

# Untersuchung der Ursachen von Lageimperfektionen selbstbohrender Schrauben und Identifikation von Methoden zu deren Minimierung

Eva Baldauf

## Zusammenfassung

Unerwünschte Berührungen und Kollisionen zwischen benachbarten Schrauben sind technische Probleme mit entsprechender Sicherheitsrelevanz. Sie werden durch Lageimperfektionen verursacht, die sowohl systematisch als auch zufällig beim Einschrauben entstehen. Um Ursachen von solchen Lageimperfektionen zu untersuchen, wurden fast 1200 Einschraubversuche in BSH, BSP und FSH durchgeführt. Für variierende Untersuchungsparameter wurde die Abweichung zwischen dem geplanten und dem tatsächlichen Austrittspunkt der Schrauben ermittelt. Die Ergebnisse belegen, dass der Winkel  $\alpha$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes, die Schlankheit sowie die Spitzenausführung einer Schraube und der Einschraubwinkel die Ausprägung von Lageimperfektionen signifikant beeinflussen. Ferner wurden Methoden zur Minimierung von Lageimperfektionen in fast 600 Einschraubversuchen untersucht. Präzise hergestellte Pilotbohrungen erwiesen sich dabei als wirksames Mittel zur Reduzierung von Lageimperfektionen.

**Stichworte** Selbstbohrende Holzschrauben, Lageimperfektionen, Mindestabstände, Führungsbohrungen

## 1 Einleitung

Selbstbohrende Schrauben werden im Ingenieurholzbau vielfältig angewendet. Haupteinsatzgebiete sind das Verbinden und Verstärken von Bauteilen. Als Verbindungsmittel werden sie z. B. bei Haupt-Nebenträger-, biegesteifen Anschlüssen und in der Brettsperrholz-Massivbauweise eingesetzt. In Bauteilen mit Schub-, Querkzug- oder Querdrukbeanspruchung wirken sie als Verstärkungselement.

Selbstbohrende Holzschrauben werden den konstruktionsbedingten Genauigkeitsanforderungen entsprechend mit oder ohne Einschraub- und Setzhilfen eingebracht. Bei korrekter Anwendung stellen diese Hilfen zunächst einen weitgehend planmäßigen Einschraubwinkel  $\beta$  zwischen der Schraubenachse und der Bauteiloberfläche sicher. Diesem vorgegebenen Einschraubwinkel folgend dringt die Schraube selbstbohrend mit jeder weiteren Umdrehung ins Holz ein und bahnt sich ihren Einschraubkanal. Dieser fluchtet zunächst mit dem vorgegebenen Einschraubwinkel. Mit zunehmender Einschraublänge wird es hingegen immer wahrscheinlicher, dass die Schraube vom planmäßigen Schraubkanal abweicht und sich danach Lageimperfectionen einstellen. Insbesondere schlanke lange Schrauben sind aufgrund ihrer Flexibilität davon betroffen.

Die Mindestabstände von selbstbohrenden Schrauben untereinander sowie zu den Bauteilrändern sind in der Regel als Vielfaches des Nenndurchmessers festgelegt, nicht aber auch in Abhängigkeit von der Einschraublänge. Insofern führen die zunehmenden Einschraubängen dazu, dass die damit einhergehenden Lageimperfectionen nicht ausreichend durch festgelegte Schraubenabstände kompensiert werden.

Wenn Lageimperfectionen von Schrauben die Mindestabstände überschreiten, treten Schrauben u. U. unkontrolliert aus dem Bauteil aus [1, 2]. Innerhalb gekreuzter Schraubenanordnungen können Schrauben sich auch gegenseitig berühren, wodurch das Gewinde und der Korrosionsschutz Schaden nehmen [3, 4]. Bei Schraubenkollisionen besteht sogar die Gefahr des Erreichens des Bruchdrehmoments bzw. Abbrechens [5]. Solche Effekte beeinflussen die mechanische Wirksamkeit einer Schraubverbindung

und setzen die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit herab [6].

In [2] wird berichtet, dass in Bretttschichtholz eingebrachte Holzschrauben bis zu etwa 10 % der Einschraublänge von ihrem vorgesehenen Schraubkanal abweichen. Diese prozentuale Abweichung beruht auf nicht weiter spezifizierten Einschraubversuchen mit bis zu 500 mm Einschraublänge. Vorausgehende Untersuchungen zu Lageimperfectionen in [7] ergaben, dass in BSH selbstbohrend eingebrachte Holzschrauben zwischen 8 und 12 % der Einschraublänge abweichen können. Mit den Ergebnissen sind zwei verschiedene Einschraubgeometrien, zwei unterschiedliche Schraubenspitzen und Einschraubängen bis 340 mm für Schrauben mit einem Nenndurchmesser von 8 mm abgedeckt.

Die Ursachen von Lageimperfectionen sind vielfältig. Entscheidend für die räumliche Orientierung und Ausprägung von Lageimperfectionen sind der anatomische Aufbau des Holzes, die Gestalt und Abmessungen von Schrauben, der Winkel  $\alpha$  zwischen Faserrichtung und Schraubenachse sowie der Einschraubwinkel  $\beta$  zwischen Bauteiloberfläche und Schraubenachse. Bislang fehlte jedoch eine systematische Ursachenerforschung, in der auch unterschiedliche Holzwerkstoffe, lange schlanke Schrauben und ungewollte Abweichungen vom planmäßigen Einschraubwinkel  $\beta$  berücksichtigt werden. Anknüpfend an die Ergebnisse aus [7] werden in einem Forschungsprojekt [8, 9, 10, 11] unter Beteiligung der Industrie und des Handwerks die Ursachen von Lageimperfectionen und Schädigungsmechanismen infolge gegenseitiger Berührung oder Kollision untersucht. Auf Grundlage der Ergebnisse werden Modelle zur Beschreibung von Lageimperfectionen entwickelt sowie handwerkliche und technische Lösungen zur Vermeidung von berührungs- und kollisionsbedingten Problemen an Verschraubungen formuliert.

Der Fokus dieses Referats liegt auf den Ursachen von Lageimperfectionen und praktischen Methoden ihrer Minimierung. Grundlage des Referats sind neue Resultate, die die Verfasserin der Fachöffentlichkeit in ähnlicher Form bereits zugänglich gemacht hat [12].

## 2 Ursachen von Lageimperfectionen

### 2.1 Material

Die Einschraubversuche zur Untersuchung der Ursachen von Lageimperfectionen wurden in Brett-schichtholz (BSH), Brettsperrholz (BSP) und Furnierschichtholz (FSH) aus Nadelholz durchgeführt. Die physikalischen Eigenschaften der Prüfkörper sind in **Tab. 1** zusammengestellt.

**Tab. 1:** Mittlere Rohdichte und Holzfeuchte der Prüfkörper.

Werkstoff	N	Rohdichte		Holzfeuchte	
		$\rho_{\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	COV [%]	$u_{\text{mean}}$ [%]	COV [%]
BSH (GL24 und GL30)	135	441	5,92	13,6 <sup>1)</sup>	10,6
BSP (C24)	16	450	2,45	12,4 <sup>1)</sup>	4,95
FSH (LVL S)	2	556	1,09	5,70 <sup>2)</sup>	9,93

<sup>1)</sup> Elektronische Widerstandsmessung mit Gann-Hydromette

<sup>2)</sup> Darmmethode





In den Einschraubversuchen wurden vier Schraubentypen verwendet: Teilgewindeschraube ohne Bohrspitze (Typ A und B), Vollgewindeschraube mit Bohrspitze (Typ C) und Teilgewindeschraube mit Zentrierbohrspitze (Typ D). In die Untersuchung gingen Nenndurchmesser  $d$  der Schrauben von 6, 8 und 10 mm und Einschraublängen  $\ell_{\text{ef}}$  zwischen 60 und 650 mm ein. Die Schlankheit der Schrauben  $\lambda$  (Einschraublänge  $\ell_{\text{ef}}$  durch Nenndurchmesser  $d$ ) lag zwischen 10 und 65. **Tab. 2** gibt eine Übersicht der Schrauben und deren Kenngrößen.

### 2.2 Methode

Zur Ursachenerforschung von Lageimperfectionen wurden etwa 1170 Schrauben eingedreht. Die Einschraubversuche wurden gemäß der in [7] beschriebenen Methodik durchgeführt. Schrauben mit einer Einschraublänge von bis zu 420 mm wurden mithilfe eines handgeführten Akkuschraubers eingedreht. Bei größeren Einschraublängen erfolgte das Ansetzen der Schrauben mit einem Akkuschrauber und das weitere Eindrehen mit einer leistungsfähigen drehzahlreduzierten Bohrmaschine. Alle Schrauben wurden ohne Vor- oder Pilotbohrung in die Prüfkörper

eingbracht. Zu Beginn des Eindrehens gewährleisteten Schraubenführungen die Einhaltung des planmäßigen Einschraubwinkels  $\beta$ .

**Tab. 2:** Gestalt und Kenngrößen der Schraubentypen.

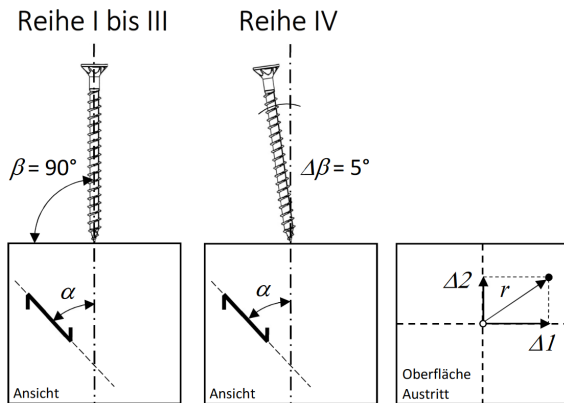
Typ	Gewinde	Schrauben- spitze	$d$ [mm]	$\ell_{\text{ef}}$ [mm]	$\lambda$ [-]
A	Teil-G.		6	60, 160, 240	10, 27, 40
			8	80, 214, 320	10, 27, 40
B	Teil-G.		6	60, 160, 240	10, 27, 40
			8	80, 214, 320, 420	10, 27, 40, 53
			10	400	40
C	Voll-G.		6	160, 240	27, 40
			8	214, 320, 420, 520	27, 40, 53
			10	650	65
D	Teil-G.		6	160	27
			8	214, 320, 420	27, 40, 53

Die Schrauben wurden vollständig durch die Prüfkörper gedreht, sodass deren Spitzen auf der Unterseite des Prüfkörpers austraten. Die Abweichung zwischen dem planmäßigen und dem tatsächlichen Schraubenaustritt wurde mithilfe der Koordinaten  $\Delta 1$  und  $\Delta 2$  auf der Austrittsseite gemessen, s. **Abb. 1**, rechts. Für die absolute Abweichung  $r$  gilt Gleichung (1).

$$r = \sqrt{\Delta 1^2 + \Delta 2^2} \quad (1)$$

Die Einschraubversuche gliederten sich in vier Versuchsreihen, in denen die gezielte Variation einzelner Untersuchungsparameter erfolgte. **Tab. 3** gibt eine Übersicht über die Parameter und deren Untersuchungsbereich. In Reihe I wurden die Schrauben in BSH unter Variation der Schraubengestalt, -abmessungen und des Winkels  $\alpha$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung des Holzes eingedreht. Die Prüfkörper der Reihen II und III bestanden aus BSP bzw. FSH. Innerhalb der ersten drei Reihen betrug der Einschraubwinkel  $\beta$  stets 90°, s. **Abb. 1**, links. Reihe IV diente zur Untersuchung des Einflusses ungewollter

Abweichungen  $\Delta\beta$  vom Einschraubwinkel auf Lageimperfektionen. Die Schrauben wurden dazu gezielt mit  $\Delta\beta = 5^\circ$  eingedreht, s. **Abb. 1**, mittig. Der Winkel  $\alpha$  betrug in dieser Reihe daher  $85^\circ$  und  $40^\circ$ .



**Abb. 1:** Versuchsaufbau der Reihen I bis III (links), Reihe IV (mittig) und absolute Abweichung  $r$  auf der Oberfläche des Schraubenaustritts (rechts).

**Tab. 3:** Untersuchungsparameter der Reihen I bis IV.

Reihe	Werkstoff	Schrauben-typ	$d$ [mm]	$\lambda$ [-]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]
I	BSH	A, B, C, D	6, 8, 10	10, 27, 40, 53, 65	90, 60, 45, 30	90
II	BSP	A, B	6, 8	40	90, 45	90
III	FSH	A, B	6, 8	40	90, 45	90
IV	BSH	A, B	6, 8	10, 40	85, 40	85

## 2.3 Ergebnisse

### Reihe I: BSH

Zunächst wird der Einfluss des Winkels  $\alpha$ , der Einschraublänge  $\ell_{ef}$  und des Nenndurchmessers  $d$  auf Lageimperfektionen anhand der in BSH eingedrehten Vollgewindeschrauben (Typ C) dargestellt. Hinsichtlich der Schraubengestalt werden die Typen A, B, C und D ausgewertet.

#### Winkel $\alpha$

**Abb. 2** zeigt die Abweichungen  $\Delta 1$  und  $\Delta 2$  der in BSH eingedrehten Vollgewindeschrauben für die vier un-

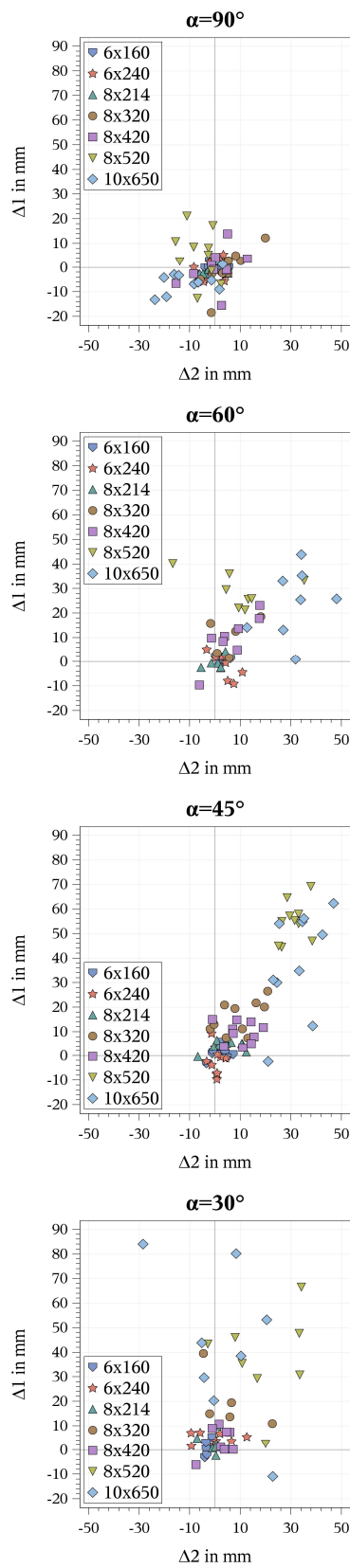
tersuchten Winkel  $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  und  $30^\circ$ . Die Austrittspunkte sind nach dem Nenndurchmesser  $d$  und der Einschraublänge  $\ell_{ef}$  differenziert. Bei  $\alpha = 90^\circ$  verteilen sich die Austrittspunkte der Schrauben annähernd symmetrisch um den Koordinatenursprung (= planmäßiger Austrittspunkt). Die Verteilung der Austrittspunkte zeigt dabei eine etwas größere Streuung in  $\Delta 2$ - als in  $\Delta 1$ -Richtung auf. Die Austrittspunkte bei  $\alpha = 60^\circ, 45^\circ$  und  $30^\circ$  verlagern sich in die positive  $\Delta 1$ - und  $\Delta 2$ -Richtung und streuen dabei stärker in  $\Delta 1$ - als in  $\Delta 2$ -Richtung. Bei Winkeln  $\alpha$  kleiner  $90^\circ$  weichen die Schrauben folglich stärker vom planmäßigen Austrittspunkt ab und nähern sich dem Faserverlauf während des Eindrehens an. Besonders deutlich ist dies bei den langen Schrauben (8 x 520 und 10 x 650) ausgeprägt.

#### Einschraublänge $\ell_{ef}$

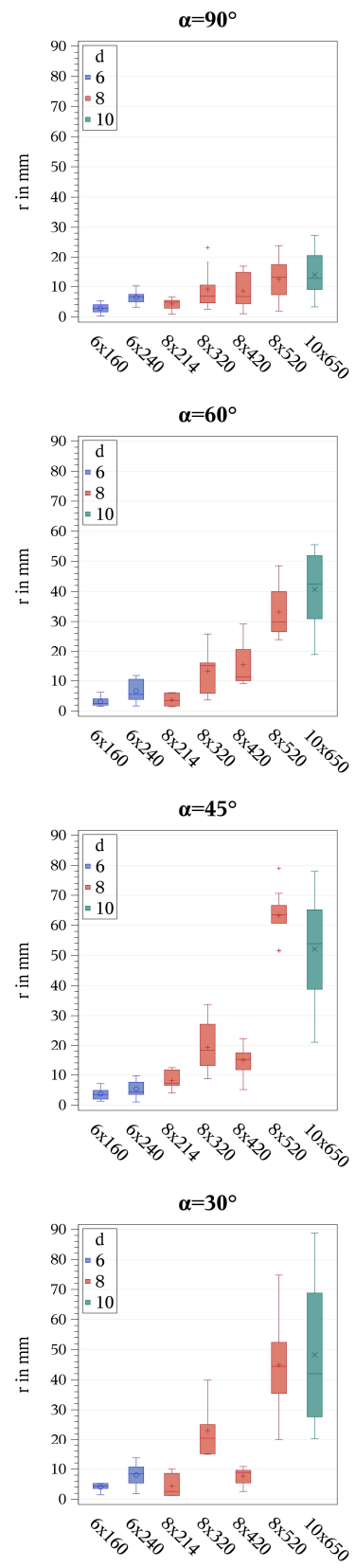
In **Abb. 3** ist die Abweichung  $r$  der untersuchten Vollgewindeschrauben für die Winkel  $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  und  $30^\circ$  dargestellt. Die Box-Plots sind gruppiert nach dem Nenndurchmesser  $d$ . Die Median- und Maximalwerte von  $r$  steigen bei  $d = 6$  und  $8$  mm mit zunehmender Einschraublänge an. Bei  $d = 8$  mm und  $\alpha = 60^\circ, 45^\circ$  und  $30^\circ$  ist der Anstieg der Maximalwerte progressiv. Eine Ausnahme stellen die vergleichsweise geringen Abweichungen der Schraube 8 x 420 bei  $\alpha = 45^\circ$  und  $30^\circ$  dar. Die Ursache hierfür ist noch zu klären. In **Tab. 4** sind die Median- und Maximalwerte der Abweichungen  $r$  sowie das Verhältnis aus  $r$  und der Einschraublänge  $\ell_{ef}$  für die untersuchten Schrauben und Einschraubkonfigurationen zusammengestellt. Bei den Vollgewindeschrauben treten die größten Abweichungen bei  $\alpha = 45^\circ$  und  $\lambda = 65$  auf. Sie betragen bis zu 15 % der Einschraublänge.

#### Nenndurchmesser $d$

Um den Einfluss des Nenndurchmessers auf Lageimperfektionen von Schrauben mit gleichem Schlankheitsverhältnis  $\lambda$  zu untersuchen, wurden Vollgewindeschrauben mit  $\lambda = 27, 40$  und  $65$  betrachtet. ANOVA-Tests zeigen, dass der Nenndurchmesser  $d$  bei den folgenden Einschraubkonfigurationen einen signifikanten Einfluss auf die Abweichung der untersuchten Schrauben hat:  $\alpha = 45^\circ$  und  $\lambda = 27, 40$  sowie  $\alpha = 30^\circ$  und  $\lambda = 40$ . In diesen Fällen sind die Abweichungen der Schrauben mit  $d = 8$  signifikant größer als bei  $d = 6$ . Die restlichen Einschraubkonfigurationen zei-



**Abb. 2:** Abweichung  $\Delta 1$  über  $\Delta 2$  der Vollgewindeschrauben der Reihe I für  $\alpha = 90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $30^\circ$  differenziert nach dem Nenndurchmesser  $d$  und der Einschraublänge  $\ell_{\text{ef}}$ .



**Abb. 3:** Abweichung  $r$  der Vollgewindeschrauben der Reihe I für  $\alpha = 90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $30^\circ$  gruppiert nach dem Nenndurchmesser  $d$ .

gen keinen signifikanten Unterschied in den Abweichungen zwischen den Durchmessern auf. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Abweichungen von Schrauben mit unterschiedlichem Nenndurchmesser über die Schraubenschlankheit insbesondere bei  $\alpha \leq 45^\circ$  nur unzureichend abbildet werden können.

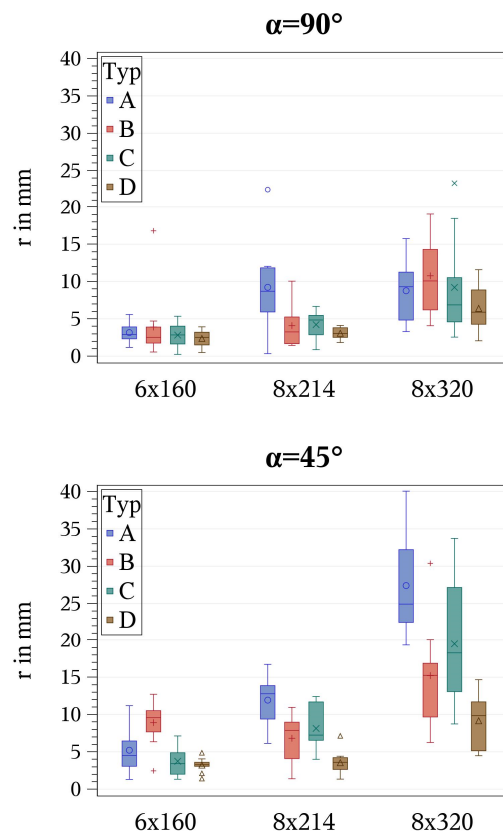
**Tab. 4:** Abweichungen  $r$  und Verhältnisse  $r / \ell_{ef}$  der Vollgewindeschrauben der Reihe I für  $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  und  $30^\circ$ .

$d$ [mm]	$\alpha$ [°]	$\lambda$ [-]	$\ell_{ef}$ [mm]	$N$ [-]	$r_{median}$ [mm]	$s^*$ [mm]	$r_{max}$ [mm]	$r_{median} / \ell_{ef}$ [%]	$r_{max} / \ell_{ef}$ [%]
6	90	27	160	10	2,84	1,53	5,34	1,78	3,34
		40	240	10	6,65	2,12	10,2	2,77	4,26
	60	27	160	6	2,46	1,78	6,22	1,54	3,89
		40	240	8	5,48	3,83	11,7	2,29	4,89
	45	27	160	10	3,42	2,00	7,13	2,14	4,45
		40	240	10	4,29	2,97	9,75	1,79	4,06
	30	27	160	6	4,28	1,43	5,27	2,67	3,30
		40	240	8	8,35	3,94	13,7	3,48	5,70
	90	27	214	10	4,84	1,75	6,66	2,26	3,11
		40	320	10	6,87	6,71	23,3	2,15	7,28
		53	420	10	6,74	6,06	16,8	1,61	4,00
		65	520	10	13,1	6,66	23,8	2,52	4,59
8	60	27	214	6	3,37	2,03	6,10	1,58	2,85
		40	320	5	15,0	8,89	25,9	4,67	8,08
		53	420	8	11,3	7,69	29,2	2,70	6,94
		65	520	8	29,8	8,92	48,5	5,73	9,33
	45	27	214	10	7,24	2,96	12,4	3,38	5,80
		40	320	10	18,3	8,16	33,7	5,71	10,5
		53	420	10	15,2	4,86	22,4	3,61	5,33
		65	520	10	63,5	8,14	79,0	12,2	15,2
	30	27	214	6	2,60	3,89	10,0	1,22	4,67
		40	320	5	20,5	10,3	39,8	6,42	12,4
		53	420	8	8,88	2,99	10,8	2,11	2,58
		65	520	8	44,4	16,4	74,8	8,55	14,4
10	90	65	650	10	12,7	7,79	27,2	1,96	4,18
	60	65	650	8	42,4	12,8	55,5	6,53	8,54
	45	65	650	10	53,9	17,4	78,0	8,30	12,0
	30	65	650	8	42,0	25,3	88,8	6,46	13,7

\* Standardabweichung

### Schraubentyp und Spitzenausführung

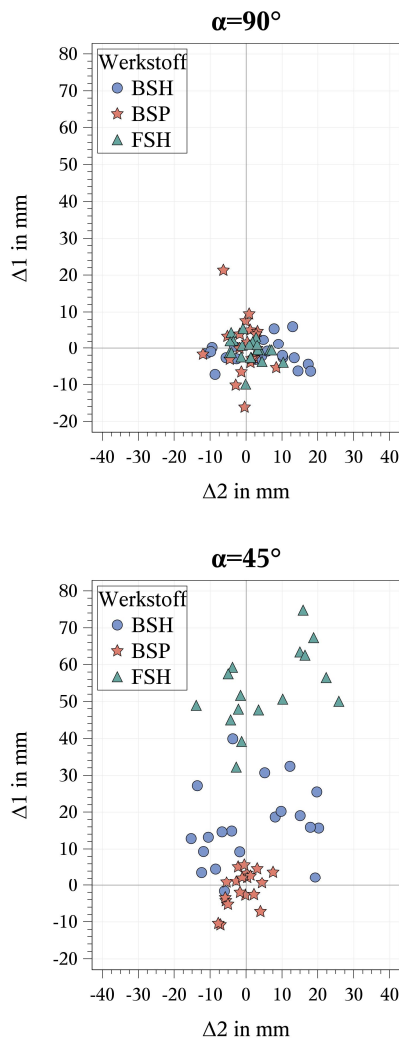
Der Einfluss des Schraubentyps und der Spitzenausführung auf Lageimperfectionen wurde mit den Schraubentypen A, B, C und D der Abmessungen ( $d \times \ell_{ef}$ ) 6 x 160, 8 x 214, 8 x 320 für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  in BSH untersucht. **Abb. 4** zeigt die Abweichung  $r$  der verwendeten Schrauben differenziert nach dem Schraubentyp für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$ . ANOVA-Tests ergeben, dass bei  $\alpha = 90^\circ$  in den Abweichungen der vier Schraubentypen nur bei 8 x 214 ein signifikanter Unterschied vorliegt. In diesem Fall sind der Median, der Maximalwert und die Streuung von  $r$  bei der Teilgewindeschraube mit Zentrierbohrspitze (Typ D) am geringsten. Bei  $\alpha = 45^\circ$  sind die Unterschiede zwischen den Abweichungen der vier Schraubentypen bei allen drei Schraubenabmessungen signifikant. Die Zentrierbohrspitze des Typs D steht auch hier im Zusammenhang mit den geringsten Abweichungen.



**Abb. 4:** Abweichung  $r$  der untersuchten Schraubenabmessungen für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  differenziert nach dem Schraubentyp.

## Reihe II und III: Holzwerkstoffe

Zur Untersuchung des Einflusses von Holzwerkstoffen auf Lageimperfektionen wurden Schrauben der Abmessungen ( $d \times \ell_{\text{ef}}$ ) 6 x 240 und 8 x 320 des Schraubentyps A und B in BSH, BSP und FSH eingedreht. In **Abb. 5** sind die Abweichungen  $\Delta 1$  und  $\Delta 2$  der Schrauben 8 x 320 für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  differenziert nach dem Werkstoff ohne weitere Unterscheidung nach Typ dargestellt. Bei  $\alpha = 90^\circ$  treten die Schrauben im BSH, BSP und FSH annähernd symmetrisch um den planmäßigen Austrittspunkt aus. Im BSH betragen die maximalen Abweichungen 6 % und im BSP 7 % der Einschraublänge. Im FSH fallen die maximalen Abweichungen mit 3 % etwas geringer aus.



**Abb. 5:** Abweichung  $\Delta 1$  über  $\Delta 2$  der Schrauben 8 x 320 für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  mit Unterscheidung nach Werkstoff.

Bei  $\alpha = 45^\circ$  zeigt sich im BSH und im FSH eine deutliche Verschiebung der Austrittspunkte in die positive  $\Delta 1$ -Richtung. Infolge der starken Annäherung der Schrauben während des Eindrehens an den Faserverlauf, vgl. **Abb. 6**, stellen sich im BSH bei den Schrauben 8 x 320 maximale Abweichungen von 13 % und im FSH von 24 % der Einschraublänge ein. Die Abweichungen im BSP fallen mit 4 % der Einschraublänge vergleichsweise gering aus. Die Ergebnisse der Schrauben 6 x 240 sind zahlenmäßig ähnlich.

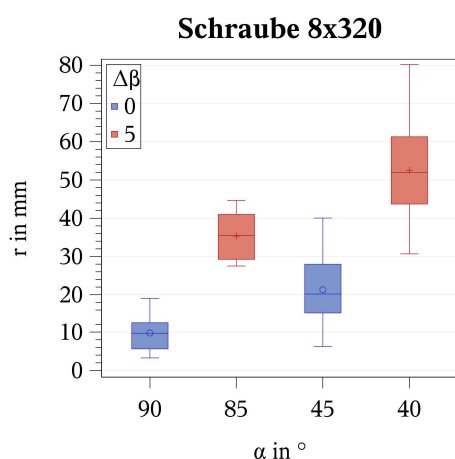


**Abb. 6:** Verlauf der Schraube 8 x 320 im FSH bei  $\alpha = 45^\circ$ .

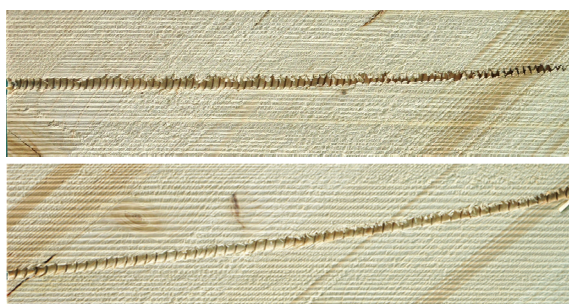
## Reihe IV: Ungewollte Abweichung $\Delta\beta$

In Reihe I bis III betrug der Einschraubwinkel  $\beta$  zwischen Schraubenachse und Prüfkörperoberfläche stets  $90^\circ$ . Um den Einfluss ungewollter Abweichungen  $\Delta\beta$  vom Einschraubwinkel auf Lageimperfektionen zu untersuchen, wurden in Reihe IV Schrauben mit  $\beta = 85^\circ$  in BSH eingedreht, s. **Abb. 1**, mittig. Die Abweichung  $\Delta\beta = 5^\circ$  wurde dabei so angesetzt, dass sich der Winkel  $\alpha$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung verringert. Bei  $\beta = 85^\circ$  betrugen die untersuchten Winkel  $\alpha$  daher  $85^\circ$  und  $40^\circ$ , statt  $90^\circ$  bzw.  $45^\circ$ .

In **Abb. 7** sind die Abweichungen  $r$  der Schrauben 8 x 320 der Reihe I und IV für die untersuchten Winkel  $\alpha$  aufgetragen. Die Box-Plots sind differenziert nach der Abweichung  $\Delta\beta$ . Die Abweichungen  $r$  der mit  $\Delta\beta = 5^\circ$  eingedrehten Schrauben sind größer als diejenigen bei  $\Delta\beta = 0^\circ$ . Bei  $\alpha = 85^\circ$  setzt sich  $\Delta\beta$  zunächst linear im Holz fort. Das führt erwartungsgemäß zu einer größeren Endabweichung  $r$ . Da sich bei  $\alpha = 45^\circ$  und  $40^\circ$  die Schrauben während des Eindrehens grundsätzlich der Faserrichtung annähern, hat eine anfängliche Abweichung  $\Delta\beta$  bei  $\alpha = 40^\circ$  eine frühere Annäherung an die Faserrichtung zur Folge. Es stellen sich in diesem Fall Abweichungen bis zu 25 % der Einschraublänge ein. **Abb. 8** zeigt den Einfluss der Abweichung  $\Delta\beta$  auf den Verlauf der Schraube im Holz für  $\Delta\beta = 5^\circ$  und  $\alpha = 40^\circ$  (unten) im Vergleich zu  $\Delta\beta = 0^\circ$  und  $\alpha = 45^\circ$  (oben).



**Abb. 7:** Abweichung  $r$  der Schrauben 8 x 320 für die untersuchten Winkel  $\alpha$  differenziert nach der Abweichung  $\Delta\beta$  vom Einschraubwinkel.



**Abb. 8:** Verlauf der Schraube bei  $\Delta\beta = 0^\circ$  und  $\alpha = 45^\circ$  (oben) sowie  $\Delta\beta = 5^\circ$  und  $\alpha = 40^\circ$  (unten).

### 3 Methoden zur Minimierung von Lageimperfektionen

Die Abweichung zwischen tatsächlichem und planmäßigem Einschraubwinkel ist von Anfang an entscheidend für die spätere räumliche Orientierung und Ausprägung einer Lageimperfektion, s. Abschnitt 2.3, Reihe IV. Bei Einschraubwinkeln  $\beta = 90^\circ$  lassen sich Schrauben aufgrund der rechtwinkligen Ausrichtung zur Bauteiloberfläche auch ohne Schraubenführung mit geschultem Blick präzise ausrichten. Das Einbringen von Schrauben mit Winkeln  $\beta < 90^\circ$  gestaltet sich hingegen schwieriger. Daher sind für solche Fälle Setz- und Einschraubhilfen auf dem Markt verfügbar. Setzhilfen basieren auf dem Prinzip einfacher Winkelschablonen. Bei Einschraubhilfen wird der Schraube eine richtungsgebundene Führung vorgegeben und das Abrutschen der Schraubenspitze

auf der Holzoberfläche durch Positionierung des Eintrittslochs reduziert. Eine weitere Möglichkeit zur Eingrenzung von Lageimperfektionen stellen Führungsbohrungen dar. Diese gewährleisten bei exakter Ausführung und geeigneter Tiefe gleich zu Beginn einen planmäßigen Einschraubwinkel. Hierbei wird zwischen Pilotbohrungen, die nur für einen kleinen anfänglichen Teil der Einschraublänge eine Führung vorgeben, und solchen, die für die gesamte Einschraublänge erfolgen, unterschieden. Für das Forschungsprojekt wurden auf dem Markt verfügbare Setz- und Einschraubhilfen sowie Pilot- und Vorbohrungen erprobt und deren Wirkung auf Lageimperfektionen untersucht.

#### 3.1 Material und Methode

Zur Untersuchung von Methoden zur Minimierung von Lageimperfektionen wurden fast 600 Schrauben in zwei Versuchsreihen in BSH eingedreht. **Tab. 5** gibt eine Übersicht der Untersuchungsparameter. Die physikalischen Eigenschaften der Prüfkörper sind in **Tab. 1** angegeben.

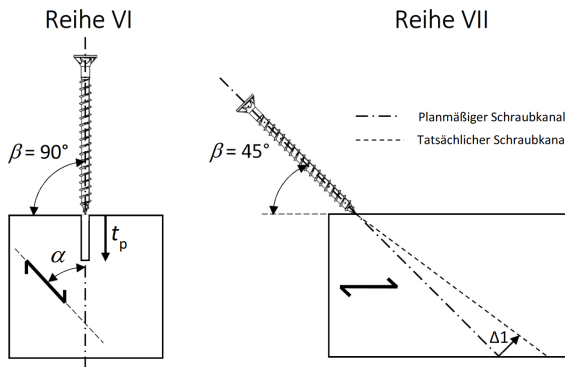
**Tab. 5:** Untersuchungsparameter der Versuchsreihen VI und VII.

Reihe	Werkstoff	Schraubentyp	$d$ [mm]	$\lambda$ [-]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	Methode zur Minimierung
VI*	BSH	A, C	6, 8	27, 40, 65	90, 60, 45, 30	90	Pilotbohrung: $t_p=0,1 \cdot \ell_{ef}$ Vorbohrung: $t_p=\ell_{ef}$
VII*	BSH	A, C	8	40, 65	45	45	Einschraub- & Setzhilfen

\* Reihe V umfasst die Untersuchung des Einflusses von Holzmerkmalen auf Lageimperfektionen. Die Ergebnisse werden in diesem Beitrag nicht vorgestellt.

#### Reihe VI: Führungsbohrung

Reihe VI beinhaltet die Untersuchung von Führungsbohrungen unterschiedlicher Tiefen und deren Auswirkung auf Lageimperfektionen. **Abb. 9** (links) zeigt den Versuchsaufbau. Der Einschraubwinkel  $\beta$  betrug konstant  $90^\circ$ . Es wurden Pilotbohrungen mit einer Tiefe von 10 % und vollständige Vorbohrungen mit bis zu 100 % der Einschraublänge untersucht.



**Abb. 9:** Versuchsaufbau der Reihe VI (links) und der Reihe VII (rechts).

**Tab. 6** zeigt die verwendeten Bohrer zur Herstellung der Führungsbohrungen. Der Durchmesser der Bohrer betrug gemäß [13] 4 mm bei Schrauben mit  $d = 6$  mm und 5 mm bei  $d = 8$  mm. Die Pilotbohrung bis 10 % der Einschraublänge wurden mit Holzspiralbohrern ausgeführt. Die Verwendung von Führungsvorrichtungen gewährleisteten dabei einen Winkel von  $90^\circ$  zwischen Bohrer und Prüfkörperoberfläche. Die Herstellung einer Vorbohrung mit bis zu 100 % erfolgte in mehreren Schritten: Zunächst wurde mit einem Holzspiral- und anschließend mit einem Schlangenbohrer bzw. mit einem Druckluftbohrsystem gearbeitet. Bei einer Einschraublänge von 320 mm betrug die Tiefe der Vorbohrung 300 mm. Bei Prüfkörper mit einer Höhe von 520 mm wurde ab 60 mm bis 300 mm mit einem Schlangen- und danach bis 420 mm mit einem druckluftumspülten Bohrer weitergebohrt. Eine Vorbohrung der gesamten Einschraublänge war in diesem Fall aufgrund der begrenzten Länge der Bohrer nicht möglich.

Alle Bohrungen wurden mit einem handgeführten Akku-Schrauber erstellt. Das Eindrehen der Schrauben erfolgte in die vorgebohrten Kanäle ohne Schraubenführung mit einer drehzahlreduzierten Bohrmaschine. Die Schrauben wurden vollständig durch die Prüfkörper gedreht. Die Abweichung zwischen planmäßigem und tatsächlichen Austrittspunkt wurde auf der Oberfläche des Austrittspunkts gemessen und die absolute Abweichung  $r$  nach Gleichung (1) bestimmt.

**Tab. 6:** Abmessungen der Bohrer und Bohrtiefen.

$d$ [mm]	Bohrung	Bohrer ( $d_{\text{Bohr}} \times \ell_{\text{Bohr}}$ ) [mm x mm]	Max. Bohrtiefe [mm]
6	Pilotbohrung	HB <sup>1)</sup> 4x75	$0,1 \cdot \ell_{\text{ef}}$
	Vorbohrung	HB 4x75 HSS <sup>2)</sup> 4x280	50 $\ell_{\text{ef}}$
8	Pilotbohrung	HB 5x85	$0,1 \cdot \ell_{\text{ef}}$
	Vorbohrung	HB 5x85	60
		HSS 5x315 DLBS <sup>3)</sup> 5x500	300 420

<sup>1)</sup> Holzspiralbohrer

<sup>2)</sup> High-Speed-Steel-Schlangenbohrer

<sup>3)</sup> Druckluftbohrsystem

### Reihe VII: Setz- und Einschraubhilfen

In Reihe VII wurden Setz- und Einschraubhilfen zur Einhaltung eines planmäßigen Einschraubwinkels angewendet und deren tatsächliche Wirkung auf Lageimperfectionen untersucht. Der Einschraubwinkel  $\beta$  betrug konstant  $45^\circ$ . Der Versuchsaufbau und die Abweichung zwischen planmäßigem und tatsächlichem Schraubkanal sind in **Abb. 9** (rechts) verdeutlicht. **Abb. 10** zeigt die Fabrikate der Setz- und Einschraubhilfen.



**Abb. 10:** Setzhilfe Kunststoff (oben), Setzhilfe Stahl (mittig) und Einschraubhilfe (unten) [Bildquellen: heco-schrauben.de, rothoblaas.de, wuerth.de]

### 3.2 Ergebnisse

#### Reihe VI: Führungsbohrung

##### Schraubentyp

ANOVA-Tests zeigen, dass zwischen den Abweichungen der Schraubentypen A und C in Reihe VI nur bei den folgenden Einschraubkonfigurationen ein signifikanter Unterschied vorliegt: Pilotbohrung bei 6 x 160 und  $\alpha = 90^\circ$  sowie 8 x 214 und  $\alpha = 45^\circ$ . Die beiden Schraubentypen werden aufgrund der allgemein vergleichbaren Verhältnisse nachfolgend gemeinsam betrachtet.

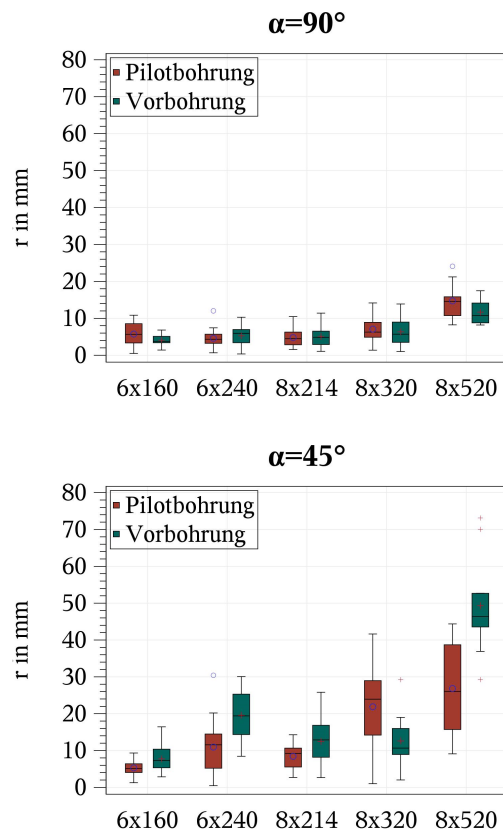
##### Abweichung

**Abb. 11** zeigt die Abweichung  $r$  der untersuchten Schraubenabmessung ( $d \times \ell_{ef}$ ) für die Winkel  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$ . Die Box-Plots sind nach der Art der Führungsbohrung differenziert. Bei  $\alpha = 90^\circ$  ist der Unterschied zwischen den Abweichungen der Schrauben mit Pilot- und Vorbohrung nicht signifikant. Bei  $\alpha = 45^\circ$  weichen die vorgebohrten Schrauben jedoch stärker ab als die Schrauben mit Pilotbohrung. Eine Ausnahme sind die Abweichungen der Schraube 8 x 320 bei  $\alpha = 45^\circ$ . Bei der Vorbohrung sind in diesem Fall Median und Maximalwert im Vergleich zur Pilotbohrung geringer. Die Ergebnisse der Winkel  $\alpha = 60^\circ$  und  $30^\circ$  sind zahlenmäßig ähnlich. Die größten Abweichungen werden bei den Schrauben 6 x 240 mit Vorbohrung und  $\alpha = 60^\circ$  beobachtet. Sie betragen bis zu 17 % der Einschraublänge.

#### Reihe VII: Setz- und Einschraubhilfen

##### Abweichung

Innerhalb der Reihe VII gab es zwischen den Abweichungen  $r$ , die auf die verwendeten Setz- und Einschraubhilfen zurückzuführen waren, keine signifikanten Unterschiede. Bei 8 x 520 traten infolge einer unerwartet starken Annäherung an den Faserverlauf während des Eindrehens nicht alle eingebrachten Schrauben auf der Unterseite des Prüfkörpers aus. Die Abweichungen der nicht ausgetretenen Schrauben sind in den Ergebnissen nicht berücksichtigt. Die maximal gemessenen Abweichungen bei den Setz- und Einschraubhilfen betrugen bis zu 22 % der Einschraublänge.



**Abb. 11:** Abweichung  $r$  der untersuchten Schrauben für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  differenziert nach der Art der Führungsbohrung.

##### Anwendung

Während des Eindrehens wurde auf die Handhabbarkeit der Setz- und Einschraubhilfen geachtet und Beobachtungen wurden festgehalten. Zur Vermeidung eines Abrutschens der Schraubenspitze auf der Prüfkörperoberfläche ist bei der Benutzung von Setzhilfen ein anfängliches Eindrehen der Schraube bis zum Greifen im Holz unter  $90^\circ$  zur Oberfläche erforderlich. Ein anschließendes Neigen und Einlegen der Schraube in die Führungsnut der Setzhilfe ermöglicht danach ein Einbringen unter  $45^\circ$ . Das Fixieren der Setzhilfe auf dem Holz und das gleichzeitige Eindrehen der Schraube können von einer Person durchgeführt werden. Die aufgeraute Oberfläche auf der Unterseite der Kunststoff-Setzhilfe ermöglicht während des Eindrehens einen rutschsicheren Halt der Hilfe auf der Holzoberfläche. Die Führungsnut der Kunststoff-Setzhilfe wies nach Versuchsdurchführung leichte Abnutzungsspuren auf. Die Stahl-Setzhilfe verrutschte während des Eindrehens aufgrund der glatten Oberfläche, wodurch das Fixieren der

Hilfe und der Schraube erschwert wird. Eine Materialabnutzung trat nicht ein.

Die Anwendung der Einschraubhilfe ist technisch und zeitlich aufwendiger als diejenige von Setzhilfen. Das Abrutschen der Schraubenspitze auf der Holzoberfläche wird durch die Positionierung des Eintrittsloches mithilfe einer Führungshülse reduziert. Die Führungshülse ist auf den Nenndurchmesser und den Schraubentyp abgestimmt, wodurch nur eine begrenzte Auswahl an Schrauben verwendet werden können.

## 4 Diskussion

Um die Methodik und die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zu bewerten, werden im Folgenden die Reihen I, IV, VI und VII miteinander verglichen und der Einfluss einzelner Untersuchungsparameter auf Lageimperfectionen ergründet.

- Reihe I und IV: Einfluss Einschraubwinkel

In Reihe I wurden zu Beginn des Eindrehens Schraubenführungen verwendet, um ungewollte Abweichungen vom Einschraubwinkel weitestgehend auszuschließen. Die Versuchsergebnisse enthalten keine Abweichungen von Schrauben, die nach reinem Augenmaß eingedreht wurden. In Reihe IV wurde der Einfluss einer festgelegten Abweichung  $\Delta\beta = 5^\circ$  vom planmäßigen Einschraubwinkel auf Lageimperfectionen untersucht. Die Abweichung  $\Delta\beta$  wurde durch gezielt manipulierte Schraubenführungen vorgegeben. Die Ergebnisse belegen, dass anfängliche Abweichungen vom Einschraubwinkel Lageimperfectionen verstärken.

- Reihe VI: Einfluss Pilot- oder Vorbohrung

Zur Herstellung der Führungsbohrungen kamen in Reihe VI unterschiedliche Bohrer zum Einsatz, s. **Tab. 6**. Pilotbohrungen wurden ausschließlich mit Holzspiralbohrern angefertigt. Das Herstellen der Vorbohrung erfolgte aufgrund begrenzter Bohrerlängen zunächst mit dem Holzspiralbohrer, dann mit dem Schlangenbohrer und bei Prüfkörperhöhen von 520 mm zusätzlich mit einem druckluftumspülten Bohr-

system. Im Vergleich zu den Schlangenbohrern zeichnen sich Holzspiralbohrer durch kürzere Längen und eine zentrierende Bohrspitze aus. Holzspiralbohrer eignen sich daher für die Herstellung präziser Pilotbohrungen. Der längere und schlankere Schlangenbohrer wich beim Vorbohren mit  $\alpha < 90^\circ$  stark rechtwinklig zur Faser ab, vgl. **Abb. 12**. Die Schrauben, die dem vorgebohrten Kanal folgten, zeigten daher deutliche Abweichungen in die  $\Delta 2$ -Richtung auf. Die Ergebnisse belegen, dass die vorgebohrten Schrauben größere Abweichungen als die Schrauben mit Pilotbohrung aufweisen. Mit Schlangenbohrern hergestellte Vorbohrungen sind somit nicht geeignet, um Lageimperfectionen von Schrauben zu minimieren.

Aufgrund des schrittweisen Vorbohrens der Einschraublänge von 520 mm konnte die Präzision des Druckluftbohrsystems nicht vollständig genutzt werden. Die mit dem Schlangenbohrer vorgebohrten Kanäle zeigten bereits starke Abweichungen rechtwinklig zur Faser auf, denen der Bohrer mit Druckluftspülung folgte. Es ist zu empfehlen, auf das Vorbohren mit dem Schlangenbohrer zu verzichten und nach der anfänglichen Führungsbohrung des Holzspiralbohrers direkt das Druckluftbohrsystem anzuwenden.



**Abb. 12:** Abweichen der vorgebohrten Schrauben 6 x 240 rechtwinklig zur Faser bei  $\alpha = 30^\circ$ .

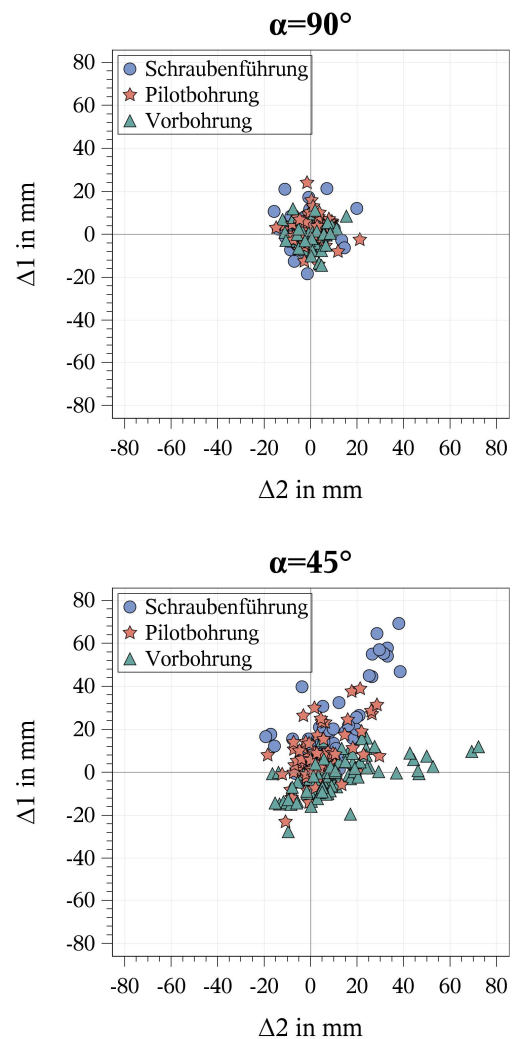
- Reihe I und VI: Vergleich selbstbohrende Schraube und Bohrer

Zum Vergleich der Einschraubmethoden der Reihen I und VI werden Schrauben mit einer Schlankheit  $\lambda$  von 27, 40 und 65 der Schraubentypen A und C betrachtet. **Abb. 13** zeigt die Austrittspunkte dieser Schrauben für die Winkel  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  differenziert nach der Einschraubmethodik. Die Schrauben der Reihe I wurden mithilfe von Schraubenführungen eingebracht, während in Reihe VI Führungsbohrungen den planmäßigen Einschraubwinkel vorgeben.

Bei  $\alpha = 90^\circ$  liegen die Austrittspunkte der Schrauben, die nach den drei Einschraubmethoden eingebracht wurden, annähernd symmetrisch um den planmäßigen Austrittspunkt. Bei  $\alpha = 45^\circ$  nähern sich die mit Schraubenführung eingebrachten Schrauben beim Eindrehen während des Gewindefurchens der Faserichtung an. Im Gegensatz dazu weichen die vorgebohrten Schrauben verstärkt rechtwinklig zur Faser ab. Die Austrittspunkte der Schrauben mit Pilotbohrung liegen zwischen den Austrittspunkten der Schrauben mit Schraubenführung und der vorgebohrten Schrauben. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Schlangenbohrer im Vergleich zu den selbstbohrenden Schrauben in eine andere Richtung abweichen. Die Ursache hierfür liegt in einem qualitativen Unterschied zwischen dem Kräftespiel, das während des Eindrehens am Gewinde und des Vorbohrns an der Bohrspitze stattfindet.

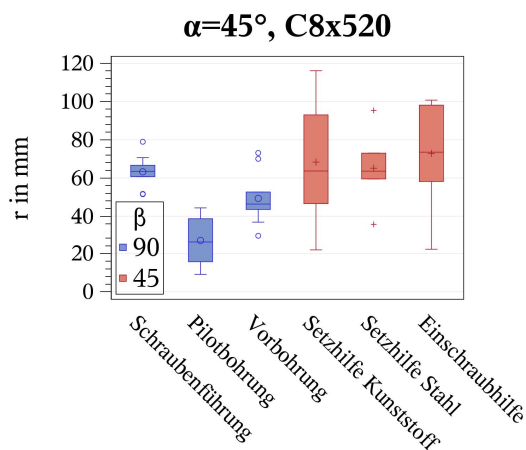
- Reihe I, VI und VII: Einfluss der Einschraubmethoden

Zur Darstellung des Einflusses der untersuchten Einschraubmethoden auf Lageimperfectionen sind in **Abb. 14** die Ergebnisse der Reihe I, VI und VII für  $\alpha = 45^\circ$  zusammengetragen. Die Box-Plots sind gruppiert nach dem Einschraubwinkel  $\beta$ . Die Schrauben vom Typ C 8 x 520 wurden in diesen Reihen verwendet und dienen als Referenz. Die Schrauben mit Pilotbohrung weichen am geringsten ab. Die Mediane und die Streuung von  $r$  sind bei den mit Setz- und Einschraubhilfen eingebrachten Schrauben am größten. Ein Grund hierfür ist u. a. der Einschraubwinkel  $\beta = 45^\circ$ . Trotz Hilfen und vertikalem Ansetzen der



**Abb. 13:** Abweichung  $\Delta 1$  über  $\Delta 2$  der Schrauben der Reihen I und VI für  $\alpha = 90^\circ$  und  $45^\circ$  differenziert nach der Einschraubmethode.

Schraube zu Beginn kann ein anfängliches Abrutschen der Spitze nicht vollständig ausgeschlossen werden. Setz-, Einschraubhilfen und Schraubenführungen gewährleisten zwar die Einhaltung eines planmäßigen Einschraubwinkels, einem späteren Annähern an die Faser bei Winkeln  $\alpha < 90^\circ$  wirken sie jedoch nicht entgegen. Präzise hergestellte Pilotbohrungen stellen den planmäßigen Einschraubwinkel im Holz wirksam sicher. Dem Bohrkanal folgend tritt eine Annäherung an den Faserverlauf erst mit fortgeschrittener Einschraublänge ein, wodurch die Lageimperfectionen insgesamt reduziert werden können.



**Abb. 14:** Abweichung  $r$  der Schrauben C 8 x 520 für  $\alpha = 45^\circ$  über den unterschiedlichen Einschraubmethoden gruppiert nach dem Einschraubwinkel  $\beta$ .

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erforschung der Ursachen von Lageimperfectionen wurden fast 1200 Schrauben in BSH, BSP und FSH eingedreht. Folgende Untersuchungsparameter wurden dabei gezielt variiert und deren Einfluss auf Lageimperfectionen bestimmt: Winkel  $\alpha = 90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$  und  $30^\circ$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung, vier unterschiedliche Schraubentypen, Einschraublängen zwischen 60 und 650 mm, Nenndurchmesser 6, 8 und 10 mm und Einschraubwinkel  $\beta = 90^\circ$  und  $85^\circ$ .

Die Ergebnisse belegen, dass der Winkel  $\alpha$  zwischen Schraubenachse und Faserrichtung die Ausprägung von Lageimperfectionen signifikant beeinflusst. Insbesondere in BSH und FSH bedingt ein Winkel  $\alpha$  kleiner  $90^\circ$  während des Eindrehens eine Annäherung der Schraube an den Faserverlauf. Die größten Abweichungen traten in FSH bei  $\alpha = 45^\circ$  ein und betragen bis zu 25 % der jeweiligen Einschraublänge. Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass bei  $\alpha < 90^\circ$  Abweichungen mit zunehmender Einschraublänge progressiv anwachsen. Schrauben mit Zentrierbohrspitzen weisen die geringsten Abweichungen auf. Anfängliche Abweichungen vom planmäßigen Einschraubwinkel von nur  $5^\circ$  verstärken die Ausprägung von Lageimperfectionen deutlich und führten zu Gesamtabweichungen von bis zu 25 % der Einschraublänge.

Zur Untersuchung von Methoden zur Minimierung von Lageimperfectionen wurden fast 600 Schrauben mit Führungsbohrung, Setz- oder Einschraubhilfen in BSH eingedreht. Die Ergebnisse zeigen, dass Pilotbohrungen mit einer Tiefe von 10 % zu einem geringeren Abweichen der Schrauben führen als Vorbohrungen mit bis zu 100 % der Einschraublänge. Die positive Wirkung einer Führungsbohrung geht bei einer vollständigen Vorbohrung aufgrund des starken Abweichens schlanker Schlangenbohrer im Holz verloren und ist daher nicht zu empfehlen. Die Abweichungen der mit Setz- und Einschraubhilfen eingebrachten Schrauben unterschieden sich nicht signifikant voneinander.

Die Diskussion der untersuchten Einschraubmethoden zeigt, dass präzise hergestellte Pilotbohrungen am besten zur Minimierung von Lageimperfectionen geeignet sind. Im Vergleich zu Setz- und Einschraubhilfen stellen Pilotbohrungen den Einschraubwinkel wirksam sicher und beugen damit auch ein Annähern der Schraube an die Faserrichtung bei  $\alpha < 90^\circ$  vor. Insbesondere bei großen Einschraublängen können Lageimperfectionen dadurch deutlich eingegrenzt werden.

Die Versuchsergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung von Lageimperfectionen. Mit diesen Modellen sollen realitätsnahe Verläufe von Schraubkanälen erfasst und damit eine gezielte Kontrolle und Methoden zur Minimierung ermöglicht werden. Dadurch sollen Schädigungen infolge von Lageimperfectionen reduziert und die Qualität sowie Sicherheit von Schraubverbindungen verbessert werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] KRÜGER, O.: *Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen*. 16. Internationales Holzbau-Forum, 2010.
- [2] TRAUTZ, M.; KOJ, C.: *Laserstrahlbohrungen für richtungsgenau positionierte Vollgewindeschrauben - Einbau und Tragverhalten*. Bautechnik 92 (2015), Heft 6, S. 403-411, 2015.
- [3] BLAß, H.J.: *Selbstbohrende Schrauben und Systemverbinder - Stand der Technik und Herausforderungen*. 23. Internationales Holzbau-Forum, 2017.
- [4] STEIGE, Y.; FRESE, M.: *Study on a newly developed diagonal connection for hybrid timber trusses made of spruce glulam and beech laminated veneer lumber*. Wood Material Science & Engineering, Bd. 14-5, S. 280-290, 2019.
- [5] TRAUTZ, M. et al.: *Mit Schrauben bewehren - Selbstbohrende Vollgewindeschrauben als Verstärkung in Brettschichtholzträgern und zur Ausbildung von hochleistungsfähigen Verbindungen*. Forschungsbericht 01/2007, Lehrstuhl für Tragkonstruktionen, RWTH Aachen, 2007.
- [6] BLAß, H.J.; STEIGE, Y.: *Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Bd. 34, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2018.
- [7] FRESE, M.; JORDAN, M.: *Deviations between planned and actual position of wood screws - consequences for minimum spacing*. In: International Network on Timber Engineering Research, INTER 51-7-1, S. 49-63, Tallinn, 2018.
- [8] BALDAUF, E.; FRESE, M.: *Lageimperfektionen von selbstbohrenden Schrauben in Holz und Holzwerkstoffen*. In: Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. (Hg.) iVTH-Kurzberichte, Kurzbericht 12/22, 2022.
- [9] BALDAUF, E.; FRESE, M.: *Lageimperfektionen von selbstbohrenden Schrauben in Holz und Holzwerkstoffen*. In: Internationaler Verein für Technische Holzfragen e. V. (Hg.) iVTH-Kurzberichte, Kurzbericht 06/23, 2023.
- [10] MEIERTOBEREND, C.: *Untersuchungen zu den Ursachen von Lageimperfektionen selbstbohrender Schrauben in Holz und Holzwerkstoffen*. Masterarbeit, KIT Holzbau und Baukonstruktionen (unveröffentlicht), 2023.
- [11] GUTMANN, M.: *Untersuchungen zur Minimierung von Lageimperfektionen selbstbohrender Schrauben in Holz*. Masterarbeit, KIT Holzbau und Baukonstruktionen (unveröffentlicht), 2023.
- [12] BALDAUF, E.: *Lageimperfektionen von selbstbohrenden Schrauben in Holz und Holzwerkstoffen*. In: Kuhlmann, U. (Hg.) Doktorandenkolloquium - Holzbau Forschung + Praxis, Universität Stuttgart, 2024.
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: *ETA-11/0190 vom 23. Juli 2018 - Würth selbstbohrende Schrauben*.

### Autorin

Eva Baldauf

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Holzbau und Baukonstruktion  
R.-Baumeister-Platz 1  
76131 Karlsruhe

Kontakt:  
baldauf@kit.edu