

Beurteilung der Spaltgefahr beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben

Evaluating the risk of splitting with self-drilling timber screws

Evaluation du risque de fente du bois lors du vissage par vis bois autoforantes

Valutazione del rischio di fessurazione durante l'avvitamento di viti per legno autoforanti

Thomas Uibel
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe, Deutschland



Beurteilung der Spaltgefahr beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben

1. Einleitung

In den letzten Jahren haben sich selbstbohrende Holzschrauben als Verbindungsmittel im Holzbau etabliert. Sie erlauben die wirtschaftliche Herstellung von Anschlüssen und haben neue Verbindungsarten ermöglicht. Selbstbohrende Holzschrauben werden häufig auch zur Befestigung von Verbindern aus Stahl oder Aluminium an Holz oder Holzwerkstoffen verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiet von selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde ist die Verstärkung von Bauteilen in Bereichen von Querdruck- oder Quersugbeanspruchungen [1]. Sie können als Quersugbewehrung innerhalb einer Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln ein sprödes Versagen durch Aufspalten verhindern und gleichzeitig zur Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindung beitragen, wie die Arbeit von Bejtka [2] zeigte. Bei allen genannten Anwendungen sind geringe Abstände der Schrauben untereinander und zu den Bauteilrändern gewünscht oder sogar erforderlich. Bei der Dimensionierung von Bauteilquerschnitten im Holzbau kann neben der Bauteiltragfähigkeit häufig auch die Größe der benötigten Anschlussflächen maßgebend werden. Diese müssen so gewählt werden, dass alle für die Tragfähigkeit des Anschlusses benötigten Verbindungsmittel angeordnet werden können. In diesen Fällen ermöglichen geringe Abstände der Verbindungsmittel geringere Querschnittsmaße der Bauteile und führen somit zu wirtschaftlicheren Konstruktionen.

Die bauaufsichtlich zugelassenen selbstbohrenden Holzschrauben aus Kohlenstoffstahl werden i. d. R. nach dem Aufrollen des Gewindes gehärtet, um höhere Werte der Zugtragfähigkeit, des Fließmomentes und der Torsionstragfähigkeit (Bruchdrehmoment) zu erreichen. Darüber hinaus verfügen sie häufig über spezielle Bohrspitzen, Schneidgewinde und Reibschäfte, um das Einschraubdrehmoment im Holz zu vermindern. Diese Eigenschaften gestatten es, sie im Gegensatz zu genormten Holzschrauben (Gewinde nach DIN 7998 [13]) in nicht vorgebohrte Hölzer einzudrehen. Beim Einbringen von Verbindungsmitteln ohne Vorbohren kann ein Holzbauteil aufspalten oder eine Rissbildung ausgelöst werden, siehe Abbildung 1. Hierdurch kann die Kraftübertragung stark reduziert oder völlig ausgeschlossen werden, so dass eine Verwendung des Bauteils nicht mehr möglich ist. Außerdem beeinflussen Risse, die durch die Montage der Verbindungsmittel verursacht wurden, die Tragfähigkeit des Bauteils bzw. des Anschlusses unter Belastung. Diese Anfangsrisse können ein weiteres Risswachstum initiieren und so zum Versagen des Holzes durch Aufspalten führen.



Abbildung 1: Rissbildung und Aufspalten beim Einschrauben aufgrund geringer Abstände bzw. Holzdicken

Zur Vermeidung des Risswachstums und des Aufspaltens des Holzes werden in den Bemessungsnormen für Holzbauwerke bzw. in den bauaufsichtlichen Zulassungen für Holzschrauben Mindestabstände und Mindestholzdicken in Abhängigkeit der Verbindungsmitteldurchmesser vorgeschrieben. Die angegebenen Mindestwerte sind Erfahrungswerte bzw. beruhen auf experimentellen Untersuchungen. Bei selbstbohrenden Holzschrauben können Erkenntnisse bezüglich der Spaltgefahr des Holzes beim Eindrehen i. d. R. nicht von einem Schraubentyp auf andere bzw. neu entwickelte Schraubentypen übertragen werden. Dieses ist auf Abweichungen bezüglich der Geometrien und Gestaltungsmerkmale (Spitzen-, Schaft-, Kopfausbildungen, etc.) bei unterschiedlichen Schraubentypen bzw. Schraubendurchmessern zurückzuführen.

Daher werden bisher die Mindestabstände und Mindestholzdicken für den jeweiligen Schraubentyp durch umfangreiche Einschraubversuche mit einem iterativen Vorgehen ermittelt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes [4], [5] wurde am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) eine Methode entwickelt, diese Parameter auf Basis weniger Grundlagenversuche sowie numerischer Berechnungen zu bestimmen. Hierdurch kann der Umfang von Einschraubversuchen reduziert werden, so dass statt vieler iterativer Versuche nur noch eine geringe Anzahl bestätigender Einschraubversuche erforderlich wird. Für auf Abscheren beanspruchte Schrauben sind zusätzlich noch Tragfähigkeitsversuche mit Verbindungen erforderlich.

2. Ermittlung erforderlicher Abstände und Holzdicken

Allgemein werden selbstbohrende Holzschrauben bezüglich der Mindestabstände zunächst wie Nägel in nicht vorgebohrten Hölzern behandelt, s. Abbildung 2 und Tabelle 1. Deutlich geringere Mindestabstände sind bei Schrauben möglich, die über Bohrspitzen, Schneidgewinde, Reibschäfte oder ähnliche Merkmale verfügen, da diese die Gefahr des Aufspaltens reduzieren. Häufig können derartig gestaltete Schrauben bei Einhaltung von bestimmten Mindestholzdicken mit Abständen wie für Nägel in vorgebohrten Hölzern angeordnet werden, vgl. Tabelle 1. Werden die Schrauben überwiegend auf Herausziehen beansprucht, können die Mindestabstände ggf. weiter reduziert werden. Die Anwendbarkeit reduzierter Mindestabstände und zugehöriger Mindestholzdicken muss für die bauaufsichtliche Zulassung der jeweiligen Schraube nachgewiesen werden. Hierzu werden bisher Einschraubversuche durchgeführt, mit denen iterativ die Kombinationen aus Abständen und Holzdicken ermittelt werden, die nicht zum Versagen durch Aufspalten bzw. zu tragfähigkeitsreduzierenden Risserscheinungen führen.

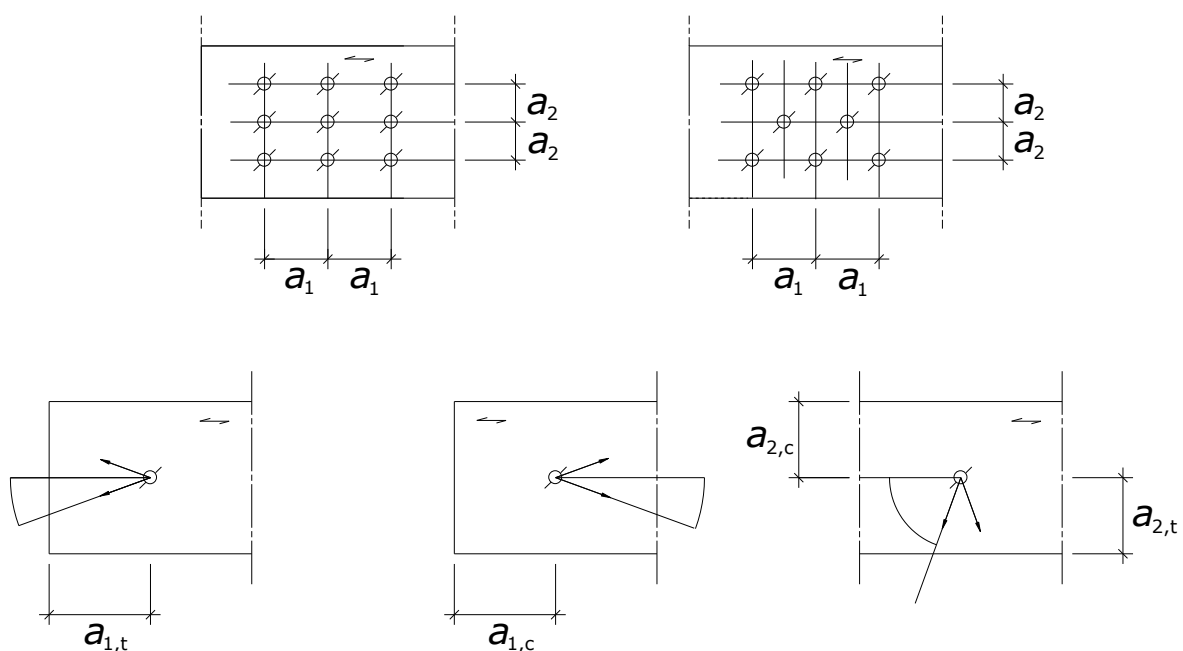


Abbildung 2: Definition der Mindestabstände für stiftförmige Verbindungsmittel

Tabelle 1: Abstände von Nägeln in nicht vorgebohrten u. vorgebohrten Hölzern gemäß DIN 1052 [12]

	a_1	a_2	$a_{1,t}$	$a_{1,c}$	$a_{2,t}$	$a_{2,c}$
nicht vorgebohrt ¹⁾ $d < 5 \text{ mm}$	$(5+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$5 \cdot d$	$(7+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$7 \cdot d$	$(5+2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$5 \cdot d$
nicht vorgebohrt ¹⁾ $d \geq 5 \text{ mm}$	$(5+7 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$5 \cdot d$	$(10+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$10 \cdot d$	$(5+5 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$5 \cdot d$
vorgebohrt	$(3+2 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$3 \cdot d$	$(7+5 \cdot \cos \alpha) \cdot d$	$7 \cdot d$	$(3+4 \cdot \sin \alpha) \cdot d$	$3 \cdot d$

¹⁾ nicht vorgebohrte Hölzer mit $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$

Bei Einschraubversuchen werden die zu prüfenden Holzschrauben mittels eines handelsüblichen Einschraubgerätes in einen Prüfkörper aus Vollholz eingedreht und anschließend die entstehenden Risserscheinungen beurteilt. Hierbei werden die Schrauben i. d. R. soweit eingedreht, dass der Kopf bündig mit der Holzoberfläche abschließt. Im Folgenden werden diese Versuche als konventionelle Einschraubversuche bezeichnet.

Bei konventionellen Einschraubversuchen sind die unterschiedlichen Einflüsse auf das Spaltverhalten des Holzes zu berücksichtigen. Dieses muss bei der Festlegung der Randbedingungen für die Versuche so erfolgen, dass sich aus den Versuchsergebnissen zuverlässige Aussagen für die relevanten Anwendungen ableiten lassen. Bisherige Kenntnisse über die Einflussfaktoren auf das Spaltverhalten von Holz beim Einbringen von Verbindungsmitteln ohne Vorbohren beruhen überwiegend auf systematischen, experimentellen Untersuchungen, wie z. B. den Arbeiten von Blaß et al. [3], Ehlbeck et al. [6], [7], Kevärimäki [8], Lau et al. [9], Marten [10] und Schmid [11]. Die Mehrzahl dieser Untersuchungen beschränkt sich auf das Spaltverhalten von Holz beim Einschlagen von Nägeln. Es konnte beobachtet werden, dass die Rissentstehung und das Risswachstum von unterschiedlichen Parametern beeinflusst werden. Diese können vereinfacht in materialspezifische, geometrische und verbindungsmittelspezifische Einflüsse eingeteilt werden. Materialspezifische Einflüsse sind die folgenden Eigenschaften des Baustoffs Holz: Holzart, Rohdichte, Jahrringbreite, Holzfeuchte und die Jahrringlage in Bezug zur Verbindungsmittelachse. Zu den geometrischen Einflüssen zählen die Abstände und Holzdicken in Bezug zum Durchmesser der Verbindungsmittel sowie die Anordnung der Verbindungsmittel im Anschlussbild.

Die Ausbildung der Spitze, des Kopfes, des Schaftes bzw. des Gewindes sowie die Querschnittsform und Oberflächenbeschaffenheit von Schrauben bzw. Nägeln stellen verbindungsmittelspezifische Einflüsse dar. Insbesondere bei selbstbohrenden Holzschrauben sind die genannten Merkmale für das Spaltverhalten des Holzes beim Eindrehen von entscheidender Bedeutung. Die Schrauben verschiedener Hersteller und Typen unterscheiden sich daher nicht nur in ihrer Grundgeometrie, sondern auch deutlich in der Anordnung und Ausbildung der spaltreduzierenden Merkmale. In Abbildung 3 bzw. Abbildung 4 sind einige Beispiele für die Ausbildung von Spitzen und Köpfen bei selbstbohrenden Holzschrauben mit Voll- und Teilgewinde dargestellt.



Abbildung 3: Gestaltung der Spitzen bei unterschiedlichen Typen selbstbohrender Holzschrauben

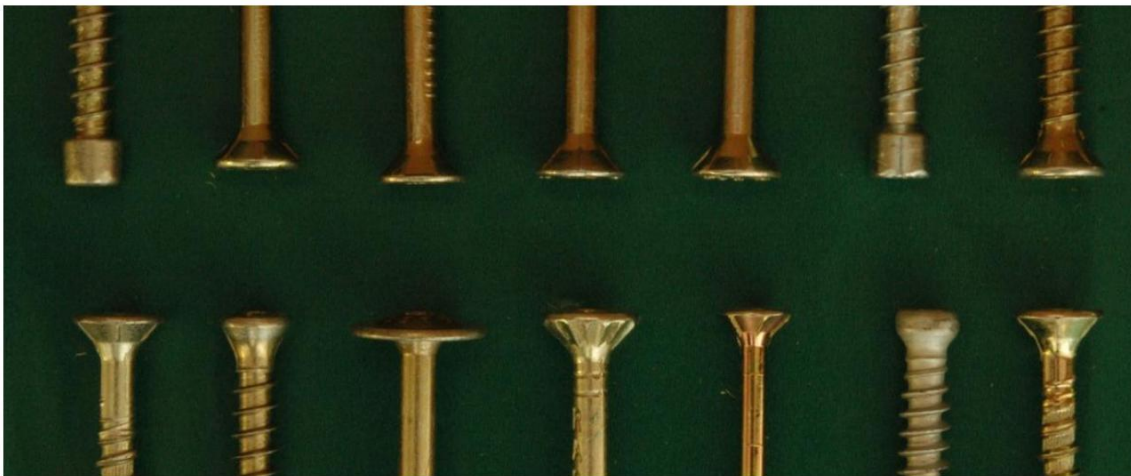


Abbildung 4: Gestaltung der Köpfe bei unterschiedlichen Typen selbstbohrender Holzschrauben

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens [3] sowie weiterer Projekte wurden die erforderlichen Mindestabstände und Mindestholzdicken für selbstbohrende Holzschrauben systematisch untersucht. Hierzu wurden 326 konventionelle Einschraubversuche mit fünf Schraubentypen (vier Hersteller) bei unterschiedlichen Schraubenbildern durchgeführt. Insgesamt wurden dabei 1125 Schrauben verwendet. Ziel der Einschraubversuche war die Ermittlung der Holzdicken, bei denen ein Aufspalten des Holzes bei Abständen wie für Nägel in vorgebohrten Hölzern gemäß Tabelle 10 der DIN 1052 [12] (siehe Abbildung 2 und Tabelle 1) zuverlässig vermieden wird. Für die Einschraubversuche wurden Prüfkörper aus Fichte/Tanne mit höherer Rohdichte verwendet ($\rho_m = 484 \text{ kg/m}^3$, mittlere Holzfeuchte $u_m = 12,0 \%$). Neben der Anzahl der Schraubenreihen und der Schraubenzahl innerhalb einer Reihe wurden ebenfalls die unterschiedlichen Orientierungsmöglichkeiten der Schrauben bei zwei- bzw. mehrschnittigen Verbindungen berücksichtigt. Die empirisch ermittelten Mindestholzdicken sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Es zeigte sich, dass für die untersuchten Schrauben, die allesamt über Bohrspitzen verfügten, Abstände wie für Nägel in vorgebohrten Hölzern möglich sind. Je nach Schraubentyp sind dabei jedoch unterschiedliche Mindestholzdicken erforderlich und ggf. Einschränkungen bezüglich der Abstände $a_{1,c}$ und a_1 einzuhalten. Bei Schrauben mit voneinander abweichender Geometrie (Außen-, Kern- und Kopfdurchmesser) konnte ein unterschiedliches Spaltverhalten des Holzes beobachtet werden. Für Schrauben gleicher Durchmesser und ähnlicher Geometrieverhältnisse wurden signifikante Unterschiede bezüglich der ermittelten Mindestholzdicken festgestellt, was auf die verschiedenartige Ausbildung der spaltreduzierenden Merkmale zurückzuführen ist. Es wird deutlich, dass sich die Ergebnisse von Einschraubversuchen selbst bei gleichen Durchmessern nicht auf verschiedene Schraubentypen übertragen lassen.

Dies zeigen zum Beispiel die verschiedenen Mindestholzdicken für die Schrauben mit 8 mm Durchmesser der Hersteller A, B und C. Des Weiteren können die für einen Schraubendurchmesser ermittelten Mindestholzdicken bzw. Mindestabstände nicht auf Schrauben anderer Durchmesser des gleichen Typs übertragen werden. Dieses wird an den Versuchsergebnissen für die Schrauben des Herstellers A der Durchmesser 8, 10 und 12 mm deutlich. Bei den Schrauben mit $d = 12$ mm sind aufgrund abweichender Geometrieverhältnisse im Vergleich geringere Holzstärken möglich. Eine ausreichende Erfassung der materialspezifischen Einflüsse auf das Spaltverhalten des Holzes erfordert eine entsprechend hohe Versuchszahl. Insbesondere ist hierbei auch zu berücksichtigen, dass der nicht bekannte Eigenspannungszustand der Prüfkörper die Rissbildung beeinflussen kann. Hierauf sind u. a. Probleme bei der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von Einschraubversuchen bei sonst gleichen Prüfkorpereigenschaften zurückzuführen. Des Weiteren ist die Auswertung von konventionellen Einschraubversuchen teilweise schwierig, da nur oberflächlich sichtbare Risse bzw. Spalterscheinungen zur Beurteilung zur Verfügung stehen. Insgesamt sind für eine zuverlässige experimentelle Ermittlung der Mindestabstände und Mindestholzdicken von selbstbohrenden Holzschrauben für jeden Schraubentyp und teilweise sogar für jeden Durchmesser umfangreiche Einschraubversuche vorzusehen.

Tabelle 2: Experimentell durch konventionelle Einschraubversuche ermittelte Mindestholzdicken

Hersteller	Typ	d in mm	ρ_m in kg/m ³	Anzahl Versuche	Mindestholzdicke t in mm		Einschränkungen bezüglich der Mindestabstände
A	1	5	487	51	24	$4,8 \cdot d$	$a_{1,c} \geq 12 \cdot d, a_1 \geq 5 \cdot d$
A	2	5	483	56	30	$6 \cdot d$	$a_{1,c} \geq 12 \cdot d, a_1 \geq 5 \cdot d$
A	1	8	477	35	80	$10 \cdot d$	-
A	1	10	497	12	100	$10 \cdot d$	$a_{1,c} \geq 12 \cdot d, a_1 \geq 5 \cdot d$
A	1	12	449	42	96	$8 \cdot d$	$a_{1,c} \geq 12 \cdot d, a_1 \geq 5 \cdot d$
B	1	8	497	13	40	$5 \cdot d$	$a_{1,c} \geq 12 \cdot d, a_1 \geq 5 \cdot d$
C	1	6	504	51	42	$7 \cdot d$	-
C	1	8	484	44	64	$8 \cdot d$	-
D	1	8,9	494	22	127	$14,3 \cdot d$	$a_{1,c} \geq 12 \cdot d, a_1 \geq 5 \cdot d$

d Nenndurchmesser der Schrauben in mm

3. Neue Methoden zur Beurteilung der Spaltgefahr

3.1. Prüfmethode zur Ermittlung von Kräften beim Einschrauben

Das bisher übliche Vorgehen, die Mindestabstände und die Mindestholzdicken für selbstbohrende Holzschrauben iterativ durch Einschraubversuche zu bestimmen, ist vergleichsweise aufwändig. Des Weiteren ist die Auswertung der Versuche auf Grundlage von äußerlich sichtbaren Risserscheinungen teilweise schwierig und erfordert umfangreiche Erfahrungen in der Durchführung und Bewertung von konventionellen Einschraubversuchen. Daher wurde ein Verfahren entwickelt, die Parameter Mindestabstände und Mindestholzdicke durch wenige Versuche in Verbindung mit numerischen Berechnungen zu ermitteln, vgl. [4]. Auf diese Weise sind lediglich einige bestätigende konventionelle Einschraubversuche notwendig.

Mit einem Finite-Elemente-Modell lassen sich materialspezifische und geometrische Einflüsse auf das Spaltverhalten (siehe Abschnitt 2) weitgehend erfassen. Die verbindungsmittelspezifischen Einflüsse, insbesondere die Wirkung von Bohrspitzen, Schneidgewinden, Fräsrippen sowie Reibschäften, können nicht direkt modelliert werden. Deshalb wurde zunächst eine Prüfmethode entwickelt, mit der die Wirkung der spaltreduzierenden Merkmale durch wenige Versuche objektiv festgestellt werden kann. Bei der neuen Prüfmethode wird die zu untersuchende Schraube in einen Prüfkörper aus Voll-, Brettschicht- oder Furnierschichtholz eingeschraubt. Der Prüfkörper selbst besteht aus zwei Teilen, die aus einem Querschnitt durch faserparallele Auftrennung hergestellt werden. Anschließend werden die beiden Prüfkörperhälften mit Messschrauben verbunden (siehe Abbildung 5). Die zu prüfende Holzschraube wird zwischen die beiden durch die Messschrauben zusammengespannten Prüfkörperhälften mittels einer Schraubenprüfmaschine bei konstanter Drehzahl eingedreht und gleichzeitig das Einschraubdrehmoment gemessen. Durch den Einschraubvorgang entstehen Kräfte, die rechtwinklig zur Schraubenachse und zur Faserrichtung der Prüfkörperhälften wirken. Die resultierenden Dehnungen der Messschrauben werden mit Hilfe im Schraubenkern applizierter Dehnmessstreifen gemessen. Auf Grundlage einer Kalibrierung können die Dehnungen in Kräfte umgerechnet werden. In Abbildung 6 ist die Versuchseinrichtung während der Versuchsdurchführung dargestellt. Einen geöffneten Prüfkörper nach dem Versuch zeigt Abbildung 5 (rechts).

Die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit drei unterschiedlichen Schraubentypen der Größe 8.0 x 200 mm sind in Abbildung 7 zusammengestellt. Es wurden jeweils drei Prüfkörper mit gleichen Eigenschaften verwendet, die mit den Maßen $d/b/h = 24/80/180$ mm aus einem Vollholzabschnitt hergestellt wurden. Die Diagramme in Abbildung 7 zeigen die mit den Messschrauben ermittelten Kräfte über der jeweiligen Einschraubtiefe. Für die unterschiedlichen Schraubentypen konnten signifikante Kraftverläufe in Abhängigkeit des Einschraubweges bestimmt werden. Die Lage der Messpunkte (MSr) ist in Abbildung 6 dargestellt.

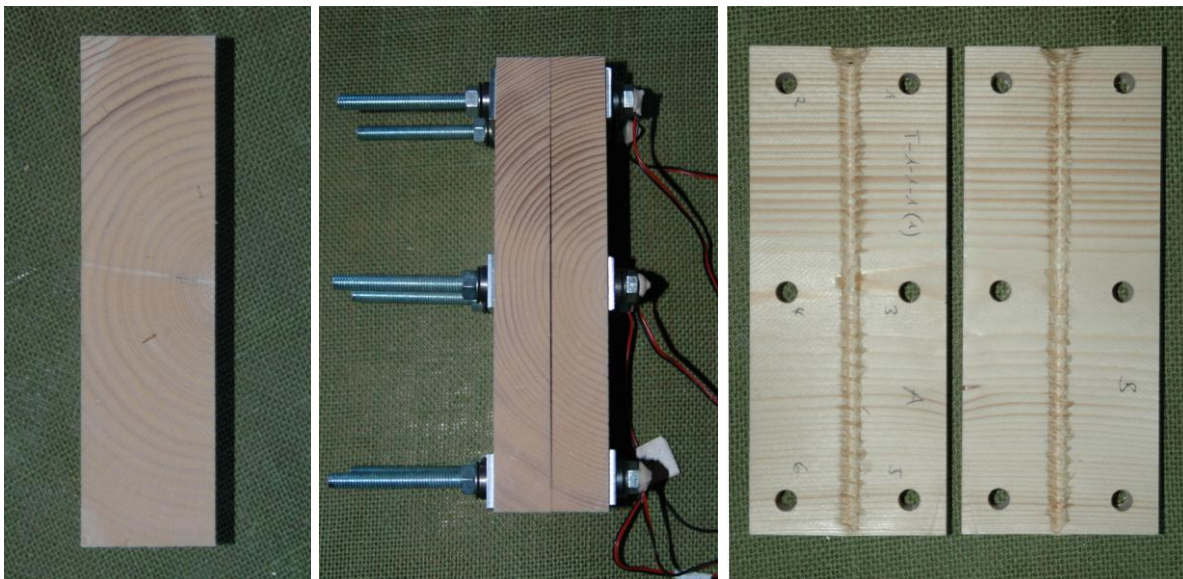


Abbildung 5: Prüfkörper zur Ermittlung von Kräften beim Eindrehen von Schrauben, vor dem Auftrennen, nach dem Auftrennen mit Messschrauben (ohne Vorspannung) sowie geöffnet nach der Versuchsdurchführung

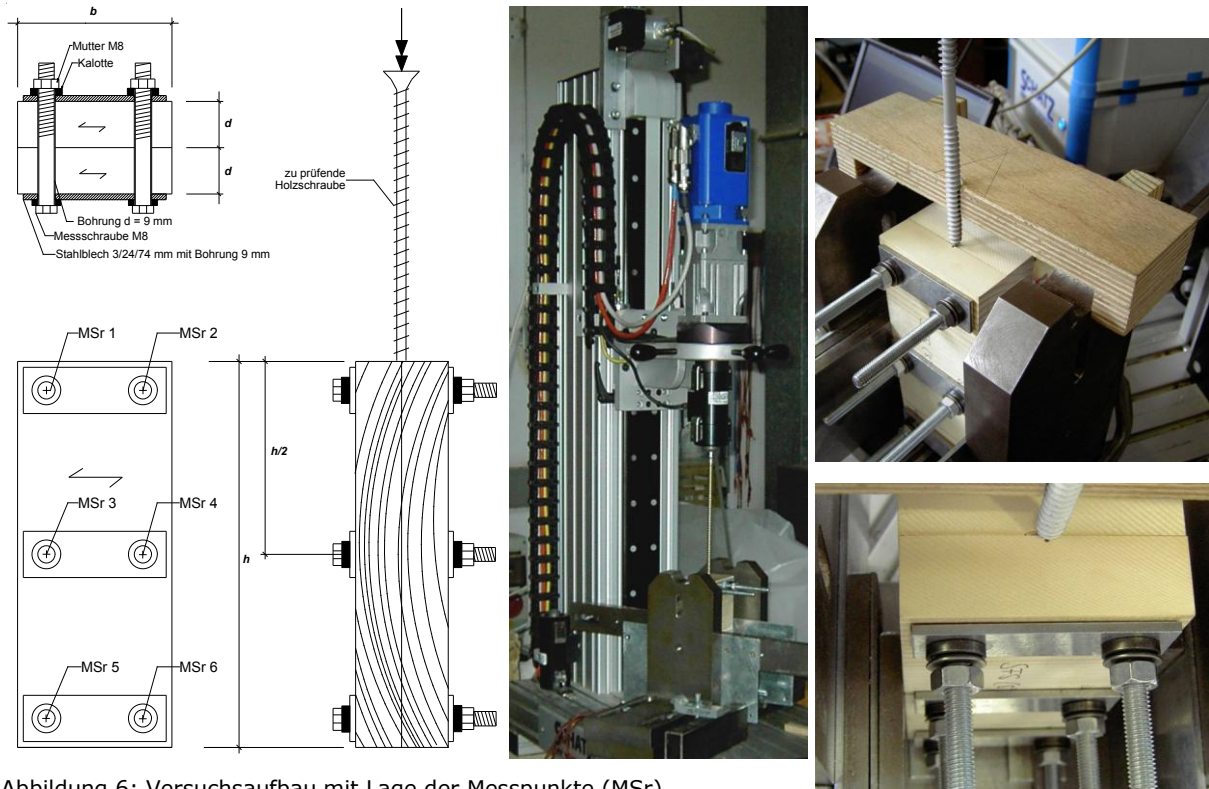
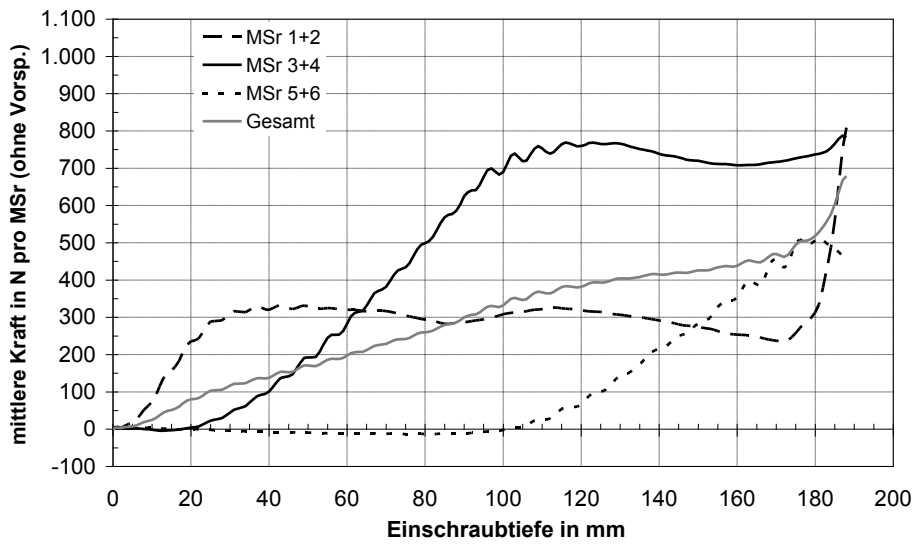


Abbildung 6: Versuchsaufbau mit Lage der Messpunkte (MSr)

Mittelwerte der gemessenen Kräfte für Schraubentyp A



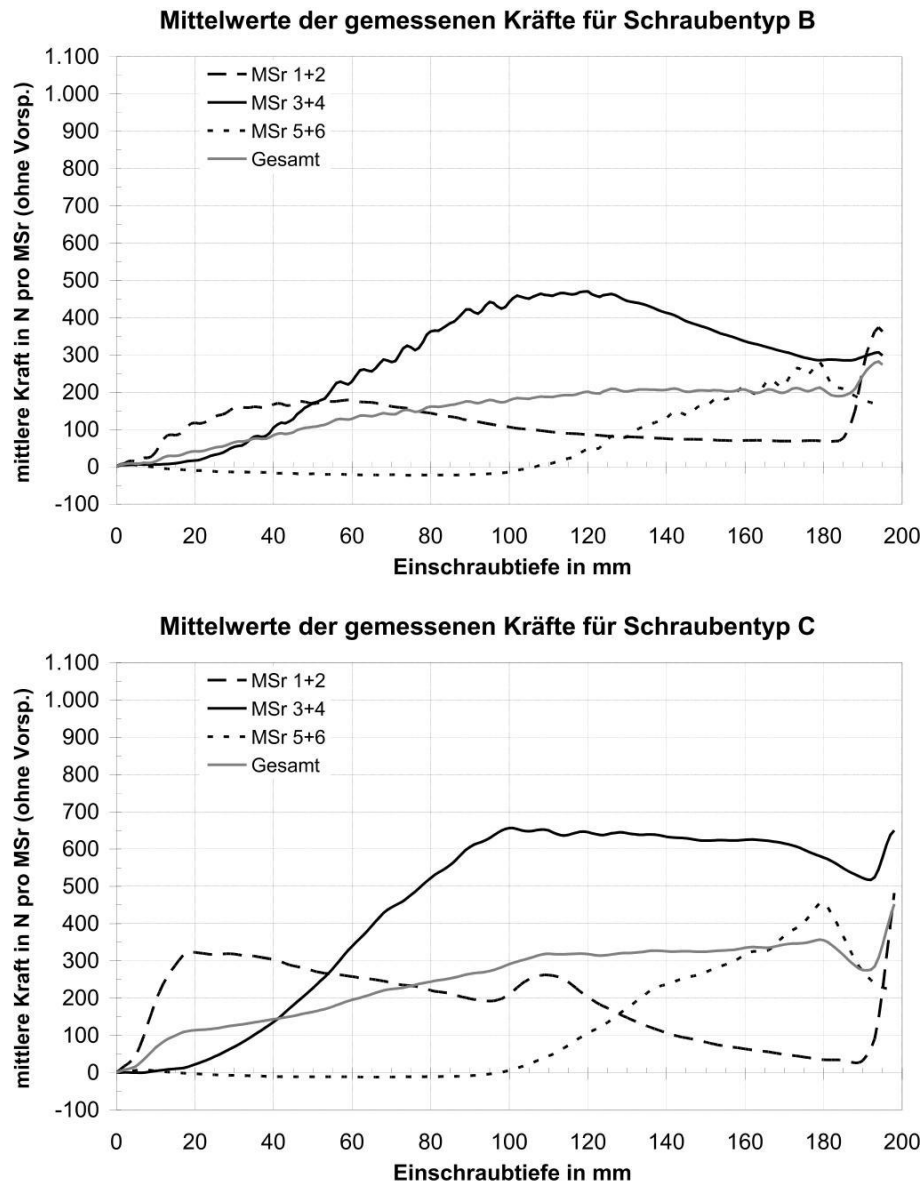


Abbildung 7: Ergebnisse der Versuchsreihe 1, mittlere Kräfte an den Messpunkten

Die Ergebnisse der Versuchsreihen 1 bis 3 sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Als Vergleichsgröße für die beim Einschrauben auf den Prüfkörper wirkende Kraft wird die mittlere Gesamtkraft $F_{m,tot}$ verwendet. Dieses ist die Summe der an den Messschrauben gemessenen Kräfte ($F_{MSr,i}$), die über die Schraubenlänge ℓ_{Sr} gemittelt wird:

$$F_{m,tot} = \frac{1}{\ell_{Sr}} \int_0^{\ell} F_{MSr,1}(x) + F_{MSr,2}(x) + \dots + F_{MSr,i}(x) + \dots + F_{MSr,n}(x) dx$$

In den Versuchsreihen 2 u. 3 wurden Prüfkörper der Maße $d/b/h = 24/80/200$ mm verwendet, wobei die Prüfkorpereigenschaften innerhalb einer Reihe jeweils gleich waren. Eine Betrachtung der Schraube des Herstellers A als Referenzschraube (Index 100 %) ermöglicht einen Vergleich zu den durch konventionelle Einschraubversuche ermittelten Mindestholzdicken. Graphisch wird dieser Vergleich in Abbildung 8 veranschaulicht. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Versuchsmethoden. Durch Vergleich der gemessenen Kräfte mit den Messwerten für eine Referenzschraube, deren Spaltwirkung bekannt ist, kann somit direkt auf die erforderlichen Mindestholzdicken geschlossen werden.

Tabelle 3: Mittlere Gesamtkraft für 8er Schrauben im Vgl. zu den Ergebnissen von Einschraubversuchen

Reihe	Hersteller	Versuchszahl		ρ_m in kg/m ³	mittlere Gesamtkraft		Mindestholzdicke	
		gesamt	verwertbar		F in N	Index	t in mm	Index
1	A	10	9	453	1646	100 %	10 · d	100 %
	B	10	8	454	886	54 %	5 · d	50 %
	C	10	7	460	1466	89 %	8 · d	80 %
2	A	14	9	378	1003	100 %	10 · d	100 %
	B	10	10	391	595	59 %	5 · d	50 %
	C	10	10	387	908	91 %	8 · d	80 %
3	A	13	6	506	1689	100 %	10 · d	100 %
	B	10	7	507	1013	60 %	5 · d	50 %
	C	10	8	502	1576	93 %	8 · d	80 %

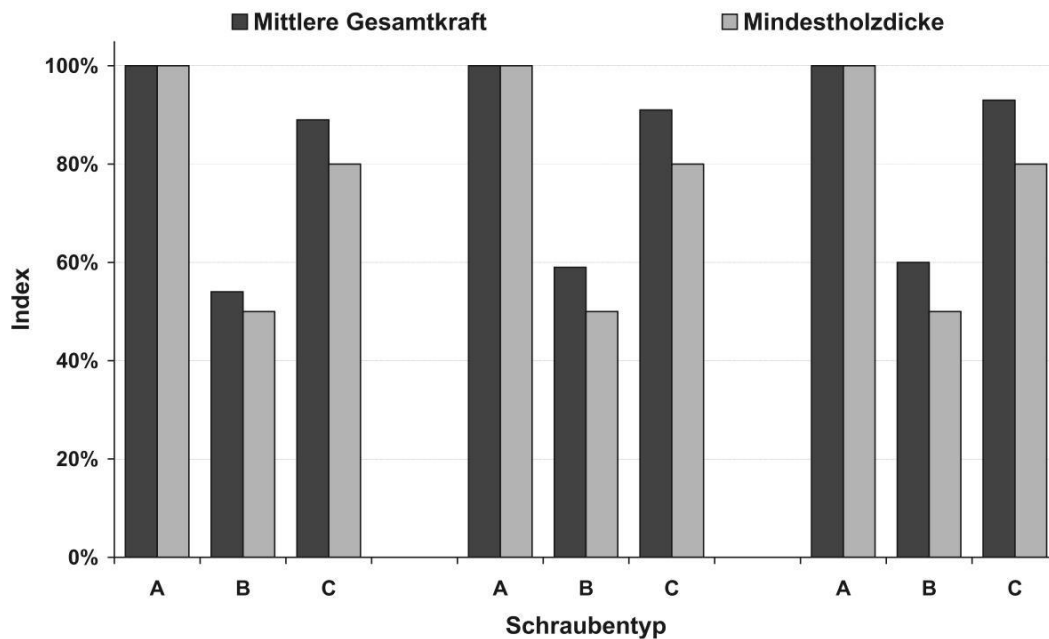


Abbildung 8: Vergleich zwischen mittlerer Gesamtkraft und Mindestholzdicke für die drei Versuchsreihen

Die beschriebene Prüfmethode liefert eine qualitative Aussage über die auftretenden Spaltkräfte und kann somit als Grundlage für eine quantitative Erfassung dieser in einem numerischen Modell herangezogen werden.

Zur Absicherung der Prüfmethode wurde in verschiedenen Reihen mit insgesamt 384 Versuchen der Einfluss folgender Parameter auf die Messgrößen untersucht: Rohdichte der Prüfkörper, Vorspannung der Messschrauben, Einschraubgeschwindigkeit, Schraubendurchmesser, Prüfkörpergeometrie, Schraubentyp, Schraubenlänge sowie das Verhältnis zwischen Prüfkörperhöhe und Schraubenlänge. In weiteren Versuchsreihen mit insgesamt 225 Versuchen wurde die Anzahl der Messschrauben (6, 8, 10 Messschrauben) variiert und der Einfluss des Winkels zwischen Schraubenachse und Jahrringtangente untersucht. Diese Versuche wurden mit Prüfkörpern durchgeführt, welche in Prüfkörperhöhe über gleiche Eigenschaften (Rohdichte, Jahrringlage, Elastizitäts- und Schubmoduln) verfügen. Hierzu wurden je zwei bzw. drei Prüfkörper aus ein und derselben Brettlamelle hergestellt, indem diese in kurze Abschnitte aufgeteilt und die Abschnitte zu Brettschichtholz verklebt wurden.

Darüber hinaus wurde der Einfluss des Winkels ε zwischen Faserrichtung und Schraubenchse ermittelt. Hierfür wurden die Versuche, bei denen die Schrauben rechtwinklig zur Faserrichtung angeordnet waren ($\varepsilon = 90^\circ$), durch Versuche mit faserparallel ($\varepsilon = 0^\circ$) und unter einem Winkel von $\varepsilon = 45^\circ$ eingedrehten Schrauben ergänzt. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Prüfverfahrens wurden die Prüfkörper aus Voll- bzw. Brettschichtholz durch Prüfkörper aus Furnierschichtholz ersetzt. Diese lassen sich deutlich wirtschaftlicher herstellen. Außerdem ist beim Eindrehen der Schrauben in Furnierschichtholz die Gefahr des Verlaufs in eine der Prüfkörperhälfte geringer.

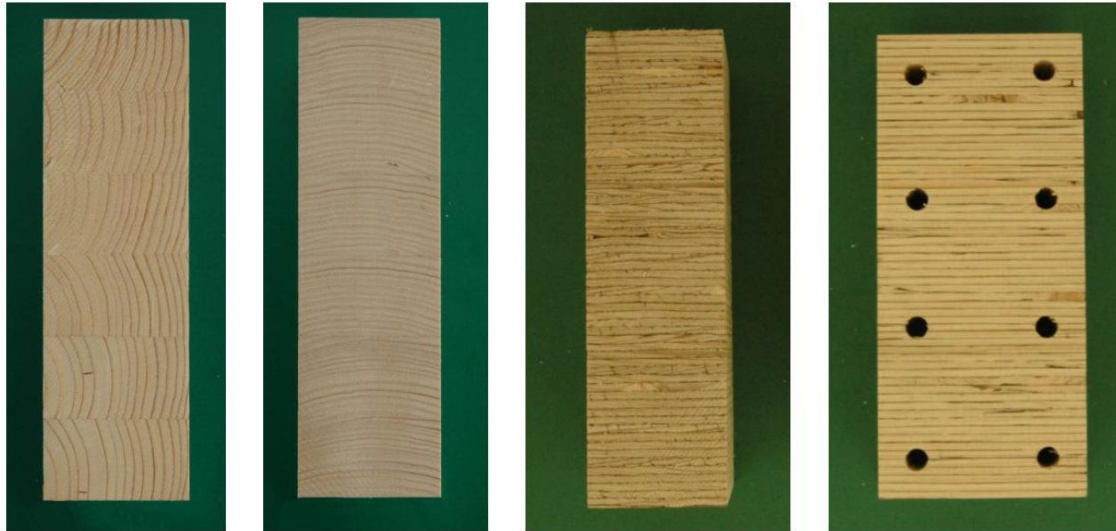


Abbildung 9: Prüfkörper aus Brettschichtholz mit homogenisiertem Aufbau sowie aus Furnierschichtholz

3.2. Numerische Ermittlung von Rissflächen und Verifizierung

Zur Entwicklung eines Rechenmodells, mit dem das Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von Schrauben ermittelt und beurteilt werden kann, wurde zunächst der Einschraubvorgang genauer betrachtet. Beim Eindrehen einer Schraube in ein Bauteil wirken Kräfte rechtwinklig zur Faserrichtung auf das Holz und verursachen eine Querzugbeanspruchung. Erreicht die Querzugbeanspruchung die Querzugfestigkeit, können sich Risse bilden. Diese breiten sich von der Schraubenchse ausgehend über die jeweilige Einschraubtiefe entlang der Faserrichtung im Holzbauteil aus, so dass eine Rissfläche entsteht. Ist die Schraube so weit eingedreht, dass die Schraubenspitze aus dem Bauteil austritt, erstreckt sich die Rissfläche bereits über die gesamte Bauteilhöhe. Beim Weiteren Eindrehen der Schraube kann sich die Rissfläche entlang der Faserrichtung vergrößern. Dies tritt in signifikanter Weise z. B. beim Versenken des Kopfes auf.

Eine experimentelle Ermittlung von Rissflächen ist im Rahmen von Einschraubversuchen möglich. Hierzu kann z. B. ein von Lau et al. [9] für Einschlagversuche mit Nägeln entwickeltes Verfahren in modifizierter Form angewendet werden. Das Verfahren beruht darauf, die gerissenen Flächen nach dem Einschrauben durch Einfärben zu kennzeichnen. Die Schraube wird hierzu nach dem Einschraubvorgang herausgedreht und Farbe in die Einschrauböffnung gefüllt. Durch die Kapillarwirkung breitet sich die Farbe im gerissenen Bereich aus. Eine signifikante Ausbreitung der Farbe über den gerissenen Bereich hinaus kann nachweislich ausgeschlossen werden. Anschließend wird der Prüfkörper in der Rissebene geöffnet, so dass die Rissfläche ermittelt werden kann. Abbildung 10 zeigt einen geöffneten Prüfkörper mit der zugehörigen Messkurve zur Rissflächenerfassung.

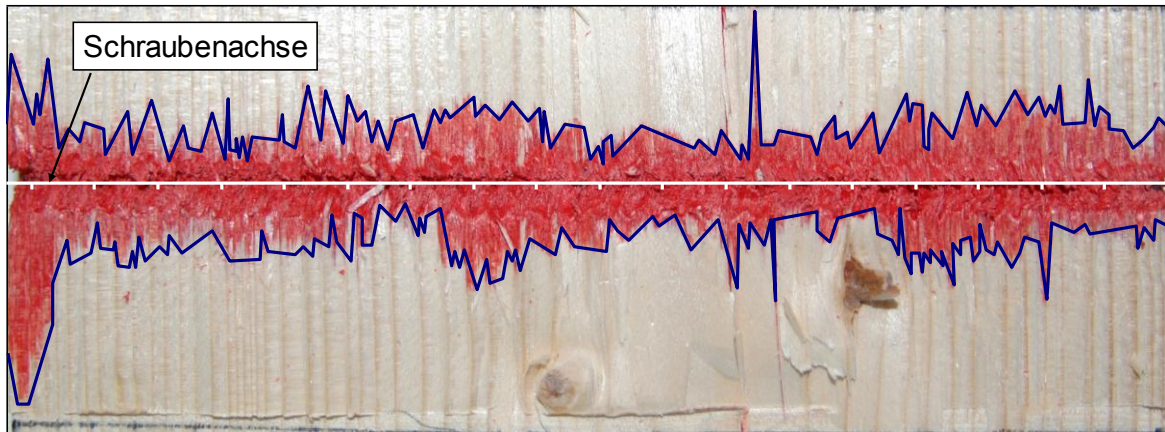


Abbildung 10: Aufgetrennter Prüfkörper mit visualisierter Rissfläche und Graphen der Rissflächenbegrenzung

Die Größe der resultierenden Rissfläche ist entscheidend für die Beurteilung der Spaltgefahr. Daher wurde das Rechenmodell so konzipiert, dass die durch den Einschraubvorgang hervorgerufene Rissbildung ermittelt werden kann. Bei den Berechnungen werden die materialspezifischen Einflüsse des Holzes auf das Spaltverhalten wie u. a. die Elastizitäts- und Schubmoduln sowie die Rohdichte berücksichtigt. Das Holzbauteil wird unter Ausnutzung der Symmetriebedingungen im Finite-Elemente-Programm ANSYS 11.0 mit Volumenelementen modelliert. In der Rissebene wird das für die Berechnung wichtige Verhalten des Holzes unter Querkzugbeanspruchung durch nicht-lineare Federelemente abgebildet. Die Eigenschaften der Federn wurden anhand von vorhandenen Versuchsergebnissen mit CT-Proben der Holzart Fichte kalibriert. Hierzu wurden die Versuche mit CT-Proben von Schmid [11] mit einem zweidimensionalen FE-Modell abgebildet und iterativ ein zutreffendes Federgesetz ermittelt.

Der Einschraubvorgang in ein Holzbauteil kann bisher nicht direkt in einem Finite-Elemente-Modell umgesetzt werden. Daher ist das gewählte Modell so konzipiert, dass stattdessen zur Berechnung der Rissflächen die Belastung des Holzes durch den Einschraubvorgang verwendet werden kann. Diese Belastung kann auf Grundlage der Kraftverläufe berechnet werden, die mit der neuen Prüfmethode (vgl. Abschnitt 3.1) über den Einschraubweg ermittelt wurden. Hierzu werden diese Versuche mittels eines FE-Modells abgebildet und durch Vergleiche mit den Versuchsergebnissen die Funktion einer schraubenspezifischen, quasi-statischen Ersatzlast iteriert. Die berechnete Ersatzlast wird im FE-Modell zur Ermittlung der Rissflächen in Einschraubrichtung als Wanderlast angesetzt. Einflüsse der Rohdichte und der Einschraubgeschwindigkeit sowie der Winkel zw. Schraubenachse und Jahrringtangente können bei der Berechnung durch Korrekturbeiwerte erfasst werden.

Die Ergebnisse einer Rissflächenberechnung mittels des FE-Modells sind in Abbildung 11 für einen konkreten Versuch im Vergleich zur experimentell ermittelten Rissfläche dargestellt. Gezeigt wird ein geöffneter Prüfkörper mit der durch Einfärben visualisierten Rissfläche sowie die zugehörigen Messkurven zur Rissflächenerfassung. Des Weiteren sind die Graphen angegeben, die die simulierte Rissfläche begrenzen. Es zeigt sich eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen. Anhand von experimentell ermittelten Rissflächen konnte die numerische Rissflächenberechnung kalibriert und verifiziert werden. Für die in praxi relevanten Konfigurationen zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und den experimentell ermittelten Rissflächen. Dies wird auch durch den Vergleich zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Rissflächen belegt, der in Abbildung 12 dargestellt ist. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse dreier Versuchsreihen mit den Schrauben der Hersteller A, B und C.

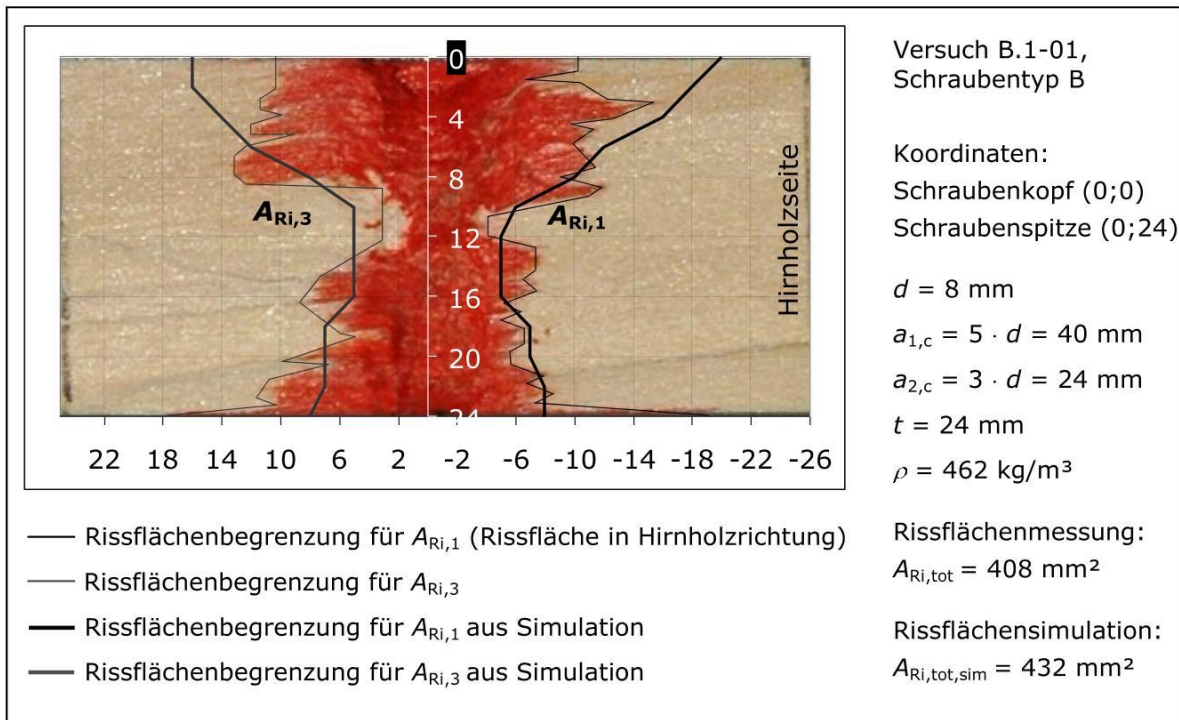
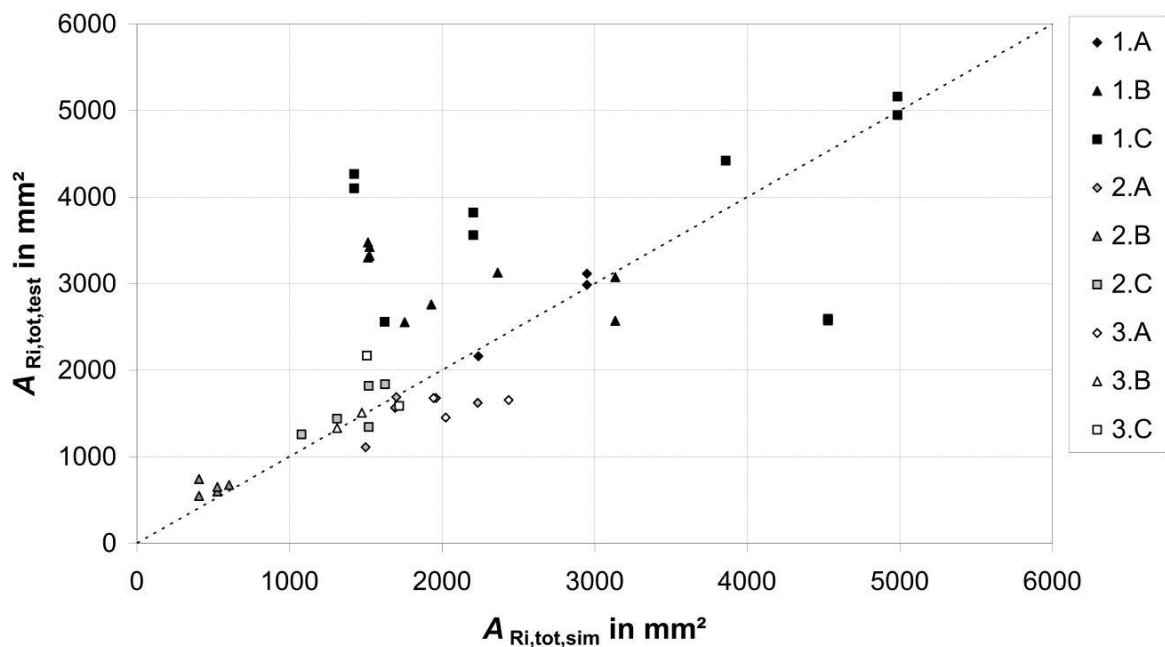


Abbildung 11: Beispiel einer Rissflächenermittlung durch Simulation und Versuch, Koordinaten in mm

Abbildung 12: Vergleich von Rissflächen aus Versuch ($A_{\text{Ri,tot,test}}$) und Simulation ($A_{\text{Ri,tot,sim}}$) für drei Versuchsreihen mit Schrauben der Hersteller A, B und C

4. Zusammenfassung

Selbstbohrende Holzschrauben können auch in nicht vorgebohrte Hölzer mit geringen Mindestabständen untereinander und zum Rand eingedreht werden, ohne dass das Holzbauteil durch Aufspalten versagt. Die Ermittlung der erforderlichen Mindestholzdicken und Mindestabstände durch iterative Einschraubversuche ist vergleichsweise aufwändig. Aufgrund der verschiedenartigen Schraubenausbildungen ist eine Übertragung von Ergebnissen auf andere Schraubentypen und Schraubengeometrien nur teilweise oder gar nicht möglich. Die Qualität der durch konventionelle Einschraubversuche getroffenen Aussagen ist eingeschränkt, da sich diese lediglich auf Beobachtungen von Risserscheinungen an der Holzoberfläche stützen.

Mit einer neuen Prüfmethode lassen sich Kräfte messen, die beim Einschrauben auf das Holz wirken und so die Einflüsse der schraubenspezifischen Merkmale wie u. a. Bohrspitzen qualitativ und quantitativ erfassen. Durch Vergleichsversuche mit Referenzschrauben sind die erforderlichen Mindestholzdicken und Mindestabstände direkt abschätzbar, so dass lediglich bestätigende, konventionelle Einschraubversuche mit diesen Parametern nötig sind. Die Prüfmethode erlaubt es, mit vergleichsweise wenigen Versuchen das Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen einer Schraube auf Grundlage objektiver Messgrößen zu beurteilen.

Mit dem entwickelten Rechenmodell auf Grundlage der Methode der finiten Elemente kann das Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von Schrauben abgeschätzt werden. Das Modell ermöglicht die Berechnung der aus dem Einschraubvorgang resultierenden Rissflächen für unterschiedliche Abstände und Holzdicken. Zur Kalibrierung und Verifizierung des Rechenmodells wurden Einschraubversuche durchgeführt, bei denen die Rissflächen durch Einfärben visualisiert wurden. Es zeigte sich i. d. R. eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen den simulierten und den experimentell ermittelten Rissflächen.

Durch die aufgezeigte, wirklichkeitstgetreue Simulation des Spaltverhaltens von Holz beim Eindrehen von Schrauben kann die Anzahl der benötigten konventionellen Einschraubversuche zur Festlegung von Mindestabständen und Mindestholzdicken deutlich reduziert werden.

5. Literatur

- [1] Bejtka, I.: Querkzug- und Querdrukverstärkungen. Aktuelle Forschungsergebnisse. In: Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage. Forschung für die Praxis, Karlsruhe 2003. Tagungsband, Bruderverlag, Karlsruhe, 2003, S. 7 – 18
- [2] Bejtka, I.: Verstärkungen von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 2, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2005
- [3] Blaß, H.J.; Bejtka, I.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 4, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2006
- [4] Blaß, H.J.; Uibel, T.: Spaltversagen von Holz in Verbindungen – Ein Rechenmodell für die Rissbildung beim Eindrehen von Holzschrauben. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 12, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universitätsverlag Karlsruhe, 2009
- [5] Blaß, H.J.; Uibel, T.: Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. In: Doktorandenkolloquium, Holzbau Forschung und Praxis, Stuttgart 2008. Tagungsband, Hrsg.: U. Kuhlmann, J. Schänzlin, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2008, S. 135 - 142
- [6] Ehlbeck, J.; Görlacher, R.: Mindestabstände bei Stahlblech-Holz-Nagelverbindungen. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH), 1982
- [7] Ehlbeck, J.; Siebert, W.: Ermittlung der Mindestholzabmessungen und Mindestnagelabständen bei Nagelverbindungen mit europäischem Douglasienholz. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe, 1988
- [8] Kevarinmäki, A.: Nails in spruce – splitting sensitivity, end grain joints and withdrawal strength, In: Proceedings. CIB-W18 Meeting 2005, Karlsruhe, Germany, 2005, Paper 38-7-6
- [9] Lau, P.W.C.; Tardiff, Y.: Progress report: Cracks produced by driving nails into wood – effects of wood and nail variables. Forintek Canada Corp., 1987
- [10] Marten, G.: Spalten und Tragfähigkeit von Nagelverbindungen, Fortschritte und Forschung im Bauwesen, Reihe D, Berichte des Beirats für Bauforschung beim Bundesminister für Wohnungsbau, Heft 9, Versuche für den Holzbau, 1953, S. 55-89
- [11] Schmid, M.: Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz. Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2002
- [12] DIN 1052, Ausgabe Dezember 2008. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [13] DIN 7998, Ausgabe Februar 1975. Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben