

Forschungsvorhaben

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels selbstschneidenden Holzschrauben (G-99/19)

von
François Colling

- Schlussbericht -
November 2000

<p>Das Forschungsvorhaben wurde gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung mit Mitteln des Holzabsatzfonds sowie durch die Holzwirtschaft</p>
--

Vorwort

Angeregt vom Technischen Beirat der Studiengemeinschaft Holzleimbau, Düsseldorf wurde dieses Vorhaben bei der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung zur Beantragung eingereicht. Als finanzieller Förderer für dieses Vorhaben konnte der Holzabsatzfonds gewonnen werden.

Unterstützt wurde dieses Vorhaben auch von den folgenden Firmen:

- abc Verbindungstechnik, Ennepetal
- Adolf Würth GmbH, Künzelsau
- Anton Heggenstaller AG, Aichach,
- Jakob Maier GmbH, Türkheim

Die Versuche wurden am Baustofflabor der FH Augsburg unter Aufsicht von Herrn Dipl.-Ing Siegfried Hager durchgeführt.

Die Versuche wurden weitestgehend selbständig und absolut zuverlässig durchgeführt von den Praktikanten bzw. Diplomanden

- Stefan Bedö
- Holger Dietrich
- Herbert Lugauer
- Alexander Schmid

Auch die Auswertung der Versuchsergebnisse lag weitgehend in ihren Händen.

Insgesamt wurden 260 Versuche mit einzelnen Schrauben, 121 Versuche mit direkter Last-einleitung (Schwellenversuche) und 87 Versuche mit indirekter Lateinleitung (Auflagerversuche) durchgeführt. Nur dem Eifer und Engagement aller Beteiligten und dem Entgegenkommen des Baustofflabors der FH Augsburg ist es zu verdanken, dass diese Vielzahl von Versuchen - die weit über dem geplanten Versuchsprogramm liegt - mit den zur Verfügung stehenden Mitteln überhaupt durchgeführt werden konnten.

Allen Beteiligten sei für ihre Unterstützung und Mitarbeit herzlich gedankt.

François Colling

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
1 Einleitung	1
2 Vorversuche	2
2.1 Eindrückverhalten von Schrauben	2
2.1.1 Ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes	3
2.1.2 Mit Mitwirkung des Schraubenkopfes	6
2.2 Direkte Lasteinleitung	9
2.3 Indirekte Lasteinleitung	14
2.4 Schlussfolgerungen für die Hauptversuche	16
3 Schraubenversuche	18
3.1 Materialwahl	18
3.2 Eindrückversuche	18
3.3 Ausziehversuche	21
4 Einschraubversuche (Mindestabstände)	27
5 Schwellenversuche	31
5.1 Rohdichte 400 kg/m ³	32
5.1.1 Unverstärkte Proben	32
5.1.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)	33
5.1.3 Verstärkte Proben (9 Schrauben)	36
5.1.4 Versuche mit unsauberer Ausführung	38
5.1.5 Verstärkungsfaktoren	43
5.2 Rohdichte 500 (465) kg/m ³	47
5.2.1 Proben mit höherer Holzfeuchte	47
5.2.2 Versuche mit trockenem Holz	48
5.2.3 Verstärkungsfaktoren	54
5.3 Zusammenfassende Bewertung	57
6 Auflagerversuche	58
6.1 Rohdichte 400 kg/m ³	59
6.1.1 Unverstärkte Proben	59
6.1.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)	60
6.1.3 Verstärkte Proben (9 Schrauben)	62
6.1.4 Verstärkungsfaktoren	64
6.2 Rohdichte 500 kg/m ³	67
6.2.1 Unverstärkte Proben	67
6.2.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)	67
6.2.3 Verstärkte Proben (9 Schrauben)	68
6.2.4 Verstärkungsfaktoren	69

6.3	Zusammenfassende Bewertung	72
7	Diskussion, Rechenverfahren	73
7.1	Unverstärkte Proben	73
7.2	Verstärkte Proben	75
7.3	Rechenverfahren	76
7.3.1	Anzahl der effektiv wirksamen Schrauben	76
7.3.2	Berechnung der Traglast	77
7.3.3	Überprüfung des Rechenverfahrens	78
8	Zusammenfassung	79
8.1	Zielsetzung, Versuchsplan	79
8.2	Mindestabstände	80
8.3	Bestimmung des Verstärkungseffektes	80
8.4	Ergebnisse der Schwellenversuche	81
8.5	Ergebnisse der Auflagerversuche	82
8.6	Rechenverfahren	82

1 Einleitung

Die Suche nach Möglichkeiten zur Erhöhung der Querdruckfestigkeit bei Auflagerungen war bereits zu Beginn der 80er Jahre Gegenstand von Untersuchungen [Möhler/Freiseis]¹. Hier wurden verschiedene konstruktive Verstärkungsmaßnahmen untersucht und Vorschläge für die Bemessung gemacht. Die vorgeschlagenen Maßnahmen konnten sich in der Praxis jedoch kaum durchsetzen, zum Teil aus ästhetischen (z.B. außenliegende Nagelplatten), zum Teil auch aus wirtschaftlichen Gründen, weil sich die Verstärkungsmaßnahmen als zu aufwendig in der Herstellung erwiesen (z.B. eingeleimte Buchenholzdübel oder eingeleimte Gewindestangen).

Möhler/Freiseis untersuchten auch die Möglichkeit einer Verstärkung mittels Sondernägeln. Hierbei wurden hauptsächlich Rillennägel untersucht, weil diese bei Vorversuchen bessere Werte lieferten als Schraubnägel. Die Hauptversuche konnten diese Tendenz jedoch nicht bestätigen, so daß empfohlen wurde, für Rillennägel keine Verstärkungswirkung in Rechnung zu stellen.

Der festgestellte geringe Verstärkungseffekt von unter 10% ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß Rillennägel zwar einen hohen Widerstand gegen Herausziehen aufweisen, nicht jedoch gegen „Eindrücken“.

Die Schlußfolgerung von Möhler/Freiseis, lediglich bei einem einzigen, geprüften Schraubnagel eine Verstärkungswirkung von 25% anzusetzen, deutet darauf hin, daß stiftförmige Verbindungsmittel mit schraubenförmigem Gewinde durchaus geeignet sind, eine Erhöhung der Querdruckbelastbarkeit zu erzielen. Leider wurden hier keine weiteren Untersuchungen mehr durchgeführt.

Die vor einigen Jahren entwickelten „Schnelbauschrauben“ (z.B. ABC-Spax oder Würth-Ecofast) dürfen im Gegensatz zu den Holzbauschrauben nach DIN 1052 ohne Vorbohren ins Holz eingedreht werden, so daß sie eine sehr wirtschaftliche Alternative darstellen.

Ziel dieses Vorhabens war es nun, die Erhöhung der Querdruckfestigkeit mit Hilfe von Holzbauschrauben zu untersuchen, die ohne Vorbohren eingebracht werden dürfen. Hierbei soll der Einfluß verschiedener Parameter, wie z.B. Schraubendurchmesser und -länge, Schraubenabstände, versenkte/ nicht versenkte Anordnung, sowie der Holzqualität untersucht werden.

Vorrangig wurde dabei an folgende Einsatzbereiche gedacht:

- a) Auflagerung von Stielen auf Schwellen mit "direkter" Lasteinleitung (Schwellenpressung),
- b) Auflagerung von Biegeträgern mit "indirekter" Lasteinleitung.

Bei diesen Varianten sollten dabei jeweils nur Auflagerungen mit einseitigem Überstand untersucht werden, weil bei einer solchen Beanspruchung die geringsten Festigkeiten zu erwarten sind.

Um die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse sicherzustellen, war weiterhin darauf zu achten, dass die verstärkten und unverstärkten Proben auch vergleichbare Holzeigenschaften, sprich Rohdichten aufweisen. Um störende bzw. streuende Einflüsse infolge unterschiedlicher Materialeigenschaften weitestgehend auszuschließen, wurden die Versuche daher mit gezielt ausgesuchten Hölzern durchgeführt.

¹ Möhler, K.; Freiseis, R. 1983: Erhöhung der Querdruckfestigkeit der Auflagerungen von Vollholz- und Brettschichtholzbauteilen durch zusätzliche Konstruktionsmaßnahmen. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe

2 Vorversuche

Im Rahmen von Vorversuchen sollte die Durchführbarkeit der geplanten Versuche getestet werden.

Sämtliche Vorversuche wurden an Prüfkörpern durchgeführt, die aus einem Brettschichtholz(BSH-) balken (b/h = 12/12 cm) herausgeschnitten wurden. Dieser BSH-träger bestand aus 6 übereinandergelegten Brettern, so dass keine Keilzinkenverbindungen auftraten. Hiermit sollte erreicht werden, dass bei allen Proben gleiche Materialeigenschaften vorhanden waren, um so verfälschende Einflüsse, die auf unterschiedliches Material zurückzuführen sind, auszuschließen.

An die Eigenschaften der einzelnen Bretter (z.B. Rohdichte) wurden - im Gegensatz zu den Hauptversuchen - keine Anforderungen gestellt.

2.1 Eindrückverhalten von Schrauben

In Absprache mit den Firmen *abc* und *Würth*² wurden für die Vorversuche zur Ermittlung des Eindrückverhaltens von Schrauben die in **Tabelle 2.1-1** zusammengestellten Schraubentypen ausgewählt. Diese Schrauben sind alle im Besitz einer bauaufsichtlichen Zulassung.

Tabelle 2.1-1 Ausgewählte Schraubentypen

Schraubentyp	Kopf/Antrieb	Gewindelänge ¹⁾ l _g [mm]
A1 - 4x55	Senkkopf, AW-Antrieb	48
A1 - 4,5x55		48
A1 - 6x70		60
A2 - 4x55	Senkkopf, PZ-Kreuzschlitz	51
A2 - 4,5x55		50
A2 - 6x80		74
S - 4x55	Senkkopf, Kreuzschlitz Z	50
S - 6x55		48
S - 6x70		60
S - 8x80		47 ²⁾
S - 8x100		57 ²⁾
¹⁾ Angabe nach Zulassung		
²⁾ Teilgewinde		

² Den Firmen *abc* Verbindungstechnik, Ennepetal und Adolf Würth GmbH, Künzelsau sei sehr herzlich für die Unterstützung dieses Vorhabens gedankt.

2.1.1 Ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes

In **Bild 2.1-1** ist die Versuchsvorrichtung für diese Versuchsreihe dargestellt.

Von jedem Schraubentyp wurden 5 Versuche durchgeführt. In **Bild 2.1-2a und b** sind die Kraft-Verformungs-Diagramme von zwei Schraubentypen beispielhaft dargestellt. Hierbei wurden die mit zwei Wegaufnehmern gemessenen Verformungen gemittelt.

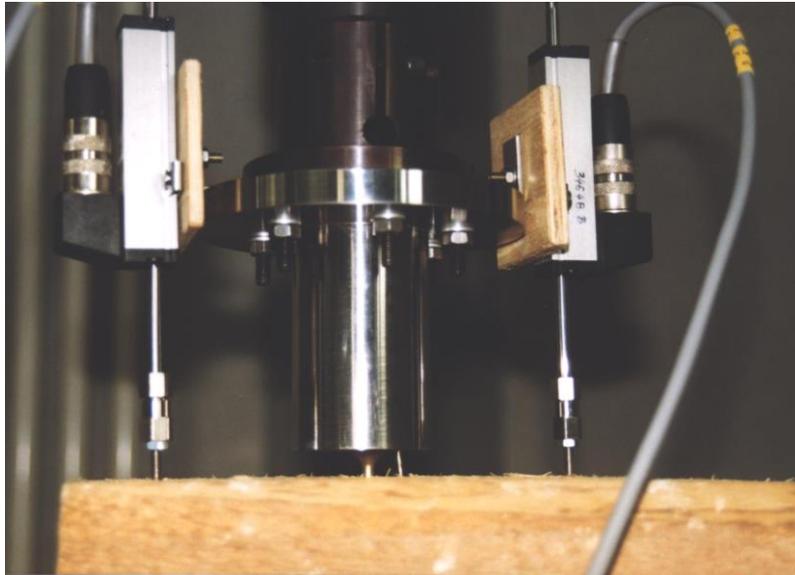


Bild 2.1-1 Versuchsvorrichtung zur Ermittlung des Eindrückverhaltens von Schrauben; ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes

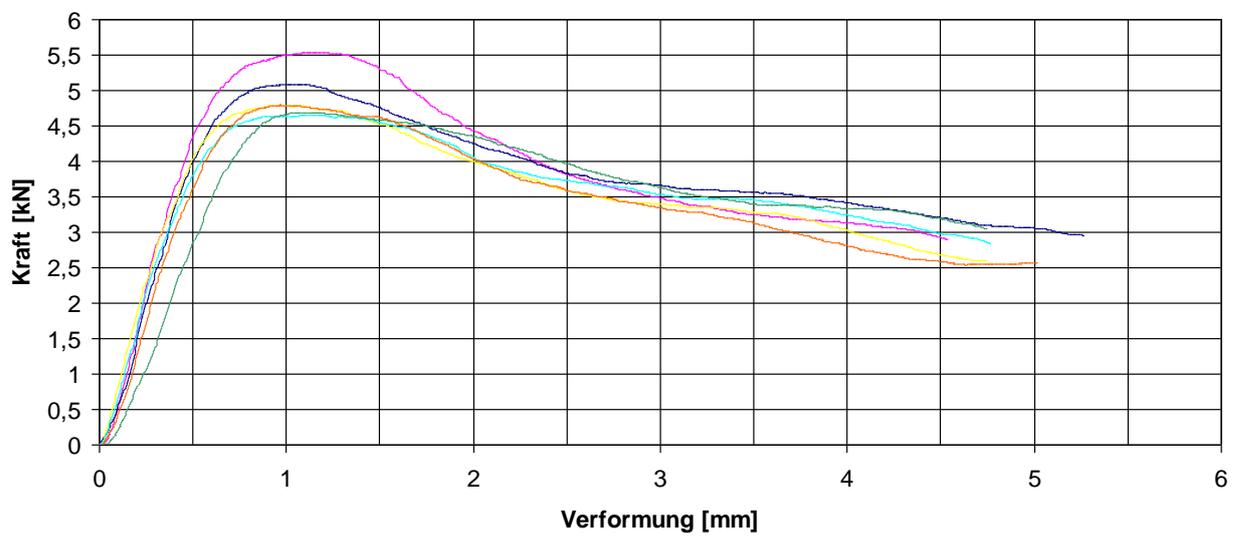


Bild 2.1-2a Kraft-Verformungs-Diagramme des Schraubentyps A1 - 4x55, Eindrücken ohne Kopf

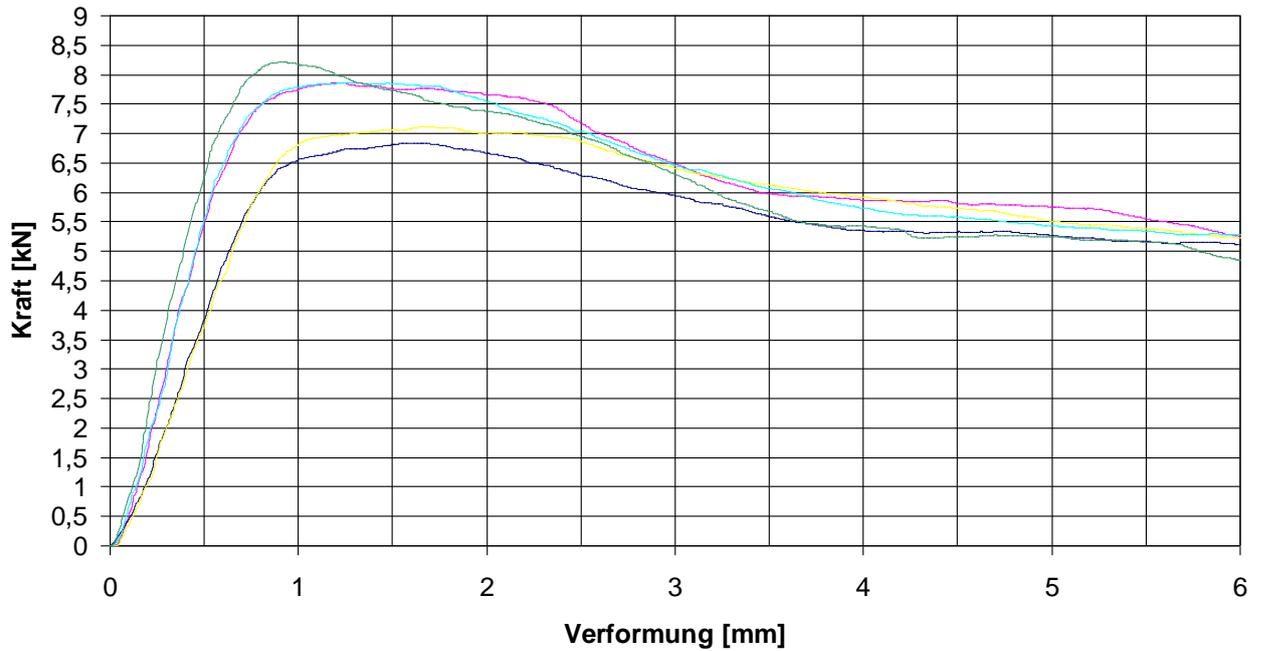


Bild 2.1-2b Kraft-Verformungs-Diagramme des Schraubentyps S - 6x70, Eindringen ohne Kopf

In **Bild 2.1-3** sind die ermittelten Höchstwerte zusammengestellt.

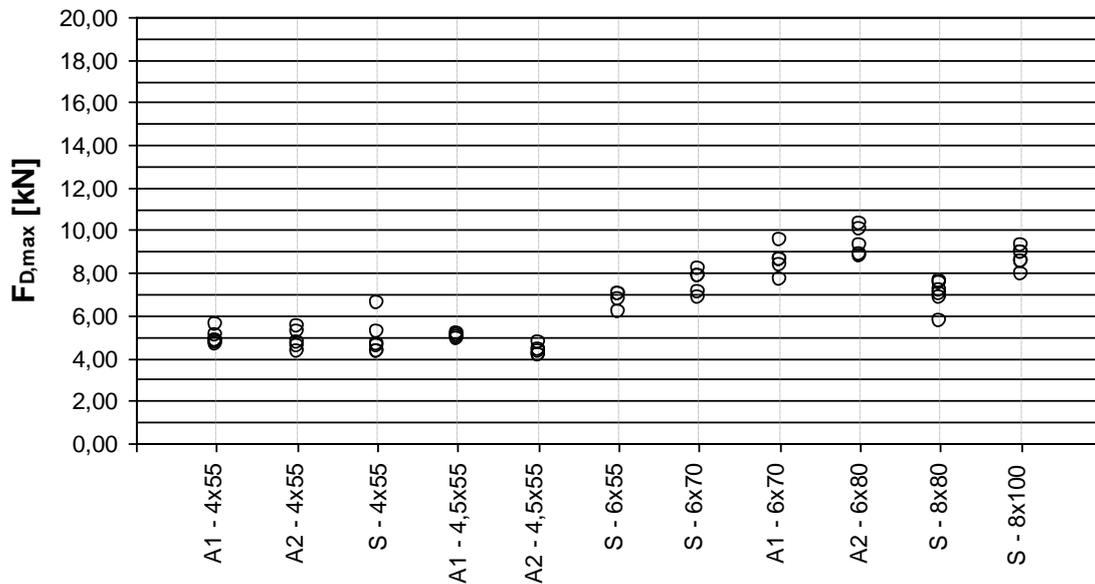


Bild 2.1-3 Höchstwerte $F_{D,max}$, Eindringen ohne Kopf

In **Bild 2.1-4** sind die bei Erreichen der Höchstlast gemessenen Eindrückungen zusammengestellt.

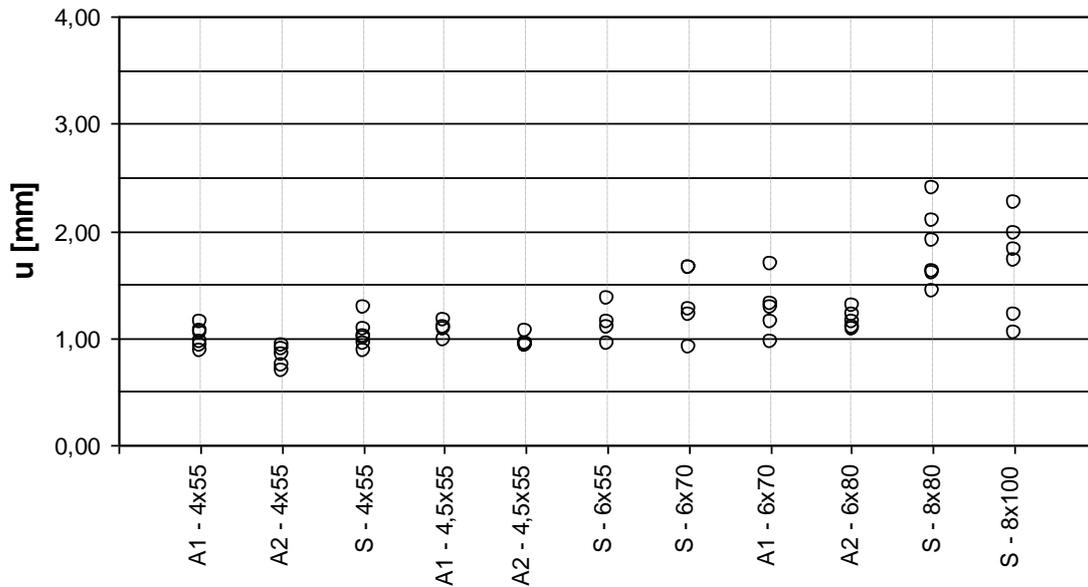


Bild 2.1-4 Eindrückungen bei Erreichen von $F_{D,max}$, Eindrücken ohne Kopf

Zur „Bereinigung“ der Schraubengeometrie wurde in Anlehnung an den in DIN 1052 definierten B_Z - Wert ein Wert B_D definiert:

$$B_D = \frac{F_{D,max}}{d_S \cdot l_g} \quad [N / mm^2]$$

mit

$F_{D,max}$ = Höchstlast aus den Versuchen in N

d_S = Schraubendurchmesser in mm

l_g = Gewindelänge in mm

In **Bild 2.1-5** sind diese Werte dargestellt.

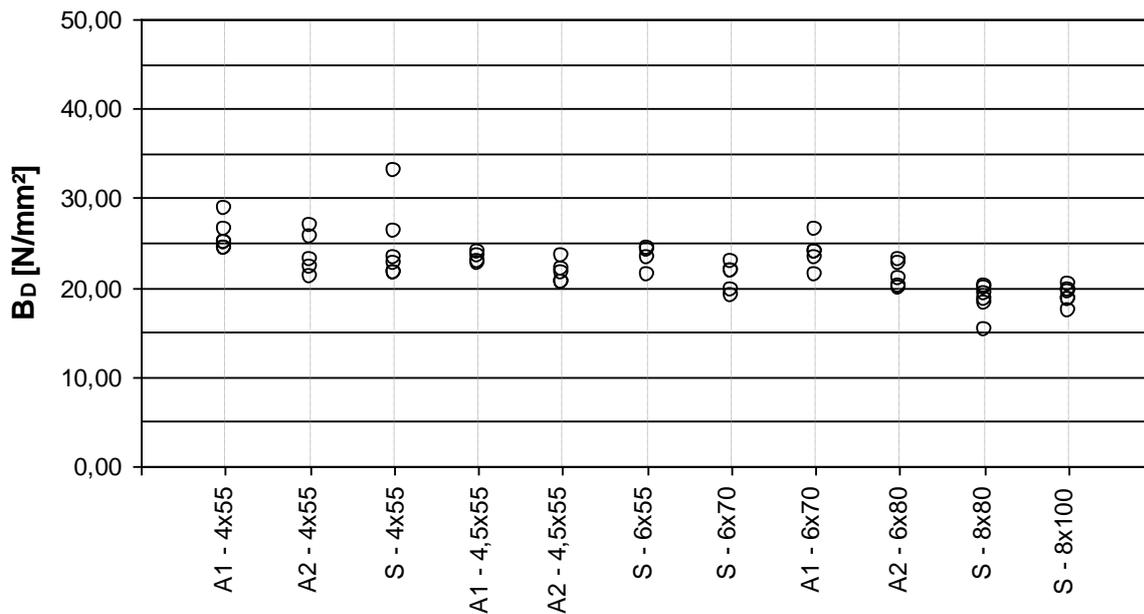


Bild 2.1-5 B_D - Werte, Eindrücken ohne Kopf

Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die B_D - Werte für alle Schraubentypen in der gleichen Größenordnung liegen, wobei eine leichte Abnahme mit zunehmender Schraubengröße (Wert $d_s \cdot l_g$) zu vermuten ist.

Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass das Verhältnis Gewindetiefe zu Schraubendurchmesser nicht konstant ist: bei kleineren Durchmessern ist die Verzahnung "wirksamer" als bei größeren Durchmessern.

2.1.2 Mit Mitwirkung des Schraubenkopfes

Die Schrauben wurden bündig mit der Holzoberfläche eingeschraubt. Zur Kraftübertragung auf den Schraubenkopf wurde ein jeweils auf den Kopfdurchmesser abgestimmtes Zwischenstück aus Stahl verwendet. In **Bild 2.1-6** ist die Versuchsvorrichtung für diese Versuchsreihe dargestellt.

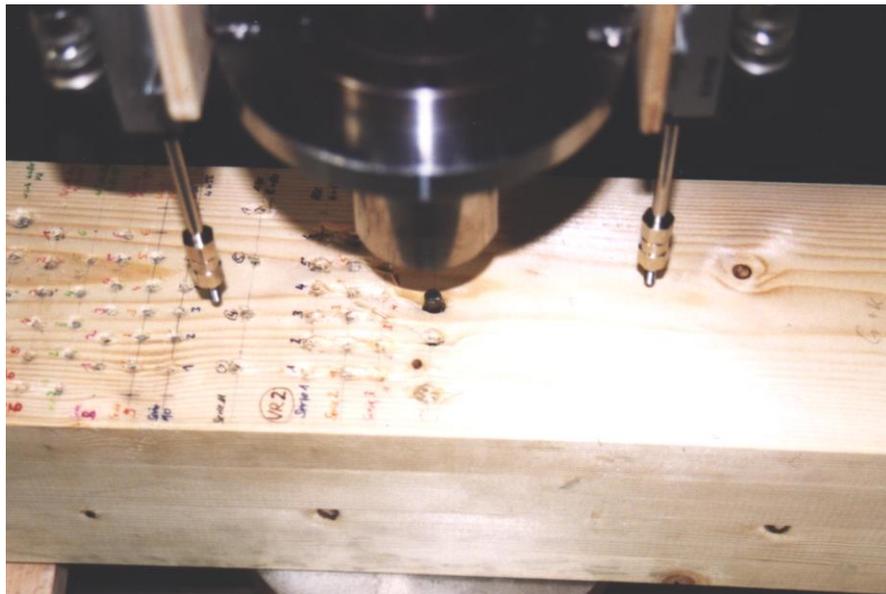


Bild 2.1-6 Versuchsvorrichtung zur Ermittlung des Eindrückverhaltens von Schrauben; mit Mitwirkung des Schraubenkopfes

Von jedem Schraubentyp wurden erneut 5 Versuche durchgeführt. In **Bild 2.1-7a und b** sind die Kraft-Verformungs-Diagramme der gleichen Schraubentypen wie in *Bild 2.1-2* beispielhaft dargestellt.

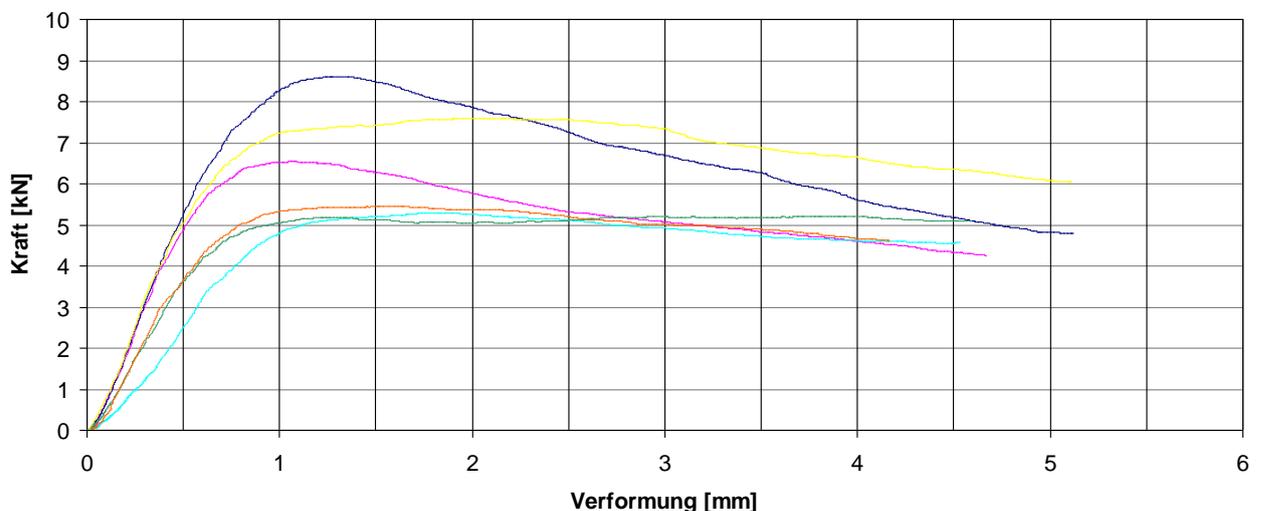


Bild 2.1-7a Kraft-Verformungs-Diagramme des Schraubentyps A1 - 4x55, Eindrücken mit Kopf

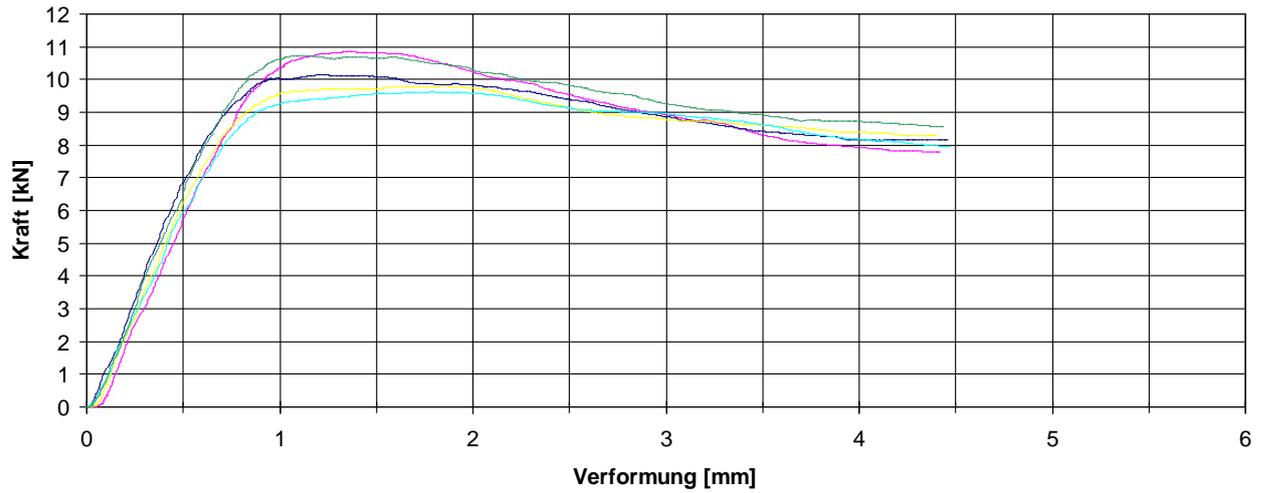


Bild 2.1-7b Kraft-Verformungs-Diagramme des Schraubentyps S - 6x70, Eindrücken mit Kopf

In Bild 2.1-8 sind die ermittelten Höchstwerte zusammengestellt.

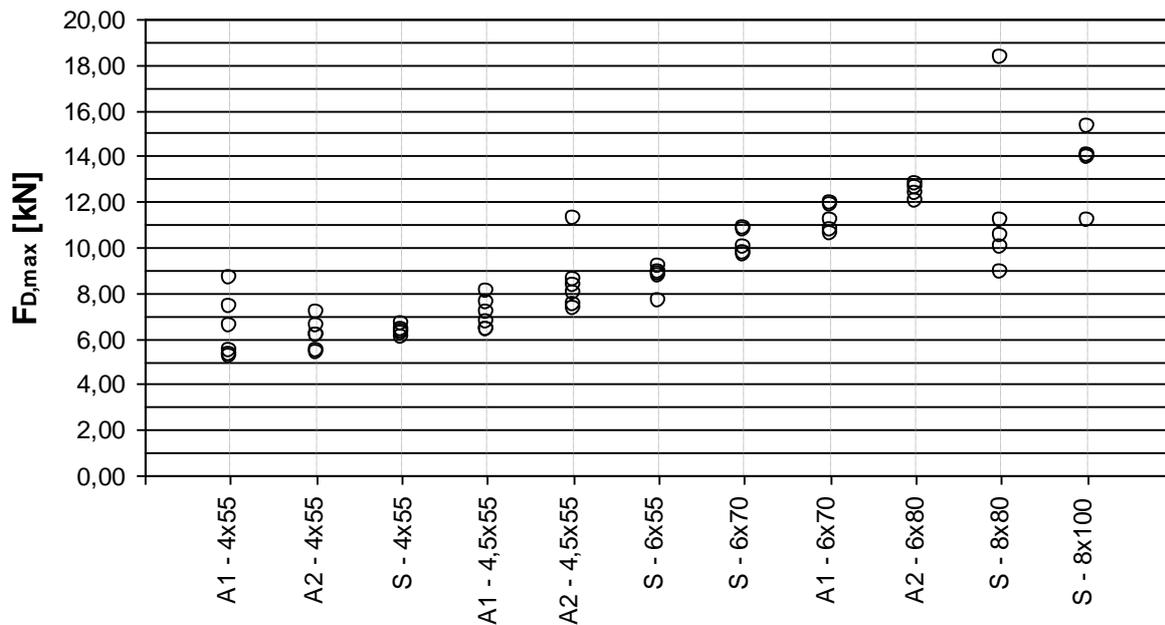


Bild 2.1-8 Höchstwerte $F_{D,max}$, Eindrücken mit Kopf

In Bild 2.1-9 sind die bei Erreichen der Höchstlast gemessenen Eindrückungen zusammengestellt.

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels Schnellbauschrauben

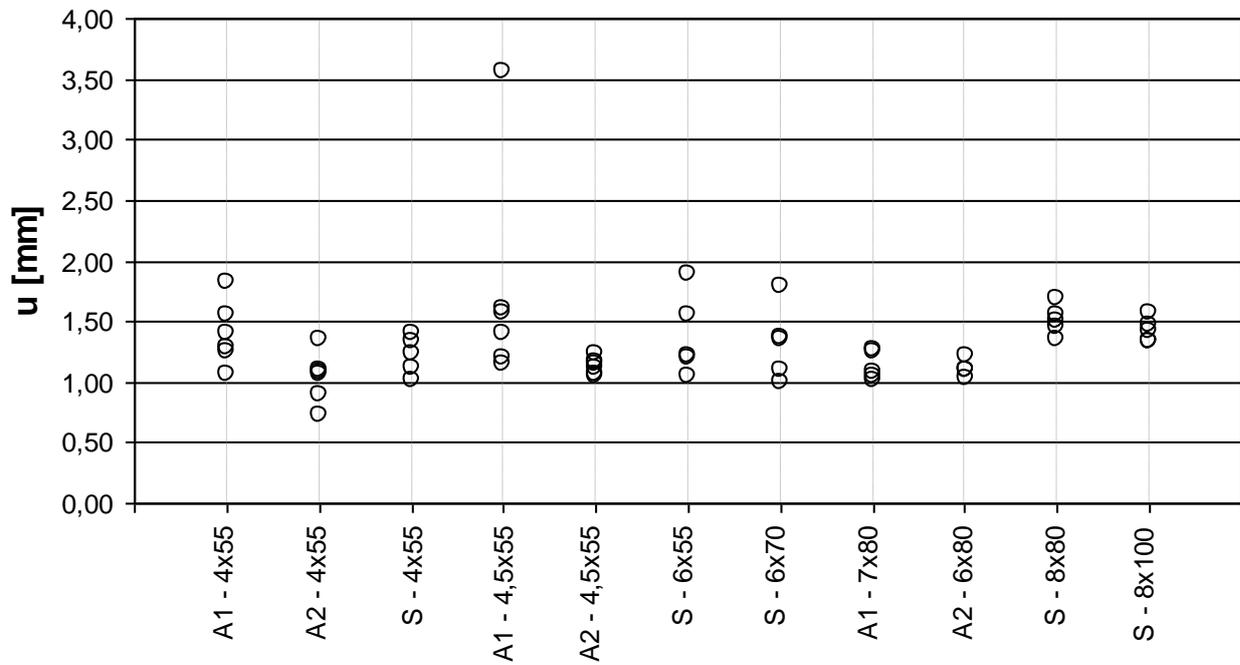


Bild 2.1-9 Eindrückungen bei Erreichen von $F_{D,max}$, Eindrücken mit Kopf

Zur „Bereinigung“ der Schraubengeometrie wurde wiederum der Wert B_D ermittelt:

$$B_D = \frac{F_{D,max}}{d_S \cdot l_g} \quad [N / mm^2]$$

mit

$F_{D,max}$ = Höchstlast aus den Versuchen in N

d_S = Schraubendurchmesser in mm

l_g = Gewindelänge in mm

In **Bild 2.1-10** sind diese Werte dargestellt.

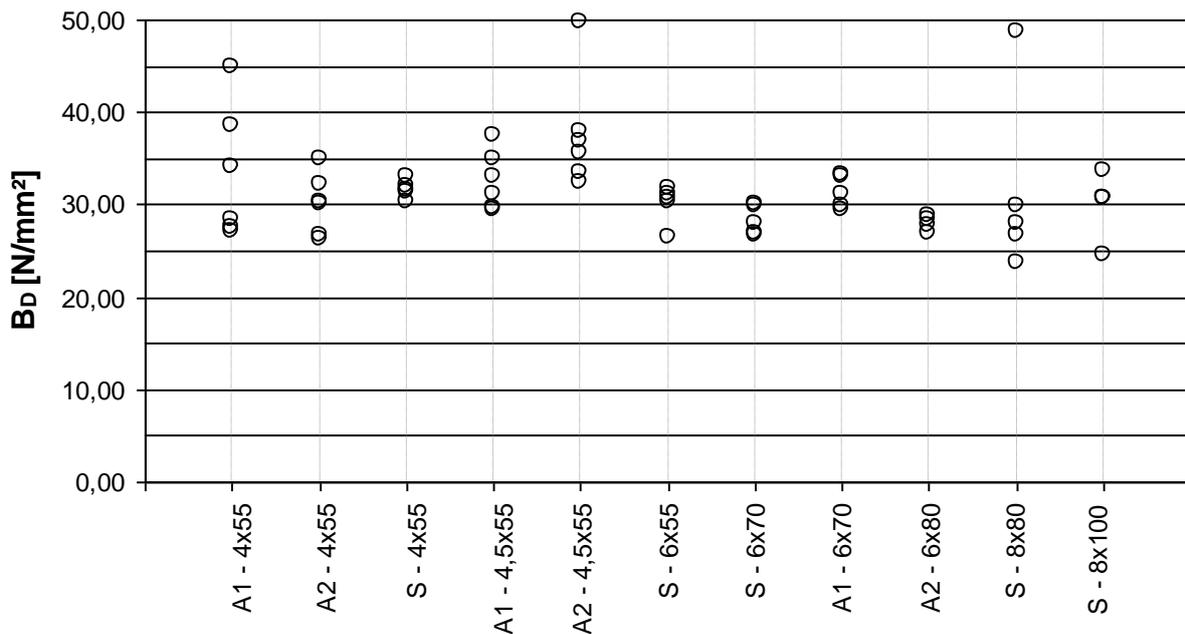


Bild 2.1-10 B_D - Werte, Eindrücken mit Kopf

Aus diesem Diagramm ist erneut eine leichte Abnahme der B_D - Werte mit zunehmender Schraubengröße (Wert $d_s \cdot l_g$) zu erkennen.

In **Tabelle 2.1-2** sind die Mittelwerte von B_D mit und ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes gegenübergestellt.

Tabelle 2.1-2 B_D - Werte (Mittelwerte in N/mm²) ohne/mit Mitwirkung des Schraubenkopfes

Schraubentyp	Mittelwerte von B_D		Faktor
	ohne	mit	
	Mitwirkung des Schraubenkopfes		
A1 - 4x55	25,7	33,4	1,30 ^{*)}
A1 - 4,5x55	23,2	32,6	1,41
A1 - 6x70	23,8	31,3	1,32 ^{*)}
A2 - 4x55	23,0	30,0	1,30
A2 - 4,5x55	21,7	37,7	1,74
A2 - 6x80	21,3	28,0	1,31
S - 4x55	24,7	31,6	1,28 ^{*)}
S - 6x55	23,3	30,1	1,29
S - 6x70	21,1	28,3	1,34 ^{*)}
S - 8x80	18,6	31,3	1,68
S - 8x100	19,1	30,0	1,57
*) ausgewählte Schraubentypen für die Hauptversuche			

Die Werte **mit** Mitwirkung des Schraubenkopfes liegen somit im Mittel etwa 30% über denen **ohne** Mitwirkung des Schraubenkopfes.

2.2 Direkte Lasteinleitung

Im Rahmen der Vorversuche zur Ermittlung des Tragverhaltens von Schwellen (direkte Lasteinleitung) wurde der in **Bild 2.2-1** dargestellte Versuchsaufbau gewählt.

Die Lasteinleitungsbreite wurde in Anlehnung an die Abmessungen der Wandstiele im Wohnungsbau mit 6 cm gewählt.

Bei den verstärkten Proben wurden 4 bzw. 6 Schrauben des Typs A1 - 4x55 eingebracht.

Die Eindrückungen wurden mittels induktiver Wegaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von 1/100 mm gemessen. Die Messlänge betrug 55 mm, was der Länge der Schrauben entsprach.

Im Hinblick auf die Erfassung möglichst ungünstiger Verhältnisse wurden die Probekörper ohne jeglichen Überstand ausgeführt. Ein weiterer Gesichtspunkt war dabei auch die Einsparung von Holz.

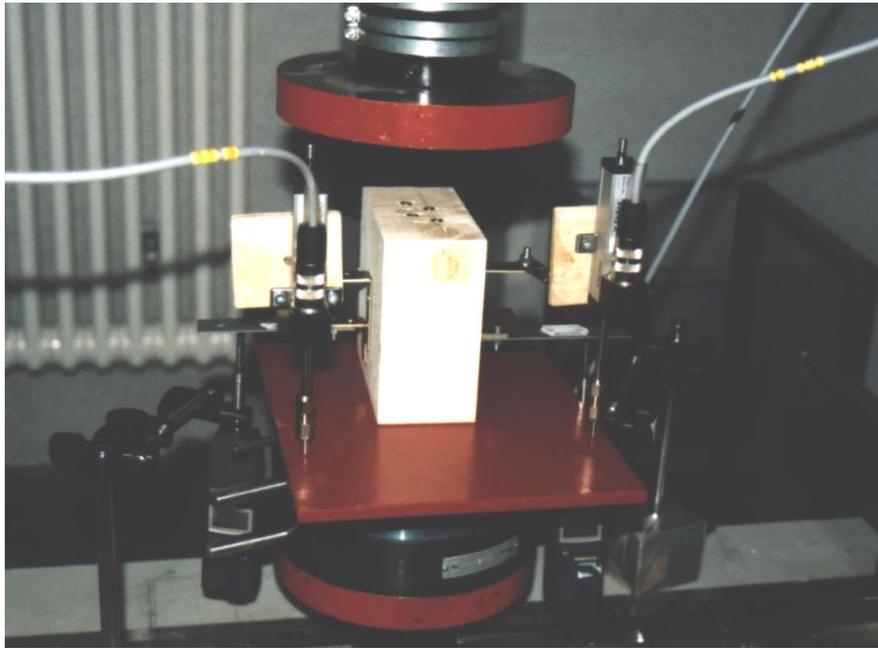


Bild 2.2-1 Versuchsanordnung (direkte Lasteinleitung, Schwellenpressung)

Für die Bestimmung des Verstärkungseffektes wurde folgendes Vorgehen gewählt:

1. Zunächst wurden die Eindrückungen ermittelt, die bei den unverstärkten Proben bei Erreichen der zulässigen Last nach DIN 1052 auftraten (u_{DIN}).
2. Für die Bestimmung des Verstärkungseffektes wurde angenommen, dass die bei den unverstärkten Proben aufgetretene mittlere „zulässige“ Eindrückung auch bei den verstärkten Proben auftreten darf. Daher wurden bei den verstärkten Proben die Lasten ermittelt, die bei Erreichen der mittleren „zulässigen“ Eindrückung aufgenommen wurden (F_{uDIN}).
3. Der Verstärkungseffekt auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung wurde dann wie folgt berechnet:

$$k_{V,DIN} = \frac{f_{v,uDIN}}{zul f_{DIN}}$$

mit

$f_{v,uDIN}$ = die bei Erreichen der "zulässigen" Eindrückung auftretende Spannung bei den verstärkten Proben

zul $\sigma_{DIN} = 0,8 \cdot 2,5 = 2,0 \text{ N/mm}^2$ (Faktor 0,8 wegen fehlendem Überstand).

4. Bei allen Versuchen wurde die Kraft F_{lin} und die Eindrückung u_{lin} bei Erreichen der Linearitätsgrenze bestimmt.
5. Der Verstärkungseffekt auf diesem Niveau wurde wie folgt berechnet:

$$k_{V,lin} = \frac{f_{v,lin}}{f_{uv,lin}}$$

mit

$f_{v,lin}$ = Spannung bei Erreichen der Linearitätsgrenze bei den verstärkten Proben

$f_{uv,lin}$ = zugehöriger Mittelwert der Spannung bei den unverstärkten Proben

6. Weiterhin wurde bei allen Proben die Last bei Erreichen der Querdruckfestigkeit nach DIN EN 1193 bestimmt. Die dort geregelte Ermittlung der Last bei Erreichen der Druckfestigkeit ist in **Bild 2.2-2** schematisch dargestellt.

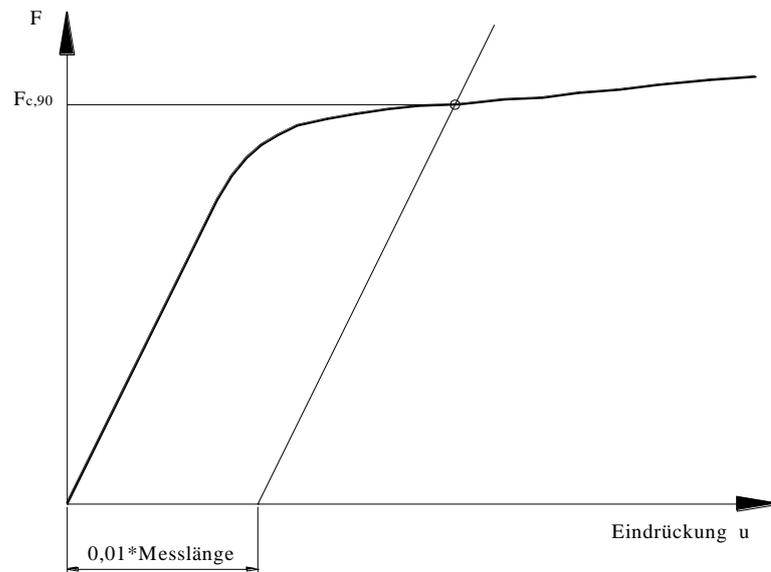


Bild 2.2-2 Ermittlung der Querdruckfestigkeit $F_{c,90}$ nach DIN EN 1193

7. Der Verstärkungseffekt auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit wurde wie folgt berechnet:

$$k_{v,c,90} = \frac{f_{v,c,90}}{f_{uv,c,90}}$$

mit

$f_{v,c,90}$ = Querdruckfestigkeit bei den verstärkten Proben

$f_{uv,c,90}$ = Mittelwert der Querdruckfestigkeit bei den unverstärkten Proben

In **Bild 2.2-3** ist ein typisches Last-Verformungsdiagramm einer verstärkten Probe mit den abgelesenen Werten dargestellt.

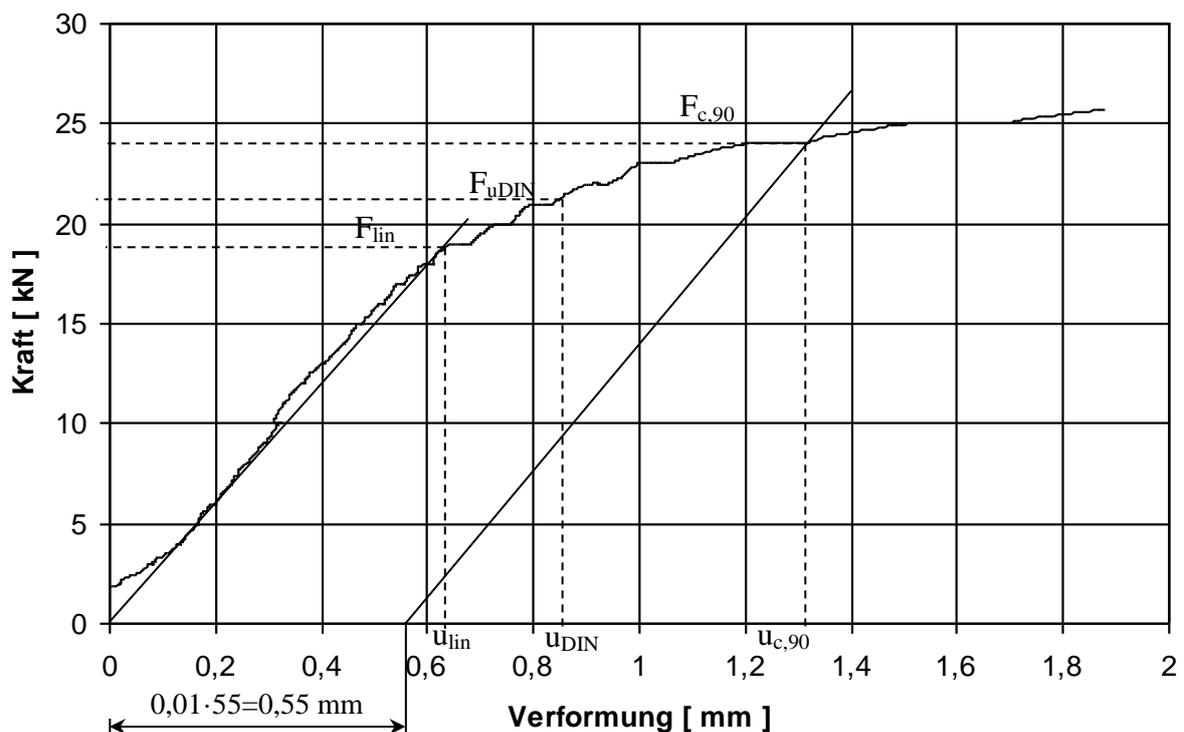


Bild 2.2-3 Typisches Last-Verformungs-Diagramm einer verstärkten Probe mit den abgelesenen Werten

In **Tabelle 2.2-1** sind die Versuchsergebnisse für die unverstärkten Proben zusammengestellt.

Tabelle 2.2-1 Versuchsergebnisse, unverstärkte Proben

zul σ_{DIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
2,00	1,09	1,89	1,03	2,78	2,06	100
2,00	0,64	1,76	0,51	2,63	1,30	190
2,00	0,46	1,85	0,36	2,63	1,06	280
2,00	1,25	2,00	1,25	2,78	2,28	90
<i>Mittelwerte</i>	<i>0,86</i>	<i>1,88</i>	<i>0,79</i>	<i>2,70</i>	<i>1,68</i>	<i>165</i>

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- bei Erreichen der zulässigen Spannung nach DIN 1052 liegt bereits ein nichtlineares Tragverhalten vor ($f_{lin} = 1,88 < 2,0 \text{ N/mm}^2 = \text{zul } \sigma_{DIN}$),
- die Verformungen bei Erreichen der rechnerischen Querdruckfestigkeit liegen bei 1-2 mm und somit in einer erwarteten Größenordnung,
- für den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung wurden deutlich geringere Werte ermittelt, als dies nach DIN 1052 zu erwarten war.

In **Tabelle 2.2-2a und b** sind die Versuchsergebnisse und die berechneten Verstärkungsfaktoren für die verstärkten Proben zusammengestellt.

Tabelle 2.2-2a Versuchsergebnisse und Verstärkungsfaktoren, verstärkte Proben (4 Schrauben)

	f_{uDIN} [N/mm ²]	$k_{V,DIN}$	f_{lin} [N/mm ²]	$k_{V,lin}$	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$k_{V,c,90}$	E_{90} [N/mm ²]
	2,33	1,17	2,22	1,19	3,21	1,19	180
	2,88	1,44	2,36	1,26	3,07	1,14	260
	3,89	1,94	2,47	1,32	3,21	1,19	330
	2,99	1,49	2,36	1,26	3,35	1,24	240
<i>Mittelwerte</i>	<i>3,02</i>	<i>1,51</i>	<i>2,35</i>	<i>1,26</i>	<i>3,21</i>	<i>1,19</i>	<i>250</i>

Tabelle 2.2-2b Versuchsergebnisse und Verstärkungsfaktoren, verstärkte Proben (6 Schrauben)

	f_{uDIN} [N/mm ²]	$k_{V,DIN}$	f_{lin} [N/mm ²]	$k_{V,lin}$	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$k_{V,c,90}$	E_{90} [N/mm ²]
	2,99	1,49	2,61	1,39	3,36	1,24	200
	2,78	1,39	2,36	1,26	3,18	1,18	210
	1,74	0,87	2,50	1,33	3,08	1,14	110
	1,96	0,98	2,35	1,25	3,06	1,13	130
<i>Mittelwerte</i>	<i>2,36</i>	<i>1,18</i>	<i>2,45</i>	<i>1,31</i>	<i>3,17</i>	<i>1,17</i>	<i>160</i>

Aus diesen Tabellen ist folgendes zu erkennen:

- bei einer Verstärkung mit 4 Schrauben beträgt der Verstärkungseffekt auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung etwa 50%. Bei 6 Schrauben beträgt dieser Effekt lediglich etwa 20%, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei zwei Versuchen „negative“ Effekte festzustellen waren. Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden.
- Die Schrauben verlängern den Bereich mit linearem Tragverhalten um etwa 25-30%, wobei kein signifikanter Unterschied zwischen 4 und 6 Schrauben festzustellen ist.
- Durch die Schrauben wird die Querdruckfestigkeit um etwa 15-20% erhöht, wobei erneut kein signifikanter Unterschied zwischen 4 und 6 Schrauben festzustellen ist.
- Der Elastizitätsmodul wird - mit Ausnahme der beiden „negativen“ Effekte - zwar ebenfalls erhöht, die Werte liegen aber nach wie vor deutlich unter dem in DIN 1052 angegebenen Wert.

Die Aussagekraft dieser Versuche wurde durch das Bruchverhalten der Proben in Frage gestellt: infolge der behinderten Querdehnung im Bereich der Lasteinleitungen trat im mittleren Bereich der Proben ein Querzugversagen auf (siehe **Bild 2.2-4**). Das Einbringen von 6 Schrauben könnte dieses Querzugversagen unterstützt haben, weil hier mehr Holz verdrängt wird (Einbringen ohne Vorbohren).

Im Rahmen der ersten Arbeitsgruppensitzung wurde daher auch beschlossen, die Hauptversuche an Proben mit einem einseitigen Überstand von etwa 200 mm durchzuführen. Hiermit sollten „Würfelbrüche“ verhindert werden.

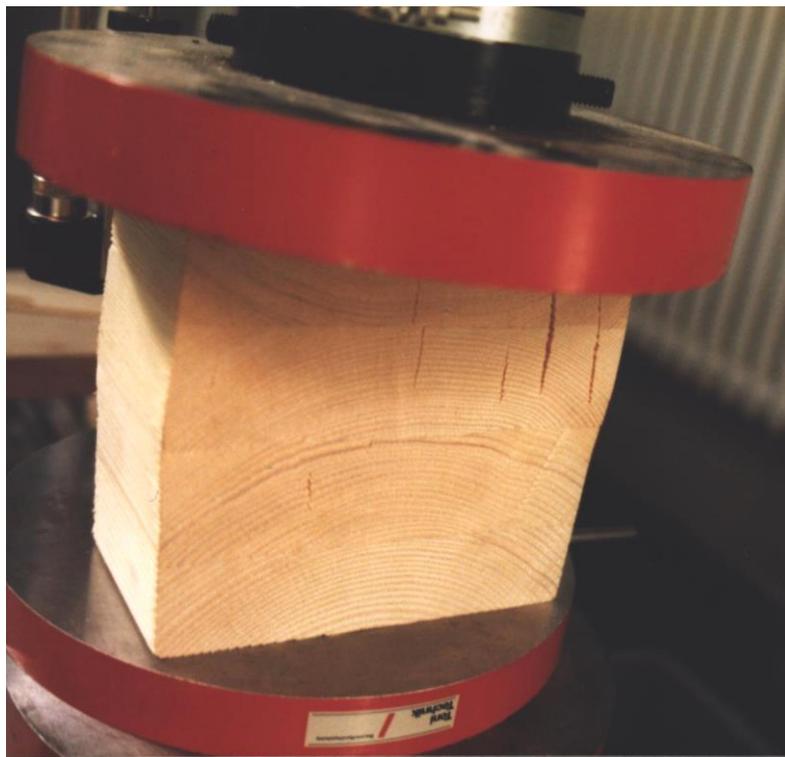


Bild 2.2-4 Querzugversagen („Würfelbruch“) durch behinderte Querdehnung

2.3 Indirekte Lasteinleitung

Im Rahmen der Vorversuche zur Ermittlung des Tragverhaltens von Balkenauflagern (indirekte Lasteinleitung) wurde der in **Bild 2.3-1** dargestellte Versuchsaufbau gewählt.

Als Lasteinleitungsbreite wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit den Schwellenversuchen ebenfalls 6 cm gewählt.

Bei den verstärkten Proben wurden 4 bzw. 6 Schrauben des Typs A1 - 4x55 eingebracht.

Die Eindrückungen wurden wiederum mittels induktiver Wegaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von 1/100 mm gemessen. Die Messlänge betrug 55 mm, was der Länge der Schrauben entsprach.

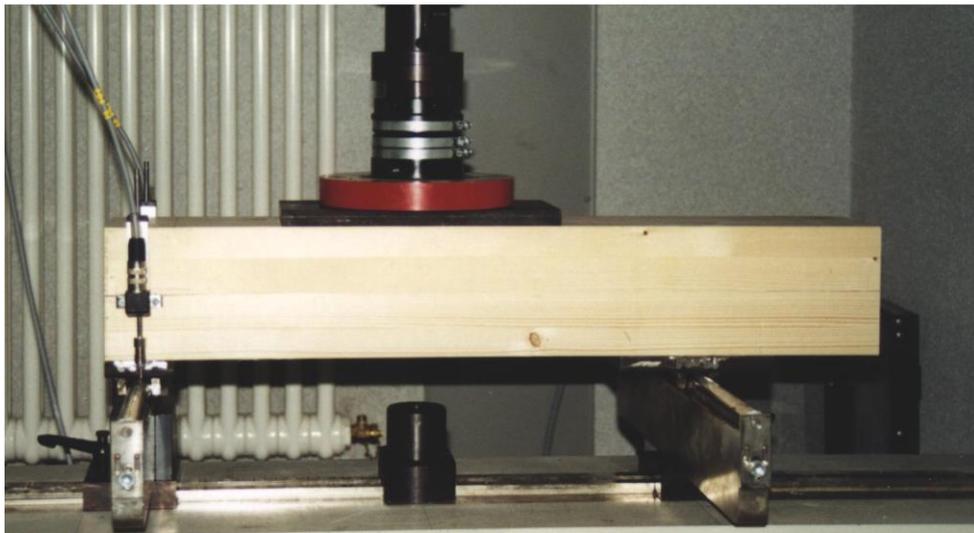


Bild 2.3-1 Versuchsanordnung (indirekte Lasteinleitung, Balkenaufleger)

Bedingt durch die Höchstlast der Prüfmaschine von 100 kN konnten die Versuche nicht wie bei den Schwellenversuchen bis zum Erreichen der Querdruckfestigkeit gefahren werden.

Für die Bestimmung des Verstärkungseffektes wurde - wie bei den Schwellenversuchen - folgendes Vorgehen gewählt:

1. Zunächst wurden die Eindrückungen ermittelt, die bei den unverstärkten Proben bei Erreichen der zulässigen Last nach DIN 1052 auftraten (u_{DIN}).
2. Für die Bestimmung des Verstärkungseffektes wurde angenommen, dass die bei den unverstärkten Proben aufgetretene mittlere „zulässige“ Eindrückung auch bei den verstärkten Proben auftreten darf. Daher wurden bei den verstärkten Proben die Lasten ermittelt, die bei Erreichen der mittleren „zulässigen“ Eindrückung aufgenommen wurden (F_{uDIN}).
3. Der Verstärkungseffekt auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung wurde dann wie folgt berechnet:

$$k_{v,DIN} = \frac{f_{v,uDIN}}{zul f_{DIN}}$$

mit

$f_{v,uDIN}$ = die bei Erreichen der "zulässigen" Eindrückung auftretende Spannung bei den verstärkten Proben

zul σ_{DIN} = $0,8 \cdot 2,5 = 2,0 \text{ N/mm}^2$ (Faktor 0,8 wegen fehlendem Überstand)

4. Die Kraft F_{lin} und die Eindrückung u_{lin} bei Erreichen der Linearitätsgrenze konnten nur bei den unverstärkten Proben bestimmt werden. Bei den verstärkten Proben mussten die Versuche meist wegen Erreichen der Höchstlast der Prüfmaschine abgebrochen werden. Somit konnte kein Verstärkungseffekt auf diesem Niveau ermittelt werden.
5. Das gleiche gilt für die Querdruckfestigkeit, die bei keinem der Proben ermittelt werden konnte.

In **Tabelle 2.3-1** sind die Versuchsergebnisse für die unverstärkten Proben zusammengestellt.

Tabelle 2.3-1 Versuchsergebnisse, unverstärkte Proben

zul σ_{DIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
2,00	0,12	5,10	0,29	-	-	970
2,00	0,16	5,29	0,43	-	-	680
2,00	0,20	5,22	0,52	-	-	550
<i>Mittelwerte</i>	<i>0,16</i>	<i>5,20</i>	<i>0,41</i>	-	-	<i>720</i>

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- im Gegensatz zu den Schwellenversuchen geht der Bereich linearen Tragverhaltens deutlich über den Bereich der zulässigen Spannung nach DIN 1052 hinaus ($f_{lin} = 5,20 > 2,0 = \text{zul } \sigma_{DIN}$),
- die auftretenden Eindrückungen sind deutlich geringer als bei den Schwellenversuchen, was auf einen positiven Einfluss der Lastausbreitung schließen lässt,
- die Werte für den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung liegen deutlich über denen der Schwellenversuche.

In **Tabelle 2.3-2a und b** sind die Versuchsergebnisse und die berechneten Verstärkungsfaktoren für die verstärkten Proben zusammengestellt.

Tabelle 2.3-2a Versuchsergebnisse und Verstärkungsfaktoren, verstärkte Proben (4 Schrauben)

	f_{uDIN} [N/mm ²]	$k_{V,DIN}$	f_{lin} [N/mm ²]	$k_{V,lin}$	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$k_{V,c,90}$	E_{90} [N/mm ²]
	2,00	1,00	4,86	-	-	-	690
	2,18	1,09	> 7,0	-	-	-	750
	2,49	1,25	> 7,0	-	-	-	850
	2,69	1,35	> 7,0	-	-	-	920
<i>Mittelwerte</i>		1,17	-	-	-	-	<i>800</i>

Tabelle 2.3-2b Versuchsergebnisse und Verstärkungsfaktoren, verstärkte Proben (6 Schrauben)

	$f_{u,DIN}$ [N/mm ²]	$k_{V,DIN}$	f_{lin} [N/mm ²]	$k_{V,lin}$	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$k_{V,c,90}$	E_{90} [N/mm ²]
	1,88	0,94	> 7,0	-	-	-	650
	2,49	1,25	> 7,0	-	-	-	860
	2,97	1,49	> 7,0	-	-	-	1020
	3,58	1,79	> 7,0	-	-	-	1230
<i>Mittelwerte</i>	<i>2,73</i>	<i>1,37</i>		-	-	-	<i>940</i>

Aus diesen beiden Tabellen ist folgendes zu erkennen:

- bei einer Verstärkung mit 4 Schrauben beträgt der Verstärkungseffekt auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung etwa 15%. Bei 6 Schrauben erhöht sich dieser Effekt auf etwa 35%, wobei zu berücksichtigen ist, dass erneut bei einem Versuchen ein „negativer“ Effekt festzustellen war,
- die Schrauben verlängern den Bereich mit linearem Tragverhalten erneut deutlich, wobei genauere Werte wegen der begrenzten Höchstlast der Prüfmaschine nicht ermittelt werden konnten,
- der Elastizitätsmodul wird durch die Anordnung der Schrauben erhöht.

2.4 Schlussfolgerungen für die Hauptversuche

Im Rahmen einer Arbeitsgruppensitzung wurden die Vorversuche besprochen und die nachfolgend aufgeführten Randbedingungen für die Hauptversuche festgelegt.

Zu den Schwellenversuchen:

- Die Schwellenversuche sollten mit Vollholz, und nicht wie ursprünglich vorgesehen, mit Brettschichtholz durchgeführt werden. Dies wurde deshalb so entschieden, weil der Haupt-Anwendungsfall für diese Beanspruchung im Bereich des Hausbaus liegt, bei dem vornehmlich Vollholz-Schwellen eingesetzt werden.
- Um die Verhältnisse bei einer Fußschwelle möglichst realitätsnah zu erfassen, wurde vereinbart, die Prüflast über eine zwischengelegte „Stirnholzscheibe“ (Dicke etwa 20 mm) einzuleiten. Hiermit soll die Kraftübertragung eines Pfostens auf die Schwelle angenähert werden.
- Die Prüfkörper sollten einen einseitigen Überstand von etwa 200 mm besitzen, um einen „Würfelbruch“ wie bei den Vorversuchen zu vermeiden.
- Als Querschnitt für die Schwellen wurde $b/h = 140/60$ mm festgelegt.
- Die Versuche sollten sowohl mit Holz einer Rohdichte von etwa 400 kg/m³ als auch mit etwa 500 kg/m³ durchgeführt werden.
- Als Schrauben wurden die Typen A1 - 4x55 und S - 4x55 festgelegt. Auf einen größeren Schraubendurchmesser wurde verzichtet, weil dies in dem vorgesehenen Anwendungsfall als unüblich eingeschätzt wurde.
- Zur Verstärkung sollten 4 bzw. 9 Schrauben angeordnet werden.

Zu den Auflagerversuchen:

- Die Auflagerversuche sollten mit Brettschichtholz durchgeführt werden. Als Anwendungsbereich wurde hier der Holz-Skelettbau angesehen, in dem häufig Brettschichtholz zum Einsatz kommt.
- Als Querschnitt für die BSH-Träger wurde $b/h = 140/240$ mm festgelegt.
- Die Versuche sollten mit Brettschichtholz sowohl mit einer Rohdichte von etwa 400 kg/m^3 als auch mit etwa 500 kg/m^3 durchgeführt werden.
- Als Schrauben wurden die Typen A1 - 6x70 und S - 6x70 festgelegt. Auf einen kleineren Schraubendurchmesser wurde verzichtet.
- Zur Verstärkung sollten 4 bzw. 9 Schrauben angeordnet werden.

3 Schraubenversuche

3.1 Materialwahl

Für die Hauptversuche wurde folgendes Material ausgewählt:

- Schrauben Typ A1 - 4x55 und S - 4x55 für die Schwellenversuche (direkte Lasteinleitung);
- Schrauben Typ A1 - 6x70 und S - 6x70 für die Auflagerversuche (indirekte Lasteinleitung);
- Konstruktionsvollholz (KVH) b/h = 140/60 mm für die Schwellenversuche³: hierzu wurden gezielt Hölzer mit einer Rohdichte von $400 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ und zu einem späteren Zeitpunkt Hölzer mit einer Rohdichte von $500 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ ausgesucht. Bei der späteren Auswertung von Versuchsergebnissen stellte sich heraus, dass die Hölzer mit der höheren Rohdichte tatsächlich nur eine Rohdichte von etwa 465 kg/m^3 aufwiesen. Zum Zeitpunkt der Wägung hatten diese Hölzer eine Holzfeuchte von etwa 22%, wobei das im Vergleich zu trockenem Holz höhere Gewicht eine höhere Rohdichte „vortäuschte“.
- Brettschichtholz b/h = 140/240 mm für die Auflagerversuche⁴: hierzu wurden gezielt BSH-Träger mit Brettern geringer ($\rho = 400 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) und hoher ($\rho = 500 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) Rohdichte hergestellt. Diese Bretter wurden übereinandergelegt und miteinander verleimt, so dass keine Keilzinkenverbindungen auftraten. Hierdurch sollten möglichst gleichwertige Materialien für die verschiedenen Versuchsreihen gewährleistet werden.

3.2 Eindrückversuche

Das Tragverhalten der ausgewählten Schrauben unter Eindrückbeanspruchung wurde eingehender untersucht. Hierbei beschränkte man sich - wie mit der Arbeitsgruppe abgesprochen - auf das Eindrückverhalten „mit Kopf“, d.h. unter Mitwirkung des Schraubenkopfes.

In **Tabelle 3.2-1** sind die durchgeführten Versuchsreihen zusammengestellt. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils 10 Versuche durchgeführt.

Tabelle 3.2-1 Versuchsreihen, Eindrückversuche „mit Kopf“

KVH				BSH			
$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 500 (465) \text{ kg/m}^3$		$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$	
A1-4x55	S-4x55	A1-4x55	S-4x55	A1-6x70	S-6x70	A1-6x70	S-6x70
x	x	x	x	x	x	-	-

Im Hinblick auf die Vermeidung von störenden oder verfälschenden Einflüssen wurden die Schrauben - so weit dies erkennbar war - in astfreie Bereiche eingeschraubt.

³ Der Fa. Anton Heggenstaller AG, Aichach sei sehr herzlich für die Unterstützung dieses Vorhabens gedankt

⁴ Der Fa. Jakob Maier GmbH, Türkheim sei sehr herzlich für die Unterstützung dieses Vorhabens gedankt

In **Bild 3.2-1 und -2** sind die Last-Verformungsdiagramme zweier Versuchsreihen beispielhaft dargestellt.

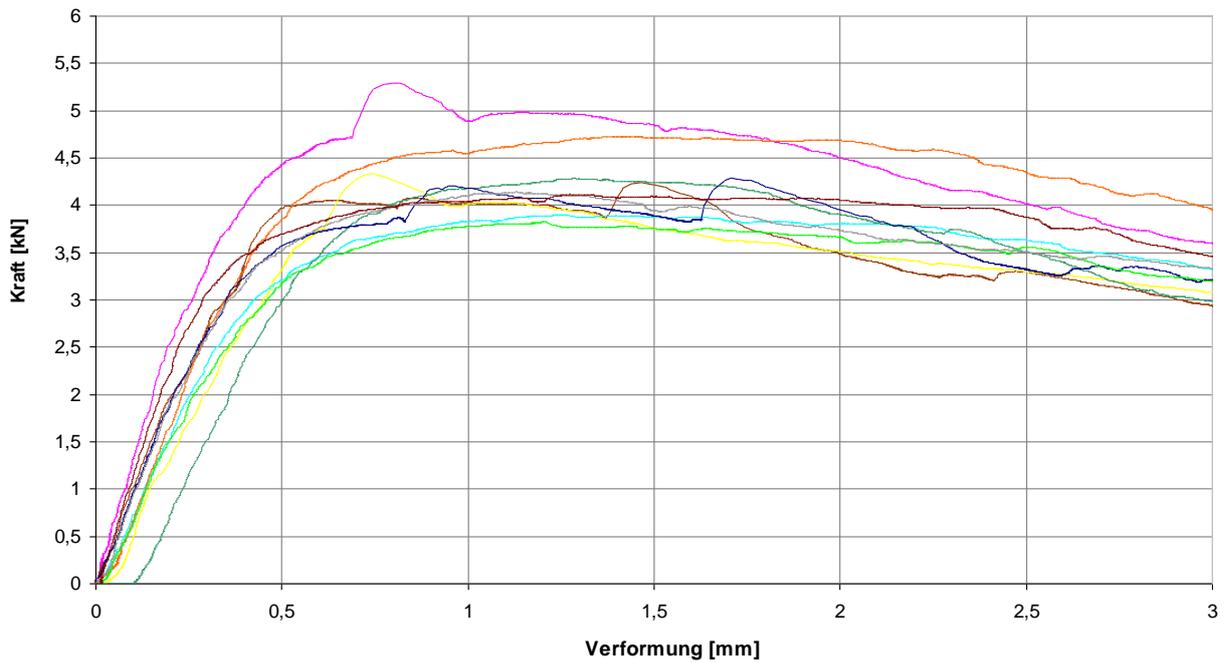


Bild 3.2-1 Versuchsergebnisse KVH 400 kg/m³, Typ A1 - 4x55

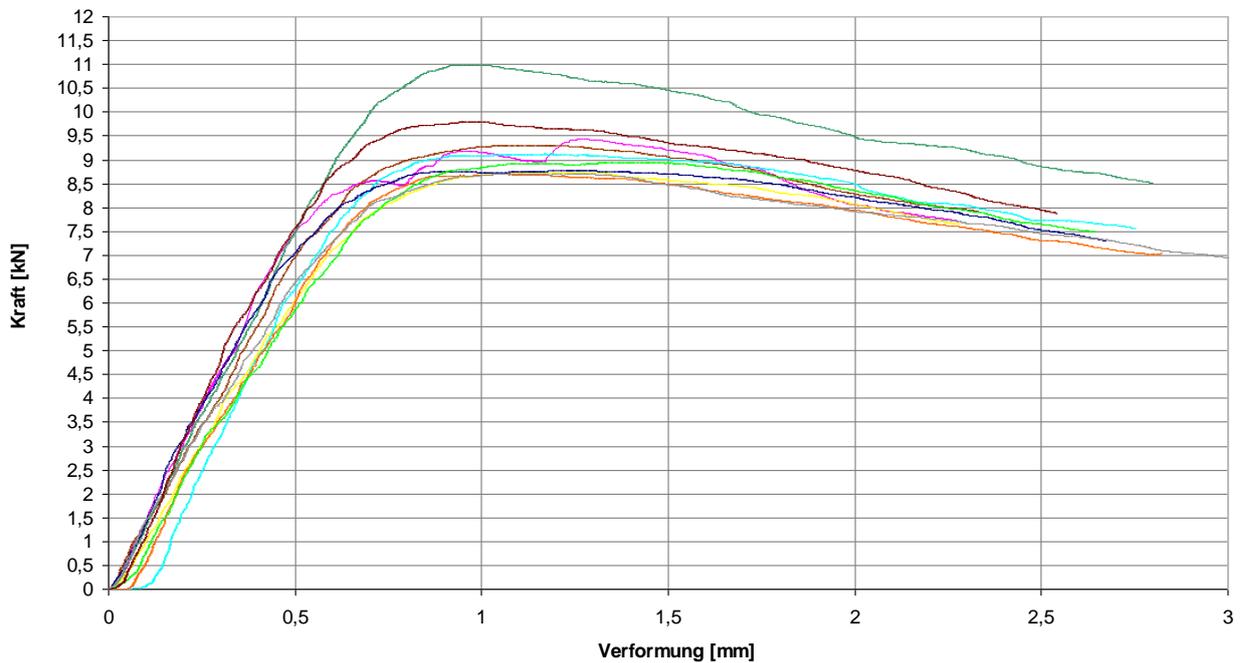


Bild 3.2-2 Versuchsergebnisse BSH 400 kg/m³, Typ S - 6x70

In **Bild 3.2-3** sind alle ermittelten Höchstwerte dargestellt.

In **Tabelle 3.2-2** sind die Ergebnisse statistisch ausgewertet.

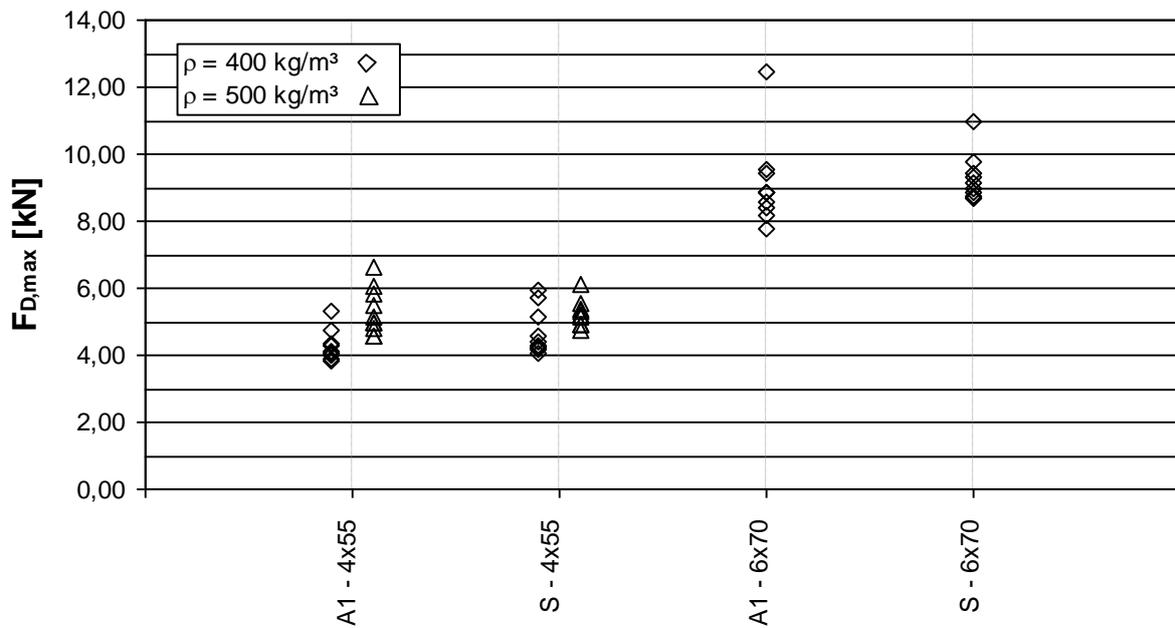


Bild 3.2-3 Höchstwerte $F_{D,max}$, Eindrücken mit Kopf

Zur „Bereinigung“ der Schraubengeometrie wurde - wie bei den Vorversuchen - der Wert B_D definiert:

$$B_D = \frac{F_{D,max}}{d_S \cdot l_g} \quad [\text{N} / \text{mm}^2]$$

mit

$F_{D,max}$ = Höchstlast aus den Versuchen in N

d_S = Schraubendurchmesser in mm

l_g = Gewindelänge in mm

In Bild 3.2-4 sind diese Werte dargestellt.

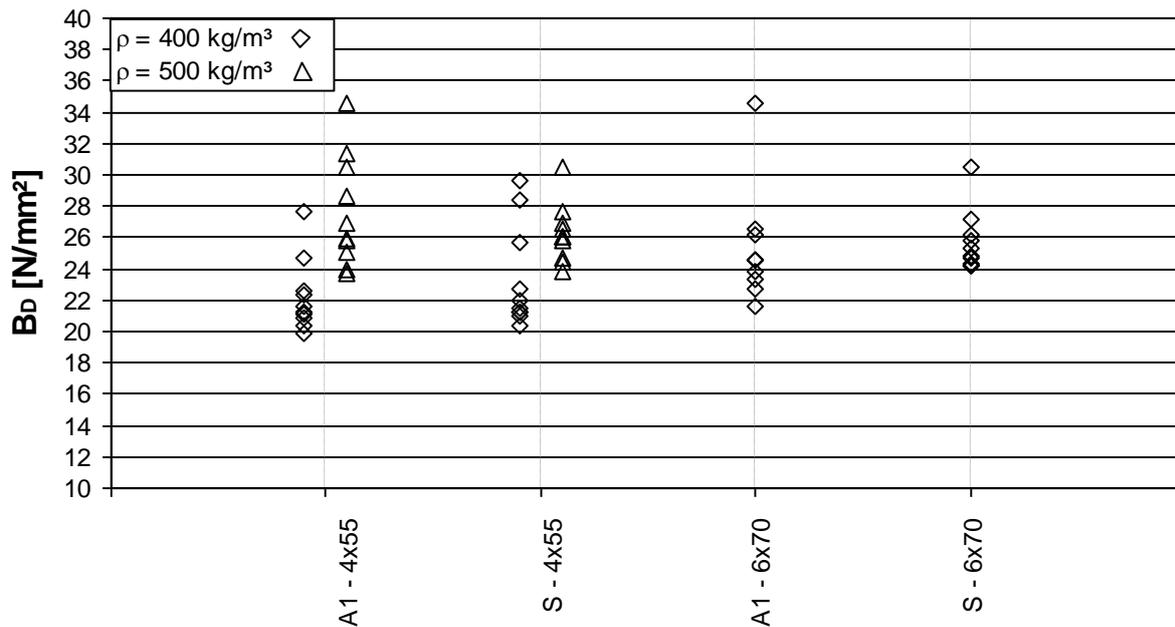


Bild 3.2-4 B_D - Werte, Eindrücken mit Kopf

Tabelle 3.2-2 Zusammenfassung der Ergebnisse,

	KVH				BSH			
	$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 500 (465) \text{ kg/m}^3$		$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$	
	A1-4x55	S-4x55	A1-4x55	S-4x55	A1-6x70	S-6x70	A1-6x70	S-6x70
F_{D,max}								
Mittelwert	4,26	4,68	5,31	5,25	9,10	9,26	-	-
Stand. abw.	0,42	0,63	0,64	0,36	1,22	0,67	-	-
5%-Frakt.	3,57	3,63	4,25	4,66	7,08	8,16	-	-
B_D								
Mittelwert	22,2	23,4	27,7	26,3	25,3	25,7	-	-
Stand. abw.	2,20	3,17	3,36	1,79	3,40	1,86	-	-
5%-Frakt.	18,6	18,2	22,1	23,3	19,7	22,7	-	-

Aus diesen Bildern und Tabelle 3.2-2 ist folgendes zu erkennen:

- Die Unterschiede zwischen den Schraubentypen A1 und S sind gering.
- Die Höchstwerte $F_{D,max}$ liegen bei KVH der Rohdichte 500 (465) kg/m^3 etwa 20% über denen bei KVH mit einer Rohdichte von 400 kg/m^3 .
- Die B_D - Werte für BSH liegen etwa 10% über denen für KVH.

3.3 Ausziehversuche

Insbesondere bei den Schwellenversuchen zeigte sich, dass die Schraubenköpfe nach Beendigung der Versuche z.T. deutlich über das eingedrückte Holz herausragten: das Holz wurde stärker zusammengedrückt als die Schrauben in das Holz hineingedrückt wurden. Dies entspricht einer Ausziehbeanspruchung der Schraube, zumindest im Bereich der Oberfläche.

Daher wurde - zusätzlich zu dem bereits beschriebenen Eindruckverhalten - das Ausziehverhalten der verschiedenen Schraubentypen untersucht.

In **Bild 3.3-1** ist die Versuchsvorrichtung zur Ermittlung des Ausziehverhaltens dargestellt.

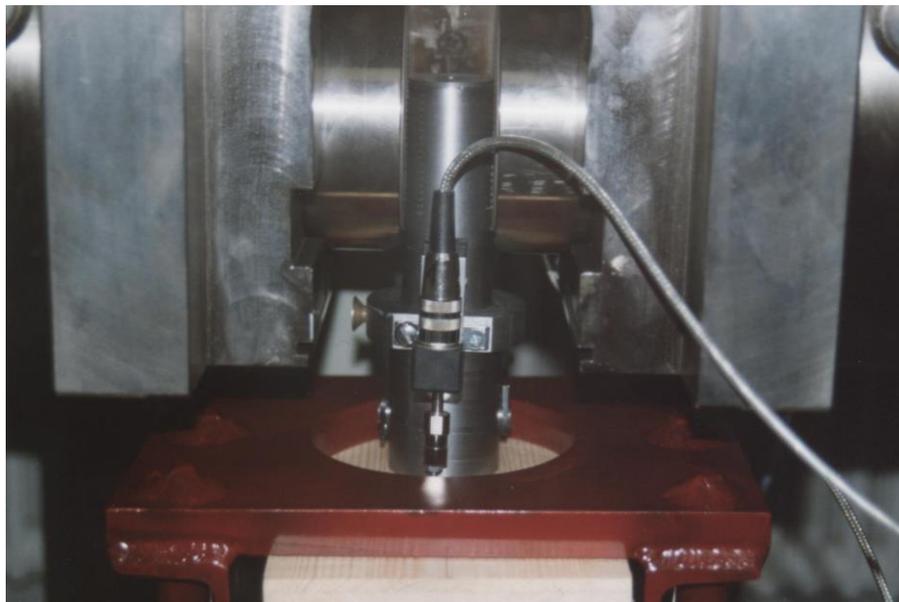


Bild 3.3-1 Versuchsvorrichtung für Ausziehversuche

In **Tabelle 3.3-1** sind die durchgeführten Versuchsreihen zusammengestellt. In jeder Versuchsreihe wurden jeweils 5-6 Versuche durchgeführt.

Tabelle 3.3-1 Versuchsreihen, Ausziehversuche

	KVH				BSH			
	$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 500 \text{ (465) kg/m}^3$		$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$		$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$	
	Typ A1	Typ S	Typ A1	Typ S	Typ A1	Typ S	Typ A1	Typ S
4x55	x	x	x	x	x	x	x	x
6x70	x	x	x	x	x	x	x	x

Im Hinblick auf die Vermeidung von störenden oder verfälschenden Einflüssen wurden die Schrauben - so weit dies erkennbar war - in astfreie Bereiche eingeschraubt.

In **Bild 3.3-2 und -3** sind die Last-Verformungsdiagramme zweier Versuchsreihen beispielhaft dargestellt.

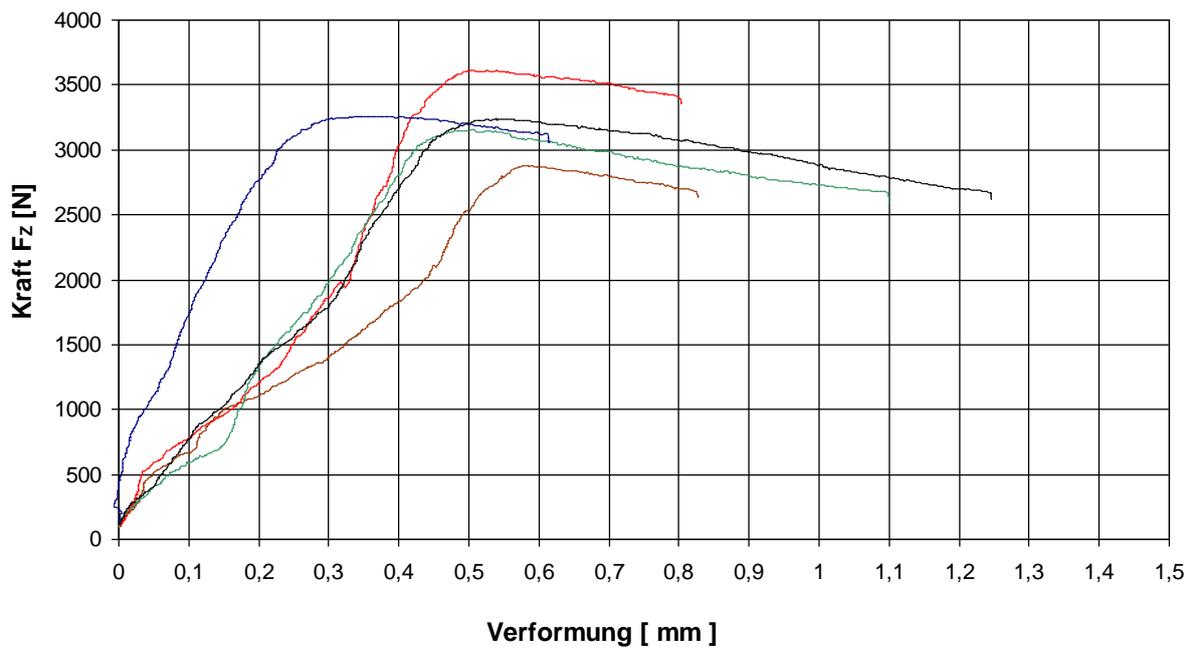


Bild 3.3-2 Versuchsergebnisse KVH 400 kg/m^3 , Typ A1 - 4x55

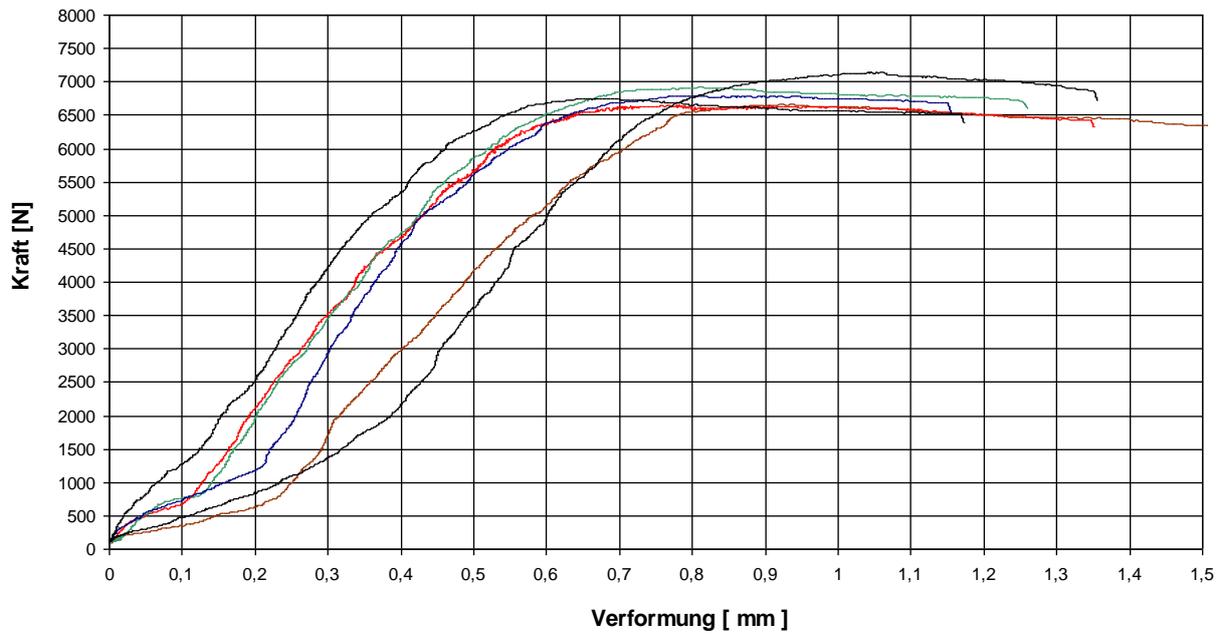


Bild 3.3-3 Versuchsergebnisse BSH 400 kg/m³, Typ S - 6x70

In **Bild 3.3-4a** und **-4b** sind die ermittelten Höchstwerte für die Rohdichten 400 und 500 kg/m³ dargestellt.

In **Tabelle 3.3-2** sind die Ergebnisse statistisch ausgewertet.

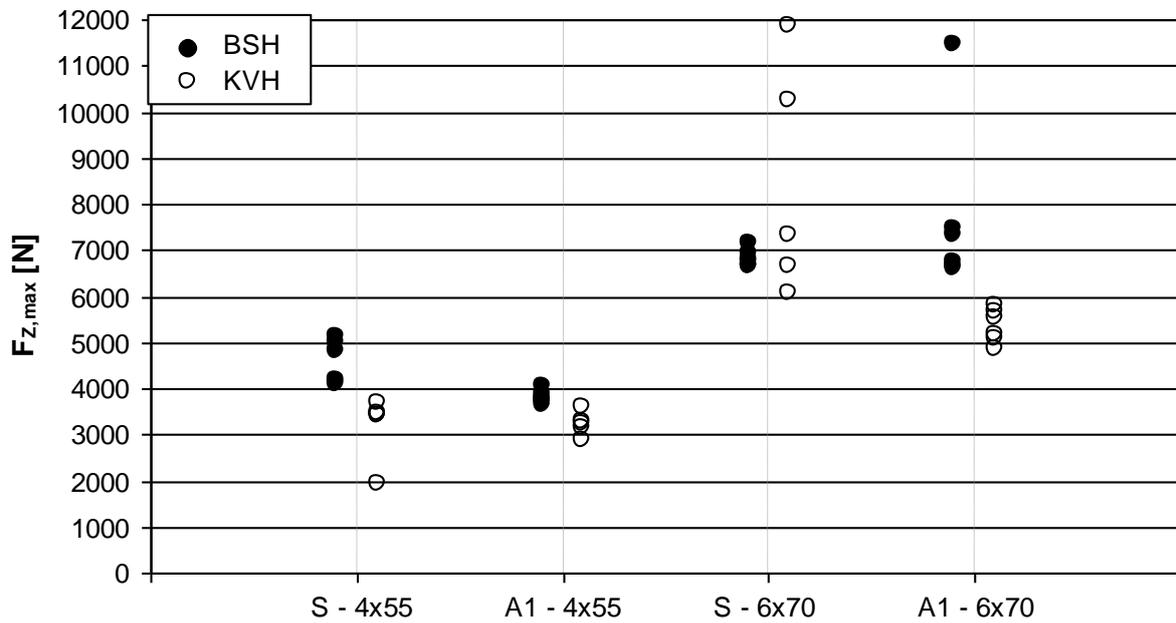


Bild 3.3-4a Höchstwerte $F_{Z,max}$, Rohdichte 400 kg/m³

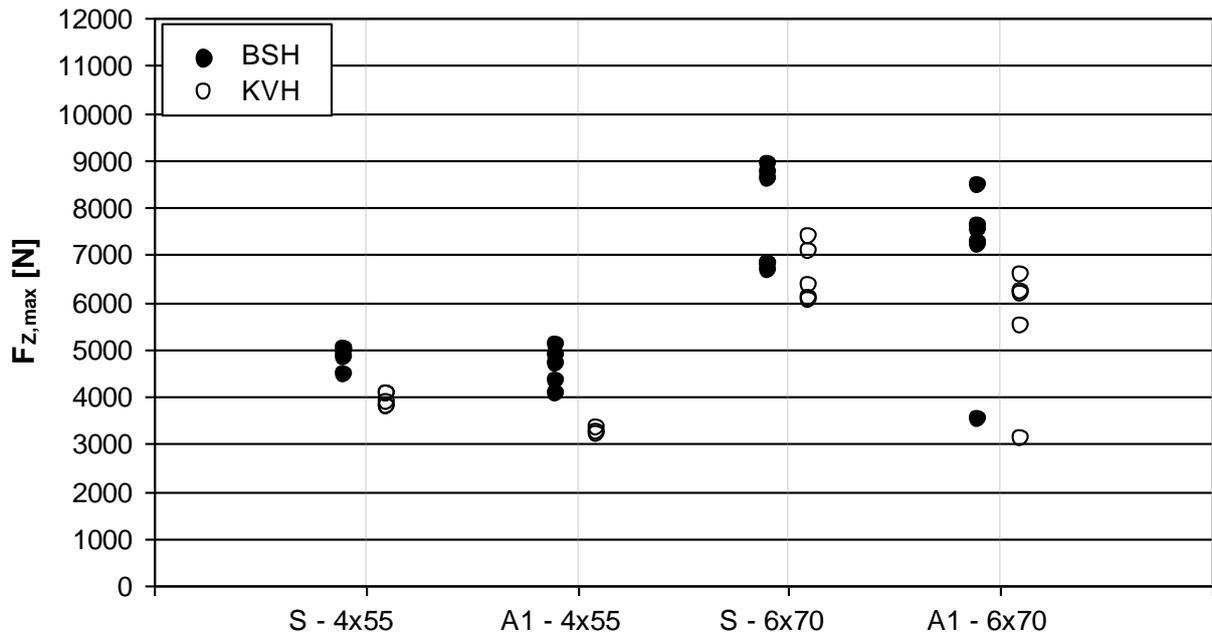


Bild 3.3-4b Höchstwerte $F_{Z,max}$, Rohdichte 500 kg/m^3

In **Bild 3.3-5a und b** sind die berechneten B_Z - Werte für die Rohdichten 400 und 500 kg/m^3 dargestellt.

In **Tabelle 3.3-2** sind die Versuchsergebnisse statistisch ausgewertet.

In **Tabelle 3.3-3** sind die Versuche nochmals ausgewertet, wobei sowohl die Schraubentypen A1 und S als auch die verschiedenen Schraubendurchmesser jeweils zusammengefasst wurden.

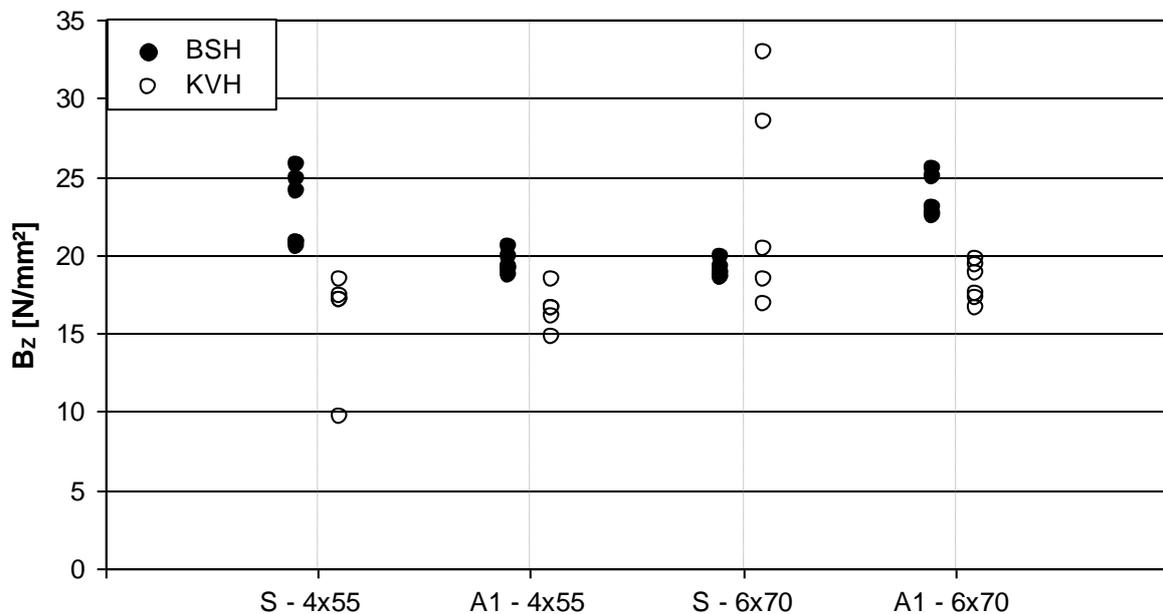


Bild 3.3-5a B_Z - Werte, Rohdichte 400 kg/m^3

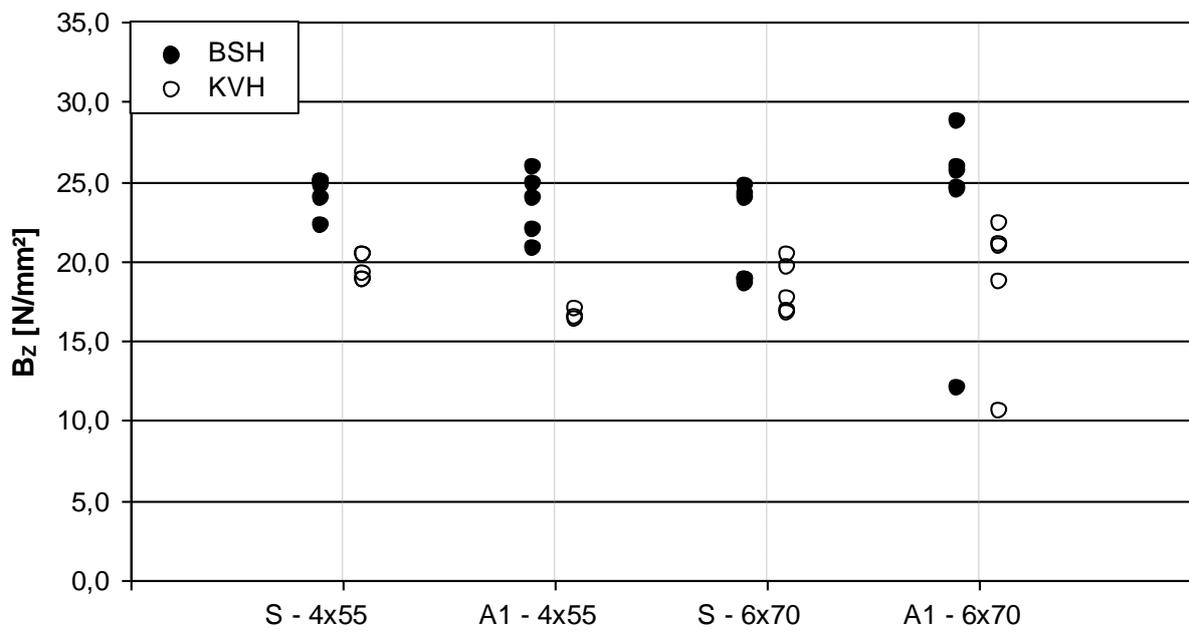


Bild 3.3-5b B_z - Werte, Rohdichte 500 kg/m^3

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels Schnellbauschrauben

Tabelle 3.3-2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Schrauben- größe		KVH				BSH			
		400 kg/m ³		500 (465) kg/m ³		400 kg/m ³		500 kg/m ³	
		A1	S	A1	S	A1	S	A1	S
4x55	F_{Z,max}								
	Mittelwert	3,23	3,19	3,25	3,90	3,80	4,56	4,60	4,85
	Stand. abw.	0,23	0,64*	0,05	0,14	0,12	0,42	0,37	0,20
	5%-Frakt.**)	2,85	2,13*	3,16	3,67	3,60	3,86	3,99	4,52
	B_Z								
	Mittelwert	16,5	15,9	16,6	19,5	19,4	22,8	23,5	24,3
Stand. abw.	1,19	3,2*	0,28	0,69	0,63	2,12	1,89	1,00	
5%-Frakt.**)	14,5	10,7*	16,1	18,4	18,3	19,3	14,6	22,6	
6x70	F_{Z,max}								
	Mittelwert	5,35	8,43	5,50	6,56	7,71	6,82	6,92	7,74
	Stand. abw.	0,34	2,24*	1,25*	0,54	1,70*	0,17	1,58*	1,00
	5%-Frakt.	4,79	4,74*	3,44*	5,67	4,91*	6,54	4,32*	6,09
	B_Z								
	Mittelwert	18,2	23,4	18,7	18,2	26,2	18,9	23,5	21,5
Stand. abw.	1,16	6,23*	4,25*	1,50	5,79*	0,47	5,37*	2,78	
5%-Frakt.**)	16,3	13,2*	11,7*	15,8	16,7*	18,2	14,7*	16,9	
*) Streuung durch Einzelwerte (Ausreißer) stark vergrößert									
**) Berechnet unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$									

Tabelle 3.3-3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse, B_Z - Wert in N/mm²

B _Z - Wert	KVH			BSH		
Rohdichte	Mittelwert	Stand. abw.	5%-Frakt.*)	Mittelwert	Stand. abw.	5%-Frakt.*)
400 kg/m ³	18,5	4,66	10,8	21,8	4,37	14,6
500 kg/m ³	18,4	2,67	14,1	23,2	3,49	17,4
*) Berechnet unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$						

Aus den Bildern und Tabellen ist folgendes zu erkennen:

- Sowohl bei der Rohdichte 400 kg/m³ als auch bei 500 kg/m³ ist die Tendenz zu erkennen, dass die Schrauben in Brettschichtholz höhere Auszieherte erreichen als bei Vollholz.
- Im direkten Vergleich zwischen den Schraubentypen A1 und S erreichten die Schrauben des Typs 6 mal höhere Werte, während die Schrauben des Typs A1 zweimal „besser“ waren. Eine eindeutige Tendenz lässt sich aufgrund der Versuchsanzahl (jeweils 5 bis 6 Versuche) jedoch nicht erkennen.
- Anders als bei den Eindrückversuchen ist keine eindeutige Tendenz dahingehend festzustellen, ob und inwieweit die Schrauben mit zunehmender Rohdichte des Holzes höhere Auszieherte erreichen. Die Mittelwerte liegen jeweils in der gleichen Größenordnung, lediglich bei den 5%-Fraktilwerten deutet sich an, dass die Auszieherte in Holz höherer Rohdichte größer sind.

4 Einschraubversuche (Mindestabstände)

Für die hier untersuchte Beanspruchung von Schrauben sind in DIN 1052 keine Verbindungsmittelabstände festgelegt. Im Hinblick auf die Vermeidung von Spaltrissen bei zu enger Schraubenanordnung wurden verschiedene Schraubenbilder untersucht.

Die Einschraubversuche wurden an Konstruktionsvollholz (KVH) und Brettschichtholz (BSH) mit hoher Rohdichte ($\sim 500 \text{ kg/m}^3$ bei BSH, $\sim 465 \text{ kg/m}^3$ bei KVH) verwendet, weil bei diesen Hölzern die Spaltgefahr am größten eingeschätzt wurde.

Bei KVH wurden im Hinblick auf die Schwellenversuche Schrauben 4x55 eingesetzt, während bei BSH im Hinblick auf die Auflagerversuche Schrauben 6x70 verwendet wurden.

Von jedem Anschlussbild wurden 3 bis 5 Versuche durchgeführt. Die aufgetretenen Risse wurden vermessen, wobei eine Fuge als „durchgerissen“ angesehen wurde, bei der sich der Riss über mehr als $2/3$ des Abstandes erstreckte.

In **Tabelle 4-1** sind die Schraubenbilder dargestellt und die Ergebnisse für KVH zusammengefasst.

Tabelle 4-1 Ergebnisse der Einschraubversuche, KVH, Schrauben 4x55

		Bemerkung	Anteil der gerissenen Fugen ^{*)}	
			zum Hirnholz	untereinander
nicht versetzte Anordnung		KVH-1: 3 Proben Sehr enge Anordnung	7 %	100 %
		KVH-2: 3 Proben Sehr enge Anordnung Seitlicher Randabstand verkleinert	13 %	97 %
		KVH-3: 3 Proben Abstand untereinander (e_{\perp}) vergrößert	7 %	83 %
versetzte Anordnung		KVH-4: 3 Proben Sehr enge Anordnung	0 %	4 %
		KVH-5: 5 Proben Größere Abstände untereinander	27 %	6 %
^{*)} Eine Fuge galt als gerissen, wenn der Riss sich über mehr als $2/3$ des Abstandes erstreckte				

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Der bei allen Proben vorhandene Abstand von $5 \cdot d$ zum Hirnholz kann nicht als ausreichend angesehen werden.
- Eine nicht versetzte Anordnung mit Abständen $e_{\parallel} \leq 4 \cdot d$ führt in nahezu allen Fugen zu einem Aufreißen.
- Die versetzte Anordnung erweist sich als sehr effektiv: hierdurch wird der Abstand untereinander praktisch verdoppelt. Selbst bei sehr enger Anordnung beträgt der Anteil der gerissenen Fugen nur wenige Prozent.

In **Bild 4-1** und **-2** sind einige Probekörper dargestellt.



Bild 4-1 Probekörper der Reihe KVH-2

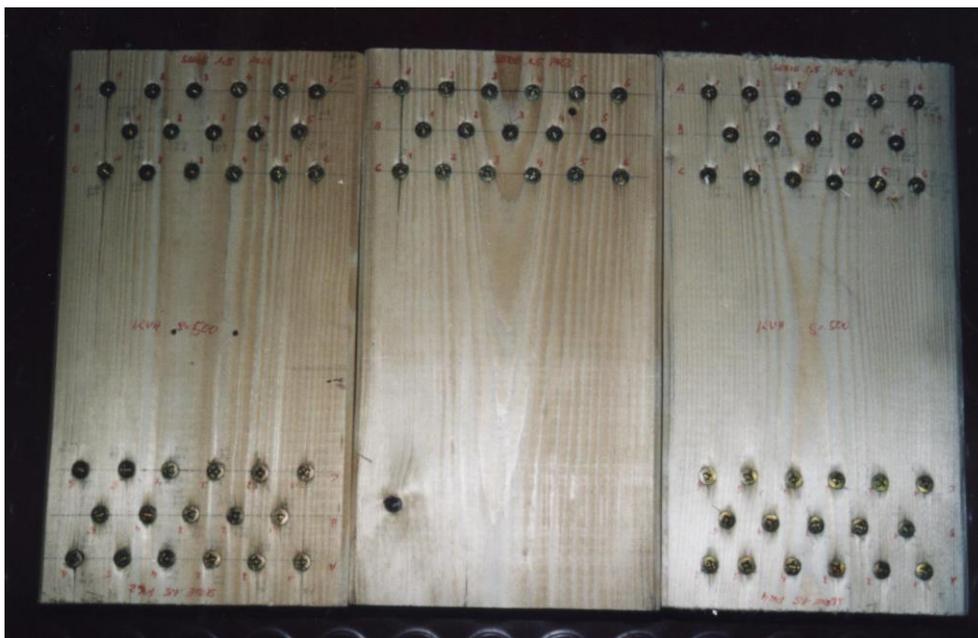
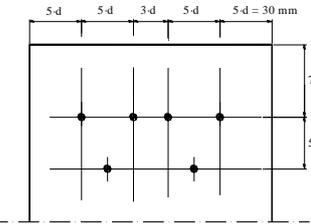
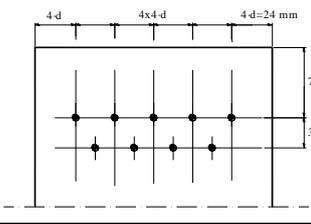
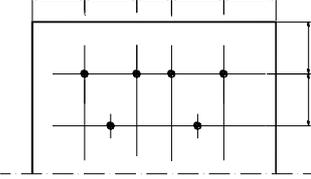


Bild 4-2 Probekörper der Reihe KVH-5

In **Tabelle 4-2** sind die Ergebnisse der Einschraubversuche in BSH zusammengestellt.

Tabelle 4-2 Ergebnisse der Einschraubversuche, BSH, Schrauben 6x70

	Bemerkung	Anteil der gerissenen Fugen ^{*)}		
		zum Hirnholz	untereinander	
versetzte Anordnung		BSH-1: 3 Proben	0 %	0 %
		BSH-2: 4 Proben Abstand untereinander ($e_{ }$) verkleinert	0 %	0 %
		BSH-3: 5 Proben Abstand zum Hirnholz verkleinert	25 %	1,8 %
^{*)} Eine Fuge galt als gerissen, wenn der Riss sich über mehr als 2/3 des Abstandes erstreckte				

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die Rissgefahr bei den BSH-Proben ist deutlich geringer als bei den KVH-Versuchen. Eine Ursache hierfür liegt sicherlich darin, dass bei den BSH-Proben - im Gegensatz zu den KVH-Proben - die Schrauben nicht den gesamten Probekörper durchdrangen. Es ist anzunehmen, dass der nicht durchdrungene Querschnitt die Spaltgefahr reduziert hat.
- Für den Abstand zum Hirnholz scheint ein Maß von $7 \cdot d$ ausreichend zu sein.
- Bei versetzter Anordnung der Schrauben ist selbst bei sehr geringen Schraubenabständen kaum ein Aufreißen der Fugen zu erwarten.

In **Bild 4-3** ist ein Probekörper der Reihe BSH-3 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die zum Hirnholz gerissene Fuge wegen zu geringem Abstand.

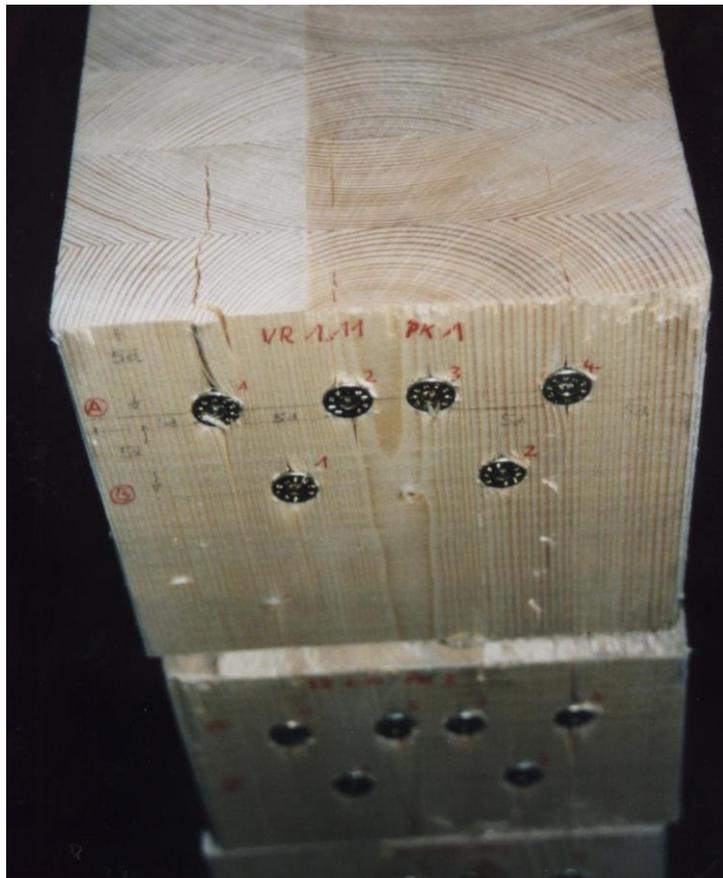


Bild 4-3 Probekörper der Reihe BSH-3

5 Schwellenversuche

Entsprechend den Beschlüssen der Arbeitsgruppe wurde als Schwellenmaterial Konstruktionsvollholz $b/h = 140/60$ mm verwendet. Im Hinblick auf eine möglichst geringe Streuung der Versuchswerte und eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden gezielt Hölzer mit einer Rohdichte von 400 ± 10 kg/m^3 und zu einem späteren Zeitpunkt Hölzer mit einer gewünschten Rohdichte von 500 ± 10 kg/m^3 ausgesucht. Wie schon erwähnt, wiesen die Hölzer mit höherer Rohdichte jedoch wegen der zum Zeitpunkt der Wägung höheren Holzfeuchte nur einen Mittelwert von etwa 465 kg/m^3 auf.

Die Versuchsvorrichtung mit einem eingebauten Prüfkörper ist in **Bild 5-1** dargestellt. Hier ist die Zwischenlage aus einer „Hirnholzscheibe“ zu erkennen, welche die Lasteinleitung durch einen Pfosten annähern soll.

Die Aufstandsänge betrug 60 mm, der einseitige Schwellenüberstand 200 mm.

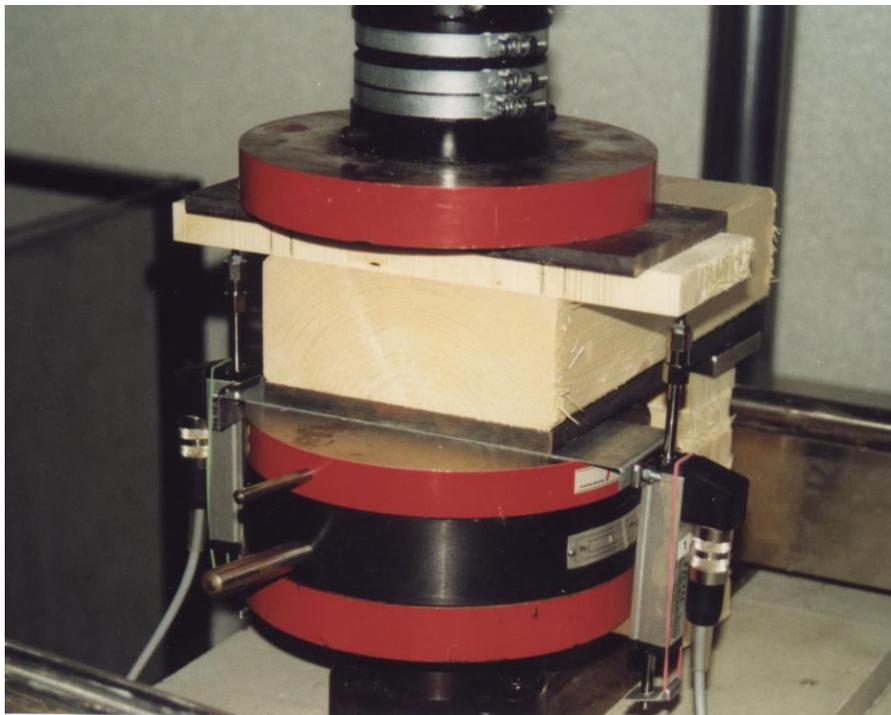


Bild 5-1 Versuchsvorrichtung für die Schwellenversuche

Für die Messung der Schwellenverformungen wurden seitlich Wegaufnehmer angebracht, mit deren Hilfe die Verformungen über die gesamte Schwellenhöhe gemessen wurden (Messlänge = 60 mm). Hierin enthalten waren somit auch solche Verformungen, die durch das Anlegen eines leicht geschüsselten Querschnittes auftraten. Aus Platzgründen war es jedoch nicht möglich, Verformungen innerhalb der Schwelle zu messen.

5.1 Rohdichte 400 kg/m^3

5.1.1 Unverstärkte Proben

Da die unverstärkten Proben die Referenzwerte für den zu ermittelnden Verstärkungseffekt liefern sollten, wurden insgesamt 11 Versuche durchgeführt. Die Holzfeuchte der Proben lag zwischen 13 und 15 %.

Folgende Werte wurden gemessen bzw. ermittelt:

- Anfangsschlupf u_0
Zu Beginn jedes Versuches gibt es sog. Anlegeprozesse, in deren Verlauf sich der Prüfkörper „weicher“ verhält. Sind diese Anlegeprozesse abgeschlossen, so findet ein deutlicher Lastanstieg statt, ab dem üblicherweise der Bereich linearen Tragverhaltens beginnt.
- Eindrückung u_{DIN}
Dieser Wert entspricht der Eindrückung bei Erreichen der zulässigen Spannung nach DIN 1052:
zul $\sigma_{\text{DIN}} = 0,8 \cdot 2,0 = 1,6 \text{ N/mm}^2$ (zul $F = 1,6 \cdot 60 \cdot 140 = 13440 \text{ N}$).
- $f_{\text{lin}}, u_{\text{lin}}$
 f_{lin} entspricht der Spannung bis zu der ein lineares Tragverhalten zu beobachten ist, u_{lin} entspricht der zugehörigen Eindrückung.
- $f_{\text{c},90}, u_{\text{c},90}$
 $f_{\text{c},90}$ entspricht der Druckfestigkeit nach DIN EN 1193 (wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, siehe auch Bild 2.2-2), $u_{\text{c},90}$ der zugehörigen Eindrückung.
- E_{90}
Dieser Wert entspricht dem aus den Last-Verformungs-Diagrammen ermittelten Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes.

In **Bild 5.1-1** ist das ausgewertete Last-Verformungs-Diagramm eines Prüfkörpers beispielhaft dargestellt.

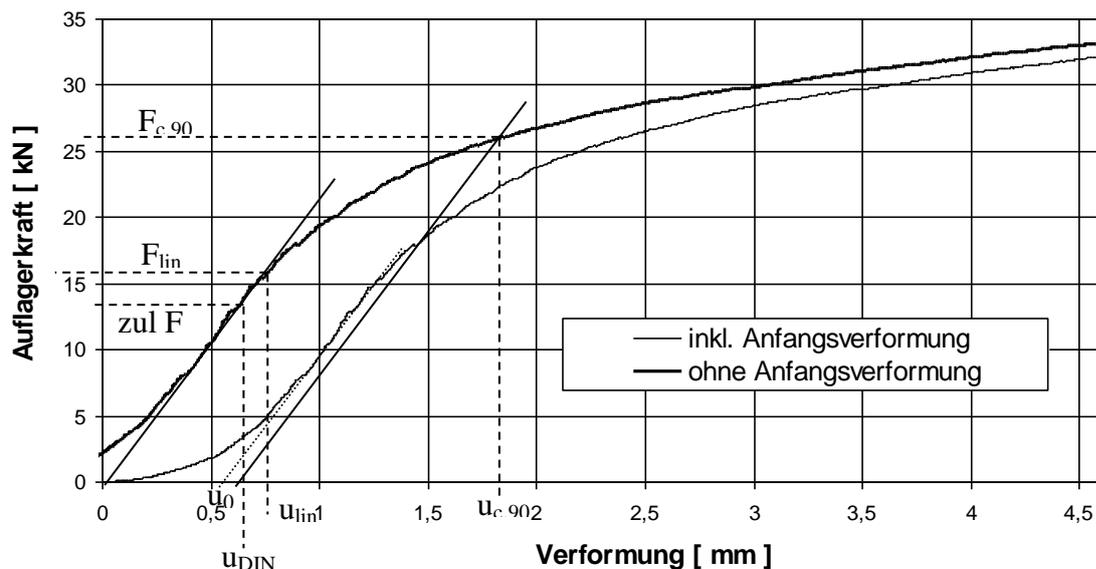


Bild 5.1-1 Last-Verformungs-Diagramm des Prüfkörpers Nr. 6

In **Tabelle 5.1-1** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-1 Versuchsergebnisse, KVH 400, unverstärkt

	u_0 [mm]	zul σ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
	0,42	1,60	0,55	1,67	0,58	2,81	1,56	172
	0,55		0,68	1,79	0,76	2,75	1,76	141
	0,51		0,54	1,60	0,54	3,14	1,65	178
	0,86		0,74	1,79	0,83	2,76	1,86	129
	0,48		0,73	1,67	0,76	2,86	1,90	132
	0,55		0,64	1,86	0,73	3,07	1,81	153
	0,60		0,61	2,26	0,86	3,63	1,98	158
	0,47		0,70	2,02	0,87	3,07	1,93	140
	0,54		0,63	1,90	0,76	3,07	1,82	150
	0,73		0,70	1,43	0,64	3,06	1,93	134
	0,32		0,76	1,23	0,57	2,79	1,90	129
Mittelwert	0,55	1,60	0,66	1,75	0,72	3,00	1,83	147
Stand.abw.				0,27		0,24		
5%-Frakt. *)				1,31		2,60		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Der Bereich linearen Tragverhaltens geht nur wenig über den Wert der zulässigen Spannung nach DIN 1052 hinaus: der Mittelwert der Spannung $f_{lin} = 1,75 \text{ N/mm}^2$ liegt nur geringfügig über der zulässigen Spannung von $1,60 \text{ N/mm}^2$.
- Die mittlere Querdruckfestigkeit liegt bei $3,0 \text{ N/mm}^2$, bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa $2,6 \text{ N/mm}^2$.
- Der Elastizitätsmodul E_{90} ist - wie bereits bei den Vorversuchen festgestellt - vergleichsweise niedrig. Inwieweit diese geringe Werte auf die Art der Messungen zurückzuführen sind, ist unklar.
- Der Mittelwert der bei der zulässigen Spannung aufgetretenen Eindrückungen ($u_{DIN} = 0,66 \text{ mm}$) dient als Basiswert für die Bestimmung des Verstärkungsfaktors auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückungen.

5.1.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)

Bei diesen Versuchen wurden die Schrauben so angeordnet, dass sie annähernd gleichmäßig über die gedrückte Fläche verteilt waren. Hierbei wurde ein Abstand von $7 \cdot d$ zum Hirnholz eingehalten. Um innerhalb der gedrückten Fläche zwei Reihen anordnen zu können, wurde der Abstand $e_{||}$ in Faserrichtung zu $3 \cdot d$ gewählt.

Das Schraubenbild ist in **Bild 5.1-2** dargestellt.

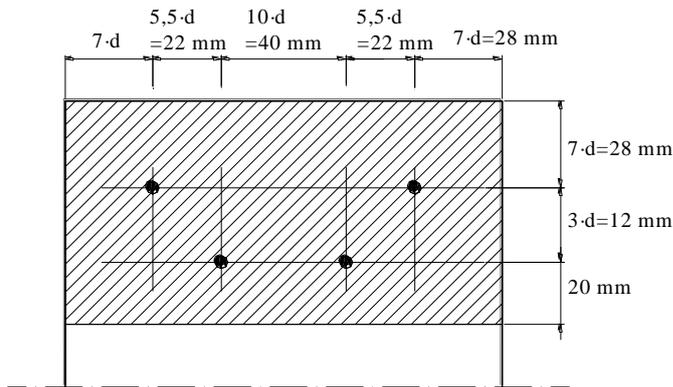


Bild 5.1-2 Anordnung der Schrauben

Es wurden je 5 Versuche mit den Schraubentypen A1 - 4x55 und S - 4x55 durchgeführt.

Folgende Werte wurden gemessen bzw. ermittelt:

- Anfangsschlupf u_0
- Spannung f_{uDIN}
Dieser Wert entspricht der Spannung bei Erreichen der mittleren „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben ($u_{DIN} = 0,66$ mm).
- f_{lin} , u_{lin}
- $f_{c,90}$, $u_{c,90}$
- E_{90}

In **Bild 5.1-3** ist das ausgewertete Last-Verformungs-Diagramm eines Prüfkörpers beispielhaft dargestellt.

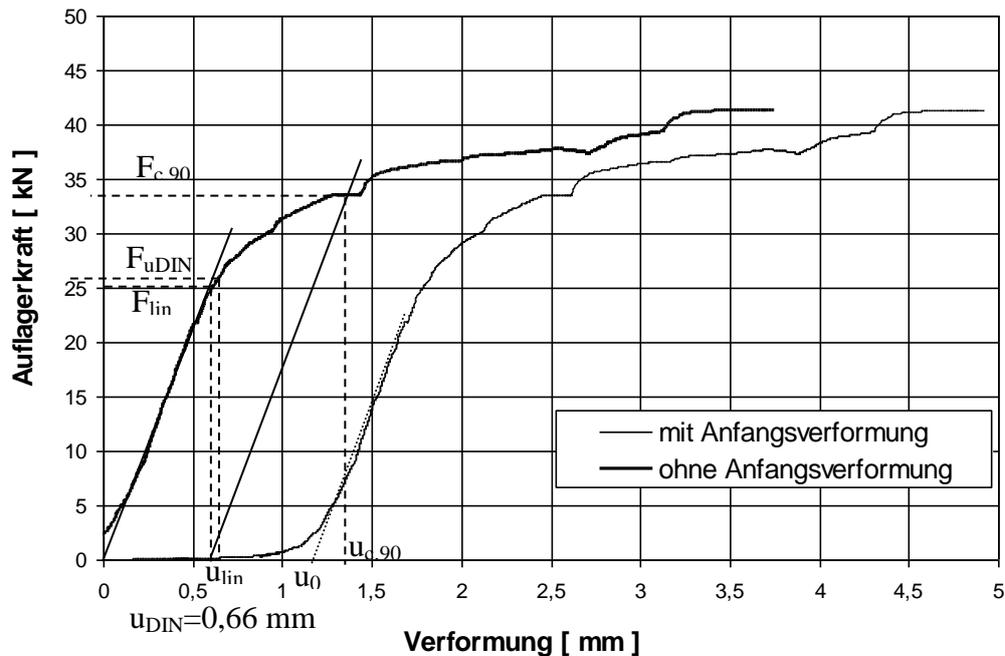


Bild 5.1-3 Last-Verformungs-Diagramm, verstärkt, 4 Schrauben, Typ A1 - 4x55, Prüfkörper 2

In **Bild 5.1-4** sind einige Prüfkörper nach dem Versuch dargestellt. Aus diesem Bild ist deutlich zu erkennen, wie sich die Schraubenköpfe in das Stirnholz der Lasteinleitungsplatte eindrückte.



Bild 5.1-4 verstärkte Prüfkörper nach dem Versuch

In **Tabelle 5.1-2** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-2 Versuchsergebnisse, KVH 400, verstärkt, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	$f_{u,DIN}$ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	0,62	3,10	0,66	2,86	0,56	3,94	1,36	306
	1,17	3,10		2,98	0,59	3,99	1,39	303
	0,73	3,21		2,86	0,55	4,38	1,44	312
	1,54	3,27		3,10	0,62	4,19	1,43	300
	0,35	3,24		2,81	0,53	4,23	1,40	318
S - 4x55	0,56	3,10	0,66	2,74	0,53	4,43	1,45	310
	1,13	2,98		2,86	0,61	4,31	1,52	281
	0,62	2,86		2,86	0,66	4,25	1,57	260
	1,08	2,74		2,86	0,71	4,13	1,62	241
	0,54	2,74		2,62	0,60	4,17	1,56	262
Mittelwert	0,83	3,03	0,66	2,86	0,60	4,20	1,47	289
Stand.abw.		0,20		0,13		0,16		
5%-Frakt. ^{*)}		2,70		2,65		3,95		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben aufgenommene Spannung beträgt im Mittel etwa $3,0 \text{ N/mm}^2$, was erheblich über der zul. Spannung von $1,6 \text{ N/mm}^2$ liegt.
- Der Bereich linearen Tragverhaltens wird durch die eingebrachten Schrauben erheblich verlängert: der Mittelwert der Spannung $f_{\text{lin}} = 2,86 \text{ N/mm}^2$ liegt deutlich über dem zugehörigen Wert der unverstärkten Proben von $1,75 \text{ N/mm}^2$.
- Die Querdruckfestigkeit der verstärkten Proben liegt bei etwa $4,2 \text{ N/mm}^2$, bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa $3,9 \text{ N/mm}^2$.
- Der Elastizitätsmodul E_{90} ist gegenüber den unverstärkten Proben deutlich höher.

5.1.3 Verstärkte Proben (9 Schrauben)

Auch bei diesen Versuchen wurden die Schrauben so angeordnet, dass sie annähernd gleichmäßig über die gedrückte Fläche verteilt waren. Hierbei wurde ein Abstand von $7 \cdot d$ zum Hirnholz eingehalten. Um innerhalb der gedrückten Fläche zwei Reihen anordnen zu können, wurde der Abstand e_{\parallel} in Faserrichtung zu $3 \cdot d$ gewählt.

Das Schraubenbild ist in **Bild 5.1-5** dargestellt.

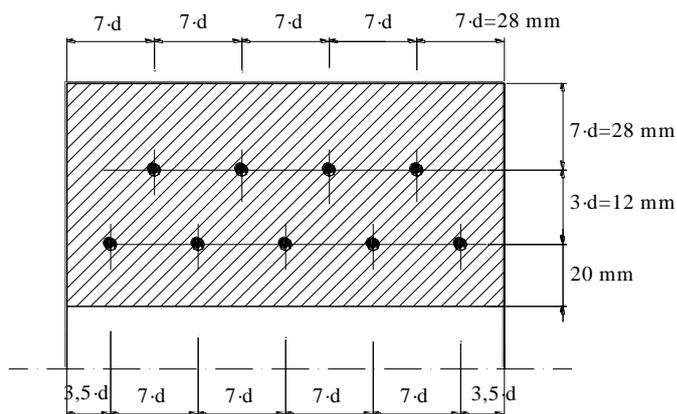


Bild 5.1-5 Anordnung der Schrauben

Es wurden wiederum je 5 Versuche mit den Schraubentypen A1 - 4x55 und S - 4x55 durchgeführt.

In **Bild 5.1-6** sind einige Prüfkörper nach dem Versuch dargestellt. Aus diesem Bild sind wiederum die Eindrückungen der Schraubenköpfe in das Hirnholz der Lasteinleitungsplatte zu erkennen.

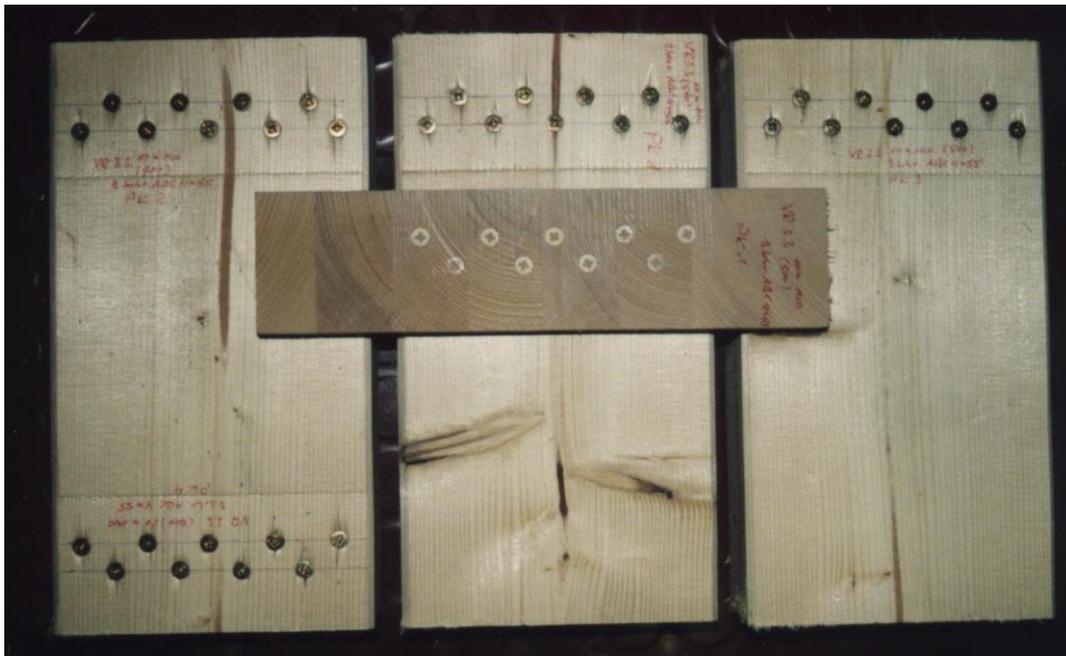


Bild 5.1-6 verstärkte Prüfkörper nach dem Versuch

In **Tabelle 5.1-3** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-3 Versuchsergebnisse, KVH 400, verstärkt, 9 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	$f_{u,DIN}$ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	0,70	2,86	0,66	3,10	0,72	4,39	1,60	258
	1,47	3,11		3,11	0,66	4,55	1,57	282
	0,78	3,15		2,98	0,60	4,26	1,46	298
	0,80	3,10		3,10	0,67	4,36	1,55	277
	0,81	3,69		3,10	0,48	4,64	1,33	387
S - 4x55	0,55	2,98	0,66	2,50	0,48	4,17	1,40	313
	0,67	2,56		2,56	0,64	4,40	1,70	240
	0,87	2,50		2,50	0,65	4,14	1,68	231
	0,73	2,56		2,50	0,62	3,86	1,55	242
	0,60	2,44		2,38	0,63	3,83	1,61	227
Mittelwert	0,80	2,90	0,66	2,78	0,62	4,26	1,55	275
Stand.abw.		0,39		0,32		0,267		
5%-Frakt. ^{*)}		2,25		2,26		3,82		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit 4 Schrauben ist ersichtlich, dass zwar die gleichen Tendenzen vorliegen, dass aber mit 9 Schrauben keine weitere Steigerung der Tragfähigkeit erreicht wurde.

Ein ähnlicher Effekt wurde bereits bei den Vorversuchen mit 4 bzw. 6 Schrauben festgestellt (siehe Abschnitt 2.2).

5.1.4 Versuche mit unsauberer Ausführung

Nach Abschluss aller Bauteilversuche wurde noch eine Versuchsreihe durchgeführt, in dessen Verlauf die Einflüsse einer unsaubereren Ausführung untersucht werden sollten.

Folgende unsauberen Ausführungen wurden untersucht:

- Schräg eingedrehte Schrauben,
- Überstehende Schraubenköpfe,
- Versenkte Schraubenköpfe,
- Teils überstehende, teils versenkte Schraubenköpfe.

Die Versuche wurden nur mit KVH einer Rohdichte von 400 kg/m^3 mit jeweils 4 Schrauben durchgeführt, weil - wie bereits beschrieben - kein höherer Effekt mit 9 Schrauben zu erwarten ist. Die Holzfeuchte der Proben lag zwischen 11 und 13%.

5.1.4.1 Schräg eingedrehte Schrauben

In **Bild 5.1-7** ist dargestellt, wie die Schrauben in das Holz eingebracht wurden.



Bild 5.1-7 Schräg eingedrehte Schrauben, links: beim Eindrehen, rechts: nach dem Versuch

In **Tabelle 5.1-4** sind die Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-4 Versuchsergebnisse, KVH 400, schräg eingedrehte Schrauben, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]	
A1 - 4x55	1,58	1,43	0,66	2,50	1,20	3,51	2,27	125	
	1,35	1,25		2,74	1,45	3,89	2,64	113	
S - 4x55	0,80	1,19		2,58	1,60	3,79	2,93	97	
	1,13	1,43		2,98	1,38	4,11	2,51	129	
Mittelwert	1,22	1,32		0,66	2,70	1,41	3,82	2,59	116
Stand.abw.		0,11			0,18		0,21		
5%-Frakt. ^{*)}		1,15		2,40		3,47			
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$									

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben (Tabelle 5.1-2) ist folgendes zu erkennen:

- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ werden durch das schräge Eindrehen nur wenig beeinflusst und liegen nur etwa 10% unter denen der ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,66 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist deutlich geringer und liegt sogar unterhalb der zulässigen Spannung der unverstärkten Proben ($f_{uDIN} = 1,32 < 1,60 = \text{zul } \sigma_{DIN}$)! Dies deutet auf ein „weicheres“ Tragverhalten dieser Proben hin, was auch durch den wiederum sehr geringen Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung bestätigt wird.

Eine Ursache für das „weichere“ Tragverhalten wird darin vermutet, dass die Probekörper durch das weitere Runtertrocknen leicht verformt (geschüsselt) waren. Die Anlegeprozesse zu Beginn jedes Versuches waren daher ausgeprägter als bei den vorherigen Versuchen (vgl. u_0 -Werte). Inwieweit sich dies auf die weiteren Messungen niederschlug konnte nicht geklärt werden. Zu befürchten ist jedoch, dass die vorgenommenen Messungen (Verformungen zwischen der oberen Lasteinleitungsplatte und der unteren Auflagerplatte) von diesen Effekten beeinflusst wurden und somit nur bedingte Aussagekraft besitzen.

5.1.4.2 Überstehende Schraubenköpfe

In **Bild 5.1-8** sind zwei überstehende Schraubenköpfe dargestellt. Der Überstand lag dabei zwischen 1 und 2 mm.



Bild 5.1-8 Überstehende Schraubenköpfe

In **Tabelle 5.1-5** sind die Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-5 Versuchsergebnisse, KVH 400, überstehende Schraubenköpfe, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	$f_{u,DIN}$ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	2,81	1,31	0,66	2,98	1,50	4,17	2,70	119
	3,40	1,25		2,50	1,40	3,57	2,60	107
S - 4x55	2,30	1,31		2,86	1,61	4,02	2,93	106
	1,54	1,13		2,62	1,80	4,10	3,43	87
Mittelwert	2,51	1,25	0,66	2,74	1,58	3,96	2,92	105
Stand. abw.		0,07		0,19		0,23		
5%-Frakt. ^{*)}		1,13		2,43		3,58		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben (Tabelle 5.1-2) ist folgendes zu erkennen:

- Die Werte für den Anfangsschlupf sind im Mittel etwa um 1,5 mm größer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben. Dies entspricht etwa dem Überstand der Schraubenköpfe. Aus den Last-Verformungsdiagrammen ist das Eindringen der Schraubenköpfe in die Lasteinleitungsplatte deutlich zu erkennen. In **Bild 5.1-9** ist ein solches beispielhaft dargestellt.

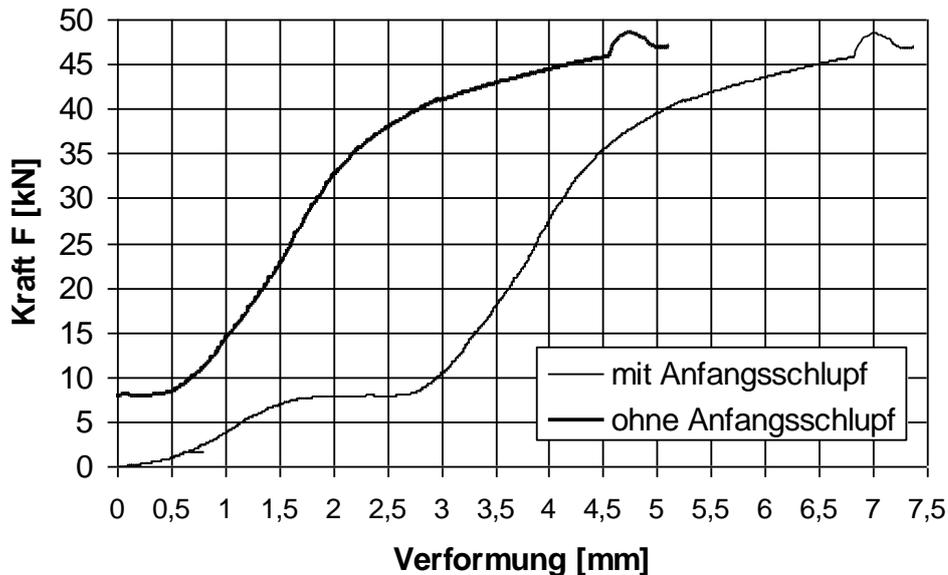


Bild 5.1-9 Last-Verformungsdiagramm eines Prüfkörpers mit überstehenden Schraubenköpfen

- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ werden durch die überstehenden Schraubenköpfe erneut nur wenig beeinflusst.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,66 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist - wie bei den schräg eingedrehten Schrauben - deutlich geringer und liegt unterhalb der zulässigen Spannung der unverstärkten Proben ($f_{uDIN} = 1,25 < 1,60 = \text{zul } \sigma_{DIN}$)! Gleiches gilt für den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung.

Auch diese Versuche deuten somit auf die Problematik der Verformungsmessungen hin.

5.1.4.3 Versenkte Schraubenköpfe

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die Schraubenköpfe um etwa 1-2 mm in das Holz versenkt. In **Bild 5.1-10** im nächsten Abschnitt ist eine solche Schraube dargestellt.

In **Tabelle 5.1-6** sind die Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-6 Versuchsergebnisse, KVH 400, versenkte Schraubenköpfe, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	0,55	1,07	0,66	2,50	1,56	3,93	3,05	96
	0,91	1,37		2,50	1,19	3,43	2,22	126
S - 4x55	0,98	1,43		2,62	1,28	3,71	2,42	123
	0,62	1,49		2,38	1,05	3,43	2,10	136
Mittelwert	0,77	1,34	0,66	2,50	1,27	3,63	2,45	120
Stand.abw.		0,16		0,08		0,21		
5%-Frakt. ^{*)}		1,08		2,36		3,28		

^{*)} Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben (Tabelle 5.1-2) ist folgendes zu erkennen:

- Die Werte für den Anfangsschlupf liegen in der Größenordnung der ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ liegen unter den Werten der ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben. Allerdings liegen sie noch deutlich über den Werten der unverstärkten Proben. Diese Versuche bestätigen somit die Vermutung, dass der Verstärkungseffekt durch das Versenken der Schrauben etwas später einsetzt und geringer ist als bei ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,66 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist erneut deutlich geringer und liegt wiederum unterhalb der zulässigen Spannung der unverstärkten Proben ($f_{uDIN} = 1,34 < 1,60 = \text{zul } \sigma_{DIN}$)! Gleiches gilt für den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung.

Auch diese Versuche deuten erneut auf die Problematik der Verformungsmessungen hin.

5.1.4.4 Versenkte und überstehende Schraubenköpfe

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden jeweils zwei Schraubenköpfe um etwa 1-2 mm in das Holz versenkt und zwei Schraubenköpfe mit überstehendem Kopf eingedreht. In **Bild 5.1-10** ist ein solcher Prüfkörper dargestellt.



Bild 5.1-10 Prüfkörper mit versenkten und überstehenden Schraubenköpfen

In **Tabelle 5.1-7** sind die Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.1-7 Versuchsergebnisse, KVH 400, überstehende und versenkte Schraubenköpfe, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	1,70	0,83	0,66	2,50	1,80	3,93	3,56	83
	2,20	1,01		2,50	1,66	3,54	2,94	90
S - 4x55	1,88	1,25		2,98	1,57	4,21	2,85	114
	2,68	1,43		2,62	1,18	3,90	2,38	133
Mittelwert	2,12	1,13	0,66	2,65	1,55	3,90	2,93	105
Stand.abw.		0,23		0,20		0,24		
5%-Frakt. ^{*)}		0,76		2,33		3,50		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen ist folgendes zu erkennen:

- Die Werte für den Anfangsschlupf sind wegen der überstehenden Schraubenköpfe um etwa 1,5 mm größer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ liegen im Bereich der Werte mit schrägen und überstehenden Schrauben.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,66 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist erneut deutlich geringer und liegt wiederum unterhalb der zulässigen Spannung der unverstärkten Proben ($f_{uDIN} = 1,13 < 1,60 = \text{zul } \sigma_{DIN}$)! Gleiches gilt für den Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung.

5.1.5 Verstärkungsfaktoren

Die hier durchgeführten Hauptversuche zeigten - wie die Vorversuche auch - dass mit 9 Schrauben kein höherer Verstärkungseffekt als mit 4 Schrauben erzielt wurde. Die Ursachen für dieses Ergebnis konnten im Rahmen dieses Vorhabens nicht untersucht bzw. geklärt werden.

Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass mit höherer Anzahl von Verbindungsmitteln das Holz einer stärkeren Spaltwirkung durch die nicht vorgebohrten Schrauben ausgesetzt ist, was sich nachteilig auf die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme auswirkt.

Bedingt durch dieses etwas unerwartete Ergebnis war die Herleitung eines Bemessungsverfahrens, in dem der Verstärkungseffekt über die Anzahl und die Tragfähigkeit der Schrauben berechnet werden kann, nicht mehr möglich.

Nachfolgend wird daher der Verstärkungseffekt vereinfachend als Faktor ausgedrückt:

$$\text{Verstärkungsfaktor } k_V = \frac{\text{verstärkt}}{\text{unverstärkt}}$$

Folgende Verstärkungsfaktoren wurden berechnet:

- Auf dem Niveau der zulässigen „Eindrückung“: $k_{V,uDIN} = \frac{f_{uDIN}}{1,60}$

Dieser Faktor drückt aus, um welches Maß die aufnehmbare Spannung gesteigert wurde, wenn als Grenzwert der auftretenden Verformungen die mittlere Eindrückung u_{DIN} der unverstärkten Proben bei Erreichen der zulässigen Querdruckspannung von 1,60 N/mm² herangezogen wird.

- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze:
$$k_{V,lin} = \frac{f_{v,lin}}{f_{uv,lin} \text{ (Mittelwert)}}$$

Dieser Faktor beschreibt, um welches Maß der Bereich linearen Tragverhaltens durch die Verstärkung verlängert wurde.
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit:
$$k_{V,c,90} = \frac{f_{v,c,90}}{f_{uv,c,90} \text{ (Mittelwert)}}$$

Dieser Faktor drückt aus, um welches Maß die Querdruckfestigkeit nach DIN EN 1193 gesteigert werden konnte.

Die berechneten Faktoren sind in **Tabelle 5.1-8** zusammengestellt und in den **Bildern 5.1-11 bis 13** graphisch dargestellt.

Hieraus sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Die Verstärkungseffekte auf den verschiedenen Niveaus sind unterschiedlich groß.
- Der Verstärkungseffekt $k_{V,uDIN}$ auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung liegt bei 4 ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben zwischen 1,7 und 2,1. Bei 9 Schrauben liegt dieser Faktor bei größerer Streuung in der gleichen Größenordnung, sogar mit abnehmender Tendenz.
Bei nicht ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben liegt dieser Verstärkungsfaktor gar unter 1,0, was physikalisch kaum zu erklären ist.
Aufgrund der Vermutung, dass die Verformungsmessungen durch die Art der Messung verfälscht worden sein könnten, ist der Verstärkungsfaktor $k_{V,uDIN}$ mit Vorsicht zu bewerten.
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,lin}$ auf dem Niveau der Linearitätsgrenze wird im Gegensatz zum Faktor $k_{V,uDIN}$ nicht durch einen absoluten Verformungswert bestimmt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Aussagekraft dieses Faktors nicht durch Messprobleme beeinträchtigt wird.
Bei 4 Schrauben liegt dieser Faktor bei etwa 1,5 bis 1,8, und selbst bei nicht ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben liegen diese Werte zwischen 1,3 und 1,7. Bei 9 Schrauben wurde erneut kein erhöhter Verstärkungseffekt festgestellt, im Gegenteil: auch hier ist eine abnehmende Tendenz zu vermuten.
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,c,90}$ auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit fällt etwas niedriger aus als der Faktor $k_{V,lin}$: die Werte liegen bei 4 Schrauben zwischen 1,3 und 1,5. Bei den nachlässig eingedrehten Schrauben sinkt dieser Faktor auf etwa 1,1 bis 1,4 ab. Auch auf diesem Niveau bestätigt sich, dass mit 9 Schrauben kein größerer Verstärkungseffekt erreicht werden konnte.
- Bei den überstehenden Schraubenköpfen ist fraglich, inwieweit der Verstärkungseffekt wegen der anfänglichen Eindrückungen (Eindrücken der Schraubenköpfe in das Hirnholz des Pfostens) überhaupt noch wirksam ist: diese Anfangsverformungen sind nämlich bereits größer als die „zulässige“ Eindrückung.
Andererseits ist fraglich, ob überstehende Schraubenköpfe überhaupt praxisrelevant sind: hier dürften vielmehr die „Gefahr“ von versenkten Schraubenköpfen bestehen.

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels Schnellbauschrauben

Tabelle 5.1-8 Zusammenstellung der Verstärkungsfaktoren, KVH 400

	Schraubentyp	$k_{V,uDIN}$	$k_{V,lin}$	$k_{V,c.90}$
4 Schrauben 4x55	A1	1,93	1,64	1,31
		1,93	1,70	1,33
		2,01	1,64	1,46
		2,05	1,77	1,40
		2,02	1,61	1,41
	S	1,93	1,57	1,48
		1,86	1,64	1,44
		1,79	1,64	1,42
		1,71	1,64	1,38
		1,71	1,50	1,39
	Mittelwert	1,90	1,63	1,40
9 Schrauben 4x55	A1	1,79	1,77	1,46
		1,94	1,78	1,52
		1,97	1,70	1,42
		1,93	1,77	1,45
		2,31	1,77	1,55
	S	1,86	1,43	1,39
		1,60	1,47	1,47
		1,56	1,43	1,38
		1,60	1,43	1,29
		1,53	1,36	1,28
	Mittelwert	1,81	1,59	1,42
4 Schr. schräg	A1	0,89	1,43	1,17
		0,78	1,57	1,30
	S	0,74	1,48	1,26
		0,89	1,70	1,37
	Mittelwert	0,83	1,55	1,27
4 Schr. überstehen d	A1	0,82	1,71	1,39
		0,78	1,43	1,19
	S	0,82	1,64	1,34
		0,71	1,50	1,36
	Mittelwert	0,78	1,57	1,32
4 Schr. versenkt	A1	0,67	1,43	1,31
		0,86	1,43	1,14
	S	0,89	1,50	1,24
		0,93	1,36	1,14
	Mittelwert	0,84	1,43	1,21
4 Schr. überstehen d/ versenkt	A1	0,52	1,43	1,31
		0,63	1,43	1,18
	S	0,78	1,70	1,40
		0,89	1,50	1,30
	Mittelwert	0,71	1,52	1,30

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels Schnellbauschrauben

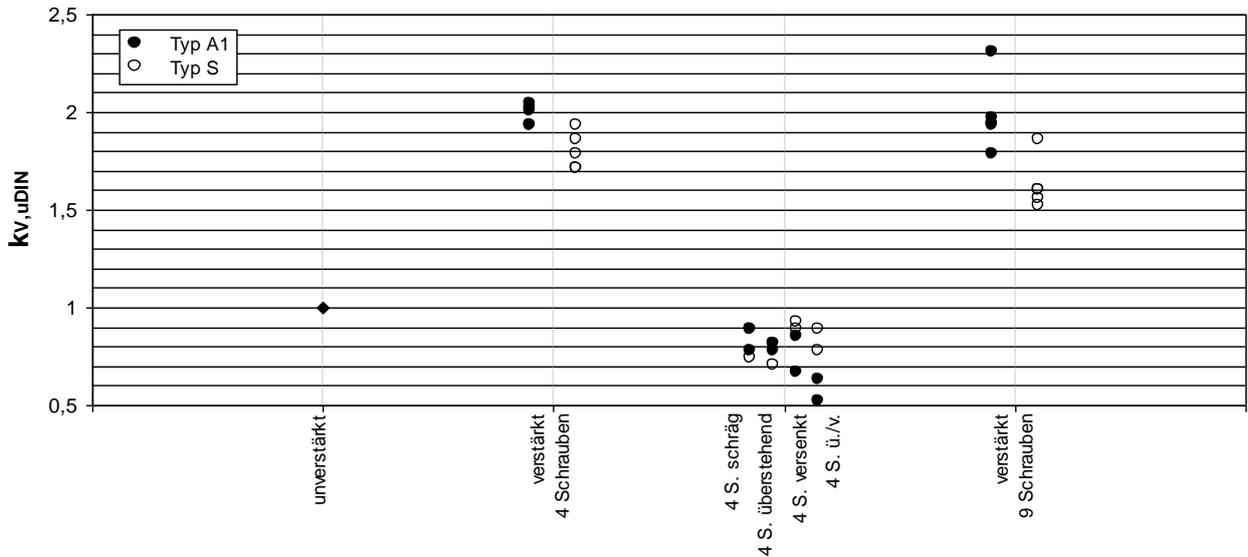


Bild 5.1-11 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückungen, KVH 400

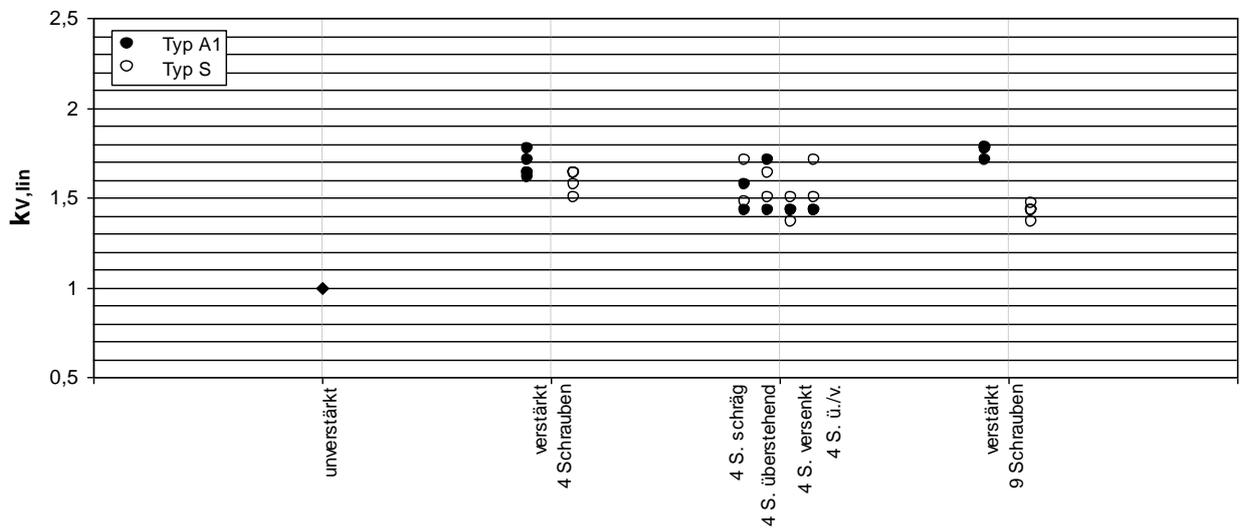


Bild 5.1-12 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Linearitätsgrenze, KVH 400

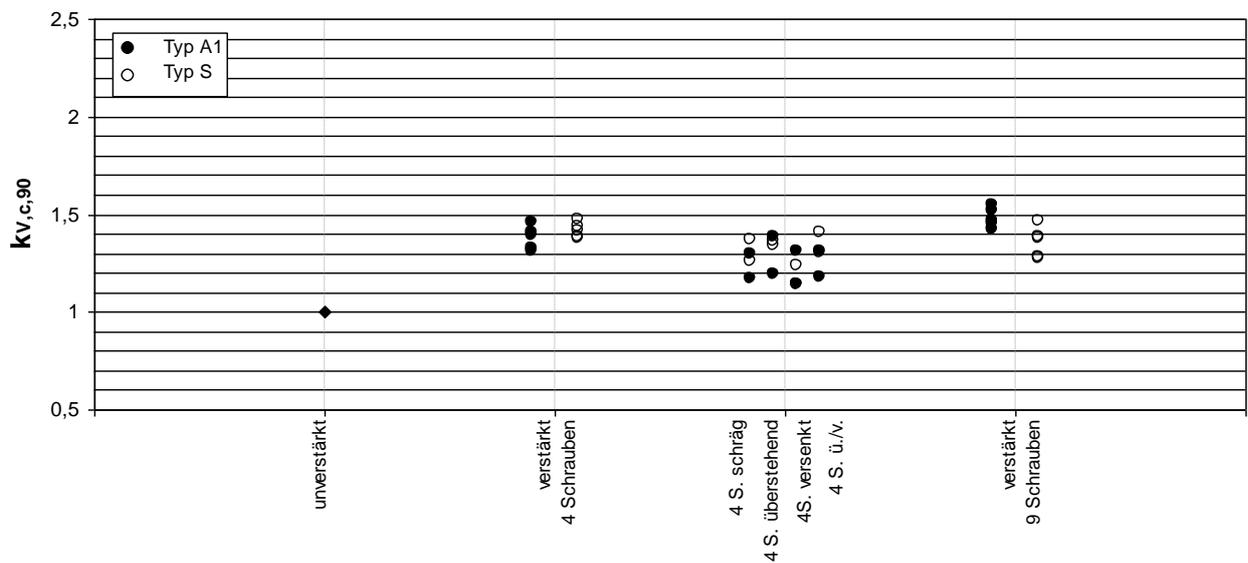


Bild 5.1-13 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten, KVH 400

5.2 Rohdichte 500 (465) kg/m³

5.2.1 Proben mit höherer Holzfeuchte

Die erste Versuchsreihe mit Holz höherer Rohdichte wurde unmittelbar nach Auswahl der Hölzer durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt hatten die Hölzer - wie bereits erwähnt - eine Holzfeuchte von etwa 22%.

Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse lediglich zusammengefasst. Auf eine detailliertere Beschreibung wird angesichts der nur bedingt verwertbaren Ergebnisse verzichtet.

In **Tabelle 5.2-1** sind die Ergebnisse der unverstärkten Proben zusammengestellt.

Tabelle 5.2-1 Versuchsergebnisse unverstärkte Proben

zul σ_{DIN} [N/mm ²]	f_{lin} [N/mm ²]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]
1,60	1,67	2,71
	1,55	2,44
	1,67	2,94
	1,69	2,67
	1,43	2,75
Mittelwert	1,60	2,70

Ein Vergleich mit Tabelle 5.1-1 zeigt, dass sowohl für f_{lin} als auch für $f_{c,90}$ keine höheren Werte als bei den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ erzielt wurden. Dies deutet auf einen starken Einfluss der Holzfeuchte auf die Querdruckfestigkeit hin.

In **Tabelle 5.2-2** sind die Ergebnisse der verstärkten Proben und der zugehörigen Verstärkungsfaktoren zusammengestellt.

Aus dieser Tabelle sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Die Verstärkung mit 9 Schrauben liefert - im Gegensatz zu den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ - höhere Verstärkungsfaktoren als mit 4 Schrauben. Der Anstieg des Verstärkungseffektes steht aber in keinem Verhältnis mit der Anzahl der eingedrehten Schrauben.
- Auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung ist im Gegensatz zu den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ nur ein geringer Verstärkungseffekt festzustellen (Faktor im Mittel 0,94 bzw. 1,20).
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze liegen die Verstärkungsfaktoren jedoch in der gleichen Größenordnung wie bei den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ (Faktor im Mittel 1,53 bzw. 1,72).
- Auch auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit liefern diese Versuche ähnliche Verstärkungsfaktoren wie die Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$.

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass der erzielte Verstärkungseffekt vermutlich deshalb so groß war, weil die unverstärkten Proben wegen der höheren Holzfeuchte vergleichsweise „weich“ waren. Die im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuche mit trockenem Holz zeigen, dass bei „steiferem“ Ausgangsmaterial der Verstärkungseffekt geringer ausfällt.

Tabelle 5.2-2 Versuchsergebnisse verstärkte Proben und zugehörige Verstärkungsfaktoren

	Schraubentyp	$f_{u,DIN}$ [N/mm ²]	$k_{V,uDIN}$	f_{lin} [N/mm ²]	$k_{V,lin}$	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$k_{V,c,90}$
4 Schrauben 4x55	A1	1,38	0,86	2,14	1,34	3,19	1,18
		2,02	1,26	2,02	1,26	3,20	1,19
		1,25	0,78	2,62	1,64	4,15	1,54
		2,02	1,26	3,81	2,38	4,61	1,71
		1,25	0,78	2,20	1,38	3,25	1,20
	S	1,14	0,71	2,05	1,28	3,57	1,32
		1,25	0,78	2,38	1,49	3,36	1,24
		1,25	0,78	2,62	1,64	3,95	1,46
		1,43	0,89	2,68	1,68	3,71	1,37
		2,00	1,25	1,90	1,19	3,93	1,46
	Mittelwert	1,50	0,94	2,44	1,53	3,69	1,37
9 Schrauben 4x55	A1	1,60	1,00	2,68	1,68	4,02	1,49
		1,96	1,23	2,44	1,53	3,69	1,37
		1,40	0,88	2,74	1,71	3,82	1,41
		1,89	1,18	2,56	1,60	3,79	1,40
		1,55	0,97	2,50	1,56	3,48	1,29
	S	2,08	1,30	2,74	1,71	3,96	1,47
		2,02	1,26	2,86	1,79	4,06	1,50
		1,73	1,08	2,86	1,79	3,88	1,44
		2,20	1,38	2,80	1,75	4,17	1,54
		2,80	1,75	3,33	2,08	4,86	1,80
	Mittelwert	1,92	1,20	2,75	1,72	3,97	1,47

5.2.2 Versuche mit trockenem Holz

Die Hölzer trockneten durch Lagerung in der Prüfhalle auf eine Holzfeuchte von etwa 11 bis 13% herunter. Anschließend wurden die im vorigen Abschnitt beschriebenen Versuchsreihen nochmals durchgeführt und durch Versuche mit nicht ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben ergänzt.

Auf die Untersuchung des Verstärkungseffektes bei 9 Schrauben wurde verzichtet, weil die bisherigen Versuche keinen deutlich höheren Effekt erwarten ließen. Ein weiterer Grund war auch der, dass dies den zur Verfügung stehenden Etat überschritten hätte.

Die Versuchsauswertung erfolgte analog zu den Proben mit einer Rohdichte von 400 kg/m³ (vgl. Abschnitt 5.1).

5.2.2.1 Unverstärkte Proben

In **Tabelle 5.2-3** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.2-3 Versuchsergebnisse, KVH 500, unverstärkt

	u_0 [mm]	zul σ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
	0,48	1,60	0,76	2,74	1,28	3,77	2,36	128
	0,74		0,68	3,45	1,50	4,75	2,62	138
	0,79		0,75	2,26	1,04	3,50	2,23	130
	0,44		0,86	2,62	1,37	3,42	2,37	115
	0,82		0,73	2,50	1,13	3,70	2,27	133
	1,20		0,95	3,57	2,10	4,56	3,27	102
	1,14		0,80	2,93	1,46	4,56	2,87	120
	1,38		1,38	1,96	1,70	2,68	2,90	69
	0,86		0,84	3,57	1,86	4,92	3,17	115
	0,90		1,14	3,57	1,86	4,54	2,96	115
Mittelwert	0,88		1,60	0,89	2,92	1,53	4,04	2,70
Stand. abw.				0,57		0,69		
5%-Frakt. ^{*)}				1,99		2,90		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, dass diesmal die Werte für f_{lin} und $f_{c,90}$ deutlich über denen der Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ liegen (vgl. Tabelle 5.1-1). Dieses Ergebnis wurde im Hinblick auf die höhere Rohdichte dieser Proben auch erwartet.

Unerwartet niedrig ist hingegen der Elastizitätsmodul der hier geprüften Proben: die Werte für E_{90} liegen sogar unter denen der Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ ($117 < 147 \text{ N/mm}^2$). Eine Ursache hierfür könnte wieder die Tatsache sein, dass sich die Hölzer durch das Heruntertrocknen leicht geschüsselt hatten. Obwohl die Eindrücke auf beiden Seiten der Prüfkörper gemessen und die Werte gemittelt wurden, ist eine nachteilige Beeinflussung der Verformungsmessungen nicht auszuschließen.

Aus dieser Tabelle ist weiterhin folgendes zu erkennen:

- Der Bereich linearen Tragverhaltens geht - im Gegensatz zu den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ - deutlich über den Wert der zulässigen Spannung nach DIN 1052 hinaus (Mittelwert von $f_{lin} = 2,92 \text{ N/mm}^2 \gg \text{zul } \sigma_{DIN} = 1,60 \text{ N/mm}^2$). Dies deutet darauf hin, dass die höhere Rohdichte den Bereich linearen Tragverhaltens deutlich verlängert.
- Die mittlere Querdruckfestigkeit liegt bei $4,0 \text{ N/mm}^2$, bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa $2,9 \text{ N/mm}^2$.
- Der Mittelwert der bei der zulässigen Spannung aufgetretenen Eindrücke ($u_{DIN} = 0,89 \text{ mm}$) dient als Basiswert für die Bestimmung des Verstärkungsfaktors auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrücke.

5.2.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)

In **Tabelle 5.2-4** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 5.2-4 Versuchsergebnisse, KVH 500, verstärkt, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	0,82	2,14	0,89	2,98	1,25	4,29	2,40	143
	0,55	3,10		3,10	0,90	4,50	1,90	206
	0,78	3,10		3,10	0,86	4,40	1,82	216
	0,69	2,00		3,13	1,44	4,49	2,66	130
	0,68	2,02		2,26	1,00	4,07	2,40	136
S - 4x55	1,18	2,62	0,89	3,33	1,16	4,68	2,22	172
	1,76	2,44		3,21	1,18	4,64	2,28	163
	0,97	3,14		3,27	0,94	4,79	1,93	209
	1,49	2,95		3,10	0,94	4,85	2,07	198
	1,83	2,20		3,45	1,37	4,58	2,42	151
Mittelwert	1,08	2,57	0,89	3,09	1,10	4,53	2,21	172
Stand. abw.		0,45		0,31		0,22		
5%-Frakt. ^{*)}		1,84		2,59		4,16		
^{*)} Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben aufgenommene Spannung beträgt im Mittel 2,57 N/mm², was erheblich über der zulässigen Spannung von 1,6 N/mm² liegt.
- Der Bereich linearen Tragverhaltens wird durch die eingebrachten Schrauben kaum verlängert: der Mittelwert der Spannung $f_{lin} = 3,09$ N/mm² liegt nur wenig über dem Wert der unverstärkten Proben von 2,89 N/mm². Dies deutet darauf hin, dass das Eindrehen von Schrauben nur eine geringe Wirkung auf das „von Haus aus“ steifere Material hat.
- Die Querdruckfestigkeit der verstärkten Proben liegt bei etwa 4,5 N/mm², bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa 4,2 N/mm².
- Der Elastizitätsmodul E_{90} ist gegenüber den unverstärkten Proben etwa 45% höher.

5.2.2.3 Versuche mit unsauberer Ausführung

Wie bei den Versuchen mit einer Rohdichte von 400 kg/m^3 wurden auch hier folgende „unsaubere“ Ausführungen untersucht:

- Schräg eingedrehte Schrauben,
- Überstehende Schraubenköpfe,
- Versenkte Schraubenköpfe,
- Teils überstehende, teils versenkte Schraubenköpfe.

Die Ergebnisse sind in den **Tabellen 5.2-5 bis 8** zusammengefasst.

Tabelle 5.2-5 Versuchsergebnisse, KVH 500, schräg eingedrehte Schrauben, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	1,50	1,90	0,89	3,69	1,73	4,61	2,75	128
	2,10	1,31 ¹⁾		2,21 ¹⁾	1,59	3,13 ¹⁾	2,81	84 ¹⁾
	1,37	2,48		3,21	1,15	4,49	2,20	168
S - 4x55	1,50	1,65	0,89	3,81	2,10	4,89	3,30	109
	1,00	1,40 ¹⁾		2,21 ¹⁾	1,46	3,81 ¹⁾	3,10	91 ¹⁾
Mittelwert	1,49	1,75	0,89	3,03 (3,57)	1,61	4,19 (4,66)	2,83	116 (135)
Stand. abw.		0,42		0,69		0,64		
5%-Frakt. ^{*)}		1,06		1,887		3,14		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								
1) Risse im Holz								

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben (Tabelle 5.2-4) ist folgendes zu erkennen:

- Die Spannung f_{lin} wird durch das schräge Eindrehen nicht beeinflusst. Die Querdruckfestigkeit $f_{c,90}$ liegt nur etwa 10% unter derjenigen der ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben. Diese Tendenz wurde bereits bei Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ festgestellt.
- Der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den unverstärkten Proben.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,89 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} hingegen ist deutlich geringer ($1,75 < 2,57 \text{ N/mm}^2$) und liegt in der Größenordnung der zulässigen Spannung nach DIN 1052.

An dieser Stelle sei erneut auf die Messproblematik bei diesen Schwellenversuchen erinnert. Der Verstärkungseffekt auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung, der auf einen expliziten Wert einer Eindrückung bezogen wird, sollte daher nicht überbewertet werden.

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels Schnellbauschrauben

Tabelle 5.2-6 Versuchsergebnisse, KVH 500, überstehende Schraubenköpfe, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	2,29	1,49	0,89	3,93	2,01	4,90	3,10	117
	2,70	1,31		3,45	2,83	4,61	4,35	73
S - 4x55	2,35	1,39		4,10	2,50	4,94	3,80	98
	2,70	1,74		3,27	1,99	4,71	3,46	99
Mittelwert	2,51	1,48	0,89	3,69	2,33	4,79	3,68	97
Stand. abw.		0,16		0,34		0,14		
5%-Frakt. ^{*)}		1,22		3,14		4,57		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben (Tabelle 5.2-4) ist folgendes zu erkennen:

- Die Werte für den Anfangsschlupf sind im Mittel etwa um 1,5 mm größer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben. Dies entspricht etwa dem Überstand der Schraubenköpfe. Diese Tendenz wurde bereits bei Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ festgestellt.
- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ werden durch die überstehenden Schraubenköpfe nur wenig beeinflusst.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,89 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist - wie bei den schräg eingedrehten Schrauben - deutlich geringer und liegt sogar unterhalb der zulässigen Spannung der unverstärkten Proben!
- Auch der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung ist geringer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben und liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den unverstärkten Proben.

Auch diese Versuche deuten somit auf die Problematik der Verformungsmessungen hin.

Tabelle 5.2-7 Versuchsergebnisse, KVH 500, versenkte Schraubenköpfe, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	1,09	2,93	0,89	3,10	0,96	4,50	1,98	193
	0,75	1,07		4,23	3,90	4,94	5,13	65
S - 4x55	1,06	2,26		3,46	1,32	4,61	2,35	157
	1,00	1,49		4,36	4,00	4,94	5,15	65
Mittelwert	0,98	1,94	0,89	3,79	2,55	4,75	3,65	120
Stand.abw.		0,71		0,52		0,20		
5%-Frakt. ^{*)}		0,76		2,92		4,42		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben (Tabelle 5.2-4) ist folgendes zu erkennen:

- Die Werte für den Anfangsschlupf liegen in der Größenordnung der ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ liegen sogar über den Werten der ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben!
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,89 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist erneut deutlich geringer und liegt nur geringfügig über der zulässigen Spannung der unverstärkten Proben.
- Auch der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung ist geringer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben und liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den unverstärkten Proben.

Tabelle 5.2-8 Versuchsergebnisse, KVH 500, überstehende und versenkte Schraubenköpfe, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	f_{uDIN} [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 4x55	3,15	2,38	0,89	3,45	1,30	4,52	2,30	159
	2,18	2,58		3,33	1,15	4,83	2,27	174
S - 4x55	2,90	1,49		3,87	2,35	4,98	3,60	99
	2,62	1,43		2,71	1,70	3,93	3,05	96
Mittelwert	2,71	1,97	0,89	3,34	1,63	4,57	2,81	132
Stand. abw.		0,52		0,41		0,40		
5%-Frakt. *)		1,12		2,66		3,90		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen ist folgendes zu erkennen:

- Die Werte für den Anfangsschlupf sind wegen der überstehenden Schraubenköpfe um etwa 1,5 mm größer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ liegen im Bereich der Werte mit ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung von 0,89 mm aufgenommene Spannung f_{uDIN} ist erneut deutlich geringer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.
- Der Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faserrichtung ist geringer als bei den ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben.

5.2.3 Verstärkungsfaktoren

Wie bei den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ wurden folgende Verstärkungsfaktoren berechnet:

- Auf dem Niveau der zulässigen „Eindrückung“: $k_{V,uDIN} = \frac{f_{uDIN}}{1,60}$
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze: $k_{V,lin} = \frac{f_{v,lin}}{f_{uv,lin} \text{ (Mittelwert)}}$
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit: $k_{V,c,90} = \frac{f_{v,c,90}}{f_{uv,c,90} \text{ (Mittelwert)}}$

Die berechneten Faktoren sind in **Tabelle 5.2-9** zusammengestellt und in den **Bildern 5.2-1 bis 3** graphisch dargestellt.

Hieraus sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Die Verstärkungseffekte auf den verschiedenen Niveaus sind unterschiedlich groß.
- Der Verstärkungseffekt $k_{V,uDIN}$ auf dem Niveau der zulässigen „Eindrückung“ liegt bei 4 ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben im Mittel bei 1,6 und ist geringer als bei den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$.
Bei nicht ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben ist dieser Verstärkungsfaktor geringer und liegt z.T. unter 1,0.
Aufgrund der Vermutung, dass die Verformungsmessungen durch die Art der Messung verfälscht worden sein könnten, ist der Verstärkungsfaktor $k_{V,uDIN}$ mit Vorsicht zu bewerten.
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,lin}$ auf dem Niveau der Linearitätsgrenze wird im Gegensatz zum Faktor $k_{V,uDIN}$ nicht durch einen absoluten Verformungswert bestimmt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Aussagekraft dieses Faktors nicht durch Messprobleme beeinträchtigt wird.
Bei 4 ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben liegt dieser Faktor bei nur etwa 1,1 und ist deutlich geringer als bei den Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$. Bei den nicht ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben sind die zugehörigen Werte größer und liegen bei größerer Streuung im Mittel etwa bei 1,2 bis 1,35.
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,c,90}$ auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit liegt bei 4 ordnungsgemäß eingedrehten Schrauben im Mittel bei 1,1. Bei den nachlässig eingedrehten Schrauben liegt dieser Faktor im Mittel zwischen 1,1 und 1,2.

Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Holz mittels Schnellbauschrauben

Tabelle 5.2-9 Zusammenstellung der Verstärkungsfaktoren, KVH 500

	Schraubentyp	$k_{V,uDIN}$	$k_{V,lin}$	$k_{V,c,90}$
4 Schrauben 4x55	A1	1,34	1,02	1,06
		1,93	1,06	1,11
		1,93	1,06	1,09
		1,25	1,07	1,11
		1,26	0,78	1,01
	S	1,64	1,14	1,16
		1,53	1,10	1,15
		1,96	1,12	1,18
		1,85	1,06	1,20
		1,38	1,18	1,13
	Mittelwert	1,61	1,06	1,12
4 Schrauben schräg	A1	1,19	1,26	1,14
		0,82 ¹⁾	0,76 ¹⁾	0,78 ¹⁾
		1,55	1,10	1,11
	S	1,03	1,31	1,21
		0,88 ¹⁾	0,76 ¹⁾	0,94 ¹⁾
	Mittelwert	1,09 (1,26)	1,04 (1,22)	1,04 (1,15)
4 Schrauben überstehend	A1	0,93	1,35	1,21
		0,82	1,18	1,14
	S	0,87	1,40	1,22
		1,09	1,12	1,17
	Mittelwert	0,93	1,26	1,19
4 Schrauben versenkt	A1	1,83	1,06	1,11
		0,67	1,45	1,22
	S	1,41	1,19	1,14
		0,93	1,49	1,22
	Mittelwert	1,21	1,30	1,18
4 Schrauben überstehend / versenkt	A1	1,49	1,18	1,12
		1,61	1,14	1,20
	S	0,93	1,33	1,23
		0,89	0,93	0,97
	Mittelwert	1,23	1,15	1,13
¹⁾ Risse im Holz				

5.3 Zusammenfassende Bewertung

Die Versuche mit Proben geringerer und höherer Rohdichte zeigen auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung übereinstimmend deutlich größere Verstärkungseffekte als auf dem Niveau der Linearitätsgrenze bzw. der Querdruckfestigkeit. In Anbetracht des nicht eindeutig geklärten Einflusses geschüsselter Proben auf die Verformungsmessungen sollten die Faktoren $k_{V, \text{uDIN}}$ daher nicht überbewertet werden.

Die nachfolgende Bewertung beschränkt sich daher auf die Verstärkungseffekte auf dem Niveau der Linearitätsgrenze und der Querdruckfestigkeit.

Weiterhin werden nur die Ergebnisse mit 4 Schrauben aufgeführt, weil die Versuche gezeigt haben, dass der Verstärkungseffekt mit 9 Schrauben - wenn überhaupt - nur geringfügig höher ist und in keinem Verhältnis zur Anzahl der Schrauben steht.

In **Tabelle 5.3-1** sind die Mittelwerte der Spannungen f_{lin} und $f_{c,90}$ mit den zugehörigen Verstärkungsfaktoren zusammengestellt.

Tabelle 5.3-1 Zusammenstellung der Ergebnisse, Mittelwerte

		un- verstärkt	4 Schrauben	4 Schrauben schräg	4 Schrauben überstehend	4 Schrauben versenkt	4 Schrauben ü./v.
$\rho = 400$ kg/m ³	f_{lin}	1,75	2,86	2,70	2,74	2,50	2,65
	$k_{V, \text{lin}}$	-	1,63	1,55	1,57	1,43	1,52
	$f_{c,90}$	3,00	4,20	3,82	3,96	3,63	3,90
	$k_{V, c,90}$	-	1,40	1,27	1,32	1,21	1,30
$\rho = 500$ (465) kg/m ³	f_{lin}	2,92	3,09	3,57	3,69	3,79	3,34
	$k_{V, \text{lin}}$	-	1,06	1,22	1,26	1,30	1,15
	$f_{c,90}$	4,04	4,53	4,66	4,79	4,75	4,57
	$k_{V, c,90}$	-	1,12	1,15	1,19	1,18	1,13

Aus dieser Tabelle können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der Verstärkungseffekt bei Holz höherer Rohdichte ist erwartungsgemäß geringer als bei Holz geringerer Rohdichte. Da man sich aber bei der Festlegung von Rechenwerten für die Materialeigenschaften eher an Holz geringer Rohdichte orientiert erscheint es gerechtfertigt, die Verstärkungsfaktoren der Proben mit $\rho = 400$ kg/m³ heranzuziehen.
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze kann ein Verstärkungsfaktor von mindestens 1,4 angesetzt werden, wobei dann der Einfluss einer nicht auszuschließenden unsaubereren Ausführung abgedeckt wäre. Unter Zugrundelegung einer ordnungsgemäßen Ausführung wäre sogar ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,6 denkbar.
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten könnte ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,25 zugrundegelegt werden, wenn man den Einfluss einer unsaubereren Ausführung berücksichtigen will. Bei ordnungsgemäßer Ausführung beträgt der Verstärkungsfaktor ca. 1,4.

6 Auflagerversuche

Für die Brett-schichtholzträger wurde ein Probenquerschnitt $b/h = 140/240$ mm mit einer Länge von 700 mm verwendet. Die BSH-Träger wurden gezielt mit Brettern geringer ($\rho = 400 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) und hoher ($\rho = 500 \pm 20 \text{ kg/m}^3$) Rohdichte hergestellt. Diese Bretter wurden übereinandergelegt und miteinander verleimt, so dass keine Keilzinkenverbindungen auftraten. Hierdurch sollten möglichst gleichwertige Materialien für die verschiedenen Versuchsreihen gewährleistet werden.

Die Versuchsvorrichtung mit einem eingebauten Prüfkörper ist in **Bild 6-1** dargestellt. Die Versuche wurden an einer Presse mit 5.000 kN durchgeführt.

Im Hinblick auf die benötigten größeren Verbindungsmittelabstände betrug die Auflagerlänge nicht wie bei den Schwellenversuchen 60 mm, sondern 80 mm.

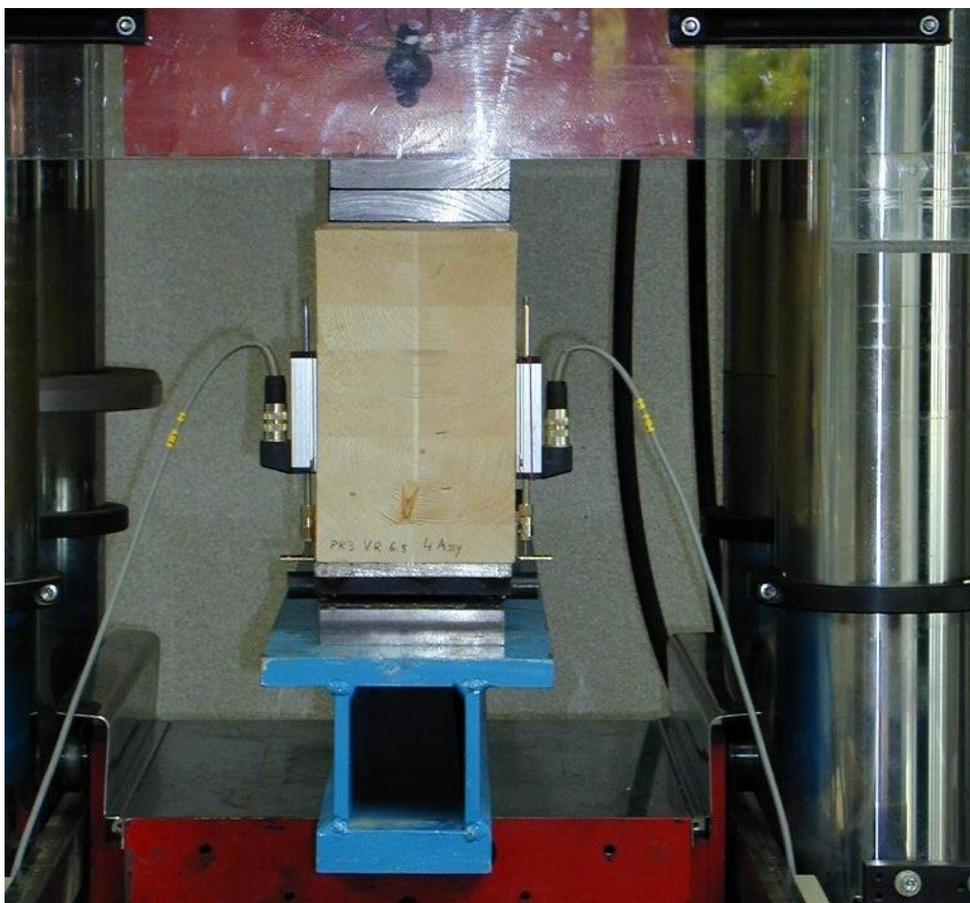


Bild 6-1 Versuchsvorrichtung für die Auflagerversuche

Für die Messung der Schwellenverformungen wurden seitlich Wegaufnehmer angebracht, mit deren Hilfe die Eindrücke über eine Messlänge von 60 mm gemessen wurden. Bei der Versuchsauswertung wurden die beiden Messwerte jeweils gemittelt.

6.1 Rohdichte 400 kg/m^3

6.1.1 Unverstärkte Proben

Da die unverstärkten Proben die Referenzwerte für den zu ermittelnden Verstärkungseffekt liefern sollten, wurden insgesamt 11 Versuche durchgeführt. Die Holzfeuchte der Proben lag zwischen 11 und 13 %.

Wie bei den Schwellenversuchen wurden folgende Werte gemessen bzw. ermittelt:

- Anfangsschlupf u_0
- Eindrückung u_{DIN}
Eindrückung bei Erreichen der zulässigen Spannung nach DIN 1052 (zul $\sigma_{\text{DIN}} = 0,8 \cdot 2,5 = 2,0 \text{ N/mm}^2$, zul $F = 2,0 \cdot 80 \cdot 140 = 22400 \text{ N}$).
- f_{lin} , u_{lin}
- $f_{\text{c},90}$, $u_{\text{c},90}$
- E_{90}

In **Bild 6.1-1** ist ein typisches Last-Verformungs-Diagramm für einen unverstärkten Prüfkörper beispielhaft dargestellt.

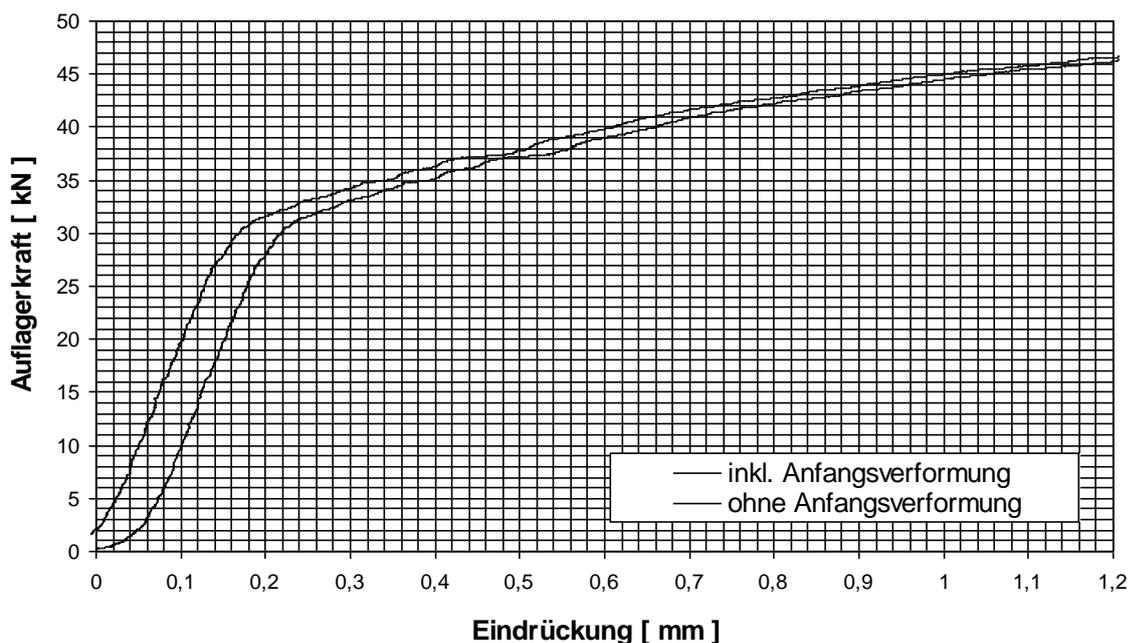


Bild 6.1-1 Typisches Last-Verformungs-Diagramm für unverstärkte Proben, BSH 400

In **Tabelle 6.1-1** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Der Bereich linearen Tragverhaltens geht nicht weit über den Wert der zulässigen Spannung nach DIN 1052 hinaus: der Mittelwert der Spannung $f_{\text{lin}} = 2,56 \text{ N/mm}^2$ liegt nur etwa 25% über der zulässigen Spannung von $2,00 \text{ N/mm}^2$.
Zum Vergleich: bei den Schwellenversuchen lag f_{lin} bei etwa $1,75 \text{ N/mm}^2$.

- Die mittlere Querdruckfestigkeit liegt bei 4,1 N/mm², bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa 3,7 N/mm².
Zum Vergleich: bei den Schwellenversuchen lag $f_{c,90}$ bei etwa 3,0 N/mm².
- Der Elastizitätsmodul E_{90} ist deutlich höher als bei den Schwellenversuchen: 580 N/mm² im Vergleich zu 150 N/mm².
- Der Mittelwert der bei der zulässigen Spannung aufgetretenen Eindrückungen ($u_{DIN} = 0,24$ mm) dient als Basiswert für die Bestimmung des Verstärkungsfaktors auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung.

Bei diesen Versuchen wird deutlich, dass sich die bei den Auflagerversuchen vorhandene Lastausbreitung positiv auf das Tragverhalten auswirkt: Die Unterschiede gegenüber den Schwellenversuchen lassen sich nämlich nicht nur mit dem unterschiedlichen Material (BSH - KVH) erklären.

Tabelle 6.1-1 Versuchsergebnisse, BSH 400, unverstärkt

	u_0 [mm]	zul σ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
	0,30	2,00	0,27	2,68	0,37	4,02	1,10	434
	0,17		0,33	2,68	0,44	4,38	1,30	365
	0,15		0,37	2,96	0,55	4,20	1,32	323
	0,20		0,28	2,51	0,37	3,79	1,10	407
	0,22		0,35	2,92	0,53	4,20	1,32	331
	0,28		0,13	2,41	0,16	4,31	0,89	904
	0,05		0,12	2,41	0,14	3,84	0,82	1033
	0,02		0,15	2,41	0,18	3,93	0,89	804
	0,09		0,20	2,32	0,22	3,93	0,97	633
	0,07		0,22	2,41	0,26	4,38	1,08	556
	0,12		0,20	2,46	0,24	4,20	1,02	614
Mittelwert	0,15	2,00	0,24	2,56	0,31	4,11	1,07	582
Stand. abw.				0,21		0,20		
5%-Frakt. ^{*)}				2,22		3,77		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

6.1.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)

Bei diesen Versuchen wurden die Schrauben so angeordnet, dass sie annähernd gleichmäßig über die gedrückte Fläche verteilt waren. Hierbei wurde ein Abstand von $7 \cdot d$ zum Hirnholz eingehalten. Für den Abstand $e_{||}$ in Faserrichtung wurde entsprechend den Einschraubversuchen $4 \cdot d$ gewählt.

Das Schraubenbild ist in **Bild 6.1-2** dargestellt.

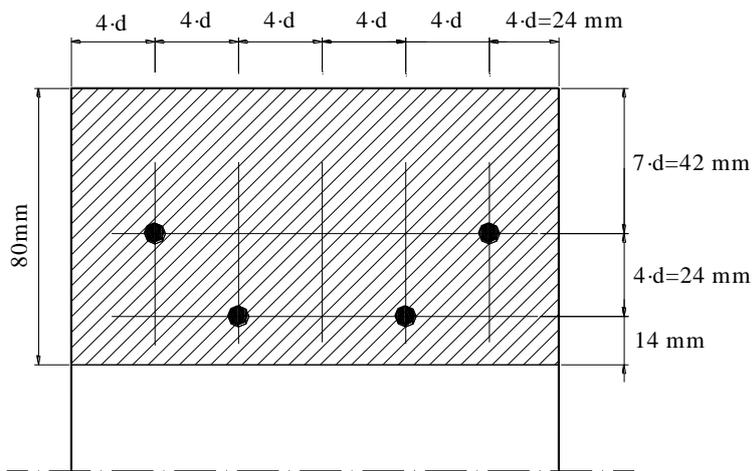


Bild 6.1-2 Anordnung der Schrauben

Es wurden je 5 Versuche mit den Schraubentypen A1 - 4x55 und S - 4x55 durchgeführt.

Wie bei den Schwellenversuchen wurden folgende Werte gemessen bzw. ermittelt:

- Anfangsschlupf u_0
- Spannung f_{uDIN}
Spannung bei Erreichen der mittleren „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben ($u_{DIN} = 0,24$ mm)
- f_{lin} , u_{lin}
- $f_{c,90}$, $u_{c,90}$
- E_{90}

In **Bild 6.1-3** ist ein typisches Last-Verformungs-Diagramm für diese Versuchsreihe dargestellt.

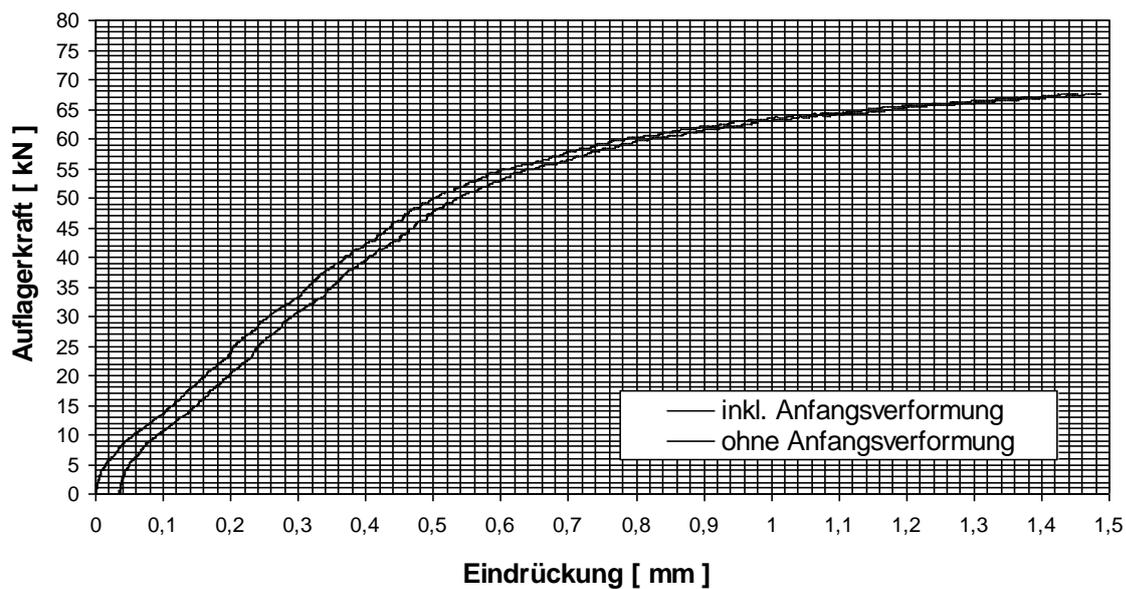


Bild 6.1-3 Typisches Last-Verformungs-Diagramm für verstärkte Proben, 4 Schrauben, BSH 400

In **Tabelle 6.1-2** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 6.1-2 Versuchsergebnisse, BSH 400, verstärkt, 4 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	$f_{i,DIN}$ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 6x70	-0,04	2,14	0,24	3,57	0,40	5,89	1,26	536
	-0,01	2,41		5,27	0,52	7,77	1,37	608
	0,01	1,96		2,86	0,34	7,59	0,66	504
	0,11	2,32		3,30	0,34	- ¹⁾	- ¹⁾	583
	0,08	2,95		4,91	0,41	5,94	1,10	719
S - 6x70	0,08	2,59	0,24	2,50	0,22	6,03	1,14	682
	0,00	1,63		4,42	0,62	5,76	1,42	428
	0,04	4,73		3,30	0,17	6,29	0,92	1166
	0,03	- ¹⁾		4,20	0,19	- ¹⁾	- ¹⁾	1325
	0,07	1,88		3,39	0,45	8,66	1,20	452
Mittelwert		2,51	0,24	3,77	0,37	6,74	1,13	700
Stand.abw.		0,92		0,90		1,10		
5%-Frakt. ^{*)}		1,00		2,30		5,13		
^{*)} Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$ ¹⁾ Konnte nicht aus den Versuchen bestimmt werden.								

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben aufgenommene Spannung beträgt im Mittel 2,5 N/mm², was etwa 25% über der zulässigen Spannung von 2,0 N/mm² liegt.
- Der Bereich linearen Tragverhaltens wird durch die eingebrachten Schrauben erheblich verlängert: der Mittelwert der Spannung $f_{lin} = 3,77$ N/mm² liegt deutlich über dem zugehörigen Wert der unverstärkten Proben von 2,56 N/mm².
- Die Querdruckfestigkeit der verstärkten Proben liegt bei etwa 6,7 N/mm², bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa 5,1 N/mm² und liegt somit ebenfalls deutlich über den zugehörigen Werten der unverstärkten Proben.
- Der Elastizitätsmodul E_{90} ist gegenüber den unverstärkten Proben nur geringfügig höher.

6.1.3 Verstärkte Proben (9 Schrauben)

Auch bei diesen Versuchen wurden die Schrauben so angeordnet, dass sie annähernd gleichmäßig über die gedrückte Fläche verteilt waren. Hierbei wurde ein Abstand von $7 \cdot d$ zum Hirnholz eingehalten.

Das Schraubenbild ist in **Bild 6.1-4** dargestellt.

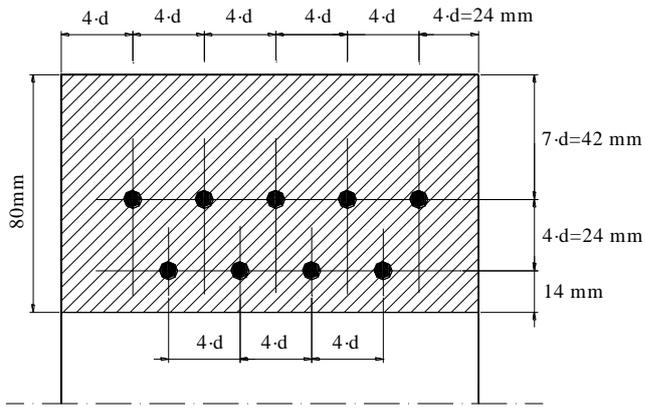


Bild 6.1-4 Anordnung der Schrauben

Es wurden wiederum je 5 Versuche mit den Schraubentypen A1 - 4x55 und S - 4x55 durchgeführt.

Bei diesen Versuchen wurde bei einigen Proben eine ausgesprochene Höchstlast erreicht. Bei den bisherigen Versuchen wurde die Querdruckfestigkeit über das Kriterium der Eindrückung (nach DIN EN 1193) bestimmt. In **Bild 6.1-5** ist ein Last-Verformungsbild mit ausgeprägter Höchstlast dargestellt.

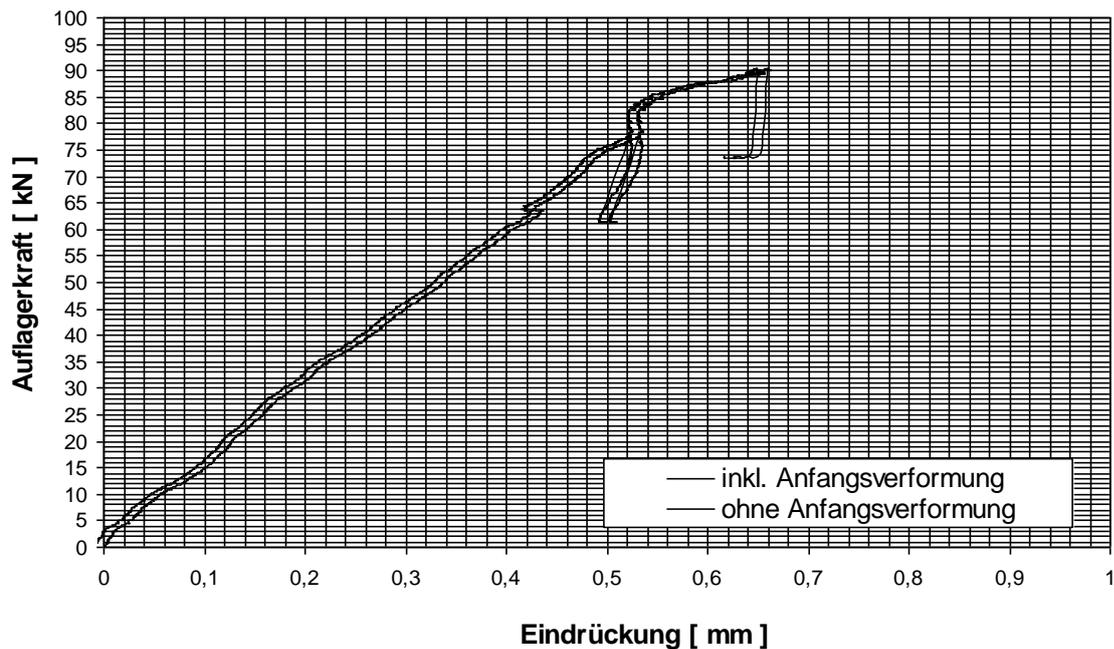


Bild 6.1-5 Last-Verformungs-Diagramm für einen Prüfkörper mit ausgeprägter Höchstlast, verstärkt, 9 Schrauben, BSH 400

In **Tabelle 6.1-3** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 6.1-3 Versuchsergebnisse, BSH 400, verstärkt, 9 Schrauben

Typ	u_0 [mm]	$f_{u,DIN}$ [N/mm ²]	u_{DIN} [mm]	f_{lin} [N/mm ²]	u_{lin} [mm]	$f_{c,90}$ [N/mm ²]	$u_{c,90}$ [mm]	E_{90} [N/mm ²]
A1 - 6x70	0,00	2,32	0,24	4,46	0,48	7,23	1,35	558
	0,01	3,39		3,21	0,22	8,04	0,66	877
	0,01	3,39		5,71	0,41	8,93	0,42	836
	0,02	4,02		4,46	0,27	8,48	0,28	1011
	-0,01	2,59		3,57	0,34	7,95	0,97	630
S - 6x70	0,04	4,73	0,24	4,38	0,20	6,16	0,90	1313
	-0,05	2,95		2,95	0,24	6,25	1,11	737
	0,06	3,62		4,73	0,32	8,04	0,47	887
	-0,01	3,21		4,02	0,31	8,26	1,24	778
	0,07	2,68		3,75	0,34	7,32	1,25	662
Mittelwert		3,29	0,24	4,12	0,31	7,67	0,87	829
Stand. abw.		0,72		0,81		0,92		
5%-Frakt. ^{*)}		2,11		2,80		6,16		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit 4 Schrauben ist ersichtlich, dass mit 9 Schrauben eine weitere Steigerung der Tragfähigkeit erreicht wurde. Der erreichte Verstärkungseffekt ist allerdings nicht proportional zu der Anzahl der eingedrehten Schrauben.

6.1.4 Verstärkungsfaktoren

Wie bei den Schwellenversuchen wurden folgende Verstärkungsfaktoren berechnet:

- Auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung: $k_{V,u,DIN} = \frac{f_{u,DIN}}{2,00}$
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze: $k_{V,lin} = \frac{f_{v,lin}}{f_{uv,lin} \text{ (Mittelwert)}}$
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit: $k_{V,c,90} = \frac{f_{v,c,90}}{f_{uv,c,90} \text{ (Mittelwert)}}$

Die berechneten Faktoren sind in **Tabelle 6.1-4** zusammengestellt und in den **Bildern 6.1-6 bis -8** graphisch dargestellt.

Tabelle 6.1-4 Zusammenstellung der Verstärkungsfaktoren, BSH 400

	Schraubentyp	$k_{V,uDIN}$	$k_{V,lin}$	$k_{V,c,90}$
4 Schrauben 6x70	A1	1,07	1,39	1,44
		1,21	2,06	1,89
		0,98	1,12	1,85
		1,16	1,29	-
		1,47	1,92	1,45
	S	1,29	0,98	1,47
		0,82	1,73	1,40
		2,37	1,29	1,53
		-	1,64	-
		0,94	1,32	2,11
	Mittelwert	1,26	1,47	1,64
9 Schrauben 6x70	A1	1,16	1,74	1,76
		1,70	1,26	1,96
		1,70	2,23	2,17
		2,01	1,74	2,07
		1,29	1,39	1,94
	S	2,37	1,71	1,50
		1,47	1,15	1,52
		1,81	1,85	1,96
		1,61	1,57	2,01
		1,34	1,46	1,78
	Mittelwert	1,65	1,61	1,87

Hieraus sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Die Verstärkungseffekte auf den verschiedenen Niveaus sind wie bei den Schwellenversuchen unterschiedlich groß.
- Die Streuung der Werte ist in Anbetracht des doch gleichwertigen Probenmaterials vergleichsweise groß. Sie ist auch deutlich größer als bei den Schwellenversuchen.
- Im Gegensatz zu den Schwellenversuchen ist bei 9 Schrauben ein höherer Verstärkungseffekt zu erkennen als bei 4 Schrauben.
- Der Verstärkungseffekt $k_{V,uDIN}$ auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung liegt bei 4 Schrauben zwischen 0,8 und 2,4 (Mittelwert 1,26). Bei 9 Schrauben liegt dieser Faktor bei geringerer Streuung zwischen 1,16 und 2,37 (Mittelwert 1,65).
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,lin}$ auf dem Niveau der Linearitätsgrenze liegt bei 4 Schrauben bei etwa 1,0 bis 2,0 (Mittelwert 1,47). Bei 9 Schrauben liegt dieser Wert zwischen 1,15 und 2,23 (Mittelwert 1,61).
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,c,90}$ auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit fällt etwas höher aus als der Faktor $k_{V,lin}$: die Werte liegen bei 4 Schrauben zwischen 1,4 und 2,1 (Mittelwert 1,64). Bei 9 Schrauben liegt dieser Wert zwischen 1,5 und 2,2 (Mittelwert 1,87).

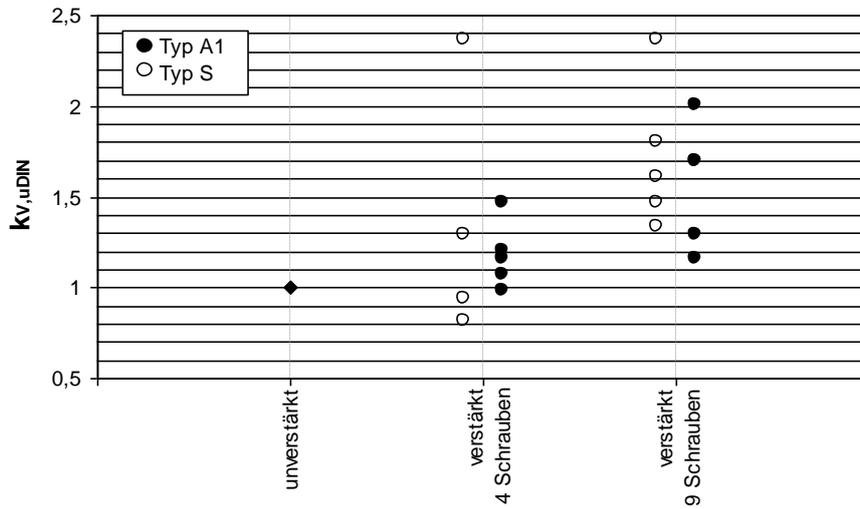


Bild 6.1-6 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückungen, BSH 400

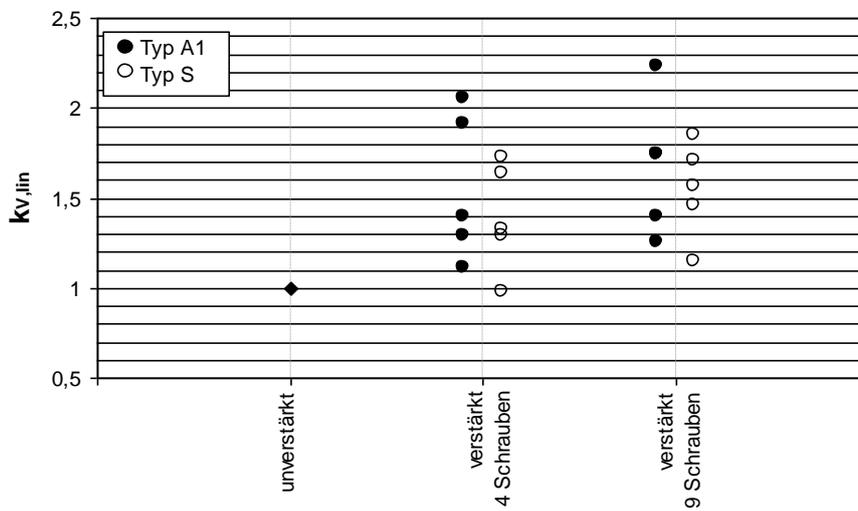


Bild 6.1-7 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Linearitätsgrenze, BSH 400

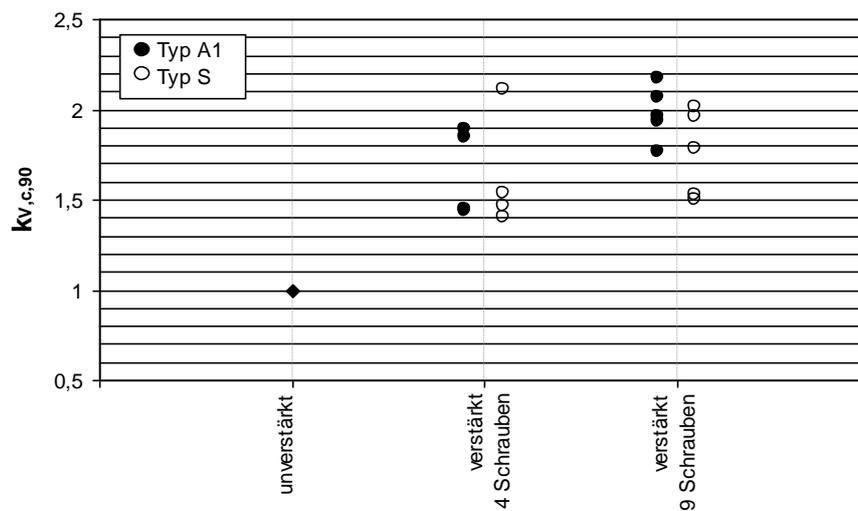


Bild 6.1-8 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten, BSH 400

6.2 Rohdichte 500 kg/m³

6.2.1 Unverstärkte Proben

In **Tabelle 6.2-1** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Tabelle 6.2-1 Versuchsergebnisse, BSH 500, unverstärkt

	u ₀ [mm]	zul σ _{DIN} [N/mm ²]	u _{DIN} [mm]	f _{lin} [N/mm ²]	u _{lin} [mm]	f _{c,90} [N/mm ²]	u _{c,90} [mm]	E ₉₀ [N/mm ²]
	0,00	2,0	0,10	2,50	0,13	4,51	0,83	1154
	-0,01		0,08	3,04	0,12	5,54	0,83	1518
	0,04		0,18	2,77	0,24	4,55	1,00	692
	-0,01		0,12	2,14	0,13	4,87	0,89	989
	0,00		0,05	2,32	0,07	5,45	0,75	2143
Mittelwert	0,88	2,0	0,11	2,55	0,14	4,98	0,86	1299
Stand.abw.				0,32		0,43		
5%-Frakt. ^{*)}				2,03		4,27		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: $x_5 = m - 1,645 \cdot s$								

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, dass die Werte für f_{lin} in der gleichen Größenordnung wie bei BSH 400 liegen. Die Werte für f_{c,90} liegen jedoch etwa 25% über denen der Proben mit ρ = 400 kg/m³ (vgl. Tabelle 6.1-1).

Unerwartet hoch ist hingegen der Elastizitätsmodul der hier geprüften Proben: die Werte für E₉₀ liegen deutlich über denen der Proben mit ρ = 400 kg/m³ (1299 >> 582 N/mm²).

Aus dieser Tabelle ist weiterhin folgendes zu erkennen:

- Die mittlere Querdruckfestigkeit liegt bei etwa 5,0 N/mm², bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa 4,3 N/mm².
- Der Mittelwert der bei der zulässigen Spannung aufgetretenen Eindrückungen ist mit u_{DIN} = 0,11 mm sehr gering. Dieser dient als Basiswert für die Bestimmung des Verstärkungsfaktors auf dem Niveau der zulässigen Spannungen.

6.2.2 Verstärkte Proben (4 Schrauben)

In **Tabelle 6.2-2** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben aufgenommene Spannung liegt im Mittel nur knapp 25% über der zulässigen Spannung von 2,0 N/mm². Dies könnte mit dem außergewöhnlich „steifen“ Material bei den unverstärkten Proben erklärt werden, so dass auf diesem Niveau nur eine vergleichsweise geringe Verstärkung erzielt wurde.
- Der Bereich linearen Tragverhaltens wird durch die eingebrachten Schrauben deutlich verlängert: der Mittelwert der Spannung f_{lin} = 3,7 N/mm² liegt um ca. 45% über dem Wert der unverstärkten Proben von 2,55 N/mm².

- Die Querdruckfestigkeit der verstärkten Proben liegt bei etwa 7,0 N/mm², bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa 5,9 N/mm². Diese Werte liegen ebenfalls deutlich über denen der unverstärkten Proben.
- Der Elastizitätsmodul E₉₀ liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den unverstärkten Proben.

Tabelle 6.2-2 Versuchsergebnisse, BSH 500, verstärkt, 4 Schrauben

Typ	u ₀ [mm]	f _{uDIN} [N/mm ²]	u _{DIN} [mm]	f _{lin} [N/mm ²]	u _{lin} [mm]	f _{c,90} [N/mm ²]	u _{c,90} [mm]	E ₉₀ [N/mm ²]
A1 - 6x70	-0,01	1,74	0,11	3,13	0,20	6,88	1,40	962
	-0,03	1,34		2,95	0,24	5,63	1,60	737
	-0,03	1,52		4,46	0,32	6,25	1,55	837
	0,02	2,68		4,02	0,16	7,05	0,88	1507
	0,02	3,04		5,00	0,18	7,50	0,87	1667
S - 6x70	0,00	1,79	0,11	4,29	0,27	7,77	1,08	970
	0,01	4,11		4,02	0,11	7,54	0,79	2296
	-0,01	2,50		2,50	0,11	6,70	0,75	1364
	0,05	2,19		3,04	0,15	7,05	0,94	1214
	0,03	3,39		3,66	0,12	7,28	0,83	1830
Mittelwert		2,43	0,11	3,71	0,19	6,97	1,07	1338
Stand. abw.		0,89		0,79		0,65		
5%-Frakt. ^{*)}		0,97		2,41		5,90		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: x ₅ = m - 1,645 · s								

6.2.3 Verstärkte Proben (9 Schrauben)

In **Tabelle 6.2-3** sind alle Versuchsergebnisse dieser Reihe zusammengefasst.

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die bei der „zulässigen“ Eindrückung der unverstärkten Proben aufgenommene Spannung liegt in der Größenordnung der zulässigen Spannung von 2,0 N/mm² und ist somit geringer als bei der Versuchsreihe mit 4 Schrauben. Dies könnte wiederum mit dem außergewöhnlich „steifen“ Material bei den unverstärkten Proben erklärt werden.
- Der Bereich linearen Tragverhaltens wird durch die eingebrachten Schrauben deutlich verlängert: der Mittelwert der Spannung f_{lin} = 4,1 N/mm² liegt um ca. 60% über dem Wert der unverstärkten Proben von 2,55 N/mm².
- Die Querdruckfestigkeit der verstärkten Proben liegt bei etwa 7,5 N/mm², bei einem geschätzten charakteristischen Wert von etwa 6,5 N/mm². Diese Werte liegen deutlich über denen der unverstärkten Proben.
- Der Elastizitätsmodul E₉₀ ist im Mittel geringer als bei den unverstärkten Proben.

Im Vergleich zu den Ergebnissen mit 4 Schrauben ist ersichtlich, dass mit 9 Schrauben eine weitere, wenn auch geringe Steigerung der Tragfähigkeit erreicht wurde.

Tabelle 6.2-3 Versuchsergebnisse, BSH 500, verstärkt, 9 Schrauben

Typ	u ₀ [mm]	f _{uDIN} [N/mm ²]	u _{DIN} [mm]	f _{lin} [N/mm ²]	u _{lin} [mm]	f _{c,90} [N/mm ²]	u _{c,90} [mm]	E ₉₀ [N/mm ²]
A1 - 6x70	-0,04	2,14	0,11	3,75	0,19	7,32	0,97	1184
	0,00	2,37		3,30	0,16	7,86	0,94	1279
	-0,02	1,70		4,02	0,25	7,72	1,08	964
	0,01	1,92		5,89	0,32	8,08	0,82	1105
	-0,01	2,95		4,02	0,16	8,62	0,90	1507
S - 6x70	-0,02	2,00	0,11	5,18	0,31	7,63	0,72	1002
	-0,01	1,16		4,02	0,39	7,46	1,18	618
	-0,03	1,43		4,11	0,32	7,14	1,14	770
	0,01	2,99		2,54	0,08	6,34	0,71	1902
	-0,08	0,85		4,55	0,57	6,96	1,14	479
Mittelwert		1,95	0,11	4,14	0,28	7,51	0,96	1081
Stand. abw.		0,70		0,93		0,63		
5%-Frakt. ^{*)}		0,79		2,61		6,48		
*) Unter Annahme einer Gauß-Normalverteilung: x ₅ = m - 1,645 · s								

6.2.4 Verstärkungsfaktoren

Wie bei den Proben mit ρ = 400 kg/m³ wurden folgende Verstärkungsfaktoren berechnet:

- Auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung: $k_{v,uDIN} = \frac{f_{uDIN}}{2,0}$
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze: $k_{v,lin} = \frac{f_{v,lin}}{f_{uv,lin} \text{ (Mittelwert)}}$
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit: $k_{v,c,90} = \frac{f_{v,c,90}}{f_{uv,c,90} \text{ (Mittelwert)}}$

Die berechneten Faktoren sind in **Tabelle 6.2-4** zusammengestellt und in den **Bildern 6.2-1 bis -3** graphisch dargestellt.

Hieraus sind folgende Tendenzen zu erkennen:

- Die Verstärkungseffekte auf den verschiedenen Niveaus sind erneut unterschiedlich groß.
- Die Streuung der Werte ist auch hier vergleichsweise groß.
- Wie bei den Proben mit ρ = 400 kg/m³ ist auch hier bei 9 Schrauben ein geringfügig höherer Verstärkungseffekt zu erkennen als bei 4 Schrauben.

- Der Verstärkungseffekt $k_{V,uDIN}$ auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung liegt bei 4 Schrauben zwischen 0,7 bis 2,1 (Mittelwert 1,21). Bei 9 Schrauben hingegen liegt dieser Wert nur zwischen 0,4 und 1,5 (Mittelwert 0,97)! Dies deutet - wie bei den Schwellenversuchen auch - darauf hin, dass dieser Faktor nur bedingt zur Abschätzung des Verstärkungseffektes geeignet ist.
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,lin}$ auf dem Niveau der Linearitätsgrenze liegt bei 4 Schrauben bei etwa 1,0 bis 2,0 (Mittelwert 1,45). Bei 9 Schrauben liegt dieser Wert zwischen 1,0 und 2,3 (Mittelwert 1,62).
- Der Verstärkungsfaktor $k_{V,c,90}$ auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit fällt etwas geringer aus als der Faktor $k_{V,lin}$: die Werte liegen bei 4 Schrauben zwischen 1,1 und 1,6 (Mittelwert 1,40). Bei 9 Schrauben liegt dieser Wert zwischen 1,3 und 1,7 (Mittelwert 1,5).

Tabelle 6.2-4 Zusammenstellung der Verstärkungsfaktoren, BSH 500

	Schraubentyp	$k_{V,uDIN}$	$k_{V,lin}$	$k_{V,c,90}$
4 Schrauben 6x70	A1	0,87	1,22	1,38
		0,67	1,15	1,13
		0,76	1,75	1,25
		1,34	1,57	1,42
		1,52	1,96	1,51
	S	0,89	1,68	1,56
		2,05	1,57	1,51
		1,25	0,98	1,34
		1,09	1,19	1,42
		1,70	1,43	1,46
	Mittelwert	1,21	1,45	1,40
9 Schrauben 6x70	A1	1,07	1,47	1,47
		1,18	1,29	1,58
		0,85	1,57	1,55
		0,96	2,31	1,62
		1,47	1,57	1,73
	S	1,00	2,03	1,53
		0,58	1,57	1,50
		0,71	1,61	1,43
		1,50	0,99	1,27
		0,42	1,78	1,40
	Mittelwert	0,97	1,62	1,51

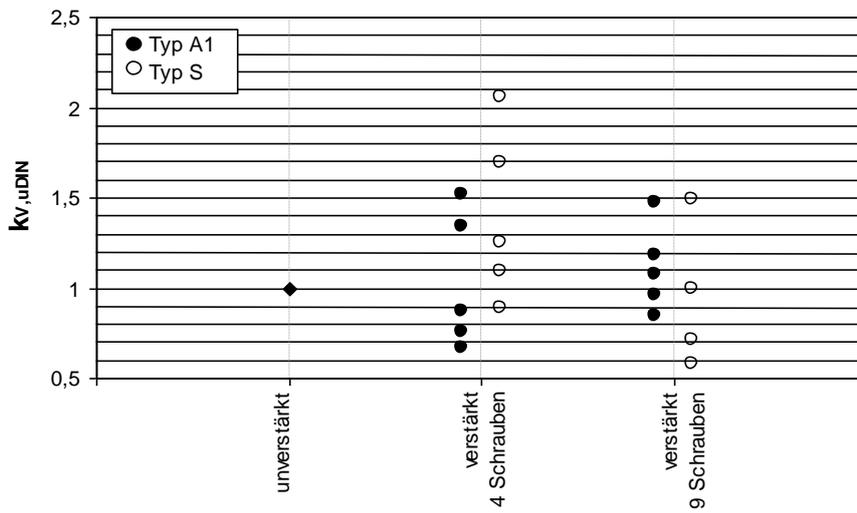


Bild 6.2-1 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückungen, BSH 500

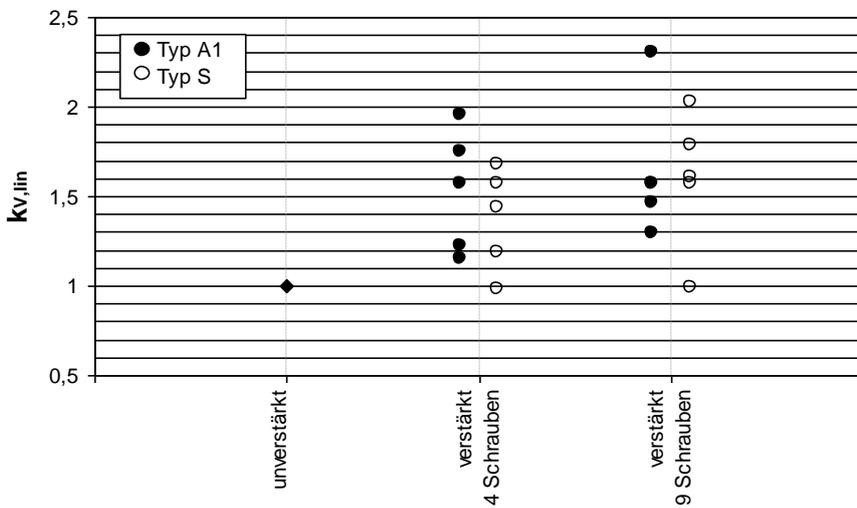


Bild 6.2-2 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Linearitätsgrenze, BSH 500

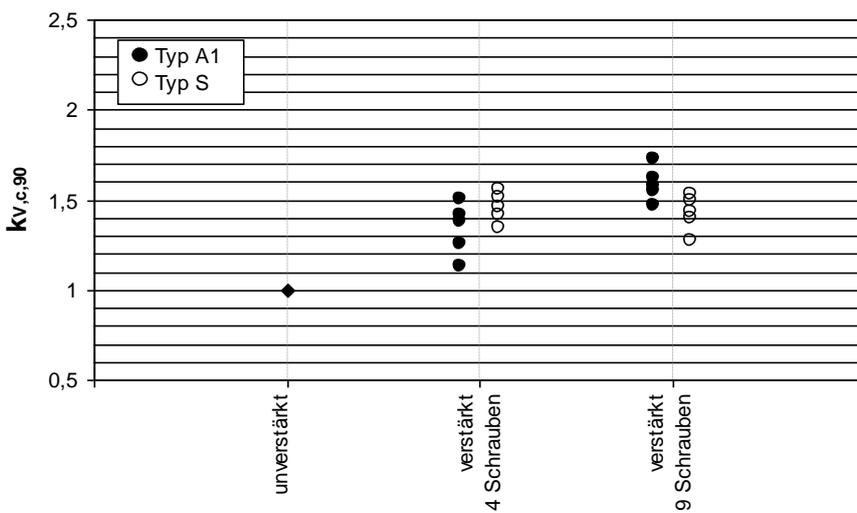


Bild 6.2-3 Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten, BSH 500

6.3 Zusammenfassende Bewertung

In **Tabelle 6.3-1** sind die Mittelwerte der Spannungen $f_{u,DIN}$, f_{lin} und $f_{c,90}$ mit den zugehörigen Verstärkungsfaktoren zusammengestellt.

Tabelle 5.3-1 Zusammenstellung der Ergebnisse, **Mittelwerte**

		un- verstärkt	4 Schrauben	9 Schrauben
$\rho = 400 \text{ kg/m}^3$	$f_{u,DIN}$	2,00	2,51	3,29
	$k_{V,u,DIN}$	-	1,26	1,64
	f_{lin}	2,56	3,77	4,12
	$k_{V,lin}$	-	1,47	1,61
	$f_{c,90}$	4,11	6,74	7,67
	$k_{V,c,90}$	-	1,64	1,87
$\rho = 500 \text{ (465) kg/m}^3$	$f_{u,DIN}$	2,00	2,43	1,95
	$k_{V,u,DIN}$	-	1,21	0,97
	f_{lin}	2,55	3,71	4,14
	$k_{V,lin}$	-	1,45	1,62
	$f_{c,90}$	4,98	6,97	7,51
	$k_{V,c,90}$	-	1,40	1,51

Aus dieser Tabelle können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Wegen der z.T. widersprüchlichen Ergebnisse wird der Faktor $k_{V,u,DIN}$ nicht weiter für die Abschätzung des Verstärkungseffektes benutzt.
- Der Verstärkungseffekt bei Holz höherer Rohdichte ist auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten erwartungsgemäß geringer als bei Holz geringerer Rohdichte. Wie bei den Schwellen erscheint es aber auch hier gerechtfertigt, sich am Holz mit der geringeren Rohdichte zu orientieren.
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze kann bei 4 Schrauben ein Verstärkungsfaktor von mindestens 1,4 angesetzt werden, bei 9 Schrauben ein Faktor von 1,6.
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten könnte bei 4 Schrauben ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,6 zugrundegelegt werden, bei 9 Schrauben ein Faktor von etwa 1,8.
- Eine Aussage über die Auswirkungen einer „unsauberen“ Ausführung ist mit diesen Versuchen nicht möglich.

7 Diskussion, Rechenverfahren

7.1 Unverstärkte Proben

In der derzeit noch gültigen DIN 1052 (04.88) sind die in **Tabelle 7.1-1** angegebenen zulässigen Querdruckspannungen vereinbart. Bei den im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Versuchen wurden wegen des fehlenden Überstandes die in Klammern angegebenen Werte bei der Auswertung herangezogen.

Tabelle 7.1-1 Zulässige Spannungen nach DIN 1052 (04.88)

	Vollholz	Brettschichtholz
zul. $\sigma_{D,\perp}$	2,0 (1,6) ^{*)}	2,5 (2,0) ^{*)}
*) Bei unzureichendem Überstand		

Im Gelbdruck zur neuen DIN 1052 (05.00) werden in Anlehnung an den EUROCODE 5 die in **Tabelle 7.1-2** angegebenen charakteristischen Festigkeitswerte vorgeschlagen.

Tabelle 7.1-2 Charakteristische Querdruckfestigkeit nach E DIN 1052 (05.00)

	S 10	BS 11	BS 14
$f_{c,90,k}$	2,5	2,7	3,0

Diese Festigkeitswerte legen eine Prüfung nach EN 1193 zugrunde, in der die Querdruckfestigkeit anhand einer würfelförmigen Probe ermittelt wird. Diese Werte gelten dann auch für Schwellen und Auflagerungen ohne Überstand.

Bei den in Abschnitt 2 beschriebenen Versuchen wurden ebenfalls würfelförmige Proben aus Brettschichtholz (BS 11) verwendet. Die vier Versuchskörper (aus einem Brettschichtholzträger herausgeschnitten) ergaben eine mittlere Querdruckfestigkeit von etwa 2,7 N/mm², was in der Größenordnung des in E DIN 1052 angegebenen charakteristischen Wertes liegt.

Vergleicht man die zulässigen Spannungen der „alten“ Norm mit den charakteristischen Werten des Normentwurfes, so wird deutlich, dass man im Falle der Querdruckfestigkeit ein geringeres Sicherheitsniveau akzeptiert, als dies bei anderen Beanspruchungen der Fall ist. Der globale Sicherheitsbeiwert ergibt sich zu $\gamma_{\text{global}} = 2,5/1,6 = 1,56$ für Vollholz S 10 bzw. $2,7/2,0 = 1,35$ für Brettschichtholz BS 11 im Vergleich zum sonst angestrebten Sicherheitsniveau von $\gamma_{\text{global}} \approx 2,1$ gegenüber der 5%-Fraktile.

Der in E DIN 1052 angegebene Beiwert $k_{c,90}$ zur Erhöhung der Querdruckfestigkeit beträgt bei Schwellenbeanspruchung ohne Überstand bereits 1,7 und steigt bei vorhandenem Überstand nochmals an. Dieser Faktor ist überwiegend als „fiktiver“ Beiwert anzusehen, mit dessen Hilfe das angestrebte globale Sicherheitsniveau zumindest rechnerisch sichergestellt werden soll.

Ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen mit den Werten aus E DIN 1052 bzw. EC 5 gestaltet sich aus folgenden Gründen als schwierig:

- Bei den Hauptversuchen wurden keine „Nullversuche“ mit Würfelproben durchgeführt, so dass ein laststeigernder Einfluss einer Schwellenbeanspruchung oder indirekten Lasteinleitung bei Auflagerungen nicht abgeschätzt werden kann.

- Bei den hier durchgeführten Versuchen wurden ausgesuchte Hölzer mit geringen Rohdichteschwankungen verwendet, um den Einfluss einer streuenden Rohdichte möglichst auszuschließen. Dies bedingt aber, dass die ermittelten Versuchswerte keine Aussagen über die charakteristische Tragfähigkeit der Grundgesamtheit ermöglichen.

Die nachfolgende Diskussion geht daher von folgenden Annahmen aus:

- Die in E DIN 1052 angegebenen Werte für die charakteristische Querdruckfestigkeit wurden versuchstechnisch anhand von „Würfelproben“ ermittelt.
- Die Mittelwerte der Proben mit einer Rohdichte von 400 kg/m³ entsprechen in etwa den charakteristischen Werten der „Grundgesamtheit“.
Dies wurde sowohl für die Schwellenversuche mit Vollholz S 10 als auch die Auflagerversuche mit Brettschichtholz BS 14 angenommen, weil die Rohdichte bei der visuellen Sortierung kein Sortierkriterium darstellt.

In **Tabelle 7.1-3** sind die Versuchsergebnisse der unverstärkten Proben den Werten aus E DIN 1052 gegenübergestellt.

Tabelle 7.1-3 Gegenüberstellung Versuchsergebnisse - Rechenwerte aus E DIN 1052

	E DIN 1052		Versuche	
	$f_{c,90,k}$ [N/mm ²]		$f_{c,90}$ (Mittelwert) [N/mm ²]	
S 10	Würfel	$2,5 \cdot 1,7 = 4,25$ ¹⁾	Schwelle	3,0
BS 11		2,7	Würfel (Vorversuche)	2,7
BS 14		$3,0 \cdot 1,7 = 5,10$ ¹⁾	Auflager	4,1
¹⁾ 1,7 = Faktor $k_{c,90}$ nach E DIN 1052, Abschnitt 8.2.5				

Die Versuche bestätigen, dass mit einseitigem Überstand (Schwellenbelastung) im Vergleich zu den „Würfelproben“ eine höhere Querdruckfestigkeit zu erwarten ist.

Bei indirekter Lasteinleitung (Auflagerung von Biegeträgern) ist wegen der vorhandenen Möglichkeit einer Lastausbreitung sogar eine weitere Erhöhung der Querdruckfestigkeit zu erwarten. Darüber hinaus war im Vergleich zu den Würfelproben und zur Schwellenbelastung der Bereich linearen Tragverhaltens deutlich größer.

Die Gegenüberstellung in *Tabelle 7.1-3* zeigt aber, dass die durchgeführten Versuche in z.T. **deutlichem Widerspruch zu den Bemessungsregeln in E DIN 1052** (Mai 2000) stehen.

Auch hinsichtlich des Elastizitätsmoduls rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes zeigten die Versuche **große Abweichungen zu den Normenwerten** auf. In **Tabelle 7.1-4** sind die zugehörigen Werte vergleichend gegenübergestellt.

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, dass bei Schwellenbeanspruchung der Elastizitätsmodul E_{90} deutlich unter den zugehörigen Werten der DIN-Normen liegt. Diese Tendenz wurde bereits von [Frater/Thelandersson]⁵ festgestellt, die eine Korrektur der zugehörigen Werte in EN 338 empfahlen. Eine solche wurde jedoch nicht vorgenommen.

Die Auflagerversuche hingegen zeigen deutlich höhere Werte für E_{90} als dies in den Normen angegeben wird. Dies kann sicherlich zum großen Teil mit der Lastausbreitung im Auflagerbereich bei dieser Beanspruchungsart erklärt werden.

⁵ Frater, G.S.; Thelandersson, S. 1996: Bearing Performance of Dimensional Lumber in a Platform Frame. An experimental study. Report TVBK-7053. Department of Structural Engineering, Lund University, Lund, Sweden

Tabelle 7.1-4 Elastizitätsmodul E_{90} in N/mm²

	DIN 1052 (04.88)	E DIN 1052 (05.00)	E_{90} aus Versuchen min - mittel - max	ρ_m bei Versuchen	Beanspruchung
S 10	300	370	130 - 150 - 180	400	Schwelle
			70 - 120 - 140	465	
BS 14 h	300	420	320 - 580 - 1030	400	Auflager
			690 - 1300 - 2150	500	

7.2 Verstärkte Proben

Ziel dieses Vorhabens war es, ein einfaches Rechenverfahren zu entwickeln, mit dem der Verstärkungseffekt bei der Bemessung berücksichtigt werden kann. Dieses Ziel konnte aus folgenden Gründen nur bedingt erreicht werden (siehe nächsten *Abschnitt 7.3*):

- Die durchgeführten Varianten hinsichtlich Schraubendurchmesser, Auflagerflächen und Verstärkungsgrade reichen nicht zur Herleitung eines abgesicherten, allgemeingültigen Rechenverfahrens aus.
- Die festgestellten Unterschiede zwischen den Verstärkungseffekten von 4 bzw. 9 Schrauben waren gering und stehen in keinem Verhältnis mit der Anzahl der Schrauben. Dies lässt darauf schließen, dass bei zu enger Anordnung der Schrauben ein höherer Verstärkungseffekt durch „Überlagerungseffekte“ verhindert wird (siehe **Bild 7.2-1**).

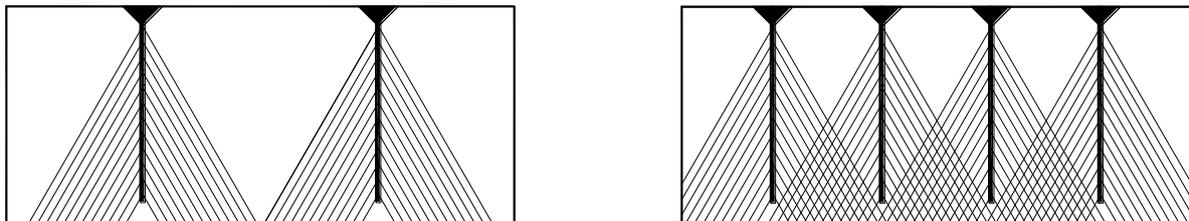


Bild 7.2-1 Überlagerungseffekte bei zu enger Anordnung der Schrauben (Prinzipskizzen)
links: Entlastung des Holzes durch ausreichenden Abstand der Schrauben
rechts: erhöhte Querdruckbeanspruchung des Holzes durch Überlagerung der Druckkegel

- Die Versuche wurden mit ausgesuchten Hölzern durchgeführt, die nur sehr geringe Rohdichteschwankungen aufwiesen. Dies wurde bewusst so durchgeführt, um die Streuung der Ergebnisse zu beschränken. Somit sind abgesicherte Aussagen zunächst nur über der Verstärkungseffekt des hier geprüften Holzes möglich. Unter der Annahme jedoch, dass die mittlere Querdruckfestigkeit der Proben mit einer Rohdichte von 400 kg/m³ in der gleichen Größenordnung liegt, wie die charakteristische Querdruckfestigkeit der Grundgesamtheit, so erscheint eine Übertragung der hier gewonnenen Erkenntnisse möglich.

In **Tabelle 7.2-1** sind die in den Abschnitten 5 und 6 ermittelten Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der Linearitätsgrenze f_{lin} und der Querdruckfestigkeit $f_{c,90}$ nochmals zusammengestellt.

In Anbetracht der festgestellten Abweichungen bzw. Widersprüche zu den Werten von E DIN 1052, beziehen sich die angegebenen Verstärkungsfaktoren auf die versuchstechnisch ermittelten Querdruckfestigkeiten unter Schwellen- bzw. Auflagerbeanspruchung, und nicht auf die in E DIN 1052 angegebenen Werte.

Tabelle 7.2-1 Verstärkungsfaktoren $k_{V,lin}$ (Linearitätsgrenze) und $k_{V,c,90}$ (Querdruckfestigkeit)

Faktor	Rohdichte-Klasse	4 Schrauben		9 Schrauben	
		Schwelle	Auflager	Schwelle	Auflager
$k_{V,lin}$	400	1,63	1,47	1,59	1,61
	500	1,06	1,45	-	1,62
$k_{V,c,90}$	400	1,40	1,64	1,42	1,87
	500	1,12	1,40	-	1,51

Legt man die Werte für die Rohdichteklasse 400 kg/m^3 zugrunde (fett geschriebene Werte), so ist bei ordnungsgemäßer Ausführung sowohl auf dem Niveau der Linearitätsgrenze als auch auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit ein auf der sicheren Seite liegender pauschaler Verstärkungsfaktor von 1,4 denkbar.

Dieser Faktor von $k_V = 1,4$ ist allerdings auf die Größe der geprüften Auflagerflächen und die Anzahl der geprüften Schrauben beschränkt:

- Bei Schwellenbeanspruchung:
Auflagerfläche $60 \times 140 \text{ mm}$, 4 bis 9 Schrauben 4×55
- Bei Auflagerbeanspruchung:
Auflagerfläche $80 \times 140 \text{ mm}$, 4 bis 9 Schrauben 6×70

7.3 Rechenverfahren

7.3.1 Anzahl der effektiv wirksamen Schrauben

Bei den Vorversuchen konnte mit 6 Schrauben kein höherer Verstärkungseffekt erzielt werden als mit 4 Schrauben. Diese zunächst unverständliche Tendenz bestätigte sich bei den Hauptversuchen mit 4 bzw. 9 Schrauben.

Dies deutet darauf hin, dass bei den geprüften Druckflächen jeweils 4 Schrauben die „optimale“, bzw. effektiv wirksame Anzahl darstellten. In **Tabelle 7.3-1** sind die jeweils zugehörigen Einzugsflächen pro Schraube zusammengestellt.

Tabelle 7.3-1 Einzugsflächen der Schrauben

	Druckfläche [mm ²]	4 Schrauben $d_S \times l_S$	Einzugsfläche [mm ²]
Schwelle	$60 \times 140 = 8400$	4×55	$2100 = 525 \cdot d_S$
Auflager	$80 \times 140 = 11200$	6×70	$2800 = 467 \cdot d_S$

Zur Bestimmung der effektiv wirksamen Anzahl von Schrauben wird folgende Gleichung vorgeschlagen, wobei eine Beschränkung auf höchstens 6 Schrauben vorgenommen wird:

$$n_{\text{ef}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 6 \\ \frac{b \cdot l_A}{450 \cdot d_S} \end{array} \right. \quad (7.1)$$

mit

- n_{ef} = effektiv wirksame Anzahl von Schrauben (ganze Zahl)
- $b \cdot l_A$ = Druckfläche (Breite x Aufstandslänge)
- d_S = Schraubendurchmesser in mm

Die Schrauben müssen dabei einen Abstand von $7 \cdot d_S$ zum Hirnholz einhalten (siehe *Abschnitt 4*).

7.3.2 Berechnung der Traglast

Auf der Grundlage der durchgeführten Bauteilversuche kann die maximale Druckkraft rechtwinklig zur Faserrichtung wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} F_{c,90} &= F_{c,90,H} + k_A \cdot n_{\text{ef}} \cdot F_{D,S} \\ &= f_{c,90} \cdot A + k_A \cdot n_{\text{ef}} \cdot F_{D,S} \end{aligned} \quad (7.2)$$

mit

- $F_{c,90}$ = Traglast rechtwinklig zur Faserrichtung
- $F_{c,90,H}$ = Traglast der unverstärkten Kontaktfläche
= $f_{c,90} \cdot A$
- $f_{c,90}$ = Querdruckfestigkeit des unverstärkten Holzes
- A = $b \cdot l_A$ = Druckfläche
- $F_{D,S}$ = Traglast der Schraube auf Eindrücken **ohne** Mitwirkung des Schraubenkopfes
- n_{ef} = effektiv wirksame Anzahl von Schrauben nach Gl.(7.1)
- k_A = Beiwert zur Berücksichtigung der Lasteinleitung
= 1,0 bei „harter“ Lasteinleitung, z.B. über Stahl oder Beton
= 0,75 bei „weicher“ Lasteinleitung, z.B. über Holz

Es wird nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieses - auf der Grundlage der durchgeführten Versuche hergeleitete - Rechenverfahren nur für die ermittelten Festigkeitswerte gültig ist. Eine Anwendung dieses Verfahrens auf die in E DIN 1052 (Mai 2000) vorgeschlagenen Rechenwerte ist nicht möglich.

Des Weiteren ist eine Aussage über die Gültigkeit des vorgeschlagenen Rechenverfahrens über die hier untersuchten Varianten hinaus nicht möglich. Der Einsatz anderer Verstärkungsmaßnahmen (z.B. Gewindestangen) und anderer Querschnitte kann durchaus zu unterschiedlichen Verstärkungseffekten führen. Diese können jedoch nur über Versuche ermittelt werden.

7.3.3 Überprüfung des Rechenverfahrens

Das Rechenverfahren wird nachfolgend auf der Grundlage der Versuche überprüft. Hierbei werden folgende Werte verwendet:

$F_{c,90}$ mittlere Traglast der verstärkten Proben

$f_{c,90}$ mittlere Querdruckfestigkeit des unverstärkten Holzes mit einer Rohdichte von 400 kg/m³

$F_{D,S}$ mittlere Traglast einer Schraube ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes in Holz mit einer Rohdichte von 400 kg/m³

In *Abschnitt 3.2* wurde die Tragfähigkeit der ausgewählten Schrauben unter Eindrückbeanspruchung ermittelt. Die durchgeführten Versuche beschränkten sich allerdings - wie im Rahmen der Arbeitsgruppe beschlossen - auf das Tragverhalten unter Mitwirkung des Schraubenkopfes. Auf der Grundlage der in *Abschnitt 2.1* durchgeführten Versuche (siehe *Tabelle 2.1-2*) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Tragfähigkeit der Schrauben „ohne Kopf“ um den Faktor 1,3 geringer sind als „mit Kopf“.

Nach *Bild 3.2-3* ergeben sich folgende Traglasten (Mittelwerte) in Holz mit einer Rohdichte von etwa 400 kg/m³:

Schraube 4x55: „mit Kopf“: $F_{D,S} \approx 4,5$ kN → „ohne Kopf“: $F_{D,S} \approx 3,5$ kN

Schraube 6x70: „mit Kopf“: $F_{D,S} \approx 9,0$ kN → „ohne Kopf“: $F_{D,S} \approx 6,9$ kN

Ein Vergleich mit *Tabelle 3.3-2* zeigt, dass die Werte $F_{D,S}$ „ohne Kopf“ in der gleichen Größenordnung liegen wie die mittleren Traglasten $F_{Z,S}$ auf Herausziehen.

In **Tabelle 7.3-2** sind die Ergebnisse des vorgeschlagenen Rechenverfahrens den Versuchsergebnissen vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 7.3-2 Gegenüberstellung der Ergebnisse des Rechenverfahrens mit den Versuchsergebnissen

	Rechenverfahren							Versuche	
	$F_{c,90} = f_{c,90} \cdot A + k_A \cdot n_{ef} \cdot F_{D,S}$							4	9
	ρ [kg/m ³]	$f_{c,90}$ ¹⁾ [N/mm ²]	A [mm ²]	k_A	n_{ef} ²⁾	$F_{D,S}$ [N]	$F_{c,90}$ [N]	Schrauben	Schrauben
Schwelle	400	3,00	8400	0,75	4	3500	35700	$F_{c,90}$ [N]	$F_{c,90}$ [N]
	465							35300	35800
Auflager	400	4,11	11200	1,0	4	6900	73630	38000	-
	500							75500	85900
								78100	84100

¹⁾ $f_{c,90}$: Mittelwert aus Versuchen $\rho = 400$ kg/m³
²⁾ n_{ef} nach Gl. (7.1)

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, dass das Rechenverfahren die in den Versuchen ermittelten Höchstlasten (Mittelwerte) bei allen untersuchten Rohdichteklassen auf der sicheren Seite liegend erfasst.

8 Zusammenfassung

8.1 Zielsetzung, Versuchsplan

Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen war die Ermittlung einer möglichen Erhöhung der Querdruckfestigkeit von Brettschichtholz durch Eindrehen von Holzschrauben ohne Vorbohren.

Im Hinblick auf die Auswahl von geeigneten Schrauben wurde im Rahmen von insgesamt 110 Vorversuchen wurde das Tragverhalten von 11 verschiedenen Schraubentypen unter Eindrückbeanspruchung sowohl mit als auch ohne Mitwirkung des Schraubenkopfes untersucht.

Die Durchführbarkeit der Bauteilversuche wurde ebenfalls im Rahmen von insgesamt 23 Vorversuchen untersucht. Hierbei wurde sowohl das Tragverhalten unter direkter Lasteinleitung (Schwellenbeanspruchung) als auch unter indirekter Lasteinleitung (Auflagerung von Biegeträgern) untersucht. Bei den Versuchen mit Schwellenbeanspruchung kamen würfelförmige Probekörper zum Einsatz.

Auf der Grundlage dieser Vorversuche wurden in Abstimmung mit der begleitenden Arbeitsgruppe die Hauptversuche wie folgt konzipiert und durchgeführt:

- Untersuchung des Tragverhaltens unter Schwellenbeanspruchung mit Vollholz (b/h = 140/60 mm), da der Haupt-Anwendungsbereich für diesen Fall im Wohnungsbau gesehen wurde. Die belastete Druckfläche betrug 60x140 mm², wobei - abweichend von den Vorversuchen - ein einseitiger Überstand von 200 mm ausgeführt wurde. Insgesamt wurden 76 Schwellenversuche mit ordnungsgemäßer Ausführung durchgeführt.
- Der Einfluss einer nicht ordnungsgemäßen Ausführung (z.B. versenkte oder überstehende Schraubenköpfe) wurde bei den Schwellenversuchen mit insgesamt 33 Versuchen abgeschätzt.
- Untersuchung des Tragverhaltens von Auflagerungen von Biegeträgern (indirekte Lasteinleitung) mit Brettschichtholz (b/h = 140/240 mm). Die belastete Druckfläche betrug 80x140 mm². In dieser Versuchsreihe wurden insgesamt 76 Versuche durchgeführt.
- Verwendung von Schrauben 4x55 mm für die Schwellenversuche und 6x70 mm für die Auflagerversuche mit verstärkten Druckflächen. Hierbei kamen jeweils 2 Schraubentypen von zwei namhaften Schraubenherstellern zum Einsatz. Die ausgewählten Schrauben sind alle im Besitz einer allg. bauaufsichtlichen Zulassung.
- Zur Verstärkung wurden jeweils 4 bzw. 9 Schrauben eingedreht.
- Untersuchung des Tragverhaltens jeweils mit gezielt ausgesuchtem Holz geringer und hoher Rohdichte (400 bzw. 500 kg/m³).

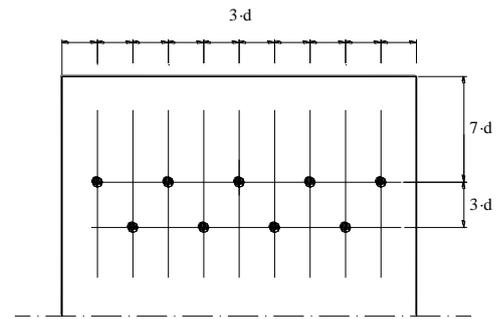
Darüber hinaus wurde das Tragverhalten der ausgewählten Schraubentypen unter Eindrückbeanspruchung unter Mitwirkung des Schraubenkopfes und auf Herausziehen untersucht (insgesamt 60 bzw. 90 Versuche). Dies erfolgte im Hinblick auf die Herleitung eines Bemessungsverfahrens, in dem die Tragfähigkeit der Schrauben explizit eingehen sollte.

Die in den Versuchen ermittelten Festigkeits- und Steifigkeitswerte für Holz unter Querdruckbeanspruchung stehen z.T. in deutlichem Widerspruch zu den in E DIN 1052 (Mai 2000) vorgeschlagenen Rechenwerten bzw. Bemessungsverfahren.

8.2 Mindestabstände

Im Rahmen von Einschraubversuchen wurde untersucht, welche Mindestabstände erforderlich sind, damit keine Risse im Holz auftreten. Diese Einschraubversuche wurden mit Holz hoher Rohdichte (ca. 500 kg/m³) durchgeführt, weil hier die Spaltgefahr höher eingeschätzt wurde. Diese Versuche ergaben folgende erforderlichen Mindestabstände:

- 7·d zum Hirnholz
- 3·d zur seitlichen Holzseite
- 3·d untereinander parallel zur Faser bei versetzter Anordnung
- 3·d (6·d) untereinander rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes.



8.3 Bestimmung des Verstärkungseffektes

Bei den Bauteilversuchen wurden zunächst unverstärkte Probekörper geprüft, die als Basis für die Abschätzung des Verstärkungseffektes herangezogen wurden.

Die Berechnung eines Verstärkungsfaktors erfolgte dabei auf drei verschiedenen Niveaus:

1. Auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung:

Als Basis für die Berechnung des Verstärkungseffektes auf diesem Niveau bildete die Eindrückung, die bei den unverstärkten Proben im Mittel bei Erreichen der zulässigen Spannung nach DIN 1052 auftrat. Unter der Annahme, dass diese Eindrückung auch bei den verstärkten Proben auftreten darf, wurde bei den verstärkten Proben die Last ermittelt, bei der diese „zulässige“ Eindrückung auftrat. Der Verstärkungsfaktor auf diesem Niveau wurde wie folgt berechnet:

$$k_{V,DIN} = \frac{f_{v,uDIN}}{zul \sigma_{DIN}}$$

mit

$f_{v,uDIN}$ = die bei Erreichen der "zulässigen" Eindrückung auftretende Spannung bei den verstärkten Proben

zul σ_{DIN} = zulässige Spannung nach DIN 1052

2. Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze:

Dieser Faktor gibt Auskunft darüber, inwieweit der Bereich linearen Tragverhaltens durch das Einbringen von Schrauben beeinflusst wird.

Bei der Berechnung des Verstärkungseffektes auf diesem Niveau wurden die Spannungen bei Erreichen der Grenze linearen Tragverhaltens ins Verhältnis gesetzt:

$$k_{V,lin} = \frac{f_{v,lin}}{f_{uv,lin}}$$

mit

$f_{v,lin}$ = Spannung bei Erreichen der Linearitätsgrenze der verstärkten Proben

$f_{uv,lin}$ = zugehöriger Mittelwert der Spannung der unverstärkten Proben.

3. Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit:

Dieser Faktor gibt Auskunft darüber, inwieweit Querdruckfestigkeit durch das Einbringen von Schrauben beeinflusst wird.

Bei der Berechnung des Verstärkungseffektes auf diesem Niveau wurden die Querdruckfestigkeiten nach EN 1193 ins Verhältnis gesetzt:

$$k_{V,c,90} = \frac{f_{v,c,90}}{f_{uv,c,90}}$$

mit

$f_{v,c,90}$ = Querdruckfestigkeit der verstärkten Proben

$f_{uv,c,90}$ = Mittelwert der Querdruckfestigkeit der unverstärkten Proben.

8.4 Ergebnisse der Schwellenversuche

In **Tabelle 1** sind die Mittelwerte der berechneten Verstärkungsfaktoren für die Schwellenbeanspruchung bei ordnungsgemäßer Ausführung zusammengefasst.

Tabelle 1 Verstärkungsfaktoren (Mittelwerte) für Schwellenbeanspruchung, ordnungsgemäße Ausführung

Rohdichte		$k_{V,uDIN}$	$k_{V,lin}$	$k_{V,c,90}$
400 kg/m ³	4 Schrauben	1,90	1,63	1,40
	9 Schrauben	1,81	1,59	1,42
500 kg/m ³	4 Schrauben	1,61	1,06	1,12

Folgende Ergebnisse/Tendenzen sind festzustellen:

- Der Verstärkungseffekt mit 4 bzw. 9 Schrauben liegt in der gleichen Größenordnung. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass mit größerer Anzahl von Schrauben die Spaltwirkung auf das Holz zunimmt. Außerdem ist bei zu enger Anordnung der Schrauben eine Überlagerung der Druckkegel der einzelnen Schrauben gegeben, was sich nachteilig auf die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme auswirkt.
- Die Verstärkungsfaktoren auf dem Niveau der „zulässigen“ Eindrückung sind deutlich höher als die beiden anderen Faktoren. Der Verstärkungsfaktor $k_{V,uDIN}$ hängt wesentlich von der absoluten Größe der ermittelten Eindrückungen ab. Aufgrund von nicht auszuschließenden Störeinflüssen bei den Verformungsmessungen sollte dieser Faktor nicht überbewertet werden.
Die beiden anderen Verstärkungsfaktoren sind nicht von der absoluten Größe der gemessenen Eindrückungen abhängig, so dass diese Werte durchaus zur Abschätzung des Verstärkungseffektes herangezogen werden können.
- Der Verstärkungseffekt bei den Proben höherer Rohdichte fällt erwartungsgemäß geringer aus: Holz mit höherer Rohdichte besitzt „von Haus aus“ eine höhere Steifigkeit, so dass die Verstärkung mit Schrauben weniger effektiv ausfällt. Da man sich aber bei der Festlegung von Rechenwerten für die Materialeigenschaften eher an Holz geringer Rohdichte orientiert erscheint es gerechtfertigt, die Verstärkungsfaktoren der Proben mit $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ heranzuziehen.
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze beträgt der Verstärkungsfaktor 1,6, was bedeutet, dass der Bereich linearen Tragverhaltens um etwa 60% verlängert wird.
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeit liegt der Verstärkungsfaktor etwa bei 1,4.

8.5 Ergebnisse der Auflagerversuche

In **Tabelle 2** sind die Mittelwerte der berechneten Verstärkungsfaktoren für die Auflagerbeanspruchung zusammengefasst.

Tabelle 2 Verstärkungsfaktoren (Mittelwerte) für Auflagerbeanspruchung

Rohdichte		$k_{V,uDIN}$	$k_{V,lin}$	$k_{V,c,90}$
400 kg/m ³	4 Schrauben	1,26	1,47	1,64
	9 Schrauben	1,64	1,61	1,87
500 kg/m ³	4 Schrauben	1,21	1,45	1,40
	9 Schrauben	0,97	1,62	1,51

Aus dieser Tabelle ist folgendes zu erkennen:

- Die Ergebnisse bzgl. des Faktors $k_{V,uDIN}$ sind erneut widersprüchlich, so dass diese Werte auch hier nicht weiter für die Abschätzung des Verstärkungseffektes benutzt werden.
- Der Verstärkungseffekt bei Holz höherer Rohdichte ist auf dem Niveau der Linearitätsgrenze gleich groß, und auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten geringer als bei Holz geringerer Rohdichte. Wie bei den Schwellen erscheint es aber auch hier gerechtfertigt, sich am Holz mit der geringeren Rohdichte zu orientieren.
- Im Gegensatz zu den Schwellenversuchen ist hier eine Zunahme des Verstärkungseffektes bei 9 Schrauben im Vergleich zu 4 Schrauben festzustellen. Diese Erhöhung steht aber in keinem Verhältnis zu der Anzahl der verwendeten Schrauben.
- Auf dem Niveau der Linearitätsgrenze kann bei 4 Schrauben ein Verstärkungsfaktor von mindestens 1,4 angesetzt werden.
- Auf dem Niveau der Querdruckfestigkeiten könnte bei 4 Schrauben ein Verstärkungsfaktor von etwa 1,6 zugrundegelegt werden.

8.6 Rechenverfahren

Ziel dieses Vorhabens war es, ein Rechenverfahren zu entwickeln, mit dem der Verstärkungseffekt bei der Bemessung berücksichtigt werden kann.

Auf der Grundlage der Bauteilversuche wurde ein Rechenverfahren hergeleitet, nach dem sich die Traglast rechtwinklig zur Faserrichtung aus folgender Gleichung ergibt:

$$\text{Gesamt-Traglast} = \text{Traglast Holz} + \text{Traglast effektiv wirksamer Schrauben}$$

Die Anzahl der effektiv wirksamen Schrauben richtet sich dabei nach der Mindest-Einzugsfläche einer Schraube, die erforderlich ist, damit eine Schraube ihre volle Verstärkungswirkung entfalten kann.

Weiterhin ist die Art der Lasteinleitung zu berücksichtigen. So ist z.B. mit einer „harten“ Auflagerung auf einer Stahlplatte ein höherer Verstärkungseffekt zu erzielen als mit einer „weichen“ Lasteinleitung über einen Holzpfosten.

Das hier vorgestellte Rechenverfahren basiert ausschließlich auf den Versuchswerten und ist wegen der festgestellten Widersprüche nicht auf das Bemessungskonzept des derzeitigen Entwurfes zur DIN 1052 anwendbar.