

Ausziehkenngößen für Holzschrauben in Eschen-Brettschichtholz

Masterarbeit von

Mathias Rasser

Eingereicht am

Institut für Holzbau und Holztechnologie



Fakultät für Bauingenieurwissenschaften
Technische Universität Graz

Begutachter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Betreuer

Dipl.-Ing. Ulrich Hübner

Graz, 13. April 2010

Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Graz, 13. April 2010

Mathias Rasser

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Personen, die mir beim Erstellen meiner Masterarbeit geholfen haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Schickhofer dafür, dass ich die vorliegende Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie durchführen und an einem zur Verfügung gestellten Arbeitsplatz schreiben konnte.

Speziell bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Hübner für seine vorbildliche Unterstützung und wertvollen Ratschläge. Weiters danke ich den Mitarbeitern des Institutes für Holzbau und Holztechnologie und der holz.bau forschung gmbh für die gute Zusammenarbeit.

Ich danke auch meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Georg und Maria, sowie meiner Freundin Anna und ihren Eltern, Heinz und Franziska, für die Unterstützung während der gesamten Studienzeit.

Ebenso danke ich meinen Freunden, vor allem Herrn Johann Huber und Herrn Manfred Unterweger für ihre Mithilfe.

Ausziehkenngößen für Holzschrauben in Eschen-Brettschichtholz

Kurzfassung

Die Herstellung von Brettschichtholz (BSH) ist in Österreich normativ auf Nadel- und Pappelholz beschränkt. Der Laubholzbestand in den Wäldern Österreichs, Deutschlands und der Schweiz steigt jedoch stark an. Einerseits ist die Nutzung geringer als der Zuwachs, andererseits wird prognostiziert, dass durch die Klimaänderung der Fichtenbestand tendenziell abnehmen und der Laubholzbestand zunehmen wird. Diese Tatsachen führen zur Notwendigkeit, Laubholz vermehrt im konstruktiven Holzbau einzusetzen. Laubhölzer sind zwar teurer als handelsübliche Bauhölzer, aber durch die höheren Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, sowie die edle Ästhetik werden auch neue Einsatzmöglichkeiten eröffnet. Die derzeitigen Bemessungsmodelle für die axiale Tragfähigkeit von Holzschrauben basieren auf Untersuchungen in Nadelholz. Diese Masterarbeit befasst sich mit den Ausziehkenngößen für Holzschrauben und Gewindestangen mit Holzschraubengewinde in Eschen-BSH. Es wurden mehr als 2500 Ausziehprüfungen durchgeführt. Die verwendeten Prüfkörper lagerten im Normalklima bei $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ und $(65 \pm 5) \%$ rel. Luftfeuchte bis zur Massekonstanz. Die Einflüsse des Schraubendurchmessers ($d = 4, 6, 8, 10, 12$ und 20 mm), der Rohdichte ($\rho_{min} = 555 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{mean} = 746 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{max} = 918 \text{ kg/m}^3$), der Einschraubtiefe ($l_{ef} = 4d, 6d, 8d$) und des Einschraubwinkels ($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ$) zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes auf den Ausziehwiderstand wurden ermittelt. Der Unterschied von der im Holz eingebetteten Schraubenspitze im Vergleich zu der durchgeschraubten Schraube wurde ebenso untersucht. Nach einer statistischen Auswertung wurde ein neues Berechnungsmodell zur Bestimmung des charakteristischen Ausziehwiderstandes unter Berücksichtigung der genannten Parameter definiert und mit den Berechnungsmodellen der deutschsprachigen Normen verglichen.

Withdrawal Characteristics of Screws in Glued Laminated Timber made of European Ash

Abstract

In Austria the production of glued laminated timber (GLT) is limited normatively to softwood and poplar. However, the share of hardwoods in Austrian, German and Swiss forests is increasing considerably. This is due to the fact that only a part of the annual increment is harvested. Furthermore, growth predictions show that the share of hardwoods will further increase because of a decrease in softwoods caused by the climate change. Therefore, new ranges of application, e. g. as a construction material, need to be evaluated. Although hardwoods are more expensive, their advantageous characteristics such as stiffness and rigidity as well as their precious aesthetics preponderate and open up the possibility for an application in timber structures. The currently valid calculation models for the withdrawal strength are based on investigations on softwood. This master thesis deals with the withdrawal characteristics of wood screws in GLT made of European ash. More than 2500 pull-out tests were carried out. The specimens were conditioned at (20 ± 1) °C and (65 ± 5) % relative humidity until constant mass was achieved. The influences of screw diameter ($d = 4, 6, 8, 10, 12$ und 20 mm), gross density ($\rho_{min} = 555$ kg/m³, $\rho_{mean} = 746$ kg/m³, $\rho_{max} = 918$ kg/m³), penetration length ($l_{ef} = 4d, 6d, 8d$) and the angle ($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ$) between screw axis and grain direction on the withdrawal resistance were ascertained. The difference between the screw tip embedded within the wood and the screw tip out of the wood was also determined. After a statistic evaluation a new calculation model for the determination of the characteristic withdrawal resistance was defined by taking into consideration the parameters mentioned above and afterwards compared with the design models of the German-speaking standards.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Arbeit	1
2	Laubhölzer im Bauwesen	2
2.1	Allgemeines	2
2.2	Forstwirtschaft	2
2.2.1	Derzeitige Situation	2
2.2.2	Zukünftige Entwicklung	3
2.2.3	Rundholzpreise	4
2.3	Laubholz für tragende Konstruktionen	5
3	Die Esche und ihr Holz	7
3.1	Allgemeines	7
3.2	Makroskopische/mikroskopische Strukturmerkmale	7
3.3	Physikalische Eigenschaften	8
3.3.1	Rohdichte	8
3.3.2	Holzfeuchte	10
3.4	Mechanische Eigenschaften	12
3.4.1	Festigkeiten	14
3.4.2	Elastisches Verhalten	16
3.5	Biologische und chemische Eigenschaften	17
3.6	Sonstige Eigenschaften	18
3.7	Verwendungsmöglichkeiten	18
3.8	Brettschichtholz aus Esche	19
3.8.1	Allgemeines	19
3.8.2	Sortierung der Lamellen	19
3.8.3	Festigkeitsklassen der Lamellen	19
3.8.4	Verklebung	20
3.8.5	Einsatzbereiche	21
4	Holzschrauben und ihr Auszieh Widerstand	22
4.1	Arten von Holzschrauben	22
4.1.1	Genormte Holzschrauben	22
4.1.2	Bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben	22
4.2	Einflussparameter auf die axiale Tragfähigkeit	23
4.3	Zulassungen	24
4.4	Durchgeführte Untersuchungen zur axialen Tragfähigkeit	25
4.4.1	Eckelman (1975): Screwholding performance in hardwoods and particleboard	26
4.4.2	Bröker und Krause (1991): Orientierende Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben	26
4.4.3	Jablonkay (1999): Schrauben unter Ausziehbeanspruchung	26
4.4.4	Bejtka (2005): Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben	27

4.4.5	Blaß u. a. (2006): Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde	28
4.4.6	Taj u. a. (2009): Withdrawal and lateral resistance of wood screw in beech, hornbeam and poplar	28
4.4.7	Pirnbacher und Schickhofer (2009): Base parameters of self-tapping screws	28
4.5	Normative Regelungen zur axialen Tragfähigkeit	29
4.5.1	ÖNORM EN 1995-1-1:2009: Bemessung und Konstruktion von Holzbauteilen	29
4.5.2	DIN 1052:2008: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauteilen	31
4.5.3	SIA 265:2003: Holzbau	33
5	Schraubenausziehprüfungen	37
5.1	Prüfmaterial	37
5.1.1	Verwendete Schrauben	37
5.1.2	Verwendetes Holz	39
5.2	Prüfkonfiguration	41
5.2.1	Prüfkörper - Serien	41
5.2.2	Vorbohrung	42
5.2.3	Sicherung gegen Quersugversagen	43
5.2.4	Prüfvorrichtung	43
5.3	Durchführung der Prüfungen	45
5.3.1	Messeinrichtung	46
5.3.2	Messrate	47
5.3.3	Nachbearbeitung	47
6	Auswertung	50
6.1	Rohdichte	50
6.2	Holzfeuchte	52
6.3	Ausziehkraft	52
6.4	Ausreißerbereinigung	53
6.5	Einschraubtiefe	54
6.5.1	Einfluss der Schraubenspitze	54
6.6	Nichtlineare Regressionsanalyse	56
6.7	Scherfestigkeit	59
6.8	Charakteristischer Auszieh Widerstand	63
6.9	Vergleich eingeschraubte/eingeklebte Gewindestange	68
6.10	Vergleich verschiedener Bemessungsmodelle	69
6.10.1	Charakteristischer Auszieh Widerstand in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel	69
6.10.2	Charakteristischer Auszieh Widerstand in Abhängigkeit von der Rohdichte	70
7	Schlussbetrachtungen	73
7.1	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	73
7.2	Schlussfolgerungen und Ausblick	74

7.3 Zukünftige Forschungsaufgaben	75
Abbildungsverzeichnis	76
Tabellenverzeichnis	78
Literaturverzeichnis	80
A Rohdichten auf 12 % Holzfeuchte korrigiert	85
A.1 Q-Q-Plots der Rohdichte	85
A.2 Histogramme und Werte der Rohdichten	85
B Holzfeuchten	88
B.1 Q-Q-Plots der Holzfeuchte	88
B.2 Histogramme und Werte der Holzfeuchten	88
C Korrigierter Auszieh Widerstand	91
D Streudiagramme zur Ausreißeranalyse	93
E Effektive Einschraubtiefe	101
F Berechneter Auszieh Widerstand	103
G Scherfestigkeit	105
H Korrigierte Scherfestigkeit	107
I Normierte Scherfestigkeit	109
J Charakteristischer Auszieh Widerstand	110
J.1 Prüfungen höher als die charakteristischen Auszieh Widerstände	110
J.2 Werte zum charakteristischen Auszieh Widerstand	110

1 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit war die Ermittlung der Ausziehkenngößen für Holzschrauben in Eschen-Brettschichtholz (Eschen-BSH) unter der Berücksichtigung maßgebender Einflussparameter. Die Einflussparameter waren der Schraubendurchmesser, die Rohdichte, die Einschraubtiefe und der Einschraubwinkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung. Die derzeitigen Bemessungsmodelle für die axiale Tragfähigkeit von Holzschrauben basieren auf Untersuchungen in Nadelholz. Basierend auf den bekannten Modellen wurde eine Grundform für die Berechnung des Ausziehwidestands festgelegt. Mit Hilfe dieser Gleichung wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt, um die Beziehung der oben genannten Parameter zum Ausziehwidestand festzustellen. Als Resultat dieser Analyse wurde ein Berechnungsmodell definiert, mit dem man den charakteristischen Ausziehwidestand von Holzschrauben in Eschen-BSH ermitteln kann.

Es wurden Holzschrauben der Firmen:

- *Schmid Schrauben Hainfeld GmbH (Hainfeld, A),*
- *SPAX International GmbH & Co. KG (Ennepetal, D) und*

Gewindestangen mit Holzschraubengewinde der Firma:

- *SFS intec AG (Heerbrugg, CH)*

auf Herausziehen geprüft.

Des Weiteren wurde der Einfluss der Schraubenspitze, d.h. der Unterschied des Ausziehwidestandes von Schrauben mit eingebettetem Regelgewinde zu Schrauben mit Regelgewinde inner- und Schraubenspitze außerhalb des Holzes, untersucht.

Die Herstellung von Brettschichtholz (BSH) für lastabtragende Bauteile ist derzeit auf Nadelholz und die Pappel beschränkt. In Zukunft soll auch vermehrt Laubholz für die Herstellung von BSH eingesetzt werden. Um den Einsatz von Bauteilen aus Eschen-BSH zu ermöglichen, laufen seit einigen Jahren Forschungsarbeiten an der TU Graz. Es wurden bereits eine Festigkeitssortierung und Untersuchungen zum Schubmodul, der Lochleibungsfestigkeit sowie den Querdruck- und Quertugeigenschaften von Eschen-BSH durchgeführt. Die Durchführung dieser Arbeit erfolgte im Rahmen des *Projektes P1.2.3 hardwood connections* an der *holz.bau forschung gmbh*. Das Ergebnis soll die unverzichtbare und solide Basis für die Modifizierung bzw. Erweiterung der derzeit gültigen Normen hinsichtlich des Einsatzes von Holzschrauben im Laubholz und deren Europäisch Technischen Zulassungen sein. In folgenden Projekten ist die Erweiterung des Berechnungsmodells auf die Holzarten Buche, Zitter-Pappel und Robinie sowie die Untersuchung des Einflusses der Holzfeuchte geplant.

2 Laubhölzer im Bauwesen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Verwendung von Laubhölzern im Bauwesen. Es werden die wichtigsten einheimischen Laubhölzer und die Sortierung der Schnitthölzer beschrieben. Weiters wird die forstwirtschaftliche Situation und Entwicklung im deutschsprachigen Raum betrachtet. Die aktuellen Rundholzpreise werden erläutert und mit Fichten- bzw. Tannenholz verglichen. Schließlich wird der Einsatz von Laubholz in tragenden Konstruktionen verdeutlicht.

2.1 Allgemeines

Die wichtigsten einheimischen Laubhölzer, die im Bauwesen verwendet werden dürfen, sind Buchen (*Fagus sylvatica* L.), Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* LIEBL. und *Quercus robur* L.), Eschen (*Fraxinus excelsior* L.) und Schwarz-Pappeln (*Populus nigra* L.). Falls die Sortierung der Schnitthölzer von Buchen, Eichen und Eschen der ON DIN 4074-5:2009 entspricht, dürfen diese im Bauwesen als Vollholz eingesetzt werden. Es werden drei Laubholz-Sortierklassen (LS) unterschieden:

- Schnittholz der Klasse LS 7,
- Schnittholz der Klasse LS 10 und
- Schnittholz der Klasse LS 13.

Diese Sortierklassen werden nach ON EN 1912:2009 bestimmten Festigkeitsklassen zugeordnet. Buche und Esche entsprechen der Festigkeitsklasse D40, falls die Buche der Sortierklasse LS 13 bzw. die Esche der Sortierklasse LS 10 und höher zugeordnet werden kann. Eichenholz der Sortierklasse LS 10 erfüllt die Anforderung der Festigkeitsklasse D30. Pappelholz wird den Festigkeitsklassen des Nadelholzes zugeordnet. Die Sortierklassen LS 13 bzw. LS 10 und höher entsprechen den Festigkeitsklassen C27 bzw. C22. Die Werte für die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sowie für die Rohdichte der einzelnen Festigkeitsklassen sind in ON EN 338:2009 angegeben.

Für die Herstellung von BSH werden in den meisten europäischen Ländern die Fichte (*Picea abies* KARST), die Weißtanne (*Abies alba* MILL.), die Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* FRANCO) verwendet. Neben einigen, weiteren Nadelhölzern sind die Silber-Pappel (*Populus alba* L.) und die Bastard-Pappel 'Robusta' (*Populus x robusta* C.K.SCHNEID.) die einzigen Laubhölzer, die nach ON EN 14080:2005 einsetzbar sind.

Aufgrund der forstwirtschaftlichen Situation kommt der Verwendung von Laubholz für lastabtragende Bauteile im Bauwesen immer mehr Bedeutung zu. Des Weiteren sprechen die sehr guten mechanischen Eigenschaften für die Nutzung von einheimischen Laubhölzern vor allem zur Herstellung von BSH.

2.2 Forstwirtschaft

2.2.1 Derzeitige Situation

Nach den Ergebnissen der Österreichischen Waldinventur 2000–2002 beträgt der Gesamtvorrat in 1000 Vfm der Baumarten im Ertragswald 1 094 730 ($\pm 17 373$). Der Anteil von

Laubhölzern liegt bei 19 %. Die stärksten Vertreter sind die Buche mit 10 % (Rotbuche 9,3 % und Hainbuche 0,7 %), die Eiche mit 2,4 % und die Esche mit 1,8 %. Im Vergleich dazu beträgt der Anteil der Fichte 61,5 %, der Tanne 4,4 %, der Lärche 6,7 % und der Weißkiefer 7 %. Der Gesamtvorrat an Laubhölzern ist in den Jahren 1986 bis 2002 um 26 % gestiegen. Die größte Steigerung verzeichnete dabei die Esche mit 65 %. Bei der Buche stieg der Vorrat um 19 % und bei der Eiche um 22 %.

Der jährliche Zuwachs ist von 1986 bis 2002 bei Eiche und Esche gestiegen, bei der Buche blieb er annähernd gleich. Die Nutzung dieser drei Baumarten ging aber deutlich zurück. (siehe Abb. 1)

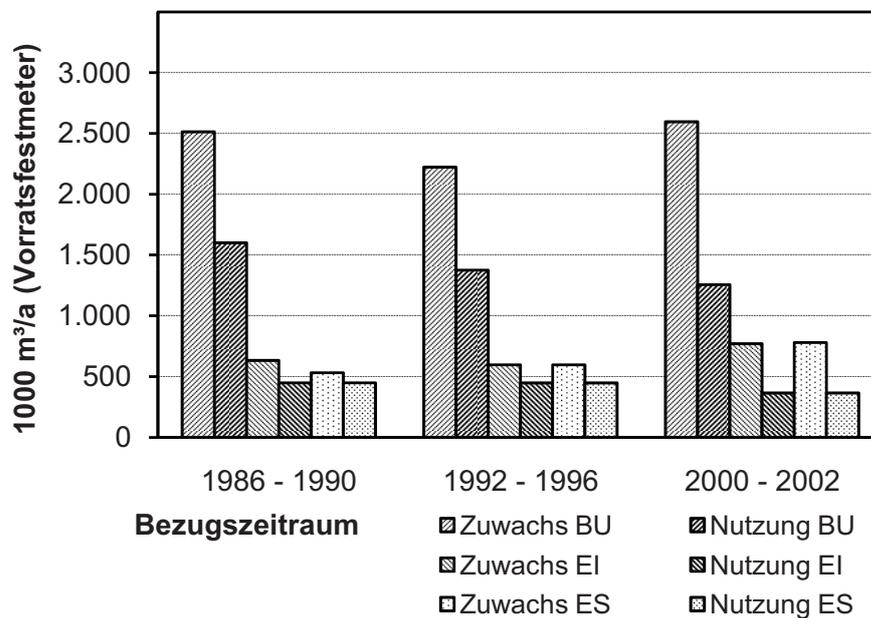


Abbildung 1: Zuwachs und Nutzung von Buche, Eiche und Esche (Hübner, 2009)

Auch in Westdeutschland ist der Anteil an Laubbäumen von 1987 bis 2002 laut der zweiten Bundeswaldinventur (BWI2) gestiegen. In der Schweiz zeichnet sich ein ähnliches Bild ab, es ist in allen Regionen der Laubholzvorrat angewachsen. Das Laubholz nimmt also im deutschsprachigen Raum zu und wird bei gleichbleibender Nutzung überaltern, d. h. die Stammqualität wird durch Holzschädlinge und z. B. Rotkern bei der Buche abgemindert.

2.2.2 Zukünftige Entwicklung

Die Entwicklung des Waldes ist stark vom Klima abhängig. Laut einer Studie von Niedermair u. a. (2007) wird der prognostizierte Klimawandel Österreichs Wälder massiv verändern. Die Bedingungen für die Fichte in niedrigen bis mittleren Seehöhen werden sich durch das zu Grunde liegende Klimaszenario A1B¹ der UNO verschlechtern. Im sommerwarmen Osten (Niederösterreich), im subillyrischen Hügelland (Steiermark, Südburgenland) sowie

¹Im A1B Szenario werden für Österreich Temperaturerhöhungen von ca. 2° bis 2050 und von rund 5° bis 2100 erwartet.

im Donauroaum wird der Bestand an Fichten durch die steigende Stressbelastung zurückgehen. Auch das Mühl- und Waldviertel sind betroffen. Eine nachhaltige, geregelte Bewirtschaftung von Fichtenwäldern wird in diesen Gebieten weitgehend unmöglich werden.

Die Buche hingegen wird sich durch die Klimaänderung flächenmäßig ausbreiten können. Vor allem in den Gebirgslagen des gesamten Ostalpenraums ist es möglich, dass die Fichte von der Buche verdrängt wird.

2.2.3 Rundholzpreise

In der Steiermark findet seit zehn Jahren eine Wertholzsubmission, organisiert von der *Waldverband Steiermark GmbH*, in Großwilfersdorf statt. Am 27. Jänner 2010 wurden 572 fm Rundholz von 22 Baumarten verkauft. Die potenziellen Käufer gaben, nach der Besichtigung des Holzes, ein schriftliches Anbot ab, konnten nicht nachbieten und das höchstbietende Los bekam den Zuschlag. Es wurden Rundholzstämme besonders wertvoller Qualität (Güteklassen Furnier, A nach Wiener Börse AG (2001)) verkauft. Die diesjährigen, erzielten Preise einiger Holzarten sind in Tab. 1 ersichtlich.

Holzarten	Anzahl [Stk.]	Volumen [fm]	Nettopreise in €/fm	
			Durchschnitts- gebot	Höchst- gebot
Laubhölzer				
Esche	15	18	239,0	578,0
Eiche	204	209	289,0	638,0
Hainbuche	1	1	73,0	73,0
Hopfenbuche	4	2	88,0	150,0
Bergahorn	219	157	826,0	9 166,0
Birke	5	3	186,0	321,0
Nadelhölzer				
Fichte	1	2	338,0	338,0
Weißkiefer	1	1	286,0	286,0

Tabelle 1: Rundholzpreise der Wertholzsubmission vom 27. Jänner 2010 in Großwilfersdorf/Steiermark

Der Bergahorn mit dem Höchstgebot von 9 166,0 € war ein Riegelahorn, mit einem besonderen Faserverlauf unter der Rinde. Das Ahornfurnier kommt bei der Herstellung von Musikinstrumenten und edlen Möbeln zum Einsatz (vgl. Zwettler, 2010).

Laut Statistik Austria (2010) betrug der Durchschnittspreis der Jahre 1999 bis 2008 von Fichten- bzw. Tannenblochholz der Güteklasse B, Stärkeklasse 2b (25 cm bis 29 cm Mittendurchmesser) 74,0 €, der Höchstpreis lag bei 87,0 € und der Tiefstpreis bei 64,0 € (Nettopreise; Umsatzsteuer 10 % bzw. 12 %). Der aktuelle Preis in der Liste für Februar 2010, veröffentlicht durch die Landwirtschaftskammer Österreich (2010), für Fichten- bzw. Tannenblochholz der oben beschriebenen Klasse liegt in der Steiermark je nach Region zwischen 67,0 € und 78,0 €. Es scheinen in dieser Auflistung keine Laubhölzer für die Steiermark auf. In Tab. 2 sind die Stammholzpreise von den in dieser Preisliste angeführten Laubhölzern aufgelistet. Der Durchschnittspreis für Eschenblochholz der Güteklassen

A und B wird im Bereich von Eichenblochholz liegen, d. h. zwischen 115,0 € und 300,0 € – vielleicht etwas niedriger, da sich die bei der Wertholzsubmission erzielten Preise für Eschenblöcke auch unter denen für Eichenblöcke belaufen (vgl. Tab. 1). Der Mittelwert des Preises für Eichenblochholz der Güteklasse B beträgt im Burgenland 120,0 €. Die Eigenschaften von Eschen- und Eichenholz sind ähnlich, in Kapitel 3 sind die wesentlichen Merkmale in mehreren Tabellen gegenübergestellt.

Holzarten		Burgenland		Niederösterreich		Salzburg	
		Nettopreis in €/fm		Nettopreis in €/fm		Nettopreis in €/fm	
		von	bis	von	bis	von	bis
Eiche	A	205,0	250,0				
	B	115,0	125,0	130,0	300,0	-	-
	C	-	-	60,0	100,0	-	-
Pappel	A	-	-	56,0	60,0	-	-
	B	-	-	30,0	32,0	-	-
	C	-	-	-	-	-	-
Buche	A	90,0	110,0			100,0	120,0
	B	65,0	75,0	55,0	60,0	60,0	80,0
	C	-	-	45,0	50,0	-	-

Tabelle 2: Stammholzpreise einiger Laubhölzer

2.3 Laubholz für tragende Konstruktionen

Die Entwicklung zu größeren Laubholzbeständen, einerseits durch den ungenutzten Zuwachs, andererseits durch die Klimaänderung, bietet die Gelegenheit das Laubholz im konstruktiven Ingenieurholzbau vermehrt einzusetzen.

Rund 8 % des Stammholzes entsprechen den Güteklassen A und F und ca. zwei Drittel können in die Güteklassen B und C eingestuft werden. Durch eine maschinelle Festigkeitssortierung kann man aus den überwiegend mittleren Qualitäten B und C hochwertige Lamellen für Brettschichtholz gewinnen. Für hoch beanspruchte BSH-Konstruktionen können Laubhölzer wie Buche, Esche und Robinie eingesetzt werden. Vor allem weisen diese Hölzer ausgezeichnete Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auf, die die Querschnitte gegenüber BSH aus Nadelhölzern deutlich reduzieren. In der Nutzungsklasse 1 (allseitig geschlossene und beheizte Konstruktionen; 20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) und Nutzungsklasse 2 (offene, überdachte Konstruktionen; 20 °C, 85 % rel. Luftfeuchte) besteht die Möglichkeit zur Anwendung. In Nutzungsklasse 3 (frei bewitterte Bauwerke) entstehen durch das Quellen und Schwinden der Holzquerschnitte zu große Spannungen in den Klebefugen und die Dauerhaftigkeit ist nicht gewährleistet (Hübner, 2009).

Seit einigen Jahren laufen Forschungsprojekte rund um das Thema Laubholz, um es möglichst bald auch in Deutschland und Österreich als lastabtragende Konstruktion im Bauwesen einsetzen zu können. Ein erster Schritt in diese Richtung wurde bereits gemacht.

Anfang Oktober 2009 wurde die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-679 für „BS-Holz aus Buche und BS-Holz Hybridträger“ durch das Deutsche Institut für Bautechnik in Berlin erteilt. Buchen-BSH besteht nach dieser Zulassung aus mindestens drei flachseitig miteinander verklebten Vollholz-Lamellen. Die Hybridträger bestehen beidseitig

aus mindestens zwei Decklagen aus Buche und Kernlamellen aus Nadelholz. Der Anwendungsbereich umfasst alle Holzbauteile, für die die Verwendung von Vollholz oder Brettschichtholz in DIN 1052:2008 erlaubt ist. Der Einbau ist auf die Nutzungsklasse 1, d. h. beheizte Innenräume mit 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte², beschränkt.

In Deutschland wird zurzeit die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Freising erweitert, dabei werden 81 m³ Buchen-BSH verbaut. Das Bauprojekt wird wissenschaftlich von der TU München begleitet (Schmidt, 2009).

In der Schweiz darf BSH aus Laubhölzern für die Herstellung von lastabtragenden Konstruktionen verwendet werden. Es gibt bereits Projekte mit Brettschichtholz-Konstruktionen aus Buche, Eiche, Esche und Robinie. Ein Beispiel ist die Produktionshalle der *Schreinerei Anton Schnidrig (Visp, CH)*, die im Jahr 2001 von der Firma *Neue Holzbau AG (Lungern, CH)* gebaut wurde. In Abb. 2 sind der Fachwerkträger, gefertigt aus Eschen-BSH, und die Querträger, welche aus Buchen-Fichten-Hybridträger hergestellt wurden, ersichtlich.



Abbildung 2: Produktionshalle der Schreinerei Anton Schnidrig (Visp, CH)

²Es stellen sich Ausgleichsfeuchten zwischen 5 % und 15 % ein, wobei in den meisten Fällen eine mittlere Ausgleichsfeuchte von 12 % nicht überschritten wird.

3 Die Esche und ihr Holz

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von Eschenholz dargelegt, um die Potenziale dieses hochwertigen Holzes aufzuzeigen. Es wird beschrieben, welche Rolle das Eschenholz früher spielte und wo es heute eingesetzt wird. Vor allem die Verwendung als Brettschichtholz ist ein Thema der Zukunft und wird deswegen genauer erläutert.

3.1 Allgemeines

Die Eschen (*Fraxinus* L.) gehören zu der Familie der Ölbaumgewächse. Es gibt etwa 65 verschiedene Arten, wobei drei in Europa heimisch sind. Diese drei sind die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior* L.), die Blumen- oder Mannaesche (*Fraxinus ornus* L.) und die Schmalblättrige Esche (*Fraxinus angustifolia* VAHL) (Aas, 2002).

Das Holz, das für die Prüfkörper verwendet wurde, stammt von der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior* L.). Alle folgenden Beschreibungen beziehen sich daher auf diese Eschenart. Die Esche zählt man aufgrund ihrer hohen Holzqualität zu den Edellaubhölzern. Sie erreicht eine Höhe von 17 m bis 35 m und einen Stammmittendurchmesser von 0,4 m bis 1,0 m. Die Stammlänge beträgt 8 m bis 12 m, wobei die Form meist gerade und zylindrisch ist (Wagenführ, 2007). Verbiss von jungen Bäumen führt nach Hacker (2002) oft zu Formfehlern wie Zwieselwuchs. Oliver-Villanueva (1993) hat Eschenbäume an unterschiedlichen Standorten untersucht und dabei ein Kronenprozent³ zwischen 45,4 % und 54,0 % festgestellt. Der „grünastfreie“ Stamm misst demnach 46,0 % bis 54,6 % der Baumhöhe, d. h. bei 30 m Baumhöhe zwischen 13,8 m und 16,4 m.

Das Verbreitungsgebiet erstreckt sich im Norden von Schottland bis Südsandinavien und im Süden über die Balkanhalbinsel, Italien und Nordspanien. Die östliche Verbreitung reicht bis zur Wolga, zur Krim und auf den Kaukasus. (siehe Abb. 3)

Um die maximale Wuchshöhe zu erreichen, braucht die Esche mineralische, tiefgründige Böden (Täler und Flussniederungen). Hinsichtlich des Wasserhaushalts ist eine große Flexibilität vorhanden. Die Baumart ist sowohl auf nassen, als auch auf sehr trockenen Böden anzutreffen. Wichtig sind spätfrostfreie Lagen (Aas, 2002).

Nach Grosser (2002) gehört die Esche zu den Kernholzstämmen, mit fakultativer Farbkernholzbildung. Das Splintholz hat eine helle, weißliche bis gelbliche Farbe mit einem nicht immer vorhandenen schwachen ins Rötliche gehenden Ton. Der Farbunterschied von Kern- und Splintholz ist weniger deutlich als bei Eiche, aber gut erkennbar. Die mechanischen Eigenschaften von Kern- und Splintholz unterscheiden sich aber nicht. In einem Alter von 60 bis 80 Jahren ist es möglich, dass ein hellbrauner Kern gebildet wird. Dieser Braunkern ist oft unregelmäßig streifig, fleckig oder wolzig gezeichnet und wird als Farbfehler angesehen. Eine Ausnahme stellt der Kern der Oliveschen dar. Hier gleicht die Farbe und Struktur des Kerns dem Holz des Olivenbaums und gilt daher als besonders wertvoll.

3.2 Makroskopische/mikroskopische Strukturmerkmale

Das Holz der Eschen ist ringporig und zeigt schmale Holzstrahlen. Die groben Gefäße im Frühholz sind mehrreihig zu einem Porenkreis angeordnet, welcher deutlich vom Spätholz abgesetzt ist (siehe Abb. 4b). Dementsprechend deutlich sieht man die Jahrringgrenzen.

³Das Kronenprozent ist das Verhältnis zwischen Kronenhöhe und Gesamthöhe eines Baumes.



Abbildung 3: Verbreitungsgebiet der Esche (Schuck u. a., 2002)

Die Gefäße im Spätholz sind äußerst fein. Im Querschnitt sind sie dennoch makroskopisch als kleine helle Punkte, mit zerstreuter Anordnung, erkennbar.

Mit zunehmender Jahrringbreite wird der Spätholzanteil höher, wobei die Frühholzbreite annähernd konstant bleibt. Die Tangentialflächen zeigen die Frühholzgefäße als Porenrillen und eine gefladerte Zeichnung. Die Radialflächen sind gestreift (siehe Abb. 4a) und man sieht ebenfalls die Porenrillen im Frühholz (Grosser, 2002). Abb. 4c zeigt eine mikroskopische Aufnahme eines Tangentialschnittes, wo die Holzstrahlen (zweireihig angeordnet) deutlich zu erkennen sind.

3.3 Physikalische Eigenschaften

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit wesentlichen physikalischen Eigenschaften genauer erklärt. Das sind die Rohdichte und die Holzfeuchte.

3.3.1 Rohdichte

Nach DIN 52182:1976 ist die Rohdichte ρ_u der Quotient aus der Masse m_u und dem äußeren Volumen V_u des makroskopischen Holzes (einschließlich des Porenraums und des darin enthaltenen Wassers) bei einem definierten Feuchtegehalt u :

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad [\text{g/cm}^3]$$

Die Darrdichte ρ_0 ist der Quotient aus der Masse m_0 und dem Volumen V_0 des darrtrockenen Holzes ($u = 0\%$):

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [\text{g/cm}^3]$$

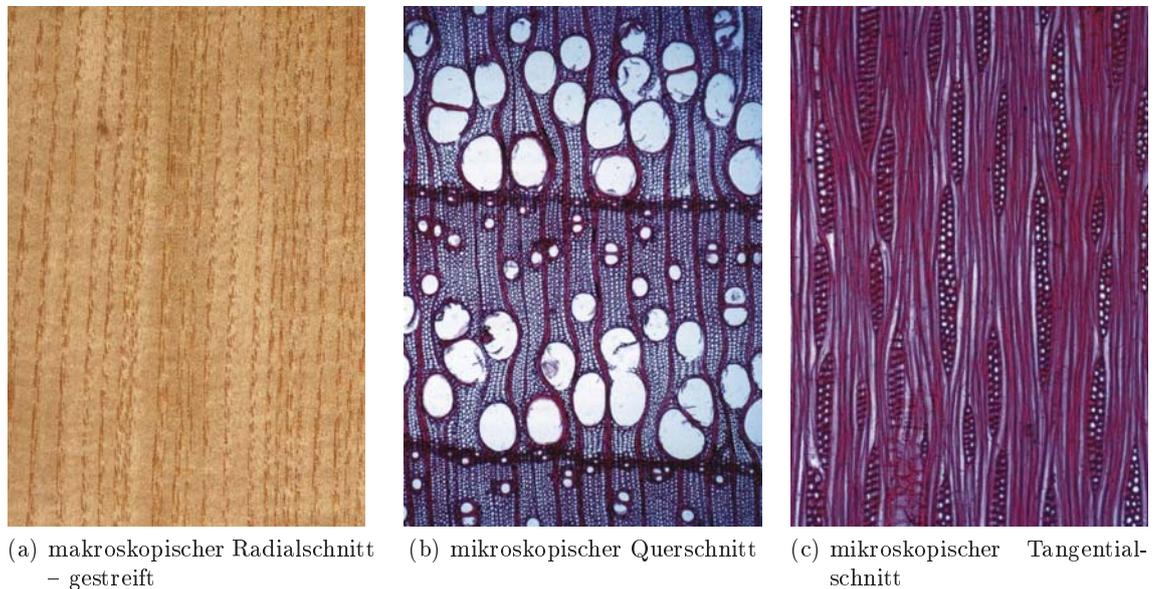


Abbildung 4: Aufnahmen der Esche nach Wagenführ (2007)

Untersuchungen von Kollmann (1941) zufolge beträgt der häufigste Wert der Darrdichte für Eschenholz $\rho_0 = 0,65 \text{ g/cm}^3$, wobei der Wert zwischen $0,41$ und $0,82 \text{ g/cm}^3$ schwanken kann.

Die mechanischen Kenngrößen beziehen sich allgemein aber auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$. Man sollte daher zur besseren Beurteilung die Rohdichte bei üblichen Feuchtigkeitsgehalten (ca. 12 bis 15%), bezogen auf das Darrgewicht, kennen.

Bei Lagerung im Normalklima ($20 \text{ }^\circ\text{C}$, 65% rel. Luftfeuchte) stellt sich eine Holzfeuchte von $u = 10,7 - 14,1\%$ nach Kollmann (1941) ein (siehe Abb. 6). Die Dichte bei diesen Bedingungen wird als Normal-Rohdichte ρ_N bezeichnet:

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \quad [\text{g/cm}^3]$$

Tab. 3 zeigt, dass die Esche mit einer mittleren Rohdichte von $0,72 \text{ g/cm}^3$ bezogen auf eine Holzfeuchte von $u = 12 - 15\%$ im Vergleich zu einigen ausgewählten, einheimischen Nutzhölzern ein schweres Holz liefert. Nur die Buche hat die gleiche Normal-Rohdichte wie die Esche.

Das Frühholz, das zur Wasserleitung dient, besitzt eine wesentlich geringere Dichte als das Spätholz (Festigungsgewebe). Nach Kollmann (1941) beträgt der Mittelwert der Rohdichte von Eschenfrühholz $0,569 \text{ g/cm}^3$ und von Eschenspätholz $0,753 \text{ g/cm}^3$. Das Verhältnis der Spätholz- zur Frühholzdichte ist somit im Mittel 1,32.

Die Rohdichte des Eschenholzes steigt nach den Untersuchungen von Kollmann (1941) also tendenziell mit zunehmender Jahrringbreite (vgl. Abschnitt 3.2). Dieser Zusammenhang ist für alle ringporigen Laubhölzer gültig.

„Breitringiges Holz liefern die auf feuchten Auewäldböden oder an Bach- und Flussufern schnell gewachsenen 'Wassereschen', während für die 'Kalkeschen'

Holzarten	Rohdichte ρ_N [g/cm ³]	
	Mittelwert	Grenzwerte
Laubhölzer		
Esche	0,72	0,45-0,86
Eiche	0,69	0,43-0,96
Buche	0,72	0,54-0,91
Bergahorn	0,63	0,53-0,79
Birke	0,65	0,51-0,83
Nadelhölzer		
Fichte	0,47	0,33-0,68
Kiefer	0,51	0,33-0,89

Tabelle 3: Rohdichte der Esche im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern (Wagenführ, 2007)

auf trockenen, flachgründigen Kalkstandorten schmale Jahrringe charakteristisch sind. Ihr Holz erweist sich allgemein auch als kurzfasriger und spröder.“ (Grosser, 2002)

Neben der Jahrringbreite bzw. dem Spätholzanteil hat auch die Lage im Stamm einen großen Einfluss auf die Rohdichte. Kollmann (1941) fand heraus (siehe Abb. 5), dass das schwerste Holz in der Krone gebildet wird. Es wird aber auch im Erdstamm massereiches Holz erzeugt. In 2 bis 4 m Höhe über dem Boden ist regelmäßig sehr leichtes Holz um das Mark herum vorhanden. Mit zunehmendem Alter produziert die Esche leichteres Holz. Diese Bereiche wechseln sich aber immer wieder mit schwerem Holz ab.

3.3.2 Holzfeuchte

Der prozentuale Holzfeuchtegehalt u ist der Quotient aus der Masse des in der Holzprobe enthaltenen Wassers $m_u - m_0$ und der Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Holzprobe m_0 :

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Die Bestimmung des Feuchtegehalts durch das Darrverfahren ist in der ON EN 13183-1:2004 geregelt.

Beinahe alle physikalischen, mechanischen und technologischen Eigenschaften des Holzes werden durch die Holzfeuchte unterhalb des Fasersättigungspunktes beeinflusst. Diese hängt wiederum von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur ab. Durch die richtige Lagerung (Klimatisierung) kann man die Holzfeuchte gezielt steuern.

„Die hygroskopischen Eigenschaften von Eschenholz gehorchen dem allgemeinen Gesetz, das ein Gleichgewicht zwischen Holzfeuchtigkeit, relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur vorschreibt“ (Kollmann, 1941).

Abb. 6 zeigt den Zusammenhang der Holzfeuchte und der relativen Luftfeuchtigkeit bei 20 °C. Man sieht, dass es einen Unterschied macht, ob das Holz vor der Klimatisierung in

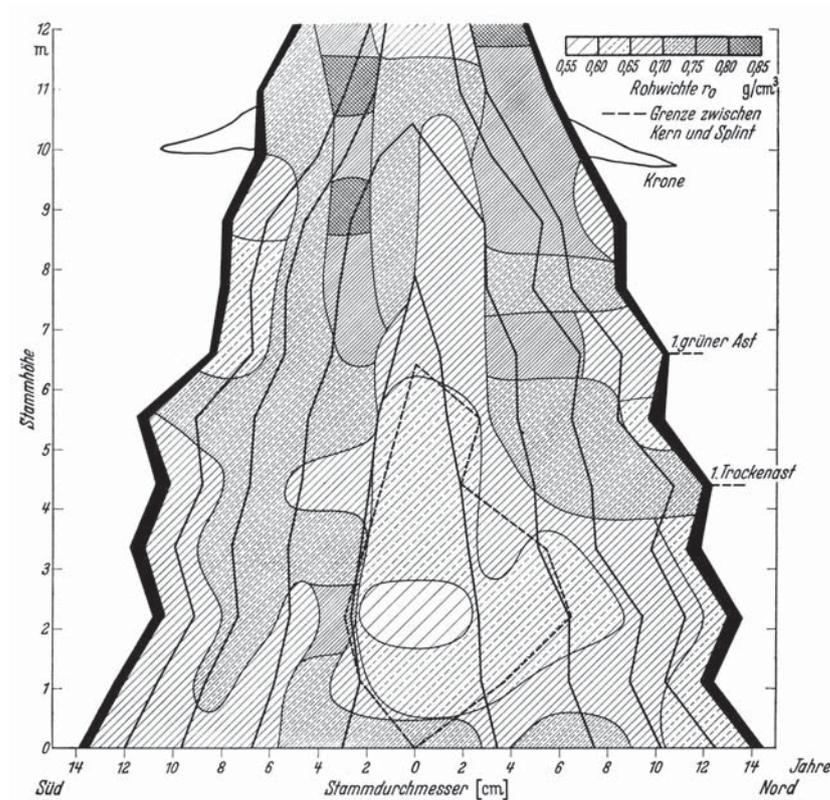


Abbildung 5: Stammwuchsbild einer Esche (Kollmann, 1941)

einem trockenerem oder feuchterem Klima lagerte⁴. Zum Beispiel wird bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % bei Adsorption eine Holzfeuchte von 10,7 % und bei Desorption eine Holzfeuchte von 14,1 % erreicht (Kollmann, 1941).

Die Fasersättigungsfeuchtigkeit (Fasersättigungspunkt) bezeichnet den Feuchtezustand des Holzes, bei dem die Feuchtigkeit nur als *gebundenes Wasser* in den Zellwänden eingelagert ist. Steigt die Holzfeuchte über den Fasersättigungspunkt, kann das Holz die Feuchtigkeit nur noch in Form von *freiem Wasser* in den Zellhohlräumen aufnehmen (Trendelenburg, 1939).

„Die meisten *Festigkeitseigenschaften* sind oberhalb dieses kritischen Feuchtekeitswertes unabhängig von der Feuchtigkeit, während sie unterhalb eine starke und stetige Abhängigkeit davon aufweisen [...]“ (Kollmann, 1951).

Nach Trendelenburg (1939) ist die Fasersättigungsfeuchtigkeit bei ringporigen Hölzern wie z. B. Esche, Eiche, Robinie mit 23 % bis 25 % sehr niedrig. Am höchsten ist sie bei zerstreutporigen Laubhölzern (Linde, Weide, Pappel etc.) mit 32 % bis 35 %. Bei Nadelhölzern ohne ausgeprägten Farbkern wie Fichte und Tanne liegt der Fasersättigungspunkt bei 30 % bis 34 %, bei Kiefer und Lärche (ausgeprägter Farbkern) bei 26 % bis 28 %.

⁴Dieser Unterschied zwischen dem hygroskopischen Gleichgewicht bei Adsorption und Desorption wird als Hysterese bezeichnet.

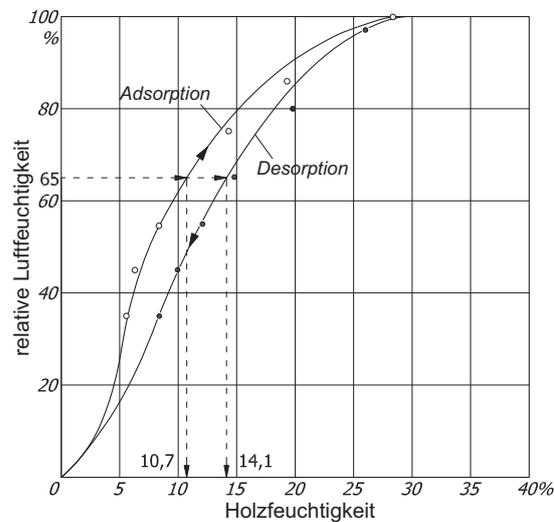


Abbildung 6: Hygroskopisches Gleichgewicht bei 20 °C nach Kollmann (1941)

„Eng verknüpft ist mit der Höhe des Fasersättigungspunktes, d. h. mit der größtmöglichen Menge an gebundenem Wasser, das Schwind- bzw. Quellmaß“ (Kollmann, 1941).

Das auf das Darrvolumen bezogene Quellmaß β_v hängt folgendermaßen mit dem auf der Grundlage des Frischvolumens berechneten Schwindmaß α_v zusammen:

$$\beta_v = \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \text{ bzw. } \alpha_v = \frac{\beta_v}{1 + \beta_v}$$

Im Durchschnitt rechnet Kollmann (1941) mit einer räumlichen Quellung von $\beta_v = 24 \cdot \rho_0$ und kommt so auf einen Mittelwert von $\beta_v = 15,6\%$, wobei der Wert zwischen $9,8\%$ und $19,4\%$ schwanken kann. Es ergibt sich somit für das Schwindmaß ein Mittelwert von $\alpha_v = 13,5\%$ und ein Schwankungsbereich von $8,9\%$ bis $16,2\%$. Nach Wagenführ (2007) beträgt das Volumenschwindmaß $\alpha_v = 12,8\%$ bis $\alpha_v = 13,6\%$.

Grosser (2002) beschreibt die Esche als mäßig schwindend. In Tab. 4 ist zu erkennen, dass von den Harthölzern nur Eiche und Ahorn ein günstigeres räumliches Schwindmaß α_v als die Esche haben. Vergleicht man die differentiellen Schwind- und Quellmaße in tangentialer Richtung zwischen Esche und Fichte ergeben sich geringere Differenzen als zwischen Buche und Fichte.

Nach Wagenführ (2007) beträgt das Schwindmaß in Längsrichtung $\alpha_l = 0,2\%$, das radiale Schwindmaß $\alpha_r = 4,6\%$ bis $\alpha_r = 5,0\%$ und das tangentiale Schwindmaß $\alpha_t = 8,0\%$ bis $\alpha_t = 8,4\%$.

„Nach der Trocknung zeigt Esche ein gutes Stehvermögen, 'arbeitet' also nur wenig. Die Trocknung selbst bereitet keine Probleme, da das Holz weder zum Reißen noch zum Verwerfen neigt“ (Grosser, 2002).

3.4 Mechanische Eigenschaften

Da Holz ein natürlicher Baustoff ist, gibt es deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Größenordnungen. Skaleneffekte im Holz treten schon im makroskopischen Bereich

Holzarten	Schwindmaß vom frischen bis zum gedarrten Zustand bezogen auf die Abmessungen im frischen Zustand in %				Differentialles Schwind-/ Quellmaß in % je 1 % Holzfeuchteänderung im Bereich von $u = 5\%$ bis $u = 20\%$		
	α_l	α_r	α_t	α_v	radial	tangential	t/r
Laubhölzer							
Esche	0,2	5,0	8,0	13,2-13,6	0,21	0,38	1,8
Eiche	0,4	4,0-4,6	7,8-10,0	12,6-15,6	0,16	0,36	2,2
Buche	0,3	5,8	11,8	17,5-17,9	0,20	0,41	2,1
Bergahorn	0,4-0,5	3,3-4,4	8,0-8,5	11,2-12,8	0,10-0,20	0,22-0,30	$\approx 1,7$
Birke	0,6	5,3	7,8-8,2	13,7-14,2	0,29	0,41	1,4
Nadelhölzer							
Fichte	0,3	3,6	7,8	11,9-12,0	0,19	0,39	2,1
Kiefer	0,4	4,0	7,7	12,1-12,4	0,19	0,36	1,9

Tabelle 4: Schwindmaße von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern (Grosser, 2002)

zwischen im Bauteilmaßstab vorhandenen Wuchsmerkmalen, wie Äste, Rindeneinschlüsse, Risse oder Dichteunterschiede, und dem von Holzfehlern freien Material (clear wood) auf. Aber auch bei fehlerfreien Kleinproben handelt es sich durch die Jahrringlagen um einen *inhomogenen Werkstoff*. Die mechanischen Eigenschaften von Holz in Bauteilgröße hängen demnach im Wesentlichen von den Wuchsmerkmalen und den daraus resultierenden Streuungen ab.

Holz lässt sich als Faserverbundwerkstoff betrachten, der in den verschiedenen Raumrichtungen (longitudinal, radial, tangential) sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweist, d. h. *anisotrop*⁵ ist.

Die Eigenschaften des Holzes können mit drei rechtwinklig aufeinander stehenden Achsen in der

- Längsrichtung (L),
- radialen Richtung (R) und
- tangentialen Richtung (T)

beschrieben werden, deshalb wird Holz auch als *orthotroper Werkstoff* bezeichnet.

Die Festigkeiten und die elastischen Eigenschaften im Bauteilmaßstab werden hauptsächlich von den folgenden Faktoren bestimmt:

- Wuchsmerkmale (Astigkeit, Schrägfaserigkeit, Reaktionsholz etc.)
- Richtung bzw. Art der Krafteinwirkung
- Winkel zwischen Belastungs- und Faserrichtung
- Rohdichte

⁵Die Anisotropie bezeichnet die Richtungsabhängigkeit mechanischer Eigenschaften.

- Holzfeuchte
- Geschwindigkeit der Lastaufbringung (statisch – dynamisch)
- Dauer der Lasteinwirkung

3.4.1 Festigkeiten

Generell sind die Festigkeiten sowohl bei Nadel- als auch bei Laubhölzern von der vorhandenen Rohdichte abhängig. Mit steigender Rohdichte nehmen die Festigkeiten zu. Das bedeutet für die Esche: Je schneller sie gewachsen ist, desto günstiger sind die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Holzes (vgl. Abschnitt 3.3.1). Dies gilt vor allem für fehlerfreies Holz.

„Jahrringbreiten oberhalb von 1,5 mm stellen [...] ein Kennzeichen für gute Qualitätseigenschaften in bezug auf Festigkeit und Härte dar“ (Grosser, 2002).

In Tab. 5 sind die Mittelwerte der Festigkeiten von einheimischen Nutzhölzern zusammengestellt. Die Werte wurden an fehlerfreien Kleinproben ermittelt und auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ bezogen. Man kann erkennen, dass die Festigkeitseigenschaften der Esche mit den Werten der Eiche vergleichbar sind und diese teilweise sogar übertreffen.

Holzarten	Darrdichte ρ_0 [kg/m ³]	Druck \parallel [N/mm ²]	Druck \perp [N/mm ²]	Zug \parallel [N/mm ²]	Zug \perp [N/mm ²]	Biegung [N/mm ²]	Abscheren [N/mm ²]
Laubhölzer							
Esche	650	52	11	165	7,0	120	12,8
Eiche	650	61	11	90	4,0	88	11
Buche	680	62	9,5	135	7,0	123	8,0
Bergahorn	590	58	-	82	-	112	9,0
Birke	610	51	-	137	-	147	12
Nadelhölzer							
Fichte	430	50	5,8	90	2,7	78	6,7
Kiefer	490	55	7,7	104	3,0	100	10

Tabelle 5: Festigkeitseigenschaften von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern (Kollmann, 1951)

Neben der Rohdichte ist die Holzfeuchte der zweite maßgebende Kennwert, der die Festigkeit erheblich beeinflusst. Dabei nehmen beinahe alle Festigkeitseigenschaften bei steigender Holzfeuchte ab. Der Grund dafür liegt darin, dass aufgenommenes Wasser (im hygroskopischen Bereich⁶) das Gefüge durch Quellen lockert.

Die Zugfestigkeit hingegen steigt beim Eschenholz vom gedarrten Zustand bis zu einer Holzfeuchte von 8 bis 12% an und nimmt erst danach bis zum Fasersättigungspunkt linear ab (Kollmann, 1951).

Einen großen Einfluss auf die Festigkeiten hat der Winkel zwischen Belastungs- und Faserrichtung. Die Festigkeiten fallen anfangs (kleine Winkel) steil ab und laufen danach

⁶Die Holzfeuchte liegt unterhalb der Fasersättigungsfuchte - das Holz enthält nur gebundenes Wasser.

(Winkel bis 90°) relativ flach aus. Hankinson (1921) beschreibt diesen Zusammenhang mit nachfolgender Formel:

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \sin \alpha^k + f_{90} \cdot \cos \alpha^k} \quad (1)$$

Mit:

- α Winkel zwischen Faser- und Belastungsrichtung
- f_{α} Festigkeitswert bei Beanspruchung schräg zur Faserrichtung
- f_0 Festigkeitswert bei Beanspruchung in Faserlängsrichtung
- f_{90} Festigkeitswert bei Beanspruchung normal zur Faserlängsrichtung
- k Koeffizient (i. A. „2“ für Festigkeitswerte)

Da Holz ein viskoelastischer Werkstoff ist, unterliegen die Festigkeiten dem Zeiteinfluss. Bei der Festigkeitsermittlung muss sowohl die Art der Belastung (statisch oder dynamisch) als auch die Dauer der Belastung (Kurz- bzw. Langzeitbelastung) berücksichtigt werden. Die Langzeitfestigkeiten (Dauerstandfestigkeiten) von Holz im Normalklima liegen bei 40 % bis 60 % der statischen Kurzzeitfestigkeiten (Niemz, 1993).

Das Holz der Esche ist bekannt für seine Zähigkeit. In Tab. 6 sind die Mittelwerte der Bruchschlagarbeit⁷ eingetragen. Die Werte wurden an fehlerfreien Kleinproben ermittelt und auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ bezogen. Die Esche wird in Bezug auf die Zähigkeit nur von Buche und Birke übertroffen.

Holzarten	Bruchschlagarbeit ω [kJ/m ²]
Laubhölzer	
Esche	68
Eiche	60
Buche	100
Bergahorn	65
Birke	85
Nadelhölzer	
Fichte	46
Kiefer	40

Tabelle 6: Bruchschlagarbeit von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern (Kollmann, 1951)

Die hervorragende Dauerfestigkeit ist ein weiteres Merkmal von Eschenholz. Mit dem Biegeschwingungsversuch nach Wöhler lässt sich die Dauerfestigkeit ermitteln. In Tab. 7 sind die Mittelwerte der Biegefestigkeit, der Biegeschwingfestigkeit und das Verhältnis dieser beiden Festigkeiten aufgelistet. Die Werte wurden an fehlerfreien Kleinproben ermittelt

⁷Die Bruchschlagarbeit ω ist ein Maß für die Zähigkeit.

und auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ bezogen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wechselfestigkeit⁸ der Esche von keiner der angeführten Holzarten übertroffen wird.

Holzarten	Biegung σ_b [N/mm ²]	Biege- schwingung σ_w [N/mm ²]	Verhältnis- zahl [σ_w/σ_b]
Laubhölzer			
Esche	120	36	0,30
Eiche	88	-	-
Buche	123	-	-
Bergahorn	112	-	-
Birke	147	35	0,24
Nadelhölzer			
Fichte	78	20	0,26
Kiefer	100	23	0,23

Tabelle 7: Dauerfestigkeiten von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern (Kollmann, 1951)

An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, dass der Braunkern die Festigkeitseigenschaften nicht beeinflusst. Braunes Kernholz ist für mechanisch beanspruchte Teile in gleicher Weise verwendbar wie hellfarbiges.

3.4.2 Elastisches Verhalten

Für fehlerfreies Holz ist das Hook'sche Gesetz gültig. Es liegt im Druck- und im Zugbereich ein linearer Zusammenhang zwischen den Spannungen und Dehnungen vor ($E = \sigma/\epsilon$). Nach dem Überschreiten des elastischen Bereichs tritt bei Zugbelastung ein sprödes und bei Druckbelastung ein duktileres Versagen ein.

Kollmann (1941) führte an Kleinproben mit Abmessungen von $b = 20$ mm, $h = 20$ mm und $l = 300$ mm 1 546 Biegeversuche durch. Er stellte dabei fest, dass der häufigste Wert des Elastizitätsmoduls bei $E = 13\,400$ N/mm² liegt und dass die Streubreite von ca. 4 300 N/mm² bis 18 100 N/mm² reicht – bezogen auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$. Werte bis $E = 8\,000$ N/mm² sind sehr selten und auf gewisse Holzfehler, wie z. B. leichte Schrägfaser, zurückzuführen.

Nach Kollmann (1941) beträgt „[...] der E -Modul guten Eschenholzes etwa 150 000 kg/cm² [15 000 N/mm², Anm. d. Verf.]“.

Der Elastizitätsmodul längs zur Faserrichtung (E_L) und der Schubmodul (G_{LT}) der Esche im Vergleich einiger einheimischer Holzarten sind in Tab. 8 zusammengestellt. Die Kenngrößen wurden an fehlerfreien Kleinproben ermittelt und auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ bezogen.

Die elastischen Eigenschaften werden ebenso wie die Festigkeiten von der Rohdichte beeinflusst. Mit steigender Rohdichte nehmen auch die E -Moduln und G -Moduln zu. Einen

⁸Das ist die größte Spannung, die bei ständigem Wechsel zwischen Zug und Druck gleicher Größe beliebig oft ertragen wird.

Holzarten	E-Modul ¹⁾ E_L [N/mm ²]	G-Modul ²⁾ G_{LT} [N/mm ²]
Laubhölzer		
Esche	13 400	910
Eiche	11 700	780
Buche	16 000	1 080
Bergahorn	9 400	1 120
Birke	14 500-16 500	930
Nadelhölzer		
Fichte	11 000	780
Kiefer	12 000	680

Tabelle 8: Elastische Kenngrößen von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern

¹⁾ nach Wagenführ (2007)

²⁾ nach Keylwerth (1951)

weiteren großen Einfluss auf die elastischen Formänderungen hat die Holzfeuchtigkeit. Dabei fällt der E-Modul mit zunehmender Holzfeuchte. Diese Eigenschaft wird beim Dämpfen ausgenützt, denn dadurch lässt sich das Eschenholz hervorragend biegen.

3.5 Biologische und chemische Eigenschaften

Nach Wagenführ (2007) ist die natürliche Dauerhaftigkeit des Eschenholzes, besonders im Freien, gering. Es ist nicht dauerhaft gegen Pilze und daher nicht witterungsfest.

„Die Anfälligkeit gegen Pilze steigt mit zunehmendem Feuchtegehalt des Holzes, insbesondere bei $u \geq 20\%$ “ (Niemz, 1993).

Weiters ist das Holz anfällig für den Gemeinen Nagekäfer (*Anobium punctatum* DE GEER) sowie anfällig für Termiten. Die natürliche Dauerhaftigkeit und die Tränkbarkeit der Esche nach ON EN 350-2:1994 sind in Tab. 9 dargestellt.

Natürliche Dauerhaftigkeit	Pilze	5	nicht dauerhaft gegen Pilze
	Anobium	S	anfällig für Gemeinen Nagekäfer
	Termiten	S	anfällig für Termiten
Tränkbarkeit	Kernholz	2	mäßig tränkbar
	Splintholz	2	mäßig tränkbar
Splintholzbreite		(x)	im allgemeinen kein deutlicher Unterschied zwischen Kernholz und Splintholz

Tabelle 9: Natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit der Esche

In der ON EN 350-2:1994 wird „mäßig tränkbar“ mit „ziemlich einfach zu trinken“ erklärt. Eine vollständige Durchdringung ist in der Regel nicht möglich, aber nach zwei oder drei

Stunden Druckbehandlung wird ein großer Anteil der Gefäße durchdrungen (ON EN 350-2:1994).

Der pH-Wert des Eschenholzes liegt bei „etwa 5,8“ und das Holz ist „[...] ziemlich laugen- und säurefest“ (Wagenführ, 2007).

3.6 Sonstige Eigenschaften

Die Oberflächen des Eschenholzes lassen sich sehr gut beizen und polieren. Das Holz besitzt zudem eine hohe Härte und eine gute Abriebfestigkeit. Die Härte nach Brinell ist in Tab. 10 ersichtlich.

Holzarten	Härte nach Brinell [N/mm ²]	
	parallel	senkrecht
Laubhölzer		
Esche	65	37-41
Eiche	50-66	25-34
Buche	72	34
Bergahorn	62	27
Birke	48	22-49
Nadelhölzer		
Fichte	32	12
Kiefer	40	19

Tabelle 10: Härte nach Brinell von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern (Wagenführ, 2007)

3.7 Verwendungsmöglichkeiten

Die Esche gehört nach Buche und Eiche zu den wichtigsten einheimischen Laubnutzhölzern.

„Die Esche ist eine äußerst vielseitig verwendbare Holzart. Auch wenn sie ihre frühere überragende Bedeutung als Spezialholz in der Wagnerie, im Fahrzeug-, Waggon- und Maschinenbau verloren hat, ist sie nach wie vor für zahlreiche Verwendungsbereiche gesucht.“ (Grosser, 2002)

Das Holz wird häufig im Ausstattungsbereich verwendet. Die Einsatzgebiete erstrecken sich vom Möbelbau als Massivholz oder Furnier, bis zum Innenausbau als Wand- und Deckenbekleidungen sowie Parkettböden. Für die Herstellung von Werkzeugstielen und -griffen wird das Eschenholz besonders oft genutzt. Der Grund hierfür liegt in den hervorragenden Werten der dynamischen Festigkeit, Elastizität und Zähigkeit. Aus Schichtholz werden Sport- bzw. Turngeräte wie Sprossenwände, Barrenholme, Kerne von Skiern etc. hergestellt. Es können weiters stark beanspruchte Gussmodelle aus Eschenholz gefertigt werden. Auch als Drechslerware findet die Esche wegen ihrer hellen Farbe und dekorativen Zeichnung Anwendung (Grosser und Zimmer, 2000).

Als lastabtragende Konstruktion im Bauwesen darf Eschenholz in Österreich und Deutschland, trotz der ausgezeichneten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften, nach den derzeit gültigen Normen nur als Vollholz eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.1).

3.8 Brettschichtholz aus Esche

3.8.1 Allgemeines

Brettschichtholz (BSH) wird aus mindestens zwei, in gleicher Faserrichtung verklebten, Brettlagen hergestellt. Getrocknete Holzbretter werden mittels Keilzinkung der Länge nach zu Lamellen verklebt. Diese Brettlamellen werden anschließend gehobelt und zu horizontal oder vertikal laminierten BSH verklebt. Beim horizontal laminierten BSH werden die Lamellen um ihre schwache Achse gebogen, beim vertikal laminierten werden die Lamellen um ihre starke Achse gebogen. Die Herstellung von BSH ist nach ON EN 14080:2005 nur mit Nadelhölzern und Pappel erlaubt. Man kann die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Brettschichtholz durch Prüfungen an BSH, durch Berechnungen und die dokumentierten Eigenschaften der Lamellen oder durch die Klassifizierungen der Lamelleneigenschaften nachweisen (Entwurf ON EN 14080:2009). Der Nachweis anhand der Klassifizierung der Lamelleneigenschaften wird in Abschnitt 3.8.3 genauer erläutert.

3.8.2 Sortierung der Lamellen

Falls das Schnittholz der Esche der Sortierklasse LS 10 und höher zugeordnet werden kann, entspricht es nach ON EN 1912:2009 der Festigkeitsklasse D40. Beim Vergleich der Sortierklassen zwischen Nadel- und Laubhölzern fällt auf, dass die Sortierklasse S 10 bei Nadelhölzern der Festigkeitsklasse C24 entspricht, d. h. einer charakteristischen Biegefestigkeit von $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$, die charakteristische Biegefestigkeit der Festigkeitsklasse D40 beträgt hingegen $f_{m,k} = 40 \text{ N/mm}^2$. Bei gleichen Sortierkriterien darf mit einer um zwei Drittel höheren Biegefestigkeit gerechnet werden. Beim Elastizitätsmodul ist der Unterschied nicht mehr ganz so groß. Der mittlere E-Modul hat in der Festigkeitsklasse C24 einen Wert von $E_{0,mean} = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ im Vergleich zu $E_{0,mean} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$ in der Festigkeitsklasse D40. Die Werte der einzelnen Festigkeitsklassen sind in Tabelle 1 in ON EN 338:2009 aufgelistet.

3.8.3 Festigkeitsklassen der Lamellen

In Tab. 11 sind die Werte der charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften sowie die Rohdichte laut Entwurf ON EN 14080:2009 angegeben, die Lamellen aus Nadelhölzern und Pappel aufweisen müssen um die Anforderungen an die jeweiligen Festigkeitsklassen zu erfüllen.

Festigkeitsklasse der Lamellen	$f_{t,0,l,k}$ [N/mm ²]	$E_{t,0,l,mean}$ [N/mm ²]	$\rho_{l,k}$ [kg/m ³]
T 11	11	9 000	320
T 14	14,5	11 000	350
T 18	18	12 000	370
T 22	22	13 000	390
T 26	26	14 000	410

Tabelle 11: Eigenschaften der Lamellen für BSH nach Entwurf ON EN 14080:2009

Die Festigkeitsklasse T 11 entspricht der Klasse C18, T 14 entspricht der Klasse C24 und T 18 entspricht der Klasse C30 nach ON EN 338:2003.

Die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindungen in den Lamellen muss nach Entwurf ON EN 14080:2009 um rund 5 N/mm^2 größer sein als die Zugfestigkeit der Lamellen, um ein Versagen in den Keilzinkenverbindungen zu vermeiden. Anhand der Festigkeitsklassen der Lamellen kann man nun die Festigkeitsklasse des Brettschichtholzes bestimmen (siehe Tab. 12).

Homogenes Brettschichtholz Festigkeitsklasse		Kombiniertes Brettschichtholz Festigkeitsklasse		
Lamellen	BSH	Äussere Lamellen	Innere Lamellen	BSH
T 14	GL 24h	T 14	T 11	GL 24c
T 18	GL 28h	T 18	T 14	GL 28c
T 22	GL 32h	T 22	T 18	GL 32c
T 26	GL 36h	T 26	T 22	GL 36c

Tabelle 12: Balkenaufbau bei Brettschichtholz nach Entwurf ON EN 14080:2009

Beim kombinierten Aufbau müssen die äusseren Lamellen je Seite mindestens $1/6$ der Trägerhöhe h umfassen und mindestens aus zwei Lamellen bestehen.

3.8.4 Verklebung

Bei nicht gekrümmten Bauteilen müssen die Lamellen eine Dicke t zwischen 35 und 45 mm (bei BSH aus Pappel: $35 \leq t \leq 40$ mm) aufweisen, dies entspricht der Dickenklasse LTH 1. Die Dicke in der Klasse LTH 2 muss zwischen 6 und 35 mm liegen. Die endgültigen Lamellendicken dürfen diese Werte nicht überschreiten (Entwurf ON EN 14080:2009).

Durch die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-679 ist die Verklebung von Buchenholzlamellen zu Brettschichtholz bereits genehmigt. Die Schwindmaße des Eschenholzes liegen deutlich unter den Schwindmaßen des Buchenholzes (vgl. Tab. 4), daher ist eine bessere Klebfugenbeständigkeit der Eschenholzlamellen zu erwarten. Die Klebfugenbeständigkeit ist aber von sehr vielen Faktoren abhängig, unter anderem von der Ebenheit der zu verklebenden Teile und vor allem vom Klebstoffsystem und seiner Verarbeitung.

Die Herstellung von Balkenschichtholz aus Buchenholz ist derzeit noch nicht möglich, da sich die Delaminierung bei zunehmender Lamellendicke stark erhöht (Ohnesorge u. a., 2008). Aus diesem Grund erscheint auch die Verwendung von Eschenlamellen für Balkenschichtholz nicht sinnvoll.

Auch BSH-Hybridträger aus Buche dürfen nach Zulassung Nr. Z-9.1-679 verwendet werden. Die Erfahrungen der Firma *Neue Holzbau AG* mit kombiniertem BSH aus Esche und Fichte bestätigen, dass das Verkleben von Esche mit Fichte bezüglich des Quellens und Schwindens unproblematischer ist als bei Buche mit Fichte (vgl. Abschnitt 3.3.2). Deshalb wäre wohl die Herstellung von BSH-Hybridträger aus Esche genauso möglich, wenn nicht zuverlässiger und daher sinnvoller.

3.8.5 Einsatzbereiche

Anstrebenswert ist die Verwendung von Eschenholz als BSH in der Nutzungsklasse 1 und auch in der Nutzungsklasse 2 (siehe Tab. 14). Wie in Abschnitt 3.8.4 bereits beschrieben, ist das Quell- und Schwindverhalten der Esche günstiger als das von der Buche, deswegen könnte der Einsatz von BSH aus Esche in Nutzungsklasse 2 auch möglich sein. Die Verwendung in Nutzungsklasse 3 ist jedenfalls zu vermeiden. Einerseits entstehen in der Nutzungsklasse 3 durch die erheblichen Holzfeuchteschwankungen (von 12 % bis 24 %) zu große Spannungen in den Klebefugen infolge des Quellens und Schwindens der Holzquerschnitte, andererseits ist die natürliche Dauerhaftigkeit der Esche unzureichend.

4 Holzschrauben und ihr Ausziehverhalten

Der Einsatz von Holzschrauben im konstruktiven Holzbau hat seit einigen Jahren stark zugenommen. Vor allem die Entwicklung von Holzschrauben mit Werten der Zugfestigkeit von rund $f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$ ist für die Verbindungstechnik von großer Bedeutung. Welche Arten von Holzschrauben es gibt, wird in diesem Kapitel erklärt. Des Weiteren werden Parameter aufgezeigt, die die axiale Tragfähigkeit im Wesentlichen beeinflussen. Die Anforderungen und Anwendungsbereiche von im Nadelholz selbstbohrenden Holzschrauben sind in den meisten Fällen in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt. Die für die verwendeten Schrauben gültigen Zulassungen werden beschrieben. Die bisherigen Erkenntnisse in Bezug auf den Ausziehverhalten vor allem in Laubholz werden ebenso erläutert. Wie die Bemessung der axialen Tragfähigkeit zur Zeit in den deutschsprachigen Normen geregelt ist, wird am Ende dieses Kapitels erklärt.

4.1 Arten von Holzschrauben

Es gibt nach Blaß und Bejtka (2004) zwei Arten von Holzschrauben für tragende Holzverbindungen, die in Deutschland eingesetzt werden dürfen:

- Genormte Holzschrauben und
- Bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben.

In Österreich ist es in der Baupraxis üblich, dass jene Produkte, die in Deutschland genormt oder bauaufsichtlich zugelassen sind, auch eingesetzt werden dürfen. Es gibt aber keine genauen, rechtlichen Regelungen bezüglich der Verwendung von Holzschrauben. Falls die Bemessung nach ON EN 1995-1-1:2009 erfolgt, ist ON EN 14592:2009, in der u. a. die Anforderungen an Schrauben geregelt sind, verbindlich.

4.1.1 Genormte Holzschrauben

Zu den genormten Holzschrauben zählt man unter anderem Schrauben nach DIN 96 (Halbrundkopf mit Längsschlitz), DIN 97 (Senkkopf mit Längsschlitz) und DIN 571 (Sechskant-Holzschrauben auch Gestellschrauben). Die Durchmesser der Schrauben nach DIN 96 und DIN 97 liegen zwischen 4 und 8 mm und die verfügbaren Längen reichen bis 150 mm. Die Schrauben nach DIN 571 sind mit einem Durchmesser zwischen 8 und 20 mm und mit Längen bis 200 mm erhältlich. Die Form des Gewindes entspricht der DIN 7998:1975, wobei die Gewindelänge ca. 60 % der Gesamtlänge beträgt. Der Durchmesser des gewindefreien Schaftes entspricht dem Gewindeaußendurchmesser, dies hat Vorteile bei Beanspruchungen durch Stahlteile quer zur Schraubenachse, da der Schaft die Lochleibungsfestigkeit für den Gesamtdurchmesser aktivieren kann. Der Einsatz dieser Verbindungsmittel ist durch die geringen Längen und niedrigen Stahlgüten (4.6) beschränkt, deshalb wurden leistungsfähigere Holzschrauben entwickelt.

4.1.2 Bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben

Im Nadelholz selbstbohrende Holzschrauben zählen zu den Entwicklungen, die in den letzten Jahren die Verbindungstechnik im Holzbau stark beeinflusst haben. Die im Bauwesen üblichen Durchmesser sind meist in bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt. Sie sind mit

Längen bis zu 600 mm, mit Durchmessern von 4 mm bis zu 12 mm und als Teil- oder Vollgewindeschrauben erhältlich. Nach dem Aufrollen des Gewindes werden die Schrauben gehärtet. Dadurch erzielt man höhere Werte des Fließmoments, der Zugtragfähigkeit und der Torsionstragfähigkeit.

Die Zugfestigkeit f_u der Schrauben kann bis zu 1 400 N/mm² betragen, wobei die marktüblichen meist 1 000 N/mm² nicht überschreiten. Die höchste Zugfestigkeit (berechnet aus der charakteristischen Zugtragfähigkeit und mit dem Kerndurchmesser der Schraube) der verwendeten Schrauben erreichten die Schrauben mit 8 mm Durchmesser der Firma *Schmid Schrauben Hainfeld GmbH* mit 1 043 N/mm² (siehe Tab. 19). Diese Schrauben werden höher gehärtet als die Schrauben der Firma *SPAX International GmbH & Co. KG* und der *SFS intec AG*. Bei zunehmender Zugfestigkeit wächst aber die Sprödhheit der Schrauben, d. h. die Duktilität nimmt ab. Außerdem besteht die Gefahr der Wasserstoffkorrosion. Beim Einschraubvorgang wird die Schraube dynamisch, insbesondere auf Torsion belastet. Dies erfordert eine gewisse Duktilität und schränkt ein noch stärkeres Härten ein. Sowohl in der Zulassung für die Schrauben der Firma *Schmid Schrauben Hainfeld GmbH* als auch für die Schrauben der Firma *SPAX International GmbH & Co. KG* wird gefordert, dass ein Biegewinkel von 45° ohne Bruch erreicht werden muss.

Es gibt bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben mit Schneidegewinde, mit einer Bohrspitze oder auch mit einem Reibenschaft zwischen dem Schaft- und Gewindebereich. Diese Ausbildungen reduzieren das Einschraubdrehmoment und die Spaltneigung des Holzes.

Die als Verbindungsmittel zugelassenen Holzschrauben können rechtwinkelig zu ihrer Achse auf Abscheren, in Richtung ihrer Achse auf Herausziehen bzw. Hineindrücken oder durch eine Kombination dieser Beanspruchungen Kräfte übertragen. Die Tragfähigkeit einer auf Abscheren beanspruchten Verbindung wird von der Lochleibungsfestigkeit des Holzes oder des Holzwerkstoffes, vom Biege widerstand der Schrauben und der Seilwirkung beeinflusst. Die Geometrie der Verbindung hat ebenfalls einen Einfluss auf die Tragfähigkeit. Die Bemessung erfolgt entsprechend der Theorie von Johansen. Die Tragfähigkeit in Richtung der Schraubenachse ist aufgrund der profilierten Ausbildung des Gewindebereiches und der hohen Zugtragfähigkeit des Materials deutlich höher als die Tragfähigkeit auf Abscheren. Aus diesem Grund sollte der Winkel zwischen Schraubenachse und Krafttrichtung möglichst klein sein. Die Bemessung von Holzschrauben, die auf Herausziehen beansprucht werden, ist in Abschnitt 4.5 beschrieben.

Es gibt viele Einsatzmöglichkeiten für bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben, zum Beispiel:

- Holz-Holz-Verbindungen (mit geneigt angeordneten Schrauben),
- Holz-Stahlblech-Verbindungen (mit geneigt angeordneten Schrauben),
- Querzugverstärkungen (z. B. von Ausklinkungen, Durchbrüchen oder gekrümmten Trägern) oder
- Querdruck-Verstärkungen (z. B. Trägerauflager).

4.2 Einflussparameter auf die axiale Tragfähigkeit

Die axiale Tragfähigkeit von Holzschrauben hängt von den folgenden, nicht nach ihrem Einfluss gereihten, Parametern ab.

- Holz:
 - Holzfeuchte u
 - Rohdichte ρ des Holzes
 - Jahrringbreite, Rohdichteunterschiede zwischen Früh- und Spätholz
- Schraube:
 - Nenndurchmesser d der Schraube (entspricht dem Außendurchmesser des Gewindes)
 - Verhältnis zwischen Gewindekern- und Gewindeaußendurchmesser d_{GK}/d
 - Steigung des Gewindes p
 - Art der Spitze
 - Zugfestigkeit der Schraube f_u
 - auf Druck beansprucht: Bettung quer und längs der Schraubenachse (Verzweigungslast)
- Verbindung:
 - effektive Einschraubtiefe l_{ef}
 - Winkel α zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes
 - Abstände der Schrauben untereinander
 - Abstände der Schrauben von den Holzrändern bzw. Hirnholzenden

In Abb. 7 sind die Winkel α und β zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-9.1-472 für Schrauben der *SFS intec AG* dargestellt. F steht für Kraft, R für Widerstand und SH für Seitenholz. Der Index in Richtung der Schraubenachse wird mit $ax(\alpha, \beta)SH$ und die Indizes rechtwinkelig zur Schraubenachse mit $la(\alpha, \beta)SH$ bzw. $la(\alpha', \beta)SH$ bezeichnet. Der Winkel α' wird mit $\alpha' = 90 - \alpha$ berechnet.

Da der in dieser Zulassung beschriebene Winkel α für die durchgeführten Prüfungen Null ist, wurde dieser nicht weiter berücksichtigt. Der Winkel β nach dieser Zulassung wird daher neu definiert und entspricht nun dem Winkel α . Im Rahmen dieser Arbeit werden Ausziehprüfungen durchgeführt, deshalb sind nur die Komponenten in Richtung der Schraubenachse von Bedeutung.

4.3 Zulassungen

Für die in dieser Arbeit verwendeten Schrauben sind die folgenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen relevant:

- Z-9.1-435: $\varnothing 4/70$ mm und $\varnothing 6/300$ mm (*Schmid Schrauben Hainfeld GmbH*)
- Z-9.1-656: $\varnothing 8/300$ mm (*Schmid Schrauben Hainfeld GmbH*)
- Z-9.1-519: $\varnothing 10/300$ mm und $\varnothing 12/300$ mm (*SPAX International GmbH & Co. KG*)

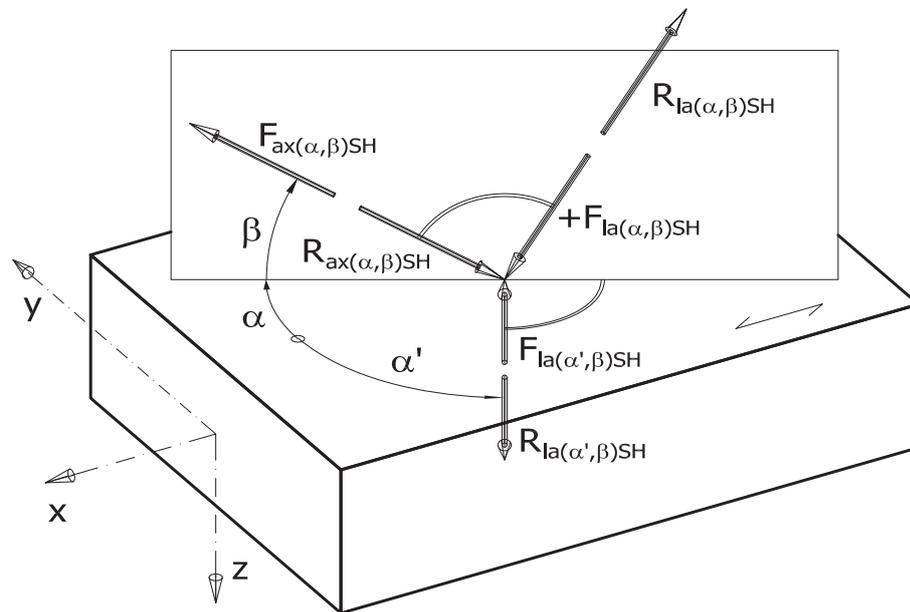


Abbildung 7: Schraubenachsen-Faser-Winkel nach Zulassung Nr. Z-9.1-472

Die eingesetzten Holzschrauben dürfen nach den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen in Holzbauteile aus Vollholz, Brettschichtholz und aus Furnierschicht-, Brett- oder Balkenlagenholz eingeschraubt werden. Sie dienen zum Anschluss von Holzbauteilen oder von Stahlteilen an Holzbauteile. Bei Verwendung von Schrauben mit einem Gewindeaußendurchmesser $d_1 \geq 8$ mm müssen die Holzbauteile aus Fichte, Kiefer oder Tanne hergestellt sein. Es darf grundsätzlich ohne Vorbohren eingeschraubt werden. Für die Ausführung gilt DIN 1052:2008. Der charakteristische Wert des Ausziehparameters wird nach der Tragfähigkeitsklasse 3 (Tab. 16) berechnet. Die Schrauben dürfen bei Holz-Holz- und Holz-Stahlblech-Verbindungen eingesetzt werden. Sie können zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen rechtwinkelig zur Faserrichtung dienen (z. B. bei Querkzug oder Querkdruck). Die Dicke der Holzbauteile muss mindestens $4 d_1$ ($d_1 =$ Gewindeaußendurchmesser) aufweisen. Die Schrauben dürfen nur für vorwiegend ruhende Belastungen nach DIN 1055 Blatt 3:1971 eingesetzt werden. Der Winkel α zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung muss bei den Schrauben nach Zulassung Z-9.1-435 größer als 60° sein. Schrauben nach Zulassung Z-9.1-656 dürfen unter einem Winkel von $\alpha \geq 30^\circ$ eingedreht werden, aber auf Druck beanspruchte Schrauben müssen einen Winkel größer als 45° aufweisen. Unter einem Winkel $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ dürfen Schrauben mit der Zulassung Z-9.1-519 bei Beanspruchung in Schaftrichtung eingedreht werden. Im Vergleich dazu dürfen Schrauben der Firma *SFS intec AG* nach Zulassung Nr. Z-9.1-472 bereits ab einem Winkel von $\alpha \geq 15^\circ$ eingesetzt werden.

4.4 Durchgeführte Untersuchungen zur axialen Tragfähigkeit

Es gibt bisher nicht viele Arbeiten, die sich mit dem Ausziehwiderstand von Holzschrauben für tragende Bauteile aus Laubholz beschäftigten. Die Ergebnisse einiger dieser Untersuchungen werden in den folgenden Abschnitten im Hinblick auf die eigenen Untersuchungen

zusammengefasst. Der Ausziehverhalten von Holzschrauben in Laubholz mit Durchmessern zwischen 6 mm und 20 mm (die im Bauwesen Anwendung finden) wurde bisher nur von Jablonkay (1999) und Schneider (o.J.) untersucht. Ergebnisse von anderen Arbeiten beziehen sich meist auf Holzschrauben, die im Möbelbau eingesetzt werden.

4.4.1 Eckelman (1975): Screwholding performance in hardwoods and particleboard

Eckelman (1975) fand heraus, dass der Ausziehverhalten besser mit der Scherfestigkeit im Holz als mit der Rohdichte korreliert. Jedoch wurden diese Prüfungen mit im Möbelbau üblichen Durchmessern durchgeführt. Der Einfluss der Schraubenspitze wurde berücksichtigt, indem bei eingebetteten Schrauben von der Gewindelänge im Holz der einfache Durchmesser abgezogen wurde.

4.4.2 Bröker und Krause (1991): Orientierende Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben

Bröker und Krause (1991) führten statische Ausziehprüfungen und dynamische Schwellbelastungen mit Spanplattenschrauben (Senk- und Halbrundkopf mit Kreuzschlitz) und Holzschrauben nach DIN 96 (Halbrundkopf mit Längsschlitz) und DIN 97 (Senkkopf mit Längsschlitz) durch. Die untersuchten Durchmesser lagen bei 3 mm, 3,5 mm, 4 mm und 5 mm. Die Prüfkörper wurden aus Flachpressspanplatten, Fichten- und Buchenvollholz hergestellt. Nach den Ergebnissen nehmen die Ausziehkräfte mit steigender Einschraublänge und steigendem Durchmesser zu. Ab 10 000 Lastwechsel sinken die Tragfähigkeiten auf Werte zwischen 21 % und 86 % der statischen Ergebnisse. Mit den erhaltenen Werten wurde keine Regressionsanalyse durchgeführt.

4.4.3 Jablonkay (1999): Schrauben unter Ausziehbeanspruchung

Jablonkay (1999) führte im Rahmen seiner Diplomarbeit 910 Ausziehprüfungen mit EJOT-Rahmenschrauben $d = 7,5$ mm durch. Er verwendete Nadel- und Laubholz für seine Prüfkörper und untersuchte die Abhängigkeit von der Holzfeuchte, der Rohdichte und vom Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung. Es wurde mittels Regressionsanalyse der Exponent für die Rohdichte zu 1,78 für Laubholz ermittelt. Dabei wurden die Prüfungswerte auf eine Holzfeuchte von 12,0 % und eine Rohdichte von 680 kg/m^3 normiert. Der Einfluss der Holzfeuchte wurde bei Fichten- und Douglasien- bzw. bei Buchenholz untersucht. Die Änderung der Holzfeuchte hatte bei Laubholz einen größeren Einfluss auf die Scherfestigkeit auf Ausziehen oder Eindringen als bei Nadelholz. Der Einfluss des Winkels konnte beim Laubholz mit einer quadratischen Gleichung definiert werden, mit einem Maximum bei $\alpha = 45^\circ$. Für Einschraubwinkel $\alpha < 15^\circ$ wurde ein konstanter Wert festgelegt. Schneider (o.J.) führte die Ergebnisse zusammen und ermittelte Glg. (2) zur Berechnung der Scherfestigkeit von Schrauben in Laubholz, die auf Ausziehen oder Eindringen belastet werden.

$$f_{v,\alpha,k} = \frac{f_{v,\alpha} \cdot \rho_k^{1,78}}{110120} - 0,524 \cdot (u - 12) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (2)$$

Mit:

- $f_{v,\alpha,k}$ Bemessungswert der Scherfestigkeit auf Ausziehen oder Eindringen in N/mm^2
 $f_{v,\alpha}$ Grundwert der Scherfestigkeit in Abhängigkeit vom Winkel α
 $0^\circ \leq \alpha < 15^\circ$: $f_\alpha = 9,0 \text{ N/mm}^2$
 $15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$: $f_\alpha = \left(11,3 - \frac{\alpha^2}{1100} + \frac{\alpha}{12,3}\right) \text{ N/mm}^2$
 ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m^3
 u Holzfeuchte in %

Der charakteristische Wert des Ausziehwiderstandes kann nun mit Glg. (3) bzw. Glg. (4) berechnet werden, bei einer Annahme von 12 % Holzfeuchte.

$0^\circ \leq \alpha < 15^\circ$:

$$R_{\alpha,k} = \frac{9 \cdot \rho_k^{1,78}}{110120} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{ef} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

$15^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$:

$$R_{\alpha,k} = \frac{\left(11,3 - \frac{\alpha^2}{1100} + \frac{\alpha}{12,3}\right) \cdot \rho_k^{1,78}}{110120} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{ef} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Mit:

- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm
 l_{ef} Gewindelänge im Holzteil ohne Spitze in mm

Die Formeln gelten nur für charakteristische Rohdichten $\rho_k \leq 800 \text{ kg/m}^3$. Untersuchungen mit Bongossi ergaben, dass bei charakteristischen Rohdichten $\rho_k > 800 \text{ kg/m}^3$ der Ausziehwiderstand um 20 % abgemindert werden muss.

4.4.4 Bejtka (2005): Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben

In dieser Arbeit wurde unter anderem der Durchdrückwiderstand von bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben in Fichtenholz bestimmt. Mit 413 Prüfungen wurde der Durchdrückwiderstand in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe und vom Durchmesser (6 mm, 7,5 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm) unter dem Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$ zwischen Schraubenachse und Faserrichtung untersucht. Die Schrauben wurden durchgeschraubt, d. h. der Einfluss der Schraubenspitze wurde nicht geprüft. Es wurde festgestellt, dass die Tragfähigkeit auf Herausziehen der Tragfähigkeit auf Herausdrücken entspricht – unter der Voraussetzung, dass die Holzschraube im Holz nicht ausknickt. Die Prüfvorrichtung wurde so gewählt, dass die Schrauben in axialer Richtung aus dem Prüfkörper gedrückt wurden. Mit den Prüfungsergebnissen wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt und dabei wurde Glg. (5) ermittelt.

$$R_{ax} = 0,61 \cdot d^{0,53} \cdot l_{ef}^{0,91} \cdot \rho^{0,79} \quad [\text{N}] \quad (5)$$

Mit:

- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm
 l_{ef} Gewindelänge im Holzteil ohne Spitze in mm
 ρ Rohdichte in kg/m^3

4.4.5 Blaß u. a. (2006): Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde

Die in Bejtka (2005) ermittelte Formel zur Berechnung des Ausziehverhaltens von selbstbohrenden Holzschrauben in Fichtenholz wurde in dieser Arbeit vereinfacht zu Glg. (6).

$$R_{ax} = 0,6 \cdot \sqrt{d} \cdot l_{ef}^{0,9} \cdot \rho^{0,8} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

Um den Einfluss des Einschraubwinkels α zu bestimmen, wurden weitere 799 Prüfungen mit den Durchmessern 5 mm, 7,5 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm durchgeführt. Die Einschraubwinkel wurden von 0° bis 90° in 15° -Schritten variiert. Die Einschraubtiefe betrug $4d$. Jede Prüfserie bestand aus mindestens 20 Prüfungen. Mittels Regressionsanalyse wurde die beste Korrelation mit Glg. (7) erreicht. Der Vorfaktor von 0,6 und die Exponenten für den Durchmesser (0,5), die Einschraubtiefe (0,9) und die Rohdichte (0,8) wurden dabei fixiert. Die Abhängigkeit des Winkels wurde mit der Hankinson-Formel (vgl. Glg. 1) und einem Verhältniswert von $(f_{v,90}/f_{v,0}) = 1,2$ ermittelt. Zur Bestimmung des charakteristischen Ausziehverhaltens wurde in Glg. (7) die charakteristische Rohdichte ρ_k (5%-Perzentilwert) eingesetzt. Da die Werte der Rohdichten und die Werte der Ausziehverhältnisse unterschiedlich streuen, musste der Vorfaktor zusätzlich auf $0,867 \cdot 0,6 = 0,52$ abgemindert werden (siehe Glg. (8)).

$$R_{ax,\alpha} = \frac{0,6 \cdot \sqrt{d} \cdot l_{ef}^{0,9} \cdot \rho^{0,8}}{\sin^2 \alpha + 1,2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

$$R_{ax,\alpha,k} = \frac{0,52 \cdot \sqrt{d} \cdot l_{ef}^{0,9} \cdot \rho_k^{0,8}}{\sin^2 \alpha + 1,2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N}] \quad (8)$$

Die Ergebnisse von Blaß u. a. (2006) bildeten die Grundlage zur Berechnung des charakteristischen Ausziehverhaltens in ON EN 1995-1-1:2009 (vgl. Abschnitt 4.5.1). Dabei gehen der Durchmesser, die Einschraubtiefe und die Rohdichte nicht linear in die Berechnung ein.

4.4.6 Taj u. a. (2009): Withdrawal and lateral resistance of wood screw in beech, hornbeam and poplar

In der Arbeit von Taj u. a. (2009) wurde „das Tragverhalten rechtwinkelig zur Schraubachse und auf Herausziehen von Holzschrauben aus den drei Hartholzarten Buche (*Fagus orientalis* Lipsky.), Hainbuche (*Carpinus betulus*) und Pappel (*Populus deltoides* 75/51)“ untersucht. Zum Einsatz kamen Möbelbauschrauben mit einer Länge von 25 mm. Es wurde festgestellt, dass die Prüfungsergebnisse sehr gut mit den nach Eckelman (1975) ermittelten Gleichungen übereinstimmen (vgl. Abschnitt 4.4.1).

4.4.7 Pirnbacher und Schickhofer (2009): Base parameters of self-tapping screws

Im Rahmen der Arbeit von Pirnbacher und Schickhofer (2009) wurden 5 524 Schraubenausziehprüfungen in Fichtenvollholz und Fichten-BSH durchgeführt und ausgewertet. Die verwendeten Schrauben hatten einen Durchmesser von 8 mm, 10 mm und 12 mm, wobei Voll- und Teilgewindeschrauben zum Einsatz kamen. Es wurden dabei die Einflüsse der Holzfeuchte, der Temperatur, des Schraubendurchmessers, der Schlankheit, der Einbettung des Gewindes von Teilgewindeschrauben, des Einschraubwinkels und der Vorbohrung

auf den Auszieh Widerstand von bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben untersucht. Die wichtigste Erkenntnis aus diesen Untersuchungen war, dass bei der Einbettung des Teilgewindes in das Holz von mindestens $2d$ die Ausziehtragfähigkeit um 15 % steigt ($d = 8 \text{ mm}$, $l_{\text{Gewinde}} = 100 \text{ mm}$). Weiters wurde festgestellt, dass die Ausziehungskraft im Bereich von $12\% < u \leq 20\%$ um 0,65 % je Prozent Holzfeuchtesteigerung abgemindert werden muss. Bei einer Holzfeuchte von 8 % bis 12 % muss keine Korrektur der Ausziehungskraft vorgenommen werden. Es konnte kein Einfluss der Temperatur zwischen -20 °C und $+50 \text{ °C}$ ermittelt werden. Der Einfluss der Schraubenspitze wurde berücksichtigt, indem $1,17d$ von der nominellen Gewindelänge im Holz abgezogen wurde. Zur Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes konnte eine modifizierte Hankinson-Funktion mit einem Koeffizienten von 2,2 und einem Verhältnis von $f_{ax,90}/f_{ax,0}$ mit 1,3 angegeben werden (vgl. Glg. 1). Der Durchmesser geht mit dem Exponenten von 0,572, die Rohdichte und die Einschraubtiefe gehen linear in die Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes ein.

4.5 Normative Regelungen zur axialen Tragfähigkeit

Die derzeit gültigen Berechnungs- und Bemessungsregeln für Holzbauten im deutschsprachigen Raum sind:

- ÖNORM EN 1995-1-1:2009
- DIN 1052:2008
- SIA 265:2003.

Die Berechnung der axialen Tragfähigkeit von Holzschrauben wird anhand dieser drei Normen erklärt.

4.5.1 ÖNORM EN 1995-1-1:2009: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten

„Die Anwendung der angegebenen Tragfähigkeitsformeln bezieht sich auf Schrauben, deren Tragfähigkeiten in Übereinstimmung mit ÖNORM EN 14 592 und mit ÖNORM EN 1995-1-1 festgelegt sind, andernfalls ist auf Europäische Technische Zulassungen zurückzugreifen“ (ON B 1995-1-1:2009).

Charakteristischer Auszieh Widerstand Nach Eurocode 5 wird der charakteristische Auszieh Widerstand von Holzschrauben unter dem Winkel α zwischen Schraubenachse und Faserrichtung nach Glg. (9) berechnet, wobei $\alpha \geq 30^\circ$ sein muss.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{\sin^2 \alpha + 1,2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N}] \quad (9)$$

Der charakteristische Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinkelig zur Faserrichtung berechnet sich nach Glg. (10) wie folgt:

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (10)$$

Mit:

- n_{ef} wirksame Anzahl von Schrauben, $n_{ef} = n^{0,9}$
- n Anzahl der Schrauben, die in einer Verbindung zusammenwirken – bei Beanspruchung durch eine Kraftkomponente in Schaftrichtung
- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm
- l_{ef} Eindringtiefe des Gewindes mit Spitze, $l_{ef} \geq 6d$ in mm
- ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte in kg/m^3
- k_d $\min \{d/8; 1\}$

Der Durchmesser, die Einschraubtiefe und die charakteristische Rohdichte gehen nicht linear in die Berechnung ein. Die Kreiszahl π ist bereits in der Berechnungsformel für den charakteristischen Wert der Ausziehfestigkeit $f_{ax,k}$ enthalten.

Durchmesser Der Durchmesser der Schraube muss im Bereich $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ liegen. Das Verhältnis des Gewindekerndurchmessers (d_{GK}) zum Gewindeaußendurchmesser muss zwischen $0,6 \leq d_{GK}/d \leq 0,75$ liegen. Falls dieses Verhältnis nicht erfüllt wird, sollte der charakteristische Ausziehverstand $F_{ax,\alpha,Rk}$ nach Glg. (11) angenommen werden.

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{\sin^2 \alpha + 1,2 \cdot \cos^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right) \quad [\text{N}] \quad (11)$$

Mit:

- $f_{ax,k}$ der nach EN 14592 bestimmte charakteristische Ausziehparameter rechtwinkelig zur Faserrichtung für die zugehörige Rohdichte ρ_a
- ρ_a zugehörige Rohdichte für $f_{ax,k}$ in kg/m^3

Vorbohrung Bei Schrauben in Nadelholz mit einem Durchmesser des glatten Schaftteils von $d < 6 \text{ mm}$ ist ein Vorbohren nicht erforderlich. Die Anforderungen an das Vorbohren für Schrauben in Laubholz bzw. Schrauben in Nadelholz, die vorzubohren sind, sind in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

Zugtragfähigkeit Die charakteristische Zugtragfähigkeit $F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k}$ wird mittels Prüfungen nach ON EN 1383:1999 ermittelt. Dabei ist der Abreißwiderstand des Schraubenkopfes oder die Zugtragfähigkeit des Schraubenschaftes maßgebend.

Bemessungswert des Ausziehverstandes Der Bemessungswert des Ausziehverstandes ist nach Glg. (12) zu berechnen.

$$F_{ax,\alpha,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{ax,\alpha,Rk}}{\gamma_M} \quad [\text{N}] \quad (12)$$

Mit:

- k_{mod} Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt (siehe Tab. 13)
- γ_M Teilsicherheitsbeiwert: $\gamma_M = 1,3$ für Vollholz
 $\gamma_M = 1,25$ für BSH

Baustoff	Nutzungs- klasse	Klasse der Lasteinwirkung				
		ständige Einwir- kung	lange Einwir- kung	mittlere Einwir- kung	kurze Einwir- kung	sehr kurze Einwir- kung
Vollholz, BSH	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tabelle 13: Modifikationsbeiwerte nach ON EN 1995-1-1:2009

Eine Übersicht über die Nutzungsklassen stellt Tab. 14 dar.

Nutzungs- klasse	Holzfeuchte in %	Klimabedingungen
1	meist $\leq 12\%$ (5 bis 15 %)	20 °C, 65 %, allseitig geschlossene, beheizte Bauwerke
2	meist $\leq 20\%$ (10 bis 20 %)	20 °C, 85 %, überdachte offene Bauwerke
3	12 bis 24 %	der freien Witterung ausgesetzte Konstruktionen

Tabelle 14: Nutzungsklassen nach ON EN 1995-1-1:2009

Mindestabstände Die einzuhaltenen Mindestabstände sind in Tab. 15 ersichtlich, wobei eine Holzdicke von $t \geq 12d$ vorausgesetzt wird. Der Randabstand wird vom Rand bis zum Schwerpunkt des Schraubengewindes im jeweiligen Bauteil gemessen (siehe Abb. 8).

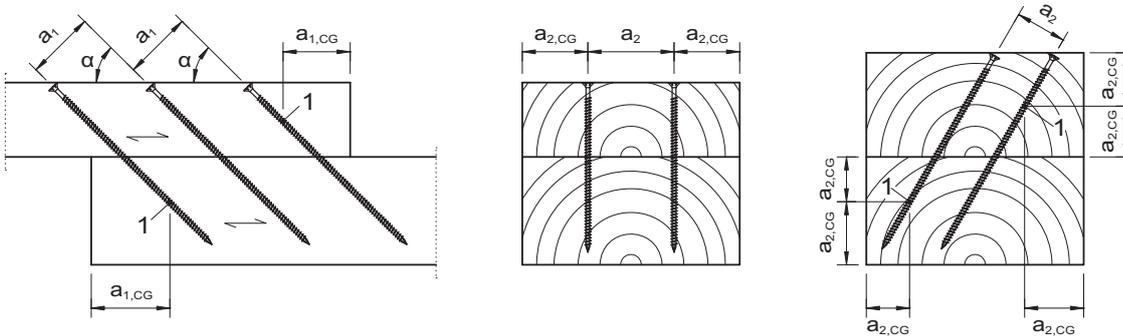
Mindestabstände	Abstand zwischen den Schrauben	Randabstand
parallel zur Faserrichtung	$a_1 = 7d$	$a_{1,CG} = 10d$
senkrecht zur Faserrichtung	$a_2 = 5d$	$a_{2,CG} = 4d$

Tabelle 15: Mindestabstände untereinander sowie von Hirnholzenden und Rändern nach ON EN 1995-1-1:2009

4.5.2 DIN 1052:2008: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken

Charakteristischer Auszieh Widerstand Der charakteristische Wert des Auszieh Widerstandes von Holzschrauben wird nach DIN 1052:2008 mit Glg. (13) ermittelt. Der Winkel α zwischen Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes muss im Bereich $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ liegen.

$$R_{ax,\alpha,k} = \min \left\{ \frac{f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{\sin^2 \alpha + \frac{4}{3} \cdot \cos^2 \alpha}; f_{2,k} \cdot d_k^2 \right\} \quad [\text{N}] \quad (13)$$



Legende

1 Schwerpunkt des Schraubengewindes im Bauteil

Abbildung 8: Mindestabstände untereinander sowie von Hirnholzenden und Rändern nach ON EN 1995-1-1:2009

Mit:

- $f_{1,k}$ charakteristischer Wert des Ausziehparameters in N/mm^2 (siehe Tab. 16)
- $f_{2,k}$ charakteristischer Wert des Kopfdurchziehparameters in N/mm^2 (siehe Tab. 16)
- l_{ef} Gewindelänge im Holzteil mit der Schraubenspitze, $l_{ef} \geq 4d$ in mm
- d Gewindeaußendurchmesser der Schraube in mm
- d_k Außendurchmesser des Schraubenkopfes, ggf. einschließlich Unterlegscheibe in mm

Weisen die Holzschrauben ein Gewinde nach DIN 7998:1975 auf, dürfen sie ohne Nachweis in die Tragfähigkeitsklasse 2A nach Tab. 16 eingestuft werden.

Tragfähigkeitsklasse	$f_{1,k}$	Tragfähigkeitsklasse	$f_{2,k}$
1	$60 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$	A	$60 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$
2	$70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$	B	$80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$
3	$80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$	C	$100 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2$
Charakteristische Rohdichte ρ_k in kg/m^3 , jedoch höchstens $500 kg/m^3$			

Tabelle 16: Charakteristische Werte für die Ausziehparameter $f_{1,k}$ und die Kopfdurchziehparameter $f_{2,k}$ in N/mm^2 für Holzschrauben nach DIN 1052:2008

Der Durchmesser und die Einschraubtiefe gehen linear und die Rohdichte geht quadratisch in die Berechnung ein. Im Ausziehparameter $f_{1,k}$ ist die Kreiszahl π bereits enthalten.

Durchmesser Der Durchmesser der Holzschrauben mit einem Gewinde nach DIN 7998:1975 muss mindestens 4 mm betragen. Werden Holzschrauben mit einem anderen Gewinde verwendet, muss deren Eignung durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nachgewiesen sein.

Vorbereitung Die Schraubenlöcher sind über die ganze Länge vorzubohren, wenn die charakteristische Rohdichte des Bauholzes über $500 kg/m^3$ beträgt und bei Verwendung von

Douglasienholz. Der Vorbohrdurchmesser darf zwischen $0,6d$ und $0,8d$ betragen. Holzschrauben (Gewinde nach DIN 7998:1975) mit einem Durchmesser $d > 8$ mm müssen auf die Länge des glatten Schaftes mit dem Schaftdurchmesser und auf die Länge des Gewindeteils mit $0,7d$ vorgebohrt werden.

Zugtragfähigkeit Die charakteristische Zugtragfähigkeit von Schrauben mit einem Gewinde nach DIN 7998:1975 darf nach Glg. (14) berechnet werden.

$$R_{ax,k} = 300 \cdot \pi \cdot \frac{d_{kern}^2}{4} \quad [\text{N}] \quad (14)$$

Der Bemessungswert der Schraubentragfähigkeit berechnet sich nach Glg. (15).

$$R_{ax,d} = \frac{R_{ax,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N}] \quad (15)$$

Mit:

d_{kern} Gewindekerndurchmesser der Schraube in mm
 γ_M Teilsicherheitsbeiwert, $\gamma_M = 1,25$

Bemessungswert des Ausziehwiderstandes Der Bemessungswert des Ausziehwiderstandes ist nach Glg. (16) zu berechnen.

$$R_{ax,\alpha,d} = \frac{k_{mod} \cdot R_{ax,\alpha,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N}] \quad (16)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Holz und Holzwerkstoffe beträgt 1,3. Die Werte für den Modifikationsbeiwert k_{mod} (siehe Tab. 13) und die Nutzungsklassen (siehe Tab. 14) entsprechen den Angaben im Eurocode 5.

Mindestabstände Für die einzuhaltenden Mindestabstände gelten die selben Bestimmungen wie für Nägel. In Tab. 17 sind die die minimalen Abstände ersichtlich. Bei Verbindungen ohne Vorbohrung müssen die Holzteile eine Mindestdicke von $t = \max\{14d; (13d - 30) \cdot \rho_k/200\}$ aufweisen.

4.5.3 SIA 265:2003: Holzbau

Nach der Schweizer Norm SIA 265:2003 wird der Bemessungswert des Tragwiderstandes R_d im Allgemeinen nach Glg. (17) ermittelt.

$$R_d = \frac{\eta_M \eta_t \eta_w}{\gamma_M} R_k \quad (17)$$

Mindestabstände		nicht vorgebohrt		vorgebohrt	
		$\rho_k \leq 420$ [kg/m ³]	$420 < \rho_k < 500$ [kg/m ³]		
a_1	parallel zur Faserrichtung	$d < 5$ mm	$(5 + 5 \cos \alpha) d$	$(7 + 8 \cos \alpha) d$	$(3 + 2 \cos \alpha) d$
		$d \geq 5$ mm	$(5 + 7 \cos \alpha) d$		
a_2	rechtwinkelig zur Faserrichtung	$5 \cdot d$		$7 \cdot d$	$3 \cdot d$
$a_{1,t}$	beanspruchtes Hirnholzende	$d < 5$ mm	$(7 + 5 \cos \alpha) d$	$(15 + 5 \cos \alpha) d$	$(7 + 5 \cos \alpha) d$
		$d \geq 5$ mm	$(10 + 5 \cos \alpha) d$		
$a_{1,c}$	unbeanspruchtes Hirnholzende	$d < 5$ mm	$7 \cdot d$	$15 \cdot d$	$7 \cdot d$
		$d \geq 5$ mm	$10 \cdot d$		
$a_{2,t}$	beanspruchter Rand	$d < 5$ mm	$(5 + 2 \sin \alpha) d$	$(7 + 2 \sin \alpha) d$	$(3 + 4 \sin \alpha) d$
		$d \geq 5$ mm	$(5 + 5 \sin \alpha) d$	$(7 + 5 \sin \alpha) d$	
$a_{2,c}$	unbeanspruchter Rand	$5 \cdot d$		$7 \cdot d$	$3 \cdot d$
α	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung				

Tabelle 17: Mindestabstände nach DIN 1052:2008

Mit:

- η_M berücksichtigt: Maßstabeffekt, Temperatur ($T \leq 50$ °C) und Einwirkungsdauer (keine stossartigen Einwirkungen)
- γ_M Partialfaktor: abhängig von η_M ; daher Angabe von γ_M/η_M
- γ_M/η_M 1,7 generell für Verbindungen mit BSH
- η_t 1,4 für stossartige Einwirkungen
- η_w 1,0 für Feuchteklasse 1 ($u \leq 12$ %)
0,8 für Feuchteklasse 2 ($12 < u \leq 20$ %)
0,6 für Feuchteklasse 3 ($u > 20$ %)

Charakteristischer Ausziehverhalten Der charakteristische Wert des Ausziehverhaltens für Feuchteklasse 1 wird somit nach Glg. (18) berechnet.

$$R_{ax,k} = 1,7 \cdot R_{ax,d} \quad [\text{N}] \tag{18}$$

Bemessungswert des Ausziehverhaltens Die Ermittlung des Bemessungswertes des Auszieh- bzw. Eindrückverhaltens einer Schraubengruppe erfolgt nach Glg. (19).

$$R_{ax,d} = n^{0,9} \cdot (\pi d l_{ef}) \cdot f_{v,\alpha,d} \quad [\text{N}] \tag{19}$$

Mit:

- n Anzahl gemeinsam wirkender Schrauben
- d Schraubendurchmesser in mm
- l_{ef} anrechenbare Einschraubtiefe in mm (siehe Abb. 9)

Der Bemessungswert der Scherfestigkeit auf Herausziehen ist nach Glg. (20) zu bestimmen.

$$f_{v,\alpha,d} = \frac{f_{v,90,d}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (20)$$

Mit:

α Winkel zwischen Kraft und Faserrichtung,

$$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

Es wird dabei der Bemessungswert der Scherfestigkeit auf Herausziehen senkrecht zur Faserrichtung nach Glg. (21) ermittelt.

$$f_{v,90,d} = 30 \cdot 10^{-3} \cdot (\pi d l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k \quad [\text{N/mm}^2] \quad (21)$$

Mit:

d Schraubendurchmesser in mm

l_{ef} anrechenbare Einschraubtiefe in mm

ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m^3

Die Kreiszahl π , der Durchmesser und die Einschraubtiefe gehen nicht linear und die Rohdichte geht linear in die Berechnung ein.

Falls im Nadelholz selbstbohrende Schrauben unter dem Winkel $\alpha = 0^\circ$ eingeschraubt werden, muss die Einschraubtiefe $l_{ef} \geq 100$ mm sein, wobei diese Verbindungen nur in der Feuchteklasse 1 (vor der Witterung geschützte Konstruktionen, $u \leq 12\%$) und Feuchteklasse 2 (teilweise vor der Witterung geschützte oder direkt bewitterte Konstruktionen, $12 < u \leq 20\%$) eingesetzt werden dürfen. Für Holzschrauben muss die Einschraubtiefe $l_{ef} \geq 6d$ und für im Nadelholz selbstbohrende Schrauben muss die Einschraubtiefe $l_{ef} \geq 8d$ sein. Die anrechenbare Einschraubtiefe entspricht der Länge des Gewindeteils im Holz abzüglich des einfachen Durchmessers (siehe Abb. 9).

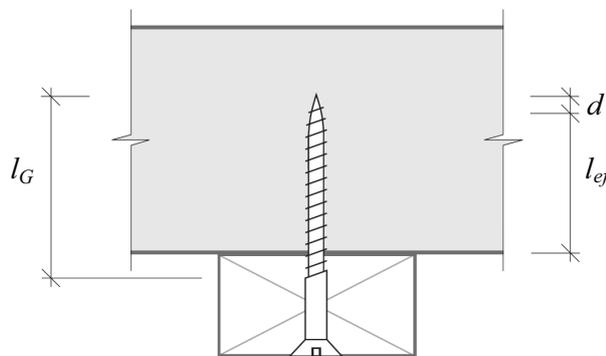


Abbildung 9: Anrechenbare Einschraubtiefe l_{ef} nach SIA 265:2003

Durchmesser Der Außendurchmesser von im Nadelholz selbstbohrenden Schrauben muss zwischen $4 \text{ mm} \leq d \leq 10 \text{ mm}$ betragen. Der Schaftdurchmesser d_s von Holzschrauben muss im Bereich von 4 mm bis 16 mm liegen. Bei im Nadelholz selbstbohrenden Schrauben muss das Verhältnis des Gewindekerndurchmessers zum Gewindeaußendurchmesser $d_{GK}/d \geq 0,6$ sein.

Vorbohrung Allfällige Vorbohrungen haben gemäß den Angaben der Schraubenhersteller zu erfolgen.

Zugtragfähigkeit Die Bemessungswerte der Tragwiderstände gelten für Holzschrauben mit einer Stahlqualität von 4.6 und für im Nadelholz selbstbohrende Schrauben mit einer Mindestzugfestigkeit von 800 N/mm^2 .

Mindestabstände Die minimalen Abstände sind nach Tab. 18 einzuhalten.

Mindestabstände	Abstand zwischen den Schrauben	Randabstand
parallel zur Faserrichtung	$4 d$	$2,5 d$
senkrecht zur Faserrichtung	$4 d$	$4 d$

Tabelle 18: Mindestabstände nach SIA 265:2003

5 Schraubenausziehprüfungen

5.1 Prüfmaterial

5.1.1 Verwendete Schrauben

Zur Ermittlung der Ausziehkenngößen in Eschen-BSH werden von drei Herstellern mit folgenden Schraubentypen Prüfungen durchgeführt:

- Firma *Schmid Schrauben Hainfeld GmbH*:
 - Teilgewindeschrauben Schmid Star Drive, Senkkopf, gehärtet und gelb verzinkt, gemäß Zulassung Nr. Z-9.1-435
Abmessungen: 4,0×70 mm
Gewindelänge: ~40 mm
 - Teilgewindeschrauben Schmid Star Drive, Senkkopf, gehärtet und gelb verzinkt, gemäß Zulassung Nr. Z-9.1-435
Abmessungen: 6,0×300 mm
Gewindelänge: ~75 mm
 - Vollgewindeschrauben Schmid Star Drive, Senkkopf mit Unterkopfripen und Halbspitze, gehärtet und gelb verzinkt, gemäß Zulassung Nr. Z-9.1-656
Abmessungen: 8,0×300 mm
Gewindelänge: ~290 mm
- Firma *SPAX International GmbH & Co. KG*:
 - Vollgewindeschrauben Spax-S, Senkkopf mit Fräsrippen und CUT-Spitze, gehärtet, kunststoffgesintert, verzinkt und gelb passiviert, gemäß Zulassung Nr. Z-9.1-519
Abmessungen: 10,0×300 mm und 12,0×300 mm
Gewindelänge: ~280 mm
- Firma *SFS intec AG*:
 - Gewindestangen WB-T-20, ohne Kopf, galvanisch verzinkt und blau passiviert
Abmessungen: 20,0×600 mm
Gewindelänge: 600 mm

In Abb. 10 sind Skizzen und in Abb. 11 Details der verwendeten Schrauben ersichtlich, die weiteren Eigenschaften sind in Tab. 19 aufgelistet. Die in Abb. 11 definierten Bezeichnungen werden in dieser Arbeit verwendet. Mit den Holzschrauben der Firma *Schmid Schrauben Hainfeld GmbH* und dem Durchmesser von $d = 4$ mm wurden Prüfungen durchgeführt, um eine Aussage über die Ausziehfestigkeit in Abhängigkeit vom Durchmesser treffen zu können. Für den konstruktiven Holzbau sind Schrauben mit 4 mm Durchmesser nur nach SIA 265:2003 erlaubt. Für die Gewindestangen mit Gewinde nach DIN 7998:1975 der Firma *SFS intec AG* gibt es keine Zulassung. Sie dienen in der Regel als Querzugverstärkungen und sind als gute Alternative zu eingeklebten Gewindestangen zu sehen. Vor allem die Montage auf der Baustelle geht relativ einfach und schnell. Da das Einkleben durch das Einschrauben ersetzt wird, vereinfachen sich die Voraussetzungen bezüglich der

Umgebungs- und Holztemperatur, sowie der Holzfeuchte und es bleibt mehr Nettoquerschnitt erhalten. Die Gewindestangen $\varnothing 20$ mm wurden aus dem selben Grund wie die Schrauben $\varnothing 4$ mm verwendet. Es konnte eine große Bandbreite (von 4 mm bis 20 mm) aufgemacht und dadurch eine gute Aussage getroffen werden. Die Gewindestangen mit Holzschraubengewinde dürfen nach DIN 1052:2008 bemessen werden, d.h. auch auf eine axiale Beanspruchung. Die Auszieh Widerstände sind daher durchaus praxisrelevant, da auch für Querzugverstärkungen der Auszieh Widerstand bekannt sein muss. In der Vergangenheit wurden Holzschrauben mit einem Durchmesser von $d = 4$ mm und $d = 20$ mm kaum angewendet, doch die Erkenntnisse bezüglich des Auszieh Widerstandes und das aus dieser Arbeit resultierende Berechnungsmodell sollen auch in Zukunft tragfähig sein.

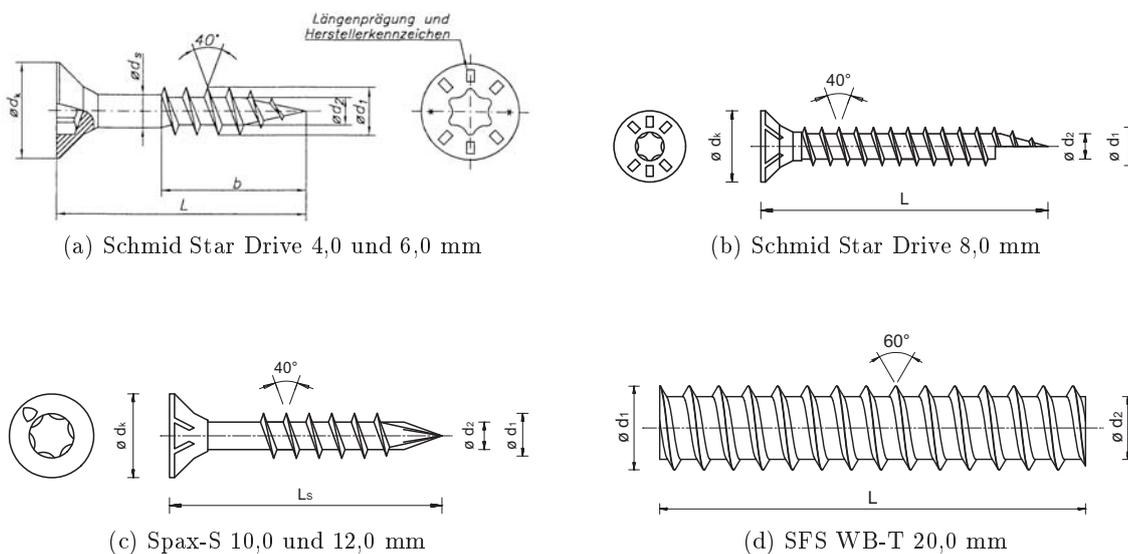


Abbildung 10: Skizzen der verwendeten Schrauben

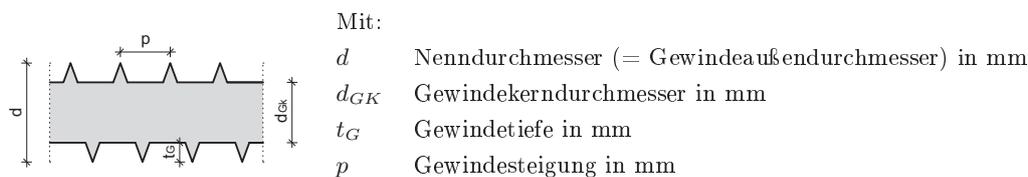


Abbildung 11: Details zu den verwendeten Schrauben

Die Lieferlänge der Gewindestangen betrug 3000 mm. Sie wurden mit einem Winkelschleifer auf eine Länge von 600 mm zugeschnitten. Zusätzlich wurde an einem Ende das Gewinde auf einer Länge von 100 mm bis auf den Kerndurchmesser abgedreht. Zum Einschrauben der Gewindestangen wurde eine Bohrmaschine mit hohem Drehmoment benötigt. Für WB-T-20 sollen laut SFS intec AG (2008) mindestens 220 Nm aufgebracht werden. Es kam der Viergang Drehbohrer DDsk 672-1 der Firma *C. & E. Fein GmbH (Schäbisch Gmünd-Bargau, D)* mit einer Nennaufnahme von 900 W und einer Leistungsabgabe von 500 W zum Einsatz. Als Aufsatz diente die Eindrehhülse ZE-20-WB und es wurde mit 100 U/min

Zulassung Nr.	Schmid Star Drive			Spax-S		SFS WB-T
	Z-9.1-435	Z-9.1-656		Z-9.1-519		-
d [mm]	4	6	8	10	12	20
d_{GK} [mm]	2,50	3,80	5,30	6,10	7,50	15,0
d_{GK}/d [-]	0,63	0,63	0,66	0,61	0,63	0,75
t_G [mm]	0,75	1,10	1,35	1,95	2,25	2,50
p [mm]	1,80	2,60	3,60	5,00	6,00	7,00
$R_{t,u,k}$ [kN]	4,5	10,5	23,0	28,0	38,0	141,4
$f_{t,u,k}$ [N/mm ²]	917	926	1043	958	860	800
Antrieb	TX 20	TX 30	TX 40	TX 50	TX 50	ZE-20-WB ¹⁾

Tabelle 19: Schraubengeometrie und charakt. Zugtragfähigkeit

Mit:

- $R_{t,u,k}$ Charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit
- $f_{t,u,k}$ Charakt. Zugfestigkeit, berechnet mittels $R_{t,u,k}$ und d_{GK}
- ¹⁾ Die Montagegeräte sind in Abb. 12 ersichtlich.

im ersten Gang eingeschraubt. Die Eindrehhülse konnte nur zum Eindrehen (nicht zum Herausschrauben) der Gewindestangen verwendet werden.

5.1.2 Verwendetes Holz

Die Prüfkörper wurden aus Brettschichtholz der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior* L.) hergestellt. Das Eschenholz stammt vom Hauptwuchsgebiet „Östliche Randalpen“ aus der „Buckligen Welt“ (Wuchsgebiet 5.2). In Abb. 13 sind die Hauptwuchsgebiete Österreichs ersichtlich.

Die Bloche wurden im Februar 2006 bzw. eine weitere Lieferung im Februar 2007 eingeschritten. Die Dicke der Lamellen, die vorerst im Rahmen einer Festigkeitssortierung Zugprüfungen unterzogen wurden, betrug 28 mm und 30 mm. Das Holz lagerte im Keller des Bautechnikzentrums der TU Graz. In weiterer Folge wurden die Lamellen je nach Bedarf klimatisiert, gehobelt, verklebt und für diverse Prüfungen eingesetzt (Querzugprüfungen etc.). Aus diesen BSH-Trägern sind nicht beschädigte Teile herausgeschnitten und wiederum im Keller gelagert worden. Es handelt sich also um kein speziell für diese Prüfungen ausgewähltes Holz. Für die Prüfkörper der Schraubenausziehprüfungen mit Einschraubwinkeln von 0° bis 75° wurden sechs BSH-Träger mit Querschnittsbreiten zwischen 128 mm und 149 mm, Querschnittshöhen zwischen 154 mm und 301 mm und einer Länge von 3 m hergestellt.

Klimatisierung Die Lamellen wurden im Normalklima, bei einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 5)\%$ und einer Temperatur von $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, bis zur Massekonstanz gelagert. Es kam zu einer Adsorption der Luftfeuchte durch das Holz und es stellte sich in etwa die untere Ausgleichsfeuchte, wie in Abb. 6 beschrieben, ein.

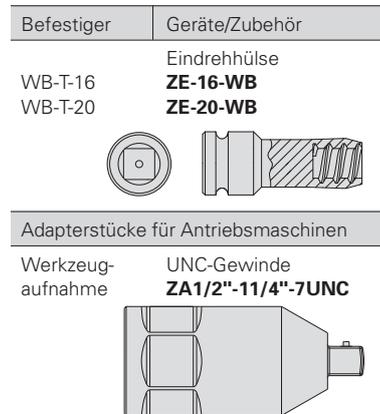


Abbildung 12: Montagegeräte SFS WB-T 20,0 mm

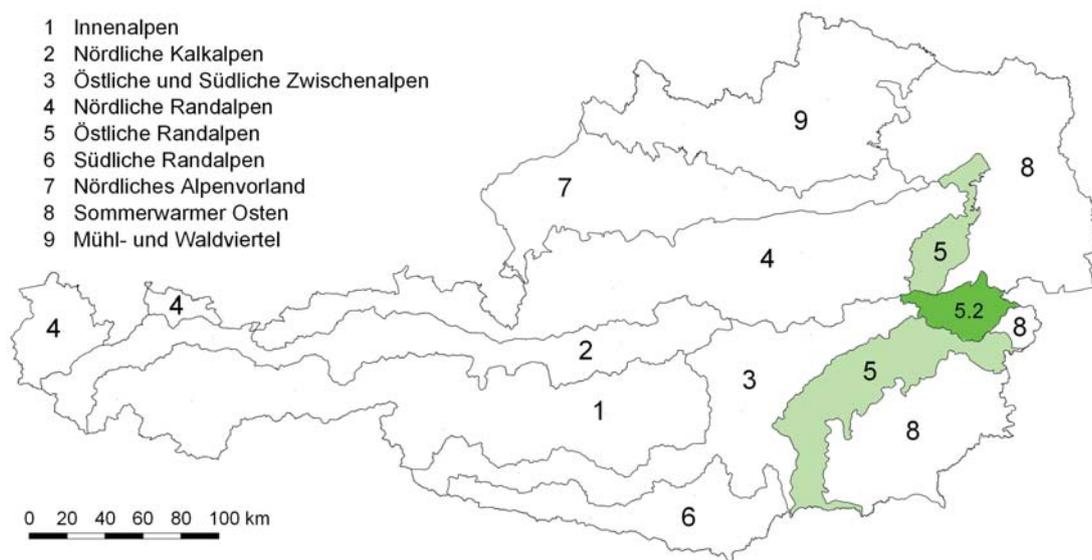


Abbildung 13: Hauptwuchsgebiete Österreichs

Verklebung Um eine gute Verklebung zu erhalten, wurden die Lamellen nach der Klimatisierung und erst kurz vor der Verklebung auf ca. 27 mm Dicke gehobelt, wie es der Hersteller BASF (2000b) empfiehlt. Die Verklebung der Lamellen erfolgte mit Kauramin[®] Leim 683 flüssig und Kauramin[®] Härter 688 flüssig nach dem Technischen Merkblatt BASF (2000a). Das Dosierverhältnis betrug 100 Gew.-Teile Leim zu 60 Gew.-Teile Härter. Das Klebstoffsystem wurde beidseitig mit ca. 300 g/m² im untergemischten Verfahren aufgetragen. Mit einem Pressdruck von 1 N/mm² konnte sichergestellt werden, dass an jeder Klebefuge durchgehend Leimperlen austraten. Die offene Antrockenzeit betrug bei ca. 20 °C und rund 45 % rel. Luftfeuchte 90 min, die Verpressung erfolgte bei der gleichen Klimabedingung mit einer Presszeit von mindestens 4 h 30 min. Für die Prüfungen mit den Gewindestangen ($d = 20$ mm) und dem Einschraubwinkel von 90° wurden 12

Prüfkörper neu verklebt⁹. Auf die nach ihrer Rohdichte sortierten Lamellen wurde dasselbe Klebstoffsystem unter den gleichen Bedingungen aufgetragen. Unmittelbar nach dem Klebstoffauftrag erfolgte eine Aufschlichtung der Lamellen und eine geschlossene Wartezeit von ca. 1 h. Bei der Verklebung von Buchenholz konnten Schmidt u. a. (2009) feststellen, dass ohne offene Antrockenzeit und bei längeren geschlossenen Wartezeiten die Delaminierung der Fugen zurückgeht. Im Rahmen der Querkzugprüfungen wurde die Scherfestigkeit der Klebefugen nach ON EN 392:1995 an 69 Fugen überprüft. Dabei wurde eine mittlere Scherfestigkeit von 14,2 N/mm² festgestellt. Das 5%-Perzentil betrug 10,7 N/mm² und der Variationskoeffizient (COV) 13,1 % (Hübner, 2010a).

5.2 Prüfkonfiguration

5.2.1 Prüfkörper - Serien

Die verwendeten Schraubendurchmesser waren 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm und 20 mm. Eine Prüfserie besteht aus 60 Prüfungen. Die untersuchten Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung wurden bei den Durchmessern 6 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm von 0° bis 90° in 15°-Schritten variiert, das entspricht 28 Serien. Mit dem Schraubendurchmesser von 4 mm und 20 mm wurden in einem Winkel von 0° und 90° Prüfungen mit vier Serien durchgeführt. Um den Einfluss der Schraubenspitze zu bestimmen, wurden mit 8 mm, 10 mm und 12 mm Durchmesser zusätzlich unter einem Winkel von 0° und 90° sechs Serien geprüft. Im Rahmen der dieser Arbeit vorangegangenen Bakkalaureatsarbeit wurden Schrauben mit einem Durchmesser von 8 mm quer zur Faser auf ihren Auszieh Widerstand hin geprüft. Kummer und Lögl (2009) bestimmten die Abhängigkeit der Ausziehfestigkeit von der Einschraubtiefe und auch den Einfluss der Schraubenspitze. Die Daten dieser Prüfungen wurden ebenfalls in die Auswertung einbezogen. In Summe wurden 42 Serien mit 2581 Ausziehprüfungen durchgeführt.

Für die Einschraubwinkel von 0° bis 75° wurden die Prüfkörper aus sechs BSH-Trägern dem Winkel entsprechend schräg herausgeschnitten. Nach ON EN 1382:1999 muss die Einschraubtiefe zwischen $8d$ und $20d$ liegen. Da der Auszieh Widerstand des Eschen-Brettschichtholzes höher als jener des Nadelholzes ist, musste die Einschraubtiefe deutlich reduziert werden. Die Einschraubtiefen lagen bei den Prüfkörpern für Schrauben mit einem Durchmesser von 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm bei $6d$. Die Prüfkörper für die Serien mit $d = 12$ mm hatten eine Einschraubtiefe von $5d$ und die für die Serien mit $d = 20$ mm $8d$. Zur Bestimmung des Einflusses der Einschraubtiefe wurden im Zuge der Bakkalaureatsarbeit die Schrauben mit $d = 8$ mm zusätzlich in Prüfkörper mit einer Dicke von $4d$ und $8d$ eingeschraubt.

Die Abstände der Schrauben zu den Rändern der Prüfkörper betrug im Regelfall mindestens $5d$. 33 Stück der Prüfkörper für die Gewindestangen mit $d = 20$ mm und dem Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$ hatten eine Breite von 134 mm und eine Länge von 182 mm. Der Randabstand betrug daher nur 67 mm bzw. 91 mm. Die restlichen Prüfkörper der Serien mit $d = 20$ mm hatten eine Mindestbreite von 149 mm, d. h. der Randabstand hatte einen Wert von $a \geq 74,5$ mm. Wurden aus einem Prüfkörper mehrere Schrauben gezogen, so betrug auch hier der Abstand der Schrauben untereinander mindestens $5d$.

Tab. 20 gibt einen Überblick über die untersuchten Serien. An die Bezeichnung ist ein „S“ angehängt, falls die Schrauben bündig mit der Unterseite abschlossen, d. h. auch die

⁹Die restlichen Prüfkörper wurden aus Querkzugprüfkörper-Resten zugeschnitten

Schraubenspitze im Prüfkörper eingebettet war. Die Bezeichnung lautete dann zum Beispiel ES08_00_48S. Bei allen übrigen Prüfkörpern wurden die Schrauben durchgeschraubt, sodass die Schraubenspitze und der teilweise am Gewindeteil vorhandene Wellenschliff außerhalb des Prüfkörpers lagen.

Bezeichnung der Serie	Material	Schraubendurchmesser in mm	Winkel α in Grad	Dicke in mm
ES04_ $\alpha\alpha$ _24	BSH	4	0 und 90	24
ES06_ $\alpha\alpha$ _36	BSH	6	0, 15 ... 90	36
ES08_90_32(S)	BSH	8	90	32
ES08_ $\alpha\alpha$ _48(S)	BSH	8	0, 15 ... 90	48
ES08_90_64(S)	BSH	8	90	64
ES10_ $\alpha\alpha$ _60(S)	BSH	10	0, 15 ... 90	60
ES12_ $\alpha\alpha$ _60(S)	BSH	12	0, 15 ... 90	60
ES20_ $\alpha\alpha$ _160	BSH	20	0 und 90	160

Tabelle 20: Bezeichnung der Serien

Die Nummerierung der einzelnen Prüfkörper begann pro Serie bei Eins und die Beschriftung lautete demnach z. B. ES06_15_36_PK-4. ES steht für Esche, 06 für den Durchmesser d (hier 6 mm), 15 für den Einschraubwinkel α (hier 15°), 36 für die Einschraubtiefe l_{ef} bei durchgeschraubten Schrauben bzw. l_{nom} bei mit der Schraubenspitze eingebetteten Schrauben (hier 36 mm), PK für Prüfkörper und 4 für die Nummer des Prüfkörpers.

5.2.2 Vorbohrung

Nach ON EN 1995-1-1:2009 sind Schrauben in Laubholz mit einem Durchmesser von $d > 6$ mm vorzubohren. Das Führungsloch soll im Gewindeteil dem 0,7-fachen Außendurchmesser und im Schaftteil dem Schaftdurchmesser entsprechen. Bei bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben darf der Durchmesser der Vorbohrung nicht größer als der Gewindekerndurchmesser sein. Der erforderliche Durchmesser sollte bei Rohdichten über 500 kg/m^3 durch Prüfungen ermittelt werden. In Tab. 21 sind die eingesetzten Vorbohrdurchmesser d_{VB} im Vergleich zum 0,7-fachen Außendurchmesser und dem Kerndurchmesser dargestellt. Der Durchmesser des Führungsloches lag immer unter $0,7 \cdot d$ bzw. unter d_{GK} , außer bei den Schrauben mit 4 mm und 12 mm Durchmesser und bei den Gewindestangen.

Die Gewindestangen wurden genau mit dem Kerndurchmesser vorgebohrt, da es die *SFS intec AG* so empfiehlt. Die ersten 80 mm wurden mit einer Ständerbohrmaschine (80 mm Hub) gebohrt, um die Führungslöcher möglichst rechtwinkelig zur Holzoberfläche herzustellen. Für die restlichen 80 mm kam eine Handbohrmaschine zum Einsatz.

Bei allen Prüfkörpern verlief die Achse der Vorbohrung rechtwinkel zur Holzoberfläche. Die Führungslöcher wurden durchnummeriert und die Nummer an die Prüfkörperbezeichnung angefügt, sodass die endgültige Bezeichnung für eine Prüfung zum Beispiel ES06_15_36_PK-4-41 lautete.

	d_{VB} [mm]	$0,7 \cdot d$ [mm]	d_{GK} [mm]
$d = 4$ mm	2,50	2,80	2,50
$d = 6$ mm	3,50	4,20	3,80
$d = 8$ mm	5,00	5,60	5,30
$d = 10$ mm	6,00	7,00	6,10
$d = 12$ mm	7,50	8,40	7,50
$d = 20$ mm	15,0	14,0	15,0

Tabelle 21: Vorbohrdurchmesser

5.2.3 Sicherung gegen Querkzugversagen

Die Prüfkörper für die Gewindestangen mit $d = 20$ mm wurden gegen Querkzugversagen gesichert. Beim Einschraubwinkel von $\alpha = 0^\circ$ kamen acht Holzschrauben $\varnothing 8/160$ mm und bei $\alpha = 90^\circ$ vier Holzschrauben $\varnothing 8/160$ mm zum Einsatz. Die Schrauben wurden mit $d = 5$ mm vorgebohrt.

5.2.4 Prüfvorrichtung

Alle Schrauben wurden in die vorgebohrten Löcher maschinell eingedreht und in axialer Richtung beansprucht. Zur Durchführung der Prüfungen wurde eine Prüfvorrichtung eingerichtet, welche an die unterschiedlichen Serien angepasst werden konnte (siehe Abb. 14).

Für die Prüfungen mit 6 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm Durchmesser dienten 12 mm dicke Unterlegscheiben mit einer Einfräse in der Form des Senkkopfes der jeweiligen Schrauben zur Übertragung der Kraft in die Schrauben. Die Unterlegscheiben wurden in eine 40 mm dicke, profilierte Stahlplatte, die starr mit dem Ausziehkopf der Prüfmaschine verbunden war, eingelegt. Um eine zentrische Krafteinleitung zu ermöglichen, entsprach die Profilierung der Stahlplatte den Unterlegscheiben. Die Prüfkörper wurden gegen eine weitere Stahlplatte gezogen. Es gab vier Stahlplatten, die je nach Schraubendurchmesser eine $4d$ -Bohrung aufwiesen. Nach ON EN 1382:1999 muss jeder Teil der Auflagerungen mindestens $3d$ von der Schraubenachse entfernt sein. Aufgrund der $4d$ -Bohrung betrug der Abstand der Auflagerplatten zu den Schraubenachsen nur $2d$, d.h. der erforderliche Abstand wurde um $1d$ unterschritten. In die Bohrung der Platten wurden passgenaue Ringe eingesetzt, die eine Zentrierung der Schrauben in der Auflagerplatte ermöglichten. Nach dem Erreichen der Vorkraft wurden die Zentrierringe herausgezogen, damit die Prüfung nicht durch Verkanten der Ringe beeinflusst werden konnte. Schrauben mit $d = 6$ mm wurden mit freiem Auge und mit Hilfe von Markierungen auf der Oberfläche der Auflagerplatte in die Achse der Bohrung gebracht. Mittels Schraubzwingen wurden die Auflagerplatten an zwei 20 mm dicken Stahlplatten fixiert. Die Stahlplatten waren durch jeweils vier Gewindestangen M 16 am unteren Biegebalken der Prüfmaschine angeschraubt. Der Abstand zwischen den Stahlplatten und dem unteren Biegebalken betrug 470 mm.

Die Prüfvorrichtung musste für die Schrauben mit 4 mm und 20 mm Durchmesser adaptiert werden. Da die Schrauben mit 4 mm Durchmesser nur 70 mm lang sind, wurde ein u-förmiges Stahlteil mit einer Länge von 205 mm angefertigt (siehe Abb. 15a), das anstatt des oben beschriebenen Ausziehkopfes die Schrauben fasste und herauszog. In Abb. 15b

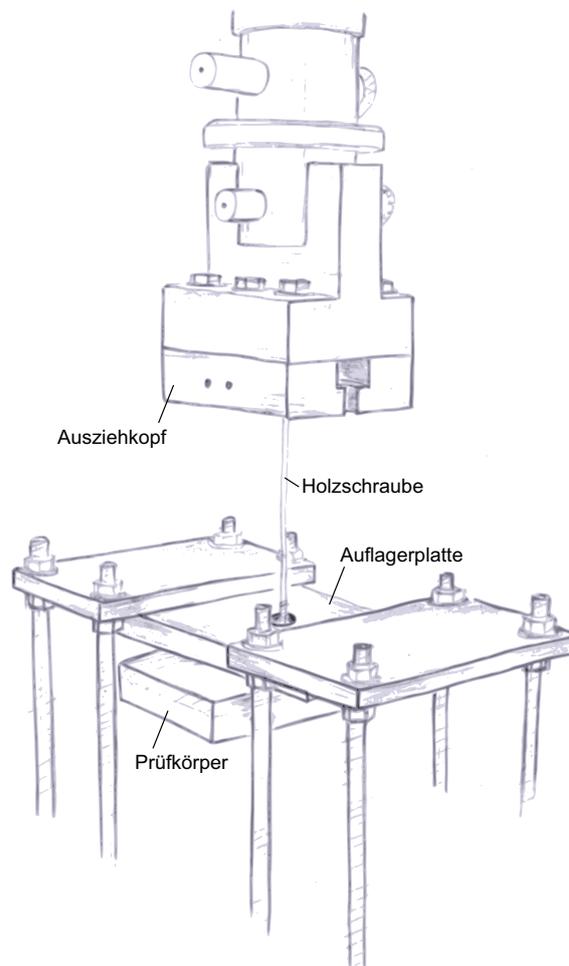


Abbildung 14: Prüfvorrichtung

sieht man das geschlitzte Blech in das der Schraubenkopf eingefädelt wurde. Die Prüfkörper wurden gegen die gleiche Stahlplatte wie die Prüfkörper für die Schrauben mit 6 mm Durchmesser gezogen. Die Bohrung der Stahlplatte hatte 24 mm Durchmesser, es konnten daher die erforderlichen $3d$ Abstand zur Schraubennachse eingehalten werden. Die Zentrierung der Schrauben erfolgte wie bei den Schrauben mit 6 mm Durchmesser. Bei den Gewindestangen WB-T-20 waren Ausziehkräfte bis zu 141,4 kN (char. Wert der Zugtragfähigkeit) zu erwarten, deshalb musste die Prüfvorrichtung dementsprechend angepasst werden. Abb. 16a zeigt die Haltevorrichtung. Die Prüfkörper wurden gegen zwei 30 mm dicke Stahlplatten gezogen. Zwischen diese beiden Platten wurden die Prüfkörper eingeführt. Der kleinste Abstand zur Gewindestangenachse betrug $2d$, d. h. der erforderliche Abstand wurde wiederum um $1d$ unterschritten. Das abgedrehte Gewindestangenende wurde in den Probenhalter 647 Hydraulic Wedge Grip mit Hilfe von hydraulischen Spannbacken eingespannt (siehe Abb. 16b).



(a) Prüfvorrichtung für $d = 4$ mm



(b) Schraubenhalterung für $d = 4$ mm

Abbildung 15: Adaption der Prüfvorrichtung für $d = 4$ mm

5.3 Durchführung der Prüfungen

Zur Durchführung der Ausziehprüfungen kam die zweiseindelige, statische Universalprüfmaschine Zwick Roell Z250 der Firma *Zwick GmbH & Co. KG (Ulm, D)*, mit einer Maximalkraft von $F_{max} = 275$ kN, zum Einsatz (Zwick/Roell, 2010b). Die Maschine besteht aus einem Rahmen mit einer feststehenden und einer beweglichen Traverse. Die bewegliche Traverse wird mit den elektrisch angetriebenen Spindeln gesteuert, dabei fährt die Traverse mit einer konstanten Geschwindigkeit je nach Bedarf nach oben oder unten. Um Ausziehprüfungen durchführen zu können, wurde die Prüfvorrichtung so eingerichtet, dass mit dem Anheben der beweglichen Traverse die Schrauben aus dem Prüfkörper gezogen wurden. Die Prüfungen wurden gemäß ON EN 1382:1999 durchgeführt, diese schreibt vor, dass das Versagen nach (90 ± 30) s eintreten soll. Die Belastung erfolgte weggesteuert, dabei wurde die Belastungsgeschwindigkeit im Bereich zwischen $0,7$ mm/min bei $\varnothing 4$ mm und $3,5$ mm/min bei $\varnothing 20$ mm eingestellt, um die maximale Ausziehkraft nach (90 ± 30) s zu erreichen. Es werden in diesem Fall die Kurzzeitfestigkeiten ermittelt.

Um die Prüfkörper zentrieren zu können, wurde eine Vorkraft von 200 N eingestellt, die für 10 s weggesteuert gehalten wurde. In dieser Zeit konnte der Prüfkörper noch bewegt und genau eingerichtet werden. Danach begann die Prüfung mit der eingestellten Geschwindigkeit.

Pro Serie gab es ein Prüfprotokoll in dem jede Prüfung handschriftlich dokumentiert wurde. Es wurden die Prüfkörpernummer, die Dateinummer, die maximale Ausziehkraft R_{ax} und Bemerkungen notiert. Unter Bemerkungen wurden die Prüfgeschwindigkeit, besondere Wuchsmerkmale des Prüfkörpers (wie Äste, Markröhren, große Jahrringbreiten etc.) sowie Schraubenbrüche oder sonstige Auffälligkeiten eingetragen. Die Prüfgeschwindigkeit hängt vom Durchmesser und vom Einschraubwinkel ab, deswegen musste sie nahezu bei jeder

(a) Prüfvorrichtung für $d = 20$ mm(b) Klemmeinrichtung für $d = 20$ mmAbbildung 16: Adaption der Prüfvorrichtung für $d = 20$ mm

Serie geändert werden. Weiters wurde noch das Datum, die Serie, die Seriennummer der verwendeten Schrauben und die Vorkraft dokumentiert.

5.3.1 Messeinrichtung

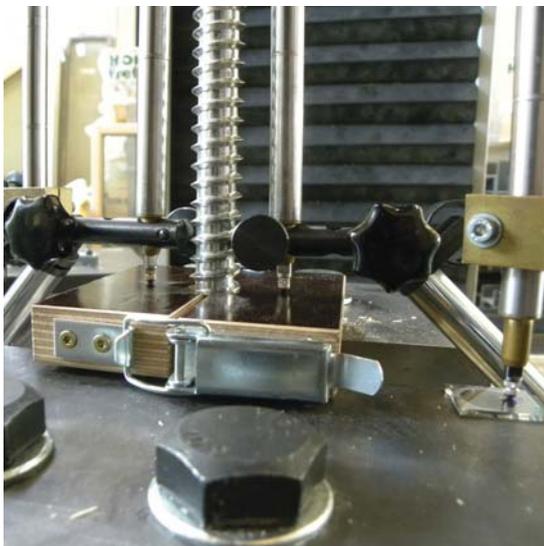
Die interne Messeinrichtung der Prüfmaschine zeichnete während der Prüfung:

- die Kraft mittels Kraftmessdose [N],
- die Zeit [s] und
- den Weg [mm]

auf. Die Kraftmessung erfolgte mit Kraftaufnehmern der Serie Xforce K der Firma *Zwick GmbH & Co. KG* (Zwick/Roell, 2010a). Bei den Serien mit 6, 8, 10 und 12 mm Durchmesser wurde eine Kraftmessdose mit einer maximalen Nennkraft von 250 kN verwendet. Für die Prüfungen mit dem Schraubendurchmesser $d = 4$ mm wurden Kräfte unter 10 kN erwartet, deswegen kam hier eine kleinere Kraftmessdose mit einer maximalen Nennkraft von 10 kN zum Einsatz. Die Messung erfolgte mit einer Genauigkeit von mindestens 0,001 % der Nennkraft des Kraftaufnehmers oder 0,25 % des Messwertes (ab 0,4 % der Nennkraft), je nachdem welcher Wert größer war. Zur Aufzeichnung der Daten diente das Programm testXpert V11.02 der Firma *Zwick GmbH & Co. KG*. Nach einer Abnahme der Kraft auf 80 % der maximal erreichten Ausziehkraft wurde die Prüfung beendet. Bei Schraubenbrüchen kam es somit zu einem schlagartigen Prüfungsabbruch.

Bei den zwei Serien mit $d = 20$ mm wurden zusätzlich sechs induktive Wegaufnehmer W10TK der Firma *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* (Darmstadt, D) (kurz *HBM*) in Magnetstativen eingerichtet um die Verformungen zu messen. Die Wegaufnehmer haben einen Nennweg von 10 mm und eine Kennwerttoleranz von 1 %. Die Magnetstative standen

auf dem unteren Biegebalken der Prüfmaschine, d. h. es wurden die vertikalen Relativbewegungen gegenüber dem Biegebalken gemessen. Oberhalb der Auflagerplatten wurde eine speziell angefertigte Klemmvorrichtung an die Gewindestangen angebracht und links und rechts von der Stange die Vertikalverschiebung gemessen. Die Verformungen der beiden Auflagerplatten wurden mittels zwei weiteren Wegaufnehmern gemessen. In Abb. 17a sind die oberhalb des Prüfkörpers angebrachten Wegaufnehmer zu sehen. Unterhalb des Prüfkörpers wurde auf das Ende der Stange eine Aluminiumleiste geklebt und wiederum mit zwei Wegaufnehmern die Verformung gemessen (siehe Abb. 17b). Die Daten wurden über die Messanlage Spider 8 (acht Schnittstellen) durch das Messwerterfassungsprogramm CAT-MAN 4.5 der Firma *HBM* aufgezeichnet.



(a) Messeinrichtung oberhalb des Prüfkörpers



(b) Messeinrichtung unterhalb des Prüfkörpers

Abbildung 17: Verformungsmessung mittels induktiver Wegaufnehmer

5.3.2 Messrate

Die interne Erfassungsrate der Prüfmaschine kann bis zu 500 Hz betragen. Die Prüfungen wurden mit einer Messrate von 5 Hz erfasst. Die Messdaten wurden als TRA- bzw. DAT-Dateien gespeichert.

5.3.3 Nachbearbeitung

Nach der Prüfung wurden die Schrauben wieder maschinell aus den Prüfkörpern herausgeschraubt. Die Gewindestangen wurden mit Hilfe der Prüfmaschine aus den Prüfkörpern herausgezogen. Dabei wurden unter dem Einschraubwinkel von $\alpha = 0^\circ$ die Fasern spiralenförmig abgeschert (siehe Abb. 18).

Rohdichte- bzw. Darrproben Um die Führungslöcher herum wurden quaderförmige Proben zur Bestimmung der Rohdichte und der Holzfeuchte herausgeschnitten. Die Größe der



Abbildung 18: Spiralenförmiges Abscheren der Fasern

Proben betrug $4d \times 4d \times \text{Prüfkörperdicke}$. Die genauen Abmessungen wurden mit einer digitalen Schiebelehre und die Masse der klimatisierten Proben mit einer Präzisionswaage auf zwei Kommastellen genau bestimmt.

Trocknung und Rückwägung Danach kamen die Proben in den Darrschrank und wurden bei $(103 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Nach ON EN 13 183-1:2004 sind die Proben darrtrocken, wenn der Masseunterschied zwischen zwei Wägevorgängen im Abstand von zwei Stunden geringer als 0,1 % ist. Je nach Probengröße wurde die Massekonstanz nach vier bis fünf Tagen erreicht. Die Darmasse wurde, unmittelbar nachdem die Proben aus dem Darrschrank entnommen wurden, wiederum mit der Präzisionswaage bestimmt.

Datenerfassung Die Daten wurden in eine Excel-Datei eingegeben und die Rohdichte bzw. die Holzfeuchte berechnet.

Die Rohdichte und die Holzfeuchte sind normalverteilte Größen (vgl. Q-Q-Plots im Anhang A.1 und Anhang B.1). In den Q-Q-Plots der Rohdichte ist zu sehen, dass vor allem im unteren Wertebereich (für das 5%-Perzentil relevant), die Normalverteilung besser als die Log-Normalverteilung an die empirische Verteilung angepasst ist. In den Q-Q-Plots der Holzfeuchte zeigen die empirischen Werte wiederum im unteren Wertebereich deutliche Abweichungen zu der Normal- bzw. Log-Normalverteilung. Diese Abweichungen kommen aus den großen Streuungen der Holzfeuchte bei der Serie ES04_90_24 mit einem Variationskoeffizienten (COV) von 7,6 % (vgl. Tabelle im Anhang B.2). Hier hatten 41,9 % der Werte eine Holzfeuchte unter 10,0 % (26 von 62 Prüfungen). Im Vergleich dazu gab es nur weitere 7 von den insgesamt 2581 Prüfungen mit einem Wert von $u < 10,0 \%$. Der Grund für die niedrigen Holzfeuchten bei Serie ES04_90_24 konnte nicht festgestellt werden, es lagerten alle Prüfkörper dieser Serie gleich lang in der Klimakammer. Im oberen Wertebereich ist die Normalverteilung besser als die Log-Normalverteilung an die empirische Verteilung der Holzfeuchte angepasst.

Aufgrund der Normalverteilung liegen 95,4% der Ergebnisse im Intervall $\mu \pm 2\sigma$. Mittels bedingter Formatierung wurden alle Werte einer Serie mit einer Abweichung vom Mittelwert, die größer war als die doppelte Standardabweichung, markiert. So konnten eventuelle Tipp- oder Messfehler sofort erkannt und ausgebessert werden.

Bei der Berechnung des Volumens wurde die Vorbohrung bzw. bei den Proben der Gewindestangen unter dem Einschraubwinkel von $\alpha = 0^\circ$ ein Zylinder mit $d = 20$ mm abgezogen. Die Führungslöcher der Quersugsicherungen wurden auch abgezogen.

Die Prüfkörper der Gewindestangen mit dem Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$ wurden in der Achse des Führungsloches und entlang der Faserrichtung aufgeschnitten, um zu sehen in welchem Bereich die Fasern aufgebogen bzw. abgerissen werden. Dieser Bereich wurde markiert und fototechnisch dokumentiert. Die Rohdichte- bzw. Darrprobe musste bei diesen Prüfkörpern somit neben dem Führungsloch herausgeschnitten werden.

6 Auswertung

Die Prüfungsergebnisse und die Daten der Rohdichte- bzw. Darrproben wurden in einer Excel-Datei gespeichert. Nachfolgend sind die wesentlichen Spalten der Excel-Tabelle aufgelistet:

- Allgemein
 - Serie
 - Prüfkörper-Nummer
 - Schraubenummer
 - Holzart
 - Zulassung (falls vorhanden)
 - Abmessung Darrprobe (Dicke; Breite; Länge)
 - Masse Darrprobe (vor der Trocknung; nach der Trocknung)
 - Holzfeuchte
 - Ausziehungskraft (tatsächliche; auf 12 % Holzfeuchte korrigierte)
 - Ausreißer
- Einflussparameter
 - Durchmesser (der Schrauben; der Vorbohrung)
 - Einschraubwinkel (in Grad; in rad)
 - Einschraubtiefe (nominelle; effektive)
 - Rohdichte (ρ_{12} - auf 12 % Holzfeuchte korrigierte; ρ_{05} - charakteristische Rohdichte)
- Auswertung
 - Scherfestigkeit (normal berechnet; auf ρ_{mean} korrigiert; auf ρ_{mean} korrigiert und auf $d = 10$ mm normiert)
 - berechnete Ausziehungskraft (Formel von der Regressionsanalyse)
 - charakteristische Ausziehungskraft (parallel verschobener Hankinson-Verlauf; bilinearer Verlauf)

In den folgenden Abschnitten wird auf die Einflussparameter und die Ergebnisse der Auswertung eingegangen. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm IBM SPSS Statistics 17.0 (2008).

6.1 Rohdichte

Die Rohdichte wurde auf die Referenzholzfeuchte von $u = 12\%$ umgerechnet. Die ON EN 384:2004 schreibt vor, dass bei einer Holzfeuchte von mehr als 12 %, die Rohdichte je Prozent Holzfeuchteminderung um 0,5 % zu verringern ist. Beträgt die Holzfeuchte weniger

als 12 %, muss die Rohdichte je Prozent Holzfeuchtedifferenz um 0,5 % erhöht werden. Glg. (22) zeigt wie die Rohdichte umgerechnet wurde:

$$\rho_{12} = \rho_i \cdot \left[1 + (12 - u_i) \cdot \frac{0,5}{100} \right] \quad (22)$$

Mit:

- ρ_{12} Rohdichte bei $u = 12\%$
- ρ_i Rohdichte bezogen auf u_i
- u_i tatsächliche Holzfeuchte einer Darrprobe

In Abb. 20a ist ein Histogramm der Rohdichten aller Proben dargestellt. Der Mittelwert lag bei $\rho_{mean} = 745,9 \text{ kg/m}^3$, der 5%-Perzentilwert bei $\rho_{05} = 667,1 \text{ kg/m}^3$ und der 95%-Perzentilwert bei $\rho_{95} = 824,6 \text{ kg/m}^3$. Der Minimalwert der Rohdichten betrug $\rho_{min} = 555,0 \text{ kg/m}^3$ und der Maximalwert $\rho_{max} = 917,8 \text{ kg/m}^3$. Die Standardabweichung betrug $47,9 \text{ kg/m}^3$ und der Variationskoeffizient (COV) ergab sich damit zu 6,4 %. Laut DIN 68 364:2003 liegt der Variationskoeffizient der Rohdichte von Eschenholz bei 9,3 %. Durch die Homogenisierung bei der BSH-Herstellung sinkt der Variationskoeffizient deutlich gegenüber Vollholz. Bei den vorangegangenen Lochleibungsprüfungen mit Eschenvollholz des gleichen Grundmaterials wurde ein Variationskoeffizient von 8,6 % festgestellt (Hübner, 2010b). Die Histogramme der Rohdichten getrennt nach Schraubendurchmesser genauso wie eine Auflistung von 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie Standardabweichung und Variationskoeffizient je Serie sind im Anhang A.2 zu finden. Die Boxplots der Rohdichten der einzelnen Serien bei 12 % Holzfeuchte sind in Abb. 19 ersichtlich. Die strichlierte Linie steht für ρ_{mean} , die fein strichlierten Linien stehen für ρ_{05} und ρ_{95} . Die Rohdichten der Serien ES06_90_36 und ES20_90_160 sind etwas erhöht.

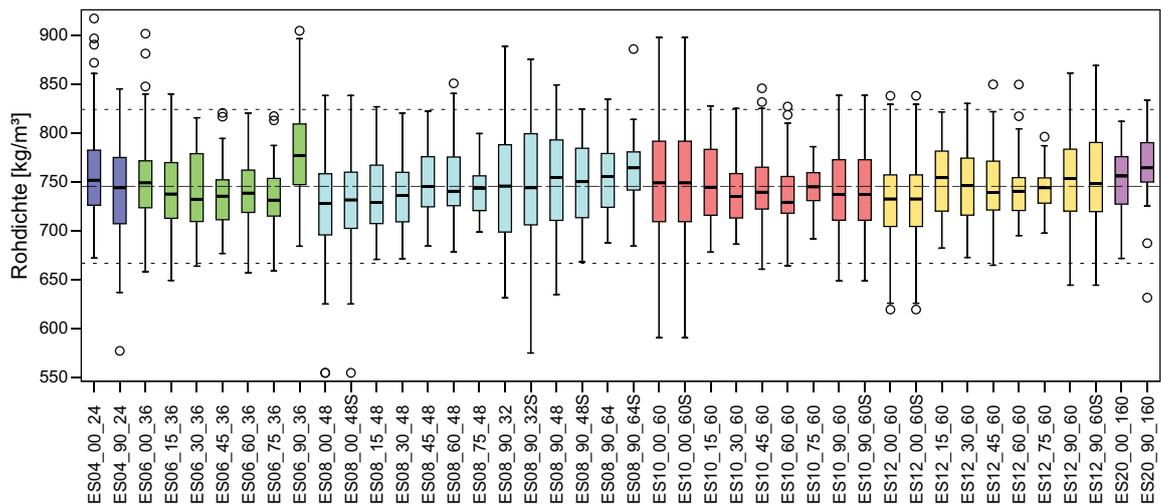


Abbildung 19: Boxplots der Rohdichten der einzelnen Serien bei 12 % Holzfeuchte

Den Ausreißern der Rohdichte wurde nicht nachgegangen, da ihre Entfernung zu den oberen bzw. unteren Whiskern gering ist. Es handelt sich um „milde Ausreißer“, sie liegen im Bereich vom 1,5fachen bis 3fachen Interquartilsabstand (interquartile range, IQR).

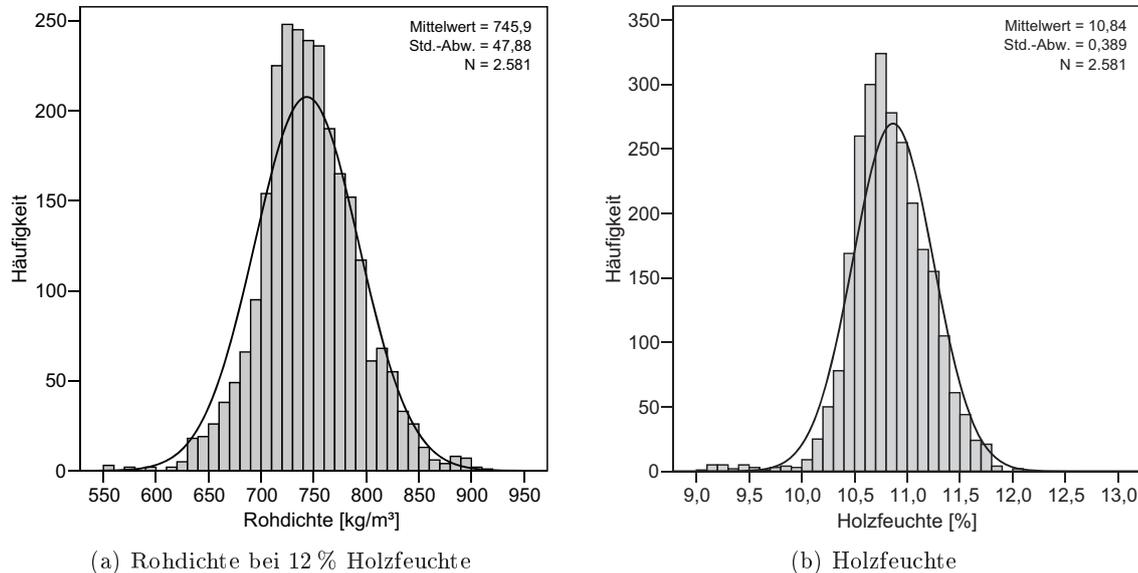


Abbildung 20: Histogramm zur Rohdichte und zur Holzfeuchte

6.2 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte wurde nach ON EN 13 183-1:2004 an den Proben bestimmt. Der Mittelwert lag bei $u_{mean} = 10,84\%$. Die Standardabweichung betrug $0,39\%$ und der Variationskoeffizient (COV) $3,6\%$. Der Minimalwert der Holzfeuchten lag bei $u_{min} = 7,47\%$ und der Maximalwert bei $u_{max} = 14,78\%$. Das Histogramm zur Holzfeuchte aller Proben ist in Abb. 20b ersichtlich. Im Anhang B.2 sind die Histogramme der Holzfeuchten getrennt nach Schraubendurchmesser abgebildet. Beim Histogramm für die Schrauben mit dem Durchmesser von $d = 4$ mm ist zu sehen, dass viele Werte unter $10,0\%$ Holzfeuchte liegen. Die dazugehörigen Prüfungen stammen von der Serie ES04_90_24 (vgl. Abschnitt 5.3.3). Eine Auflistung von 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie Standardabweichung und Variationskoeffizient je Serie sind ebenso im Anhang B.2 zu finden. Da das Eschenholz vor der Klimatisierung in einem trockenerem Klima lagerte, können die $10,84\%$ als untere Ausgleichsfeuchte angesehen werden. Die Untersuchungen von Kollmann (1941) ergeben eine untere Ausgleichsfeuchte von $u = 10,7\%$ (vgl. Abb. 6), somit einen in diesem Bereich liegenden Wert.

6.3 Ausziehkraft

Die bei der Prüfung ermittelte, maximale Ausziehkraft R_{test} wurde auf die Referenzholzfeuchte von $u = 12\%$ korrigiert. Nach den Untersuchungen von Cockrell (1933) sinkt die Ausziehkraft bei Holzarten mit einer Rohdichte $\rho_{12} \geq 650$ kg/m³ um $1,9\%$ je Prozent Holzfeuchtesteigerung. Die Korrektur der Ausziehkraft auf 12% Holzfeuchte ist in Glg. (23) ersichtlich.

$$R_{test,korr} = R_{test} \cdot \left[1 - (12 - u_i) \cdot \frac{1,9}{100} \right] \quad (23)$$

Mit:

$R_{test,korr}$	Ausziehungskraft auf $u = 12\%$ korrigiert
R_{test}	bei der Prüfung bestimmte Ausziehungskraft
u_i	tatsächliche Holzfeuchte einer Darrprobe

Eine Tabelle mit dem 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten je Serie ist im Anhang C zu finden.

6.4 Ausreißerbereinigung

Der nächste Schritt war die Überprüfung der einzelnen Serien auf Ausreißer und Extremwerte. Komplette aus der Auswertung ausgeschlossen wurden Prüfungen bei denen

- es zu einem Prüfungsabbruch kam (z. B. durch einen Stromausfall),
- die Unterlegscheibe gerissen war,
- ein falscher Schraubendurchmesser verwendet wurde oder
- ein ausgefallener Ast genau an der Stelle des Führungsloches war.

In Tab. 22 sind die ausgeschlossenen Prüfungen aufgelistet.

Ausschlusskriterium	Prüfung
Unterlegscheibe gerissen	ES06_60_36_PK-6-33
Prüfungsabbruch	ES08_60_48_PK-1-54
	ES08_60_48_PK-5-1
	ES10_15_60_PK-1-27
	ES10_90_60_PK-14-1
ausgefallener Ast	ES08_90_32S_PK-6-5
	ES10_60_60_PK-3-50
falscher Durchmesser	ES12_00_60_PK-1-2

Tabelle 22: Ausgeschlossene Prüfungen

Schraubenbrüche wurden in die Auswertung miteinbezogen. Sie stellten eine Mindestfestigkeit des Holzes dar, d. h. das Holz hätte noch mehr ausgehalten, aber die Schraube hatte bereits ihre Zugfestigkeit erreicht. Prüfungen, bei denen es zu einem Schraubenbruch kam, sind in Tab. 23 ersichtlich.

Zur Ermittlung der Ausreißer für die Regressionsanalyse wurden die Ausziehungskräfte R_{test} über den dazugehörigen Rohdichten ρ_{12} einer Serie in Streudiagrammen dargestellt. In diese Streudiagramme wurden lineare Anpassungslinien und ein 95%-Konfidenzintervall eingezeichnet. Ausziehungskräfte unter der 2,5%-Grenze und über der 97,5%-Grenze wurden bei der Regressionsanalyse ausgeschlossen, da sie das Ergebnis verfälscht hätten. In Abb. 21 sind als Beispiel die Streudiagramme der Serien ES08_15_48 und ES08_90_48 dargestellt. Die durchgezogene Linie stellt die lineare Anpassungslinie dar, die strichlierten Linien die obere und untere Grenze des Konfidenzintervalls.

Serie	Prüfkörperbezeichnung				
ES04_90_24	PK-60-60				
ES06_15_36	PK-1-47	PK-3-35	PK-4-42		
ES06_45_36	PK-4-52				
ES06_60_36	PK-3-40				
ES06_75_36	PK-5-19	PK-5-20			
ES06_90_36	PK-6-12				
ES08_90_64	PK-1-1	PK-1-2	PK-1-3	PK-3-1	PK-3-2
	PK-3-3	PK-4-1	PK-5-1	PK-5-2	PK-5-3
	PK-8-1	PK-8-2	PK-8-3	PK-9-1	PK-9-2
	PK-9-3	PK-11-1	PK-11-2	PK-11-3	PK-12-1
	PK-12-2	PK-12-3	PK-13-1	PK-13-3	PK-15-1
	PK-15-2	PK-15-3	PK-16-1	PK-16-2	PK-16-3
	PK-17-3	PK-19-1	PK-19-3	PK-21-1	PK-21-2
	PK-22-1	PK-22-2	PK-22-3		
ES08_90_64S	PK-2-5	PK-11-5	PK-19-6		
ES10_60_60	PK-1-41	PK-6-1			
ES10_90_60	PK-13-1	PK-13-2			
ES10_90_60S	PK-26-1				

Tabelle 23: Prüfungen mit Schraubenbruch

Man sieht in Abb. 21a, dass es bei der Serie ES08_15_48 zwei ausgeschlossene Prüfungen gab. Bei der Serie ES08_90_48 wurden drei Prüfungen für die Regressionsanalyse ausgeschlossen (siehe Abb. 21b). Die Streudiagramme zur Ausreißeranalyse aller Serien sind im Anhang D zu finden. Alle ausgeschlossenen Prüfungen, deren Ausziehkraft über der 97,5%-Grenze war, sind in Tab. 24 angeführt. Prüfungen bei denen die Ausziehkraft unter der 2,5%-Grenze lag, sind in Tab. 25 dargestellt.

6.5 Einschraubtiefe

Bei der Einschraubtiefe wurde zwischen nomineller und effektiver Einschraubtiefe unterschieden. Für die Serien mit eingebetteter Schraubenspitze konnte die effektive (rechnerische) Einschraubtiefe erst nach der Bestimmung des Einflusses der Schraubenspitze berechnet werden (siehe Abb. 22). Bei allen anderen Serien entspricht die nominelle Einschraubtiefe der effektiven.

6.5.1 Einfluss der Schraubenspitze

Durch die Form der Schraubenspitze weisen eingeschraubte Holzschrauben am Schraubende eine schlechtere Verankerung als entlang des Regelgewindes auf. Die Scherfestigkeit $f_{v,M}$ in der Mantelfläche um den eingebetteten Teil des Gewindes ist die bei der Prüfung ermittelte, maximale und auf 12 % Holzfeuchte korrigierte Ausziehkraft $R_{test,korr}$ dividiert durch die Mantelfläche A_M :

$$f_{v,M} = \frac{R_{test,korr}}{A_M} = \frac{R_{test,korr}}{l_{ef} \cdot d \cdot \pi} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (24)$$

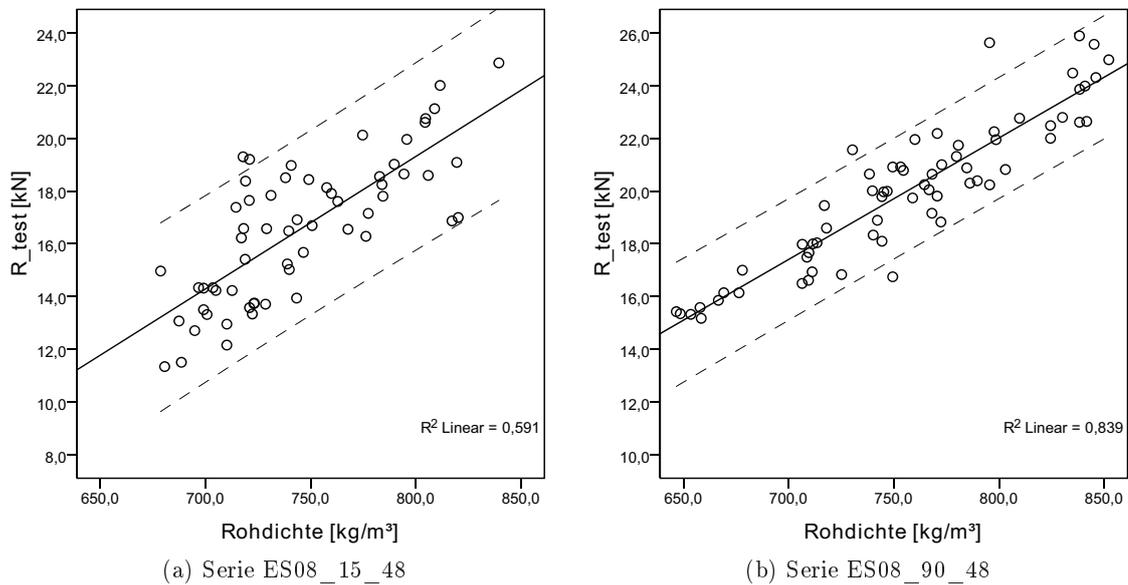


Abbildung 21: Streudiagramme zur Ausreißerbereinigung

Bei Einbettung mit Spitze ist die Scherfestigkeit $f_{v,M}$ geringer als bei Einbettung ohne Spitze (Schraubenspitze außerhalb des Holzes). Um den Einfluss der Schraubenspitze zu berücksichtigen wird die Länge des Gewindeteils inklusive Spitze im Holz l_{nom} um den Wert $x \cdot d$ verkürzt. Man erhält so die rechnerische Einschraubtiefe nach Glg. (25), bei der die Ausziehkraft einer durchgeschraubten Holzschraube gleich groß wäre. Die effektive Einschraubtiefe entspricht also der rechnerischen Einschraubtiefe bei mit Spitze eingebetteten bzw. der wahren Einschraubtiefe bei ohne Spitze eingebetteten Holzschrauben. In Abb. 22 ist der Unterschied zwischen eingebetteter und durchgeschraubter Schraube ersichtlich.

$$l_{ef} = l_{nom} - x \cdot d \quad (25)$$

Der Faktor x wird nach Glg. (26) berechnet.

$$x = \left(1 - \frac{f_{v,M,mit\ Spitze}}{f_{v,M,ohne\ Spitze}} \right) \cdot \frac{l_{nom}}{d} \quad (26)$$

Mit:

$f_{v,M,mit\ Spitze}$	Mittelwert der Scherspannung bei Einbettung mit Spitze
$f_{v,M,ohne\ Spitze}$	Mittelwert der Scherspannung bei Einbettung ohne Spitze
l_{nom}	nominelle Einschraubtiefe: Länge des Gewindeteils inkl. Spitze im Holz
d	Gewindeaußendurchmesser in mm

In Tab. 26 sind die untersuchten Serien angeführt. Bei Serie ES08_90_64 wurde die Zugfestigkeit der Schrauben bei 57,6 % der Prüfungen erreicht (38 von 66 Schraubenbrüche,

Serie	Prüfkörperbezeichnung	Serie	Prüfkörperbezeichnung
ES04_00_24	PK-12-40 PK-15-50	ES10_00_60S	PK-1-3
ES04_90_24	PK-21-21 PK-41-41	ES10_15_60	PK-2-2 PK-2-6
ES06_00_36	PK-15-51	ES10_30_60	PK-5-6 PK-6-1
ES06_30_36	PK-1-42 PK-5-22	ES10_45_60	PK-5-7
	PK-6-2	ES10_60_60	PK-5-20 PK-6-10
ES06_45_36	PK-3-48	ES10_75_60	PK-5-14 PK-5-48
ES06_60_36	PK-3-41 PK-5-12	ES10_90_60	PK-26-2
ES06_75_36	PK-5-4 PK-5-25	ES12_00_60S	PK-1-1
ES06_90_36	PK-3-5	ES12_15_60	PK-1-26
ES08_15_48	PK-5-2 PK-5-8	ES12_30_60	PK-4-37 PK-5-8
ES08_30_48	PK-2-2 PK-2-7		PK-5-17
		PK-5-24	ES12_45_60
ES08_45_48	PK-5-5 PK-5-12	ES12_60_60	PK-6-1 PK-6-9
ES08_75_48	PK-5-20 PK-6-53	ES12_75_60	PK-5-13
ES08_90_32	PK-6-1 PK-6-2	ES12_90_60	PK-10-1 PK-16-2
	PK-15-1	ES12_90_60S	PK-14-1
ES08_90_32S	PK-15-4	ES20_90_160	PK-31-31
ES08_90_48	PK-5-3 PK-9-2		

Tabelle 24: Prüfungen mit R_{test} über der 97,5%-Grenze

siehe Tab. 23). Die Schraubenbrüche führten zu einer scheinbar niedrigeren Scherfestigkeit, welche nicht der tatsächlichen entsprach. Es wurde aber eine Mindestfestigkeit des Holzes erreicht und deswegen wurden die Schraubenbrüche bei der Berechnung des Mittelwertes zu $\bar{x} = 1,11$ miteinbezogen.

Eine Tabelle mit dem 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der effektiven Einschraubtiefen je Serie ist im Anhang E zu finden.

6.6 Nichtlineare Regressionsanalyse

Nach der Bestimmung der Holzfeuchte und der Korrektur der Rohdichte und der Ausziehkraft auf 12 % Holzfeuchte sowie der Analyse der Ausreißer (vgl. Abschnitt 6.4) wurde eine nichtlineare Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei wurde Glg. (27) als Grundform zur Berechnung des Ausziehwerstandes herangezogen. Es ist dies eine Abwandlung der Berechnungsformel für den Ausziehwerstand nach ON EN 1995-1-1:2009 (siehe Abschnitt 4.5.1), der Koeffizient in der Hankinson-Funktion wurde auf „2“ fixiert (vgl. Glg. 1).

$$R_{test,korr,\alpha} = \frac{A \cdot l_{ef}^B \cdot \rho^C \cdot d^D}{\sin^2 \alpha + E \cdot \cos^2 \alpha} \quad (27)$$

Als erstes wurde der Ausziehwerstand unter Berücksichtigung der Einschraubtiefen ermittelt. Es wurden die Serien ES08_90_32, ES08_90_48 und ES08_90_64 untersucht, da bei diesen nur die Einschraubtiefen (bei gleichbleibendem Durchmesser und gleichbleibendem Einschraubwinkel) variierten.

Serie	Prüfkörperbezeichnung	Serie	Prüfkörperbezeichnung
ES04_00_24	PK-8-22 PK-18-62	ES08_90_64	PK-18-1 PK-19-2
ES04_90_24	PK-28-28 PK-51-51		PK-20-2 PK-21-3
ES06_00_36	PK-14-46 PK-18-63	ES08_90_64S	PK-4-5
ES06_15_36	PK-2-5	ES10_15_60	PK-1-60
ES06_45_36	PK-5-3	ES10_45_60	PK-3-45
ES06_60_36	PK-3-44	ES12_00_60	PK-2-1
ES06_90_36	PK-29-60	ES12_15_60	PK-3-49
ES08_00_48	PK-6-5	ES12_60_60	PK-4-61
ES08_00_48S	PK-4-7 PK-5-3	ES12_90_60	PK-30-1
ES08_30_48	PK-6-29	ES12_90_60S	PK-23-1 PK-28-2
ES08_75_48	PK-5-30 PK-6-55	ES20_00_160	PK-32-32
ES08_90_48	PK-6-3	ES20_90_160	PK-18-18
ES08_90_48S	PK-12-5		

Tabelle 25: Prüfungen mit R_{test} unter der 2,5%-Grenze

Ohne Spitze	Mit Spitze	x
ES08_00_48	ES08_00_48S	1,21
ES08_90_32	ES08_90_32S	1,07
ES08_90_48	ES08_90_48S	1,21
ES08_90_64	ES08_90_64S	0,98
ES10_00_60	ES10_00_60S	1,30
ES10_90_60	ES10_90_60S	0,96
ES12_00_60	ES12_00_60S	1,04
ES12_90_60	ES12_90_60S	1,12
Mittelwert \bar{x}		1,11

Tabelle 26: Serien ohne und mit Einbettung der Schraubenspitze

Die beste Korrelation zwischen den Prüfungsergebnissen und den rechnerisch ermittelten Traglasten wurde mit Glg. (28) und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$ erreicht.

$$R_{test,korr} = 47,02 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,94} \cdot \rho^{1,4} \quad [\text{N}] \quad (28)$$

Der Einfluss der Einschraubtiefe l_{ef} konnte mit dem Exponenten $B = 0,94$ ermittelt werden.

Als nächstes wurde der Auszieh Widerstand unter Berücksichtigung des Einschraubwinkels und des Durchmessers in Abhängigkeit von der Rohdichte bestimmt. Es kamen die Serien mit durchgeschraubter Schraube bei der Regressionsanalyse zum Einsatz. Die beste Korrelation zwischen den Prüfungsergebnissen und den rechnerisch ermittelten Traglasten wurde mit Glg. (29) und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ erreicht.

$$R_{test,korr,\alpha} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,94} \cdot \rho^{1,6} \cdot d^{0,7}}{\sin^2 \alpha + 1,21 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N}] \quad (29)$$

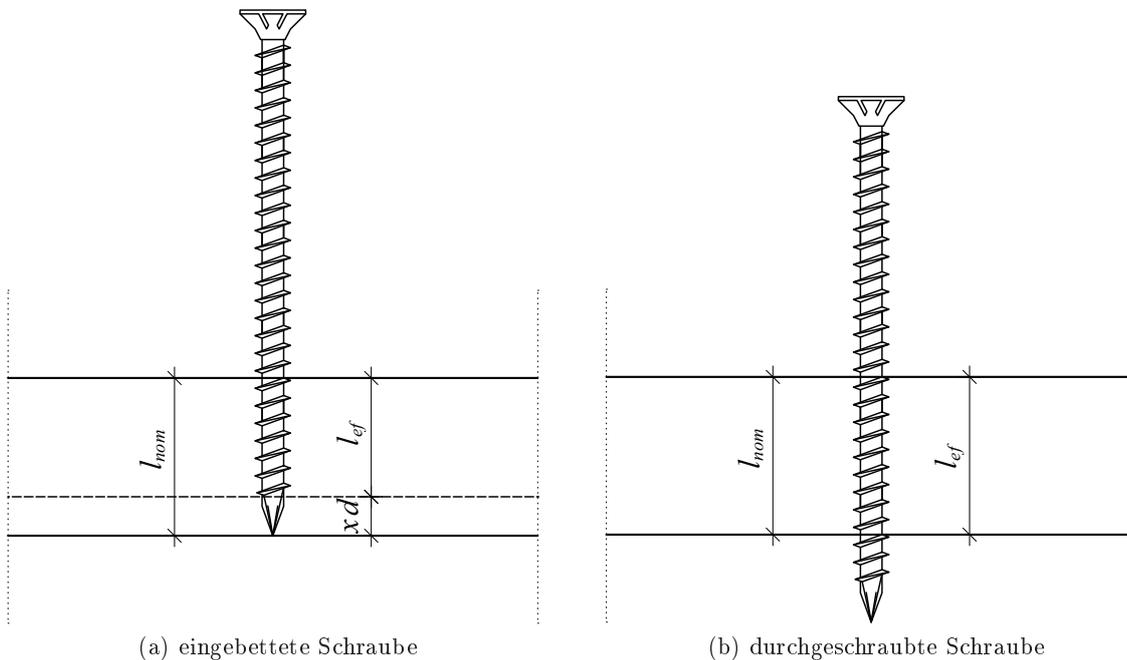


Abbildung 22: Einschraubtiefe

Mit:

l_{ef} effektive Einschraubtiefe in mm

ρ Rohdichte in kg/m^3

d Gewindeaußendurchmesser in mm

α Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung in Grad

In Tab. 27 sind die Schätzer der einzelnen Variablen nach der ersten Regressionsanalyse aufgelistet. Den größten Standardfehler hatte die Variable A mit 0,874, gefolgt von der Variable C mit 0,048. Durch die kleinen Standardfehler der Variablen B , D und E konnte bereits festgestellt werden, dass sich diese Werte bei weiteren Regressionsanalyse nicht mehr wesentlich verändern würden.

Variable	Schätzer	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untere Grenze	Obere Grenze
A	2,750	0,874	1,036	4,465
B	0,981	0,019	0,944	1,019
C	1,614	0,048	1,520	1,709
D	0,613	0,027	0,559	0,666
E	1,206	0,008	1,191	1,222

Tabelle 27: Variablenschätzer

Der Wert für die Variable B (Exponent der Einschraubtiefe) wurde jedoch auf 0,94 fixiert. Dies wirkte sich vor allem auf die Variable D aus, der Wert des Exponenten für den Durchmesser änderte sich von 0,613 auf 0,671. In Tab. 28 ist der große Einfluss der Variable B

auf die Variable D ersichtlich. Genauso ist der noch größere Einfluss der Variable A auf die Variable C zu sehen. Bei Änderung von B auf 0,9 bzw. 1,0 kam für die Variable D ein Wert von 0,73 bzw. 0,59 heraus. Der Wert der Variable B wurde aus diesem Grund nicht auf 0,9 gerundet. Der Wert der Variable C veränderte sich von 1,61 auf 1,63. Bei der Fixierung des Wertes der Variable C auf 1,6, änderten sich die Variablen $D = 0,67$ und $E = 1,21$ nicht mehr, nur der Wert der Variable A stieg auf 3,131. Bei einer weiteren Regressionsanalyse, bei der die Variablen B , C und D auf $B = 0,94$, $C = 1,6$ und $D = 0,7$ fixiert wurden, änderte sich nur mehr der Vorfaktor A auf 2,9 (auf drei Kommastellen genau gerundet). Das Bestimmtheitsmaß betrug bei diesen Analysen immer $R^2 = 0,98$. Eine Tabelle mit dem 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der nach Glg. (29) berechneten Ausziehkräfte je Serie ist im Anhang F zu finden.

	A	B	C	D	E
A	1,000	0,007	-0,997	0,022	0,141
B	0,007	1,000	-0,058	-0,972	-0,030
C	-0,997	-0,058	1,000	0,015	-0,132
D	0,022	-0,972	0,015	1,000	0,049
E	0,141	-0,030	-0,132	0,049	1,000

Tabelle 28: Korrelation der Variablenschätzer

6.7 Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit einer Holzschraube in ihrer Mantelfläche wird nach Glg. (30) ermittelt, wobei hier noch eine Korrektur auf die mittlere Rohdichte von $745,9 \text{ kg/m}^3$ durchgeführt wurde. Der Exponent der Rohdichte wurde bereits bei der Regressionsanalyse ermittelt (siehe Glg. (29)).

$$f_{v,korr,mean} = \frac{R_{test,korr}}{d \cdot l_{ef} \cdot \pi} \cdot \left(\frac{\rho_{mean}}{\rho_i} \right)^{1,6} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (30)$$

Mit:

$f_{v,korr,mean}$	Mittelwert der Scherfestigkeit auf ρ_{mean} korrigiert in N/mm^2
$R_{test,korr}$	max. Ausziehkraft auf $u = 12\%$ korrigiert
d	Gewindeaußendurchmesser in mm
l_{ef}	effektive Einschraubtiefe in mm
ρ_{mean}	$745,9 \text{ kg/m}^3$, Mittelwert der Rohdichte
ρ_i	die zu $R_{test,korr}$ gehörige Rohdichte in kg/m^3

Die Scherfestigkeit ist abhängig von der Holzart, von der Rohdichte, von der Holzfeuchte, von der Temperatur, vom Einschraubwinkel und vom Schraubendurchmesser. Der Einfluss der Temperatur wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die Prüfkörper wurden im Normklima ($20 \text{ }^\circ\text{C}$, 65% rel. Luftfeuchte) gelagert und bei $(20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ geprüft, sodass keine Temperaturkorrektur nötig war. Abb. 23 zeigt die korrigierte Scherfestigkeit in Abhängigkeit des Einschraubwinkels und des Schraubendurchmessers. Für die Darstellungen

wurden die Serien mit durchgeschraubten Schrauben und den Durchmessern 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm und 20 mm verwendet. Die Prüfungen nach Tab. 22 wurden ausgeschlossen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Scherfestigkeit mit größer werdendem Einschraubwinkel steigt, eine Berechnungsformel in Anlehnung an Hankinson (1921) lässt sich erahnen. Der Einfluss durch steigende Durchmesser zeigt sich durch die Abnahme der Scherfestigkeit. Die größeren Streuungen bei einem Winkel α von 0° und 15° sind eindeutig durch die größeren Interquartilbereiche festzustellen.

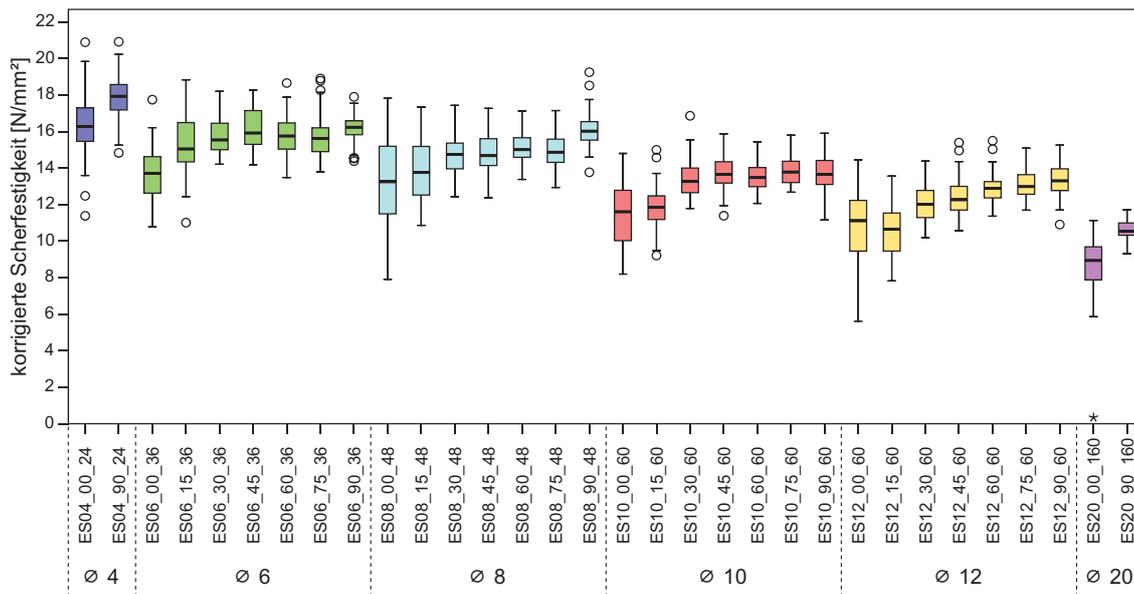


Abbildung 23: Boxplots der Scherfestigkeiten der einzelnen Serien - auf ρ_{mean} korrigiert

Um den Anstieg der Hankinson-Formel abzuschätzen, werden die Mittelwerte der Scherfestigkeiten bei einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ durch die Mittelwerte der Scherfestigkeiten bei $\alpha = 0^\circ$ dividiert (siehe Tab. 29).

Durchmesser	$f_{v,0}$ [N/mm ²]	$f_{v,90}$ [N/mm ²]	$f_{v,90}/f_{v,0}$
$d = 4$ mm	16,36	17,83	1,09
$d = 6$ mm	13,69	16,16	1,18
$d = 8$ mm	13,20	16,14	1,22
$d = 10$ mm	11,44	13,69	1,20
$d = 12$ mm	10,89	13,31	1,22
$d = 20$ mm	8,59	10,60	1,23
Mittelwert			1,19

Tabelle 29: Mittelwerte der Scherfestigkeiten bei einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$

Es ergibt sich ein Mittelwert von 1,19. Der in der Regressionsanalyse ermittelte Wert von 1,21 wird damit bestätigt. Nach ON EN 1995-1-1:2009 kommt dieser Faktor mit 1,2 in Glg. (9) vor, d. h. die Kurve der Hankinson-Funktion für die Prüfungsergebnisse hat fast den gleichen Schwung.

Tabellen mit dem 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der Scherfestigkeit bzw. der korrigierten Scherfestigkeit je Serie sind im Anhang G bzw. Anhang H zu finden.

Nach Bernasconi (2000) wird die charakteristische Scherfestigkeit des Nadelholzes um das Bohrloch bei eingeklebten Gewindestangen wie folgt berechnet:

- parallel zur Faserrichtung mit:

$$f_{va,0,k} = 30 \cdot d_a^{-0,5} \cdot (l_e/d_a)^{-0,3} \quad \text{N/mm}^2$$

- senkrecht zur Faserrichtung mit:

$$f_{va,90,k} = 25 \cdot d_a^{-0,5} \quad \text{N/mm}^2$$

Dabei bezeichnet d_a den Lochdurchmesser in mm und l_e die Einklebelänge in mm. Die Angaben sind nur für Lochdurchmesser $d_a \geq 10$ mm gültig. Wenn für die Einklebelänge l_e die bei dieser Arbeit im Regelfall verwendete Einschraubtiefe von $6d$ eingesetzt wird, ergeben die Funktionen die in Abb. 24 dargestellten Verläufe.

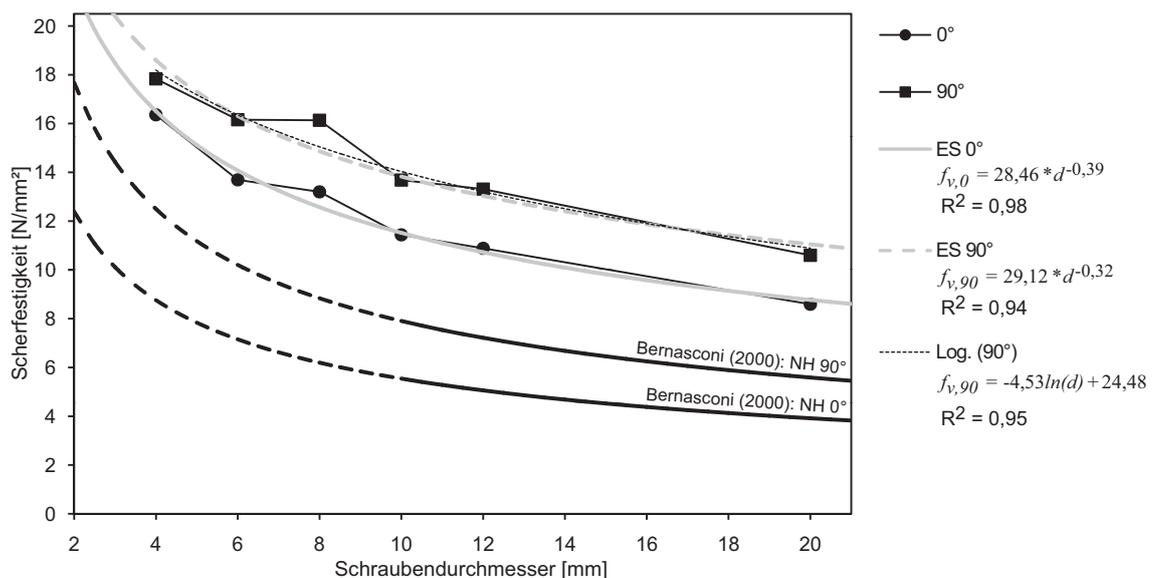


Abbildung 24: Mittelwerte der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser für die Winkel $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$

Die Scherfestigkeiten von Eschen-BSH um den Außendurchmesser der eingeschraubten Holzschrauben steigen mit sinkendem Durchmesser ähnlich wie die Funktionen nach Bernasconi (2000) an. Die Mittelwerte der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser für die Einschraubwinkel von $\alpha = 0^\circ$ bzw. $\alpha = 90^\circ$ sind in Abb. 24 als schwarz gefüllte Kreise bzw. schwarz gefüllte Quadrate eingezeichnet. Die am besten angepassten Kurven stellen Glg. (31) für die Scherfestigkeiten parallel zur Faserrichtung (graue, durchgezogene Linie) und Glg. (32) senkrecht zur Faserrichtung (graue, strichlierte Linie) dar.

$$f_{v,0} = 28,46 \cdot d^{-0,39} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (31)$$

$$f_{v,90} = 29,12 \cdot d^{-0,32} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (32)$$

Eine logarithmische Funktion (schwarze, fein strichlierte Linie) würde mit den Mittelwerten der Scherfestigkeiten senkrecht zur Faserrichtung um 1 % besser korrelieren. Weil bei Größen- bzw. Volumeneffekten aber immer Potenzfunktionen angewendet werden und um zwei ähnliche Funktionen zu erhalten, wurde die Potenzfunktion nach Glg. (32) beibehalten.

Berechnet man mit der oben ermittelten Scherfestigkeit die Ausziehungskraft unter einem Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$ (siehe Glg. (33)) erhält man für den Exponenten des Durchmessers einen Wert von $D = 0,68$. Im Vergleich dazu wurde bei der Regressionsanalyse ein Wert von $D = 0,7$ ermittelt, d. h. die Formeln zur Berechnung der Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Durchmesser nach Glg. (31) und Glg. (32) sind plausibel.

$$R_{ax,90} = f_{v,90} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{ef} = 29,12 \cdot d^{0,68} \cdot \pi \cdot l_{ef} \quad (33)$$

Mit diesen beiden Formeln und der charakteristischen Zugtragfähigkeit je Schraube kann nun die maximale, effektive Einschraubtiefe unter einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ berechnet werden (siehe Tab. 30). Die charakteristischen Werte der Zugtragfähigkeit für die Durchmesser von $d = 4$ mm bis $d = 12$ mm sind aus den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen entnommen worden. Die charakteristische Zugtragfähigkeit der Gewindestangen wurde nach SFS intec AG (2008) mit der Zugfestigkeit von $f_u = 800$ N/mm² und dem Gewindekerndurchmesser von $d_{GK} = 15$ mm berechnet.

Durchmesser		charakt. Zugtragfähigkeit	charakt. Zugfestigkeit	Einschraubwinkel $\alpha = 0^\circ$		Einschraubwinkel $\alpha = 90^\circ$	
d	d_{GK}	$R_{t,u,k}$	$f_{t,u,k}$	Scherfestigkeit	max., eff. Einschraubtiefe	Scherfestigkeit	max., eff. Einschraubtiefe
[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	$f_{v,0}$	$l_{ef,max,0}$	$f_{v,90}$	$l_{ef,max,90}$
				[N/mm ²]	[mm]	[N/mm ²]	[mm]
4	2,5	4 500	917	16,6	5,4 $d = 22$	18,7	4,8 $d = 19$
6	3,8	10 500	926	14,1	6,6 $d = 39$	16,4	5,7 $d = 34$
8	5,3	23 000	1043	12,6	9,0 $d = 72$	15,0	7,6 $d = 61$
10	6,1	28 000	958	11,6	7,7 $d = 77$	13,9	6,4 $d = 64$
12	7,5	38 000	860	10,8	7,8 $d = 93$	13,1	6,4 $d = 77$
20	15	141 372	800	8,8	12,7 $d = 254$	11,2	10,1 $d = 202$

Tabelle 30: Maximale, effektive Einschraubtiefe unter einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ für Eschen-BSH

Die maximalen, effektiven Einschraubtiefen für die verwendeten Schrauben in Eschen-BSH liegen zwischen 5,4 d und 12,7 d parallel zur Faserrichtung und zwischen 4,8 d und 10,1 d senkrecht zur Faserrichtung. Die Einschraubtiefen steigen mit größer werdendem Durchmesser, da die Scherfestigkeiten abnehmen und die Zugtragfähigkeiten der Schrauben bzw. der Gewindestangen quadratisch mit dem Durchmesser steigen. Die Prüfkörper für die Schrauben mit 4 mm Durchmesser hatten eine Dicke von 24 mm. Es kam trotzdem zu keinem einzigen Schraubenbruch, d. h. die charakteristische Zugtragfähigkeit lag über 4 500 N.

Im Vergleich dazu liegen die maximalen, effektiven Einschraubtiefen von bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben im Fichtenholz¹⁰ nach den Untersuchungen von Pirnbacher und Schickhofer (2009) zwischen $17,2d$ und $23,5d$ parallel zur Faserrichtung und zwischen $13,4d$ und $15,6d$ senkrecht zur Faserrichtung (siehe Tab. 31). Die Scherfestigkeiten wurden aus den Prüfungsergebnissen berechnet. Die verwendeten Schrauben waren vom Typ Spax-S der Firma *SPAX International GmbH & Co. KG*. Die charakteristischen Zugtragfähigkeiten $R_{t,u,k}$ sind aus der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-9.1-519 und die charakteristische Zugfestigkeit wurde mit $R_{t,u,k}$ und der Querschnittsfläche des Gewindekerns berechnet. Es handelt sich um berechnete maximale, effektive Einschraubtiefen.

Durchmesser		charakt. Zugtragfähigkeit	charakt. Zugfestigkeit	Einschraubwinkel $\alpha = 0^\circ$		Einschraubwinkel $\alpha = 90^\circ$	
d	d_{GK}	$R_{t,u,k}$	$f_{t,u,k}$	Scherfestigkeit	max., eff. Einschraubtiefe	Scherfestigkeit	max., eff. Einschraubtiefe
[mm]	[mm]	[N]	[N/mm ²]	$f_{v,0}$	$l_{ef,max,0}$	$f_{v,90}$	$l_{ef,max,90}$
				[N/mm ²]	[mm]	[N/mm ²]	[mm]
8	5	17 000	866	4,92	$17,2d = 137$	6,30	$13,4d = 107$
10	6,1	28 000	958	4,11	$21,7d = 217$	5,91	$15,1d = 151$
12	7,5	38 000	860	3,58	$23,5d = 282$	5,39	$15,6d = 187$

Tabelle 31: Maximale, effektive Einschraubtiefe unter einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ für Nadelholz

Die erforderlichen Einschraubtiefen von bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben sind im Eschen-BSH deutlich niedriger als im Fichtenholz. Bei Verwendung der gleichen Schrauben und bei der Annahme, dass die charakteristische Zugkraft übertragen wird, würde sich der Materialbedarf von Eschen-BSH gegenüber Fichtenholz bei einem Durchmesser von $d = 10$ mm bzw. $d = 12$ mm und einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ auf 0,35 bzw. 0,33 und bei einem Winkel von $\alpha = 90^\circ$ auf 0,42 bzw. 0,41 reduzieren.

6.8 Charakteristischer Auszieh Widerstand

Zur Bestimmung des charakteristischen Auszieh Widerstandes wurden alle Prüfungen bis auf die in Tab. 22 verwendet, um auch in der Praxis auftretende Fehler bzw. Ausreißer zu berücksichtigen. Der charakteristische Auszieh Widerstand (5%-Perzentilwert der Grundgesamtheit) für die untersuchten Holzschrauben wurde erreicht, indem die charakteristische Rohdichte $\rho_k = 667 \text{ kg/m}^3$ (5%-Perzentilwert) in Glg. (29) eingesetzt und der Vorfaktor A auf $A = 0,826 \cdot 2,9 = 2,4$ abgemindert wurde. Da die Streuungen der Rohdichten und der Auszieh Widerstände unterschiedlich sind, musste diese zusätzliche Abminderung vorgenommen werden. Somit lagen mindestens 95 % der auf 12 % Holzfeuchte korrigierten Prüfwerte je Serie über den charakteristischen Auszieh Widerständen. Bei einer Abminderung des Vorfaktors auf 85 % wären auch bereits 95 % der Prüfwerte über den charakteristischen Auszieh Widerständen gelegen. Es gibt aber noch keine Ergebnisse über das Langzeitverhalten von bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben in Eschen-BSH und der Einfluss der Holzfeuchte wurde auch noch nicht untersucht. Aus diesem Grund und um einen Vorfaktor

¹⁰Das verwendete Material war zum Teil Fichtenvollholz und auch Fichten-BSH.

mit nur einer Kommastelle zu erhalten, wurde dieser etwas weiter abgemindert. Da die Serien mit einem Einschraubwinkel von 0° und 15° höhere Streuungen aufwiesen, musste bei diesen Serien eine weitere Abminderung auf $A = 0,87 \cdot 2,4 = 2,08$ erfolgen, damit auch hier 95 % aller Prüfwerte über den charakteristischen Auszieh Widerständen lagen. Der charakteristische Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Eschen-BSH beträgt damit nach Glg. (34):

$$R_{ax,\alpha,k} = \frac{A \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,94} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7}}{\sin^2 \alpha + 1,21 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N}] \quad (34)$$

Mit:

A 2,4 für $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
 2,08 für $\alpha < 30^\circ$

l_{ef} effektive Einschraubtiefe in mm

ρ_k charakteristische Rohdichte in kg/m^3

d Gewindeaußendurchmesser in mm

α Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung in Grad

Diese Formel stellt einen parallel verschobenen Hankinson-Verlauf dar, keine optimale Lösung, da es beim Einschraubwinkel $\alpha = 30^\circ$ einen Sprung der Funktion gäbe. Um eine bessere Lösung zur Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes zu finden, wurden zunächst die auf die mittlere Rohdichte von $745,9 \text{ kg}/\text{m}^3$ korrigierten Scherfestigkeiten aller Prüfungen mit Glg. (35) auf den Referenzdurchmesser von $d_{ref} = 10 \text{ mm}$ normiert. Es wurden hierbei die Serien mit durchgeschraubten Schrauben und ohne Variation der Einschraubtiefen verwendet. Die in Tab. 22 beschriebenen Prüfungen wurden ausgeschlossen. Der Exponent für den Durchmesser zur Berechnung der *Auszieh Widerstände* beträgt $D = 0,7$. Für die Normierung der *Scherfestigkeiten* muss aber der Exponent mit dem Wert von $(-0,3)$ verwendet werden (vgl. Abschnitt 6.7).

$$f_{v,norm} = f_{v,korr,mean} \cdot \left(\frac{d_{ref}}{d_i} \right)^{(-0,3)} \quad [\text{N}/\text{mm}^2] \quad (35)$$

Mit:

$f_{v,norm}$ Mittelwert der Scherfestigkeit auf d_{ref} normiert in N/mm^2

$f_{v,korr,mean}$ siehe Glg. (30)

d_{ref} 10 mm, Referenzdurchmesser

d_i Gewindeaußendurchmesser der jeweiligen Prüfung in mm

Eine Tabelle mit dem 5%-Perzentil-, Mittel- und 95%-Perzentilwert sowie der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten der normierten Scherfestigkeit je Serie ist im Anhang I zu finden.

Abb. 25 zeigt die Boxplots der normierten Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel α . Die Quadrate stellen die 5%-Perzentilwerte und die Rauten den idealen Hankinson-Verlauf der normierten Scherfestigkeiten dar, die Werte dazu sind in Tab. 32 aufgelistet.

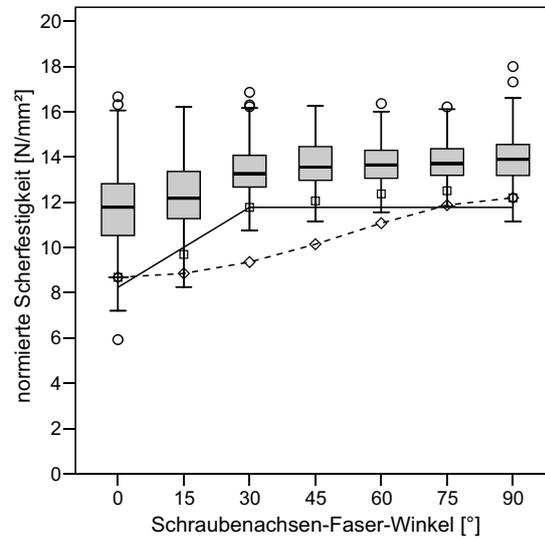


Abbildung 25: Boxplots der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel - auf $d_{ref} = 10$ mm normiert

Die Hankinson-Funktion hat einen deutlichen Anstieg, das Verhältnis $f_{v,norm,90}/f_{v,norm,0}$ beträgt 1,4. Sie bildet die 5%-Perzentilwerte aber schlecht ab. Die 5%-Perzentilwerte steigen von $\alpha = 0^\circ$ bis $\alpha = 30^\circ$ von $8,69 \text{ N/mm}^2$ auf $11,78 \text{ N/mm}^2$ an und im Bereich $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ stellt sich nahezu ein horizontaler Verlauf ein, das Maximum wird bei $\alpha = 75^\circ$ mit $12,51 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Der Mittelwert der 5%-Perzentilwerte von $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ beträgt $12,18 \text{ N/mm}^2$. Mit einem bilinearen Verlauf (schwarze Linie) können die 5%-Perzentilwerte gut angenähert werden.

Winkel	Anzahl N [Stk.]	Normierte Scherfestigkeit				
		5%-Perzentil [N/mm ²]	Hankinson [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Std.-Abw. [N/mm ²]	COV [%]
0°	365	8,69	8,69	11,68	1,88	16,1
15°	242	9,70	8,86	12,24	1,58	12,9
30°	241	11,78	9,36	13,37	1,06	7,9
45°	242	12,06	10,15	13,68	1,03	7,5
60°	243	12,37	11,08	13,72	0,91	6,6
75°	242	12,51	11,88	13,79	0,88	6,4
90°	369	12,20	12,20	13,90	1,07	7,7

Tabelle 32: Werte der normierten Scherfestigkeit je Schraubenachsen-Faser-Winkel

Um die Gültigkeit einer bilinearen Anpassung zu untersuchen, wurden die in Abb. 26 ersichtlichen Boxplots der korrigierten Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel α für die Durchmesser 6 mm, 8 mm, 10 mm und 12 mm erstellt. Die Quadrate stellen wiederum die 5%-Perzentilwerte und die Rauten den idealen Hankinson-Verlauf der korrigierten Scherfestigkeiten dar. Es bestätigte sich bei allen Durchmessern, dass die ideale Hankinson-Funktion die 5%-Perzentilwerte ungenügend abbildet. Durch die niedrigeren

Werte der korrigierten Scherfestigkeiten bei 0° und 15° und durch die erhöhten Streuungen unter diesen Einschraubwinkeln steigen die 5%-Perzentilwerte im Bereich von $\alpha = 0^\circ$ bis $\alpha = 30^\circ$ deutlich an.

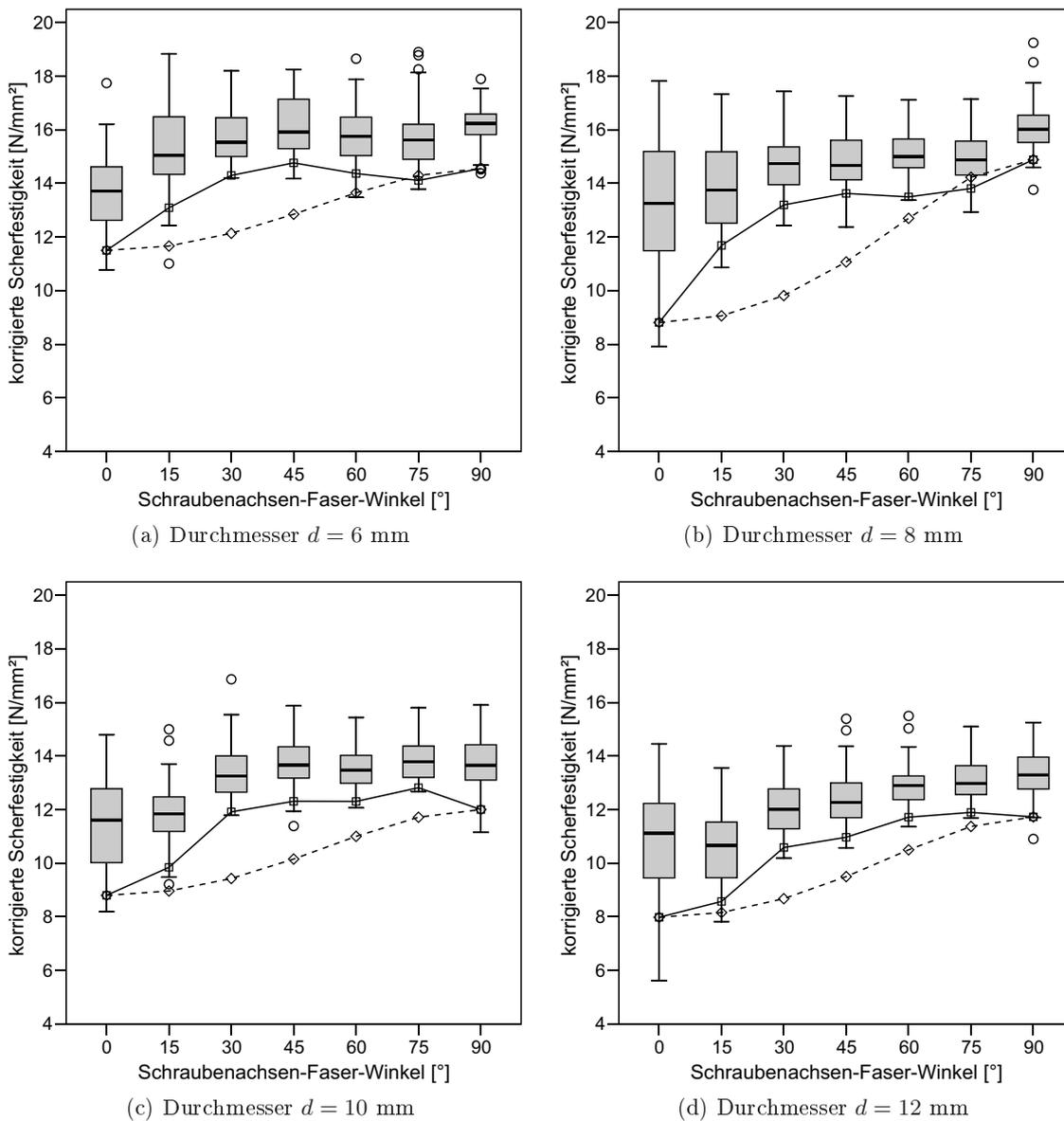


Abbildung 26: Boxplots der korrigierten Scherfestigkeiten je Durchmesser in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel

In Abb. 26a ist zu sehen, dass die 5%-Perzentilewerte der Schrauben mit 6 mm Durchmesser bei $\alpha = 45^\circ$ ein Maximum erreichen. Die Werte zwischen 30° und 90° könnten durch eine horizontale Gerade gut angenähert werden. Der Wert bei $\alpha = 90^\circ$ ist höher als bei $\alpha = 75^\circ$. Das Verhältnis zwischen der korrigierten Scherfestigkeit bei 90° zu der korrigierten Scherfestigkeit bei 0° beträgt 1,27.

Die 5%-Perzentilwerte der Schrauben mit $d = 8$ mm (Abb. 26b) sind von 30° bis 75° auf gleicher Höhe, bei 90° gibt es einen Anstieg. Das Verhältnis zwischen der korrigierten Scherfestigkeit bei 90° zu der korrigierten Scherfestigkeit bei 0° beträgt 1,69.

Die 5%-Perzentilwerte der Schrauben mit $d = 10$ mm und 12 mm zeigen einen ähnlichen Verlauf. Das Maximum wird bei 75° erreicht. Danach fällt der Wert wieder ab. Das Verhältnis zwischen der korrigierten Scherfestigkeit bei 90° zu der korrigierten Scherfestigkeit bei 0° beträgt bei $d = 10$ mm 1,36 und bei $d = 12$ mm 1,47.

Die 5%-Perzentilwerte können somit sehr gut mit einem bilinearen Verlauf wiedergegeben werden. Das Verhältnis der *korrigierten* Scherfestigkeit bei 0° zur *korrigierten* Scherfestigkeit bei 30° beträgt, genauso wie der Verhältniswert der *normierten* Scherfestigkeiten, im Mittel 0,74.

Um ein besseres Ergebnis und auch eine elegantere Lösung zur Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes zu erzielen, wurde Glg. (36) definiert.

$$R_{ax,\alpha,k} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,94} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7} \begin{cases} \cdot 1 & \text{für } \alpha \geq 30^\circ \\ \cdot (1 - 0,01 \cdot (30^\circ - \alpha)) & \text{für } \alpha < 30^\circ \end{cases} \quad [\text{N}] \quad (36)$$

Diese Formel stellt einen bilinearen Verlauf dar, wobei für Einschraubwinkel $\alpha \geq 30^\circ$ ein konstanter Wert festgesetzt wurde und für $\alpha < 30^\circ$ eine Abminderung um 1 % je Winkelgrad bis auf 0° , d. h. der Wert bei 0° beträgt 70 % vom konstanten Wert zwischen 30° und 90° . Der charakteristische Auszieh Widerstand ist damit unabhängig vom Einschraubwinkel ab $\alpha \geq 30^\circ$. Auf 70 % wurde abgemindert um eine gewisse Reserve zu haben, da keine Ergebnisse zum Langzeitverhalten von Holzschrauben in Eschen-BSH vorliegen und der Einfluss der Holzfeuchte bisher nur aus der Literatur (in dieser Arbeit nach Cockrell (1933)) zur Scherfestigkeit von Kleinproben abgeschätzt werden kann. Mindestens 95 % der auf 12 % Holzfeuchte korrigierten Prüfwerte je Serie waren über den charakteristischen Auszieh Widerständen. Im Anhang J.1 ist eine Tabelle zu finden in der die Anzahl und Prozent der Prüfungen je Serie eingetragen sind, deren Prüfwerte über den charakteristischen Auszieh Widerständen lagen. Einzig bei Serie ES04_90_24 (grau hinterlegt) waren mit der angeführten Berechnungsformel nur 92 % der Prüfwerte über den charakteristischen Werten, der Grund dafür konnte nicht eruiert werden. Die Werte des charakteristischen Auszieh Widerstandes je Serie und die dazugehörigen Variationskoeffizienten der zwei Berechnungsmodelle nach Glg. (34) bzw. nach Glg. (36) sind im Anhang J.2 zu finden.

In Abb. 27 sind die Verläufe der beiden Berechnungsmodelle für den Schraubendurchmesser von $d = 10$ mm, der Einschraubtiefe von $l_{ef} = 6d$ und der charakteristischen Rohdichte von $\rho_k = 667 \text{ kg/m}^3$ über dem Einschraubwinkel α dargestellt.

Die zu dieser Abbildung gehörigen Werte für die charakteristischen Auszieh Widerstände sind in Tab. 33 aufgelistet. Es zeigt sich, dass durch den Sprung in der Hankinson-Formel bei $\alpha = 30^\circ$ der Wert um 25 % niedriger ist, als der nach der bilinearen Formel berechnete Wert.

Das Verhältnis zwischen dem charakteristischen Auszieh Widerstand bei 90° zum charakteristischen Auszieh Widerstand bei 0° beträgt für den parallel verschobenen Hankinson-Verlauf 1,4 und für den bilinearen Verlauf 1,43.

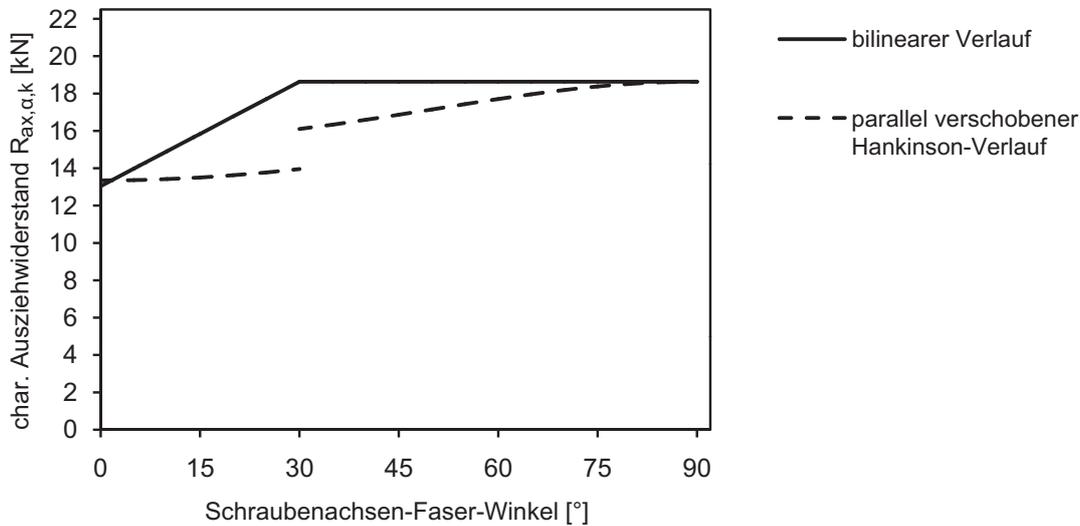


Abbildung 27: Vergleich der Berechnungsmodelle für den charakteristischen Auszieh-widerstand von Holzschrauben in Eschen-BSH für $d = 10$ mm, $l_{ef} = 6d$ und $\rho_k = 667$ kg/m³

	Schraubenachsen-Faser-Winkel in Grad							
	0	15	30	30	45	60	75	90
$R_{ax,\alpha,k,Hankinson}$ [kN]	13,35	13,51	13,95	16,10	16,87	17,71	18,38	18,64
$R_{ax,\alpha,k,bilinear}$ [kN]	13,05	15,84	18,64					
$\frac{R_{ax,\alpha,k,Hankinson}}{R_{ax,\alpha,k,bilinear}}$ [-]	1,02	0,85	0,75	0,86	0,90	0,95	0,99	1,00

Tabelle 33: Werte des charakteristischen Auszieh-widerstandes für die Berechnungsmodelle von Holzschrauben in Eschen-BSH

6.9 Vergleich eingeschraubte/eingeklebte Gewindestange

Beim Vergleich einer quer zur Faserrichtung eingeschraubten Gewindestange mit Holzschraubengewinde (in Eschen-BSH) mit einer ebenfalls quer zur Faserrichtung eingeklebten CFK-Gewindestange (in Fichtenvollholz) zeigen sich Ähnlichkeiten im Bruchbild (siehe Abb. 28). Bei den CFK-Gewindestangen kam ein zähmodifizierter Klebstoff zum Einsatz. Es wurde eine verbundfreie Zone vorgelagert, wodurch es zu einem Versagen im Holz und einer höheren Duktilität aufgrund der „Propfenwirkung“ kam (Pörtner und Seim, 2008). Alle Prüfkörper der Serie ES20_90_160 wurden in der Achse des Führungsloches und entlang der Faserrichtung aufgeschnitten, um festzustellen in welchem Bereich die Fasern beansprucht werden. In Abb. 28a ist zu sehen, dass im Abstand vom einfachen Durchmesser die Fasern aufgebogen und teilweise abgerissen wurden. Durch die hohen Beanspruchungen bis zum Versagen kam es trotz der Quersicherungen bei manchen Prüfkörpern zu Rissen quer zur Faser. Bei den eingeklebten Gewindestangen ist ebenso das Abreißen von ganzen Faserbündeln im Abstand von $1d$ ersichtlich (siehe Abb. 28b).

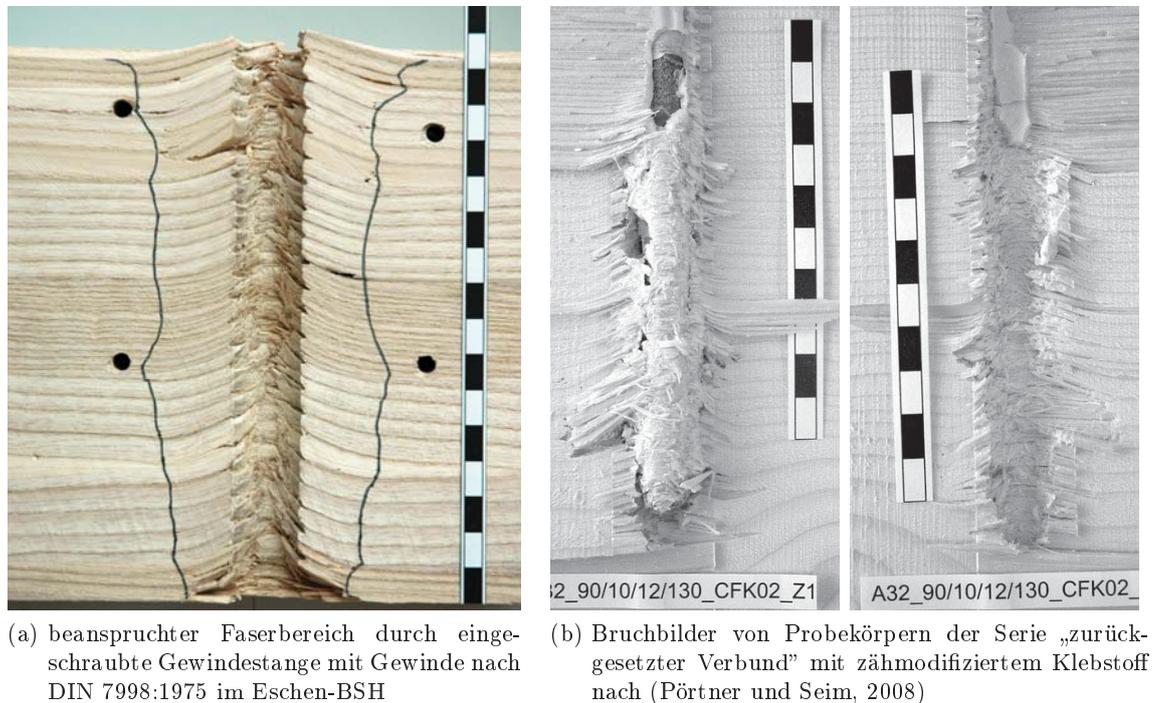


Abbildung 28: Vergleich eingeschaubte/eingeklebte Gewindestange

6.10 Vergleich verschiedener Bemessungsmodelle

Das für Holzschrauben in Eschen-BSH ermittelte Berechnungsmodell zur Bestimmung des charakteristischen Auszieh Widerstandes (vgl. Glg. 36) wurde mit den in Abschnitt 4.5 beschriebenen Bemessungsmodellen verglichen. Die von Schneider (o.J.) bestimmte Glg. (4) zur Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes von Schrauben in Buche und Bongossi wird ebenfalls zum Vergleich herangezogen. Es wird der charakteristische Auszieh Widerstand einerseits in Abhängigkeit vom Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes und andererseits in Abhängigkeit von der Rohdichte den verschiedenen Modellen gegenübergestellt.

6.10.1 Charakteristischer Auszieh Widerstand in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel

Die Verläufe in Abb. 29a wurden mit einem Schraubendurchmesser von $d = 8$ mm, einer effektiven Einschraubtiefe von $l_{ef} = 6d$ und einer charakteristischen Rohdichte von $\rho_k = 500$ kg/m³ berechnet. Für die Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes darf nach DIN 1052:2008 höchstens eine Rohdichte von $\rho_k = 500$ kg/m³ eingesetzt werden, da dem Bemessungsmodell nur Ausziehprüfungen mit Fichte (*Picea abies* KARST) bis zu einer Rohdichte von etwa 560 kg/m³ zugrunde liegen. Der charakteristische Wert des Ausziehparameters wurde nach der Tragfähigkeitsklasse 3 (Tab. 16) berechnet (vgl. Abschnitt 4.3). Das Berechnungsmodell mit dem parallel verschobenen Hankinson-Verlauf (schwarze, strichlierte Linie) für Eschen-BSH wurde zusätzlich in Abb. 29a eingezeichnet. Nach SIA 265:2003 wird die Abhängigkeit des Einschraubwinkels mit einem Verhältniswert von 1,5 zwischen der Ausziehtragfähigkeit bei $\alpha = 90^\circ$ zur Ausziehtragfähigkeit bei $\alpha = 0^\circ$

berücksichtigt. In DIN 1052:2008 geht das Verhältnis mit einem Wert von $4/3$ und in ON EN 1995-1-1:2009 mit einem Wert von $1,2$ ein. Die größeren Streuungen bei $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 15^\circ$ werden in der SIA 265:2003 durch den gegenüber in der DIN 1052:2008 und im Eurocode 5 höheren Verhältniswert berücksichtigt. Nach DIN 1052:2008 darf dafür erst ab einem Winkel von $\alpha \geq 45^\circ$ und im EC 5 erst ab $\alpha \geq 30^\circ$ eingeschraubt werden. Schneider (o.J.) sieht von 0° bis 14° einen konstanten Wert für den charakteristischen Auszieh Widerstand vor. Für Einschraubwinkel $\alpha \geq 15^\circ$ wird eine quadratische Gleichung angesetzt, mit einem Maximum bei $\alpha = 45^\circ$.

In Tab. 34 sind die Werte des charakteristischen Auszieh Widerstandes für die gewählten Parameter der verschiedenen Bemessungsmodelle aufgelistet. Das ermittelte, bilineare Berechnungsmodell zeigt, dass die Ergebnisse der derzeit gültigen Modelle für das Beispiel mit extrem niedriger Rohdichte für Eschen-BSH zu niedrig sind. Bei einem Einschraubwinkel von $\alpha = 30^\circ$ ergibt sich für den charakteristischen Auszieh Widerstand eine Steigerung von 36% und bei $\alpha = 90^\circ$ eine Steigerung von 18% gegenüber der Formel in ON EN 1995-1-1:2009. Der Unterschied zur Bemessung nach DIN 1052:2004 beträgt bei $\alpha = 45^\circ$ 24% und bei $\alpha = 90^\circ$ 6% . Der Maximalwert rechtwinklig zur Faserrichtung mit $7,68$ nach DIN 1052:2004 weicht nur um $0,05$ kN vom Maximalwert nach Schneider (o.J.) unter $\alpha = 45^\circ$ ab.

$R_{ax,\alpha,k}$ in kN	Schraubenachsen-Faser-Winkel in Grad							
	0	14	15	30	45	60	75	90
DIN 1052:2004	-	-	-	-	6,58	7,09	7,51	7,68
SIA 265:2003	4,29	4,37	4,39	4,68	5,15	5,72	6,22	6,43
ON EN 1995-1-1:2009	-	-	-	6,01	6,29	6,59	6,82	6,92
Schneider (o.J.)	5,23	5,23	7,16	7,51	7,63	7,51	7,14	6,54
ES: bilinearer Verlauf	5,70	6,84	6,93	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15

Tabelle 34: Werte des charakteristischen Auszieh Widerstandes der verschiedenen Bemessungsmodelle für $d = 8$ mm, $l_{ef} = 6d$ und $\rho_k = 500$ kg/m³

6.10.2 Charakteristischer Auszieh Widerstand in Abhängigkeit von der Rohdichte

In Abb. 29b sind die Ergebnisse der verschiedenen Bemessungsmodelle für den charakteristischen Auszieh Widerstand in Abhängigkeit von der Rohdichte dargestellt. Die Berechnung erfolgte mit einem Schraubendurchmesser von $d = 8$ mm, einer effektiven Einschraubtiefe von $l_{ef} = 6d$ und einem Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes von $\alpha = 90^\circ$.

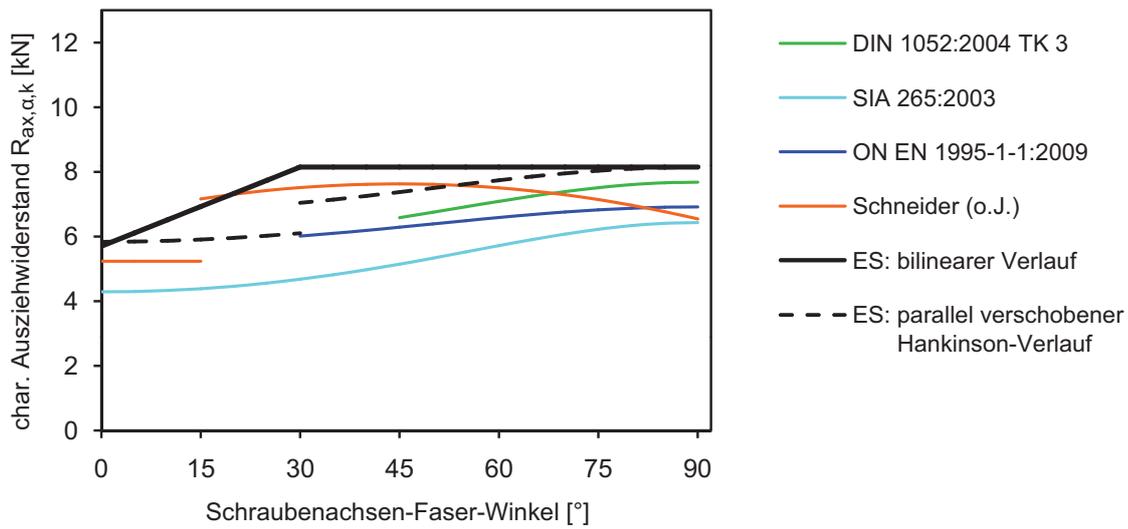
Nach DIN 1052:2004 geht die charakteristische Rohdichte quadratisch in die Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes ein (Tab. 16), wobei der Wert $\rho_k \leq 500$ kg/m³ sein muss. Die Ergebnisse nach der Formel von Schneider (o.J.) schließen an die nach DIN 1052:2004 berechneten Werte bei $\rho_k = 500$ kg/m³ mit einem um $1,14$ kN kleineren Wert an. Die Steigung der Kurve nach Schneider (o.J.) ist geringer als die Steigung der Kurve nach DIN 1052:2004, die charakteristische Rohdichte geht mit dem Exponenten von $1,78$ in die Berechnung ein. Ab charakteristischen Rohdichten $\rho_k > 800$ kg/m³ muss der charakteristische Auszieh Widerstand nach Schneider (o.J.) um 20% abgemindert werden (vgl. Abschnitt 4.4.3). Die Ergebnisse nach ON EN 1995-1-1:2009 und nach SIA 265:2003

verlaufen sehr ähnlich. Nach EC 5 beträgt der Exponent der charakteristischen Rohdichte 0,8 und in die Schweizer Norm geht die charakteristische Rohdichte linear ein. Der Verlauf für die charakteristischen Auszieh Widerstände von Holzschrauben in Eschen-BSH gleicht einem parallel nach oben verschobenen Verlauf nach Schneider (o.J.).

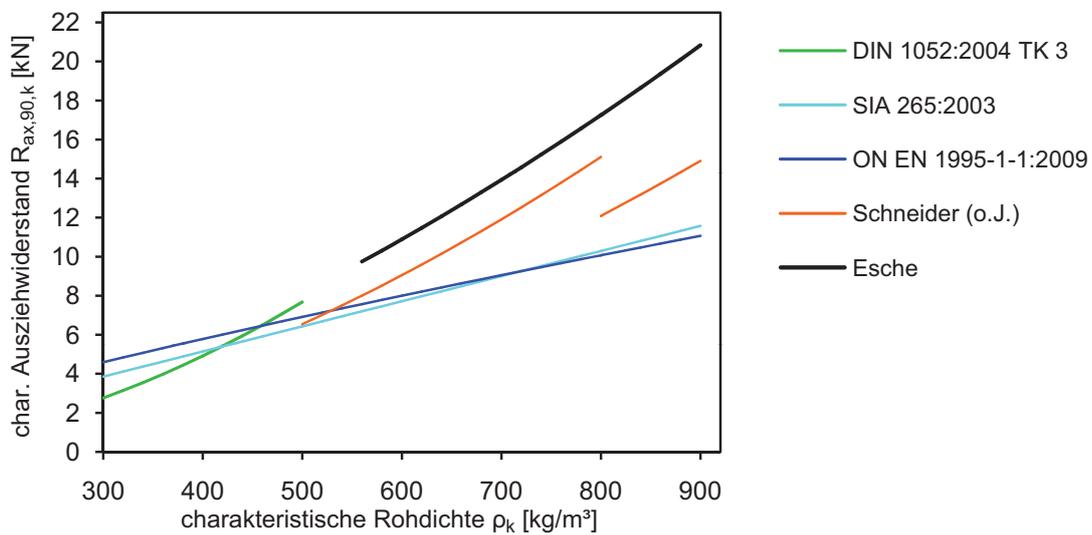
In Tab. 35 sind die Werte für die charakteristischen Auszieh Widerstände der verschiedenen Bemessungsmodelle angeführt. Für die bei dieser Arbeit ermittelte charakteristische Rohdichte von $\rho_k = 667 \text{ kg/m}^3$ liegt der charakteristische Auszieh Widerstand berechnet nach dem bilinearen Modell 48 % über dem Bemessungsmodell nach ON EN 1995-1-1:2009 und 18 % über dem Ergebnis nach Schneider (o.J.).

$R_{ax,90,k}$ in kN	Charakteristische Rohdichte in kg/m^3								
	300	400	500	600	667	700	800	801	900
DIN 1052:2004	2,76	4,92	7,68	-	-	-	-	-	-
SIA 265:2003	3,86	5,15	6,43	7,72	8,58	9,01	10,29	10,30	11,58
ON EN 1995-1-1:2009	4,60	5,79	6,92	8,00	8,71	9,05	10,07	10,08	11,07
Schneider (o.J.)	-	-	6,54	9,05	10,93	11,91	15,11	12,11	14,91
ES: bilinearer Verlauf	3,60	5,70	8,15	10,91	12,92	13,96	17,29	17,32	20,87

Tabelle 35: Werte der charakteristischen Rohdichte der verschiedenen Bemessungsmodelle für $d = 8 \text{ mm}$, $l_{ef} = 6d$ und $\alpha = 90^\circ$



(a) Charakteristischer Auszieh Widerstand in Abhängigkeit vom Schraubenachsen-Faser-Winkel α für $d = 8$ mm, $l_{ef} = 6d$ und $\rho_k = 500$ kg/m³



(b) Charakteristischer Auszieh Widerstand in Abhängigkeit von der Rohdichte ρ_k für $d = 8$ mm, $l_{ef} = 6d$ und $\alpha = 90^\circ$

Abbildung 29: Vergleich der Modelle

7 Schlussbetrachtungen

7.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 2 581 Ausziehprüfungen nach ON EN 1382:1999 in 42 Serien mit bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben und Gewindestangen mit Gewinde nach DIN 7998:1975 in Eschen-BSH durchgeführt. Es wurden dafür im Nadelholz selbstbohrende Holzschrauben von *Schmid Schrauben Hainfeld GmbH* mit den Durchmessern $d = 4$ mm, 6 mm und 8 mm und von *SPAX International GmbH & Co. KG* mit $d = 10$ mm und 12 mm verwendet. Weiters kamen Gewindestangen der Firma *SFS intec AG* mit Gewinde nach DIN 7998:1975 und einem Durchmesser von $d = 20$ mm zum Einsatz. Der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung des Holzes wurde in 15°-Schritten zwischen 0° und 90° variiert. Die Einschraubtiefe betrug im Regelfall $6d$, wobei die Schraubenspitzen außerhalb der Prüfkörper lagen. Bei acht Serien wurden die Schrauben so eingebettet, dass die Schraubenspitze im Prüfkörper lag und der Einfluss der Schraubenspitze ermittelt werden konnte. Zur Bestimmung des Einflusses der Einschraubtiefe wurden die Ergebnisse der dieser Arbeit vorangegangenen Bakkalaureatsarbeit von Kummer und Lögl (2009) übernommen. Im Zuge dieser Bakkalaureatsarbeit wurden 396 Ausziehprüfungen mit bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben $d = 8$ mm in Eschen-BSH durchgeführt, wobei die Einschraubtiefe zwischen $4d$, $6d$ und $8d$ variiert wurde.

Nach den Ausziehprüfungen wurden die Prüfkörper um die vorgebohrten Führungslöcher der Schrauben in quaderförmige Proben geschnitten, an denen die Rohdichte und die Holzfeuchte nach ON EN 13 183-1:2004 bestimmt wurde. Die Rohdichten und die aus den Prüfungen erhaltenen Ausziehkräfte wurden auf die Referenzholzfeuchte von $u = 12\%$ korrigiert. Der nächste Schritt bestand in der Analyse der Ausreißer und deren Zurückverfolgung auf die jeweiligen Prüfungsbedingungen und Prüfkörperbesonderheiten. Es konnten die jeweiligen Prüfungen ausgeschlossen werden, um keine verfälschten Auswertungsergebnisse zu erhalten.

Der erste Punkt der Auswertung war die Ermittlung des Einflusses der Schraubenspitze. Bei eingebetteter Schraubenspitze muss bei der Berechnung der Scherfestigkeit von der Länge des Gewindeteils im Holz $1,11d$ abgezogen werden. Dadurch erhält man die tatsächliche Scherfestigkeit des Holzes in der Mantelfläche um die Schraube bzw. die rechnerische Einschraubtiefe, bei der die Ausziehkraft einer durchgeschraubten Schraube gleich groß wäre.

Mit den Daten und mit Hilfe einer nichtlinearen Regressionsanalyse wurde die folgende Gleichung zur Berechnung des Ausziehwiderstandes in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser d , der Rohdichte ρ , der effektiven Einschraubtiefe l_{ef} und des Einschraubwinkels α bestimmt:

$$R_{test,korr,\alpha} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,94} \cdot \rho^{1,6} \cdot d^{0,7}}{\sin^2 \alpha + 1,21 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{N}]$$

Es stellte sich heraus, dass die effektive Einschraubtiefe l_{ef} mit dem Exponenten 0,94 in die Berechnung eingeht, d. h. dass z. B. bei Verdoppelung der Einschraubtiefe die Ausziehkraft um 92 % zunimmt. Im Vergleich dazu beträgt nach ON EN 1995-1-1:2009 der Exponent der Einschraubtiefe 0,9. Die Abhängigkeit der Ausziehkraft von der Rohdichte wird mit dem Exponenten von 1,6 und vom Durchmesser mit dem Exponenten von 0,7 berücksichtigt. Nach EC 5 beträgt der Exponent für die Rohdichte 0,8 und für den Durchmesser 0,5.

Schneider (o.J.) bestimmte für den Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Laubholz 1,78 als Exponent für die Rohdichte. Das Verhältnis der Mittelwerte der Scherfestigkeit für einen Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$ zu $\alpha = 0^\circ$ ergab sich zu 1,21. Der Verhältniswert nach EC 5 beträgt 1,2.

Zur Bestimmung des charakteristischen Wertes des Auszieh Widerstandes wurde die charakteristische Rohdichte eingesetzt und der Vorfaktor von 2,9 auf 2,4 abgemindert. Es wurde festgestellt, dass der charakteristische Auszieh Widerstand von $\alpha = 0^\circ$ bis $\alpha < 30^\circ$ etwa um 30 % ansteigt und dass ab $\alpha \geq 30^\circ$ die Abhängigkeit vom Einschraubwinkel vernachlässigbar klein ist.

Aufgrund dieser Tatsachen konnte ein bilineares Modell zur Berechnung des charakteristischen Auszieh Widerstandes gemäß nachfolgender Gleichung angegeben werden:

$$R_{ax,\alpha,k} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot l_{ef}^{0,94} \cdot \rho_k^{1,6} \cdot d^{0,7} \begin{cases} \cdot 1 & \text{für } \alpha \geq 30^\circ \\ \cdot (1 - 0,01 \cdot (30^\circ - \alpha)) & \text{für } \alpha < 30^\circ \end{cases} \quad [\text{N}]$$

In diesem Berechnungsmodell steigen die Werte des charakteristischen Auszieh Widerstandes von $\alpha = 0^\circ$ bis $\alpha < 30^\circ$ linear um 1 % je Winkelgrad an und im Bereich $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ sind die Werte konstant, d. h. nur mehr vom Durchmesser, von der effektiven Einschraubtiefe und von der charakteristischen Rohdichte abhängig.

Beim Vergleich des bilinearen Berechnungsmodelles mit den derzeit in den deutschsprachigen Normen gültigen Bemessungsmodellen zur Bestimmung des charakteristischen Auszieh Widerstandes zeigte sich, dass die Ergebnisse nach ON EN 1995-1-1:2009, SIA 265:2003 und DIN 1052:2004 deutlich unter den für Eschen-BSH rechenbaren liegen. Diese Aussage wurde bereits im Rahmen der Bakkalaureatsarbeit für den Einschraubwinkel von $\alpha = 90^\circ$ getroffen und konnte mit dieser Arbeit auf alle Winkel zwischen 0° und 90° erweitert werden. Die Ergebnisse nach den Berechnungsformeln von Schneider (o.J.) sind den bei dieser Arbeit ermittelten noch am ähnlichsten, aber auch niedriger. Der Grund dafür liegt in den Rohdichteunterschieden. Die zugrunde liegenden Prüfungswerte für die Berechnungsformel nach Schneider (o.J.) wurden auf eine Buchenroh dichte von 680 kg/m^3 normiert. Die mittlere Rohdichte der Eschenprüfkörper in dieser Arbeit lag bei 746 kg/m^3 , d. h. 10 % über den Werten von Schneider (o.J.).

7.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Da die Scherfestigkeiten von Holzschrauben in Eschen-BSH deutlich über denen in Fichtenholz liegen, gibt es folgende Vorschläge für zukünftige Schraubenverbindungen mit Eschen-BSH. Zum einen werden die Zugfestigkeiten der derzeit bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben bei deutlich geringeren Einschraubtiefen erreicht, d. h. die Einschraubtiefe tritt bei der Bauteildimensionierung weiter in den Hintergrund. Zum anderen führt dies zum Wunsch nach leistungsfähigeren Schrauben. Da eine weitere Härtung über 1000 N/mm^2 wegen der abnehmenden Duktilität und der zunehmenden Gefahr der Wasserstoffkorrosion kaum möglich ist, bliebe die Erhöhung des Verhältnisses von Kern- zu Außendurchmesser. Die Zugtragfähigkeit von Schrauben steigt ebenso quadratisch mit dem Durchmesser an wie die Anschlussfläche pro Schraube. Da die Scherfestigkeit aber mit dem Durchmesser sinkt, wären kleinere Schraubendurchmesser zu bevorzugen, allerdings würde auch gleichzeitig der Montageaufwand steigen.

Die maximalen Einschraubtiefen für im Holzbau häufig verwendete Schraubendurchmesser zwischen $d = 6$ mm und $d = 12$ mm liegen etwa zwischen $6d$ und $9d$. Das heißt, dass auch bei kleinen Querschnittsdimensionen große Kräfte ins Eschen-BSH übertragen werden können. Ein Beispiel dafür wären Holz-Glas-Fassaden aus Pfosten-Riegel-Konstruktionen mit großen Glaselementen. Durch große Glaselemente entstehen erhebliche Lasten, die die Riegel exzentrisch beanspruchen. Die Verwendung von Eschen-BSH und der Einsatz von Holzschrauben als Verbindungsmittel zwischen den Riegeln und den Pfosten würde hier erhebliche Vorteile gegenüber BSH aus Nadelholz bringen.

Durch die Reduktion der erforderlichen Einschraubtiefe könnten vermehrt Teilgewindeschrauben zum Einsatz kommen. Die Schaftdehnung könnte zu einer höheren Duktilität der Schraubenverbindung beitragen. Zusätzlich könnten bei Einbettung des Teilgewindes in das Holz höhere Kräfte übertragen werden, da die Gewindegänge in der Nähe der Holzoberfläche weniger zur Kraftübertragung beitragen als tiefer eingebettetes Regelgewinde.

7.3 Zukünftige Forschungsaufgaben

Aufbauend auf die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse sollten weitere Forschungsarbeiten mit Holzschrauben in Eschen-BSH und auch anderen Laubhölzern erfolgen.

Bei der Berechnung des Auszieh Widerstandes der Einzelschraube in Eschen-BSH wäre es sinnvoll den Einfluss der Holzfeuchte genauer zu untersuchen. Die in dieser Arbeit verwendete Näherung sollte verifiziert werden und die Einflüsse auf das Bemessungsmodell insbesondere auf den Modifikationsbeiwert k_{mod} analysiert werden.

Ebenso wäre abzuklären, bei welchen Einbettstiefen von Teilgewindeschrauben ein deutlicher Zugewinn beim Auszieh Widerstand erreicht werden kann. Dies würde das Berechnungsmodell für Holzschrauben in Eschen-BSH um einen, gerade für kurze Einschraublängen wichtigen, Parameter erweitern. Es könnte sein, dass sich durch die Einbettung des Gewindes von Teilgewindeschrauben eine andere Abhängigkeit des charakteristischen Auszieh Widerstandes vom Einschraubwinkel ergibt, d. h. der Wert im Bereich des Einschraubwinkels von $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ nicht konstant ist. Pirnbacher und Schickhofer (2009) publizierten ein Berechnungsmodell mit einer modifizierten Hankinson-Funktion und stellten fest, dass die Ausziehtragfähigkeit von Teilgewindeschrauben mit 8 mm Durchmesser um 15 % steigt, wenn das 100 mm lange Gewinde mindestens mit $2d$ im Fichtenholz versenkt wird.

Um das Modell auf weitere Laubholzarten erweitern zu können, sollte der Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Laubhölzern mit anderem anatomischen Aufbau und abweichenden Rohdichten vergleichend untersucht werden.

Von grundlegender Wichtigkeit für eine Schraubenoptimierung im Hartholz, wäre eine Funktion für die Abhängigkeit des Auszieh Widerstandes vom Verhältnis zwischen Kern- und Außendurchmesser.

Als BSH könnte das Eschenholz durchaus den Durchbruch im Bauwesen schaffen, da es mit sehr hohen Festigkeiten und edler Ästhetik das Nadelholz übertrifft. Die höheren Preise könnten durch einen gezielten Einsatz kompensiert werden. Als Vorbild gilt die Schweiz, wo bereits Eschen-BSH und Eschen-Fichten-Hybridträger verwendet werden. Nach weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird Eschen-BSH hoffentlich bald im konstruktiven Holzbau auch in Österreich und Deutschland Anwendung finden.

Abbildungsverzeichnis

1	Zuwachs und Nutzung von Buche, Eiche und Esche	3
2	Produktionshalle der Schreinerei Anton Schnidrig (Visp, CH)	6
3	Verbreitungsgebiet der Esche	8
4	Aufnahmen der Esche	9
5	Stammwuchsbild einer Esche	11
6	Hygroskopisches Gleichgewicht bei 20 °C	12
7	Schraubenachsen-Faser-Winkel nach Zulassung Nr. Z-9.1-472	25
8	Mindestabstände untereinander sowie von Hirnholzenden und Rändern nach ON EN 1995-1-1:2009	32
9	Anrechenbare Einschraubtiefe l_{ef} nach SIA 265:2003	35
10	Skizzen der verwendeten Schrauben	38
11	Details zu den verwendeten Schrauben	38
12	Montagegeräte SFS WB-T 20,0 mm	40
13	Hauptwuchsgebiete Österreichs	40
14	Prüfvorrichtung	44
15	Adaption der Prüfvorrichtung für $d = 4$ mm	45
16	Adaption der Prüfvorrichtung für $d = 20$ mm	46
17	Verformungsmessung mittels induktiver Wegaufnehmer	47
18	Spiralenförmiges Abscheren der Fasern	48
19	Boxplots der Rohdichten der einzelnen Serien bei 12 % Holzfeuchte	51
20	Histogramm zur Rohdichte und zur Holzfeuchte	52
21	Streudiagramme zur Ausreißerbereinigung	55
22	Einschraubtiefe	58
23	Boxplots der Scherfestigkeiten der einzelnen Serien - auf ρ_{mean} korrigiert	60
24	Mittelwerte der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser für die Winkel $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$	61
25	Boxplots der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel - auf $d_{ref} = 10$ mm normiert	65
26	Boxplots der korrigierten Scherfestigkeiten je Durchmesser in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel	66
27	Vergleich der Berechnungsmodelle für den charakteristischen Auszieh- widerstand von Holzschrauben in Eschen-BSH für $d = 10$ mm, $l_{ef} = 6d$ und $\rho_k = 667$ kg/m ³	68
28	Vergleich eingeschraubte/eingeklebte Gewindestange	69
29	Vergleich der Modelle	72
30	Q-Q-Plots der Rohdichte	85
31	Histogramme der Rohdichten für jeden Durchmesser	86
32	Q-Q-Plots der Holzfeuchte	88
33	Histogramme der Holzfeuchten für jeden Durchmesser	89
34	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 4$ mm	93
35	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 20$ mm	93
36	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 6$ mm	94
37	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 8, 10, 12$ mm, $\alpha = 0^\circ$	95
38	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 8$ mm	96

39	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 10$ mm	97
40	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 12$ mm	98
41	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 8$ mm, $\alpha = 90^\circ$	99
42	Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 6, 10, 12$ mm, $\alpha = 90^\circ$	100

Tabellenverzeichnis

1	Rundholzpreise der Wertholzsubmission vom 27. Jänner 2010 in Großwildersdorf/Steiermark	4
2	Stammholzpreise einiger Laubhölzer	5
3	Rohdichte der Esche im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern	10
4	Schwindmaße von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern . .	13
5	Festigkeitseigenschaften von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern	14
6	Bruchschlagarbeit von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern	15
7	Dauerfestigkeiten von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern	16
8	Elastische Kenngrößen von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern	17
9	Natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit der Esche	17
10	Härte nach Brinell von Eschenholz im Vergleich zu einheimischen Nutzhölzern	18
11	Eigenschaften der Lamellen für BSH nach Entwurf ON EN 14 080:2009 . . .	19
12	Balkenaufbau bei Brettschichtholz nach Entwurf ON EN 14 080:2009	20
13	Modifikationsbeiwerte nach ON EN 1995-1-1:2009	31
14	Nutzungsklassen nach ON EN 1995-1-1:2009	31
15	Mindestabstände untereinander sowie von Hirnholzenden und Rändern nach ON EN 1995-1-1:2009	31
16	Charakteristische Werte für die Ausziehparameter $f_{1,k}$ und die Kopfdurchziehparameter $f_{2,k}$ in N/mm ² für Holzschrauben nach DIN 1052:2008	32
17	Mindestabstände nach DIN 1052:2008	34
18	Mindestabstände nach SIA 265:2003	36
19	Schraubengeometrie und charakt. Zugtragfähigkeit	39
20	Bezeichnung der Serien	42
21	Vorbohrdurchmesser	43
22	Ausgeschlossene Prüfungen	53
23	Prüfungen mit Schraubenbruch	54
24	Prüfungen mit R_{test} über der 97,5%-Grenze	56
25	Prüfungen mit R_{test} unter der 2,5%-Grenze	57
26	Serien ohne und mit Einbettung der Schraubenspitze	57
27	Variablenschätzer	58
28	Korrelation der Variablenschätzer	59
29	Mittelwerte der Scherfestigkeiten bei einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$	60
30	Maximale, effektive Einschraubtiefe unter einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ für Eschen-BSH	62
31	Maximale, effektive Einschraubtiefe unter einem Winkel von $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ für Nadelholz	63
32	Werte der normierten Scherfestigkeit je Schraubenachsen-Faser-Winkel . . .	65
33	Werte des charakteristischen Ausziehwiderstandes für die Berechnungsmodelle von Holzschrauben in Eschen-BSH	68
34	Werte des charakteristischen Ausziehwiderstandes der verschiedenen Bemessungsmodelle	70
35	Werte der charakteristischen Rohdichte der verschiedenen Bemessungsmodelle	71

36	Werte zur Rohdichte	87
37	Werte zur Holzfeuchte	90
38	Werte zum Auszieh Widerstand - auf 12 % Holzfeuchte korrigiert	92
39	Werte zur effektiven Einschraubtiefe	102
40	Werte zum berechneten Auszieh Widerstand	104
41	Werte zur Scherfestigkeit	106
42	Werte zur Scherfestigkeit – korrigiert auf ρ_{mean}	108
43	Werte zur Scherfestigkeit – korrigiert auf ρ_{mean} und normiert auf $d = 10$ mm	109
44	Anzahl bzw. Prozent der Prüfwerte höher als die charakteristischen Aus- zieh Widerstände	110
45	Werte zum charakteristischen Auszieh Widerstand	111

Literaturverzeichnis

- [Aas 2002] AAS, Gregor: Die Gewöhnliche Esche (*Fraxinus excelsior*) – Dendrologische Anmerkungen. In: SCHMIDT, Olaf (Hrsg.) ; KÖLBEL, Markus (Hrsg.): *Beiträge zur Esche - Fachtagung zum Baum des Jahres 2001*. Freising : Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Mai 2002, S. 1–5
- [BASF 2000a] BASF: Leime und Tränkharze für die Holzwerkstoff-Industrie – Kauramin Leim 683 flüssig mit Kauramin Härter 688 flüssig im Holzleimbau. Ludwigshafen, November 2000. – Technisches Merkblatt
- [BASF 2000b] BASF: Verleimung von Hart- und Exotenhölzern. Ludwigshafen, November 2000 (M 6106 d). – Herstellerempfehlungen
- [Bejtka 2005] BEJTKA, Ireneusz: Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben / Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion. Karlsruhe, Januar 2005. – Band 2 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. – ISBN 3-937300-54-6
- [Bernasconi 2000] BERNASCONI, Andrea: Zum Kapitel 6 10 des Swisscodes: Verbindungen mit eingeleimten profilierten Stäben. Geesthacht, Deutschland, 2000. – Forschungsbericht
- [Blaß und Bejtka 2004] BLASS, Hans-Joachim ; BEJTKA, Ireneusz: *Holz Kalender 2004*. Bd. 3. Jahrgang. Kap. Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten, S. 516–541, Bruderverlag, 2004
- [Blaß u. a. 2006] BLASS, Hans Joachim ; BEJTKA, Ireneusz ; UIBEL, Thomas: Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde / Universität Karlsruhe. Universitätsverlag Karlsruhe, 2006. – Band 4 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. – ISBN 978-3-86644-034-0
- [Bröker und Krause 1991] BRÖKER, Friedrich-Wilhelm ; KRAUSE, H. A.: Orientierende Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 49 (1991), Oktober, Nr. 10, S. 381–384
- [Cockrell 1933] COCKRELL, Robert A.: A Study of the Screw-Holding Properties of Wood / New York State College of Forestry. Syracuse, New York, USA, 1933. – Technical Publication No. 44
- [DIN 1052: 2008] DIN 1052: *Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*. Dezember 2008
- [DIN 1055 Blatt 3: 1971] DIN 1055 BLATT 3: *Lastannahmen für Bauten – Verkehrslasten*. Juni 1971
- [DIN 52182: 1976] DIN 52182: *Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte*. September 1976
- [DIN 68364: 2003] DIN 68364: *Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten*. Mai 2003

- [DIN 7998: 1975] DIN 7998: *Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben*. Februar 1975
- [Eckelman 1975] ECKELMAN, Carl A.: Screwholding performance in hardwoods and particleboard. In: *Forest Products Journal* 25 (1975), Nr. 6, S. 30–35
- [Grosser 2002] GROSSER, Dietger: Das Holz der Esche – Eigenschaften und Verwendung. In: SCHMIDT, Olaf (Hrsg.) ; KÖLBEL, Markus (Hrsg.): *Beiträge zur Esche - Fachtagung zum Baum des Jahres 2001*. Freising : Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Mai 2002, S. 56–61
- [Grosser und Zimmer 2000] GROSSER, Dietger ; ZIMMER, Bernhard: *Einheimische Nutzhölzer und ihre Verwendung*, 2000
- [Hacker 2002] HACKER, Hermann: Insekten an Esche. In: SCHMIDT, Olaf (Hrsg.) ; KÖLBEL, Markus (Hrsg.): *Beiträge zur Esche - Fachtagung zum Baum des Jahres 2001*. Freising : Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Mai 2002, S. 44–49
- [Hankinson 1921] HANKINSON, R. L.: Investigation of Crushing Strength of Spruce at Various Angles to the Grain. In: *Air Service Information Circular* 3 (1921), Nr. 259. – Materials Section Paper No. 130
- [Hübner 2009] HÜBNER, Ulrich: Laubhölzer für lastabtragende Bauteile im Bauwesen. In: *OIB aktuell* 10 (2009), S. 12–23
- [Hübner 2010a] HÜBNER, Ulrich: *Scherfestigkeit der Klebefugen von Eschen-BSH*. 11. März 2010. – Mündliche Mitteilung
- [Hübner 2010b] HÜBNER, Ulrich: *Variationskoeffizient der Rohdichte von Eschenvollholz*. 9. März 2010. – Mündliche Mitteilung
- [Jablonkay 1999] JABLONKAY, Peter: *Schrauben unter Ausziehbeanspruchung*, Prof. für Holztechnologie, ETH Zürich, Diplomarbeit, 1999
- [Keylwerth 1951] KEYLWERTH, Rudolf: Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer. Düsseldorf : VDI-Verl., 1951 (Bd. 17). – VDI-Forschungsheft 430. Beilage zu „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens“
- [Kollmann 1941] KOLLMANN, Franz Friedrich Paul: *Schriftenreihe Eigenschaften und Verwertung der deutschen Naturhölzer*. Bd. 1: *Die Esche und ihr Holz*. Berlin : Julius Springer, 1941
- [Kollmann 1951] KOLLMANN, Franz Friedrich Paul: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1: *Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit*. 2., neubearb. und erw. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer, 1951. – ISBN 3-8041-3173-5
- [Kummer und Lögl 2009] KUMMER, Markus ; LÖGL, Manuel: *Bestimmung des Auszieh Widerstandes von selbstbohrenden Holzschrauben in Eschenholz*. Graz, Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Diplomarbeit, Juli 2009. – Bakkalaureatsarbeit

- [Landwirtschaftskammer Österreich 2010] LANDWIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH: *Preise Februar 2010*. Waldverband Österreich. Februar 2010. – URL http://www.waldverband.at/downloads/cms_uploaded/hoku22010_4b7e4db6edb88.pdf. – Zugriffsdatum: 03.03.2010
- [Niedermair u. a. 2007] NIEDERMAIR, Markus ; LEXER, Manfred Josef ; PLATTNER, Gerald ; FORMAYER, Herbert ; SEIDL, Rupert: *Klimawandel und Artenvielfalt: Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften? / Österreichische Bundesforste AG - Kompetenzfeld Natur- und Umweltschutz*. 2007. – Forschungsbericht
- [Niemz 1993] NIEMZ, Peter: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verl., 1993. – ISBN 3-87181-324-9
- [Ohnesorge u. a. 2008] OHNESORGE, Denny ; RICHTER, Klaus ; BECKER, Gero ; AICHER, Simon: *Adhesion behaviour of glued laminated timber from European Beech*. In: *Enhancing bondline performance, Final Conference of COST E34 Bonding of Timber*. Sopron, Hungary, May 6-7 2008, S. 110–118. – URL http://library.eawag-empa.ch/empa_publications_2008_open_access/EMPA20080125.pdf
- [Oliver-Villanueva 1993] OLIVER-VILLANUEVA, Jose-Vicente: *Holzeigenschaften der Esche (Fraxinus Excelsior L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standort*, Universität Göttingen, Dissertation, 1993
- [ON B 1995-1-1: 2009] ÖNORM B 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau - Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1*. 1. Juli 2009
- [ON DIN 4074-5: 2009] ÖNORM DIN 4074-5: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz*. 15. Juni 2009
- [ON EN 13183-1: 2004] ÖNORM EN 13183 TEIL 1: *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*. Februar 2004
- [ON EN 1382: 1999] ÖNORM EN 1382: *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragsfähigkeit von Holzverbindungsmiteln*. 1. November 1999
- [ON EN 1383: 1999] ÖNORM EN 1383: *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Prüfung von Holzverbindungsmiteln auf Kopfdurchziehen*. 1. November 1999
- [ON EN 14080: 2005] ÖNORM EN 14080: *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*. 9. Jänner 2005
- [ON EN 14080: 2009] ENTWURF ÖNORM EN 14080: *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*. 15. März 2009
- [ON EN 14592: 2009] ÖNORM EN 14592: *Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen*. 1. Februar 2009
- [ON EN 1912: 2009] ÖNORM EN 1912: *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten*. 15. Juni 2009

- [ON EN 1995-1-1: 2009] ÖNORM EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. 1. Juli 2009
- [ON EN 338: 2003] ÖNORM EN 338: *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. 01. Juli 2003
- [ON EN 338: 2009] ÖNORM EN 338: *Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen*. 01. Dezember 2009
- [ON EN 350-2: 1994] ÖNORM EN 350-2: *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa*. 1. Dezember 1994
- [ON EN 384: 2004] ÖNORM EN 384: *Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*. 01. Mai 2004
- [ON EN 392: 1995] ÖNORM EN 392: *Brettschichtholz Scherprüfung der Leimfugen*. 1. März 1995
- [Pirnbacher und Schickhofer 2009] PIRNBACHER, Gernot ; SCHICKHOFER, Gerhard: Base parameters of self-tapping screws. In: *Proceedings of CIB-W18*. Dübendorf, Schweiz, August 2009. – Paper 42-7-1
- [Pörtner und Seim 2008] PÖRTNER, Carsten ; SEIM, Werner: In Holz eingeklebte stiftförmige faserverstärkte Kunststoffe – Experimentelle Untersuchungen und mechanische Modellierung. In: *Bautechnik* 85 (2008), Nr. 4, S. 219–232
- [Schmidt 2009] SCHMIDT, Michael: *Leimbinder – Neue Absatzmöglichkeiten für Laubholz*. 23. September 2009. – URL <http://www.lwf.bayern.de/wald-und-gesellschaft/wissenstransfer-waldpaedagogik/oeffentlichkeitsarbeit/veranstaltungen/2009/34522/Leimbinder-Neue-Absatzmoeglichkeiten-fuer-Laubholz-Schmidt.pdf>. – Vortrag am 6. Bayerischen Waldbesitzertag in Freising-Weihenstephan
- [Schmidt u. a. 2009] SCHMIDT, Michael ; GLOS, Peter ; WEGENER, Gerd: Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 68 (2009), Nr. 1, S. 43–57
- [Schneider o.J.] SCHNEIDER, P.: *Auszugsfestigkeit von EJOT-Rahmenschrauben / Eidgenössische Technische Hochschule*. Zürich, o.J. – Forschungsbericht
- [Schuck u. a. 2002] SCHUCK, Hans Joachim ; SCHÜTT, Peter ; STIMM, Bernd: *Lexikon der Baum- und Straucharten – Das Standardwerk der Forstbotanik*. Hamburg : Nikol, 2002. – ISBN 3-933203-53-8
- [Sell 1989] SELL, Jürgen: *Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten*. 3. Aufl. Zürich : Baufachverlag, 1989. – ISBN 3-85565-223-6
- [SFS intec AG 2008] SFS INTEC AG: *Querzugverstärkung – Allgemeine Bemessungsgrundlagen*. Linz, März 2008 (01). – Datenblatt. Befestigungssystem WB

- [SIA 265: 2003] SIA 265: *Holzbau*. 1. März 2003
- [Statistik Austria 2010] STATISTIK AUSTRIA: *Fi./Ta. Blochholz B, Media 2 b – Preisentwicklung*. Waldverband Österreich. 3. Februar 2010. – URL http://www.waldverband.at/downloads/cms_uploaded/preisentwicklung_4b7e4d9debc57.pdf. – Zugriffsdatum: 03.03.2010
- [Taj u. a. 2009] TAJ, Mohammad Ali ; NAJAFI, Saeed Kazemi ; EBRAHIMI, Ghanbar: Withdrawal and lateral resistance of wood screw in beech, hornbeam and poplar. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 67 (2009), Nr. 2, S. 135–140
- [Trendelenburg 1939] TRENDELENBURG, R.: Über Fasersättigungsfeuchtigkeit, Schwindmaß und Raumdichtezahl wichtiger Holzarten. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 2 (1939), Januar, Nr. 1, S. 12–17
- [Wagenführ 2007] WAGENFÜHR, Rudi: *Holzatlas*. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN 3-446-40649-2
- [Wiener Börse AG 2001] WIENER BÖRSE AG: *Österreichische Holzhandelsusancen 1973*. Kap. C. Rohholz, S. 53–104, Wiener Börse AG, 2001
- [Zwettler 2010] ZWETTLER, Stefan: *Wertholzsubmission – Ergebnisliste 2010*. Waldverband Steiermark. 3. Februar 2010. – URL <http://www.waldverband-stmk.at/desktopdefault.aspx/tabid-756/>. – Zugriffsdatum: 03.03.2010
- [Zwick/Roell 2010a] ZWICK/ROELL: Kraftaufnehmer Xforce P, Xforce HP und Xforce K. Ulm, 2010 (P1 716 1.1008). – Produktinformation
- [Zwick/Roell 2010b] ZWICK/ROELL: Stand-Prüfmaschinen Z050 bis Z250 der Allround-Line. Ulm, 2010 (P1 416 1.0107 - Blatt 1 und Blatt 2). – Produktinformation

A Rohdichten auf 12 % Holzfeuchte korrigiert

Zur Bestimmung der Rohdichte wurden alle Prüfungen bzw. Proben verwendet.

A.1 Q-Q-Plots der Rohdichte

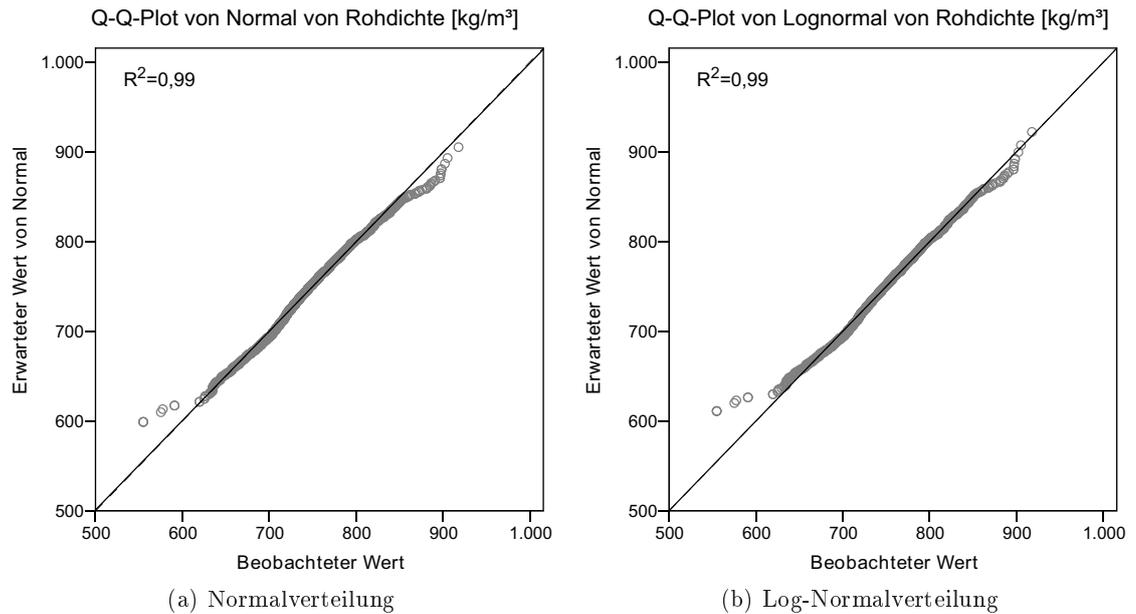
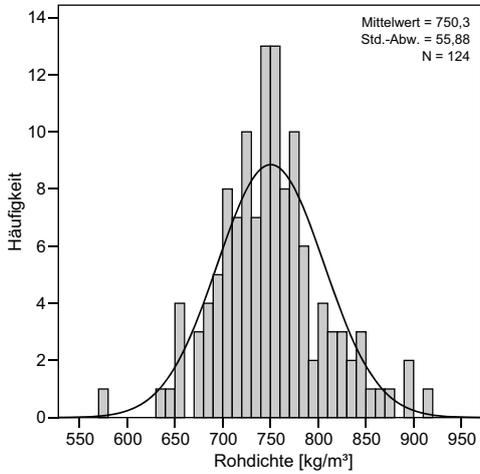
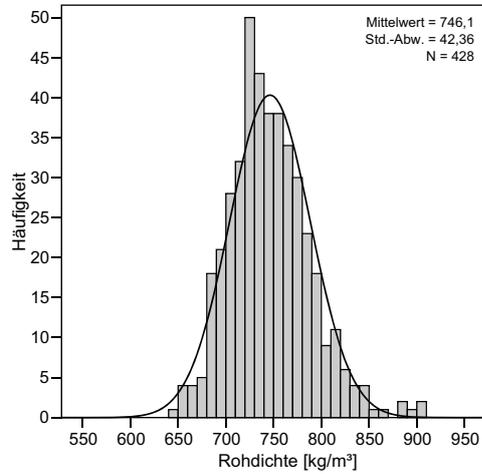


Abbildung 30: Q-Q-Plots der Rohdichte

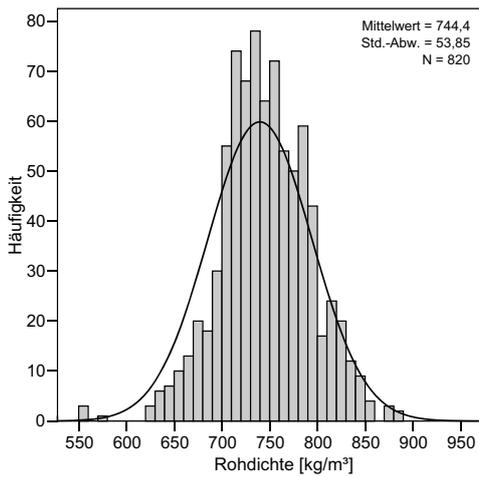
A.2 Histogramme und Werte der Rohdichten



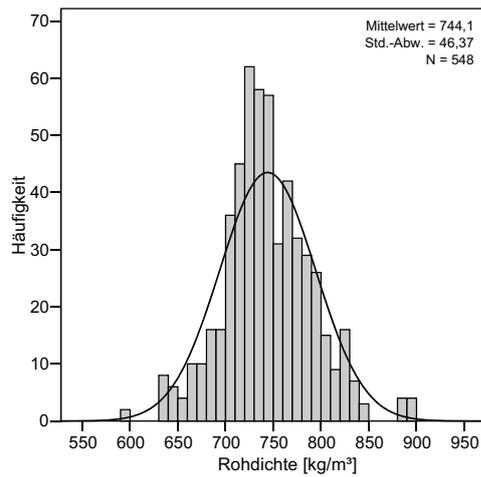
(a) $d = 4$ mm



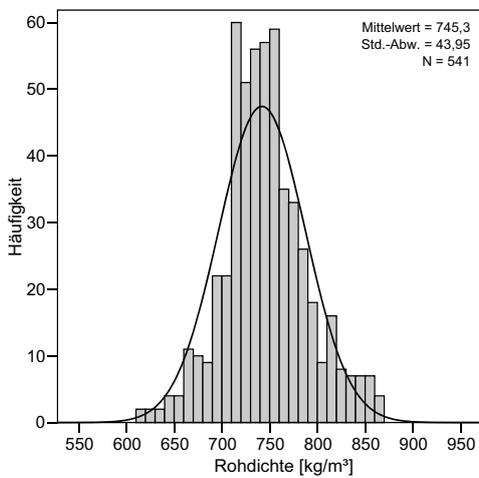
(b) $d = 6$ mm



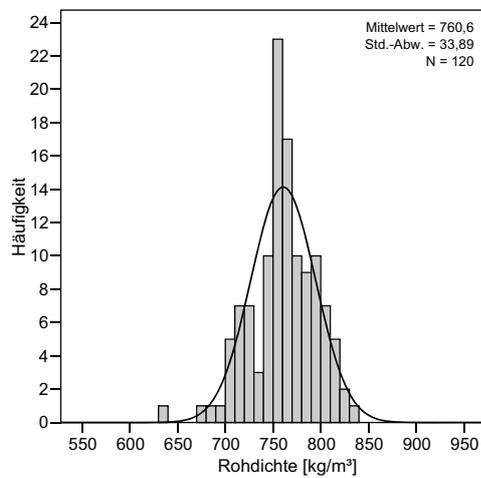
(c) $d = 8$ mm



(d) $d = 10$ mm



(e) $d = 12$ mm



(f) $d = 20$ mm

Abbildung 31: Histogramme der Rohdichten für jeden Durchmesser

Serie	Anzahl N [Stk.]	Rohdichte				
		5%-Perzentil [kg/m ³]	Mittelwert [kg/m ³]	95%-Perzentil [kg/m ³]	Std.-Abw. [kg/m ³]	COV [%]
ES04_00_24	62	686,3	762,1	872,4	55,2	7,2
ES04_90_24	62	650,6	738,5	820,8	54,5	7,4
ES06_00_36	63	681,0	752,8	840,4	48,4	6,4
ES06_15_36	59	665,9	738,9	801,4	41,4	5,6
ES06_30_36	60	680,9	741,2	807,6	39,7	5,4
ES06_45_36	61	690,7	736,6	794,4	33,0	4,5
ES06_60_36	62	693,3	739,8	790,9	32,6	4,4
ES06_75_36	61	684,6	733,7	785,0	32,3	4,4
ES06_90_36	62	703,4	779,0	867,7	48,5	6,2
ES08_00_48	60	590,2	712,4	816,6	109,3	15,3
ES08_00_48S	58	645,3	727,4	817,1	52,9	7,3
ES08_15_48	61	678,6	736,2	808,5	40,5	5,5
ES08_30_48	61	691,0	740,2	806,6	36,4	4,9
ES08_45_48	61	705,4	751,9	818,3	36,3	4,8
ES08_60_48	62	698,1	748,3	806,8	35,8	4,8
ES08_75_48	61	706,9	741,0	781,7	24,1	3,2
ES08_90_32	66	655,3	747,5	842,3	64,7	8,7
ES08_90_32S	66	637,6	749,7	850,9	65,0	8,7
ES08_90_48	66	653,5	753,2	839,2	56,6	7,5
ES08_90_48S	66	691,7	750,6	810,3	40,4	5,4
ES08_90_64	66	695,0	753,4	811,6	36,1	4,8
ES08_90_64S	66	693,5	760,1	798,0	33,8	4,4
ES10_00_60	62	634,8	749,5	881,2	67,5	9,0
ES10_00_60S	62	634,8	749,5	881,2	67,5	9,0
ES10_15_60	62	692,4	748,5	802,4	38,7	5,2
ES10_30_60	60	691,3	740,9	814,9	35,6	4,8
ES10_45_60	60	690,6	747,0	825,3	39,8	5,3
ES10_60_60	62	702,9	739,3	806,7	32,8	4,4
ES10_75_60	60	711,2	745,0	779,1	20,7	2,8
ES10_90_60	60	660,5	738,6	816,1	46,8	6,3
ES10_90_60S	60	660,5	738,6	816,1	46,8	6,3
ES12_00_60	61	643,5	730,3	818,4	51,7	7,1
ES12_00_60S	61	643,5	730,3	818,4	51,7	7,1
ES12_15_60	61	698,8	752,0	814,1	36,4	4,8
ES12_30_60	60	691,7	745,8	793,6	35,4	4,7
ES12_45_60	60	676,6	745,7	814,9	40,0	5,4
ES12_60_60	61	697,0	742,3	804,6	31,9	4,3
ES12_75_60	60	711,0	743,6	778,3	20,3	2,7
ES12_90_60	59	665,9	758,8	855,5	52,3	6,9
ES12_90_60S	58	667,6	760,2	862,4	55,5	7,3
ES20_00_160	59	702,5	753,5	806,6	33,0	4,4
ES20_90_160	61	728,2	767,6	813,2	33,5	4,4

Tabelle 36: Werte zur Rohdichte

B Holzfeuchten

Es wurden alle Proben zur Bestimmung der Holzfeuchte verwendet.

B.1 Q-Q-Plots der Holzfeuchte

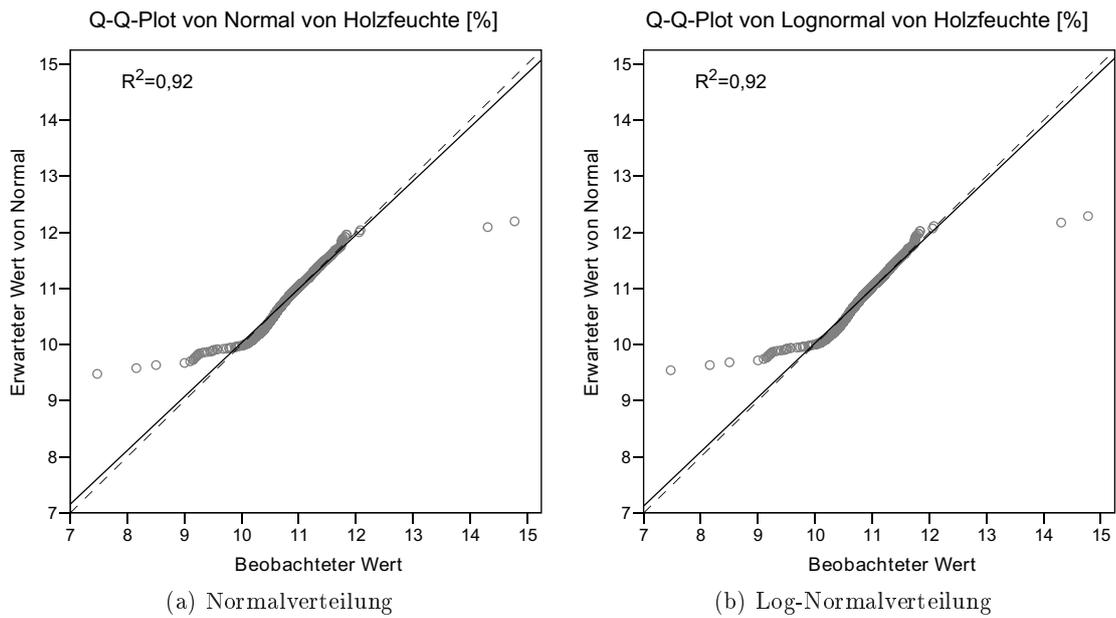
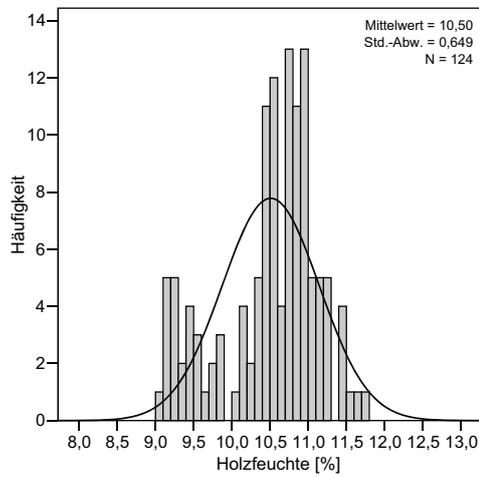
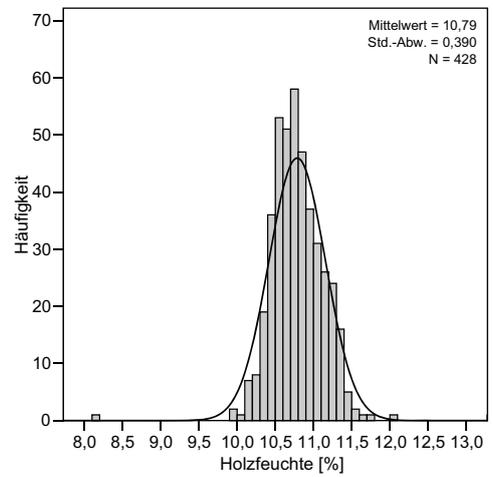


Abbildung 32: Q-Q-Plots der Holzfeuchte

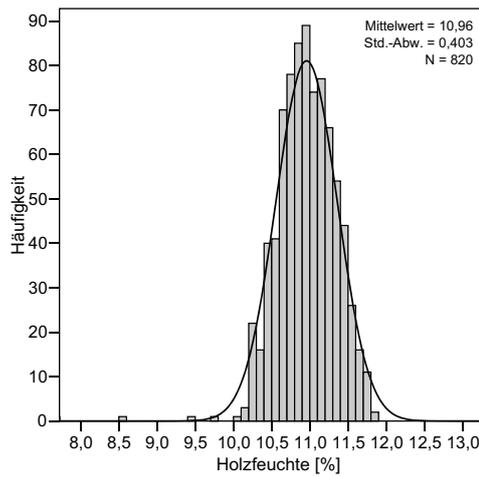
B.2 Histogramme und Werte der Holzfeuchten



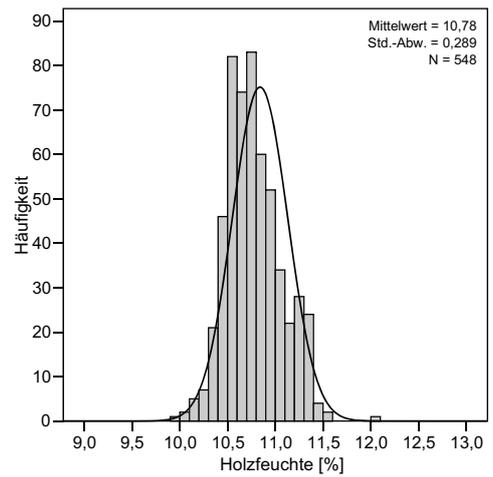
(a) $d = 4 \text{ mm}$



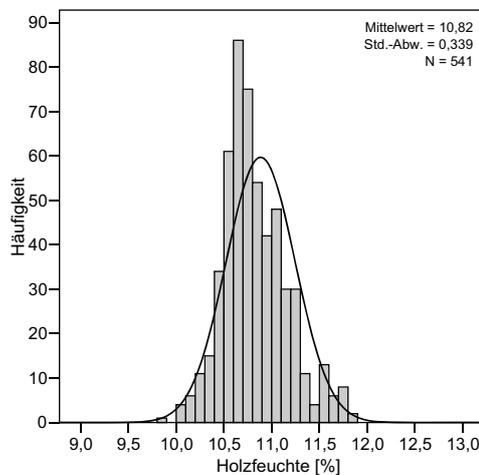
(b) $d = 6 \text{ mm}$



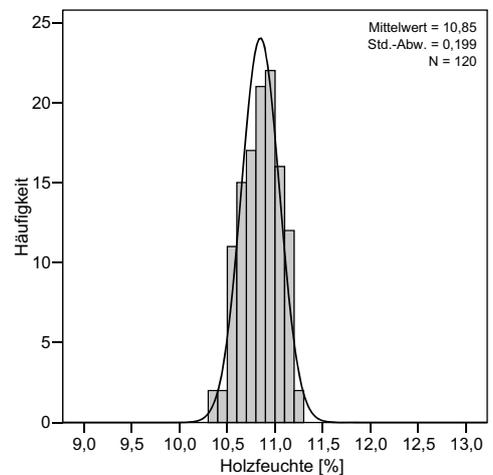
(c) $d = 8 \text{ mm}$



(d) $d = 10 \text{ mm}$



(e) $d = 12 \text{ mm}$



(f) $d = 20 \text{ mm}$

Abbildung 33: Histogramme der Holzfeuchten für jeden Durchmesser

Serie	Anzahl N [Stk.]	Holzfeuchte				
		5%-Perzentil [%]	Mittelwert [%]	95%-Perzentil [%]	Std.-Abw. [%]	COV [%]
ES04_00_24	62	10,18	10,75	11,26	0,33	3,1
ES04_90_24	62	9,16	10,25	11,46	0,78	7,6
ES06_00_36	63	10,52	11,03	11,44	0,29	2,6
ES06_15_36	59	10,19	10,69	11,11	0,28	2,6
ES06_30_36	60	10,36	10,75	11,12	0,25	2,3
ES06_45_36	61	10,19	10,60	11,02	0,24	2,3
ES06_60_36	62	10,33	10,67	11,21	0,31	2,9
ES06_75_36	61	10,36	10,73	11,09	0,24	2,2
ES06_90_36	62	10,64	11,08	11,43	0,65	5,9
ES08_00_48	60	10,21	11,08	11,75	0,41	3,7
ES08_00_48S	58	10,21	11,08	11,75	0,42	3,8
ES08_15_48	61	10,22	10,54	10,83	0,23	2,2
ES08_30_48	61	10,32	10,63	10,92	0,18	1,7
ES08_45_48	61	10,41	10,74	10,98	0,19	1,7
ES08_60_48	62	10,47	10,74	11,05	0,19	1,7
ES08_75_48	61	10,37	10,69	10,95	0,19	1,8
ES08_90_32	66	10,64	11,19	11,61	0,43	3,9
ES08_90_32S	66	10,72	11,15	11,47	0,46	4,1
ES08_90_48	66	10,69	11,08	11,47	0,31	2,8
ES08_90_48S	66	10,69	11,15	11,54	0,28	2,5
ES08_90_64	66	10,61	11,08	11,54	0,52	4,7
ES08_90_64S	66	10,99	11,24	11,55	0,16	1,5
ES10_00_60	62	10,59	10,97	11,37	0,25	2,3
ES10_00_60S	62	10,59	10,97	11,37	0,25	2,3
ES10_15_60	62	10,13	10,55	10,81	0,27	2,6
ES10_30_60	60	10,19	10,63	11,00	0,22	2,0
ES10_45_60	60	10,42	10,70	10,95	0,16	1,5
ES10_60_60	62	10,34	10,60	10,89	0,17	1,6
ES10_75_60	60	10,33	10,55	10,76	0,13	1,3
ES10_90_60	60	10,66	11,00	11,34	0,23	2,1
ES10_90_60S	60	10,66	11,00	11,34	0,23	2,1
ES12_00_60	61	10,60	11,15	11,74	0,39	3,5
ES12_00_60S	61	10,60	11,15	11,74	0,39	3,5
ES12_15_60	61	10,17	10,53	10,85	0,22	2,1
ES12_30_60	60	10,30	10,65	10,87	0,17	1,6
ES12_45_60	60	10,30	10,64	10,92	0,17	1,6
ES12_60_60	61	10,39	10,68	10,94	0,17	1,6
ES12_75_60	60	10,41	10,62	10,83	0,14	1,3
ES12_90_60	59	10,63	11,02	11,39	0,21	1,9
ES12_90_60S	58	10,57	10,99	11,32	0,22	2,0
ES20_00_160	59	10,50	10,83	11,15	0,18	1,7
ES20_90_160	61	10,54	10,86	11,14	0,22	2,0

Tabelle 37: Werte zur Holzfeuchte

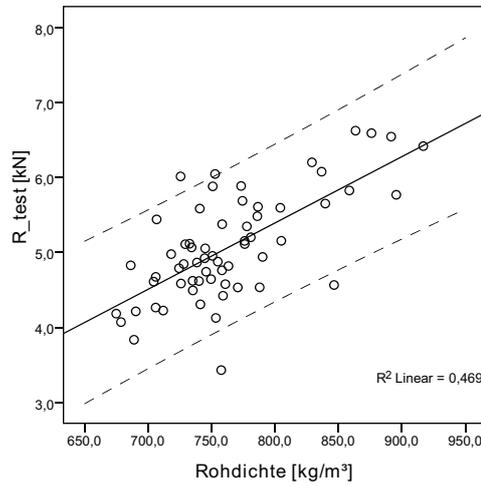
C Korrigierter Auszieh Widerstand

Zur Ermittlung der Werte für den korrigierten Auszieh Widerstand wurden die Prüfungen nach Tab. 22 und die Prüfungen ES08_90_32S_PK-15-4 und ES08_90_64S_PK-4-5 ausgeschlossen. Bei Prüfung ES08_90_32S_PK-15-4 war die getestete Ausziehkraft von 10,208 kN sehr hoch im Bezug auf die niedrige Rohdichte von $575,3 \text{ kg/m}^3$. Bei Prüfung ES08_90_64S_PK-4-5 hingegen war die getestete Ausziehkraft von 21,619 kN sehr niedrig im Bezug auf die hohe Rohdichte von $886,4 \text{ kg/m}^3$.

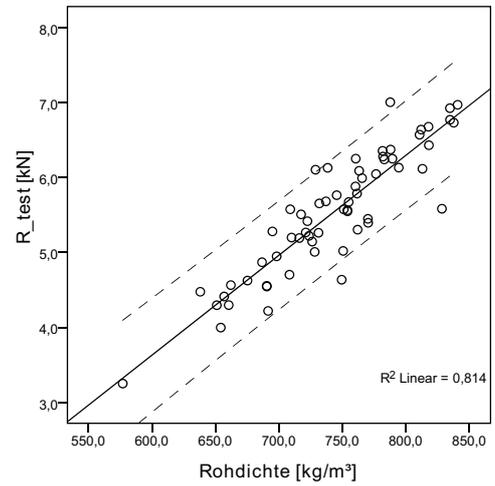
Serie	Anzahl N [Stk.]	Korrigierte Auszieh Widerstand				
		5%-Perzentil [kN]	Mittelwert [kN]	95%-Perzentil [kN]	Std.-Abw. [kN]	COV [%]
ES04_00_24	62	4,043	4,951	6,310	0,687	13,9
ES04_90_24	62	4,137	5,351	6,383	0,784	14,6
ES06_00_36	63	7,650	9,245	11,393	1,201	13,0
ES06_15_36	59	7,838	10,031	12,557	1,401	14,0
ES06_30_36	60	8,628	10,354	12,178	1,118	10,8
ES06_45_36	61	9,008	10,502	12,079	0,976	9,3
ES06_60_36	61	8,949	10,365	11,939	0,972	9,4
ES06_75_36	61	8,639	10,176	11,849	1,025	10,1
ES06_90_36	62	9,414	11,570	14,334	1,361	11,8
ES08_00_48	60	10,218	14,939	19,493	2,921	19,6
ES08_00_48S	58	8,136	11,756	15,410	2,036	17,3
ES08_15_48	61	12,425	16,104	20,063	2,608	16,2
ES08_30_48	61	14,609	17,155	20,215	1,695	9,9
ES08_45_48	61	15,012	17,980	21,186	1,972	11,0
ES08_60_48	60	15,698	18,081	21,164	1,799	10,0
ES08_75_48	61	15,743	17,639	19,964	1,428	8,1
ES08_90_32	66	9,217	12,512	15,327	1,976	15,8
ES08_90_32S	64	6,894	9,236	12,078	1,483	16,1
ES08_90_48	66	15,010	19,660	24,614	2,816	14,3
ES08_90_48S	66	12,678	15,820	18,759	1,819	11,5
ES08_90_64	66	19,906	24,481	25,973	1,760	7,2
ES08_90_64S	65	18,191	22,295	25,227	2,014	9,0
ES10_00_60	62	14,932	21,418	27,221	3,946	18,4
ES10_00_60S	62	10,924	16,764	21,248	3,145	18,8
ES10_15_60	61	17,127	22,133	26,949	3,385	15,3
ES10_30_60	60	20,435	24,701	29,740	2,787	11,3
ES10_45_60	60	21,070	25,639	29,816	2,782	10,9
ES10_60_60	61	21,604	24,966	29,096	2,210	8,9
ES10_75_60	60	22,609	25,654	29,023	1,977	7,7
ES10_90_60	59	19,054	25,420	30,689	3,094	12,2
ES10_90_60S	60	15,929	21,336	25,295	2,671	12,5
ES12_00_60	60	17,050	23,501	29,915	4,044	17,2
ES12_00_60S	61	13,705	18,768	24,703	3,659	19,5
ES12_15_60	61	17,968	24,019	31,229	4,131	17,2
ES12_30_60	60	21,413	27,091	32,826	3,430	12,7
ES12_45_60	60	22,338	27,911	34,300	3,719	13,3
ES12_60_60	61	25,485	28,710	33,051	2,547	8,9
ES12_75_60	60	25,318	29,060	32,779	2,421	8,3
ES12_90_60	59	23,193	31,121	38,914	4,551	14,6
ES12_90_60S	58	17,552	24,190	32,198	3,993	16,5
ES20_00_160	59	58,485	87,568	112,519	17,508	20,0
ES20_90_160	61	97,783	111,526	130,314	9,902	8,9

Tabelle 38: Werte zum Auszieh Widerstand - auf 12 % Holzfeuchte korrigiert

D Streudiagramme zur Ausreißeranalyse

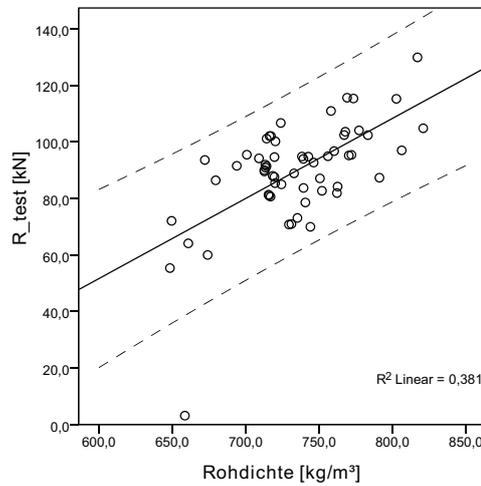


(a) ES04_00_24

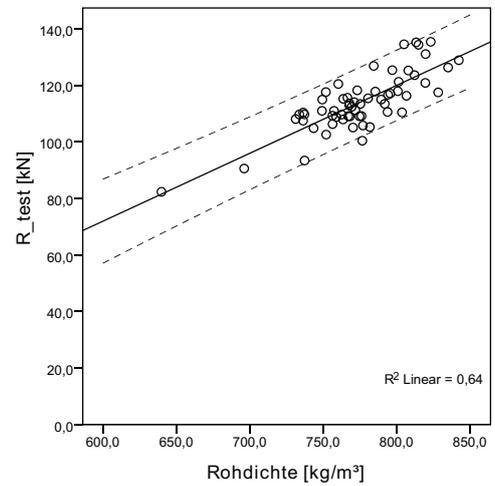


(b) ES04_90_24

Abbildung 34: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 4$ mm

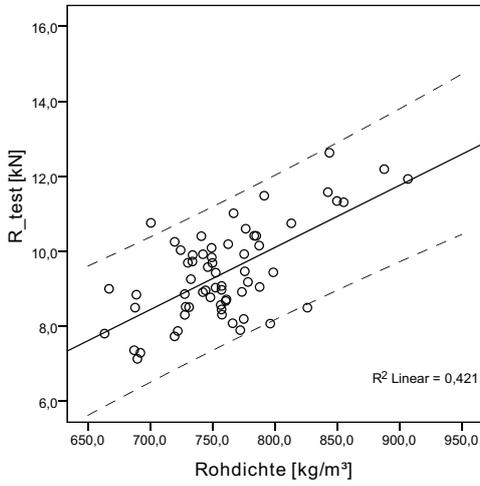


(a) ES20_00_160

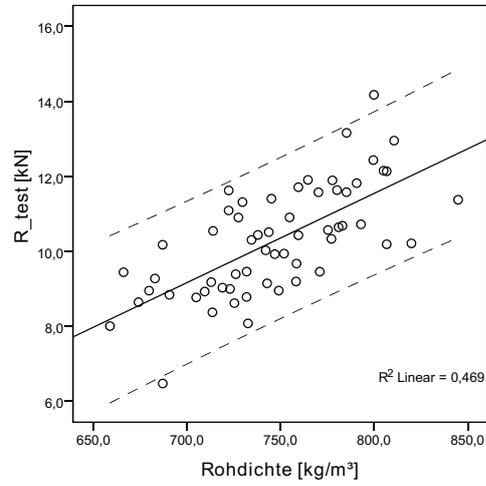


(b) ES20_90_160

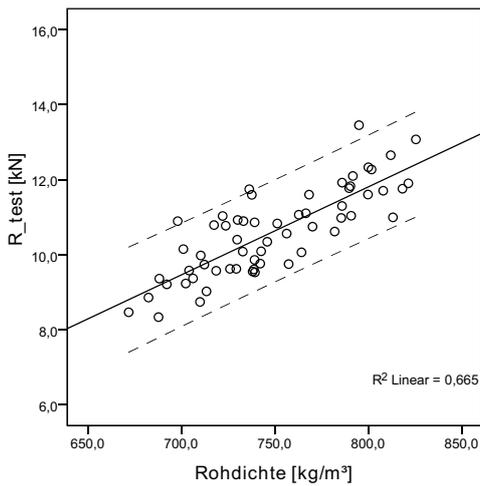
Abbildung 35: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 20$ mm



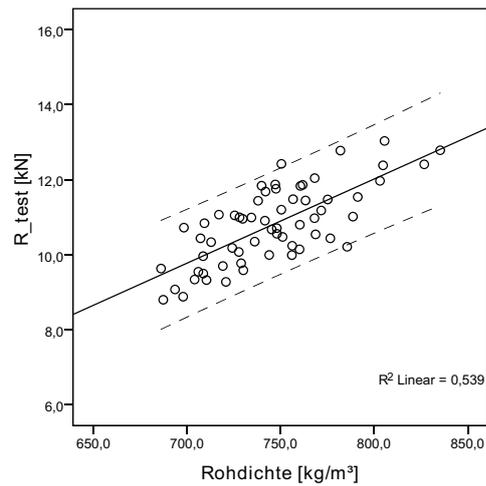
(a) ES06_00_36



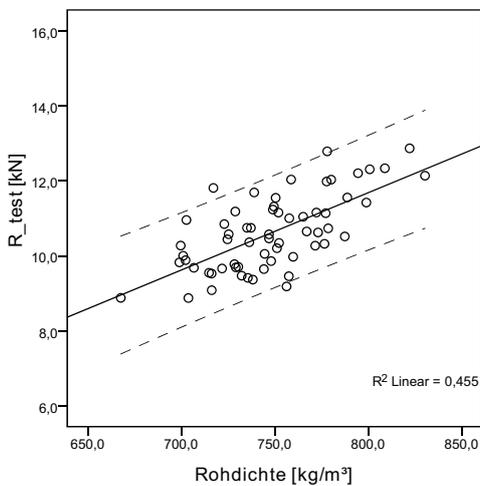
(b) ES06_15_36



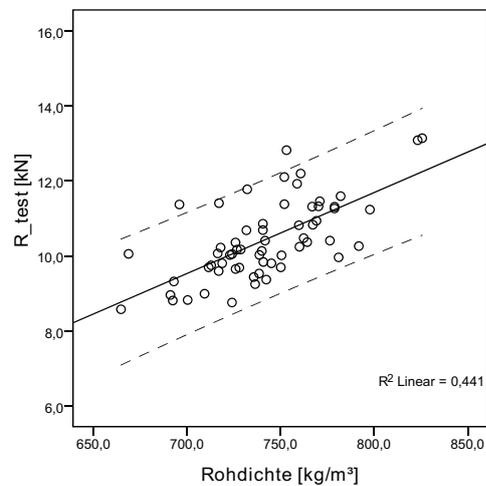
(c) ES06_30_36



(d) ES06_45_36

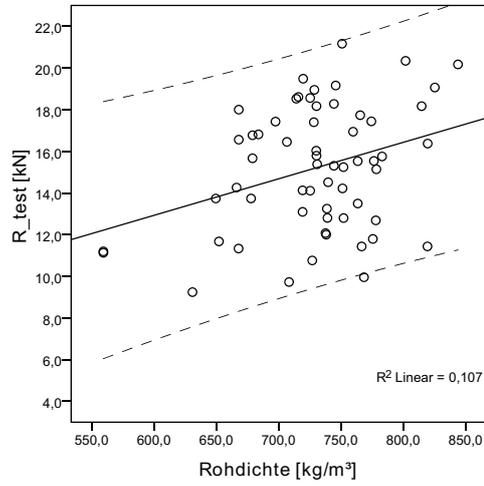


(e) ES06_60_36

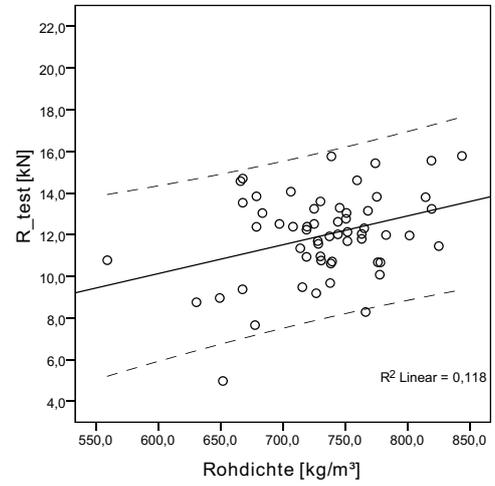


(f) ES06_75_36

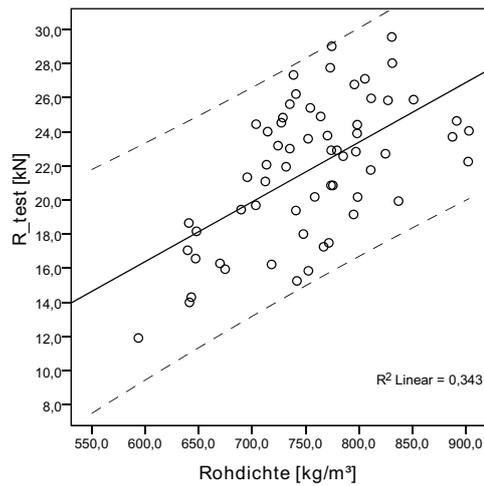
Abbildung 36: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 6$ mm



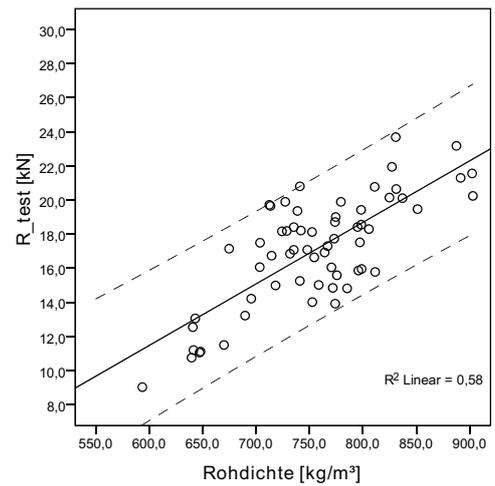
(a) ES08_00_48



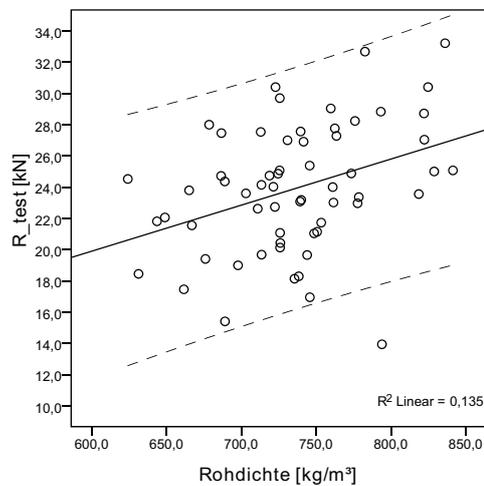
(b) ES08_00_48S



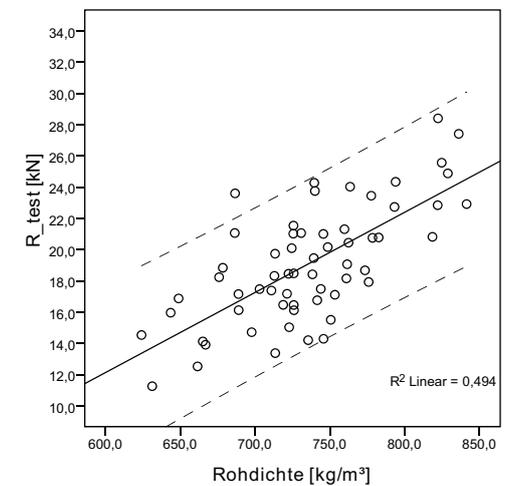
(c) ES10_00_60



(d) ES10_00_60S

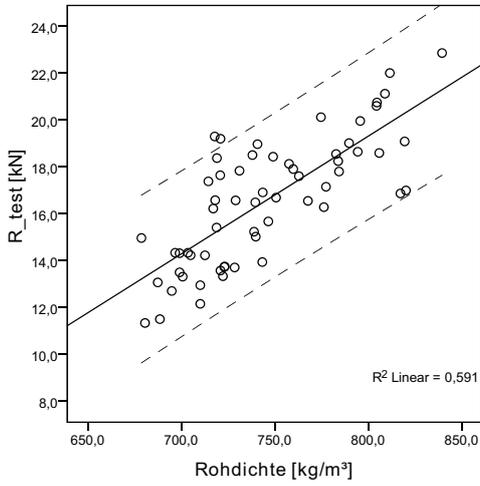


(e) ES12_00_60

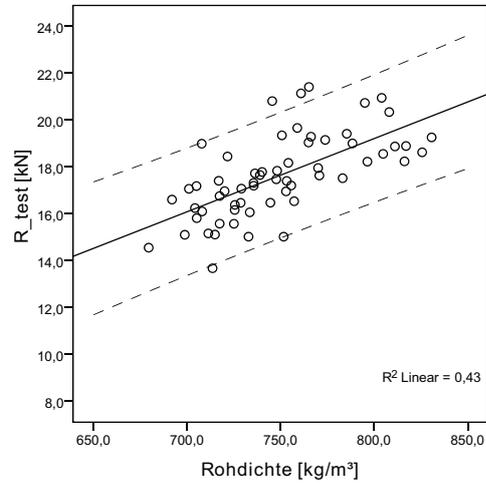


(f) ES12_00_60S

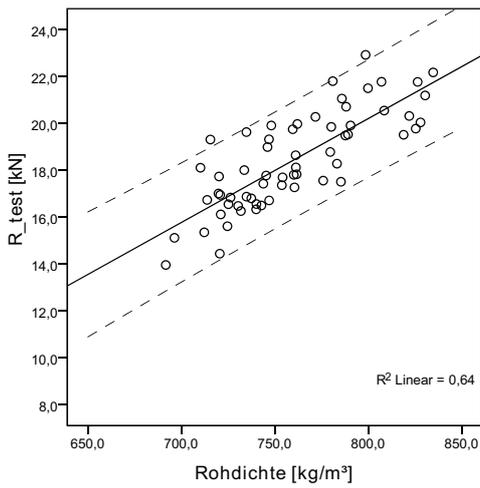
Abbildung 37: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 8, 10, 12$ mm, $\alpha = 0^\circ$



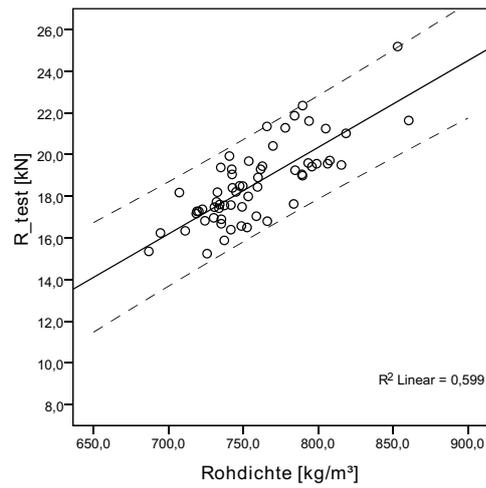
(a) ES08_15_48



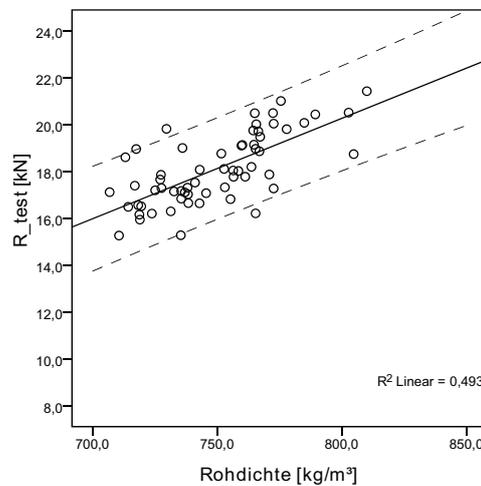
(b) ES08_30_48



(c) ES08_45_48

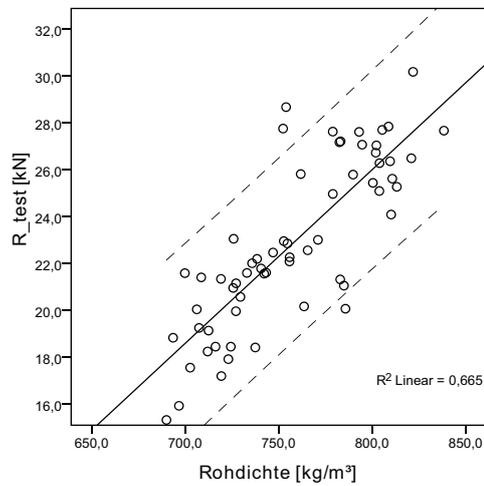


(d) ES08_60_48

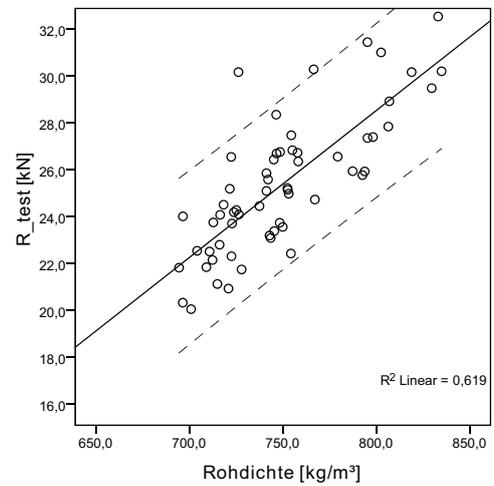


(e) ES08_75_48

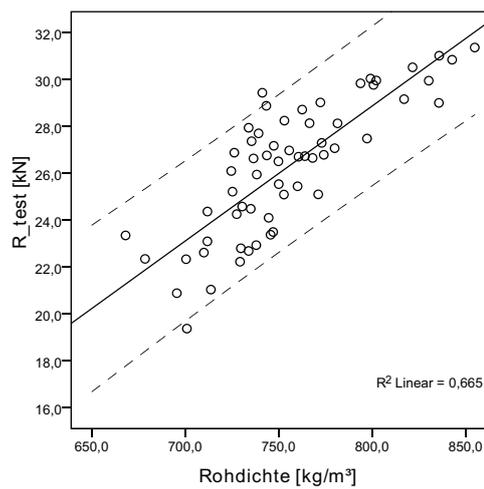
Abbildung 38: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 8 \text{ mm}$



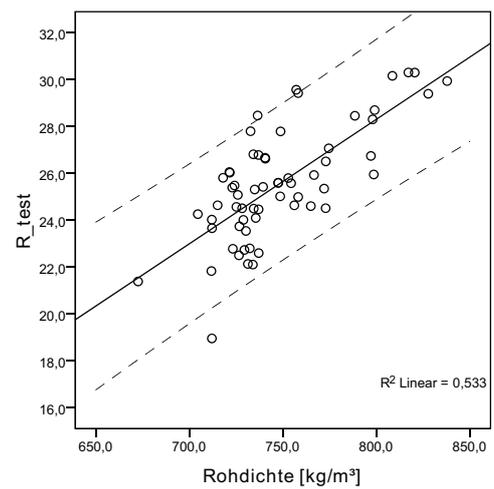
(a) ES10_15_60



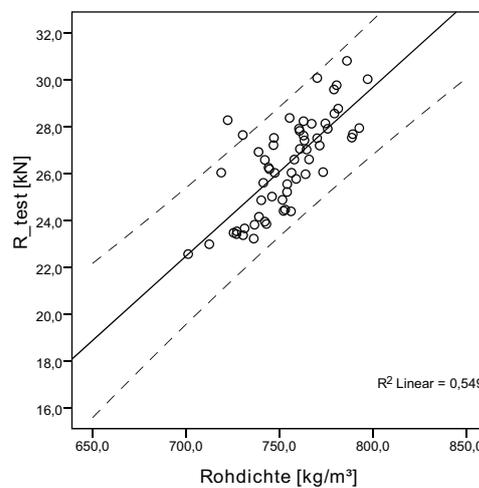
(b) ES10_30_60



(c) ES10_45_60

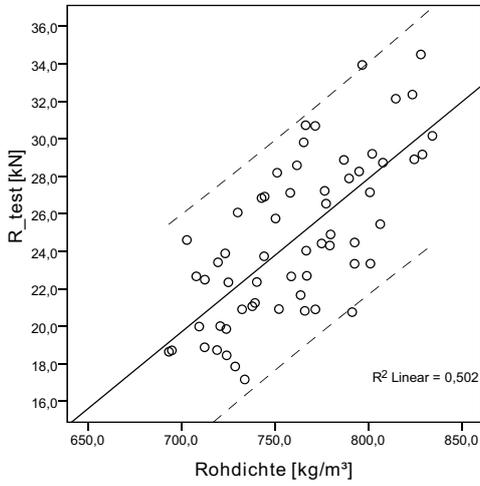


(d) ES10_60_60

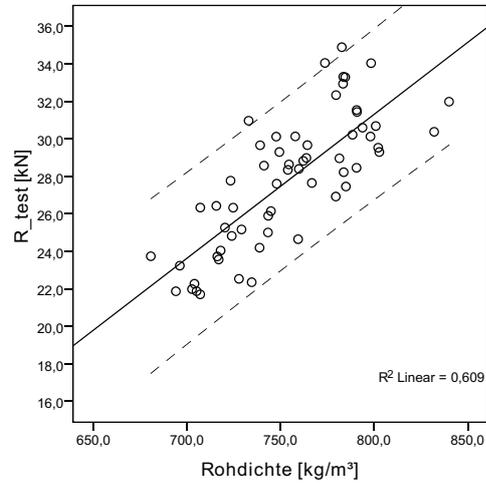


(e) ES10_75_60

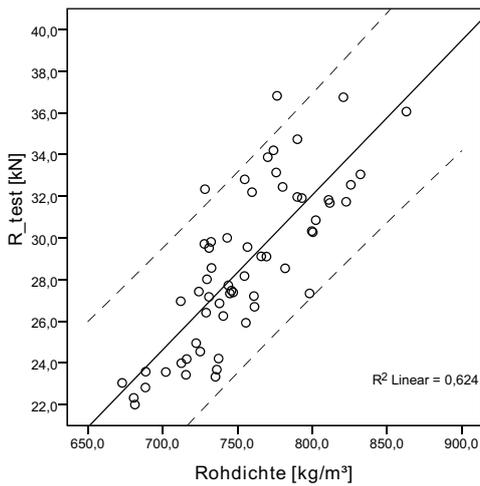
Abbildung 39: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 10$ mm



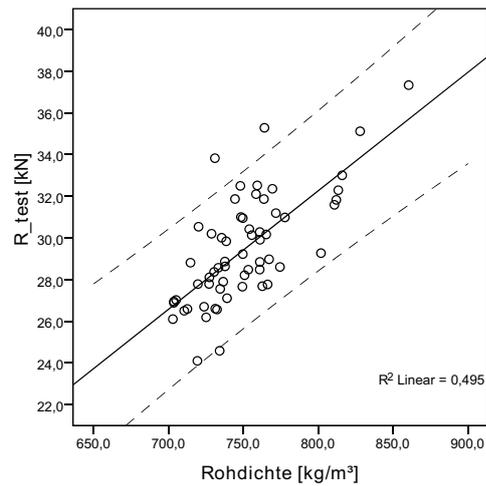
(a) ES12_15_60



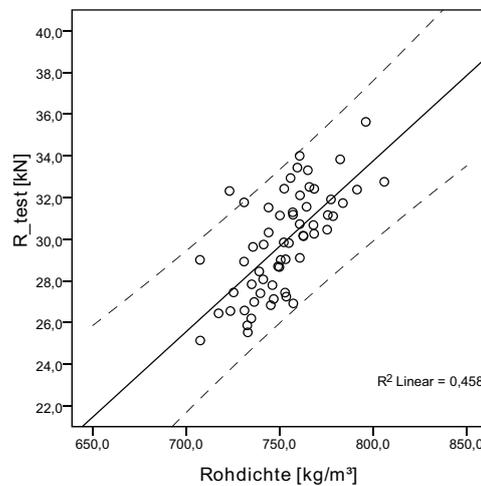
(b) ES12_30_60



(c) ES12_45_60

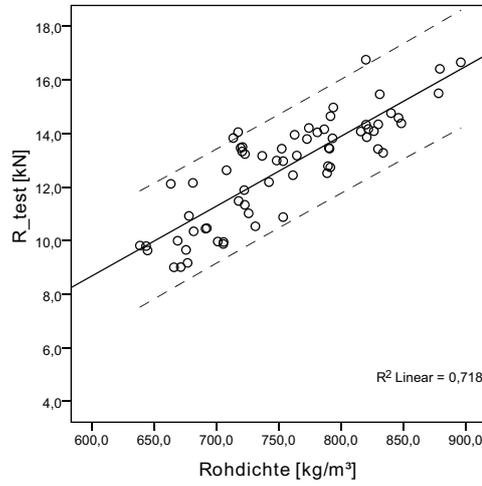


(d) ES12_60_60

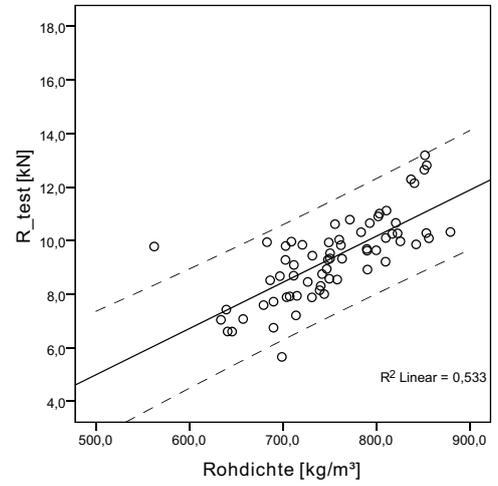


(e) ES12_75_60

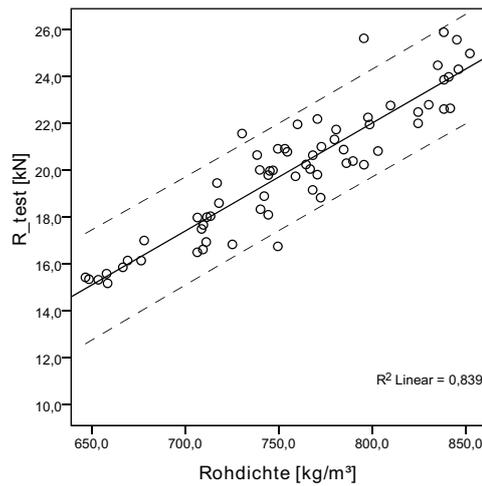
Abbildung 40: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 12$ mm



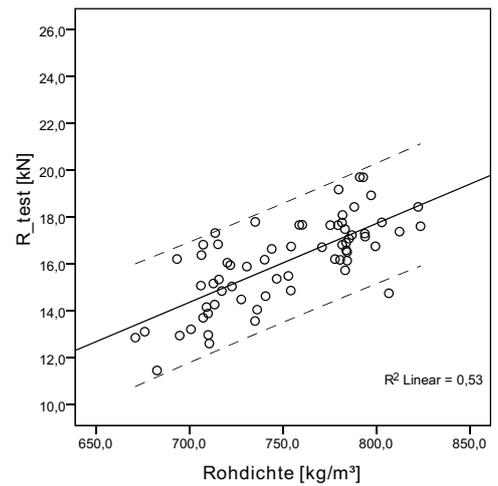
(a) ES08_90_32



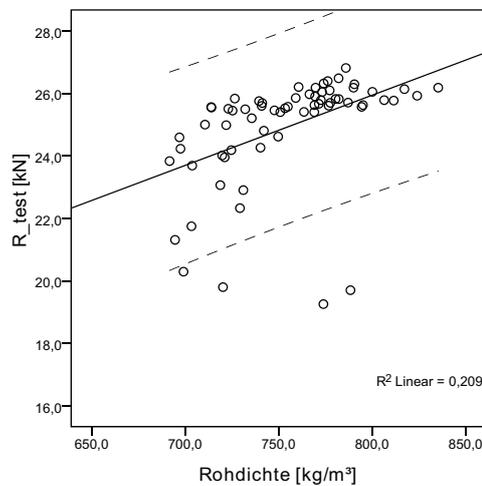
(b) ES08_90_32S



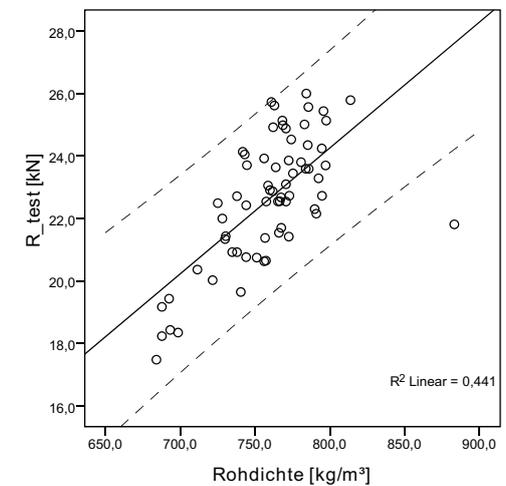
(c) ES08_90_48



(d) ES08_90_48S

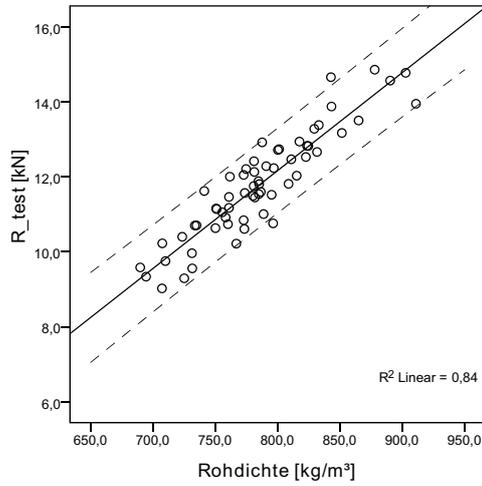


(e) ES08_90_64

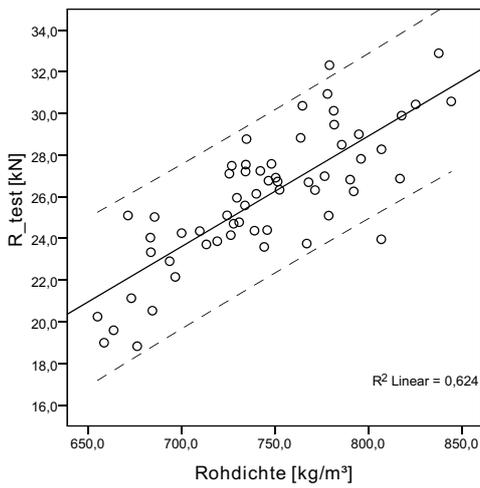


(f) ES08_90_64S

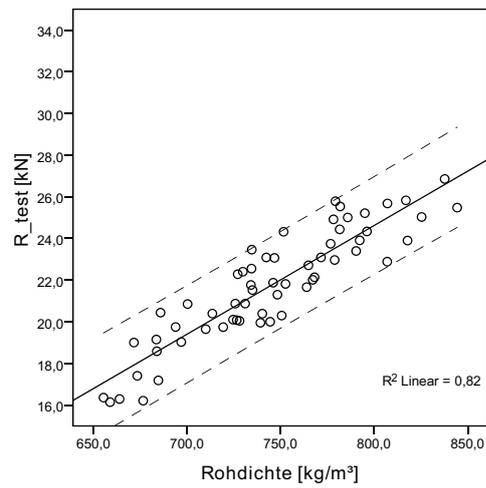
Abbildung 41: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 8 \text{ mm}$, $\alpha = 90^\circ$



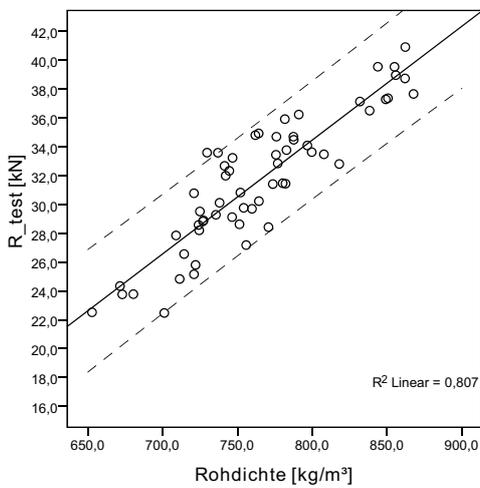
(a) ES06_90_36



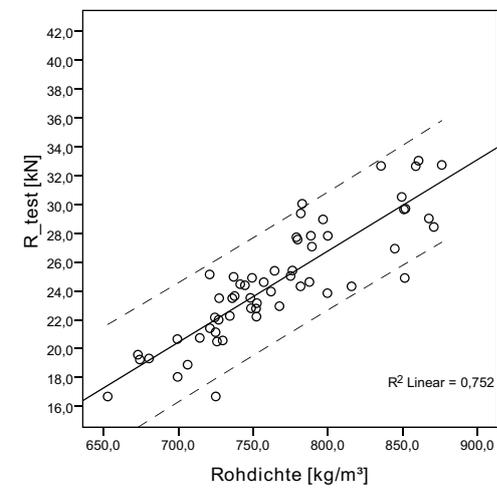
(b) ES10_90_60



(c) ES10_90_60S



(d) ES12_90_60



(e) ES12_90_60S

Abbildung 42: Streudiagramme zur Ausreißeranalyse $d = 6, 10, 12$ mm, $\alpha = 90^\circ$

E Effektive Einschraubtiefe

Zur Ermittlung der Werte für die effektive Einschraubtiefe wurden die selben Prüfungen wie für die Werte des korrigierten Auszieh Widerstandes ausgeschlossen.

Serie	Anzahl N [Stk.]	Effektive Einschraubtiefe				
		5%-Perzentil [mm]	Mittelwert [mm]	95%-Perzentil [mm]	Std.-Abw. [mm]	COV [%]
ES04_00_24	62	22,91	23,26	23,41	0,16	0,7
ES04_90_24	62	23,99	24,15	24,29	0,11	0,4
ES06_00_36	63	35,11	35,29	35,42	0,10	0,3
ES06_15_36	59	35,11	35,29	35,42	0,10	0,3
ES06_30_36	60	34,91	35,17	35,38	0,15	0,4
ES06_45_36	61	34,86	35,19	35,49	0,21	0,6
ES06_60_36	61	34,98	35,27	35,61	0,22	0,6
ES06_75_36	61	35,07	35,26	35,44	0,12	0,3
ES06_90_36	62	34,96	35,34	35,63	0,22	0,6
ES08_00_48	60	47,00	47,32	47,53	0,18	0,4
ES08_00_48S	58	38,11	38,43	38,65	0,18	0,5
ES08_15_48	61	46,84	47,14	47,38	0,21	0,4
ES08_30_48	61	46,31	46,92	47,27	0,34	0,7
ES08_45_48	61	46,64	47,12	47,44	0,23	0,5
ES08_60_48	60	47,01	47,29	47,83	0,26	0,5
ES08_75_48	61	46,98	47,28	47,58	0,19	0,4
ES08_90_32	66	31,28	31,53	31,70	0,11	0,4
ES08_90_32S	64	23,12	23,12	23,12	0,00	0,0
ES08_90_48	66	47,30	47,53	47,70	0,12	0,2
ES08_90_48S	66	39,12	39,12	39,12	0,00	0,0
ES08_90_64	66	63,26	63,47	63,60	0,12	0,2
ES08_90_64S	65	55,12	55,12	55,12	0,00	0,0
ES10_00_60	62	58,62	59,14	59,50	0,27	0,5
ES10_00_60S	62	47,52	48,04	48,40	0,27	0,6
ES10_15_60	61	58,85	59,23	59,41	0,17	0,3
ES10_30_60	60	58,92	59,23	59,73	0,27	0,5
ES10_45_60	60	58,84	59,25	59,70	0,25	0,4
ES10_60_60	61	58,84	59,44	59,92	0,34	0,6
ES10_75_60	60	58,57	59,11	59,41	0,28	0,5
ES10_90_60	59	59,75	60,04	60,18	0,11	0,2
ES10_90_60S	60	48,68	48,94	49,08	0,11	0,2
ES12_00_60	60	58,98	59,48	59,74	0,22	0,4
ES12_00_60S	61	45,67	46,16	46,42	0,22	0,5
ES12_15_60	61	58,85	59,20	59,53	0,23	0,4
ES12_30_60	60	58,93	59,23	59,77	0,26	0,4
ES12_45_60	60	58,93	59,26	59,61	0,23	0,4
ES12_60_60	61	58,62	59,32	59,67	0,32	0,5
ES12_75_60	60	58,61	59,13	59,46	0,28	0,5
ES12_90_60	59	59,86	60,03	60,13	0,08	0,1
ES12_90_60S	58	46,53	46,69	46,80	0,10	0,2
ES20_00_160	59	159,00	159,21	159,40	0,11	0,1
ES20_90_160	61	159,01	159,77	161,41	0,85	0,5

Tabelle 39: Werte zur effektiven Einschraubtiefe

F Berechneter Auszieh Widerstand

Zur Ermittlung der Werte für den berechneten Auszieh Widerstand wurden die Prüfungen nach Tab. 22 ausgeschlossen.

Serie	Anzahl N [Stk.]	Berechneter Auszieh Widerstand				
		5%-Perzentil [kN]	Mittelwert [kN]	95%-Perzentil [kN]	Std.-Abw. [kN]	COV [%]
ES04_00_24	62	4,215	4,989	6,105	0,591	11,9
ES04_90_24	62	4,849	5,946	7,025	0,689	11,6
ES06_00_36	63	8,194	9,609	11,430	0,990	10,3
ES06_15_36	59	7,991	9,432	10,761	0,847	9,0
ES06_30_36	60	8,535	9,759	11,206	0,847	8,7
ES06_45_36	61	9,059	10,124	11,512	0,743	7,3
ES06_60_36	61	9,638	10,733	12,070	0,765	7,1
ES06_75_36	61	9,829	10,982	12,274	0,772	7,0
ES06_90_36	62	10,441	12,294	14,634	1,233	10,0
ES08_00_48	60	11,745	14,586	17,599	1,792	12,3
ES08_00_48S	58	9,895	12,059	14,570	1,392	11,5
ES08_15_48	61	13,198	15,053	17,528	1,347	8,9
ES08_30_48	61	14,043	15,640	18,005	1,259	8,1
ES08_45_48	61	15,070	16,837	19,258	1,304	7,7
ES08_60_48	60	15,792	17,585	19,893	1,285	7,3
ES08_75_48	61	16,645	17,974	19,500	0,950	5,3
ES08_90_32	66	10,321	12,665	15,274	1,748	13,8
ES08_90_32S	65	7,310	9,525	11,601	1,312	13,8
ES08_90_48	66	14,977	18,843	22,356	2,264	12,0
ES08_90_48S	66	13,655	15,584	17,591	1,340	8,6
ES08_90_64	66	21,697	24,700	27,739	1,893	7,7
ES08_90_64S	66	18,924	21,938	23,694	1,563	7,1
ES10_00_60	62	17,050	22,202	28,571	3,165	14,3
ES10_00_60S	62	14,041	18,260	23,447	2,599	14,2
ES10_15_60	61	19,612	22,341	24,916	1,836	8,2
ES10_30_60	60	20,298	22,761	26,538	1,820	8,0
ES10_45_60	60	21,325	24,166	28,297	2,065	8,5
ES10_60_60	61	23,043	25,057	28,792	1,828	7,3
ES10_75_60	60	24,313	26,141	28,096	1,196	4,6
ES10_90_60	59	21,916	26,535	31,289	2,699	10,2
ES10_90_60S	60	18,294	21,925	25,650	2,220	10,1
ES12_00_60	60	19,679	24,276	29,355	2,761	11,4
ES12_00_60S	61	15,542	19,145	22,948	2,160	11,3
ES12_15_60	61	22,715	25,620	29,115	1,995	7,8
ES12_30_60	60	23,089	26,136	29,051	2,052	7,9
ES12_45_60	60	23,427	27,383	31,389	2,336	8,5
ES12_60_60	61	25,937	28,560	32,451	2,041	7,1
ES12_75_60	60	27,368	29,618	31,920	1,345	4,5
ES12_90_60	59	25,523	31,529	38,165	3,497	11,1
ES12_90_60S	58	20,196	24,975	30,538	2,936	11,8
ES20_00_160	59	82,248	92,023	102,537	6,415	7,0
ES20_90_160	61	105,523	115,067	126,918	7,917	6,9

Tabelle 40: Werte zum berechneten Auszieh Widerstand

G Scherfestigkeit

Zur Ermittlung der Werte für die Scherfestigkeit wurden die selben Prüfungen wie für die Werte des korrigierten Auszieh Widerstandes ausgeschlossen.

Serie	Anzahl N [Stk.]	Scherfestigkeit				
		5%-Perzentil [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	95%-Perzentil [N/mm ²]	Std.-Abw. [N/mm ²]	COV [%]
ES04_00_24	62	13,80	16,94	21,54	2,33	13,8
ES04_90_24	62	13,60	17,63	21,11	2,60	14,7
ES06_00_36	63	11,48	13,90	17,32	1,82	13,1
ES06_15_36	59	11,82	15,08	18,87	2,11	14,0
ES06_30_36	60	13,04	15,62	18,39	1,69	10,8
ES06_45_36	61	13,67	15,83	18,08	1,47	9,3
ES06_60_36	61	13,53	15,59	17,90	1,45	9,3
ES06_75_36	61	13,00	15,31	17,89	1,55	10,1
ES06_90_36	62	14,08	17,37	21,42	2,05	11,8
ES08_00_48	60	8,62	12,56	16,30	2,44	19,4
ES08_00_48S	58	6,88	9,88	13,01	1,70	17,2
ES08_15_48	61	10,47	13,60	16,91	2,21	16,3
ES08_30_48	61	12,36	14,55	17,07	1,43	9,8
ES08_45_48	61	12,76	15,19	17,89	1,67	11,0
ES08_60_48	60	13,23	15,21	17,85	1,48	9,8
ES08_75_48	61	13,23	14,84	16,84	1,19	8,0
ES08_90_32	66	11,63	15,79	19,36	2,50	15,8
ES08_90_32S	64	8,57	11,48	15,02	1,84	16,1
ES08_90_48	66	12,55	16,46	20,53	2,35	14,3
ES08_90_48S	66	10,51	13,11	15,55	1,51	11,5
ES08_90_64	66	12,51	15,35	16,27	1,10	7,2
ES08_90_64S	65	11,31	13,86	15,68	1,25	9,0
ES10_00_60	62	8,00	11,53	14,65	2,14	18,6
ES10_00_60S	62	5,85	9,02	11,40	1,70	18,8
ES10_15_60	61	9,24	11,89	14,48	1,81	15,2
ES10_30_60	60	10,96	13,27	16,04	1,49	11,2
ES10_45_60	60	11,26	13,78	16,03	1,51	11,0
ES10_60_60	61	11,56	13,37	15,54	1,16	8,7
ES10_75_60	60	12,21	13,81	15,65	1,05	7,6
ES10_90_60	59	10,11	13,48	16,32	1,64	12,2
ES10_90_60S	60	8,45	11,31	13,41	1,42	12,5
ES12_00_60	60	7,61	10,48	13,41	1,81	17,3
ES12_00_60S	61	6,10	8,37	10,99	1,63	19,5
ES12_15_60	61	8,03	10,76	13,94	1,85	17,2
ES12_30_60	60	9,62	12,13	14,74	1,53	12,6
ES12_45_60	60	9,98	12,49	15,34	1,67	13,4
ES12_60_60	61	11,48	12,84	14,76	1,11	8,7
ES12_75_60	60	11,42	13,03	14,75	1,07	8,2
ES12_90_60	59	10,24	13,75	17,19	2,01	14,6
ES12_90_60S	58	7,77	10,69	14,23	1,76	16,5
ES20_00_160	59	5,84	8,75	11,26	1,75	20,0
ES20_90_160	61	9,77	11,11	12,85	0,98	8,8

Tabelle 41: Werte zur Scherfestigkeit

H Korrigierte Scherfestigkeit

Zur Ermittlung der Werte für die korrigierte Scherfestigkeit wurden die selben Prüfungen wie für die Werte des korrigierten Ausziehwerstandes ausgeschlossen.

Serie	Anzahl N [Stk.]	Korrigierte Scherfestigkeit				
		5%-Perzentil [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	95%-Perzentil [N/mm ²]	Std.-Abw. [N/mm ²]	COV [%]
ES04_00_24	62	13,88	16,36	19,31	1,67	10,2
ES04_90_24	62	15,83	17,83	19,43	1,19	6,7
ES06_00_36	63	11,50	13,69	15,71	1,39	10,2
ES06_15_36	59	13,09	15,28	18,10	1,57	10,3
ES06_30_36	60	14,30	15,76	17,88	1,02	6,4
ES06_45_36	61	14,77	16,14	17,80	1,06	6,5
ES06_60_36	61	14,37	15,78	17,77	1,09	6,9
ES06_75_36	61	14,11	15,71	18,14	1,20	7,6
ES06_90_36	62	14,55	16,16	17,27	0,78	4,8
ES08_00_48	60	8,81	13,20	17,17	2,53	19,1
ES08_00_48S	58	7,48	10,33	14,24	1,87	18,1
ES08_15_48	61	11,69	13,82	16,04	1,59	11,5
ES08_30_48	61	13,20	14,73	17,13	1,11	7,6
ES08_45_48	61	13,63	14,96	16,81	1,02	6,8
ES08_60_48	60	13,50	15,13	16,84	0,97	6,4
ES08_75_48	61	13,81	14,99	16,46	0,87	5,8
ES08_90_32	66	13,55	15,68	18,14	1,36	8,7
ES08_90_32S	64	9,87	11,27	13,10	1,06	9,4
ES08_90_48	66	14,89	16,14	17,72	0,92	5,7
ES08_90_48S	66	11,33	12,96	14,82	1,03	8,0
ES08_90_64	66	13,54	15,13	16,68	1,12	7,4
ES08_90_64S	65	12,35	13,49	14,80	0,78	5,8
ES10_00_60	62	8,80	11,44	14,25	1,76	15,4
ES10_00_60S	62	7,33	8,91	10,98	1,15	12,9
ES10_15_60	61	9,84	11,80	13,56	1,19	10,1
ES10_30_60	60	11,91	13,39	15,10	0,98	7,4
ES10_45_60	60	12,31	13,72	15,21	0,92	6,7
ES10_60_60	61	12,30	13,54	15,12	0,82	6,0
ES10_75_60	60	12,81	13,83	15,15	0,73	5,3
ES10_90_60	59	12,00	13,69	15,51	1,02	7,5
ES10_90_60S	60	10,36	11,45	12,59	0,64	5,6
ES12_00_60	60	7,98	10,89	14,04	1,81	16,6
ES12_00_60S	61	6,51	8,61	10,64	1,23	14,2
ES12_15_60	61	8,57	10,57	12,89	1,37	12,9
ES12_30_60	60	10,58	12,10	13,97	1,02	8,5
ES12_45_60	60	10,97	12,46	14,35	1,07	8,6
ES12_60_60	61	11,71	12,93	14,32	0,81	6,3
ES12_75_60	60	11,89	13,09	14,55	0,81	6,2
ES12_90_60	59	11,73	13,31	14,80	0,93	7,0
ES12_90_60S	58	8,87	10,31	11,97	0,87	8,5
ES20_00_160	59	6,20	8,59	10,75	1,63	19,0
ES20_90_160	61	9,76	10,60	11,61	0,55	5,2

Tabelle 42: Werte zur Scherfestigkeit – korrigiert auf ρ_{mean}

I Normierte Scherfestigkeit

Zur Ermittlung der Werte für die normierte Scherfestigkeit wurden die Prüfungen nach Tab. 22 ausgeschlossen.

Serie	Anzahl N [Stk.]	Normierte Scherfestigkeit				
		5%-Perzentil [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	95%-Perzentil [N/mm ²]	Std.-Abw. [N/mm ²]	COV [%]
ES04_00_24	62	10,55	12,43	14,67	1,27	10,2
ES04_90_24	62	12,02	13,55	14,76	0,90	6,7
ES06_00_36	63	9,87	11,75	13,47	1,20	10,2
ES06_15_36	59	11,23	13,11	15,53	1,35	10,3
ES06_30_36	60	12,27	13,52	15,34	0,87	6,4
ES06_45_36	61	12,67	13,85	15,27	0,91	6,5
ES06_60_36	61	12,33	13,54	15,25	0,93	6,9
ES06_75_36	61	12,10	13,48	15,56	1,03	7,6
ES06_90_36	62	12,49	13,86	14,82	0,67	4,8
ES08_00_48	60	8,42	12,35	15,82	2,34	19,0
ES08_15_48	61	10,93	12,93	15,00	1,48	11,5
ES08_30_48	61	12,34	13,77	16,02	1,04	7,6
ES08_45_48	61	12,74	13,99	15,73	0,96	6,8
ES08_60_48	60	12,62	14,15	15,75	0,90	6,4
ES08_75_48	61	12,92	14,02	15,40	0,81	5,8
ES08_90_48	66	13,92	15,09	16,58	0,86	5,7
ES10_00_60	62	8,80	11,44	14,25	1,76	15,4
ES10_15_60	61	9,84	11,80	13,56	1,19	10,1
ES10_30_60	60	11,91	13,39	15,10	0,98	7,4
ES10_45_60	60	12,31	13,72	15,21	0,92	6,7
ES10_60_60	61	12,30	13,54	15,12	0,82	6,0
ES10_75_60	60	12,81	13,83	15,15	0,73	5,3
ES10_90_60	59	12,00	13,69	15,51	1,02	7,5
ES12_00_60	60	8,43	11,50	14,83	1,91	16,6
ES12_15_60	61	9,05	11,17	13,61	1,44	12,9
ES12_30_60	60	11,18	12,78	14,75	1,08	8,5
ES12_45_60	60	11,58	13,16	15,16	1,13	8,6
ES12_60_60	61	12,37	13,66	15,13	0,85	6,3
ES12_75_60	60	12,56	13,82	15,37	0,86	6,2
ES12_90_60	59	12,39	14,06	15,63	0,98	7,0
ES20_00_160	59	7,63	10,58	13,23	2,01	19,0
ES20_90_160	61	12,02	13,05	14,29	0,68	5,2

Tabelle 43: Werte zur Scherfestigkeit – korrigiert auf ρ_{mean} und normiert auf $d = 10$ mm

J Charakteristischer Auszieh Widerstand

J.1 Prüfungen höher als die charakteristischen Auszieh Widerstände

Serie	Prüfungsanzahl N_1	$R_{test, korrr} \geq R_{ax, \alpha, k}$ N_2	N_2/N_1 [%]	Serie	Prüfungsanzahl N_1	$R_{test, korrr} \geq R_{ax, \alpha, k}$ N_2	N_2/N_1 [%]
ES04_00_24	62	62	100	ES10_00_60	62	61	98,4
ES04_90_24	62	57	91,9	ES10_00_60S	62	60	96,8
ES06_00_36	63	63	100	ES10_15_60	61	59	96,7
ES06_15_36	59	58	98,3	ES10_30_60	60	60	100
ES06_30_36	60	60	100	ES10_45_60	60	60	100
ES06_45_36	61	61	100	ES10_60_60	61	61	100
ES06_60_36	61	61	100	ES10_75_60	60	60	100
ES06_75_36	61	61	100	ES10_90_60	59	57	96,6
ES06_90_36	62	62	100	ES10_90_60S	60	60	100
ES08_00_48	60	60	100	ES12_00_60	60	59	98,3
ES08_00_48S	58	57	98,3	ES12_00_60S	61	60	98,4
ES08_15_48	61	61	100	ES12_15_60	61	59	96,7
ES08_30_48	61	61	100	ES12_30_60	60	60	100
ES08_45_48	61	61	100	ES12_45_60	60	60	100
ES08_60_48	60	60	100	ES12_60_60	61	61	100
ES08_75_48	61	61	100	ES12_75_60	60	60	100
ES08_90_32	66	66	100	ES12_90_60	59	59	100
ES08_90_48	66	66	100	ES12_90_60S	58	56	96,6
ES08_90_64	66	66	100	ES20_00_160	59	58	98,3
ES08_90_32S	65	63	96,9	ES20_90_160	61	61	100
ES08_90_48S	66	66	100				
ES08_90_64S	66	66	100				

Tabelle 44: Anzahl bzw. Prozent der Prüfwerte höher als die charakteristischen Auszieh Widerstände

J.2 Werte zum charakteristischen Auszieh Widerstand

Zur Ermittlung der Werte für den charakteristischen Auszieh Widerstand wurden die Prüfungen nach Tab. 22 ausgeschlossen.

Serie	Anzahl N [Stk.]	Charakteristischer Auszieh Widerstand			
		parallel verschobener Hankinson		bilinearer Verlauf	
		Mittelwert [kN]	COV [%]	Mittelwert [kN]	COV [%]
ES04_00_24	62	2,890	0,7	2,813	0,7
ES04_90_24	62	4,164	0,4	4,164	0,4
ES06_00_36	63	5,680	0,3	5,530	0,3
ES06_15_36	59	5,747	0,3	6,715	0,3
ES06_30_36	60	6,802	0,4	7,873	0,4
ES06_45_36	61	7,129	0,6	7,878	0,6
ES06_60_36	61	7,502	0,6	7,896	0,6
ES06_75_36	61	7,784	0,3	7,893	0,3
ES06_90_36	62	7,909	0,6	7,909	0,6
ES08_00_48	60	9,152	0,4	8,910	0,4
ES08_00_48S	58	7,527	0,4	7,328	0,4
ES08_15_48	61	9,226	0,4	10,780	0,4
ES08_30_48	61	10,926	1,2	12,627	0,7
ES08_45_48	61	11,473	0,5	12,678	0,5
ES08_60_48	60	12,088	0,5	12,723	0,5
ES08_75_48	61	12,544	0,4	12,720	0,4
ES08_90_32	66	8,690	0,3	8,690	0,3
ES08_90_32S	65	6,492	0,0	6,492	0,0
ES08_90_48	66	12,782	0,2	12,782	0,2
ES08_90_48S	66	10,644	0,0	10,644	0,0
ES08_90_64	66	16,777	0,2	16,777	0,2
ES08_90_64S	66	14,692	0,0	14,692	0,0
ES10_00_60	62	13,196	0,4	12,847	0,4
ES10_00_60S	62	10,853	0,5	10,566	0,5
ES10_15_60	61	13,368	0,3	15,620	0,3
ES10_30_60	60	15,876	0,4	18,377	0,4
ES10_45_60	60	16,637	0,4	18,384	0,4
ES10_60_60	61	17,518	0,5	18,438	0,5
ES10_75_60	60	18,088	0,4	18,342	0,4
ES10_90_60	59	18,613	0,2	18,613	0,2
ES10_90_60S	60	15,359	0,2	15,359	0,2
ES12_00_60	60	15,071	0,3	14,673	0,3
ES12_00_60S	61	11,875	0,4	11,561	0,4
ES12_15_60	61	15,183	0,4	17,740	0,4
ES12_30_60	60	18,039	0,4	20,880	0,4
ES12_45_60	60	18,904	0,4	20,889	0,4
ES12_60_60	61	19,867	0,5	20,910	0,5
ES12_75_60	60	20,557	0,4	20,846	0,4
ES12_90_60	59	21,144	0,1	21,144	0,1
ES12_90_60S	58	16,696	0,2	16,696	0,2
ES20_00_160	59	54,377	0,1	52,939	0,1
ES20_90_160	61	75,874	0,5	75,874	0,5

Tabelle 45: Werte zum charakteristischen Auszieh Widerstand