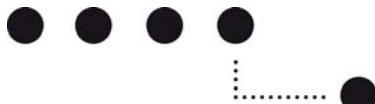


**Assemblage de contact bois-bois à surface non plane**

**Forschungsbericht - Schlussbericht**

**Berner Fachhochschule  
Architektur, Holz und Bau**



**Bericht Nr.** 2700-SB-01

**Auftrag Nr.** 2700.DHB (Projekt-Nr. BAFU: 2006.14)

**Klassifizierung** öffentlich

**Datum** 30.04.2009

**Auftraggeber**  
Bundesamt für Umwelt BAFU  
Abteilung Wald  
Michael Gautschi  
3003 Bern

**Adresse der  
Forschungsstelle**  
Berner Fachhochschule  
Architektur, Holz und Bau  
Abteilung F+E, Holzbau und Bauphysik  
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel  
Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391  
[www.ahb.bfh.ch](http://www.ahb.bfh.ch)

**Verfasser**  
Mareike Vogel  
Thomas Tannert

**Projektverantwortlicher** Andreas Müller

**Abteilungsleiter** René Graf

## ABSTRACT

Die Anschlüsse Pfosten-Schwelle respektive Pfosten-Träger gehören zu den häufigsten Verbindungen im Holzbau. Die Übertragung der Lasten erfolgt dabei sowohl längs als auch quer zur Faser. Ein Problem für die Anschlussoptimierung liegt dabei in der kleineren Festigkeit des Holzes quer zur Faserrichtung gegenüber der Festigkeit längs zur Faserrichtung.

Das an der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau durchgeführte Projekt untersuchte die Möglichkeit mit einer nicht-planen Kontaktfläche die Lastübertragung zu erhöhen. In dem vorliegenden Bericht werden die theoretischen Grundlagen sowie die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten vorgestellt. Das Potential, die einleitbare Kraft in einen Pfosten-Träger Anschluss mit einer nicht-planen Kontaktfläche zu erhöhen, wurde durch theoretische und experimentelle Untersuchungen bestätigt.

Aufbauend auf den Voruntersuchungen wurden dreiecksketten-, halbkreisketten- und parabelförmige Geometrien in Grossversuchen untersucht. Diese Versuche zeigten allerdings, dass nicht-

plane Anschlussgeometrien bei industrieller Fertigung einen relativ grossen Anfangs-Schlupf aufweisen und die erwarteten Laststeigerungen nicht erreichen. Zwar sind die maximal einleitbaren Kräfte deutlich höher als bei planen Anschlässen, diese Kräfte treten aber bei sehr grossen Setzungen auf und sind für die Bemessung und die Baupraxis daher nicht relevant.

Unter Laborbedingungen mit höchstmöglicher Präzision hergestellte Prüfkörper weisen ein geringeres und weniger unterschiedliches Schlupfverhalten auf. Ein Einsatz nichtplaner Anschlüsse empfiehlt sich daher hauptsächlich in der Produktion von vorgefertigten Elementen.

Ein zusätzliches Verkleben von dreiecksförmigen Anschlässen mit einem Epoxydharz verringert den Schlupf und führt zu einer Laststeigerung. Bei Buchenanschlüssen sind die einleitbaren Kräfte höher; dieses extrem vorteilhafte Verhalten schlägt sich allerdings nicht im Verformungsverhalten wider, sondern ist begründet durch die wesentlich höhere Bemessungskraft eines Buchenanschlusses.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1 AUSGANGSLAGE</b>	<b>4</b>
<b>2 ZIELSETZUNGEN</b>	<b>4</b>
<b>3 PROJEKTBETEILIGTE</b>	<b>5</b>
<b>4 VORGEHENSWEISE</b>	<b>5</b>
<b>5 EINFÜHRUNG</b>	<b>6</b>
5.1 Pfostenanschlüsse im Holzbau.....	6
5.2 Druckfestigkeit des Holzes.....	7
5.3 Experimentelle Voruntersuchungen.....	8
5.4 Theoretische Überlegungen zur Lasteinleitung .....	11
5.5 Beschreibung verschiedener Anschluss-Geometrien.....	12
5.6 Theoretische Laststeigerung in Abhängigkeit der Geometrie.....	15
5.7 Kleinversuche mit verschiedenen Geometrien .....	18
5.8 Geprüfte Anschlussgeometrien.....	18
5.9 Versuchsdurchführung.....	18
5.10 Ergebnisse der Kleinversuche .....	20
<b>6 GROSSVERSUCHE</b>	<b>23</b>
6.1 Herstellungsmöglichkeiten und Material .....	23
6.2 Durchführung der Grossversuche Teil I.....	26
6.3 Resultate der Grossversuche Teil I.....	27
6.4 Diskussion der Grossversuche Teil I .....	33
6.5 Durchführung der Grossversuche Teil II.....	34
6.6 Resultate der Grossversuche Teil II.....	36
6.7 Diskussion der Grossversuche Teil II .....	40
<b>7 SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>41</b>
<b>8 BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT</b>	<b>42</b>
8.1 Umfang des Berichts.....	42
<b>9 VERZEICHNISSE</b>	<b>43</b>
9.1 Abbildungsverzeichnis .....	43
9.2 Tabellenverzeichnis .....	44
9.3 Literaturverzeichnis .....	44
<b>ANHANG A: DETAILS ZU DEN KLEINVERSUCHEN</b>	<b>45</b>
A.1 Fotos der individuellen Prüfkörper .....	45
A.2 Last-Verformungs-Kurven der individuellen Prüfkörper der Kleinversuche.....	49
A.3 Varianzanalyse (ANOVA) für der Ergebnisse der Kleinversuche .....	50
<b>ANHANG B: DETAILS ZU DEN GROSSVERSUCHEN</b>	<b>51</b>
B.1 Last-Verformungs-Diagramme der individuellen Prüfkörper Teil I.....	51
B.2 Varianzanalyse (ANOVA) für der Ergebnisse der Grossversuche Teil I .....	57
B.3 Last-Verformungs-Diagramme der individuellen Prüfkörper Teil II.....	59
B.4 Varianzanalyse (ANOVA) für der Ergebnisse der Grossversuche Teil II .....	63

## 1 AUSGANGSLAGE

Die Verbindungen Pfosten–Schwelle respektive Pfosten–Träger gehören zu den häufigsten Anschlüssen im Holzbau. Die Übertragung der Lasten erfolgt dabei sowohl längs als auch quer zur Faser. Das Hauptproblem für die Anschlussoptimierung liegt dabei in der viel kleineren Festigkeit des Holzes quer zur Faserrichtung gegenüber der Festigkeit in Faserlängsrichtung. Abbildung 1-1 verdeutlicht die Problematik der Lastübertragung zwischen einem Pfosten, der auf Längsdruck beansprucht wird und einem Träger, der auf Querdruck beansprucht wird.

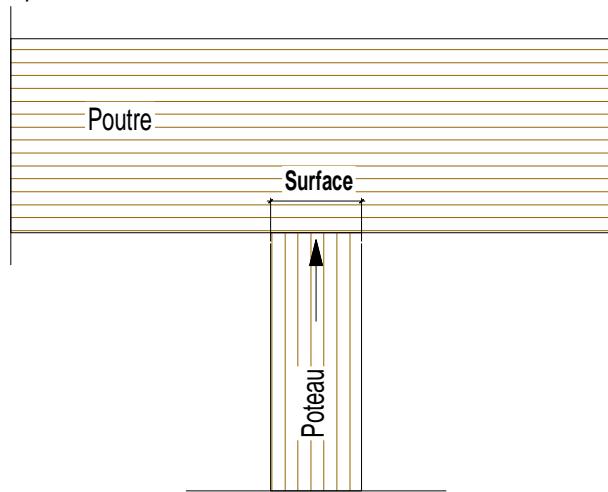


Abbildung 1-1: Anschluss Träger- Pfosten

## 2 ZIELSETZUNGEN

In dem vorliegenden Projekt wurde die Optimierung der Geometrie der Holz-Holz-Kontaktfläche zwischen Pfosten und Balken untersucht, um das Tragverhalten des Anschlusses zu verbessern. Folgende Punkte wurden berücksichtigt:

- Studium der Theorie über die Funktionsweise der Anschlüsse und Identifikation der Parameter, welche die Tragfähigkeit des Anschlusses beeinflussen,
- Festlegung der herstellungstechnischen Grenzen mit einer Machbarkeitsabklärung,
- Ausarbeitung eines Versuchsprogramms in Abhängigkeit der beiden vorgenannten Punkte, um die gewonnenen Erkenntnisse experimentell zu beurteilen, und
- Erläuterung der Vor- und Nachteile einer nichtplanen Kontaktfläche, um das Umsetzungspotenzial zu beurteilen.

### 3 PROJEKTBETEILIGTE

Die Forschungsarbeiten wurden von der Abteilung Forschung und Entwicklung der BFH-AHB durchgeführt. Für die Herstellung der Prüfkörper und die Abklärung der Umsetzung war Charpentier Vial SA aus Le Mouret beteiligt. Unterstützt wurde das Projekt durch die Sägerei G. Schelker AG, Gümmenen, welche die Buchenlamellen zur Verfügung stellte.

### 4 VORGEHENSWEISE

Das Projekt gliederte sich in vier Arbeitspakete:

#### Arbeitspaket 1 (AP1):

In einem Theoriestudium wurde aufgezeigt, wie die einleitbare Kraft in einem Pfosten-Träger-Anschluss erhöht werden kann. Dabei wurden die Parameter, welche einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Pfosten-Balken-Anschlusses haben, identifiziert und quantifiziert. Es wurden mathematisch-physikalische Zusammenhänge berücksichtigt, und die Lasten abgeschätzt, die mit einer optimierten Anschlussgeometrie aufgenommen werden können.

#### Arbeitspaket 2 (AP2):

AP2 beinhaltet die Abklärung der Möglichkeiten zur Herstellung einer nicht-planen Kontaktfläche mit CNC-Fertigungsmaschinen. In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner wurden unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten die Kriterien wie Bearbeitungstiefe, Bearbeitungsdurchmesser, Bearbeitungszeit und Bearbeitungsgeometrie hinsichtlich der Umsetzung sinnvoll limitiert.

#### Arbeitspaket 3 (AP3):

Im Rahmen von AP 3 wurden Laborversuche durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen aus AP1 und AP2 wurden Geometrien zur Prüfung festgelegt, die sich nur in einem Parameter unterscheiden, um dessen Einfluss zu untersuchen. Vergleichsweise wurden Prüfkörper mit einer planen Kontaktfläche, mit Setzholz und mit Vollgewindeschrauben verstärkten Anschlüssen geprüft.

#### Arbeitspaket 4 (AP4):

AP 4 enthält die Analyse der Ergebnisse und eine Einschätzung des Potenzials weiterer Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Optimierung von Kontaktanschlüssen.

## 5 EINFÜHRUNG

### 5.1 Pfostenanschlüsse im Holzbau

In Tragstrukturen aus Holz, ob im traditionellen Holzbau (Abbildung 5-1), im Rahmenbau (Abbildung 5-2), oder im Ingenieurholzbau, findet man Anschlüsse zwischen Posten und Schwänen bzw. Posten und Trägern. Über diese Holz-Holz Kontaktanschlüsse werden Kräfte ins benachbarte Bauteil weitergeleitet. Normalerweise verläuft die Kraft  $F$  im Pfosten parallel zur Faserrichtung (Pfostenlängsrichtung) und wird quer zur Faser in die Schwelle oder den Träger eingeleitet.

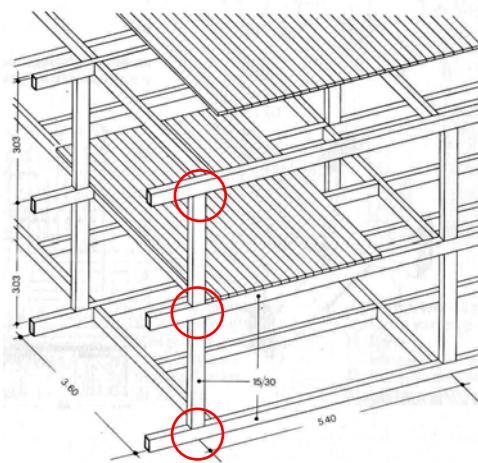


Abbildung 5-1: Anschluss im traditionellen Holzbau

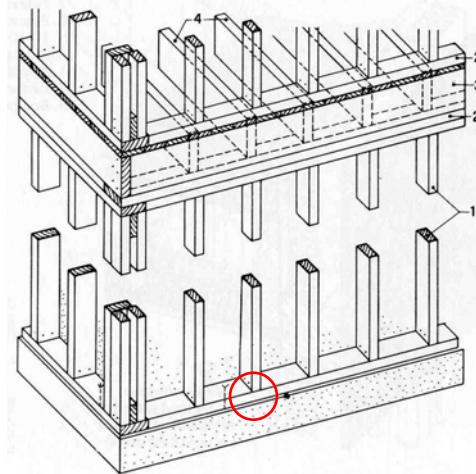


Abbildung 5-2: Anschluss im Rahmenbau

Die Problematik bei der Optimierung dieses Kontaktanschlusses liegt in der um das Mehrfache geringeren Druckfestigkeit des Holzes quer zur Faserrichtung gegenüber der Druckfestigkeit in Faserlängsrichtung. Die Querschnittsfläche des Pfostens ist oftmals zu klein, um die Kraft ohne bleibende Verformungen in die Schwelle oder den Träger einleiten zu können. Die Folge sind Quetschungen des Holzes an der Schwelle oder dem Träger im Bereich des Anschlusses.

In der Holzbaupraxis [Ehlbeck, 1985] werden oftmals die abzutragenden Lasten mit Hilfe eines Setzholzes (Laubholz mit hoher Rohdichte und Querdruckfestigkeit) über eine grössere Fläche in den Balken eingeleitet (Abbildung 5-3). Dadurch wird die Last pro Flächeneinheit quer zur Faser reduziert. Diese Methode hat die Nachteile, dass die Aspekte einer filigranen Tragstruktur nicht vollständig berücksichtigt werden können. Eine weitere Möglichkeit, die Querdruckfestigkeit des Anschlusses zu erhöhen, besteht darin, diesen mit Vollgewindeschrauben und Stahlplatten zu verstärken (Abbildung 5-4). Letztere Methode wird vorwiegend bei grösseren Tragstrukturen angewendet [Bejtka und Blass, 2006]. Beide Methoden zur Verstärkung des Anschlusses bedeuten zusätzliches Material und zusätzliche Schritte im Herstellungsprozess der Tragstruktur, was sich negativ auf die Kosten auswirkt.

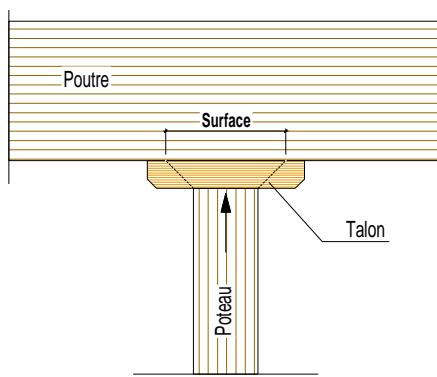


Abbildung 5-3: Mit Setzholz verstärkter Anschluss

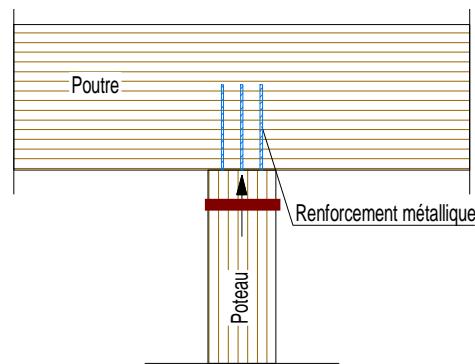


Abbildung 5-4: Mit Schrauben verstärkter Anschluss

## 5.2 Druckfestigkeit des Holzes

Die Druckfestigkeit von Holz ist in Faserlängsrichtung grösser als quer zur Faserrichtung. Für Fichte liegen die charakteristischen Werte der Druckfestigkeit in Faserrichtung bei  $43 \text{ N/mm}^2$  und quer zur Faser bei  $5.8 \text{ N/mm}^2$  [Niemz, 1993]. Die Druckfestigkeit des Holzes in Abhängigkeit des Faserlastwinkels  $\alpha$  kann mit der Hankinsonformel [Hankinson, 1921] berechnet werden:

$$f_{c,\alpha} = \frac{f_{c,90} \cdot f_{c,0}}{f_{c,0} \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,90} \cdot \cos^2 \alpha} \quad \text{Formel 1}$$

In der Schweizer Norm 265 [SIA, 2003] ist die Hankinsonformel angegeben zur Berechnung der Bemessungswerte der Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Faserlastwinkels  $f_{c,\alpha,d}$  (Abbildung 5-5). Bereits bei einem Winkel von 45 Grad beträgt die Druckfestigkeit nur noch knapp einen Viertel der Druckfestigkeit bei einem Winkel von 0 Grad (parallel zur Faser).

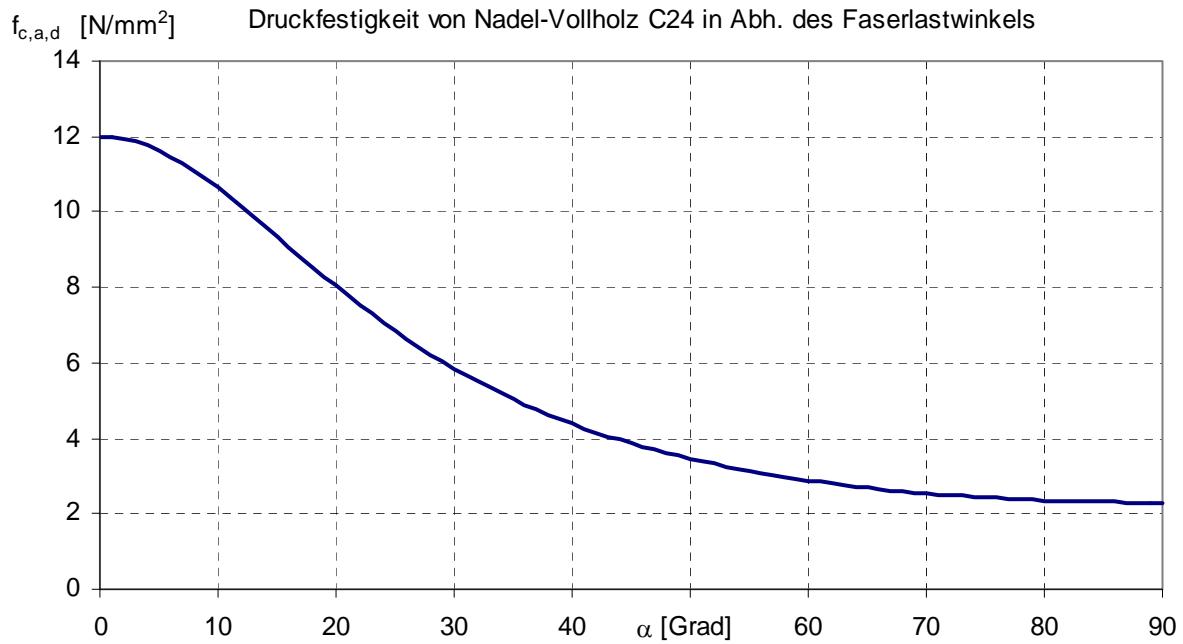


Abbildung 5-5: Druckfestigkeit von Fichte in Abhängigkeit des Faserlastwinkels

Werden Lasten über einen Pfosten quer zur Faserrichtung des Holzes ( $\alpha = 90$  Grad) ohne Setzholz in eine Schwelle oder einen Träger eingeleitet, so kann die maximal einleitbare Kraft für einen gegebenen Pfostenquerschnitt nach Formel 2 berechnet werden.

$$F_{90,\text{plan}} = a \cdot b \cdot f_{c,90} \quad \text{Formel 2}$$

Mit:  $a$  = Pfostenbreite [mm],  $b$  = Pfostendicke [mm],  $f$  = Druckfestigkeit quer zur Faser [ $\text{N/mm}^2$ ]

Mit einem Setzholz wird die einleitbare Kraft erhöht. Durch die Verteilung der abzutragenden Last über eine grössere Fläche reduziert sich die Kraft pro Flächeneinheit quer zur Faserrichtung.

Ein anderer Ansatz zur Erhöhung der einleitbaren Kraft bei gleichbleibendem Pfostenquerschnitt ist, die Geometrie der Kontaktfläche zwischen Pfosten und Schwelle bzw. Träger so zu gestalten, dass ein Teil der Kraft in Faserlängsrichtung in die Schwelle bzw. den Träger eingeleitet wird. Mit diesem Ansatz beschäftigt sich das vorliegende Projekt.

### 5.3 Experimentelle Voruntersuchungen

Im Rahmen von Vorversuchen wurde überprüft, welche Laststeigerung mit einer nicht-planen Kontaktfläche im Vergleich zu einer planen Kontaktfläche erzielt werden können. In einer ersten Serie wurden Stahlzylinder mit einem Durchmesser von 40 mm in Rundungen mit 10 mm bzw. 15 mm Tiefe eingelagert (MR35; MR39). Vergleichsweise wurden zwei Stahlplatten mit Breiten 35 mm und 39 mm auf einer planen Kontaktfläche aufgebracht (ME35; MR39), (Abbildung 5-6 oben). In einer zweiten Serie wurden Holzbauteile mit einem Querschnitt von 40 mm x 40 mm in Rundungen mit 10 mm bzw. 15 mm Tiefe eingelagert (HR35; HR39). Vergleichsweise wurden zwei plane Holzpfosten mit Breiten 35 mm und 39 mm auf einer planen Kontaktfläche aufgebracht (HE35; HE39), (Abbildung 5-6 unten)

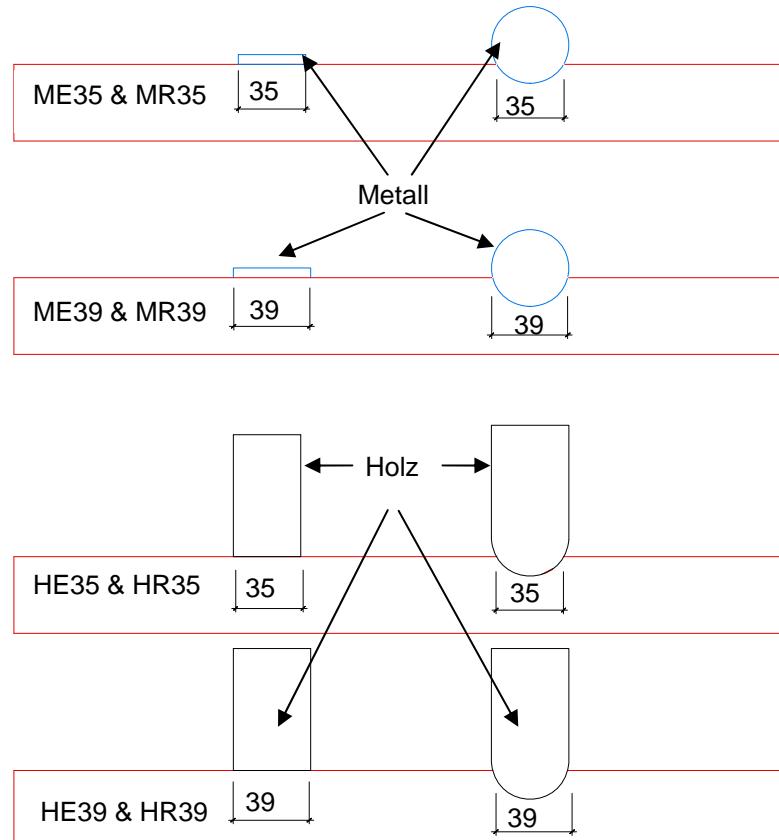


Abbildung 5-6: Darstellung der experimentellen Voruntersuchungen

Die Versuche wurden auf einer Universalprüfmaschine im Labor der BFH-AHB durchgeführt. Die aufgebrachte Kraft und die Verformung des Anschlusses wurden aufgezeichnet. Die Proportionalitätsgrenzen wurden bestimmt, um eine Aussage über die Tragfähigkeit treffen zu können (Abbildung 5-9). Die Ermittlung der Tragfähigkeit ist in Abbildung 5-10 graphisch dargestellt.

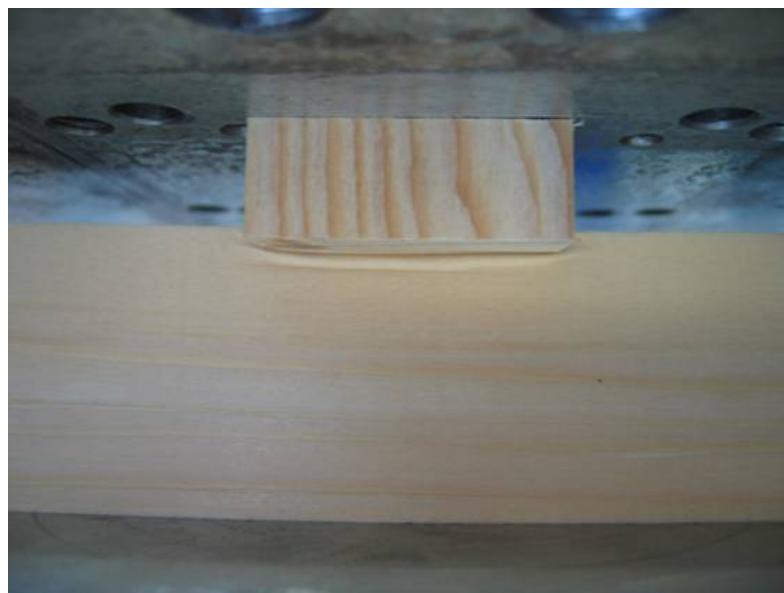


Abbildung 5-7: Verformungsverhalten von planen Kontaktflächen



Abbildung 5-8: Verformungsverhalten von nicht-planen Kontaktflächen

f [N/mm<sup>2</sup>] Vergleich der Serien HR39 und HE39 (Prüfkörper 1)

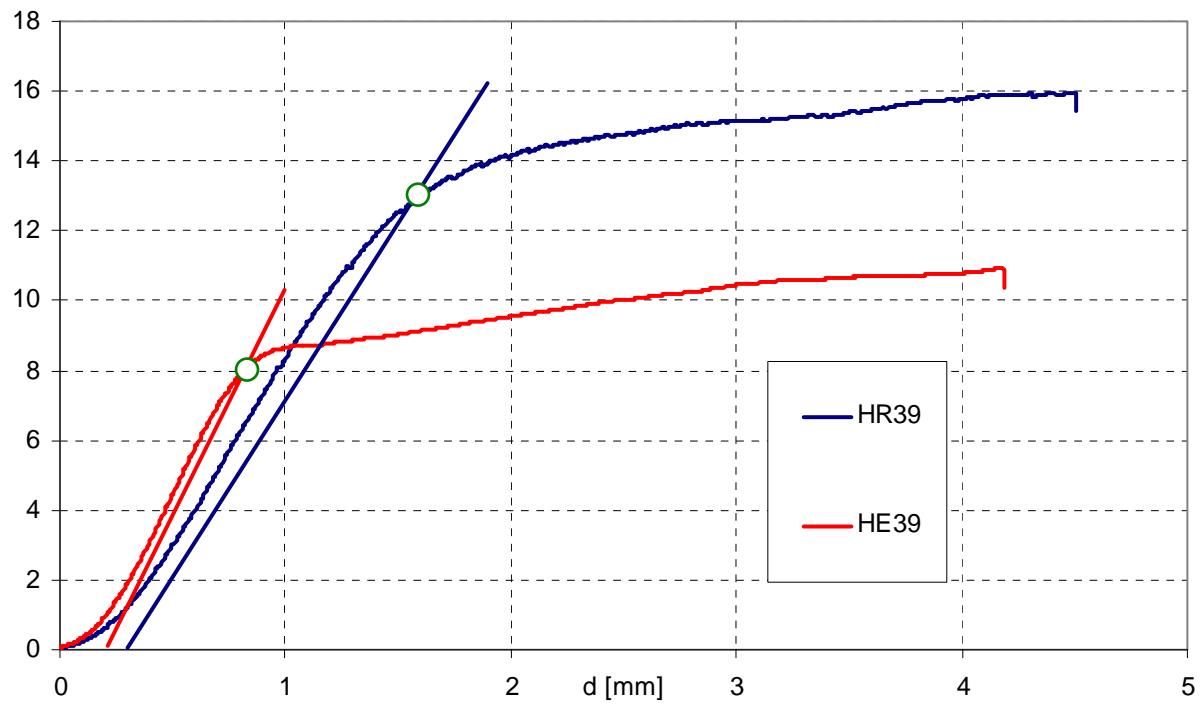


Abbildung 5-9: Ermittlung der Tragfähigkeit aus Last-Verformungs-Kurven

f [N/mm<sup>2</sup>] Tragfähigkeit der Prüfkörper der Vorversuche

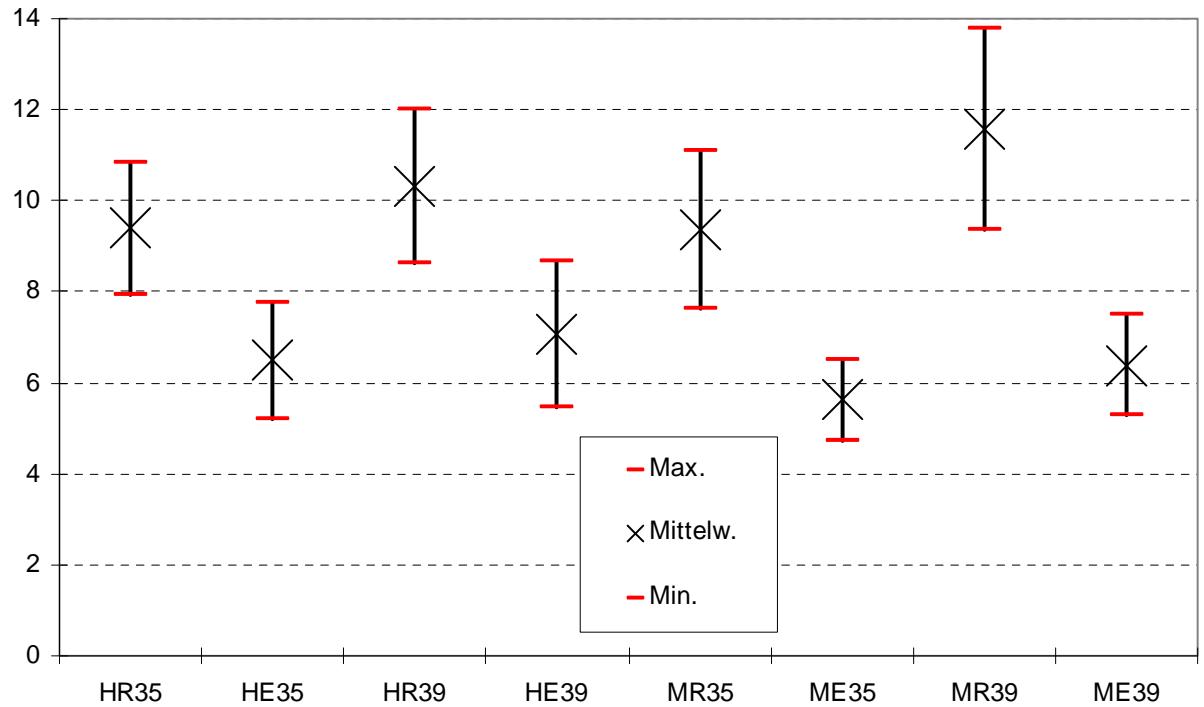


Abbildung 5-10: Tragfähigkeit der Prüfkörper der Vorversuche

## 5.4 Theoretische Überlegungen zur Lasteinleitung

Am Beispiel der kreisbogenförmigen Anschlussgeometrie soll erläutert werden, wie die theoretische Laststeigerung einer nicht-planen Anschlussgeometrie bewertet werden kann. Abbildung 5-11 illustriert die Lasteinleitung im nicht-planen Kontaktanschluss. Grundsätzlich besteht die Annahme, dass die Last senkrecht zur Oberfläche übertragen wird. Bei einem nicht-planen Anschluss kann die Kraft in einen vertikalen und einen horizontalen Anteil zerlegt werden. Der vertikale Anteil ist für die Berechnung der einleitbaren Kraft massgebend, da die Kraft aus dem Pfosten auch vertikaler Natur ist. Formel 3 zeigt die Berechnung der übertragbaren Kraft der kreisbogenförmigen Anschlussgeometrie.

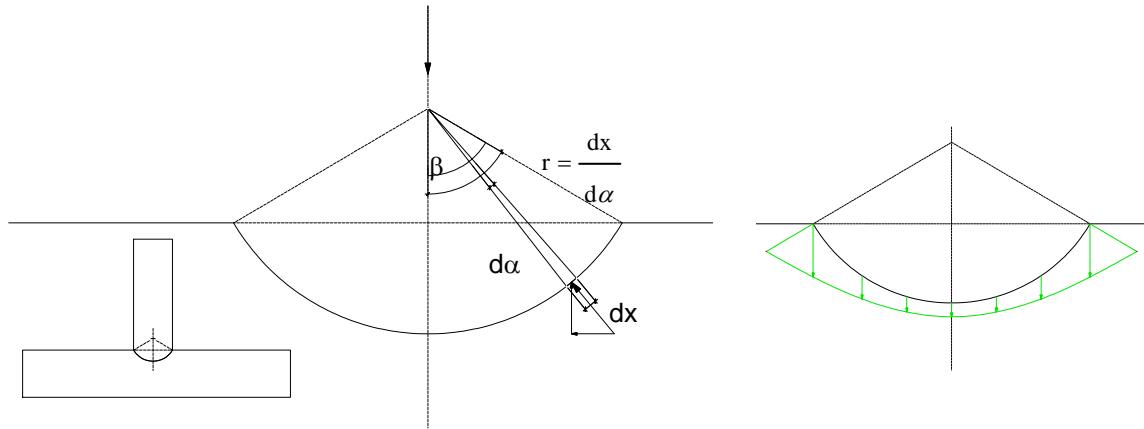


Abbildung 5-11: Lasteinleitung im nicht-planen Kontaktanschluss

$$F_{r,\perp} = 2 \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}} f_{c,\alpha} * \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot (r * b) \quad \text{Formel 3}$$

Die Druckfestigkeiten  $f_{c,\alpha}$  in Abhängigkeit des Faserwinkels  $\alpha$  werden mit Formel 1 bestimmt.

Für die Testserien HR35 und HR39 wurden die theoretischen Tragfähigkeiten bestimmt. Die Holzfestigkeiten quer zur Faser ( $f_{c,90}$ ) wurden aus den Versuchen der Testserien HE35 und HE39 ermittelt zu:  $f_{c,90,HR35} = 6.49 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{c,90,HR39} = 7.07 \text{ N/mm}^2$ . Die Festigkeiten längs zur Faser wurden mit  $f_{c,0} = 40 \text{ N/mm}^2$  angenommen [Niemz, 1993]. Mit  $r = 20 \text{ mm}$  und  $b = 40 \text{ mm}$  ergibt sich für:

HR35: ( $\beta = 1.047 * r$ )

$$F_{90,\text{plan}} = 9068 \text{ N} = (40 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 6.49 \text{ N/mm}^2)$$

Theoretische Betrachtung:  $F_{r,\perp,T} = 12240 \text{ N} \rightarrow 35\% \text{ Laststeigerung}$

Versuchsergebnisse:  $F_{r,\perp,V} = 13150 \text{ N} \rightarrow 45\% \text{ Laststeigerung}$

HR39: ( $\beta = 1.318 * r$ )

$$F_{90,\text{plan}} = 11029 \text{ N} = (40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 7.07 \text{ N/mm}^2)$$

Theoretische Betrachtung:  $F_{r,\perp,T} = 17070 \text{ N} \rightarrow 50\% \text{ Laststeigerung}$

Versuchsergebnisse:  $F_{r,\perp,V} = 16080 \text{ N} \rightarrow 46\% \text{ Laststeigerung}$

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde das vorliegende Projekt definiert.

## 5.5 Beschreibung verschiedener Anschluss-Geometrien

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Geometrien vorgestellt, die im Anschlussbereich zwischen einem Pfosten mit einer Schwelle bzw. einem Träger eingesetzt werden können.

Basis für den Vergleich verschiedener Kontaktflächen-Geometrien ist ein an Schwelle oder Balken rechtwinklig anschliessender Pfosten.

### Gerader (planer) Anschluss

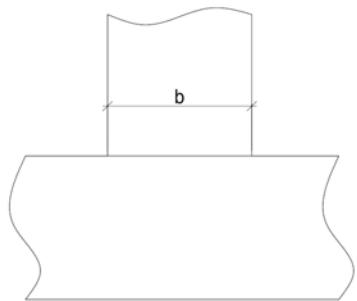


Abbildung 5-12: Gerader Anschluss

Der gerade (oder plane) Anschluss (Abbildung 5-12) ist eine reine Querdruckverbindung und entspricht dem Stand der Technik, für nicht verstärkte Anschlüsse. Er wird als Referenz eingesetzt; sämtliche Verbesserungen der untersuchten Geometrien auf die einleitbare Kraft bei einem nicht verstärkten Querdruckstoss mit gleichem Querschnitt beziehen sich auf diese Geometrie.

Die einleitbare Kraft erhöht sich proportional mit Vergrösserung des Querschnittes. Die Verbindung ist einfach auszuführen, aber die Lastübertragung ist beschränkt durch die geringe Festigkeit des Holzes quer zur Faser.

### Dreiecksförmiger Anschluss

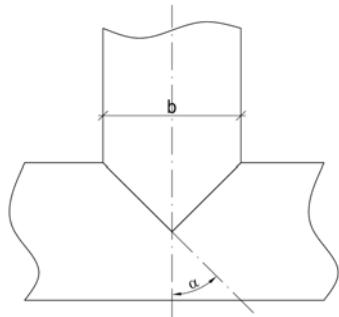


Abbildung 5-13: Dreiecksförmiger Anschluss

Beim dreiecksförmigen Anschluss (Abbildung 5-13) wird die einzuleitende Kraft in zwei Komponenten aufgeteilt, eine vertikale Komponente ( $90^\circ$  zur Faserrichtung) und eine horizontale Komponente (in Faserrichtung). Im Fall, dass die Frästiefe der halben Pfostenbreite entspricht, wird die Last unter einem Winkel von  $45^\circ$  eingeleitet. Das führt zu einer optimalen Ausnutzung der Geometrie, weil in Pfosten und Träger eine gleich grosse Kraft übertragen werden kann.

Nachteilig bei dieser Geometrie ist die Ausbildung einer Keilwirkung am Pfostenfuss. Eine Vergrösserung des Pfostenquerschnittes führt zu einer Zunahme der Frästiefe und einer Schwächung des Trägers bzw. der Schwelle.

### Dreiecksförmiger Anschluss mit Frästiefenbegrenzung

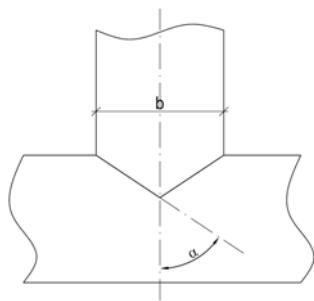
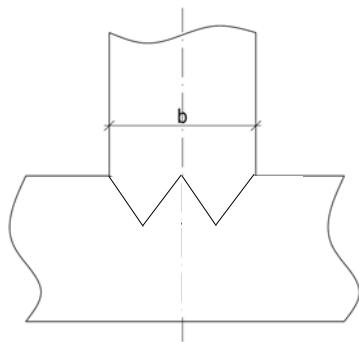


Abbildung 5-14: Dreiecksförmiger Anschluss mit Frästiefenbeschränkung

Beim dreiecksförmigen Anschluss mit Frästiefenbegrenzung (Abbildung 5-14) wird die Schwächung des Trägers bzw. der Schwelle auf ein vorgegebenes Mass begrenzt.

Das führt aus dem Gesichtspunkt der Krafteinleitung zu einer weniger optimalen Ausnutzung der Geometrie, weil der Lasteinleitungswinkel vergrössert wird.

### Dreieckskettenförmiger Anschluss



Mit dem dreieckskettenförmigen Anschluss (Abbildung 5-15) kann die Geometrie des Dreiecks auch bei Begrenzung der Frästiefe voll ausgenutzt werden. Mit der Aneinanderreihung kleiner Dreiecke, kann die gleiche Kraft übertragen werden, wie durch ein Dreieck von  $45^\circ$  über die ganze Pfostenbreite.

Die Dreieckskette kann auf jede Pfostenbreite individuell angepasst werden. Die Begrenzung der Frästiefe hat lediglich eine Anpassung der Dreiecksanzahl zur Folge, aber keine Einschränkung der aufnehmbaren Kraft. Der Dreieckswinkel ist begrenzt durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge.

Abbildung 5-15: Dreieckskettenförmiger Anschluss

### Halbkreisförmiger Anschluss

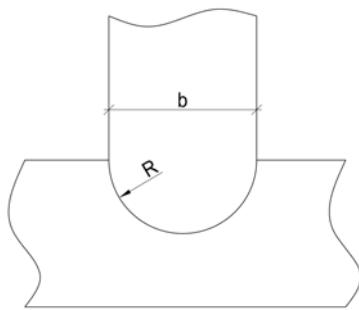


Abbildung 5-16: Halbkreisförmiger Anschluss

Der halbkreisförmige Anschluss (Abbildung 5-16) stellt bezüglich der Krafteinleitung das Optimum dar, weil ähnlich dem dreiecksförmigen Anschluss in Pfosten und Träger eine gleich grosse Kraft übertragen werden kann, die Keilwirkung, die beim dreiecksförmigen Anschluss entsteht, aber vermieden wird. Außerdem ist eine Erhöhung der Gesamtkraft zu erwarten, da ein Teil der Kontaktfläche eine geringere Faserneigung aufweist.

Allerdings führt auch hier eine Vergrösserung des Pfostenquerschnitts zu einer Zunahme der Frästiefe und einer Schwächung des Trägers bzw. der Schwelle. Der Halbkreis findet da seine Grenzen, wo bezüglich der Frästiefe Beschränkungen gemacht werden.

### Halbkreiskettenförmiger Anschluss

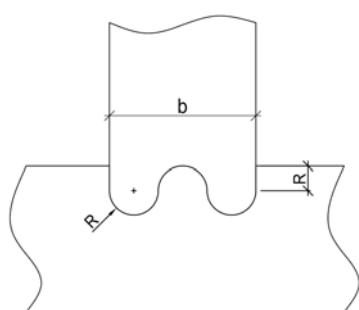
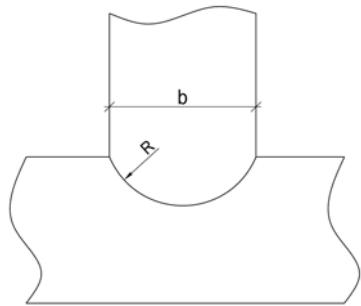


Abbildung 5-17: Halbkreiskettenförmiger Anschluss

Mit halbkreiskettenförmiger Anschluss (Abbildung 5-17) kann die optimale Geometrie des Halbkreises auch bei Begrenzung der Frästiefe voll genutzt werden. Mit der Aneinanderreihung kleiner Halbkreise, kann unabhängig vom Durchmesser der Halbkreise die gleiche Kraft übertragen werden, wie durch einen Halbkreis über die ganze Pfostenbreite.

Die Halbkreiskette kann auf jede Pfostenbreite individuell angepasst werden. Die Begrenzung der Frästiefe hat lediglich eine Anpassung der Halbkreisanzahl zur Folge, aber keine Einschränkung der aufnehmbaren Kraft. Der Radius ist begrenzt durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge.

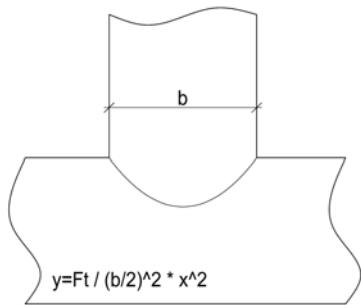
### Kreissegmentförmiger Anschluss



Mit dem kreissegmentförmigen Anschluss (Abbildung 5-18) kann für jeden Pfostenquerschnitt eine gegebene Frästiefe eingehalten werden. Mit grösser werdendem Querschnitt wird der Radius der Kontaktflächen-Geometrie vergrössert und das Kreiszentrum entlang der Pfostenlängsachse in Richtung Pfostenenschwerpunkt verschoben, so dass die Pfostenbreite die Sehne der Kreisform bildet. Bei konstanter Frästiefe und grösser werdendem Pfostenquerschnitt nimmt der Anteil der Querdruckkomponente zu. Als Folge daraus reduziert sich die einleitbare Kraft.

Abbildung 5-18: Kreissegmentförmiger Anschluss

### Parabelförmiger Anschluss



Der parabelförmige Anschluss (Abbildung 5-19) kann im Vergleich zum Halbkreis, bei gleicher Fräsbreite und Frästiefe, weniger Kraft übertragen. Wird die Frästiefe begrenzt, verändert sich mit zunehmender Pfostendimension die Geometrie ungünstig. Der Querdruckanteil nimmt zu und die einleitbare Kraft entspricht ab.

Abbildung 5-19: Parabelförmiger Anschluss

## 5.6 Theoretische Laststeigerung in Abhängigkeit der Geometrie

Es wird ein rechnerischer Vergleich über die Leistungsfähigkeit der in Kapitel 5.3 beschriebenen Anschlussgeometrien aufgestellt. Es wird nur die Situation mit Vorholz betrachtet. Für diese theoretischen Berechnungen wurde ein Pfostenquerschnitt von 100 mm x 100 mm und eine theoretische Druckfestigkeit quer zur Faser von 1 N/mm<sup>2</sup> angenommen. Die aufnehmbare Kraft für eine geraden (planen) Anschluss beträgt damit 10.000N. Für die Berechnung der aufnehmbaren Kräfte der verschiedenen nicht-planen Anschlussgeometrien wurde ein Mathcad Arbeitsblatt erstellt, welches die aufnehmbaren Kräfte in Abhängigkeit des Faserlastwinkels und der Frästiefe über die Pfostenbreite integriert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Die Frästiefen wurden für die dreiecks-, kreis- und parabelförmigen Anschlüsse auf die halbe Pfostenbreite begrenzt, für die Dreieckskette (hier zwei Dreiecke) und für die Kreiskette (hier drei Halbkreise) auf eine Viertelpfostenbreite (um einen Winkel von 45 Grad nicht zu überschreiten). Es wurden drei verschiedene Parabeln mit den Potenzen 2, 4 und 6 berechnet, da die übertragbaren Kräfte mit der Steigung der Parabel bei unterschiedlichen Frästiefen unterschiedlich verlaufen.

Zusätzlich zu den absoluten Werten der aufnehmbaren Kräfte wurden die Leistungssteigerungen als prozentuale Erhöhung der einleitbaren Kraft im Vergleich zu der geraden (planen) Anschlussgeometrie berechnet. Somit können die theoretischen Steigerungen der Leistungsfähigkeit unabhängig von spezifischen Materialkenngrößen oder Geometriabmessungen abgebildet werden. Eine graphische Darstellung der Leistungssteigerung für ein Verhältnis von Längsdruck- zu Querdruckfestigkeit von 10:1, wie es typischerweise für charakteristische Festigkeiten von Nadelhölzern vorgefunden wird, zeigt Abbildung 5-20. Abbildung 5-21 zeigt die theoretische Leistungssteigerung für ein Verhältnis von Längsdruck- zu Querdruckfestigkeit von 6:1, ähnlich dem Verhältnis, wie es für die Bemessungswerte für Nadel-Vollholz C24 laut SIA 265 [SIA, 2003] angegeben ist. (Tabelle 6:  $f_{c,0,d} = 12 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{c,90,d} = 2.3 \text{ N/mm}^2$ ).

Aus den Berechnungen geht hervor, dass die dreiecksförmige Anschlussgeometrie die höchsten theoretischen Laststeigerungen ermöglicht. Bei einem Verhältnis von Druckfestigkeit parallel zur Faser zu Druckfestigkeit quer zur Faser von 10:1 wird eine theoretische Laststeigerung von 29% erreicht. Bei einem Verhältnis von Druckfestigkeit parallel zur Faser zu Druckfestigkeit quer zur Faser von 6:1 wird immer noch eine theoretische Laststeigerung von 21% erreicht.

Wenn die Frästiefe beschränkt werden muss, kann man mit einer dreieckskettenförmigen Anschlussgeometrie bestehend aus zwei Dreiecken und einer Frästiefe  $0.25*b$  die gleiche theoretische Laststeigerung ermöglichen wie bei einer dreiecksförmigen Anschlussgeometrie und einer Frästiefe  $0.5*b$ . Prinzipiell kann dieser Gedanke dahingehend fortgesetzt werden, dass mit einer dreieckskettenförmigen Anschlussgeometrie, die aus vier Dreiecken besteht mit einer Frästiefe  $0.125*b$ , die gleiche theoretische Laststeigerung möglich ist. Bei diesen theoretischen Betrachtungen bleiben die Probleme, die durch die Kerbwirkung der Dreiecksspitzen entstehen sowie die Anforderungen an die Herstellungspräzision unberücksichtigt.

Die kreisförmige Anschlussgeometrie ermöglicht theoretische Laststeigerungen von 15% bzw. 11% bei einem Verhältnis von Druckfestigkeit parallel zur Faser zu Druckfestigkeit quer zur Faser von 10:1 bzw. 6:1. Die kreiskettenförmige Anschlussgeometrie verhält sich ähnlich positiv bei geringeren Frästiefen wie die dreieckskettenförmige Anschlussgeometrie.

Die parabelförmigen Anschlussgeometrien mit Parabeln hoher Potenz weisen eine relativ grosse Leistungssteigerung bei geringen Frästiefen auf, während die parabelförmigen Anschlussgeometrien mit Parabeln niedriger Potenz eine relativ grosse Leistungssteigerung bei grossen Frästiefen aufweisen.

Tabelle 5-1: Theoretische aufnehmbaren Kräfte der Geometrien Abhängigkeit de Frästiefe

Geometrie	Frästiefe t (mm)	$t_{c,0} : t_{c,90} = 10$		$t_{c,0} : t_{c,90} = 6$	
		F [N]	Steigerung	F [N]	Steigerung
Plane Fläche	0	10000	0%	10000	0%
Dreieck	10	10157	2%	10131	1%
	20	10601	6%	10491	5%
	30	11257	13%	11002	10%
	40	12036	20%	11572	16%
	50	12856	29%	12122	21%
Dreieckskette	0	10000	0%	10000	0%
	10	10601	6%	10491	5%
	20	12036	20%	11572	16%
	25	12856	29%	12122	21%
Kreis	0	10000	0%	10000	0%
	10	10202	2%	10166	2%
	20	10681	7%	10542	5%
	30	11162	12%	10889	9%
	40	11450	15%	11078	11%
	50	11530	15%	11128	11%
Kreiskette	0	10000	0%	10000	0%
	10	10422	4%	10343	3%
	20	11162	12%	10889	9%
	25	11530	15%	11128	11%
Parabel p=2	0	10000	0%	10000	0%
	10	10205	2%	10169	2%
	20	10741	7%	10590	6%
	30	11445	14%	11097	11%
	40	12176	22%	11560	16%
	50	12848	28%	11919	19%
Parabel p=4	0	10000	0%	10000	0%
	10	10322	3%	10258	3%
	20	10977	10%	10713	7%
	30	11595	16%	11047	10%
	40	12055	21%	11215	12%
	50	12356	24%	11260	13%

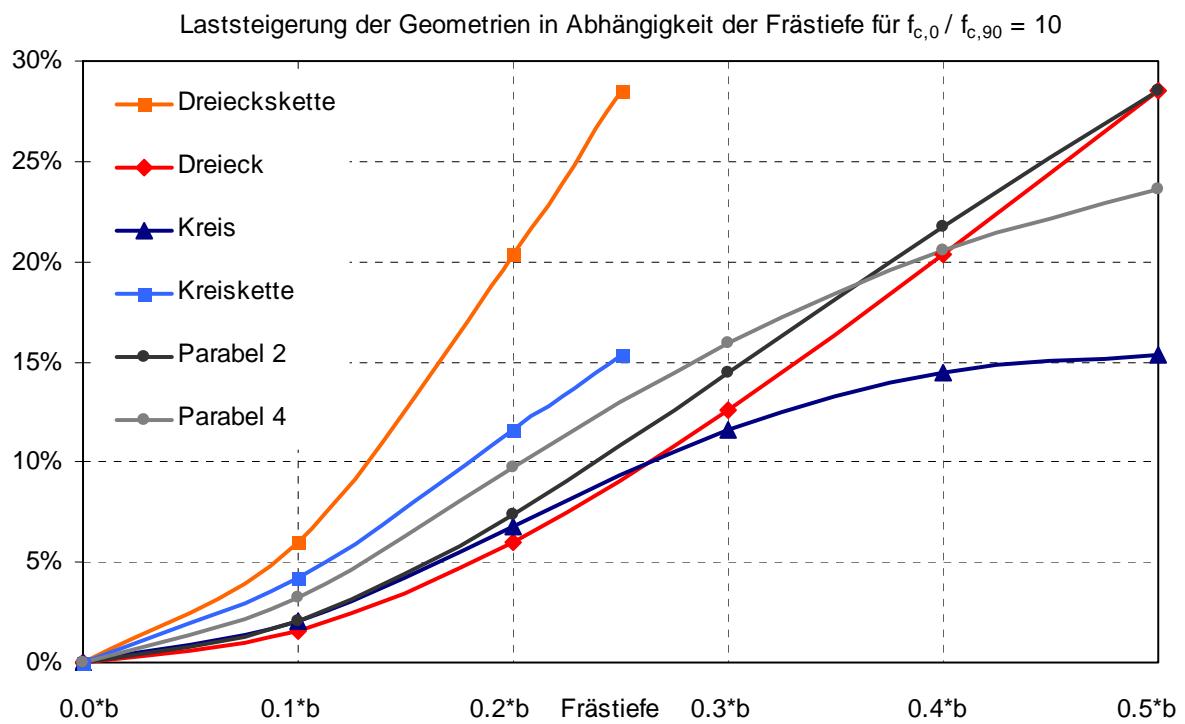


Abbildung 5-20: Theoretische Laststeigerung der Geometrien in Abh. der Frästiefe für  $f_{c,0}/f_{c,90}=10$

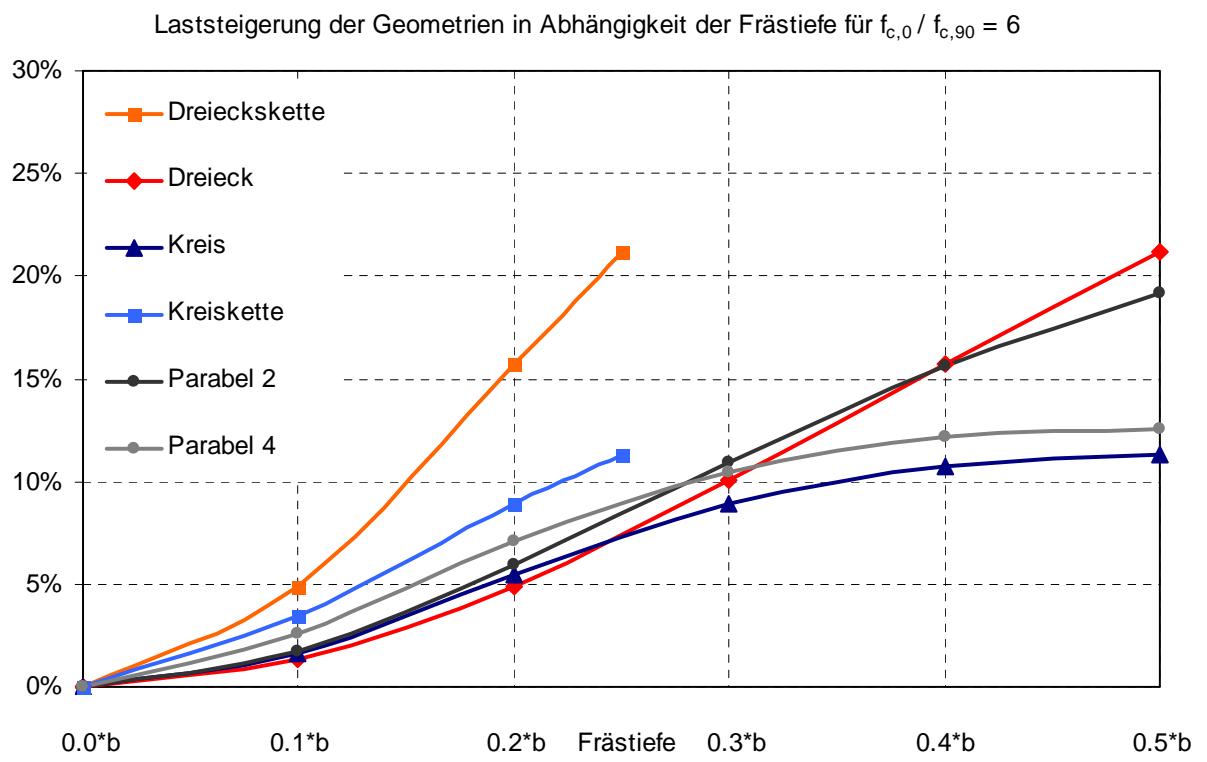


Abbildung 5-21: Theoretische Laststeigerung der Geometrien in Abh. der Frästiefe für  $f_{c,0}/f_{c,90}=6$

## 5.7 Kleinversuche mit verschiedenen Geometrien

Es wurden Versuche im Labormassstab durchgeführt, um die rechnerisch ermittelten Leistungssteigerungen für verschiedenen Anschlussgeometrien zu verifizieren.

## 5.8 Geprüfte Anschlussgeometrien

Folgende Anschlussgeometrien wurden untersucht:

- 1) D-45 - Dreiecksförmige Anschlussgeometrie mit 45° Winkel
- 2) D-ftb - Dreiecksförmige Anschlussgeometrie mit Frästiefenbeschränkung auf 40 mm
- 3) D-k. - Dreieckskettenförmige Anschlussgeometrie mit zwei 45° Winkel Dreiecken
- 4) Halbk. - Halbkreisförmige Anschlussgeometrie
- 5) K-seg. - Kreisförmige Anschlussgeometrie mit Frästiefenbeschränkung auf 40 mm
- 6) H-ket. - Halbkreiskettenförmige Anschlussgeometrie mit zwei Halbkreisen
- 7) Par. - Parabelförmige Anschlussgeometrie
- 8) Ell. - Ellipsenförmige Anschlussgeometrie

Die Anschlussgeometrien sind in Abbildung 5-23 dargestellt. Die individuellen Prüfkörper sind in Anhang A1 dargestellt. Der gewählte Prüfkörperquerschnitt war 60 mm x 60 mm; die Länge der Pfosten 100 mm und die Länge der Schwellen 460 mm. Von jeder Anschlussgeometrie wurden 5 Prüfkörper hergestellt und gestestet. Es wurde getrocknetes Fichtenholz der Klasse C24 verwendet. Exemplarisch wurde für drei Prüfkörper eine Feuchtemessung mit einem Feuchtemessgerät von Bollmann durchgeführt. Der Mittelwert der durchgeführten Messungen ergab eine Holzfeuchte von 10.7%.

## 5.9 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden auf einer Universalprüfmaschine Schenck Trebel im Labor der BFH-AHB durchgeführt. Die Prüfkörper wurden zwischen zwei parallelen Eisenplatten auf Druck (Abbildung 5-22) mit einer konstanten weggesteuerten Prüfgeschwindigkeit von 1.5 mm/min geprüft. Die aufgebrachte Kraft und die Verformung des Anschlusses wurden aufgezeichnet. Es ist anzumerken, dass es bei der gewählten Prüfeinrichtung nicht möglich war, zwischen der reinen Anschlussverformung und der Stauung des Pfostens parallel zur Faser zu unterscheiden. Es wird angenommen, dass die gesamte gemessene Verformung im Anschlussbereich auftritt. Die Versuche wurden bei Erreichen einer Verformung von 3 mm abgebrochen.

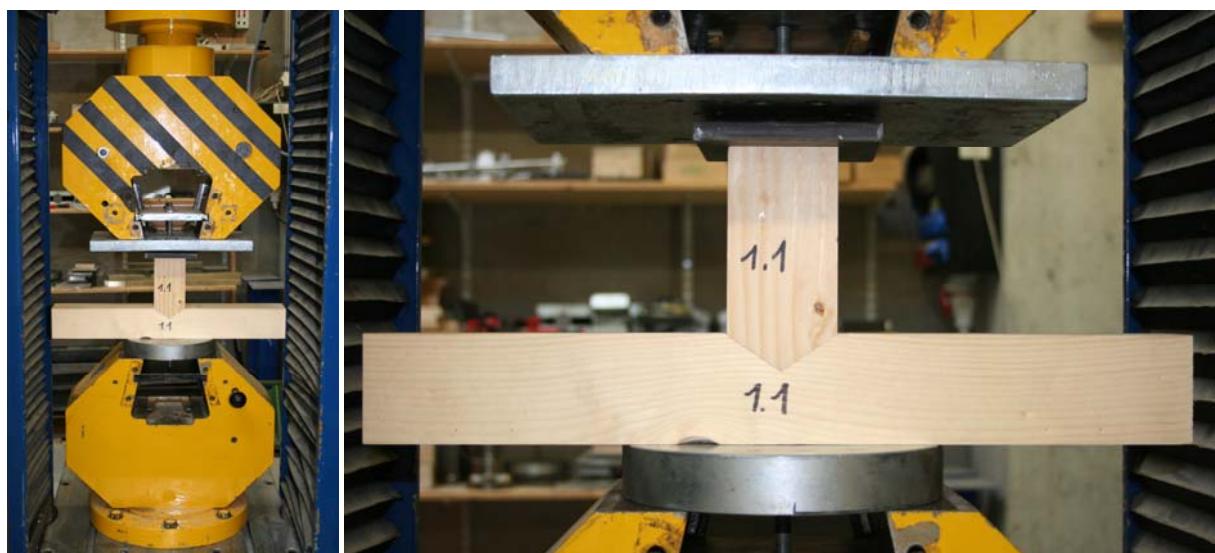


Abbildung 5-22: Prüfkörper der Kleinversuche im Testapparat

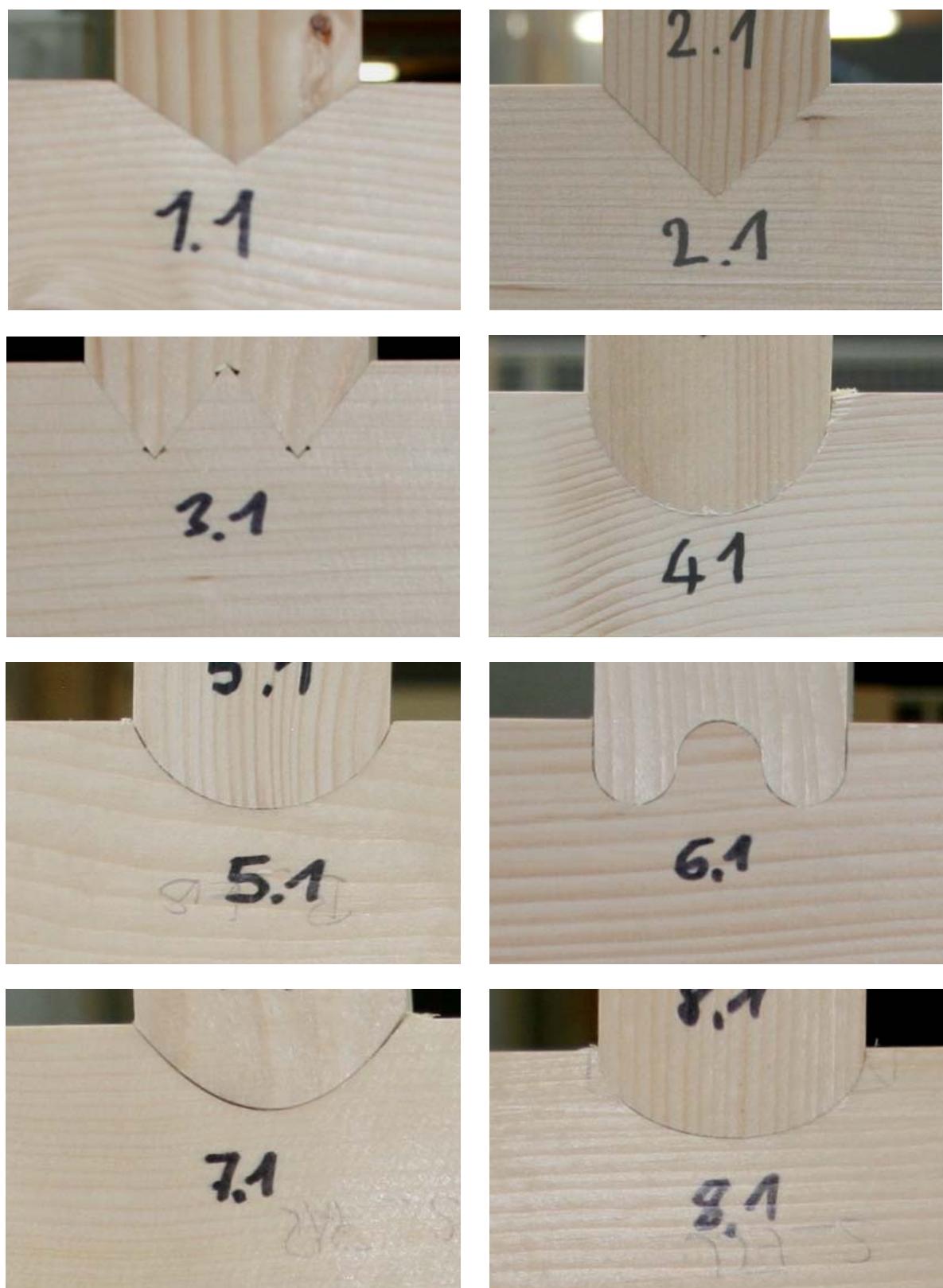


Abbildung 5-23: Geprüfte Anschlussgeometrien der Kleinversuche

## 5.10 Ergebnisse der Kleinversuche

Abbildung 5-24 illustriert die mittleren Last-Verformungs-Kurven der Anschlussgeometrien. Die Last-Verformungs-Kurven der individuellen Prüfkörper sind in Anhang A2 dargestellt.

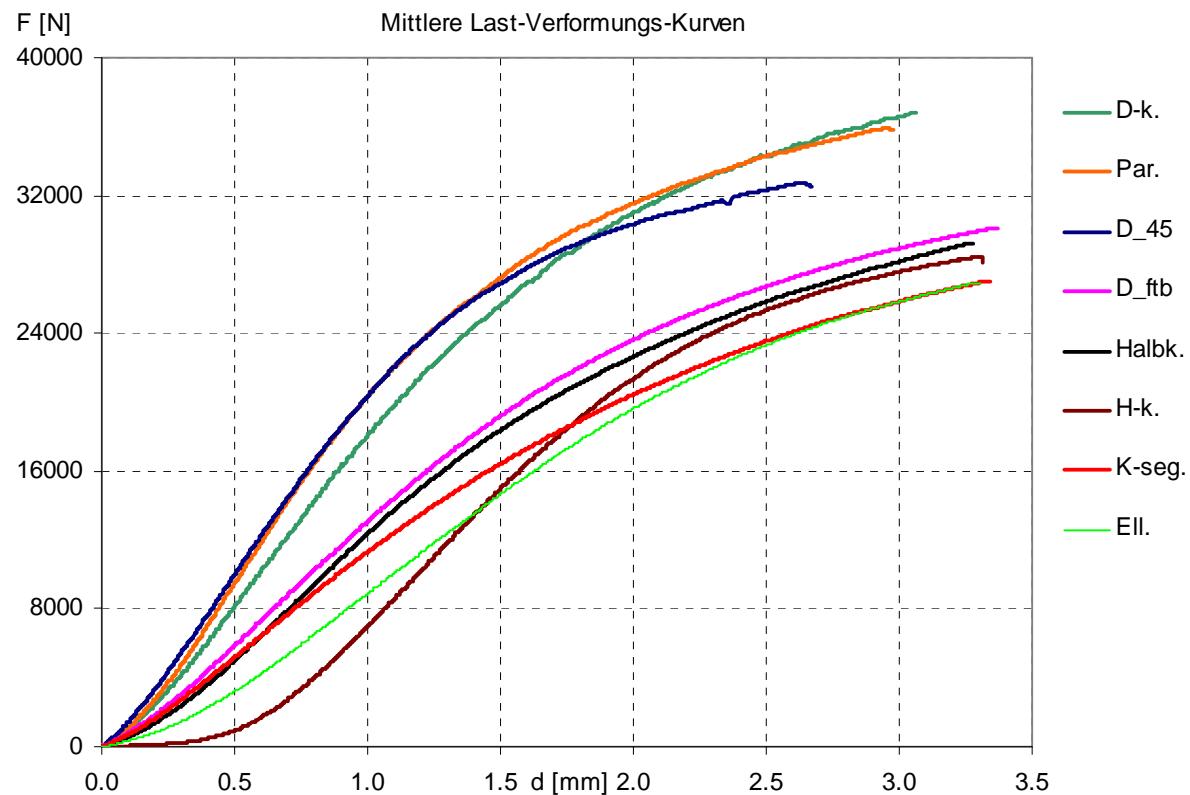


Abbildung 5-24: Mittlere Last-Verformungskurven der Kleinversuche

Abbildung 5-24 verdeutlicht, dass die dreiecksförmige, die dreieckskettenförmige und die parabelförmige Anschlussgeometrien die günstigsten Last-Verformungs-Kurven aufweisen. Um eine bessere Aussage über die unterschiedlichen Verformungseigenschaften der Anschlussgeometrien treffen zu können, wurden die Verformungen bei spezifischen Werten der aufgebrachten Last graphisch dargestellt (Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26) und zusammengestellt (Tabelle 5 2).

Als relevante Verformungen wurden die Werte 1.0mm und 2.0mm ausgewählt. Die Diagramme verdeutlichen, dass zu Beginn der Prüfung relative geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Anschlussgeometrien existieren. Allerdings weisen die halbkreiskettenförmige und die ellipsenförmige Geometrie besonders geringe Kräfte bei den Verformungen 1.0mm. Dies deutet darauf hin, dass diese Geometrien besonders anfällig gegenüber Herstellungsungenaugigkeiten sind.

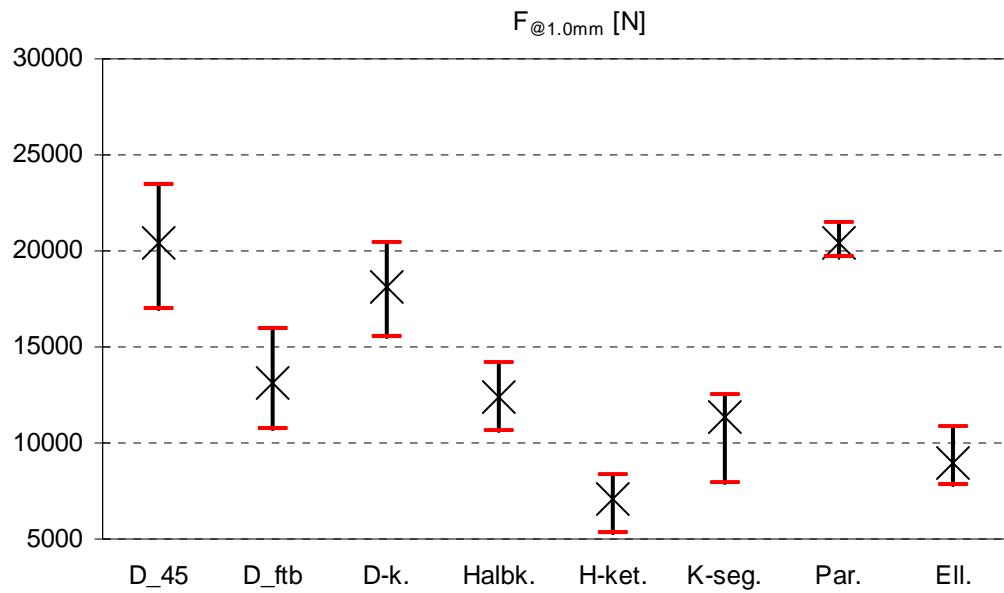


Abbildung 5-25: Aufgebrachte Lasten bei 1.0 mm Verformung (Kleinversuche)

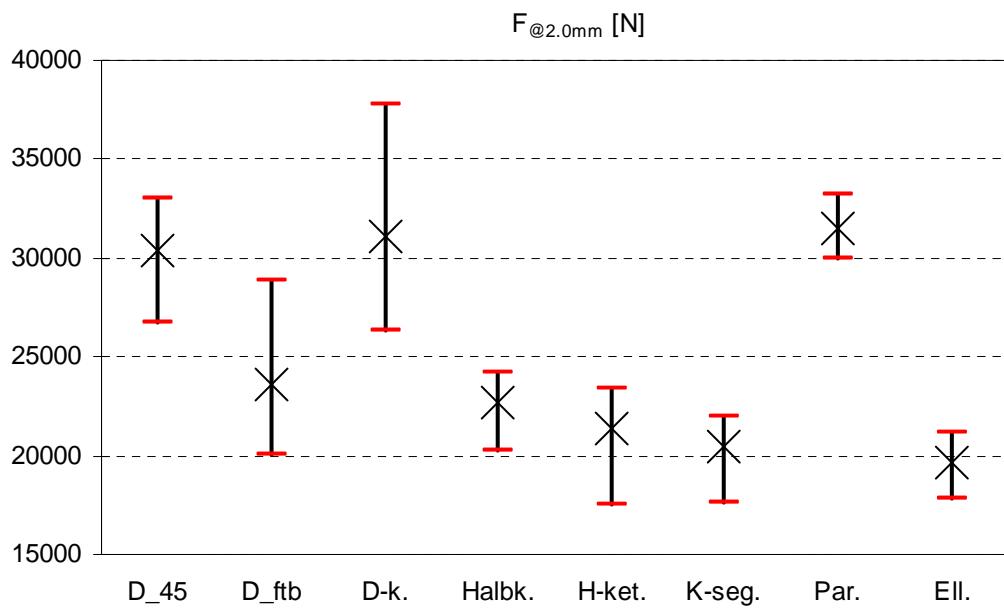


Abbildung 5-26: Aufgebrachte Lasten bei 2.0 mm Verformung (Kleinversuche)

Tabelle 5-2: Aufgebrachte Lasten bei verschiedenen Verformungen (Kleinversuche)

Geometrie		F@1.0mm	F@2.0mm
D_ftb	Mittelw.	13'111	23'651
	StAbw.	1'873	3'218
D_45	Mittelw.	20'398	30'351
	StAbw.	2'305	2'402
D-k.	Mittelw.	18'121	31'063
	StAbw.	1'737	4'239
Halbk.	Mittelw.	12'389	22'657
	StAbw.	1'626	1'466
K-seg	Mittelw.	11'343	20'461
	StAbw.	1'947	1'755
H-ket.	Mittelw.	7'042	21'401
	StAbw.	1'197	2'388
Par.	Mittelw.	20'382	31'547
	StAbw.	701	1'183
Ell.	Mittelw.	8'924	19'653
	StAbw.	1'245	1'230

Um eine statistische Aussage über die beobachteten Unterschiede treffen zu können, wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt (Anhang A3). Für alle untersuchten Verformungswerte sind die Unterschiede zwischen den Anschlussgeometrien statistisch signifikant mit einer Vertrauensbasis von 95%. Eine Analyse wurde durchgeführt, um beurteilen zu können, welche der individuellen Geometrien sich voneinander unterscheiden.

Die aus Abbildung 5-24 gewonnen Erkenntnisse wurden bestätigt. Die dreiecksförmige, die dreieckskettenförmige und die parabelförmige Anschlussgeometrien weisen die grösste Lasteinleitung bei jeder gegebenen Verformung auf. Die ellipsenförmige Anschlussgeometrie weisst die geringste Lasteintragung auf und die halbkreiskettenförmige Anschlussgeometrie weist statistisch signifikant grössere Anfangsverformungen auf.

Zu beachten ist, dass keine detaillierte Analyse der Zusammenhänge zwischen Jahrringorientierung (tangential oder radial), Jahrringbreite und Rohdichte der verwendeten Prüfkörper und des experimentell beobachteten Last-Verformungsverhalten durchgeführt wurde. Es ist bekannt, dass diese physikalischen Materialkennwerte einen gewissen Einfluss auf die Druckfestigkeit quer zur Faser haben. Eine genauere statistische Auswertung kann das Risiko ausschliessen, dass die experimentellen Ergebnisse in ihrer Aussagekräftigkeit beeinträchtigt wurden.

## 6 GROSSVERSUCHE

### 6.1 Herstellungsmöglichkeiten und Material

Theoretische Untersuchungen zeigten auf, dass in Abhängigkeit von Anschlussgeometrie und Verhältnis zwischen Querdruck- und Längsdruckfestigkeit die einleitbare Kraft erhöht werden kann. Die durchgeführten Kleinversuche bestätigten dieses Potential. Die aus Vorbetrachtungen und Kleinversuchen gewonnenen Erkenntnisse sind in die Planung der Grossversuche im Massstab 1:1 eingeflossen. Unter Berücksichtigung der praktischen Notwendigkeit, die Frästiefe zu begrenzen, wurden folgende Anschlussgeometrien getestet:

- |        |  |         |
|--------|--|---------|
| i) N   | - Normale (plane) Anschlussgeometrie                   | Serie N |
| ii) D  | - Dreieckskettenförmige Anschlussgeometrie             | Serie D |
| iii) H | - Halbkreiskettenförmige Anschlussgeometrie            | Serie H |
| iv) P  | - Parabelförmige Anschlussgeometrie                    | Serie P |
| v) V   | - Planer Anschluss, verstärkt mit Vollgewindeschrauben | Serie V |
| vi) S  | - Plane Anschlussgeometrie mit Setzholz aus Buche      | Serie S |

Die Prüfkörper wurden aus BSH GL24h aus Fichte mit einem Querschnitt 120mm x 120mm gefertigt. Die Möglichkeiten zur Herstellung der ausgewählten nicht-planen Kontaktfläche mit CNC-Fertigungsmaschinen wurden in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner abklärt. Die Geometrien waren mit der heutigen CNC-Technik einfach programmierbar und herstellbar.

#### **Normale (plane) Anschlussgeometrie**

Der plane Anschluss (Abbildung 6-1 links) ist eine reine Querdruckverbindung und entspricht dem Stand der Technik, für nicht verstärkte Anschlüsse. Die einleitbare Kraft erhöht sich proportional mit Vergrösserung des Querschnittes. Die Verbindung ist einfach auszuführen, die Lastübertragung ist beschränkt durch die Druckfestigkeit des Holzes quer zur Faser.

#### **Dreieckskettenförmiger Anschluss**

Mit dem dreieckskettenförmigen Anschluss (Abbildung 6-1 rechts) wird die einzuleitende Kraft in zwei Komponenten aufgeteilt: eine vertikale und eine horizontale Komponente (in Faserrichtung). Die Geometrie des Dreiecks auch bei Begrenzung der Frästiefe mit Hilfe einer Dreieckskette voll ausgenutzt werden.

#### **Halbkreiskettenförmiger Anschluss**

Beim halbkreiskettenförmigen Anschluss (Abbildung 6-2 links) wird die Keilwirkung, die beim dreiecksförmigen Anschluss entsteht, vermieden. Mit der Aneinanderreihung kleiner Halbkreise, kann unabhängig vom Durchmesser der Halbkreise die gleiche Kraft übertragen werden, wie durch einen Halbkreis über die ganze Pfostenbreite.

#### **Parabelförmiger Anschluss**

Der parabelförmige Anschluss (Abbildung 6-2 rechts) kann im Vergleich zum Halbkreis, bei gleicher Fräsbreite und Frästiefe, weniger Kraft übertragen. Der Querdruckanteil nimmt zu und die einleitbare Kraft entsprechend ab. Die Geometrie wurde dennoch für die Grossversuche ausgewählt, da sie einfach herstellbar ist.

#### **Verstärkte plane Anschlüsse**

In Abbildung 6-3 sind die verstärkten planen Anschlüsse dargestellt: mit einem Setzholz aus Buche 120x60x240/180 mm (links) und mit Vollgewindeschrauben(je 9 Stk. SFS WT-T 6.5 x 90) und Stahlplatte (120x120x5 mm) (rechts).

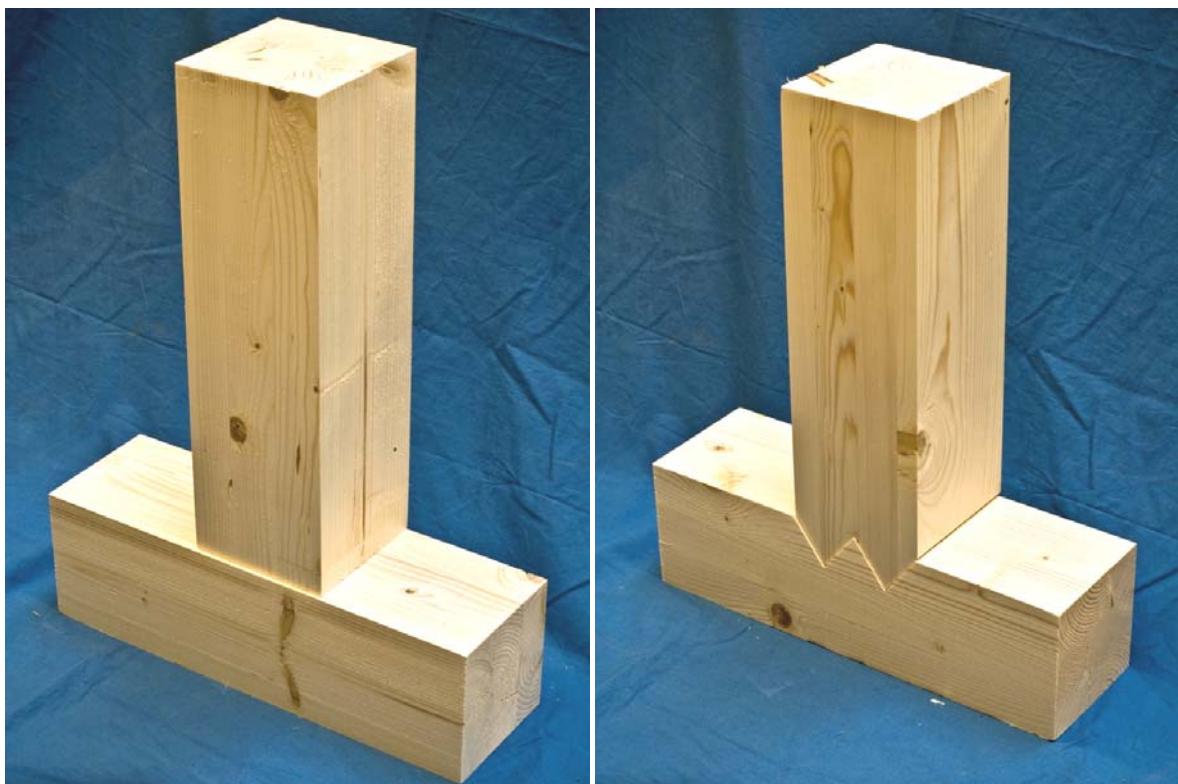


Abbildung 6-1: Planer Anschluss (links) und Anschluss mit Dreieckskettengeometrie (rechts)

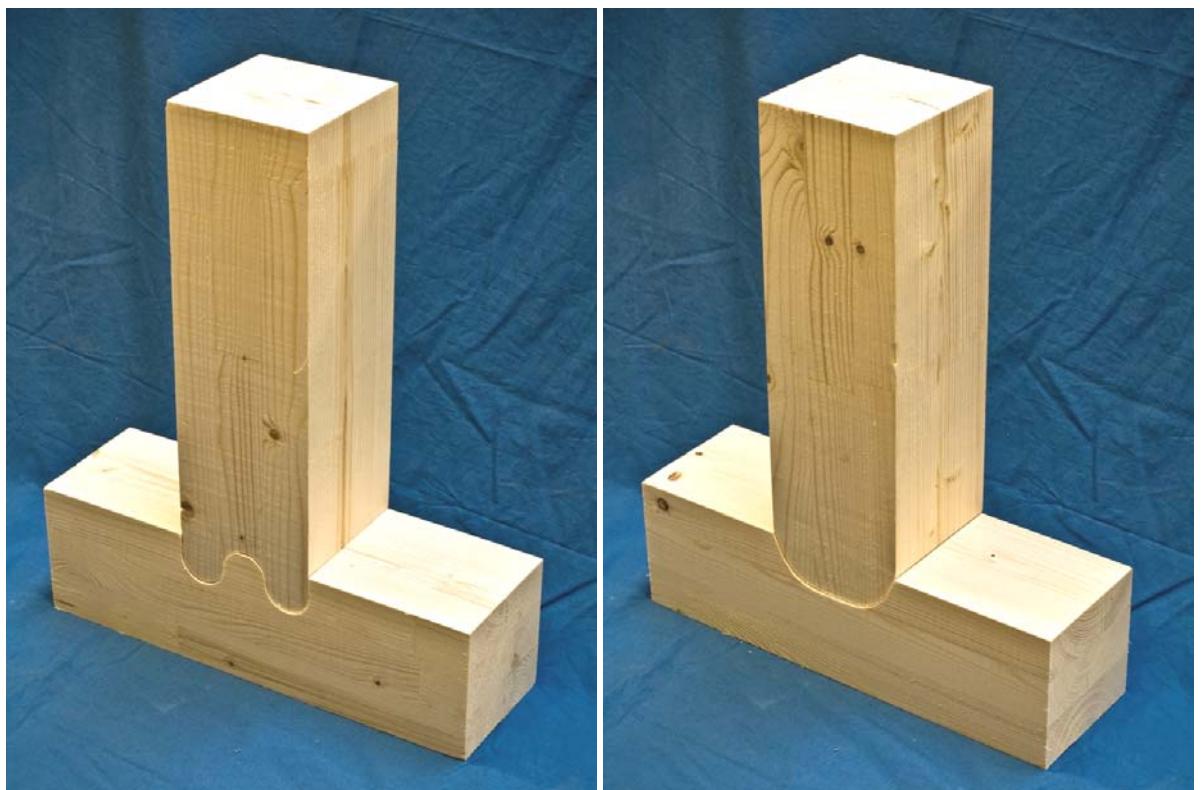


Abbildung 6-2: Anschluss mit Halbkreiskette (links) und mit Parabelgeometrie (rechts)

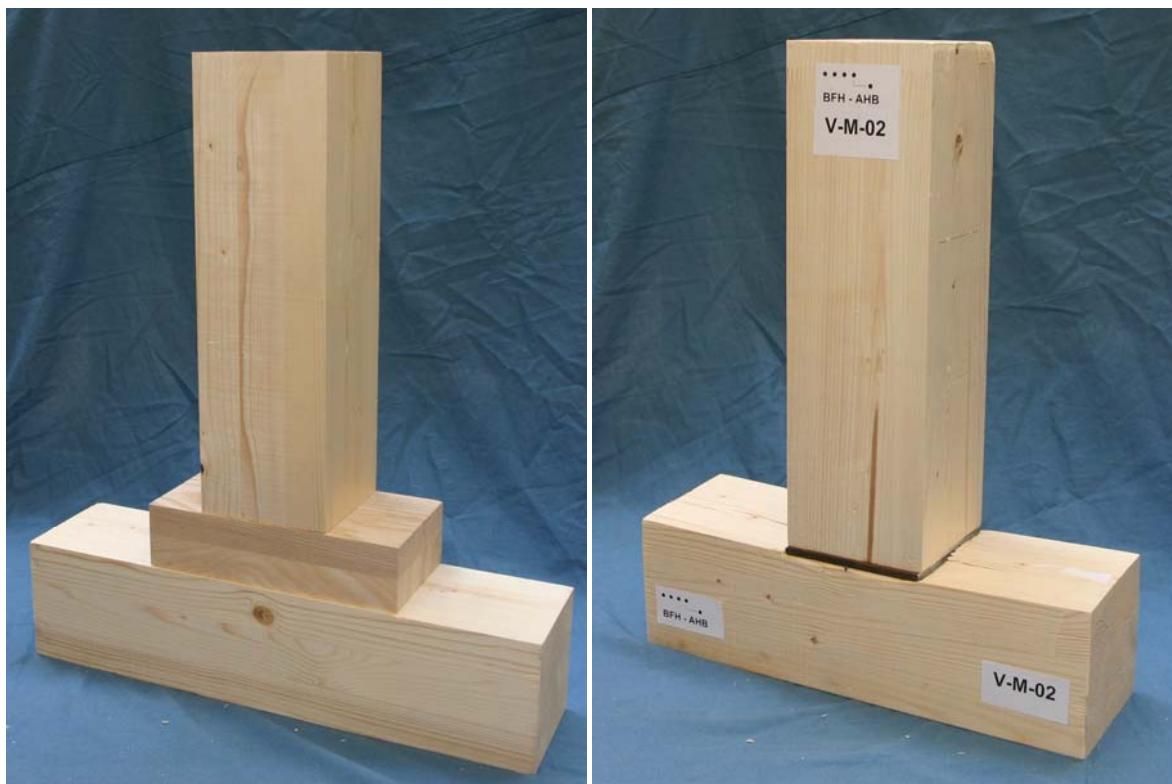


Abbildung 6-3: Anschluss verstärkt mit Setzholz (links) und mit Vollgewindeschrauben (rechts)

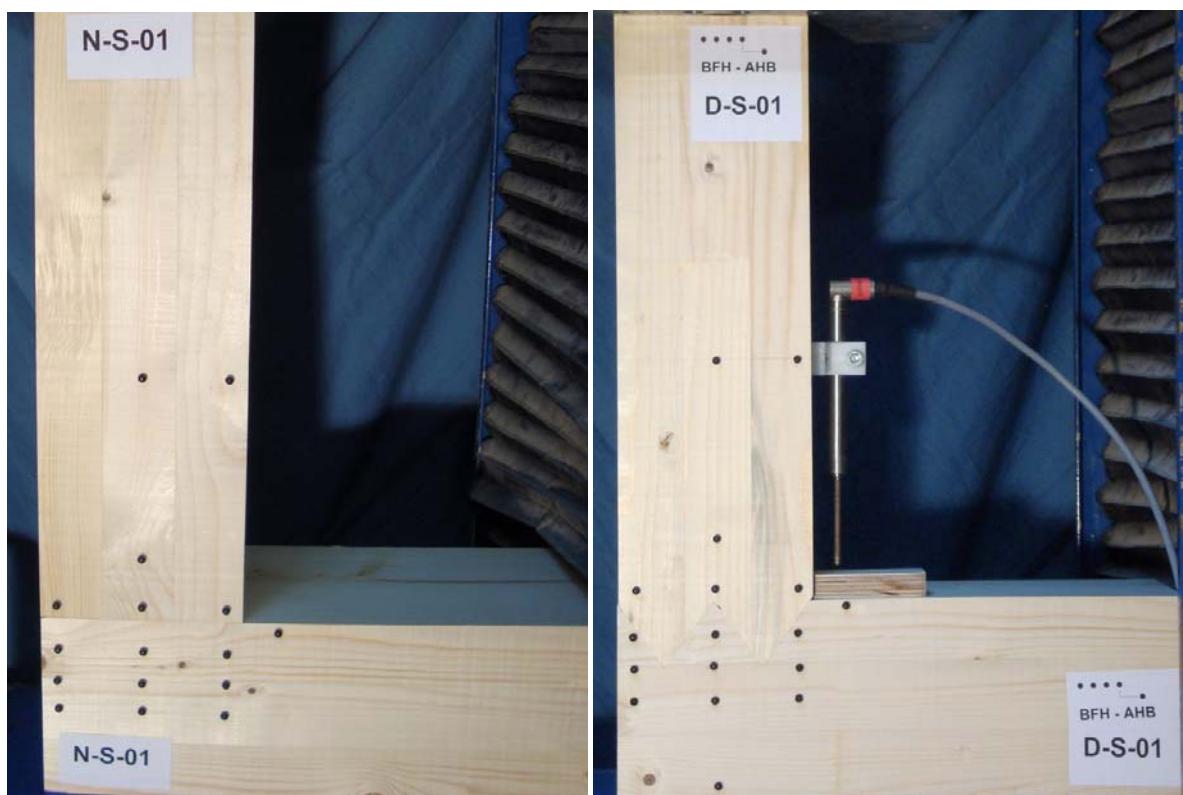


Abbildung 6-4: Anschlüsse ohne Vorholz: plan (links) und nichtplane (rechts)

## 6.2 Durchführung der Grossversuche Teil I

Von den Serien N, D, H und P wurden jeweils 22 Prüfkörper hergestellt. Davon wurden jeweils 11 Prüfkörper mit der Stütze in Trägermitte (mit Vorholz) getestet. Diese Serien sind mit \_M gekennzeichnet. Die verbleibenden 11 Prüfkörper wurden mit der Stütze am Trägerrand (ohne Vorholz) getestet. Diese Serien sind mit \_S gekennzeichnet. Von den vergleichsweise getesteten verstärkten planen Anschlüssen wurden jeweils 12 Prüfkörper hergestellt. Auch hier wurde jeweils die halbe Anzahl (6 Stück) mit Vorholz (\_M) und ohne Vorholz (\_S) getestet.

Die Versuche wurden auf einer Universalprüfmaschine Schenck Trebel im Labor der BFH-AHB durchgeführt. Die Prüfkörper wurden zwischen zwei parallelen Eisenplatten auf Druck (Abbildung 6-5) mit einer konstanten weggesteuerten Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min geprüft. Die aufgebrachte Kraft, der Traversenweg und die Verformung des Anschlusses wurden mit zwei kalibrierten Wegaufnehmern aufgezeichnet. Die Versuche wurden bei Erreichen einer Verformung von ca. 8 mm abgebrochen.

Zur Auswertung wurden die Aufzeichnungen des Traversenwegs herangezogen. Diese beinhalten allerdings zusätzlich zur Verformung des Anschlusses auch die Verformung der Prüfeinrichtung. Da diese Verformung aber unabhängig von der geprüften Anschlussgeometrie ist, wird der relative Vergleich zwischen den Anschlüssen nicht beeinflusst.



Abbildung 6-5: Prüfkörper der Grossversuche im Testapparat

## 6.3 Resultate der Grossversuche Teil I

### Last-Verformungs-Verhalten

Die mittleren Last-Verformungsdiagramme der Prüfserien sind in Abbildung 6-6 (für Serien mit Vorholz) und Abbildung 6-7 (für Serien ohne Vorholz) dargestellt. Die individuellen Last-Verformungs-Diagramme für alle individuellen Prüfkörper sind in Anhang B1 dargestellt.

Die Prüfserien weisen ein unterschiedliches Schlupfverhalten auf. Die planen Anschlussgeometrien (N, V, S) weisen nur sehr geringen Anfangsschlupf auf. Die Last wird von Beginn der Belastung über den kompletten Anschluss abgetragen.

Die nicht-planen Anschlussgeometrien hingegen weisen Anfangsschlupf auf, besonders die Prüfkörper mit halbkreiskettenförmigen und parabelförmigen Anschluss weisen erheblichen Schlupf auf. Dieses Verhalten ist jeweils bei Prüfkörpern mit und ohne Vorholz zu beobachten.

Die maximal eingeleiteten Kräfte sind sowohl bei den verstärkten Anschlüssen als auch bei den Anschlüssen mit nicht-planer Geometrie höher als bei der planen Anschlussgeometrie. Diese Kräfte treten aber bei sehr grossen Verformungen auf (grösser als 6 mm), liegen auch oberhalb der Proportionalitätsgrenze der Last-Verformungskurven, führen zu plastischen Verformungen (Abbildung 6-8) und sind daher für die Bemessung und die Baupraxis nicht relevant.

Wie zu erwarten und auch in der Bemessung nach SIA 265 berücksichtigt, können die Anschlüsse mit Vorholz wesentlich grössere Kräfte aufnehmen.

Als relevante Kenngrössen für den Vergleich der Anschlüsse wurden die die aufgetretene Verformung bei der Bemessungskraft ( $d@F_{zul}$ ), die Anschlusssteifigkeit ( $k$ ) und die eingeleitete Kraft bei einer Verformung von 2 mm ( $F@2mm$ ) herangezogen. Diese Werte sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Die Bemessungskraft wurde nach SIA 265 bestimmt und entspricht der aufnehmbaren Kraft eines Pfostens mit der Querschnittsfläche von 120 x 120 mm, bestimmt durch die Querdruckfestigkeit des Schwellenholzes. Es wird dabei für alle Anschlussgeometrien eine projektierte plane Kontaktfläche von der Grösse des Pfostenquerschnittes angenommen. Die Bemessungskraft für Anschlüsse mit Vorholz beträgt  $F_{zul,mV} = 36.0$  kN und für Anschlüsse ohne Vorholz  $F_{zul,OV} = 27.36$  kN für GL24h.

Die Anschlusssteifigkeit wurde für den Bereich 50% - 100% der Bemessungskraft berechnet, dieser Kennwert berücksichtigt nicht den Anfangsschlupf der Anschlussgeometrien. Als weiteres Kriterium wurde die eingeleitete Kraft bei einer Verformung von 2 mm herangezogen; dieser Kennwert berücksichtigt den Anfangsschlupf der Anschlussgeometrien.

### Statistische Auswertung

Die Werte aus Tabelle 6-1 sind in Abbildung 6-9 bis Abbildung 6-14 grafisch dargestellt und wurden statistisch mit einer Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet (Anhang B2). Für alle untersuchten Kenngrössen sind die Unterschiede zwischen den Anschlussgeometrien statistisch signifikant. Eine Analyse wurde durchgeführt, um beurteilen zu können, welche der individuellen Geometrien sich voneinander unterscheiden.

Bei den Anschlüssen mit Vorholz weisen die parabelförmigen und halbkreiskettenförmigen Anschlüsse signifikant grössere Setzungen bei Bemessungskraft auf, bei den Anschlüssen ohne Vorholz weist die halbkreiskettenförmige Geometrie signifikant grössere und die plane Geometrie signifikant kleinere Setzungen auf.

Die eingeleiteten Kräfte bei 2 mm Verformung sind bei den planen und verstärkten Anschlüssen mit Vorholz signifikant grösser, die Unterschiede zwischen den einzelnen nicht-planen Geometrien sind ebenfalls signifikant. Bei den Anschlüssen ohne Vorholz ergibt sich ein ähnliches Resultat: die planen und mit Vollgewindeschrauben verstärkten Anschlüssen zeigen signifikant kleinere Verformungen als alle anderen Anschlüsse, die halbkreiskettenförmigen Anschlüsse signifikant grössere.

Die Analyse der Steifigkeiten bestätigt die Erkenntnisse: mit Vollgewindeschrauben verstärkten Anschlüsse sind signifikant steifer als alle anderen Anschlüsse mit Vorholz, die parabelförmigen und halbkreiskettenförmigen Anschlüsse signifikant weniger steif. Bei Anschlüssen ohne Vorholz sind die planen und mit Vollgewindeschrauben verstärkten Anschlüssen signifikant steifer als alle anderen Anschlüsse, die parabelförmigen und halbkreiskettenförmigen Anschlüsse signifikant weniger steif.

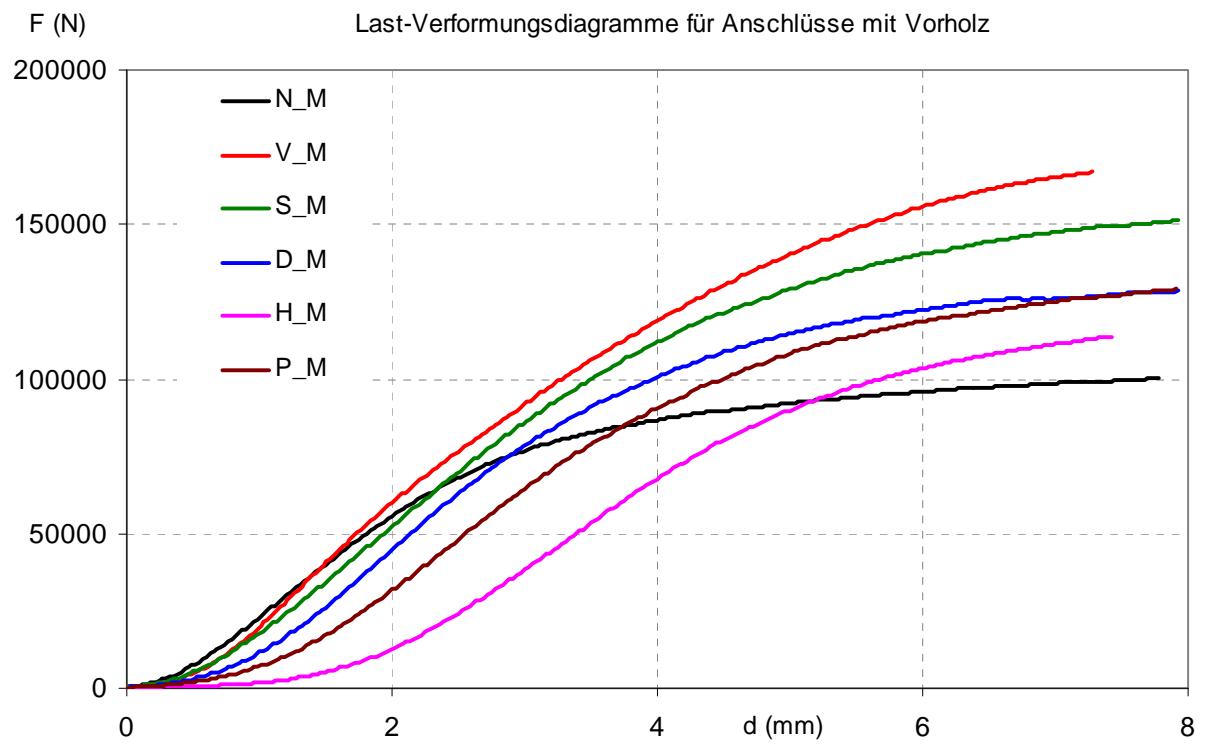


Abbildung 6-6: Last-Verformungsdiagramme für Anschlüsse mit Vorholz (Grossversuche Teil I)

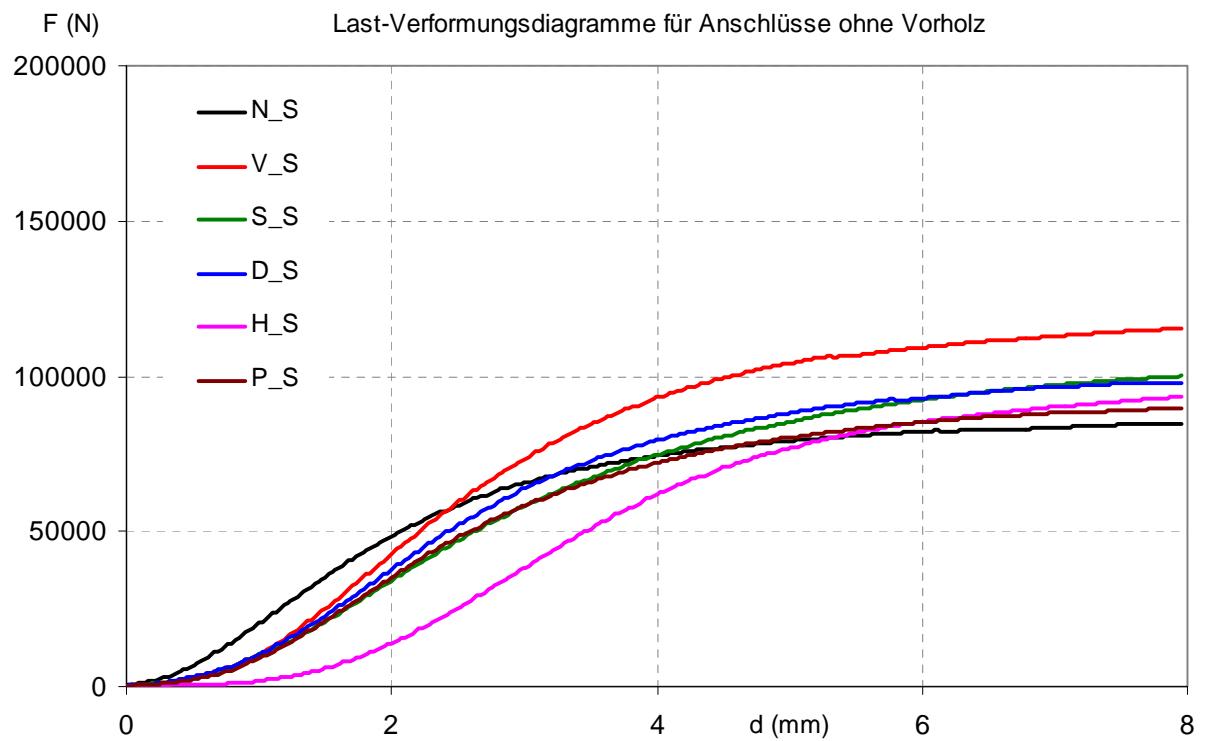


Abbildung 6-7: Last-Verformungsdiagramme für Anschlüsse ohne Vorholz (Grossversuche Teil I)

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Grossversuche Teil I

Geometrie		F@2mm (kN)	d@Fzul (mm)	k (kN/mm)
N_M	Mittelw.	55.8	1.4	35.1
	StAbw.	6.6	0.2	3.4
V_M	Mittelw.	59.1	1.4	40.7
	StAbw.	1.0	0.1	2.6
S_M	Mittelw.	51.5	1.5	34.0
	StAbw.	7.8	0.2	2.3
D_M	Mittelw.	44.0	1.8	34.9
	StAbw.	7.1	0.2	2.6
H_M	Mittelw.	12.3	3.1	30.6
	StAbw.	8.9	0.7	4.1
P_M	Mittelw.	31.1	2.1	31.0
	StAbw.	7.7	0.3	3.0
N_S	Mittelw.	48.0	1.2	30.6
	StAbw.	4.6	0.1	2.9
V_S	Mittelw.	41.9	1.6	32.0
	StAbw.	7.7	0.2	3.0
S_S	Mittelw.	33.8	1.7	25.0
	StAbw.	3.9	0.1	2.4
D_S	Mittelw.	37.3	1.7	29.6
	StAbw.	11.1	0.4	2.3
H_S	Mittelw.	13.5	2.7	25.4
	StAbw.	7.3	0.5	4.1
P_S	Mittelw.	34.8	1.7	27.4
	StAbw.	5.2	0.2	3.0



Abbildung 6-8: Getester Prüfkörper der Grossversuche

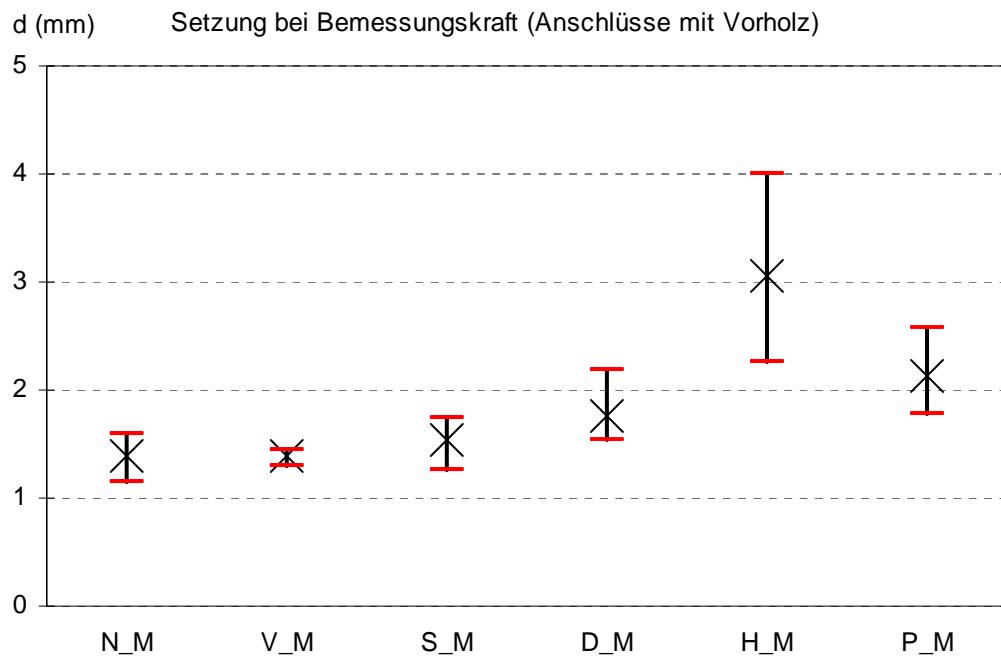


Abbildung 6-9: Verformung bei Bemessungskraft für Anschlüsse mit Vorholz (Teil I)

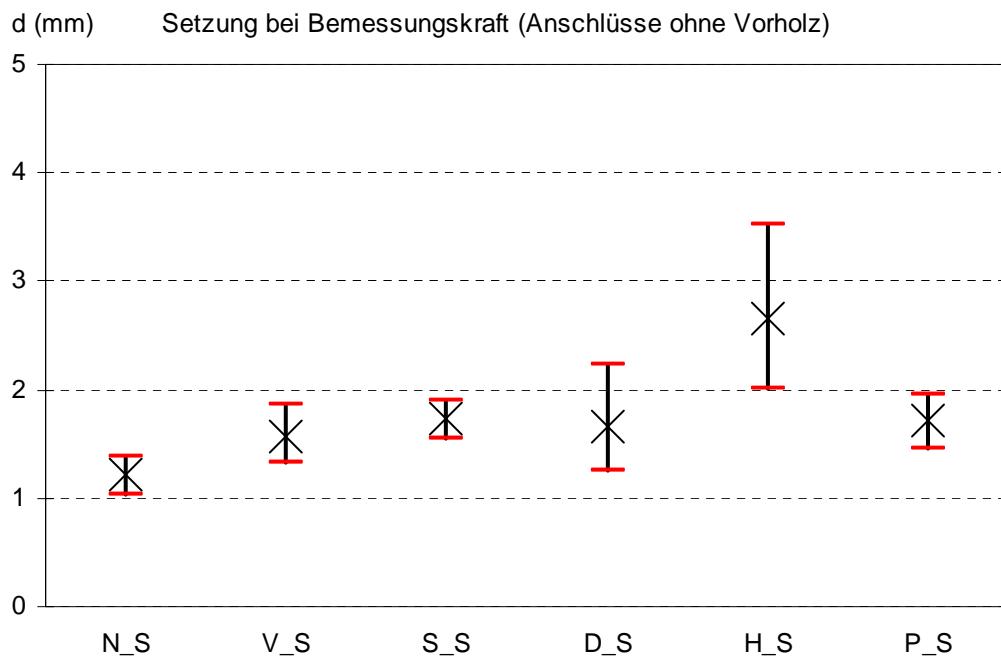


Abbildung 6-10: Verformung bei Bemessungskraft für Anschlüsse ohne Vorholz (Teil I)

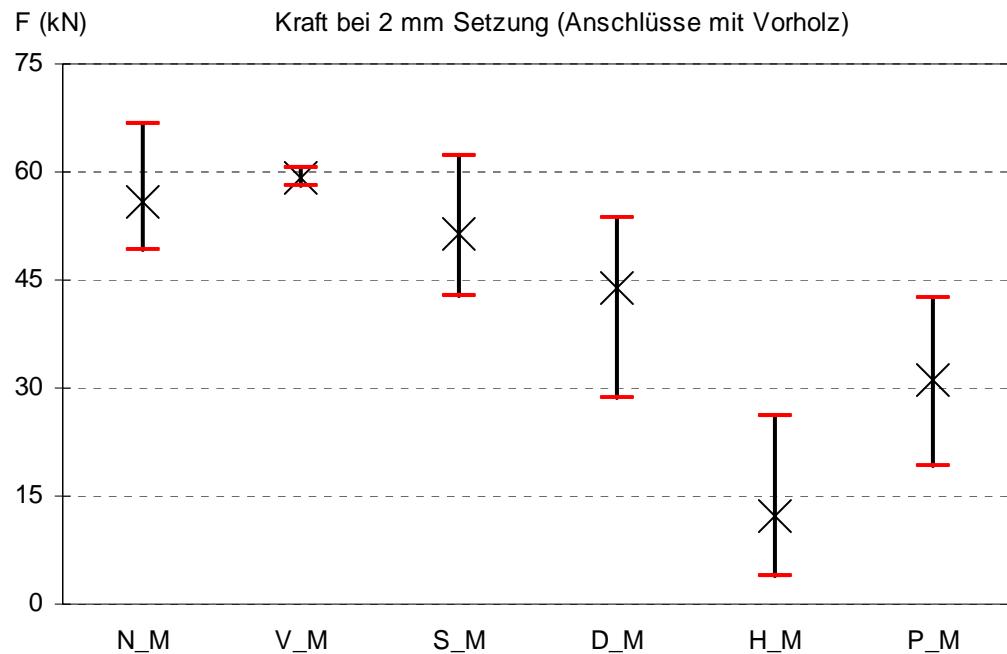


Abbildung 6-11: Lasten bei 2mm Setzung für Anschlüsse mit Vorholz (Teil I)

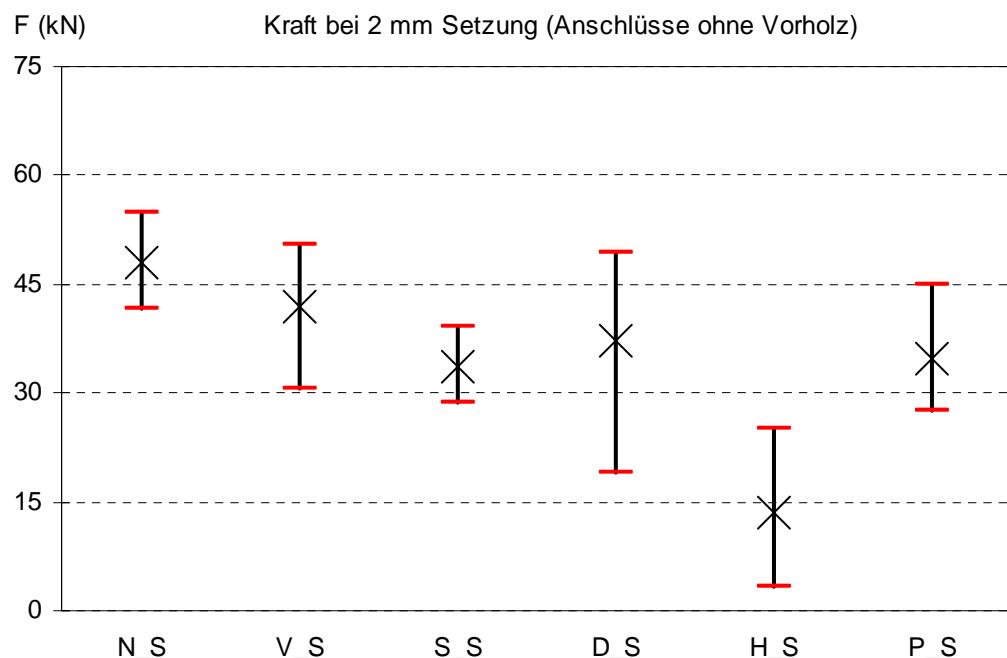


Abbildung 6-12: Lasten bei 2mm Setzung für Anschlüsse ohne Vorholz (Teil I)

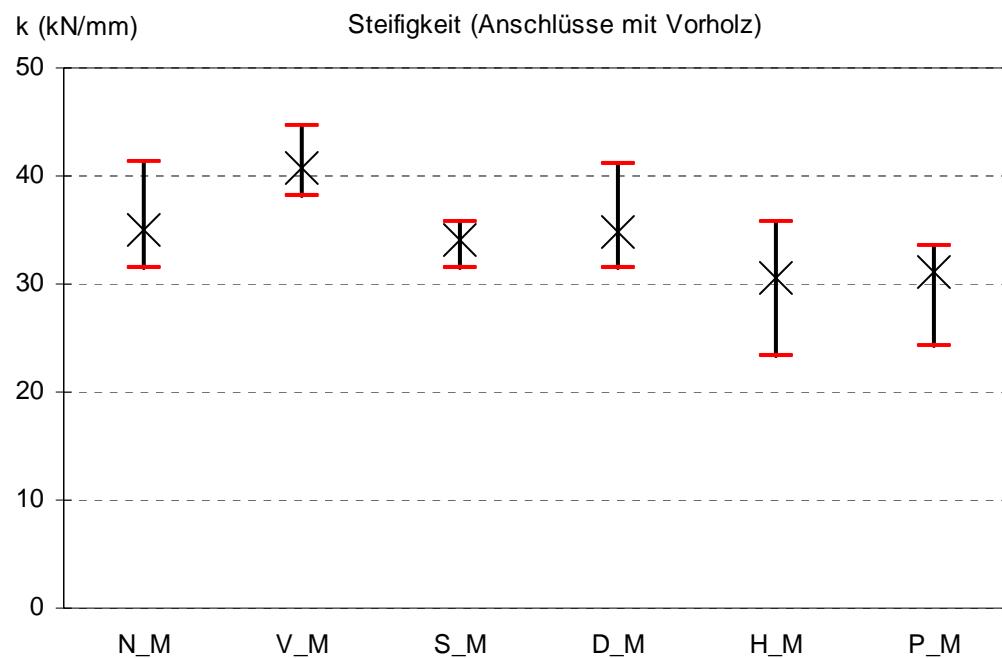


Abbildung 6-13: Steifigkeit der Anschlüsse mit Vorholz (Teil I)

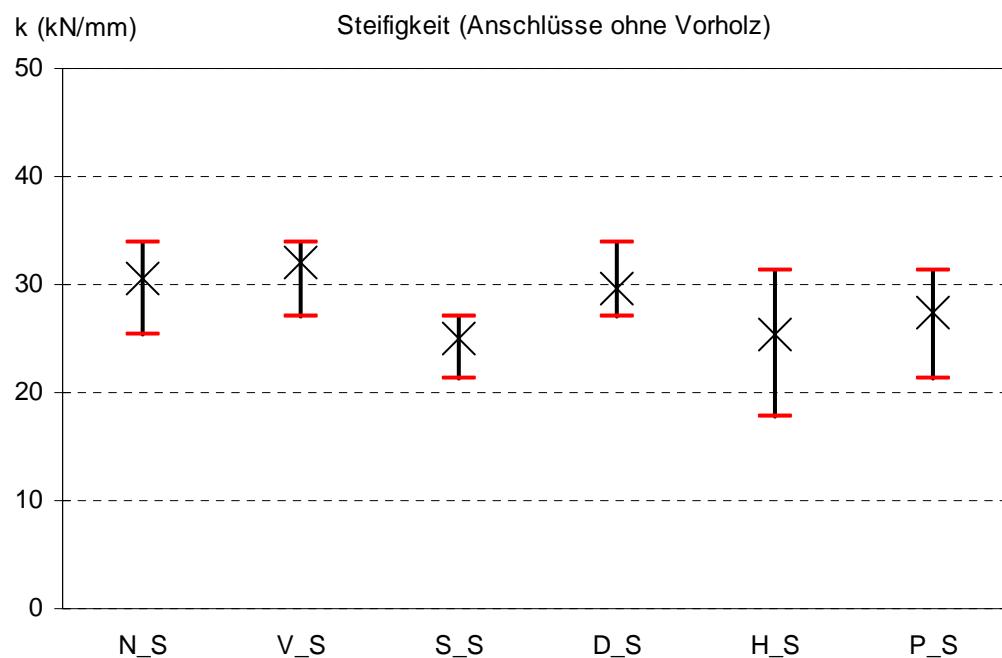


Abbildung 6-14: Steifigkeit der Anschlüsse ohne Vorholz (Teil I)

## 6.4 Diskussion der Grossversuche Teil I

Die ermittelten Last-Verformungsdiagramme der Prüfserien weisen ein unterschiedliches Schlupfverhalten auf. Während die planen Anschlussgeometrien (N, V, S) nur sehr geringen Anfangsschlupf aufweisen und die Last von Beginn der Belastung über den kompletten Anschluss abgetragen wird, weisen die nicht-planen Anschlussgeometrien hingegen Anfangsschlupf auf, besonders die Prüfkörper mit halbkreiskettenförmigen und parabelförmigen Anschluss. Ursachen dafür könnten folgende sein:

- i. Herstellungsungenauigkeiten durch die Präzision/ Feinheit des Werkzeuges
- ii. Herstellungsungenauigkeiten durch Art und Anzahl der Ansteuerungsvorgänge des Bearbeitungswerkzeuges auf das Werkstück
- iii. Schwinden durch Holzfeuchteänderungen im Zeitraum zwischen Herstellung und Montage

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Laststeigerungen welche in den theoretischen Vorüberlegungen ermittelt wurden, nicht erreicht wurden. Zwar sind die maximal eingeleiteten Kräfte sowohl bei den verstärkten Anschlüssen als auch bei den Anschlüssen mit nicht-planer Geometrie höher als bei der planen Anschlussgeometrie. Diese Kräfte treten aber bei sehr grossen Verformungen auf und sind daher für die Bemessung und die Baupraxis nicht relevant.

Die Auswertung der für die Baupraxis relevanten Kenngrössen: (i) aufgetretene Verformung bei der Bemessungskraft, (ii) die Anschlusssteifigkeit, und (iii) die eingeleitete Kraft bei einer Verformung von 2 mm zeigen deutlich, dass von den gewählten nicht-planen Anschlussgeometrien nur die dreieckskettenförmige Geometrie ein ähnliches Last-Verformungsverhalten wie die planen Anschlüsse aufweist. Wir eine erhöhte Anschlusssteifigkeit gewünscht, ist eine Verstärkung mit Vollgewindeschrauben und Stahlplatte am effektivsten.

Um das Problem des Anfangsschlupfes genauer zu untersuchen wurde eine weitere Reihe von Grossversuchen durchgeführt, bei der nur noch die dreieckskettenförmige Anschlussgeometrie mit dem planen Anschluss verglichen wird. Des Weiteren wird der Einsatz von Buche als Schwellenmaterial, in Kombination mit Fichte und Buche als Material der Stütze untersucht, um das Potential dieses Roh- und Werkstoffes zu untermauern.

Die Anschlüsse wurden im Labor der BFH-AHB hergestellt, um eine höchstmögliche Präzision zu ermöglichen und jegliche Feuchte- und damit Geometrieänderung der nicht-planen Anschlüsse zwischen dem Zeitpunkt der Herstellung und dem Moment der Prüfung zu vermeiden. Als zusätzliche Möglichkeit, den Anfangsschlupf zu minimieren, wurde eine Serie von dreiecksförmigen Anschlüssen mit einem Zweikomponenten Epoxydharz (SikaDur 330) verklebt.

## 6.5 Durchführung der Grossversuche Teil II

Es wurden weitere Versuche durchgeführt und dabei nur mittige Anschlüsse mit Vorholz betrachtet. Zusätzlich wurde Buchenholz betrachtet, dass aufgrund seiner grossen Druckfestigkeit quer zur Holzfaser sehr gut als Schwellen- bzw Trägermaterial geeignet ist (auch in Zusammenspiel mit Fichtenstützen). Als Materialien wurden Duobalken aus Fichte C24 und Brettschichtholz aus Buche D30 verwendet. Um den Einfluss Es wurden folgende Anschlussgeometrien und Materialkombinationen getestet:

- |  |              |
|--|--------------|
| i) Normale (plane) Geometrie (Fichte auf Fichte) | Serie N-F-F- |
| ii) Dreieckskette (Fichte auf Fichte)            | Serie D-F-F  |
| iii) Dreieckskette „geklebt“ (Fichte auf Fichte) | Serie Dk-F-F |
| iv) Normale (plane) Geometrie (Fichte auf Buche) | Serie N-F-B  |
| v) Dreieckskette (Fichte auf Buche)              | Serie D-F-B  |
| vi) Normale (plane) Geometrie (Buche auf Buche)  | Serie N-B-B  |
| vii) Dreieckskette (Buche auf Buche)             | Serie D-B-B  |

Von jeder Prüfserie wurden 8 Prüfkörper hergestellt und analog dem Verfahren der Grossversuche Teil I geprüft. Abbildung 6-15 zeigt einen Prüfkörper der Serie Dk-F-F. Es wurde darauf geachtet, dass die komplette Kontaktfläche mit einer gleichmässigen Klebstoffschicht von ca. 1mm Dicke bedeckt wurde. Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 zeigen Prüfkörper der Anschlüsse mit Buchenholz und die Anschlüsse der Kombination aus Buchen- und Fichtenholz.

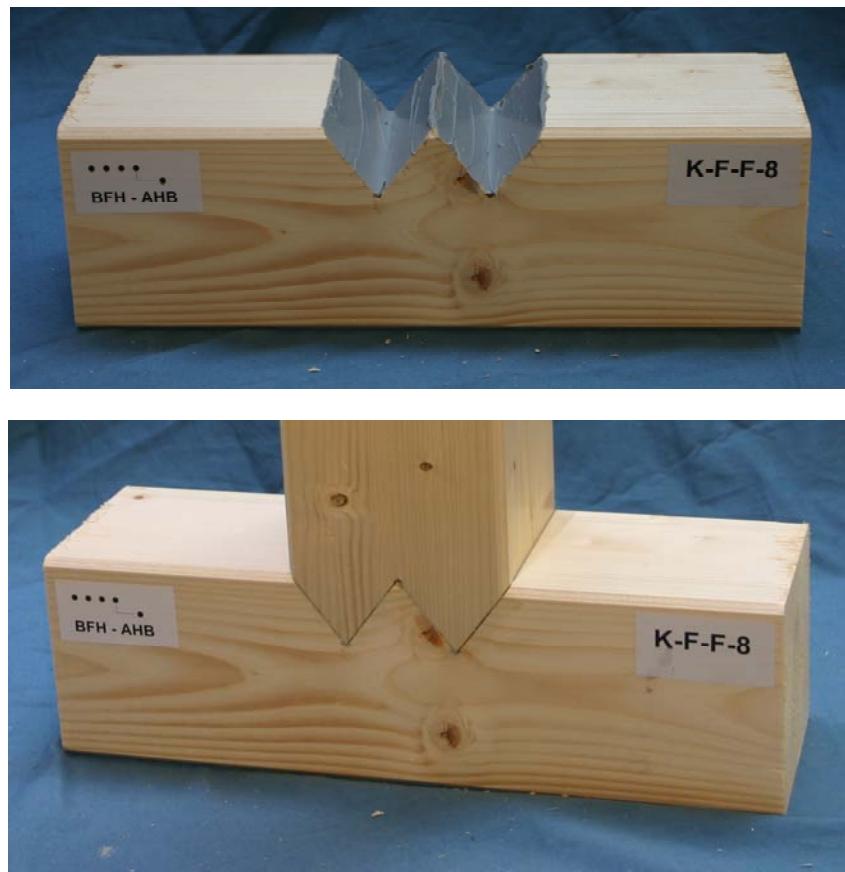


Abbildung 6-15: Geklebter Anschluss: Herstellung (oben) und Prüfkörper (unten)



Abbildung 6-16: Anschluss aus Buche: plan (links) und dreieckskettenförmig (rechts)

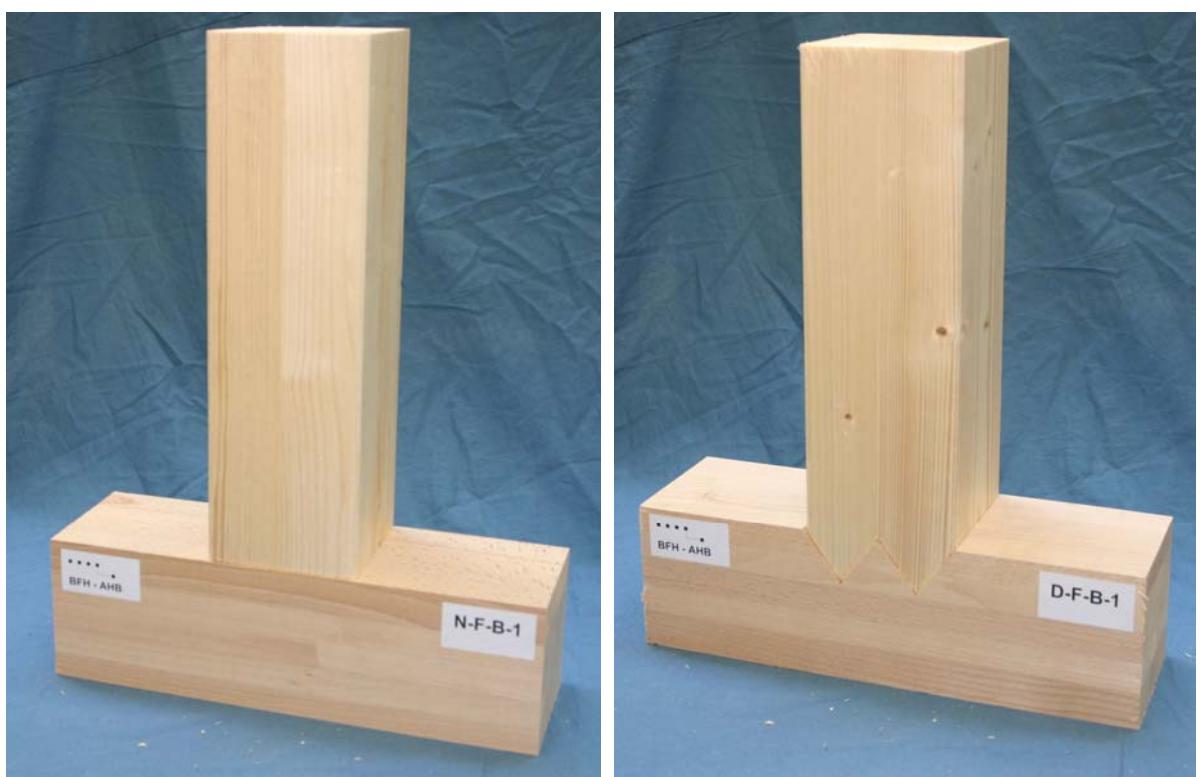


Abbildung 6-17: Anschluss Fichtenstütze auf Buche: plan (links) und dreieckskettenförmig (rechts)

## 6.6 Resultate der Grossversuche Teil II

### Last-Verformungs-Verhalten

Die mittleren Last-Verformungsdiagramme der Prüfserien sind in Abbildung 6-18 dargestellt. Die individuellen Last-Verformungs-Diagramme für alle individuellen Prüfkörper sind in Anhang B3 dargestellt.

Die Prüfserien weisen ein geringeres und weniger unterschiedliches Schlupfverhalten auf als die Prüfserien der Grossversuche Teil I. Die maximal eingeleiteten Kräfte sind sowohl bei den Anschlüssen mit dreiecksförmiger Geometrie wiederum höher als bei der planen Anschlussgeometrie. Diese Kräfte liegen aber erneut oberhalb der Proportionalitätsgrenze der Last-Verformungskurven und können daher in der Baupraxis nicht ausgenutzt werden. Wird Buche als Schwellenmaterial verwendet, sind die maximal eingeleiteten Kräfte wesentlich höher als bei Fichte, besonderes in der Kombination mit der dreiecksförmigen Geometrie. Ein Einsatz von Buche als Stützenmaterial erbringt eine weitere Laststeigerung, und auch der Bereich der elastischen Verformung wird vergrössert. Die zusätzliche Verklebung des dreieckskettenförmigen Anschlusses verringerte den Schlupf.

Als relevante Kenngrössen für den Vergleich der Anschlüsse wurden analog zu Teil I der Grossversuche die aufgetretene Verformung bei der Bemessungskraft ( $d@F_{zul}$ ), die Anschlusssteifigkeit ( $k$ ) und die eingeleitete Kraft bei einer Verformung von 2 mm ( $F@2mm$ ) herangezogen. Zusätzlich wurde noch die aufgetretene Verformung bei einer last von 36 kN ( $d@36kN$ ) betrachtet, um einen Vergleich zu den Resultaten der Grossversuche Teil I bei Anschlüssen mit Vorholz zu ermöglichen. Diese Werte sind in Tabelle 6-2 aufgeführt.

Die Bemessungskraft wurde nach SIA 265 bestimmt und entspricht der aufnehmbaren Kraft eines Pfostens mit der Querschnittsfläche von 120 x 120 mm, bestimmt durch die Querdruckfestigkeit des Schwellenholzes. Dies sind 33.1 kN für Anschlüsse auf Fichtenschwelle C24 und 100.8 kN für Anschlüsse auf Buchenschwelle D30 (beides mit Vorholz). Da die rechnerische Querdruckfestigkeit von Buche ( $f_{c,90,d} = 7.0 \text{ N/mm}^2$ ) geringer ist als die Längsdruckfestigkeit von Fichte ( $f_{c,0,d} = 12.0 \text{ N/mm}^2$ ), ist rechnerisch für allen Anschlüssen die Querdruckfestigkeit des Schwellenholzes massgebend.

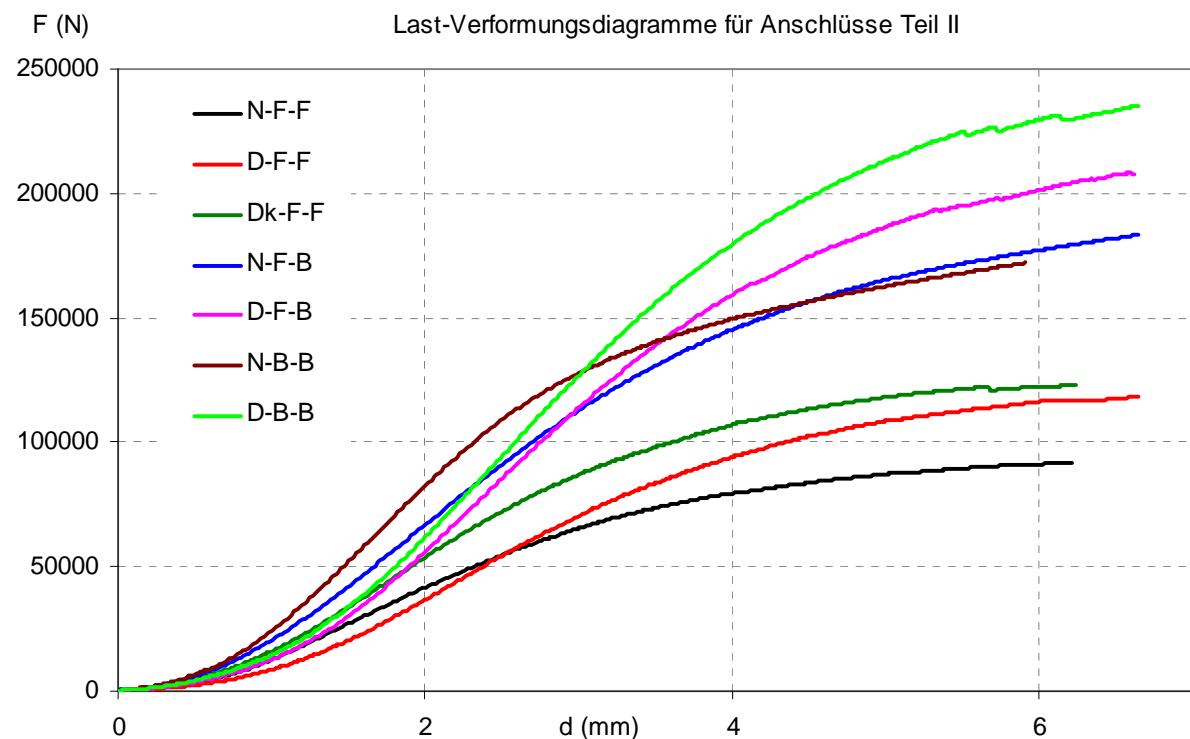


Abbildung 6-18: Last-Verformungs-Diagramme Hauptversuche Teil II

Tabelle 6-2: Zusammenstellung der Ergebnisse der Hauptversuche Teil II

Geometrie		F@2mm (kN)	d@Fzul (mm)	k (kN/mm)	d@36kN (mm)
N-F-F	Mittelw.	42.6	1.70	31.8	1.79
	StAbw.	3.9	0.10	3.3	0.10
D-F-F	Mittelw.	36.5	1.91	32.1	1.99
	StAbw.	8.9	0.26	4.1	0.27
Dk-F-F	Mittelw.	53.5	1.49	35.9	1.55
	StAbw.	8.4	0.19	3.9	0.19
N-F-B	Mittelw.	66.6	2.78	48.3	1.36
	StAbw.	11.8	0.34	13.1	0.25
D-F-B	Mittelw.	55.5	2.75	59.8	1.64
	StAbw.	13.6	0.24	1.6	0.23
N-B-B	Mittelw.	82.1	2.38	57.8	1.24
	StAbw.	18.2	0.40	9.8	0.27
D-B-B	Mittelw.	61.3	2.59	64.4	1.55
	StAbw.	10.5	0.17	1.8	0.16

### Statistische Auswertung

Die Werte aus Tabelle 6-2 sind in Abbildung 6-19 bis Abbildung 6-22 dargestellt und wurden statistisch mit einer Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet (Anhang B4).

Die eingeleiteten Kräfte bei 2 mm Verformung sind bei dem geklebten Anschluss signifikant grösser als beim nicht geklebten Anschluss. Die Kräfte bei Anschlüssen mit Buchenholz sind immer höher als bei den Anschlüssen Fichte auf Fichte und innerhalb der Anschlüsse mit Buche weist der plane Anschluss Buche auf Buche die höchsten Kräfte auf. Alle Anschlüsse mit Buchenholz weisen eine signifikant höhere Steifigkeit auf als die Anschlüsse mit Fichte, die Unterschiede innerhalb der Buchen- bzw. Fichtenanschlüsse sind nicht signifikant.

Die geklebten Anschlüsse weisen die geringsten Setzungen bei der Bemessungskraft auf; sie sind signifikant kleiner als die Setzungen der nicht geklebten dreiecksförmigen Geometrie. Die Setzungen aller reinen Fichtenanschlüsse sind signifikant kleiner als die der Anschlüsse mit Buchenholz, unabhängig von der gewählten Geometrie. Die Anschlüsse mit Ficht auf Buche weisen die grössten Setzungen auf, wiederum unabhängig von der Geometrie.

Vergleicht man die Setzungen bei einer einheitlichen Kraft von 36 kN ändert sich das Ergebnis radikal. Hier zeigen die planen Anschlüsse mit Buchenholz die günstigsten wette auf, gefolgt von den nicht-planen Anschlüssen mit Buchenholz und dem geklebten Anschluss.

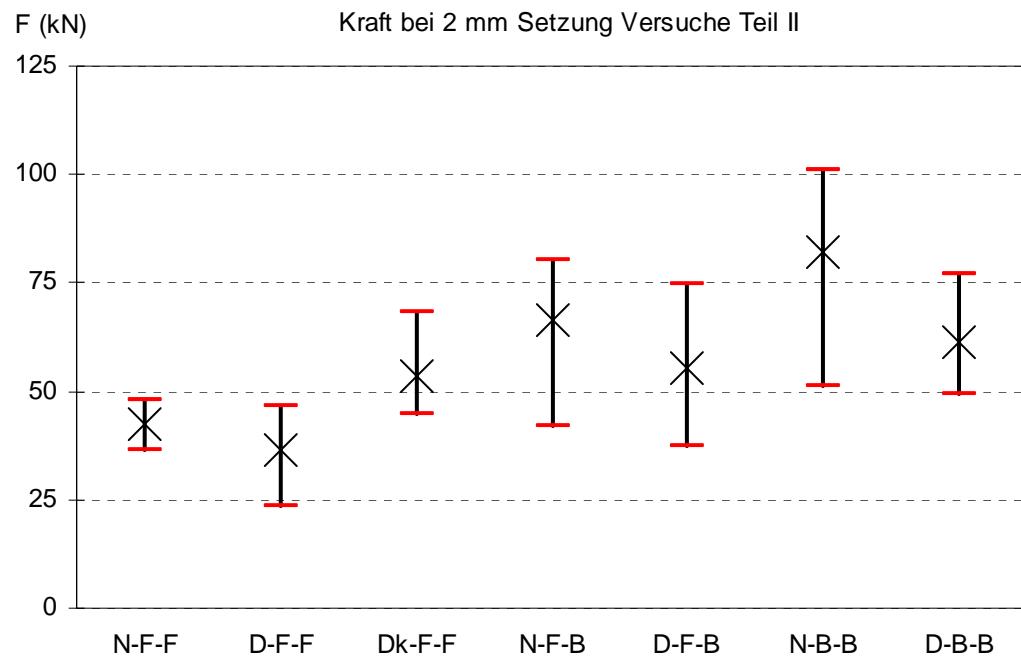


Abbildung 6-19: Lasten bei 2mm Setzung (Teil II)

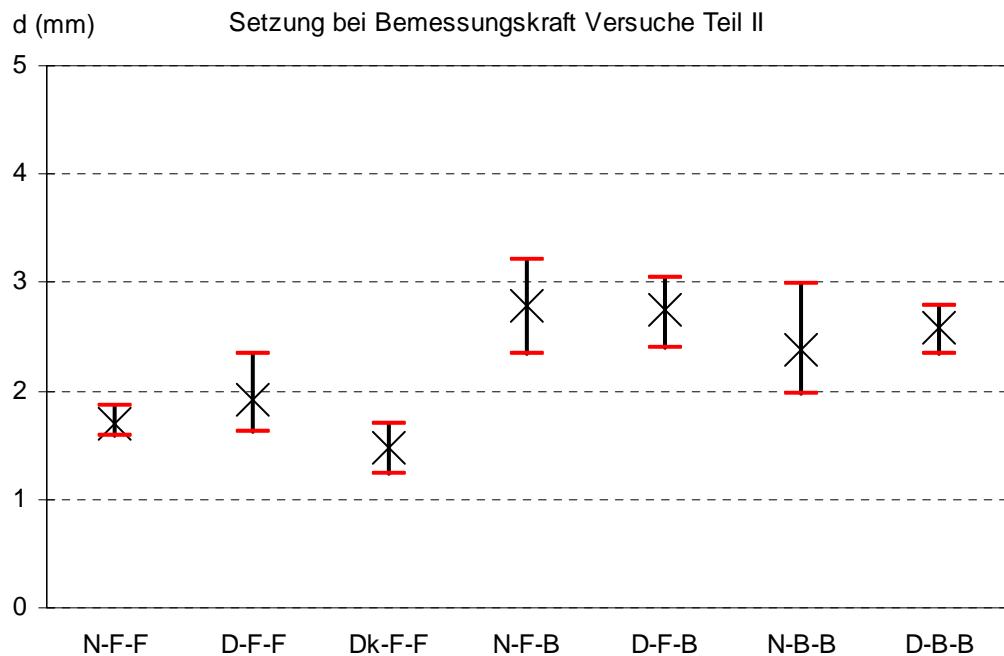


Abbildung 6-20: Verformung bei Bemessungskraft (Teil II)

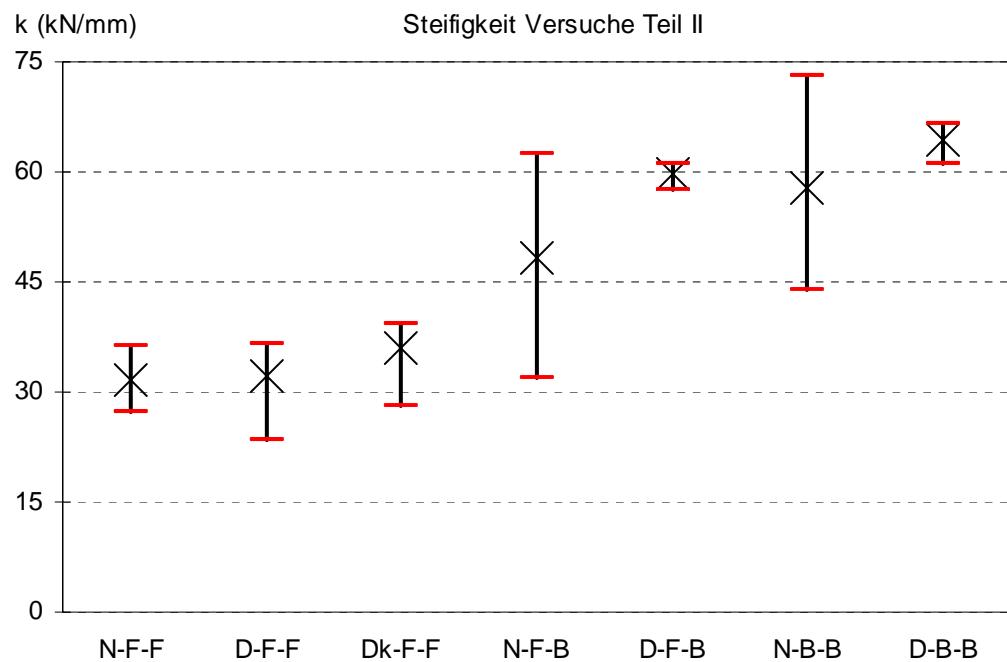


Abbildung 6-21: Steifigkeit der Anschlüsse (Teil II)

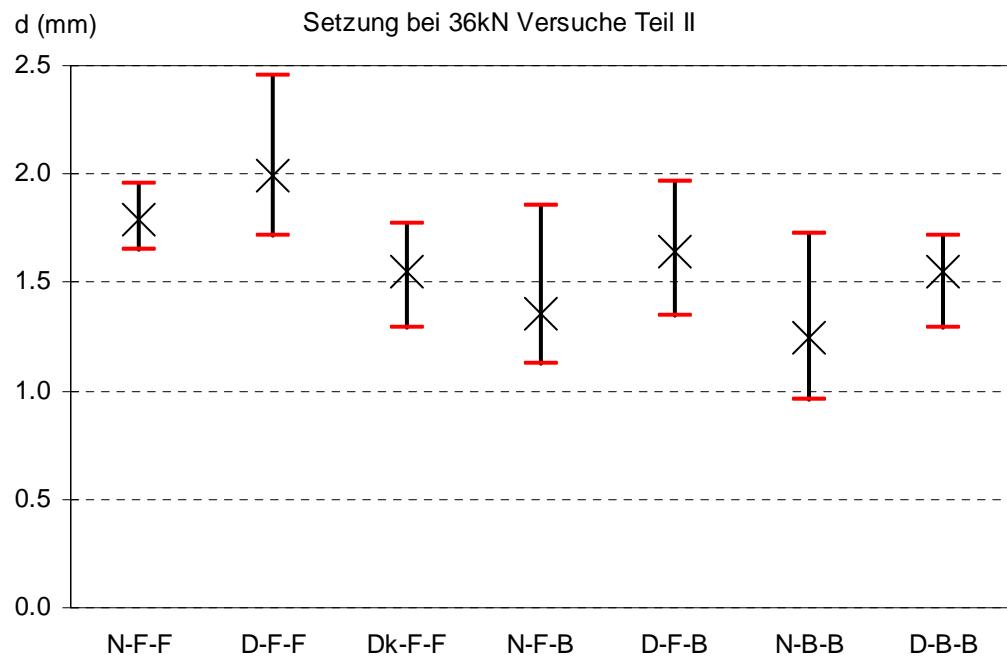


Abbildung 6-22: Verformung bei 36kN (Teil II)

## 6.7 Diskussion der Grossversuche Teil II

Die Prüfserien weisen ein geringeres und weniger unterschiedliches Schlupfverhalten auf als die Prüfserien der Grossversuche Teil I. Dies deutet darauf hin, dass die Herstellung der Prüfkörper unter Laborbedingungen höhere Genauigkeiten ermöglicht, als eine industrielle Fertigung. Des Weiteren hat die Herstellung und Prüfung der Anschlüsse in kontrolliertem Laborklima ohne Feuchte- und Temperaturschwankungen dazu beigetragen, dass keinerlei Holzfeuchteänderungen und damit kein Quellen oder schwinden des Holzes auftrat.

Die maximal eingeleiteten Kräfte sind sowohl bei den Anschlüssen mit dreiecksförmiger Geometrie als auch bei Buchenanschlüssen höher als bei der planen Anschlussgeometrie. Diese Kräfte liegen aber erneut oberhalb der Proportionalitätsgrenze der Last-Verformungskurven und können daher in der Baupraxis nicht ausgenutzt werden. Wird Buche als Schwellenmaterial verwendet, sind die maximal eingeleiteten Kräfte wesentlich höher als bei Fichte und eine weitere Laststeigerung im elastischen Bereich wird ermöglicht.

Die zusätzliche Verklebung des dreieckskettenförmigen Anschlusses verringerte nicht nur den Schlupf, sondern führte auch zu einer Steigerung der eingeleiteten Last bei 2 mm Setzung (53.5 kN) gegenüber dem planen Anschluss (42.6 kN) und der ungeklebten Dreieckskette (36.5 kN). Dies ist auf die ausgleichende und lastverteilende Eigenschaft des Klebstoffes zurückzuführen. Die hohe Festigkeit des Klebstoffes verhindert lokale Eindrückungen bei Fräsgenauigkeiten und von Holzfasern unterschiedlicher Festigkeit.

Unbedingt zu erwähnen ist die Steigerung der eingeleiteten Last bei 2 mm Setzung und die Erhöhung der Anschlusssteifigkeit bei den Prüfkörpern mit Buchenschwelle. Dieses extrem vorteilhafte Verhalten von Buche schlägt sich allerdings nicht in der Setzung bei Bemessungskraft nieder, begründet durch die wesentlich höhere Bemessungskraft eines Buchenanschlusses im Vergleich zum Fichtenanschluss. Wird zusätzlich zur Buchenschwelle auch noch Buche als Material für die Stütze verwendet, ergibt sich eine weitere Verbesserung des Last-Verformungsverhaltens. Dies weist darauf hin, dass trotz der durchwegs höheren Längsdruckfestigkeit des Stützenholzes gegenüber dem Schwellenholz das Schwellenmaterial bei der Ermittlung der Bemessungskraft nicht isoliert betrachtet werden sollte.

### **Vergleich mit Grossversuchen Teil I**

Durch Verwendung einer anderen Materialfestigkeit für das Fichtenholz lassen sich die Werte für gleiche Geometrien aus den Grossversuchen Teil I und II nicht direkt vergleichen. Deshalb wird auf eine gemeinsame statistische Auswertung alle Grossversuche verzichtet.

Bei den Versuchen Teil I beträgt die Setzung bei der Bemessungslast beim planen Anschluss 1.4 mm, bei der Dreieckskette 1.8 mm, das heisst eine Erhöhung um ca. 29%. Bei den Versuchen Teil II ist die Setzung bei der Dreieckskette vergleichsweise nur ca. 12%. Dies liefert ein weiteres Indiz dafür, dass die Herstellung der Prüfkörper unter Laborbedingungen höhere Genauigkeiten ermöglicht, als eine industrielle Fertigung und dass keinerlei Holzfeuchteänderungen des Holzes auftraten.

## 7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

### **Vorbetrachtungen**

Mit den im Rahmen des Projektes durchgeföhrten theoretischen Betrachtungen und Kleinversuchen wurde bestätigt, dass Potential besteht, die einleitbare Kraft in einen Pfosten-Träger Anschluss mit einer nicht-planen Kontaktfläche zu erhöhen. Theoretische Untersuchungen zeigten auf, dass in Abhängigkeit von Anschlussgeometrie und Verhältnis zwischen Querdruck- und Längsdruckfestigkeit die einleitbare Kraft um bis zu 30 % erhöht werden kann. Dreiecksförmige, dreieckskettenförmige und parabelförmige Geometrien wiesen die grösste theoretische Laststeigerung auf. Experimentelle Untersuchungen mit kleinen Prüfkörpern bestätigten dieses vorteilhafte Last-Verschiebungsverhalten der nicht-planen Anschlussgeometrien. Allerdings wurde bei den Kleinversuchen nur die Problematik der einleitbaren Kraft im Anschluss Träger-Pfosten betrachtet und die Querschnittsschwächung der Schwelle nicht in die Betrachtungen eingeschlossen.

### **Grossversuche**

Die Hauptversuche zeigten allerdings, dass nicht-plane Anschlussgeometrien bei industrieller Fertigung einen relativ grossen Anfangs-Schlupf aufweisen. Während die planen Anschlussgeometrien nur sehr geringen Anfangsschlupf aufweisen, weisen besonders halbkreiskettenförmige und parabelförmige Anschlüsse einen sehr grossen Schlupf auf. Als mögliche Ursachen wurden (i) Herstellungsungenauigkeiten und (ii) Schwinden durch Holzfeuchteänderungen im Zeitraum zwischen Herstellung und Montage identifiziert.

Die Laststeigerungen, welche in den theoretischen Vorüberlegungen ermittelt wurden, konnten in Grossversuchen nicht erreicht werden. Zwar sind die maximal einleitbaren Kräfte bei den Anschlüssen mit nicht-planer Geometrie deutlich höher als bei planen Anschlüssen, diese Kräfte treten aber bei sehr grossen Setzungen auf und sind für die Bemessung und die Baupraxis daher nicht relevant. Die Auswertung der für die Baupraxis relevanten Kenngrössen: (i) aufgetretene Setzung bei der Bemessungskraft, (ii) die Anschlusssteifigkeit, und (iii) die eingeleitete Kraft bei einer Setzung von 2 mm zeigten, dass nur die dreieckskettenförmige Geometrie ein ähnliches Last-Verformungsverhalten wie die planen Anschlüsse aufweist. Wird eine erhöhte Anschlusssteifigkeit gewünscht, ist eine Verstärkung mit Vollgewindeschrauben und Stahlplatte am effektivsten.

Um das Problem des Anfangsschlupfes genauer zu untersuchen wurden weitere Grossversuche mit dreieckskettenförmiger Anschlussgeometrie durchgeföhrte. Die Anschlüsse wurden unter Laborbedingungen mit höchstmöglicher Präzision hergestellt, um neben den Aspekten des Bearbeitungswerkzeuges auch jegliche Feuchte- und damit Geometrieänderung der nicht-planen Anschlüsse zwischen Herstellung und Prüfung zu vermeiden. Die Prüfserien weisen ein geringeres und weniger unterschiedliches Schlupfverhalten auf. Dies deutet darauf hin, dass die Herstellung der Prüfkörper unter Laborbedingungen höhere Genauigkeiten ermöglicht, als in industrieller Fertigung. Ein Einsatz nicht-planer Anschlüsse empfiehlt sich daher hauptsächlich in der Produktion von vorgefertigten Elementen.

Als zusätzliche Möglichkeit, den Anfangsschlupf zu minimieren, wurde eine Serie von dreiecksförmigen Anschlüssen mit einem Epoxydharz verklebt. Diese Klebung verringerte nicht nur den Schlupf, sondern führte auch zu einer Steigerung der einleitbaren Last bei 2 mm Setzung gegenüber dem planen Anschluss und der ungeklebten Dreieckskette. Abschliessend wurde der Einsatz von Buche als Schwellenmaterial, in Kombination mit Fichte und Buche als Material der Stütze untersucht. Die maximal einleitbaren Kräfte sind höher; die einleitbare Last bei 2 mm Setzung und die Anschlusssteifigkeit werden wesentlich erhöht. Dieses extrem vorteilhafte Verhalten von Buche schlägt sich allerdings nicht in einer kleineren Setzung bei Bemessungskraft wider. Dies ist begründet durch die wesentlich höhere Bemessungskraft eines Buchenanschlusses aufgrund der höheren Materialfestigkeit. Wird Buche auch als Stützenmaterial verwendet, ergibt sich eine weitere Verbesserung des Tragverhaltens.

Eine Optimierung von nicht-planen Anschlüssen sollte eine Verringerung des Anfangsschlupfes als Ziel haben. Dies kann durch folgende Massnahmen ergriffen werden: i) die Verwendung hochpräziser Werkzeuge, ii) eine optimale Vorkonditionierung, iii) die Verkürzung der Zeit zwischen Herstellung und Montage der Anschlusssteile, iv) eine luftdichte Verpackung der Teile zwischen Herstellung und Montage, v) eine Eliminierung der Passungenauigkeiten mittels einer Vorkraft vor Ort, und vi) eine Verklebung der Anschlüsse mit einem geeigneten Klebstoff. Unter Berücksichtigung dieser Empfehlungen kann das das Tragverhalten von Anschlüssen durch eine nicht-plane Geometrie verbessert werden.

## **8 BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT**

Dieser Bericht darf vervielfältigt werden. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt.

### **8.1 Umfang des Berichts**

Dieser Bericht besteht aus 63 Seiten inkl. Anhang.

## 9 VERZEICHNISSE

### 9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Anschluss Träger- Pfosten.....	4
Abbildung 5-1: Anschluss im traditionellen Holzbau .....	6
Abbildung 5-2: Anschluss im Rahmenbau .....	6
Abbildung 5-3: Mit Setzholz verstärkter Anschluss .....	6
Abbildung 5-4: Mit Schrauben verstärkter Anschluss .....	6
Abbildung 5-5: Druckfestigkeit von Fichte in Abhängigkeit des Faserlastwinkels .....	7
Abbildung 5-6: Darstellung der experimentellen Voruntersuchungen .....	8
Abbildung 5-7: Verformungsverhalten von planen Kontaktflächen.....	9
Abbildung 5-8: Verformungsverhalten von nicht-planen Kontaktflächen .....	9
Abbildung 5-9: Ermittlung der Tragfähigkeit aus Last-Verformungs-Kurven .....	10
Abbildung 5-10: Tragfähigkeit der Prüfkörper der Vorversuche.....	10
Abbildung 5-11: Lasteinleitung im nicht-planen Kontaktanschluss.....	11
Abbildung 5-12: Gerader Anschluss .....	12
Abbildung 5-13: Dreiecksförmiger Anschluss .....	12
Abbildung 5-14: Dreiecksförmiger Anschluss mit Frästiefenbeschränkung.....	12
Abbildung 5-15: Dreieckskettenförmiger Anschluss .....	13
Abbildung 5-16: Halbkreisförmiger Anschluss .....	13
Abbildung 5-17: Halbkreiskettenförmiger Anschluss .....	13
Abbildung 5-18: Kreissegmentförmiger Anschluss .....	14
Abbildung 5-19: Parabelförmiger Anschluss .....	14
Abbildung 5-20: Theoretische Laststeigerung der Geometrien in Abh. der Frästiefe für $f_{c,0}/f_{c,90}=10$ .....	17
Abbildung 5-21: Theoretische Laststeigerung der Geometrien in Abh. der Frästiefe für $f_{c,0}/f_{c,90}=6$ .....	17
Abbildung 5-22: Prüfkörper der Kleinversuche im Testapparat .....	18
Abbildung 5-23: Geprüfte Anschlussgeometrien der Kleinversuche .....	19
Abbildung 5-24: Mittlere Last-Verformungskurven der Kleinversuche.....	20
Abbildung 5-25: Aufgebrachte Lasten bei 1.0 mm Verformung (Kleinversuche).....	21
Abbildung 5-26: Aufgebrachte Lasten bei 2.0 mm Verformung (Kleinversuche).....	21
Abbildung 6-1: Planer Anschluss (links) und Anschluss mit Dreieckskettengeometrie (rechts).....	24
Abbildung 6-2: Anschluss mit Halbkreiskette (links) und mit Parabelgeometrie (rechts).....	24
Abbildung 6-3: Anschluss verstärkt mit Setzholz (links) und mit Vollgewindeschrauben (rechts).....	25
Abbildung 6-4: Anschlüsse ohne Vorholz: plan (links) und nichtplane (rechts) .....	25
Abbildung 6-5: Prüfkörper der Grossversuche im Testapparat.....	26
Abbildung 6-6: Last-Verformungsdiagramme für Anschlüsse mit Vorholz (Grossversuche Teil I).....	28
Abbildung 6-7: Last-Verformungsdiagramme für Anschlüsse ohne Vorholz (Grossversuche Teil I).....	28
Abbildung 6-8: Getesteter Prüfkörper der Grossversuche .....	29
Abbildung 6-9: Verformung bei Bemessungskraft für Anschlüsse mit Vorholz (Teil I) .....	30
Abbildung 6-10: Verformung bei Bemessungskraft für Anschlüsse ohne Vorholz (Teil I) .....	30

Abbildung 6-11: Lasten bei 2mm Setzung für Anschlüsse mit Vorholz (Teil I) .....	31
Abbildung 6-12: Lasten bei 2mm Setzung für Anschlüsse ohne Vorholz (Teil I).....	31
Abbildung 6-13: Steifigkeit der Anschlüsse mit Vorholz (Teil I) .....	32
Abbildung 6-14: Steifigkeit der Anschlüsse ohne Vorholz (Teil I) .....	32
Abbildung 6-15: Geklebter Anschluss: Herstellung (oben) und Prüfkörper (unten).....	34
Abbildung 6-16: Anschluss aus Buche: plan (links) und dreieckskettenförmig (rechts) .....	35
Abbildung 6-17: Anschluss Fichtenstütze auf Buche: plan (links) und dreieckskettenförmig (rechts)...	35
Abbildung 6-18: Last-Verformungs-Diagramme Hauptversuche Teil II .....	36
Abbildung 6-19: Lasten bei 2mm Setzung (Teil II).....	38
Abbildung 6-20: Verformung bei Bemessungskraft (Teil II) .....	38
Abbildung 6-21: Steifigkeit der Anschlüsse (Teil II) .....	39
Abbildung 6-22: Verformung bei 36kN (Teil II).....	39

## 9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Theoretische aufnehmbaren Kräfte der Geometrien Abhängigkeit de Frästiefe .....	16
Tabelle 5-2: Aufgebrachte Lasten bei verschiedenen Verformungen (Kleinversuche).....	22
Tabelle 6-1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Grossversuche Teil I .....	29
Tabelle 6-2: Zusammenstellung der Ergebnisse der Hauptversuche Teil II .....	37

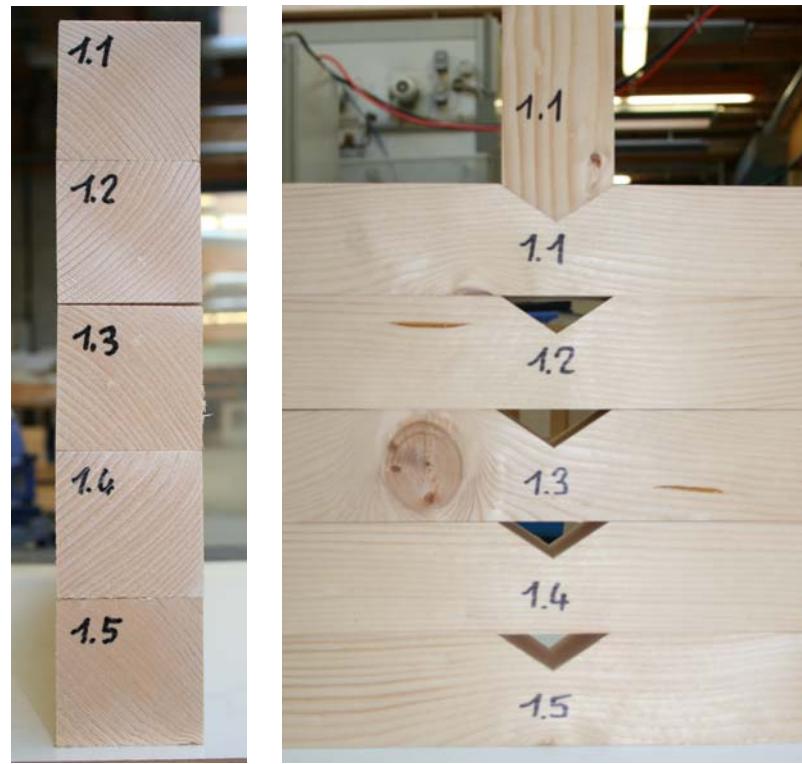
## 9.3 Literaturverzeichnis

- Ehlbeck, J. (1985). Möglichkeiten zur Erhöhung der Querdruck- und Querzugbelastbarkeit von Holz, Holz als Roh- und Werkstoff, Volume 43, Number 3, Seiten 105-109.
- Bejtka, I. and Blass, H. J. (2006). Self-tapping screws as reinforcements in beam supports. Proceedings, CIB-W18, Florence, Italy, 39-7-2.
- Niemz P. (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, 243 S., ISBN-13: 9783871813245 Verlag Drw.
- Hankinson, R. L. (1921). Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. Air service Information Circular III, No. 259, US Air Service.
- SIA 265 (2003) Holzbau, Eingetragene Norm der Schweizerischen Normenvereinigung

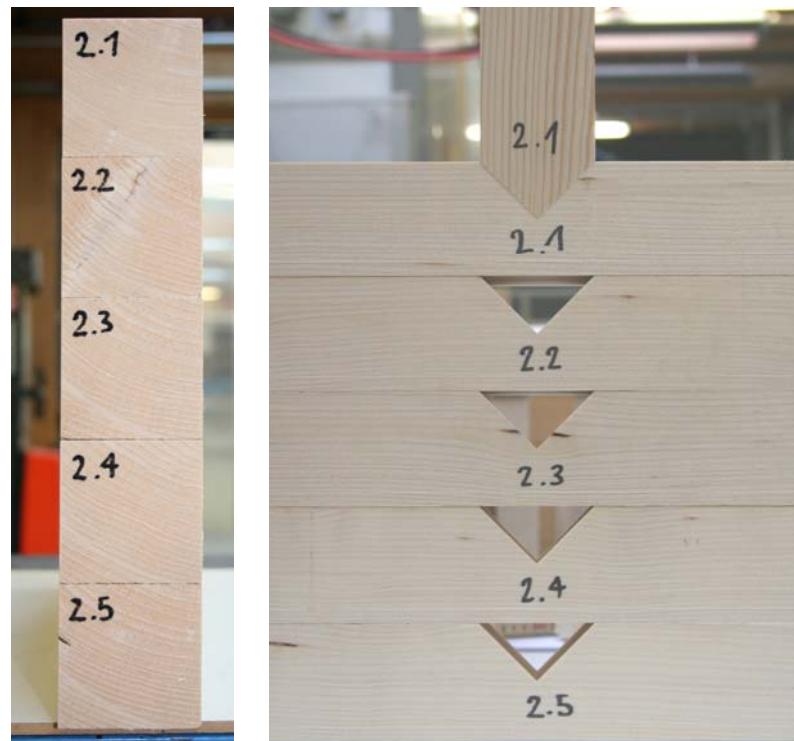
## Anhang A: DETAILS ZU DEN KLEINVERSUCHEN

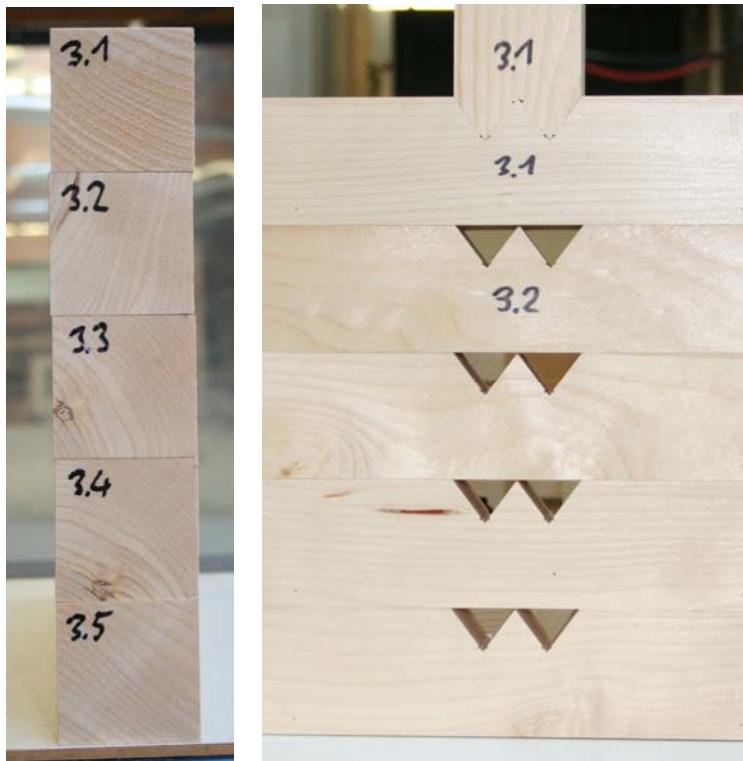
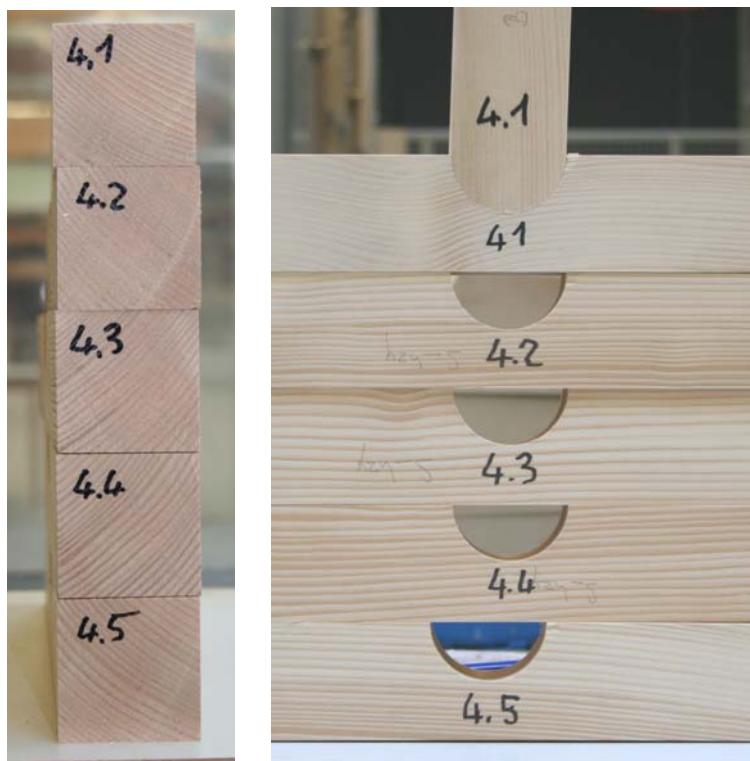
### A.1 Fotos der individuellen Prüfkörper

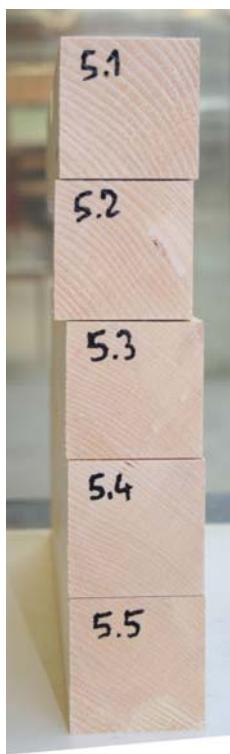
*Dreiecksförmige Anschlussgeometrie mit Frästiefenbeschränkung auf 40 mm*

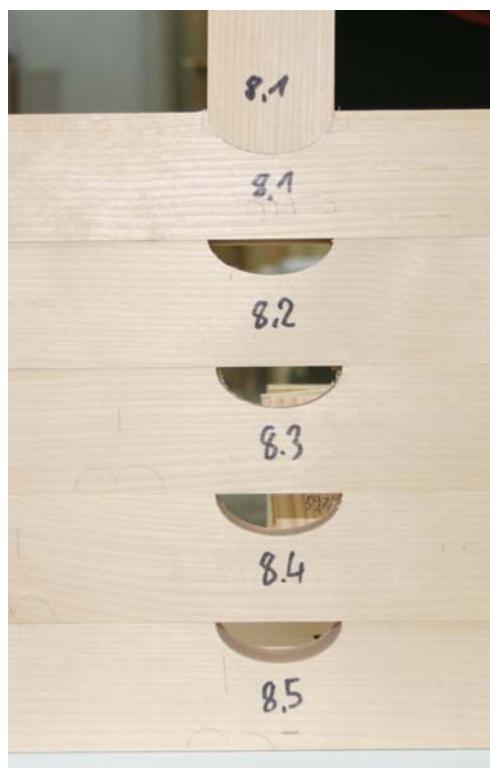
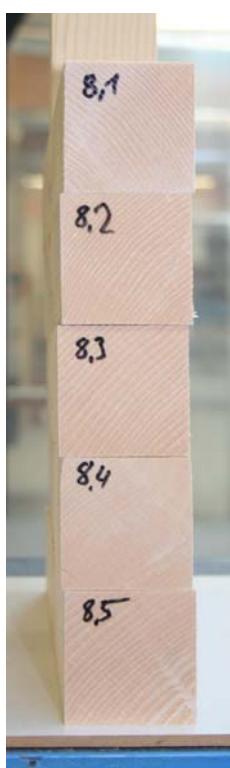


*Dreiecksförmige Anschlussgeometrie mit 45° Winkel*

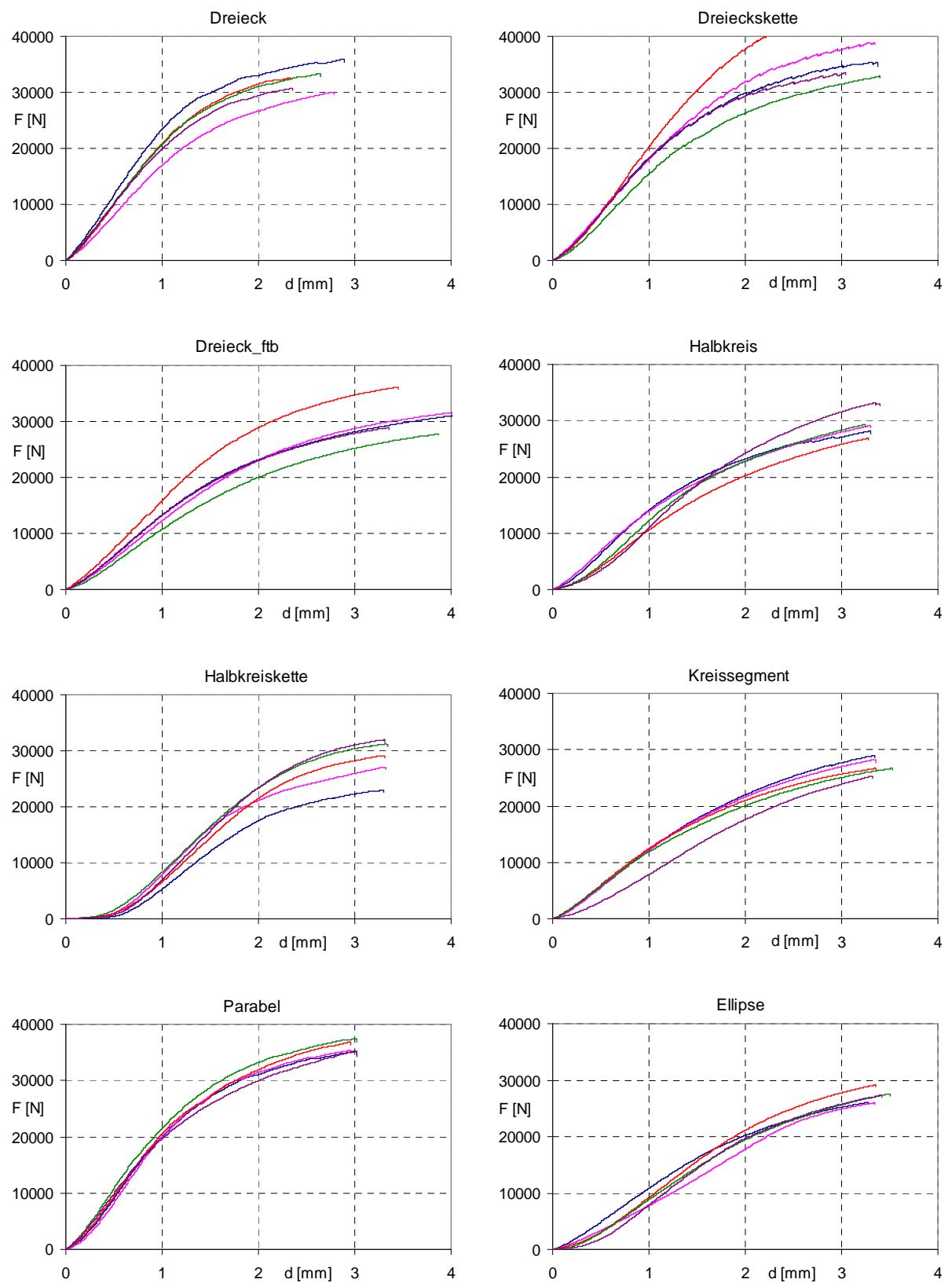


**Dreieckskettenförmige Anschlussgeometrie mit zwei 45° Winkel Dreiecken****Halbkreisförmige Anschlussgeometrie**

**Kreisförmige Anschlussgeometrie mit Frästiefenbeschränkung auf 40 mm****Halbkreiskettenförmige Anschlussgeometrie mit zwei Halbkreisen**

**Parabelförmige Anschlussgeometrie****Ellipsenförmige Anschlussgeometrie**

## A.2 Last-Verformungs-Kurven der individuellen Prüfkörper der Kleinversuche



### A.3 Varianzanalyse (ANOVA) für der Ergebnisse der Kleinversuche

Die ANOVA Tabelle zerlegt die Abweichung der untersuchten Variable in einen Anteil der durch die Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen begründet ist und einen Anteil der durch die Unterschiede innerhalb der verschiedenen Gruppen begründet ist. Der F-Wert ist ein Verhältnis dieser beiden Anteile. Wenn der P-Wert des F-Tests kleiner ist als 0.05, gibt es einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Resultate der verschiedenen Gruppen mit einem Vertrauensniveau von 95.0%. Der Mehrfachtest wendet ein Vergleichsverfahren (Least Square Difference) an, um festzustellen welche Mittelwerte sich statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Homogene Gruppen sind mit dem gleichen Buchstaben gekennzeichnet.

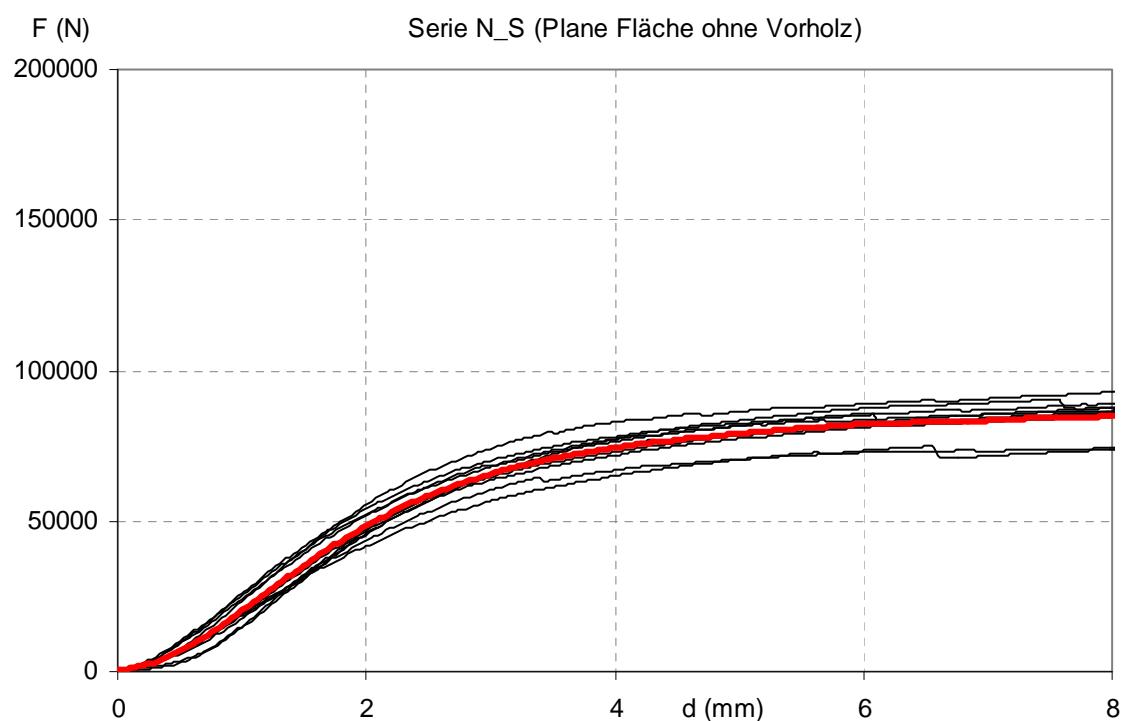
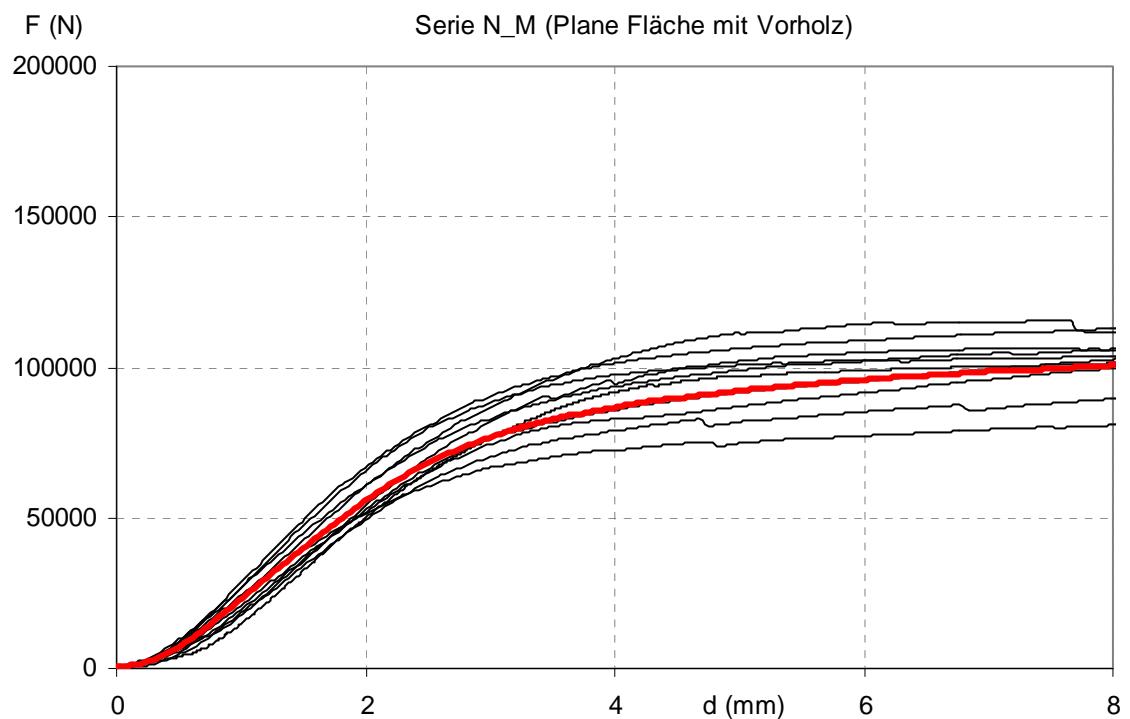
#### ANOVA für F@1.0mm

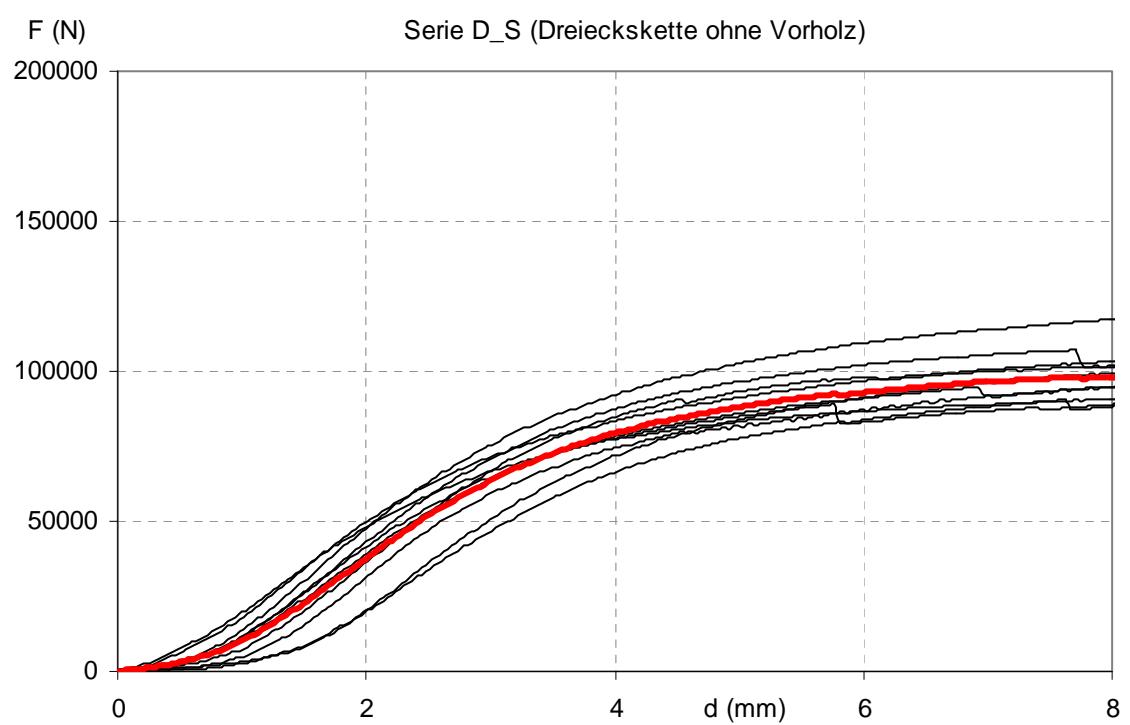
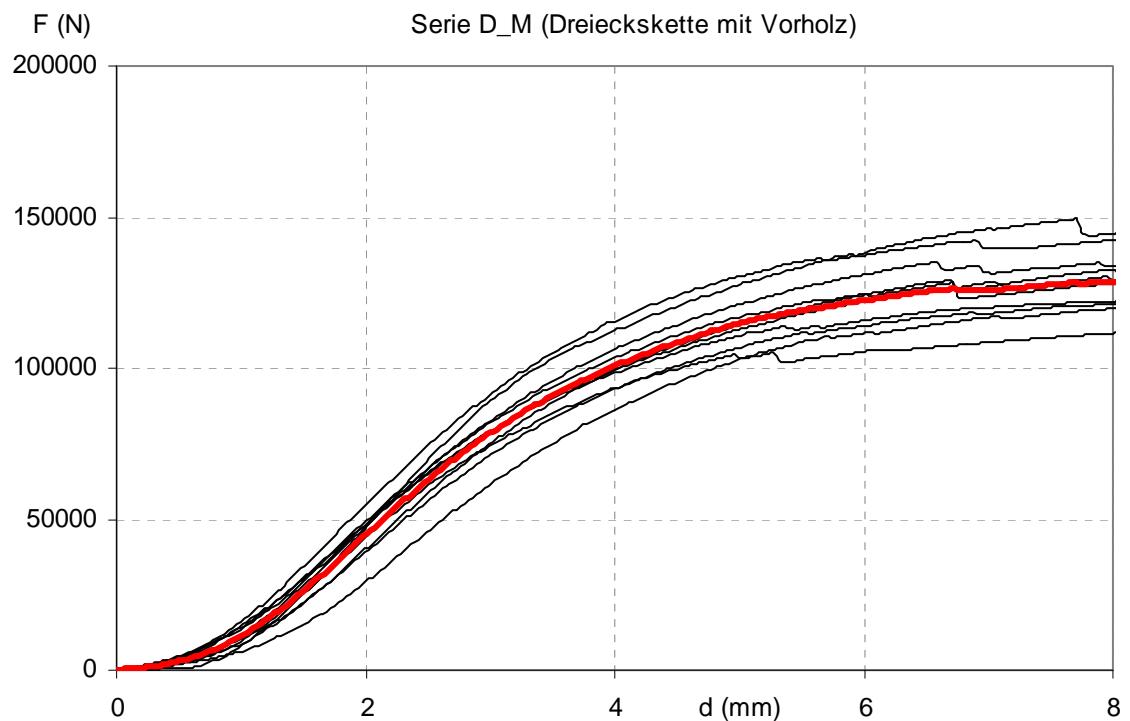
Quelle	Sum of Sq.	Df	Mean Square	F-Wert	P-Wert
Zwischen Gruppen	9.16365E8	7	1.30909E8	48.16	0.0000
Innerhalb Gruppen	8.69874E73	2	2.71836E6		
Total	1.00335E9	39			

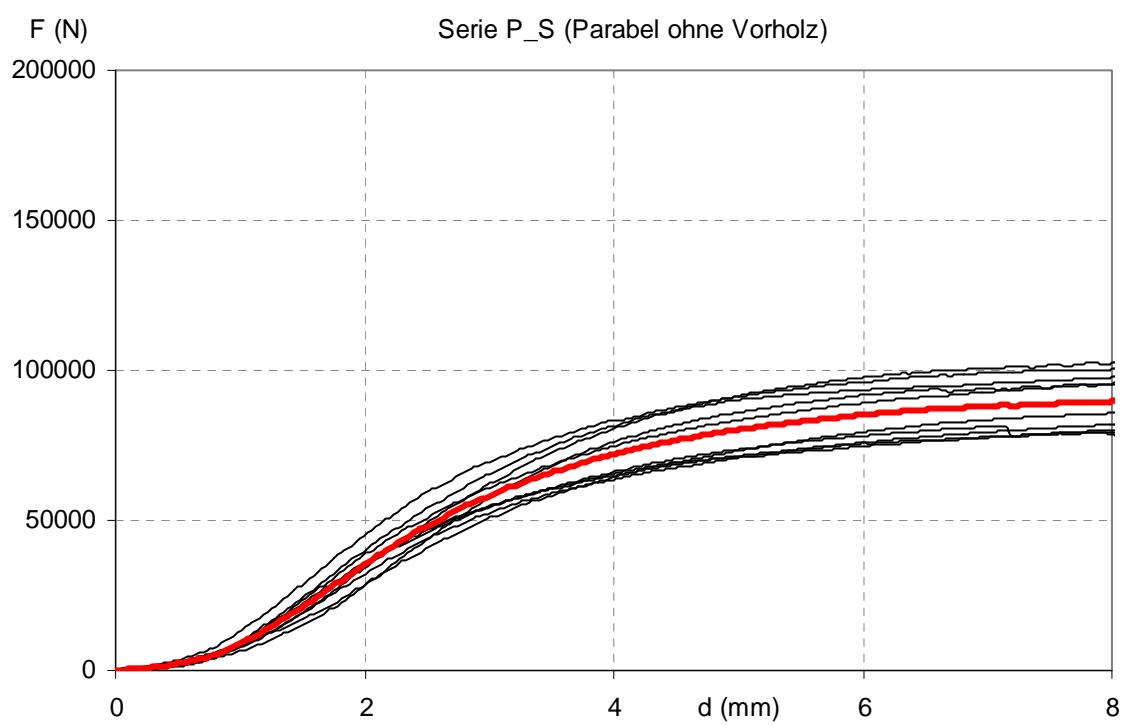
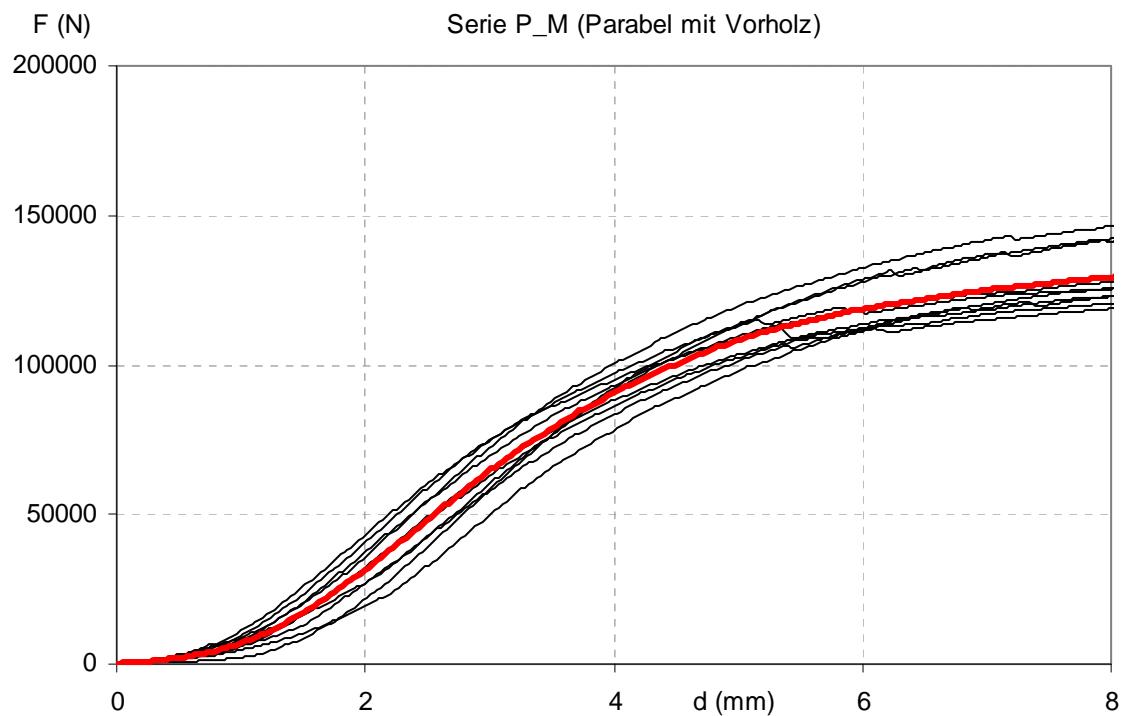
#### ANOVA für F@2.0mm

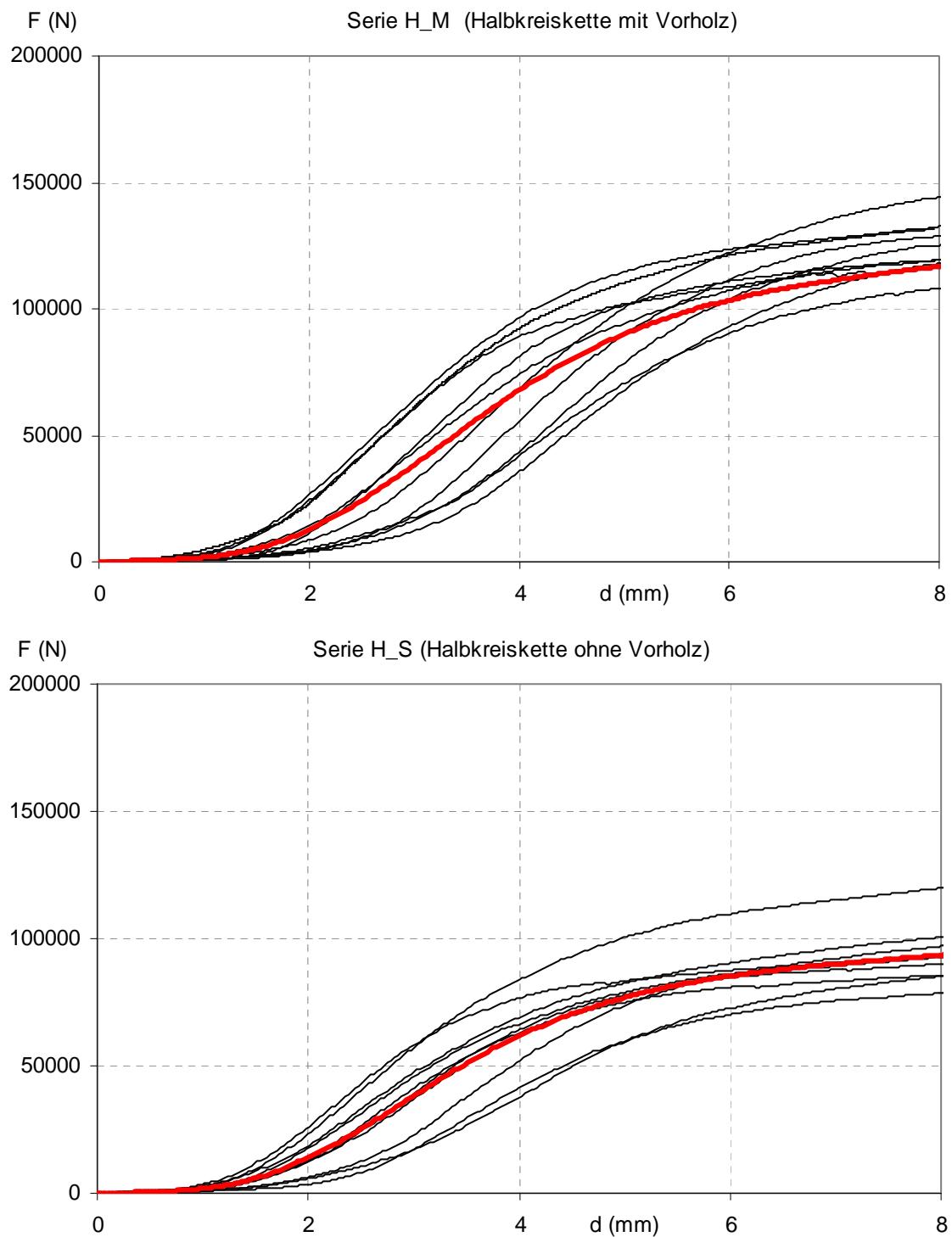
Quelle	Sum of Sq.	Df	Mean Square	F-Wert	P-Wert
Zwischen Gruppen	8.88175E8	7	1.26882E8	21.17	0.0000
Innerhalb Gruppen	1.91778E8	32	5.99305E6		
Total	1.07995E9	39			

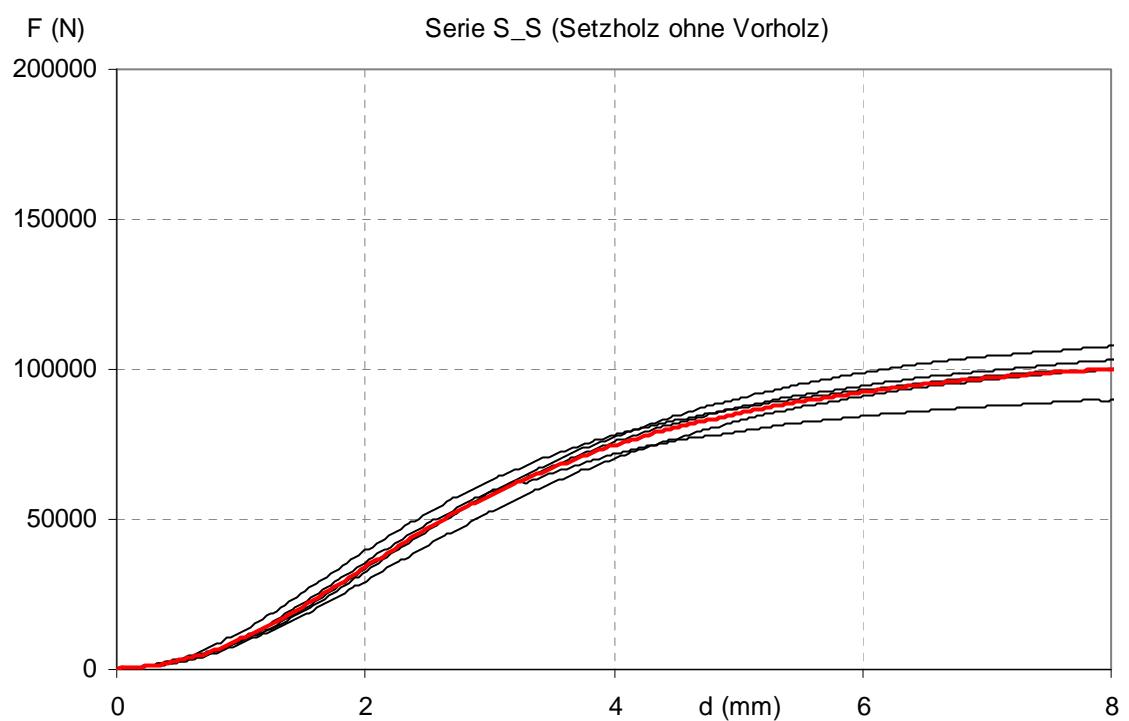
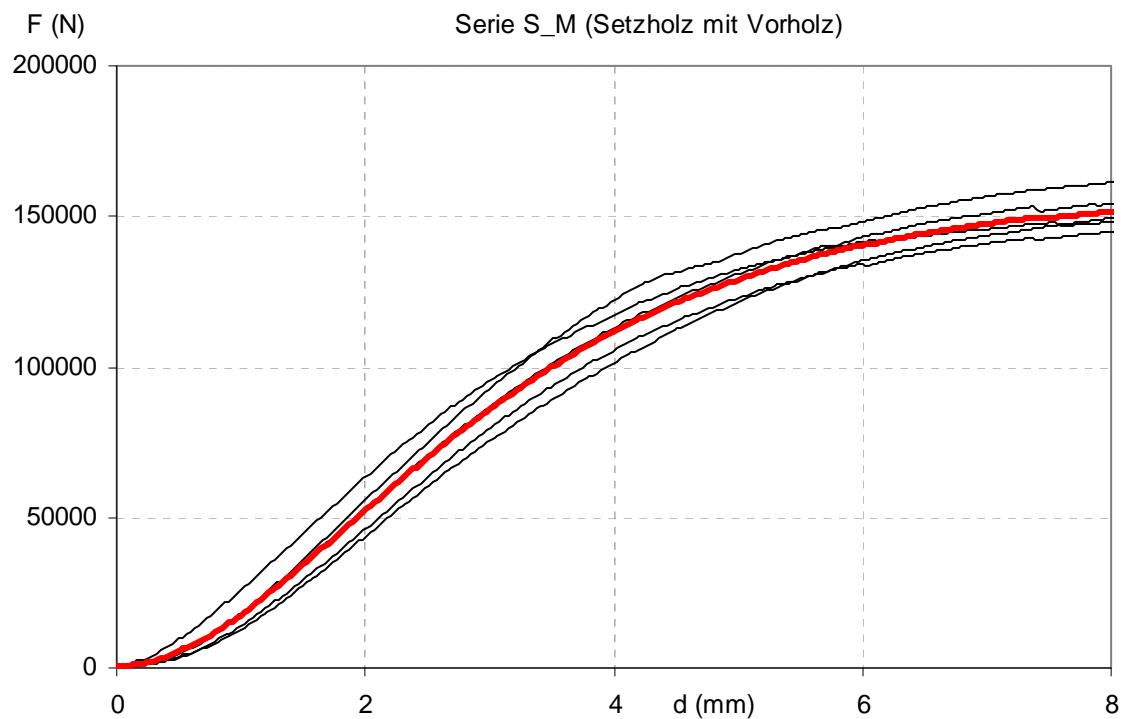
Mehrfachtests	F@1.0mm	F@2.0mm
H-kette	A	A
Ellipse	A	A
Halbkreis	B	AB
K-segm.	B	AB
D_ftb	B	B
D-kette	C	C
Parabel	D	C
D_45	D	C

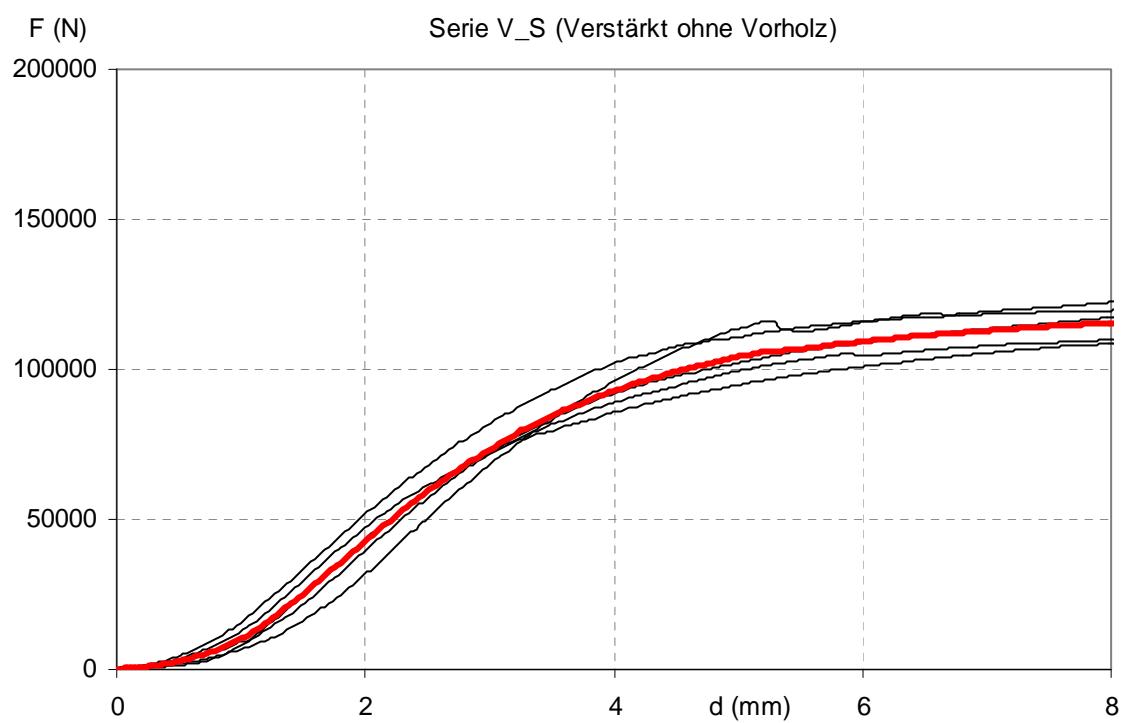
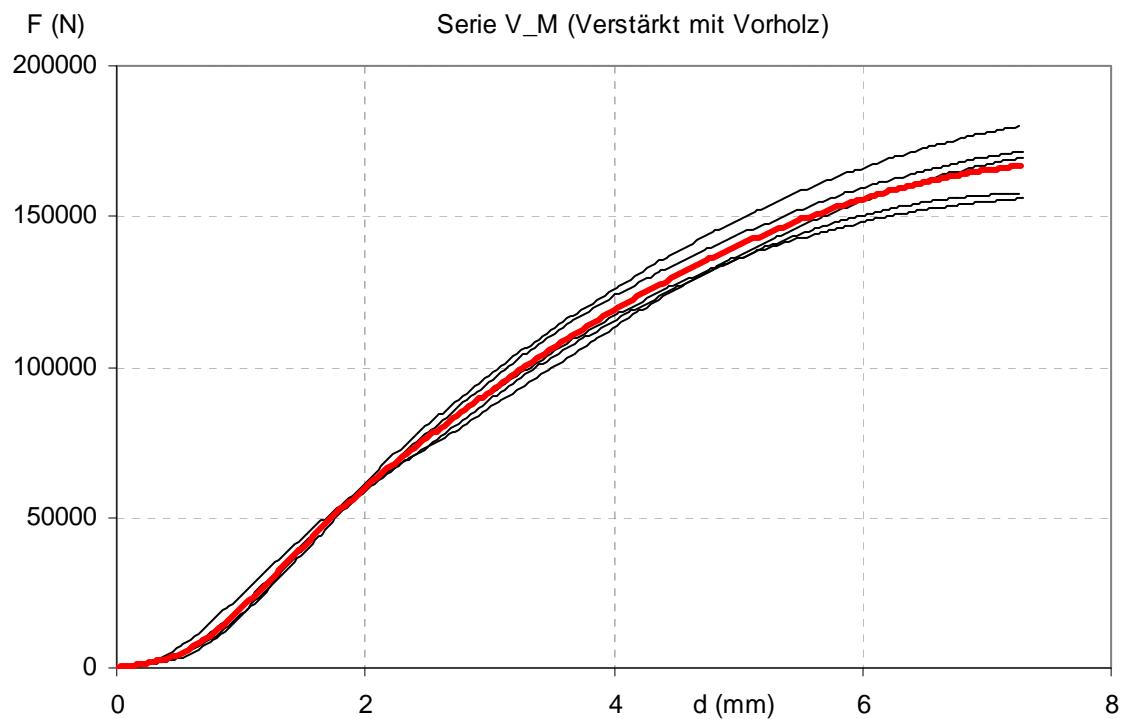
**Anhang B: DETAILS ZU DEN GROSSVERSUCHEN****B.1 Last-Verformungs-Diagramme der individuellen Prüfkörper Teil I**











## B.2 Varianzanalyse (ANOVA) für der Ergebnisse der Grossversuche Teil I

### ANOVA für Verformung bei Bemessungskraft für Anschlüsse mit Vorholz

Source	SS	df	MS	F	p
Between	18.549	5	3.710	31.58	0.000
Within	5.168	44	0.117		
Total	23.717	49			

### Mehrfachtests

V\_M A  
 N\_M A  
 S\_M AB  
 D\_M B  
 P\_M C  
 H\_M D

### ANOVA für Lasten bei 2mm Setzung für Anschlüsse mit Vorholz

Source	SS	df	MS	F	p
Between	13585	5	2716.9	51.09	0.000
Within	2340	44	53.2		
Total	15925	49			

### Mehrfachtests

H\_M A  
 P\_M B  
 D\_M C  
 S\_M CD  
 N\_M D  
 V\_M D

### ANOVA für Steifigkeit der Anschlüsse mit Vorholz

Source	SS	df	MS	F	p
Between	441.444	5	88.29	8.83	0.000
Within	439.782	44	10.00		
Total	881.226	49			

### Mehrfachtests

H\_M A  
 P\_M A  
 S\_M AB  
 D\_M B  
 N\_M B  
 V\_M C

### ANOVA für Verformung bei Bemessungskraft für Anschlüsse ohne Vorholz

Source	SS	df	MS	F	p
Between	11.251	5	2.250	23.25	0.000
Within	4.259	44	0.097		
Total	15.510	49			

#### Mehrfachtests

N_S	A
V_S	B
D_S	B
P_S	B
S_S	B
H_S	C

### ANOVA für Lasten bei 2mm Setzung für Anschlüsse ohne Vorholz

Source	SS	df	MS	F	p
Between	6610.8	5	1322.16	25.02	0.000
Within	2325.39	44	52.8		
Total	8936.19	49			

#### Mehrfachtests

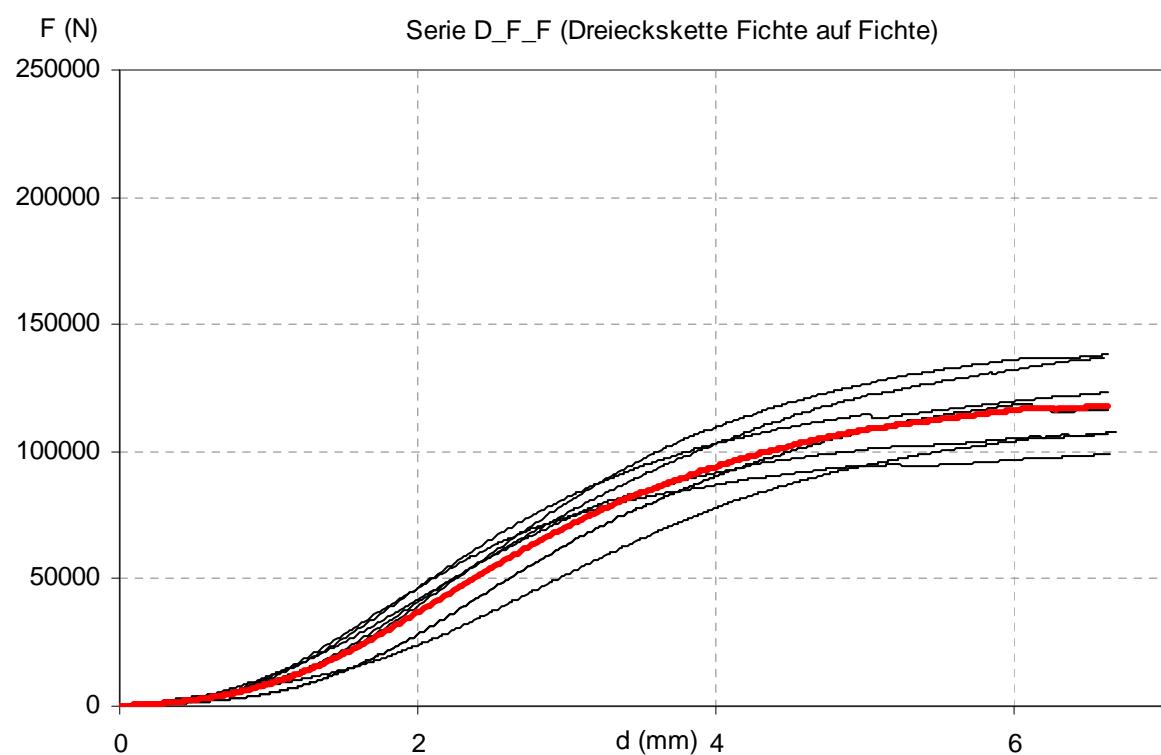
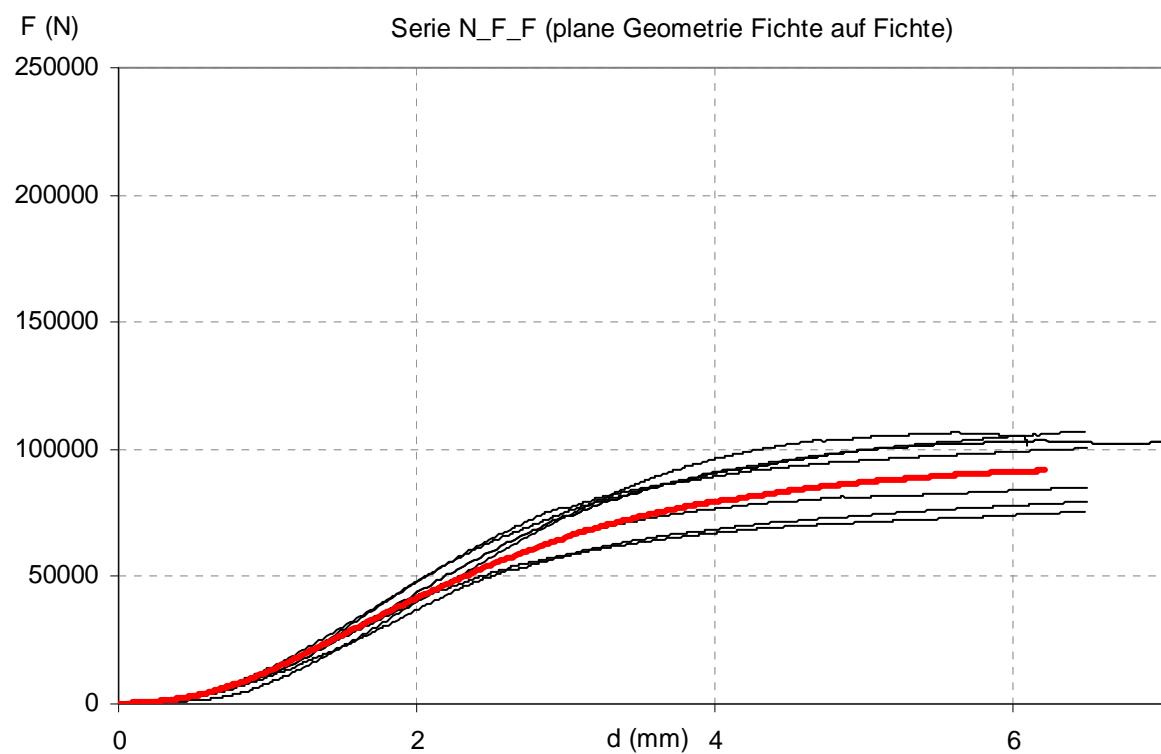
H_S	A
S_S	B
P_S	B
D_S	B
V_S	BC
N_S	C

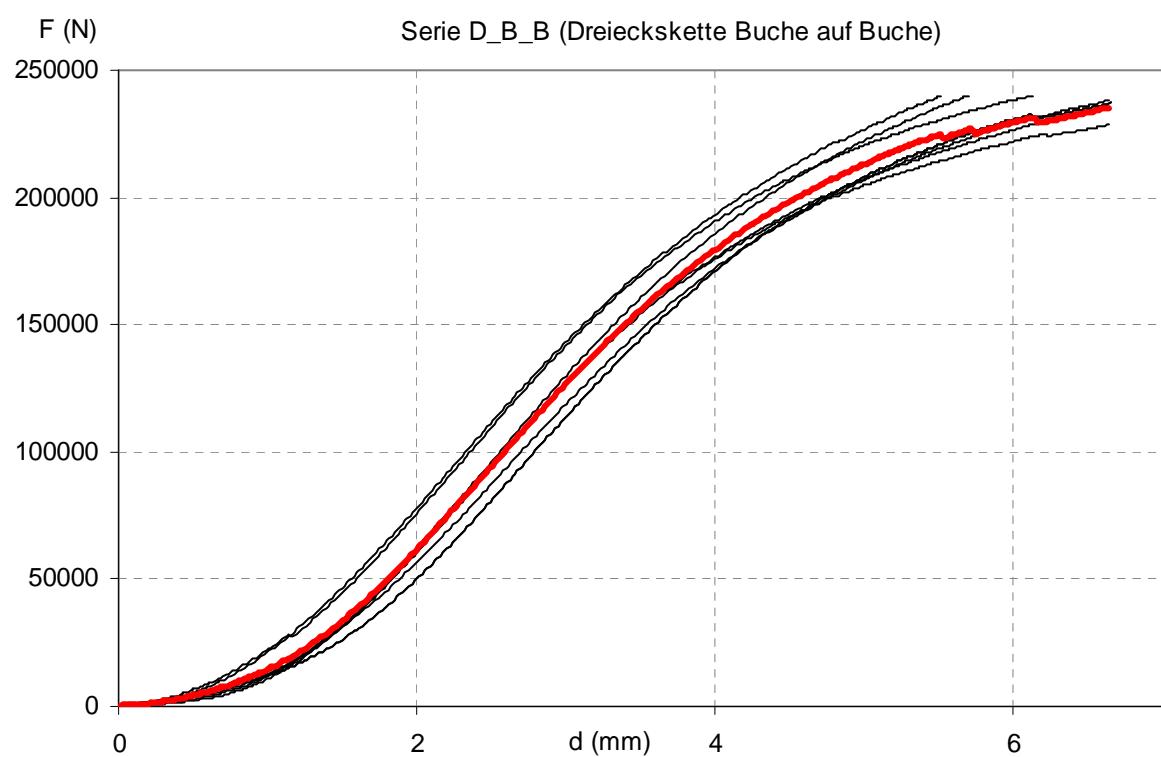
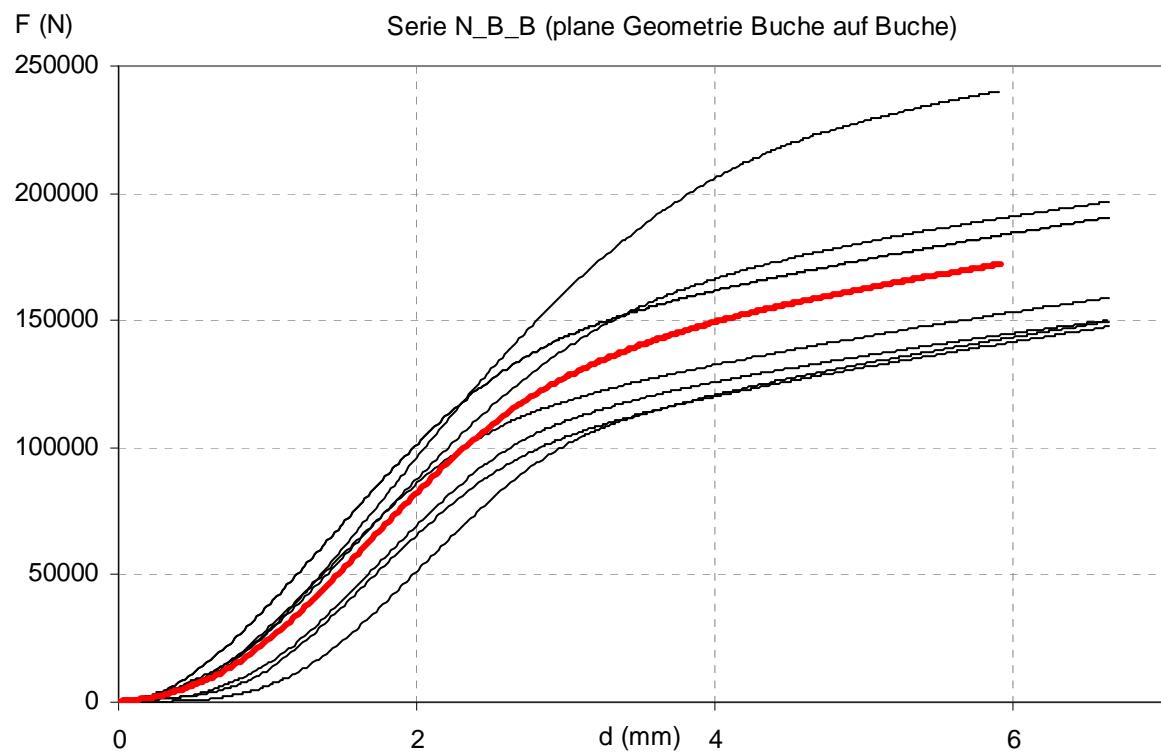
### ANOVA für Steifigkeit für Anschlüsse ohne Vorholz

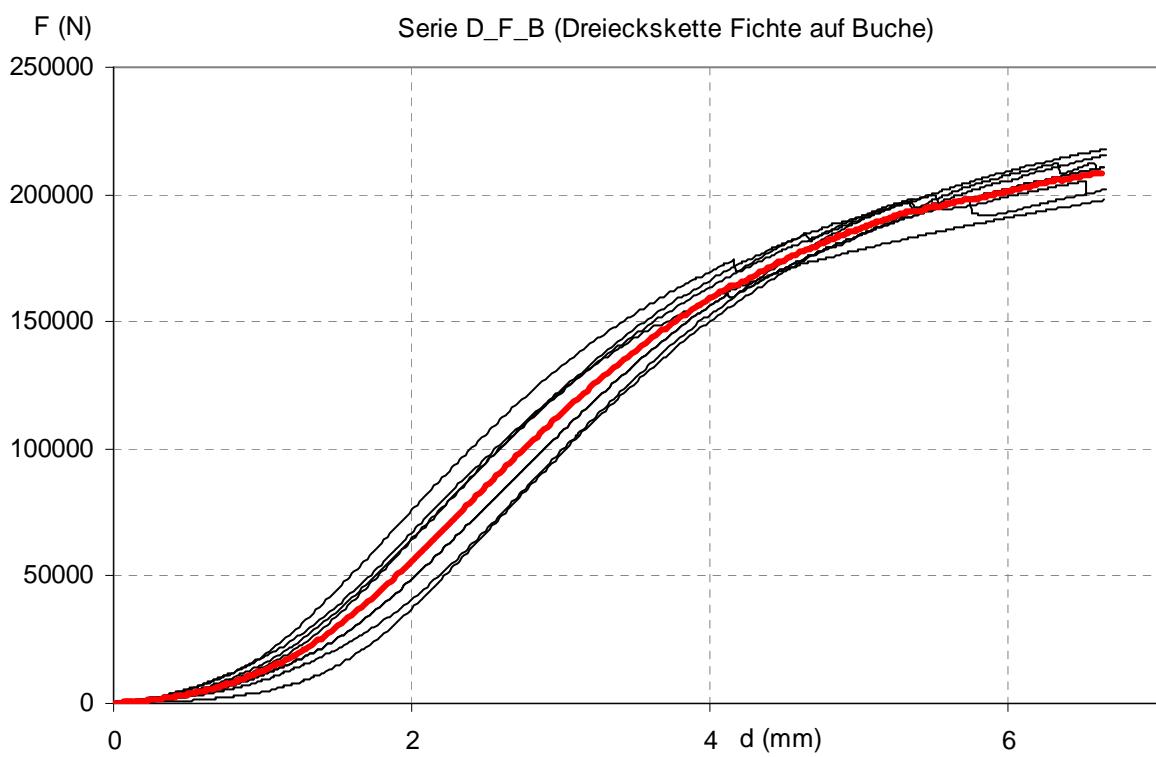
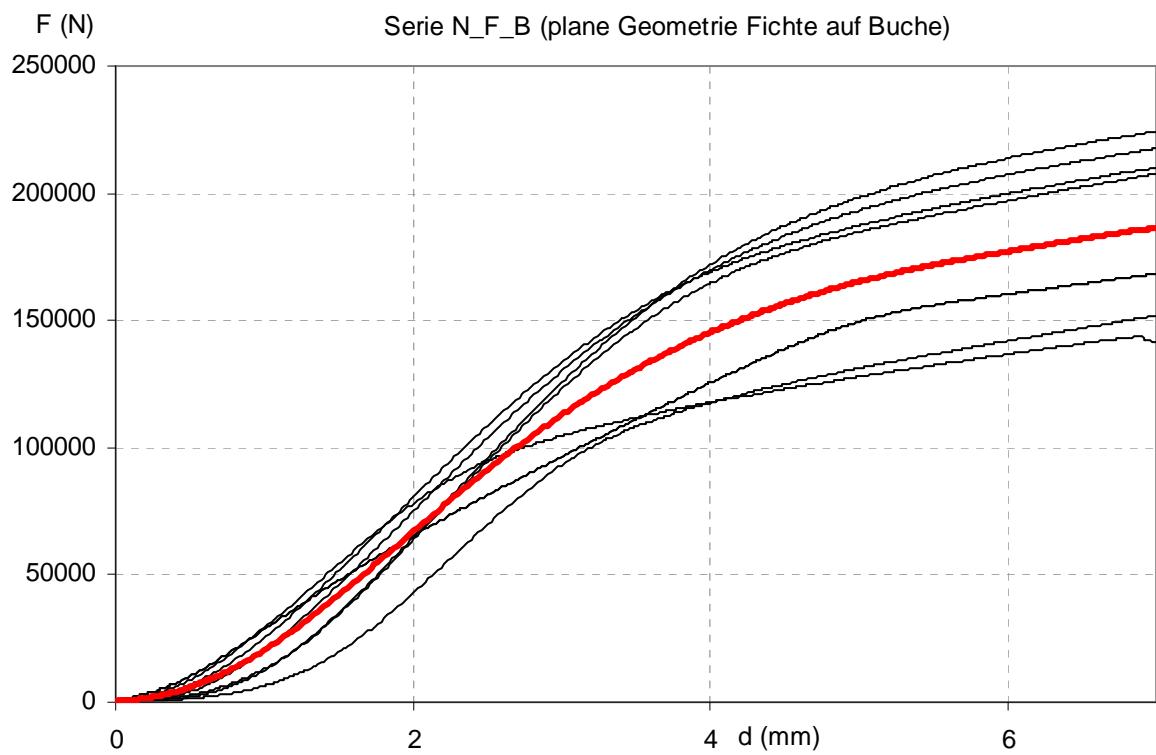
Source	SS	df	MS	F	p
Between	280.554	5	56.110	5.97	0.000
Within	413.811	44	9.405		
Total	694.365	49			

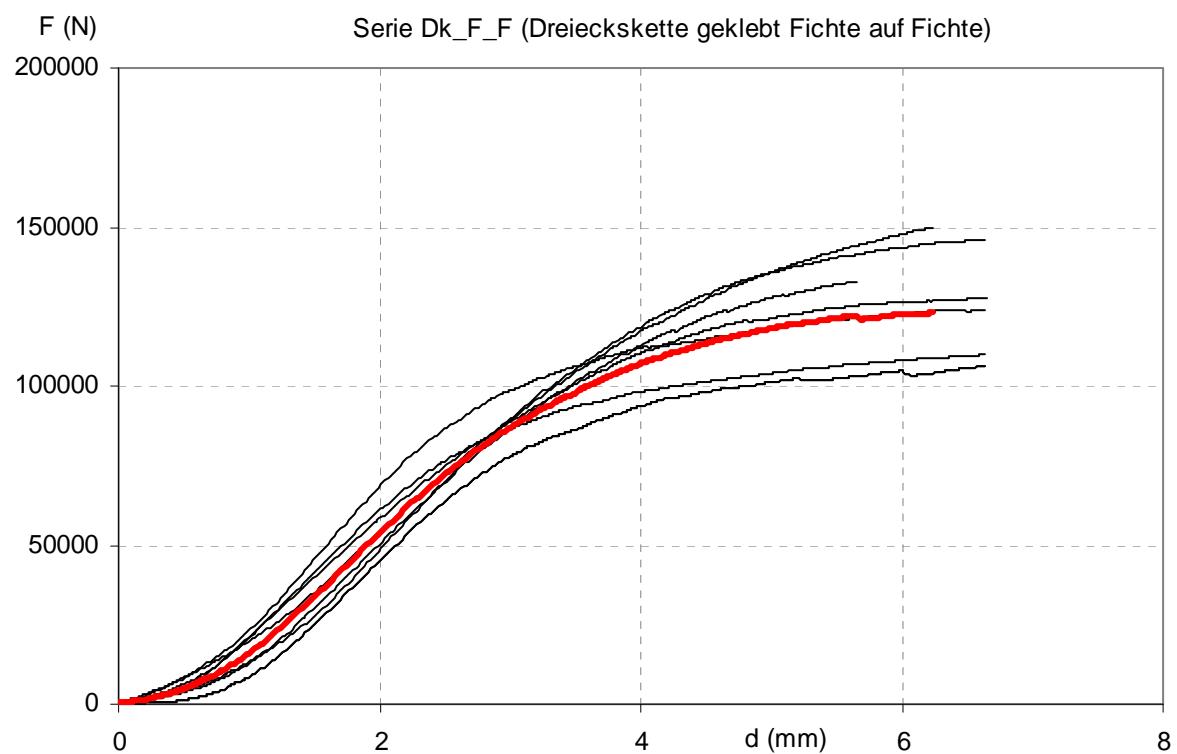
#### Mehrfachtests

S_S	A
H_S	A
P_S	AB
D_S	BC
N_S	C
V_S	C

**B.3 Last-Verformungs-Diagramme der individuellen Prüfkörper Teil II**







## B.4 Varianzanalyse (ANOVA) für der Ergebnisse der Grossversuche Teil II

### ANOVA für Verformung bei Bemessungskraft

Source	SS	df	MS	F	p
Between	13.252	6	2.209	32.12	0.000
Within	3.370	49	0.069		
Total	16.621	55			

### Mehrfachtests

Dk-F-F A  
 N\_F-F- AB  
 D-F-F B  
 N-B-B C  
 D-B-B CD  
 D-F-B D  
 N-F-B D

### ANOVA für Lasten bei 2mm Setzung

Source	SS	df	MS	F	p
Between	11039	6	1840	13.84	0.000
Within	6514	49	133		
Total	17553	55			

### Mehrfachtests

D-F-F A  
 N-F-F AB  
 Dk-F-F BC  
 D-F-B CD  
 D-B-B CD  
 N-F-B D  
 N-B-B E

### ANOVA für Steifigkeit der Anschlüsse

Source	SS	df	MS	F	p
Between	9285	6	1547.6	34.34	0.000
Within	2208	49	45.1		
Total	11494	55			

### Mehrfachtests

N\_F-F- A  
 D-F-F A  
 Dk-F-F A  
 N-F-B BC  
 N-B-B C  
 D-F-B C  
 D-B-B C

### ANOVA für Verformung bei 36kN

Source	SS	df	MS	F	p
Between	3.031	6	0.505	10.68	0.000
Within	2.318	49	0.047		
Total	5.349	55			

### Mehrfachtests

N-B-B A  
 N-F-B AB  
 D-B-B BC  
 Dk-F-F BC  
 D-F-B CD  
 N\_F-F- DE  
 D-F-F E