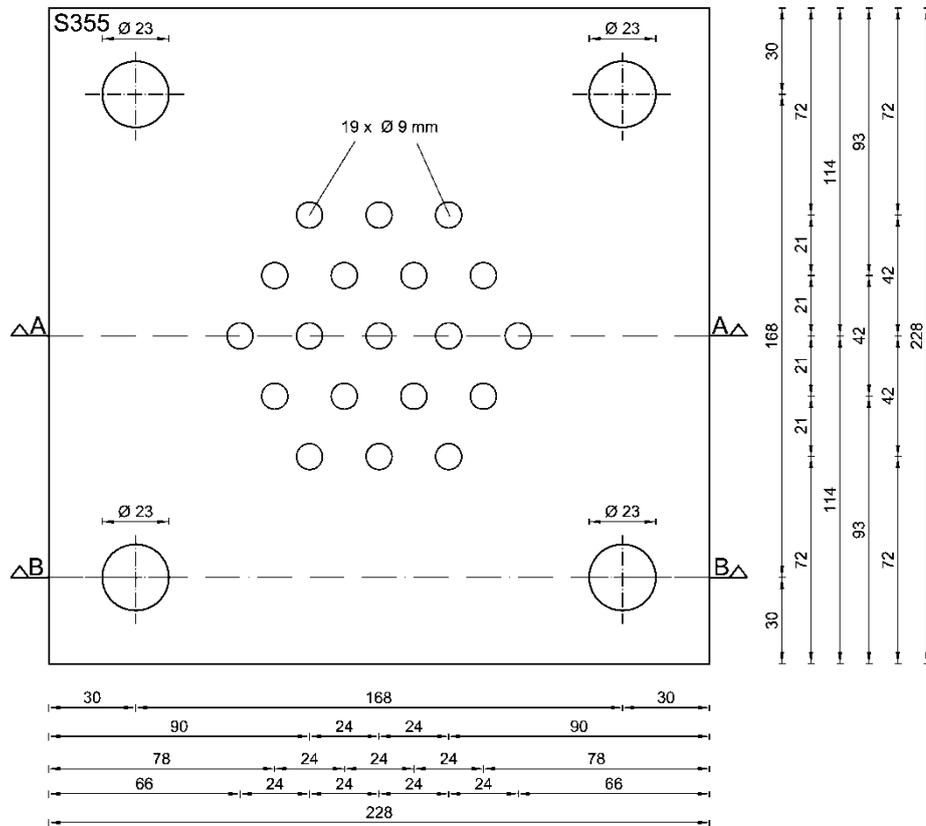
Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: $\pm 0,10 \text{ mm}$

alle Maße in mm

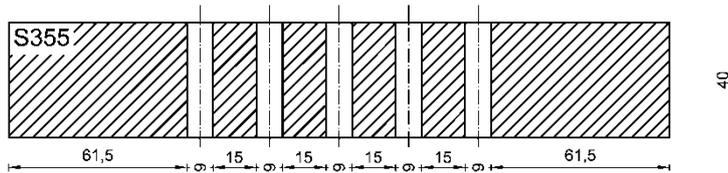
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Schraubenblech 1	Plannummer: 4	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

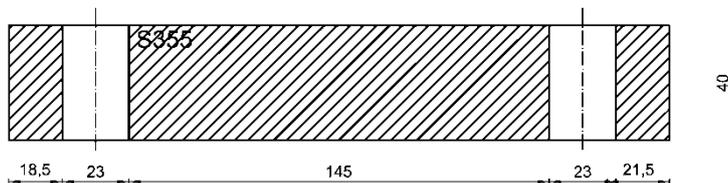
2 x Schraubenblech 2 S355



Schnitt A-A



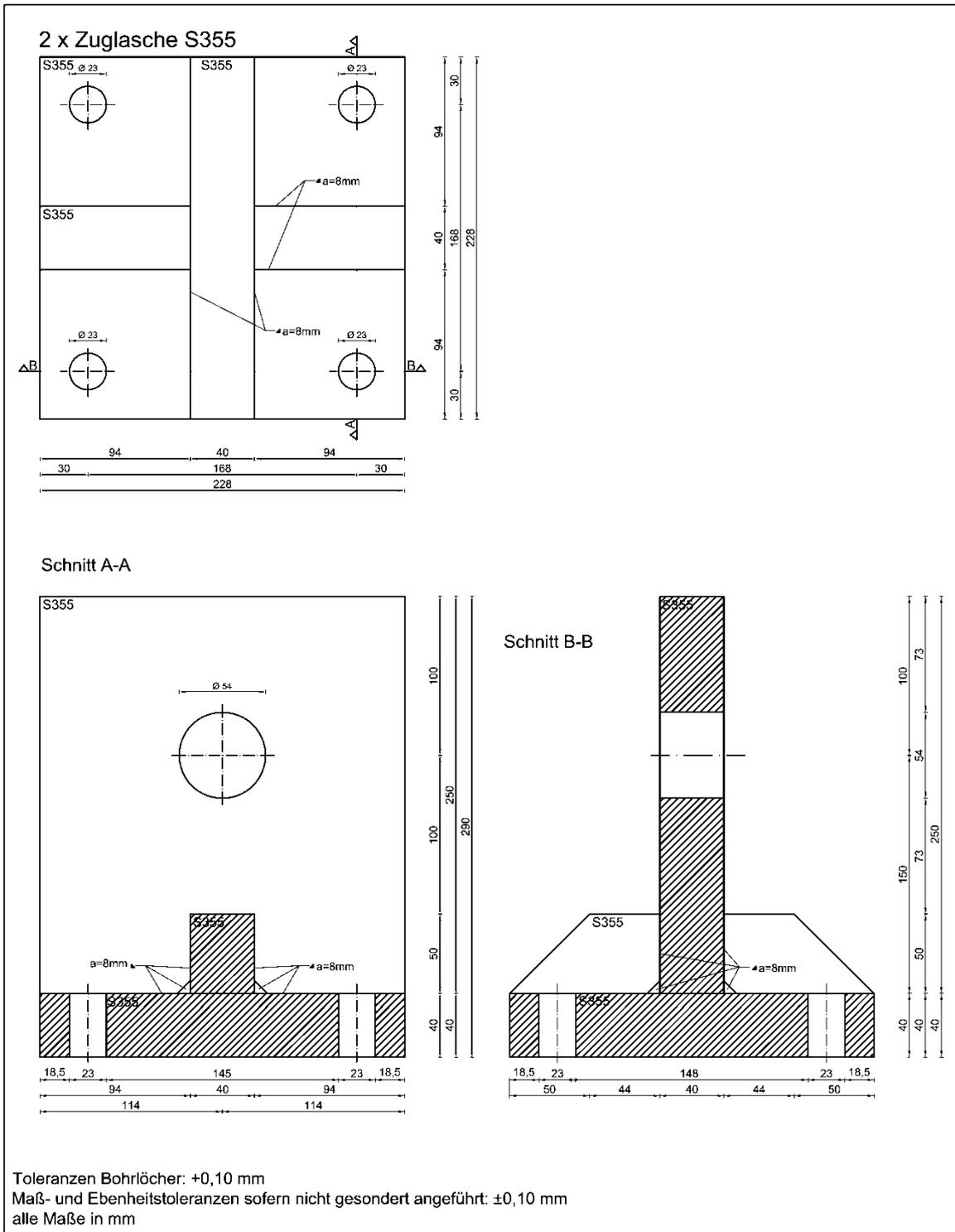
Schnitt B-B



Toleranzen Bohrlöcher: +0,10 mm
 Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: ±0,10 mm
 alle Maße in mm

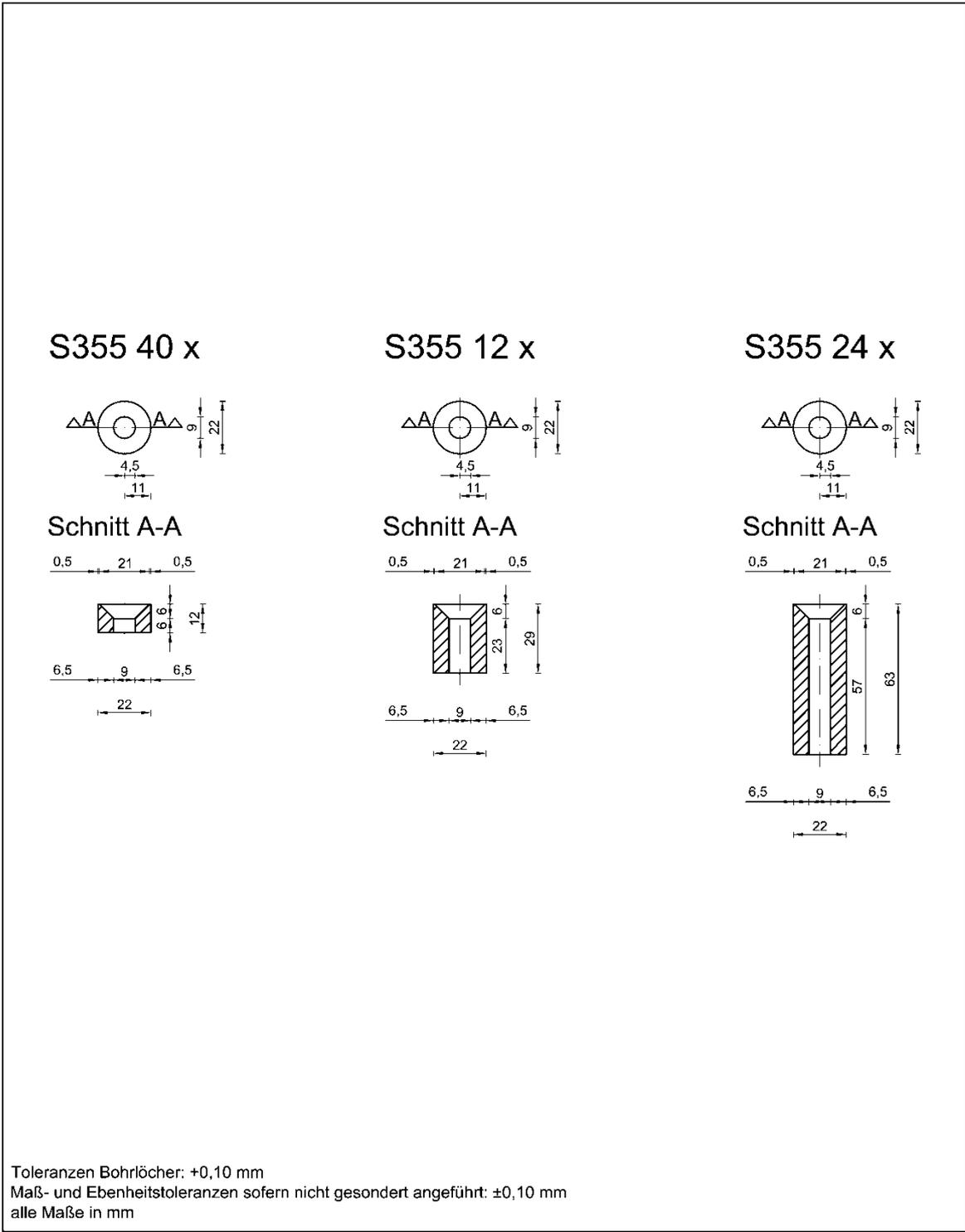
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Schraubenblech 2	Plannummer: 5	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000



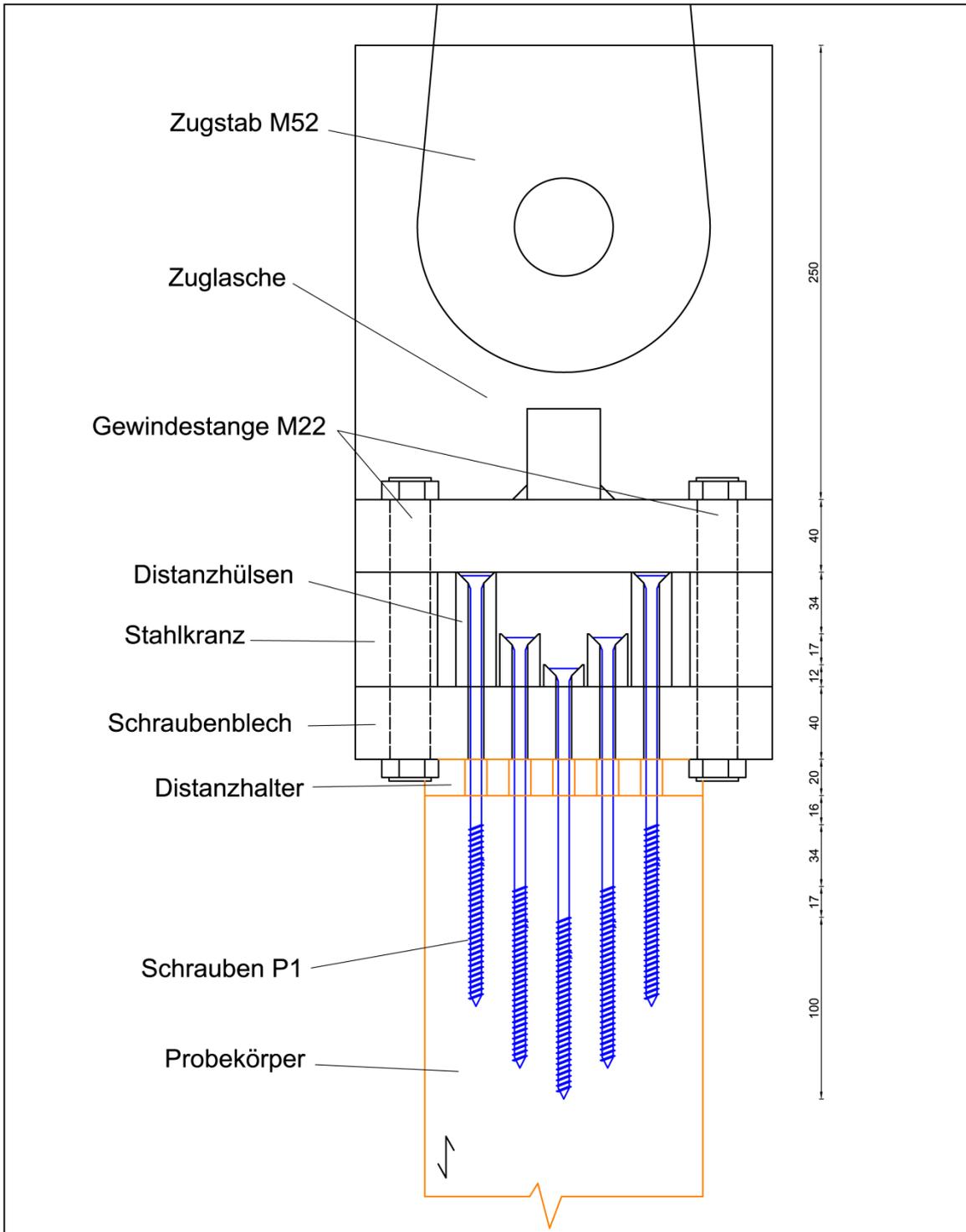
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Zuglasche	Plannummer: 6	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

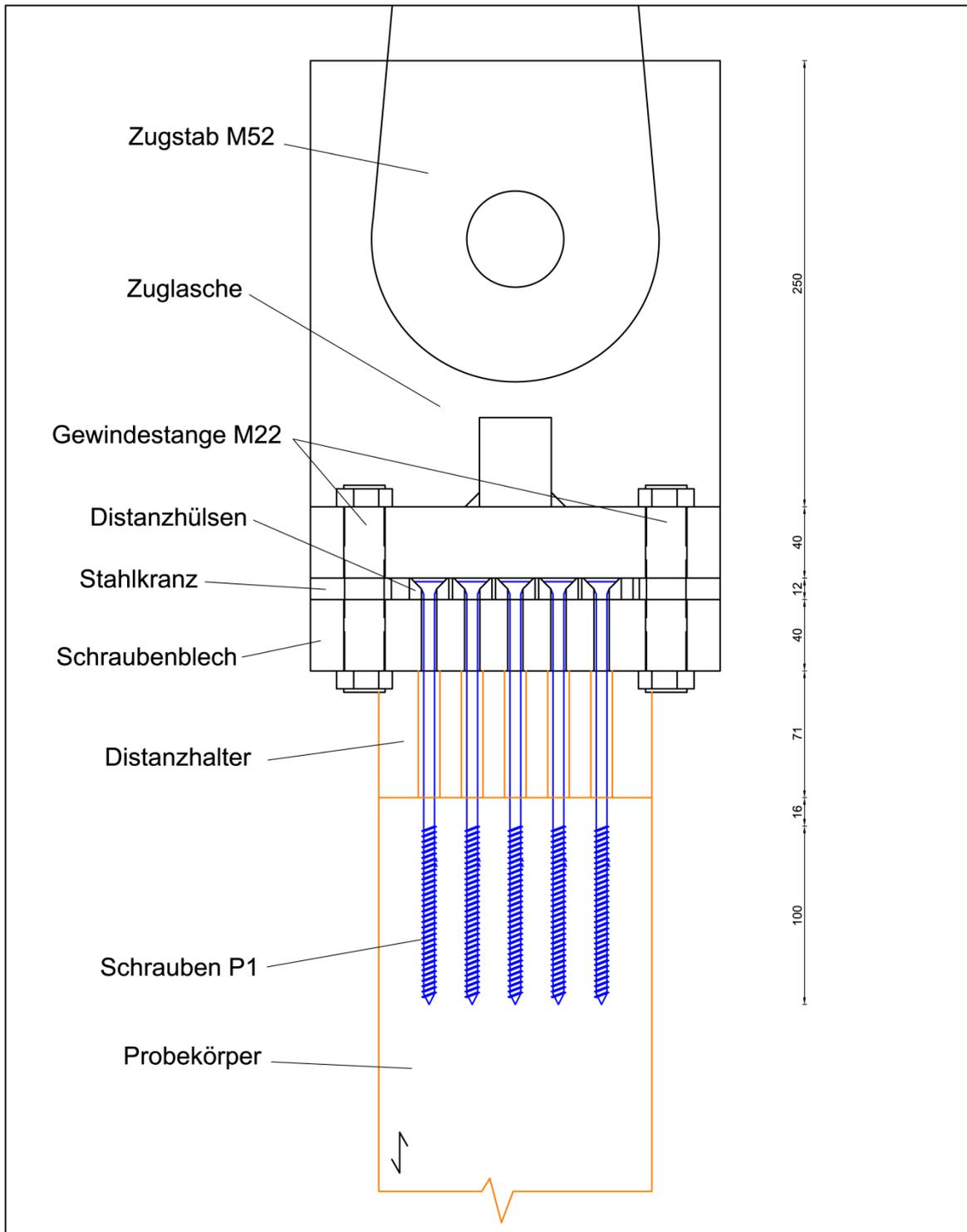


Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Abstandhalter	Plannummer: 7	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000



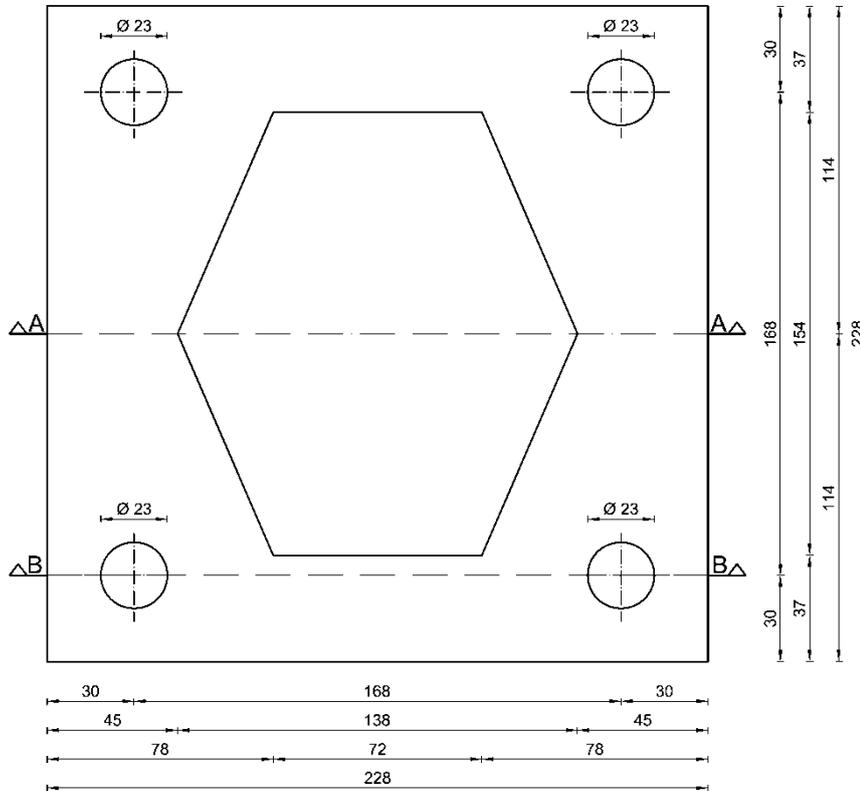
Zugversuche Baubuche		
Planinhalt: Versuchsaufbau 1	Plannummer: 8	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000



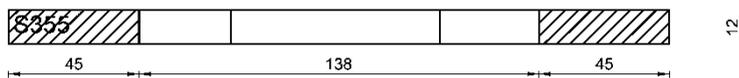
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Versuchsaufbau 2	Plannummer: 9	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

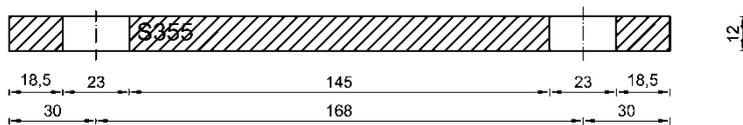
2 x Stahlkranz 2 S355



Schnitt A-A



Schnitt B-B

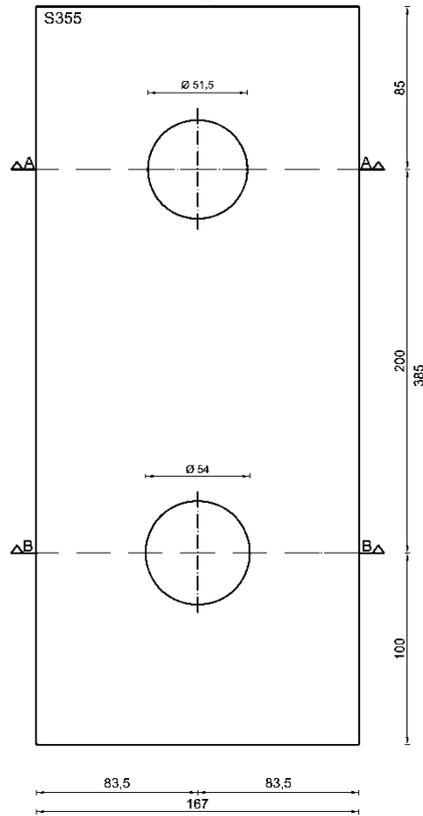


Toleranzen Bohrlöcher: +0,10 mm
 Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: ±0,10 mm
 alle Maße in mm

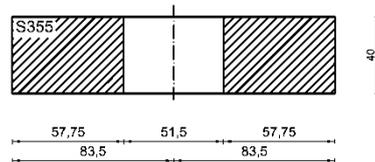
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Stahlkranz 2	Plannummer: 11	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

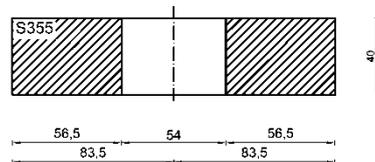
2 x Verbindungsblech S355



Schnitt A-A



Schnitt B-B



Toleranzen Bohrlöcher: +0,10 mm

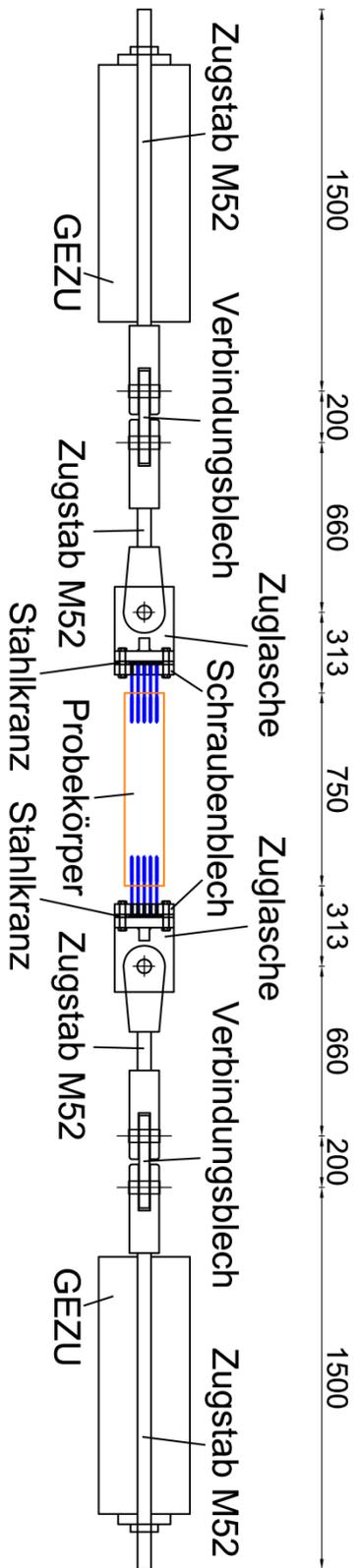
Maß- und Ebenheitstoleranzen sofern nicht gesondert angeführt: ±0,10 mm

alle Maße in mm

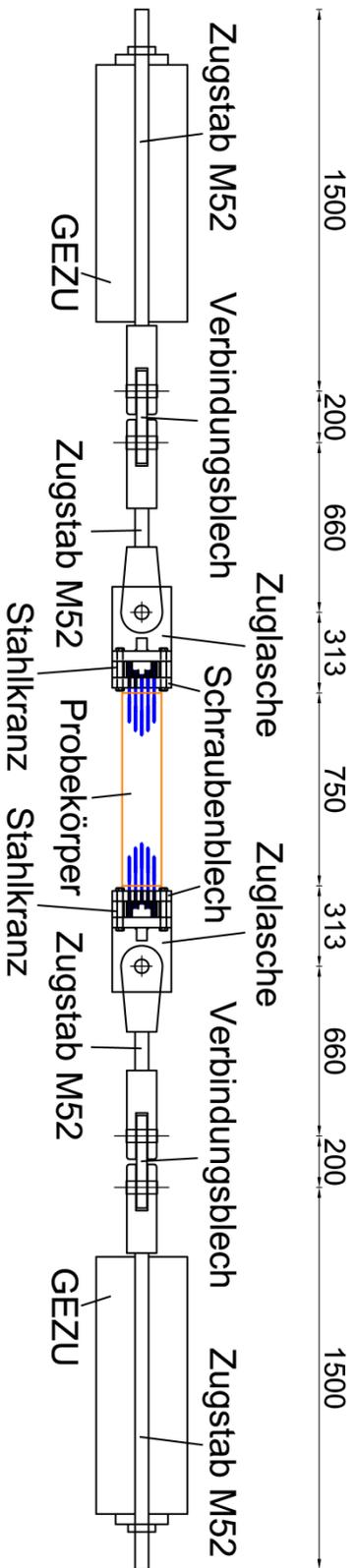
Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Verbindungsblech	Plannummer: 12	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 27.04.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

Gleichmäßige Schraubenanordnung



Parabelförmige Schraubenanordnung



Zugversuche Baubuche

Planinhalt: Prüfurbau	Plannummer: 13	Betreuer: DI Dr. Reinhard Brandner / DI Andreas Ringhofer
Erstellungsdatum: 26.07.2017		Planverfasser: Lothar Koppauer 1131000

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