

Forschungsbericht

FAGUS – Entwicklung von selbstbohrenden Schrauben für Laubholz höherer Dichte

Matthias Frese und Hans Joachim Blaß

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

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 031A437J gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Laufzeit des Vorhabens: 1. März 2015 bis 30. September 2017

GEFÖRDERT VOM



This document is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>

2025

DOI 10.5445/IR/1000183867

Inhaltsverzeichnis

1	Darstellung des Projekts	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
1.3	Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation	2
1.4	Hinweis zu dieser Open-Access-Veröffentlichung	2
2	Projektergebnisse	3
2.1	AP 1 – Gewindeflächenanalyse und Identifikation von Parametern	3
2.2	AP 2 – Validierung des Schraubenprototyps	16
2.3	AP 3 – Prüfverfahren	21
2.4	AP 4 – Parametrische Modellierung	22
3	Zusammenfassung	25
4	Literatur	26

1 Darstellung des Projekts

1.1 Aufgabenstellung

Gemeinsam mit dem Verbundpartner Würth sollte KIT Holzbau und Baukonstruktion (KIT-HuB) in der Rolle als Forschungsstelle wissenschaftliche und technische Grundlagen für Holzschrauben erforschen bzw. bereitstellen, die ohne Vorbohren in Hölzer mit höherer als bei Nadelholz vorliegender Rohdichte eingedreht werden können. Die zu entwickelnden Schrauben sollten dabei keinen Schaden nehmen.

Zu den Aufgaben von KIT-HuB zählten im Einzelnen die experimentelle Durchführung von Einschraub- und Ausziehversuchen sowie das Auswerten, Beschreiben und Analysieren entsprechender Ergebnisse nach geeigneten Methoden. Abschließend sollten ausgehend von gewonnenen Erkenntnissen Formparameter für Schraubenprototypen festgelegt werden, die im Sinne der Aufgabenstellung ohne Vorbohren eingedreht werden können und eine zuverlässige tragfähige Verbindung gewährleisten.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung sah vier Arbeitspakte (AP) mit folgenden Schwerpunkten vor:

AP 1 - Analyse von Gewindeformen handelsüblicher Holzschrauben

- Identifikation von Vor- und Nachteilen der Gewindeformen
- Identifikation zweckmäßiger Beschichtungsverfahren bzw. Beschichtungen
- Herstellung von Prototypen mit unterschiedlichen Gewindeformen
- Analyse einer erforderlichen Gewindelänge in Abhängigkeit von der Ausziehtragfähigkeit
- Ermittlung der Ausziehtragfähigkeit von Schrauben mit geeigneten Gewindeformen
- Experimentelle Untersuchung der Prototypen und abschließende Identifikation in Frage kommender Gewindeformen

AP 2 Untersuchung und Beschreibung der technischen Eigenschaften eines entwickelten Schraubenprototyps. Hierzu zählen u. a. Einschraubdrehmoment, Ausziehparameter, Zugtragfähigkeit, Bruchdrehmoment und Fließmoment

AP 3 Entwicklung und Anwendung von Prüfverfahren zur Messung der Spaltkraft beim Eindrehen in Buchenholz und in Holzwerkstoffe aus Buchenholz

AP 4 Numerische Modellierung einer Schraubenverbindung. Diese Modellierung schließt die Schraube, das die Schraube umgebende Holz und den Kontakt zwischen Schraube und Holz ein.

AP 1 war Voraussetzung für AP 2. Im AP 1 wurden Gewindeformen handelsüblicher Schrauben intensiver als geplant experimentell untersucht und analysiert. Teile des AP's 3 wurden abweichend von der Planung bereits in das AP 1 integriert. AP 4 wurde, nachdem eine in Frage kommende Gewindeform festgelegt worden war, parallel zum AP 2 bearbeitet.

1.3 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Das Projekt knüpfte an die Entwicklung und Technologie von selbstbohrenden Holzschrauben an, die in mannigfaltiger Weise heute in Nadelholz für Verbindungen von tragenden Holzkonstruktionen verwendet werden. In materieller Hinsicht waren es vor allem die Gewindeformen handelsüblicher Holzschrauben, die den Ausgangspunkt für die projektgegenständlichen zu entwickelnden Schraubenprototypen darstellten.

Die Bearbeitung des Projekts wurde wesentlich durch drei bei KIT-HuB betreute Abschlussarbeiten unterstützt. Das waren eine experimentelle Arbeit mit Durchführung und Analyse von Einschraubversuchen mit etlichen handelsüblichen Schrauben [1], eine weitere experimentelle Arbeit zur differenzierten Analyse von Schraubenprototypen [2] und eine simulationswissenschaftliche Auseinandersetzung zur parametrischen Modellierung und Beanspruchung von Schrauben [3].

Über Teilergebnisse des Projekts wurde bereits in [4] und [5] berichtet. Für die im Projekt bearbeitete technische Fragestellung sind zwischenzeitlich z. B. die Produktleistungsnachweise [6] und [7] relevant geworden.

1.4 Hinweis zu dieser Open-Access-Veröffentlichung

Aus der Projektarbeit ist im Frühjahr 2018 zunächst ein „Schlussbericht für die Öffentlichkeit“ hervorgegangen, der nur eingeschränkt zugänglich und nutzbar war und daher die inhaltliche Grundlage für diese zeitversetzte redaktionell überarbeitete Open-Access-Veröffentlichung bildet.

2 Projektergebnisse

2.1 AP 1 – Gewindeforschung und Identifikation von Parametern

Zugunsten vertiefter Erkenntnisse zum Einschraubverhalten bei Holzwerkstoffen aus Laubholz mit hoher Rohdichte und Sekundärklebefügen zwischen einzelnen Furnierschichtholzstreifen (z. B. BauBuche) wurden die Einschraubversuche neben Buchenfurnierschichtholz auch in dauerhaftem Buchenfurnierschichtholz und Eukalyptusfurnierschichtholz durchgeführt. Die Analyse einer hinsichtlich der Ausziehtragfähigkeit zu optimierenden Gewindelänge (ℓ_g) wurde im AP 2 vorgenommen.

Die Einschraubversuche mit anonymisierten handelsüblichen Schrauben als Voraussetzung für eine Analyse von dementsprechend gängigen Gewindeformen erfolgte in Buchenfurnierschichtholz. Die Entscheidung für Buchenfurnierschichtholz wurde zum Zeitpunkt ihrer Festlegung wie folgt begründet: Buchenfurnierschichtholz gilt im Holzbau als besonders zukunftsfähig und verlangt insofern nach materialtechnisch darauf abgestimmten Holzschrauben. Seine Rohdichte beträgt das 1,2-fache des Buchenvollholzes; bei derselben Einschraubtiefe sind daher rohdichtebedingt in Buchenfurnierschichtholz die höchsten Einschraubwiderstände zu erwarten. Nachdem 17 unterschiedliche Schraubentypen (mit S-01 bis S-17 anonymisiert) ausgewählt worden waren, wurden jeweils zehn Exemplare in physisch unterschiedliche Prüfkörper eingedreht.

Die Darstellung im Bild 1 zeigt ein Teilergebnis dieser Untersuchung nur für Nenn-durchmesser (d_{nenn}) zwischen 7,65 und 8,20 mm und für die Einbringrichtung rechtwinklig zur Deckfläche von Buchenfurnierschichtholz. Mittels dieser Gegenüberstellung konnten für Hölzer und Holzwerkstoffe mit hoher Rohdichte geeignete Schraubentypen identifiziert werden: Diese verfügen über ein von der Schraubenspitze ab entwickeltes Gewinde und besitzen eine moderate Gewindesteigung (p). Das sind u. a. die Schrauben der Typen S-02, S-16 und S-17 (Bild 2), die bereits nach einigen wenigen Einschraubumdrehungen unter moderatem axial ausgerichtetem Druck ein konstantes Verhältnis zwischen Drehwinkel und Einschraubtiefe erkennen lassen. Lange Bohrspitzen und gewindeschneidende Spitzen mit Furchen erwiesen sich in Buchenfurnierschichtholz grundsätzlich als unzweckmäßig.

Nenndurchmesser 7.65 - 8.20 mm

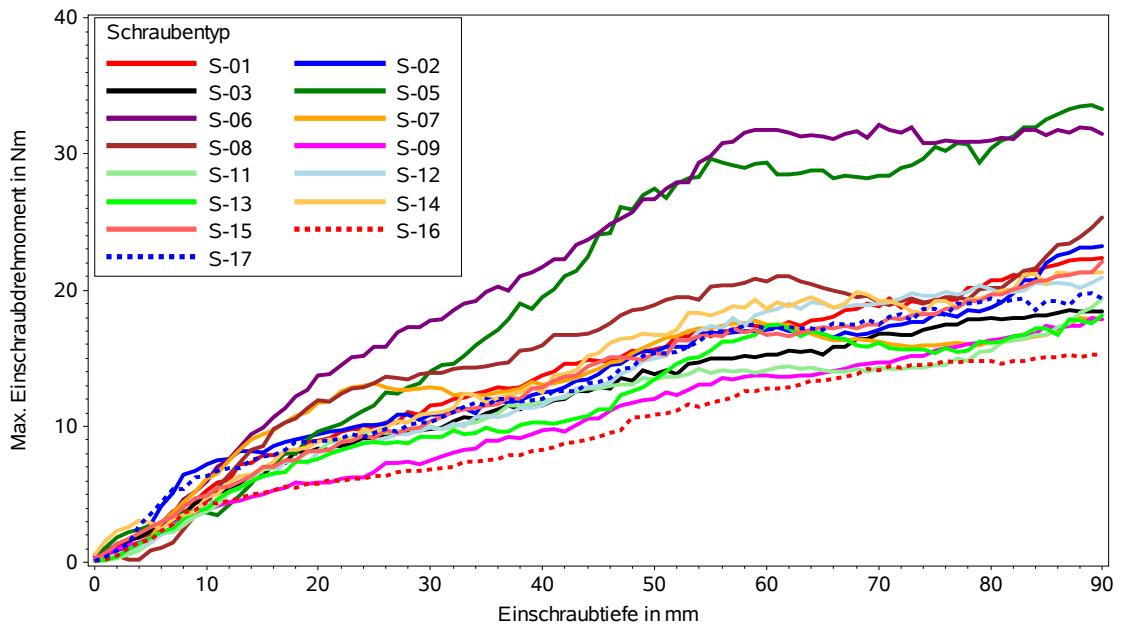


Bild 1 Maximales Einschraubdrehmoment und Einschraubtiefe

Nenndurchmesser 7.65 - 8.20 mm

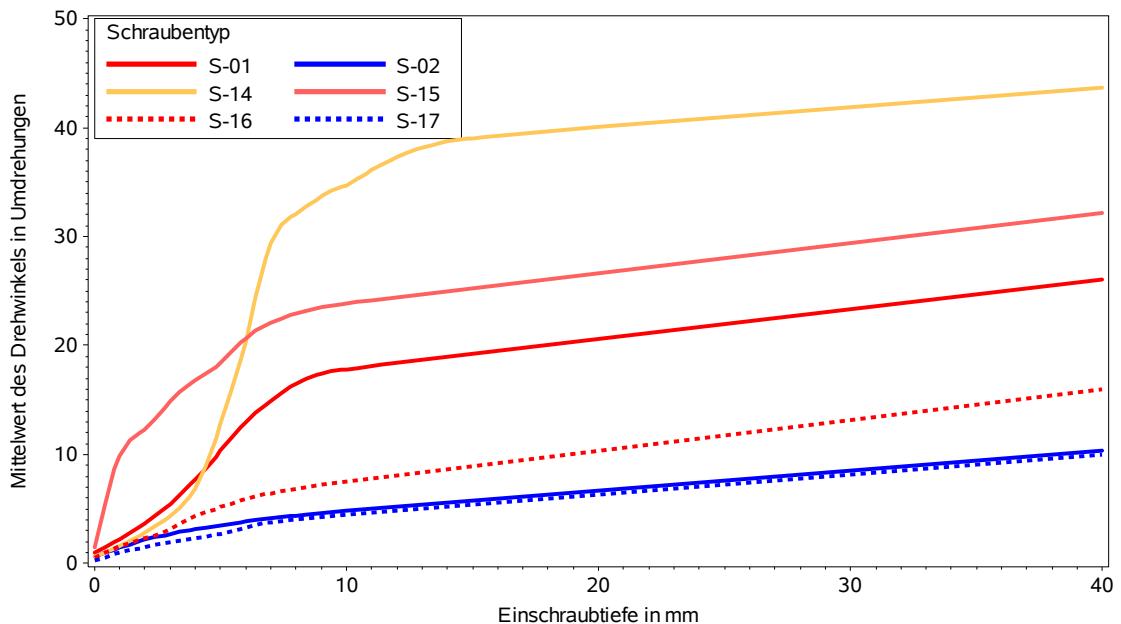


Bild 2 Analyse der erforderlichen Umdrehungen bis zum Erreichen eines konstanten Verhältnisses zwischen differentiellem Drehwinkel und differentieller Einschraubtiefe

Da sich während der zuvor beschriebenen Einschraubversuche Anzeichen dafür häuften, dass Buchenfurnierschichtholz hinsichtlich der Rohdichte nicht in dem Maße wie erwartet homogenisiert ist, wurden – dem Verfahren im Bild 3 sinngemäß folgend – differenzierte Rohdichteprofile erstellt, die im Bild 4 und Bild 5 dargestellt sind.

Die an zehn (Lamellendicke 50 mm) bzw. sieben (Lamellendicke 40 mm) unterschiedlichen Prüfkörpern gewonnenen Rohdichteprofile belegen, dass in den Sekundärklebefugen (= Trägerfugen), die durch die Herstellung von Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz bedingt sind, lokale Rohdichtespitzen infolge der Contiroll-Pressung für die Ausgangsplatten vorliegen. Diese betragen bei den beiden Brettschichthölzern mit 50 mm und 40 mm Lamellendicke bis zu 980 bzw. 900 kg/m³.

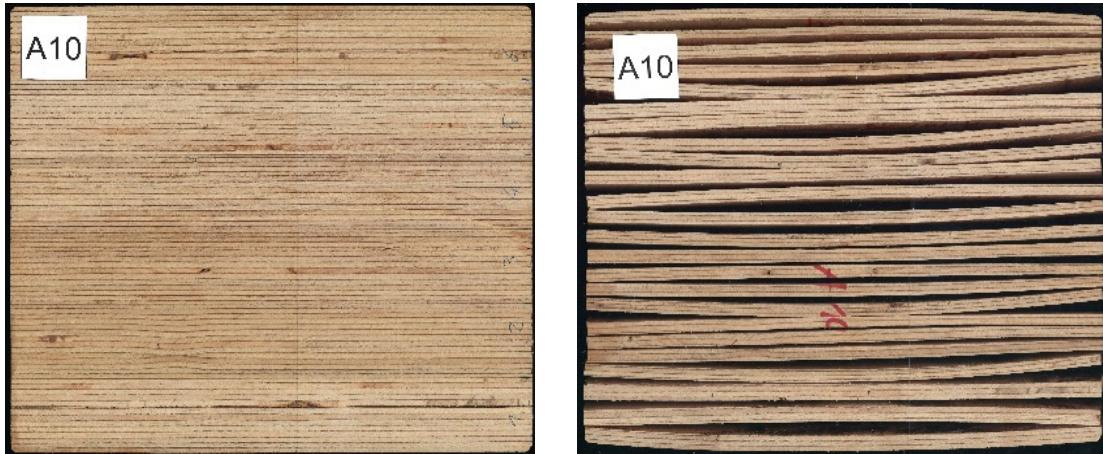


Bild 3 Aufteilung einer Buchenfurnierschichtholzscheibe (links) in 24 Einzelstreifen (rechts) zur Ermittlung eines Rohdichteprofils entlang einer Achse, rechtwinklig zu den Furnierlagen (vgl. Schichtfolge im Bild 5)

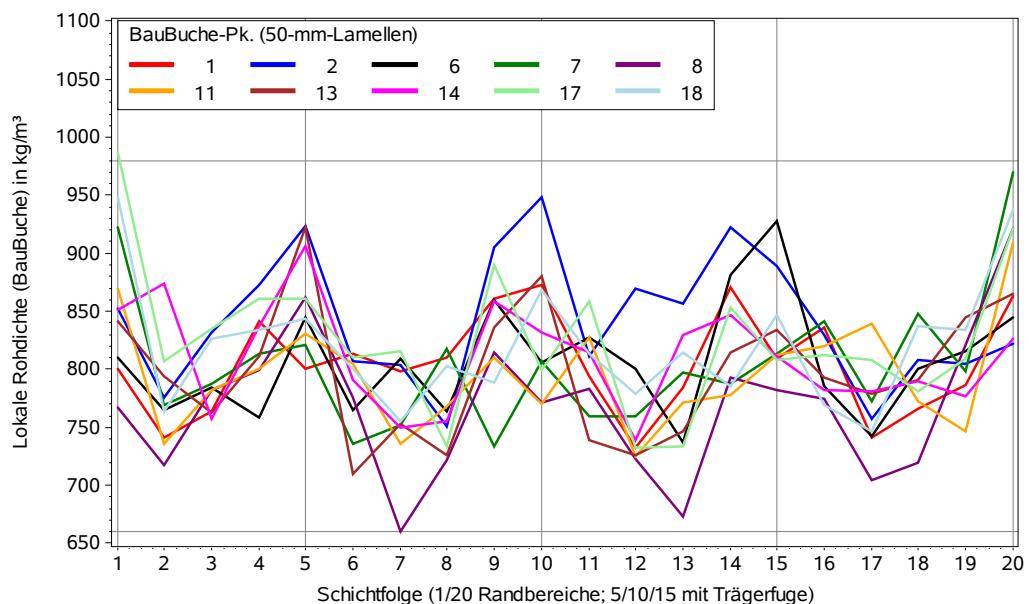


Bild 4 Rohdichteprofil von Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz entlang einer Achse, rechtwinklig zu den Furnierlagen; Lamellendicke: 50 mm

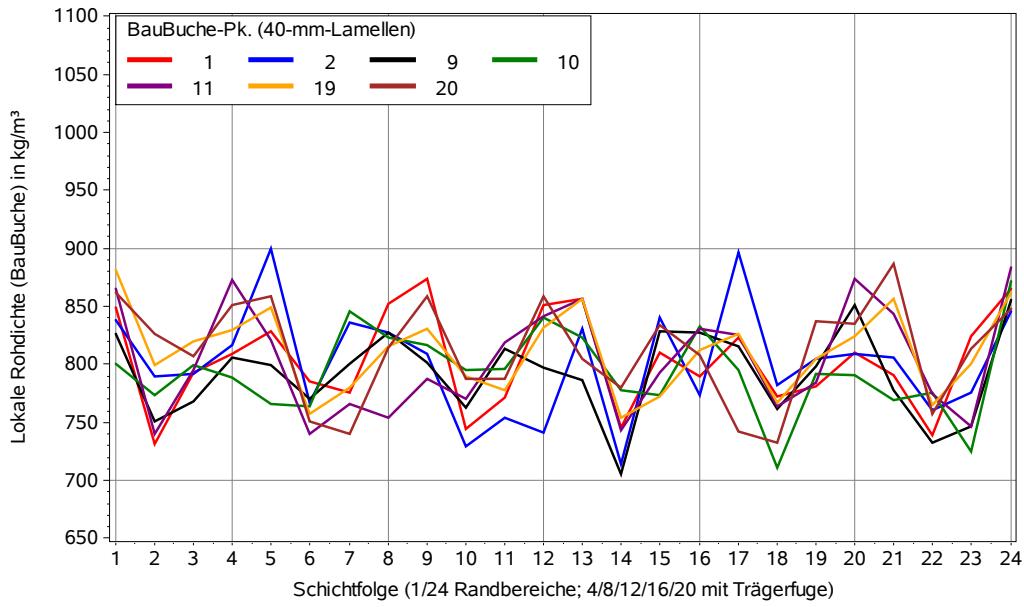


Bild 5 Rohdichteprofil von Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz entlang einer Achse, rechtwinklig zu den Fülllagen; Lamellendicke: 40 mm

Differenzierte Rohdichteprofile, die für dauerhaftes Buchenfurnierschichtholz und Eukalyptusfurnierschichtholz ermittelt wurden, sind im Bild 6 und Bild 7 dargestellt. Hier zeigt sich nicht dieselbe Regelmäßigkeit, die wie bei Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz durch ein Ansteigen der Rohdichte im Bereich der Sekundärklebefugen und ein Abfallen in der Lamellenmitte gekennzeichnet ist.

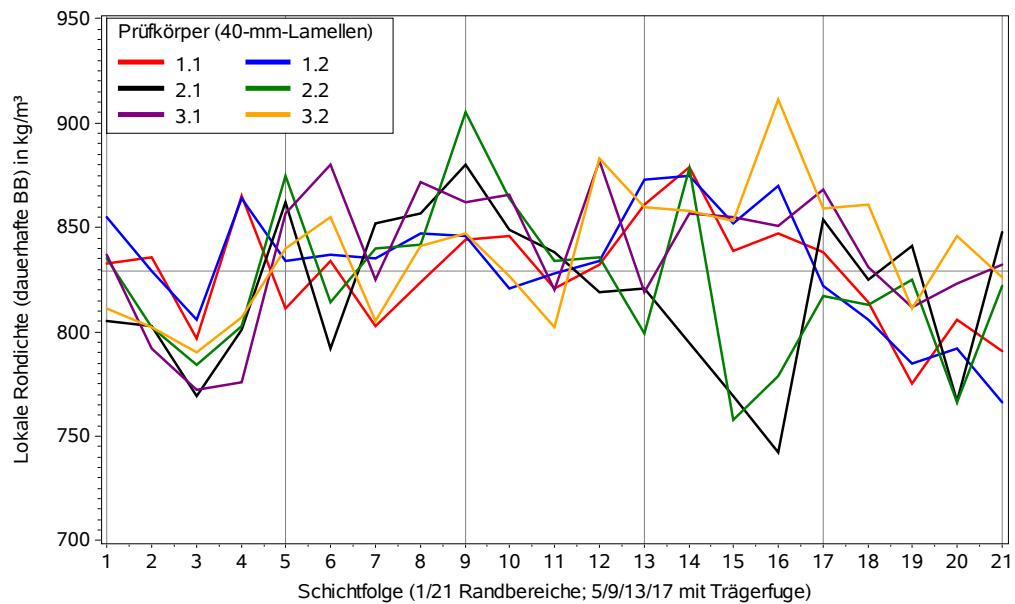


Bild 6 Rohdichteprofil von Brettschichtholz aus dauerhaftem Buchenfurnierschichtholz entlang einer Achse, rechtwinklig zu den Fülllagen; Lamellendicke: 40 mm

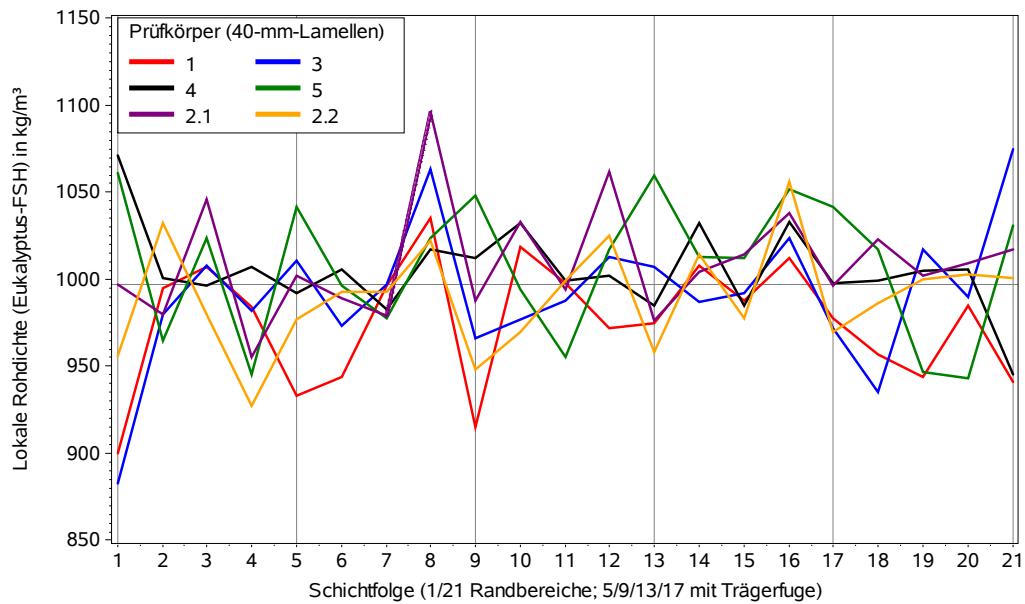


Bild 7 Rohdichteprofil von Brettschichtholz aus Eukalyptusfurnierschichtholz entlang einer Achse, rechtwinklig zu den Furnierlagen; Lamellendicke: 40 mm

Die herstellungsbedingten Rohdichteschwankungen bei Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz erforderten schließlich ein systematisches Variieren der Position der Einschraubstellen, um die höchsten im Material zu erwarten Einschraubdrehmomente darstellen zu können. Ein solches Variieren war für die Kenntnis eines umfassenden Beanspruchungsprofils erforderlich. Wie dieses Variieren im Einzelfall erfolgte, verdeutlicht das Einschraubschema im Bild 8.



Bild 8 Systematisches Variieren der Position von Einschraubstellen in der Schmalfläche von Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz; schwarze Linien kennzeichnen die Lage der Sekundärklebefugen

Einem regelmäßigen Verfahren folgend wurden Schrauben in den Sekundärklebefugen, in der Lamellenmitte und in ausgewählten Zwischenpositionen eingedreht. In mehreren unterschiedlichen quaderförmigen Prüfkörpern aus Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz (mit 40-mm-Lamellen, entspricht dem gegenwärtigen Produktstandard) wurden u. a. Schrauben mit 7 mm Nenndurchmesser und einer Gewindelänge von 80 mm eingedreht. Die Schrauben wurden rechtwinklig zu den drei strukturell unterschiedlichen Oberflächen eingebracht. Das sind die Deckfläche (Schrauben durchdringen das Furnierschichtholz rechtwinklig zu den Furnierlagen), die Hirnholzfläche (Schrauben dringen parallel zur Faserrichtung ein) und die Schmalfläche (Schrauben dringen rechtwinklig zur Faserrichtung und zugleich parallel zu den Furnierlagen ein). Im Bild 9 ist das Ergebnis dieser Untersuchung stellvertretend für weitere verwendete Schraubendurchmesser und untersuchte Holzwerkstoffe dargestellt. Demnach sind beim Eindrehen in die Schmalfläche (Eindringtiefe > Lamellendicke) grundsätzlich die höchsten Einschraubdrehmomente zu überwinden. Das gezielte Variieren der Einschraubposition zwischen einzelnen Sekundärklebefugen führte auf das Ergebnis im Bild 10. Demnach ziehen Einschraubpositionen in und in der Nähe der Sekundärklebefuge die höchsten Einschraubdrehmomente nach sich. Insofern wurden die nun folgenden Untersuchungen zur Identifikation einer geeigneten Schraubenbeschichtung an dieser Erkenntnis gezielt ausgerichtet.

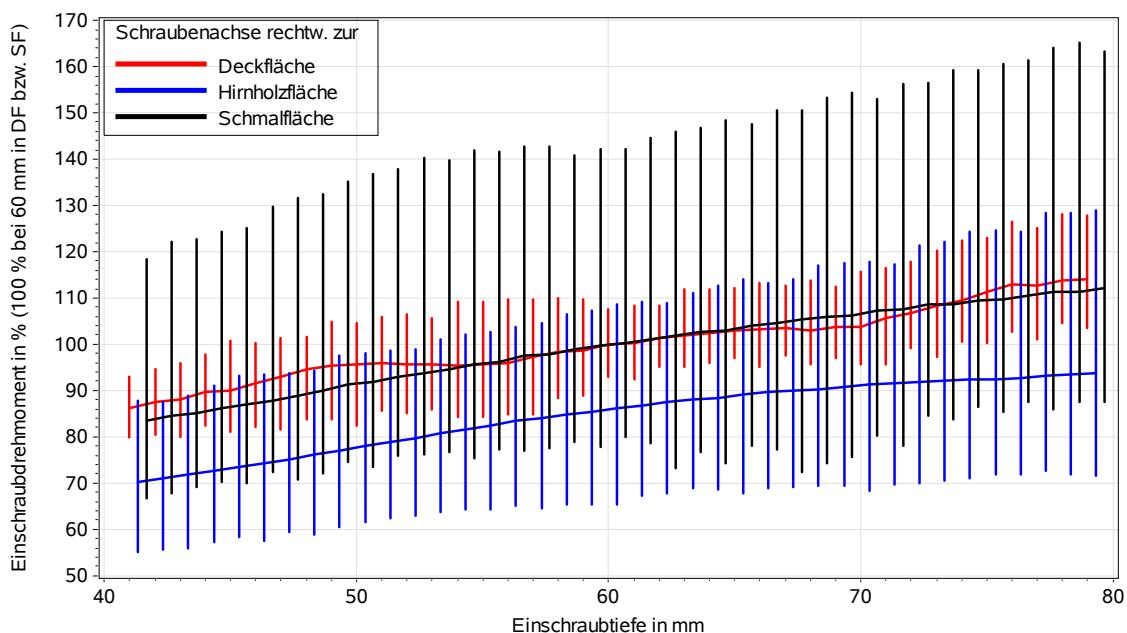


Bild 9 Zu erwartende Spanne der Einschraubdrehmomente in der Deck-, Hirnholz- und Schmalfläche; beispielhaft für eine Einschrautiefe zwischen 40 und 80 mm und einen Nenndurchmesser von 7 mm ausgewertet

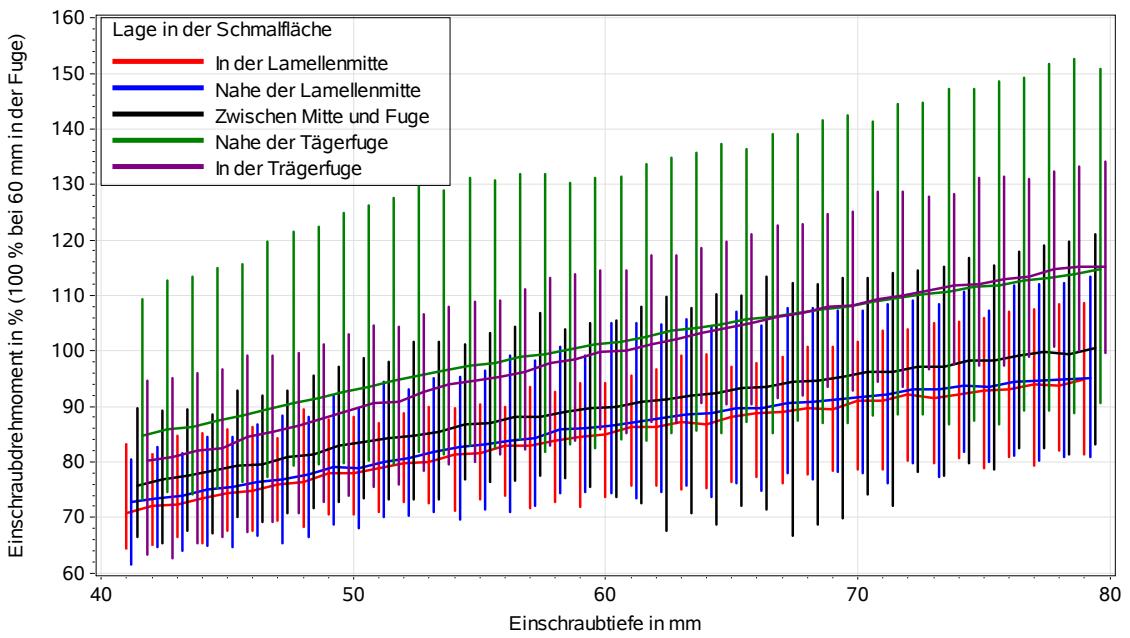


Bild 10 Zu erwartende Spanne der Einschraubdrehmomente in der Schmalfläche; hier beispielhaft für eine Einschraubtiefe zwischen 40 und 80 mm und einen Nenndurchmesser von 7 mm ausgewertet

Einschraubversuche mit gleitbeschichteten gelb verzinkten Schrauben, anorganisch beschichteten Schrauben sowie anorganisch beschichteten und zusätzlich gleitbeschichteten Schrauben belegen, dass solche Schrauben, die ein von der Spitze ab entwickeltes Gewinde haben, mit anorganischen Beschichtungen ein deutlich geringeres Einschraubdrehmoment im Vergleich mit gelb verzinkten erfordern, um dieselbe Einschraubtiefe zu erreichen (Bild 11).

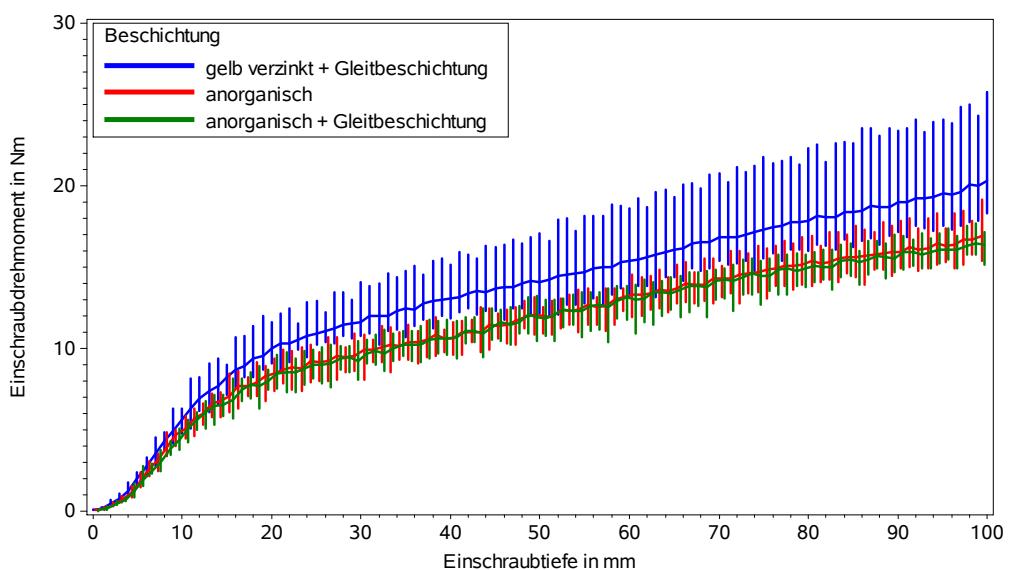


Bild 11 Einschraubversuche mit unterschiedlich beschichteten ASSY-3.0-Schrauben

Schrauben, die eine Bohrspitze aufweisen und daher in einen vorgebohrten, bereits etwas geweiteten Schraubkanal eindringen, lassen sich mit der untersuchten anorganischen Beschichtung hinsichtlich des Einschraubdrehmoments nicht in nennenswertem Maße verbessern (Bild 12).

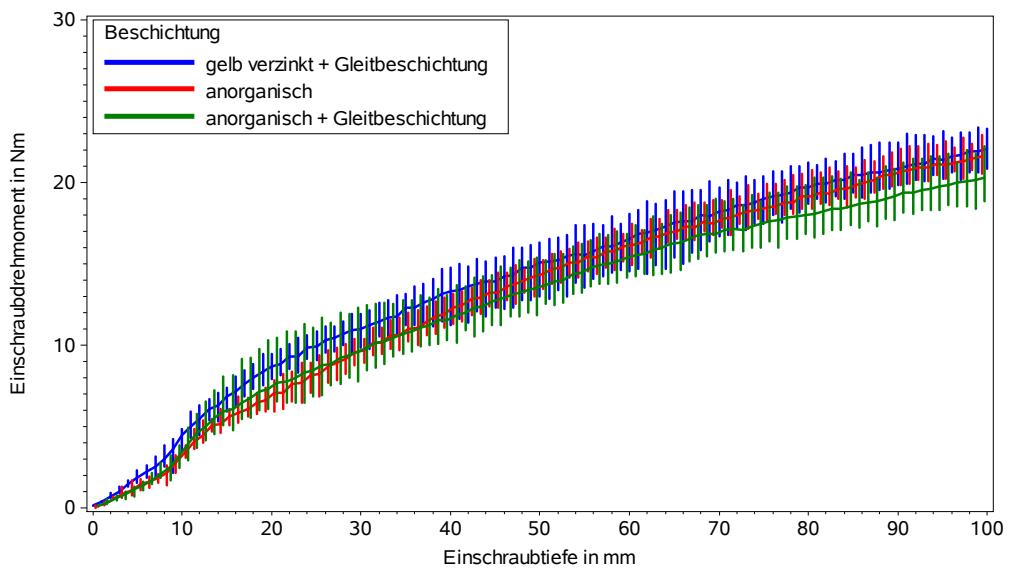


Bild 12 Einschraubversuche mit unterschiedlich beschichteten ASSY-Plus-Schrauben

Im Bild 13 sind zusammenfassend die wesentlichen Resultate der Einschraubversuche mit unterschiedlich beschichteten Schrauben vergleichend gegenübergestellt. Unabhängig von der Einschraubrichtung (rechtwinklig zur Schmal- bzw. Deckfläche) wirkt sich hinsichtlich eines möglichst geringen Einschraubdrehmoments eine anorganische Beschichtung insbesondere bei ASSY-3.0-Schrauben positiv aus. Das sind solche Schrauben, die ein ab der Spitze entwickeltes Gewinde besitzen und im Gegensatz zu den Varianten ASSY+ bzw. ASSY®+ keine vergleichbare Bohrwirkung ausüben. Gleitbeschichtungen bieten im Sinne der hiesigen Aufgabenstellung keinen zusätzlichen technischen Vorteil.

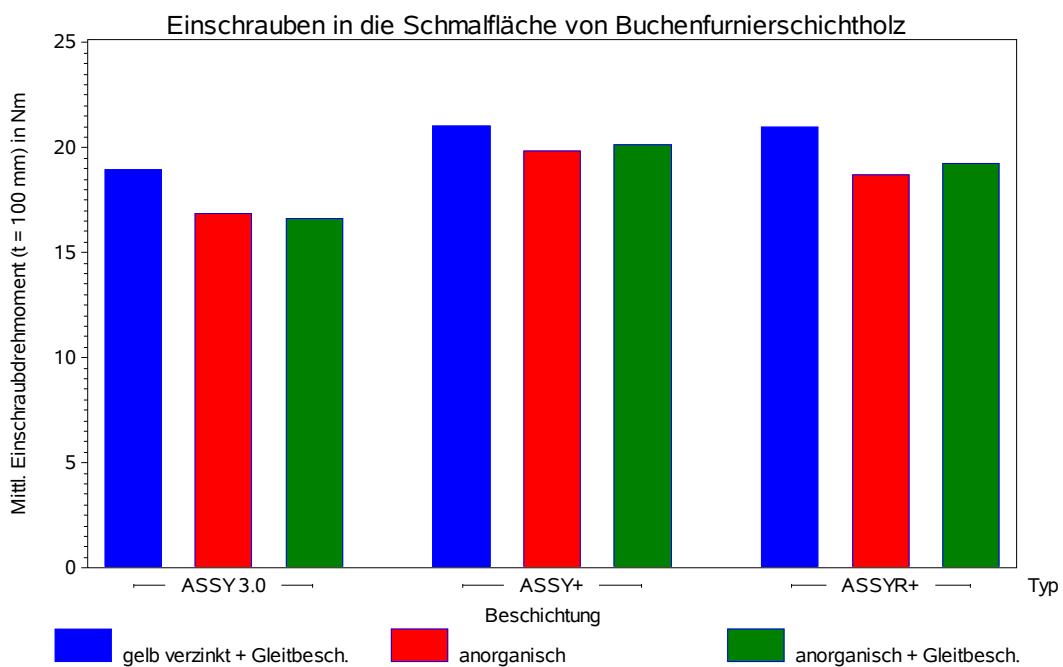
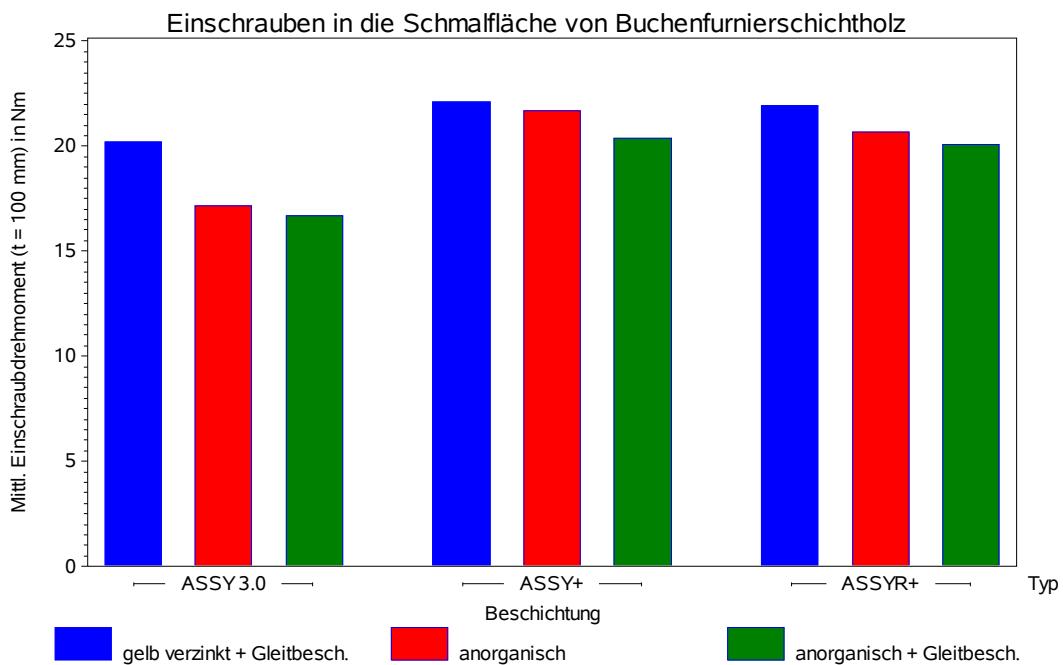


Bild 13 Vergleich zwischen Einschraubdrehmomenten bei unterschiedlich beschichteten Schrauben; Einschraubrichtung rechtwinklig zur Schmalseite (oben) und rechtwinklig zur Deckfläche (unten)

Nachdem vom Projektpartner Würth 20 hinsichtlich der Gewinde-Parameterkombinationen unterschiedliche Prototypen (Bild 14) festgelegt worden waren, wurden abweichend von dem sonstigen Walzverfahren von jedem dieser Prototypen vier Exemplare mit einem mechanischen Fräsvorfahren hergestellt.

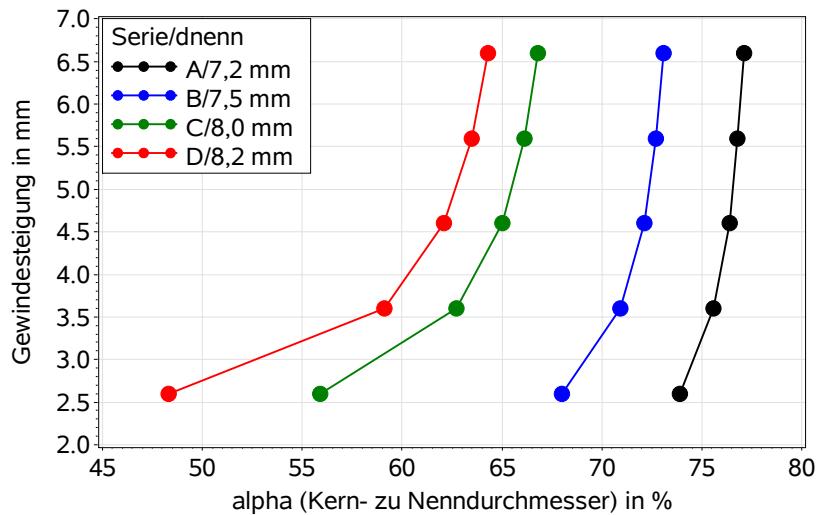


Bild 14 Gewinde-Parameterkombinationen der 20 unterschiedlichen Prototypen

Im Bild 15 sind beispielhaft zwei der insgesamt 80 Exemplare dargestellt, deren Parameterkombinationen Grenzfälle sind. Die beiden im selben Maßstab wiedergegebenen Projektionsaufnahmen der beiden Exemplare verdeutlichen ein sehr grobes Gewinde mit zugleich niedrigen Flanken bzw. ein sehr feines Gewinde mit hohen Flanken.

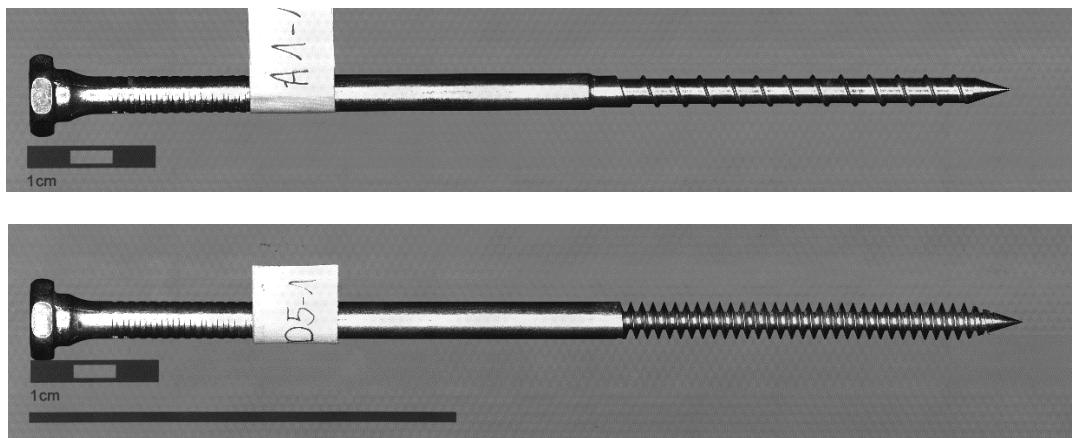


Bild 15 Exemplare von Prototypen mit extremen Gewindeformen: hohe Gewindesteigung und dicker Kern (oben) und niedrige Steigung und dünner Kern (unten)

Jedes einzelne Exemplar wurde mit Einschraub- und Ausziehversuchen getestet (Bild 16). Die verwendeten Materialien waren Buchenschnittholz, Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen (Typ Q) und solches ohne Querlagen (Typ S). Beim Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen wurden die Prototypen in die Deckfläche (Q DF), siehe Bild 17, und bei demjenigen ohne Querlagen in der Schmalfläche (SF) eingebracht. Das Versuchsprogramm wies nominell 20 (Prototypen) x 4 (Exemplare) x 3 (Werkstoffe) x 2 (Versuchsarten) = 480 Einzelversuche auf.

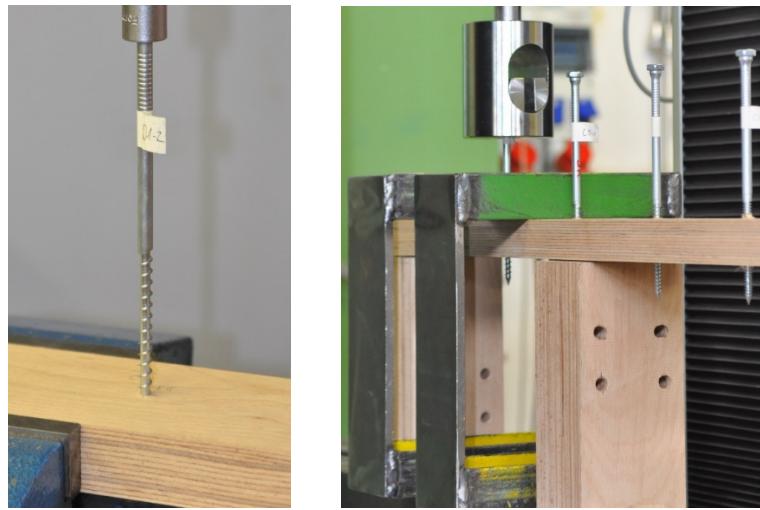


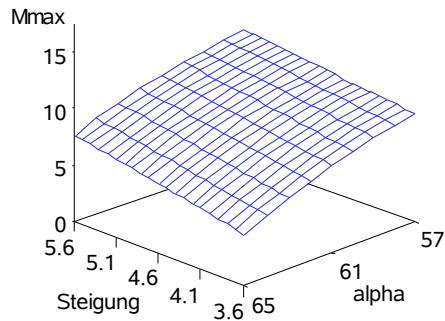
Bild 16 Einschrauben (links) und Herausziehen eines Prototyps (rechts) in bzw. aus Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen



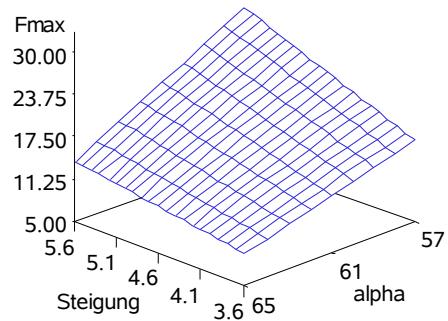
Bild 17 In Buchenfurnierschichtholz (mit Querlagen) eingeschraubte Prototypen; Darstellung repräsentativ für Buchenschnittholz und Buchenfurnierschichtholz ohne Querlagen

Die Auswertung und die statistische Analyse (u. a. mithilfe multipler Regressionsanalysen) der Einschraub- und Ausziehversuche liefert in der Bedeutung einer Kernaussage die im Bild 18 dargestellten Entscheidungshilfen für die Wahl geeigneter Werte für die Gewindesteigung und das Verhältnis aus Kern- zu Nenndurchmesser alpha (α). Über dem Feld, das durch die Variablen Steigung und α aufgespannt ist, sind Erwartungswerte für das maximale Einschraubdrehmoment (M_{max}) bzw. für den maximalen Ausziehwiderstand (F_{max}) in Form einer Fläche dargestellt. Die beiden paarweise arrangierten Darstellungen belegen für Buchenschnittholz und für Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen jeweils ähnliche Tendenzen bzw. Aussagen.

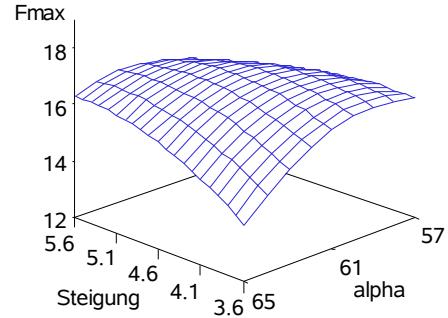
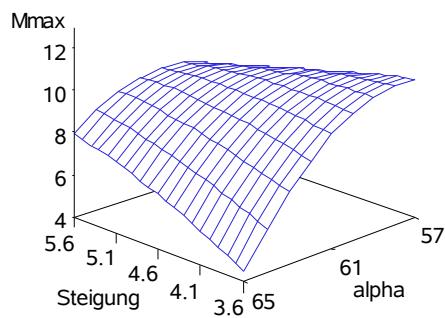
Einschraubdrehmoment bei Buchenschnittholz
dnenn = 8 mm / Rohdichte = 830 kg/m³



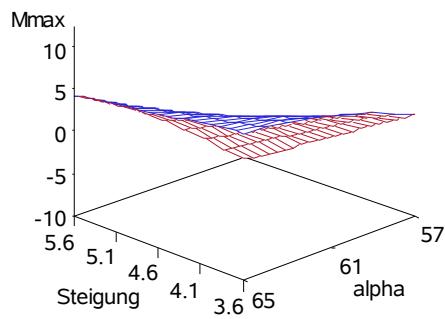
Ausziehtragfähigkeit bei Buchenschnittholz
dnenn = 8 mm / Rohdichte = 650 kg/m³



Einschraubdrehmoment bei Buchenfurnierschichtholz Q DF Ausziehwiderstand bei Buchenfurnierschichtholz Q DF
dnenn = 8 mm / Rohdichte = 860 kg/m³ dnenn = 8 mm / Rohdichte = 770 kg/m³



Einschraubdrehmoment bei Buchenfurnierschichtholz SF
dnenn = 8 mm / Rohdichte = 850 kg/m³



Ausziehwiderstand bei Buchenfurnierschichtholz SF
dnenn = 8 mm / Rohdichte = 770 kg/m³

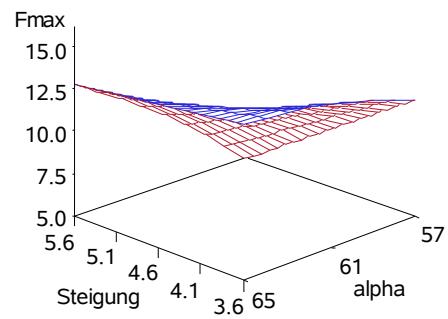


Bild 18 Erwartungswerte des Einschraubdrehmoments und des Ausziehwiderstands in Abhängigkeit von den Gewindefparametern Steigung p und α ; Buchenschnittholz, Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen (Einschrauben in die Deckfläche) und Buchenfurnierschichtholz ohne Querlagen (Einschrauben in die Schmalfläche)

Kleine Gewindesteigungen und zugleich große Verhältnisse α begünstigen ein gewünschtes niedriges Einschraubdrehmoment. Gleichwohl sind für solche Formparameter dann geringere Ausziehwiderstände zu erwarten. Die beiden Darstellungen, oben und mittig, weisen auf einen Zielkonflikt hin, dass sich mit einer spezifischen Gewindeform nicht zugleich niedrige Einschraubdrehmomente und große Ausziehwiderstände erzielen lassen.

Bei der Interpretation der im Bild 18 dargestellten Erwartungswerte für einen Nenn-durchmesser von 8 mm ist zwingend zu berücksichtigen, dass die vier im Bild 14 jeweils farblich zusammengefassten Parameterkombinationen (= Serien) mit unterschiedlichen Nenndurchmessern korreliert sind. Folglich werden Erwartungswerte im Bild 18, die außerhalb der tatsächlich für 8 mm Nenndurchmesser experimentell untersuchten Stützstellen liegen, aufgrund einer Extrapolation in ein experimentell nicht abgesichertes Feld eingeschränkt gültig sein. Anders ließe es sich nicht erklären, dass bei einer Parameterkombination $p = 5,6$ mm und $\alpha = 57\%$ z. B. die Ausziehtragfähigkeit bei Buchenschnittholz (650 kg/m^3) über derjenigen bei Buchenfurnierschichtholz SF (770 kg/m^3) liegt. Das kann physikalisch nicht sein.

Eine besondere Erklärung erfordert die Darstellung im Bild 18, unten. Hier sind die vorangehenden Tendenzen bzw. Aussagen nicht zutreffend. Die Gründe hierfür werden neben den beschriebenen Einschränkungen durch Extrapolieren in dem sporadischen Aufspalten des Buchenfurnierschichtholzes vermutet, womit ein Verlust der Klemmwirkung zwischen Schraube und Material einherging. Dieser Klemmwirkungsverlust bedingt eine sofortige Verringerung des Einschraubdrehmoments und des Ausziehwiderstands. Dass in den Darstellungen im Bild 18, unten genau diejenigen Gewindeformen, die in den Darstellungen im Bild 18, oben und mittig, die höchsten Einschraub- und Ausziehwiderstände bedingen, nun die geringsten Einschraub- und Ausziehwiderstände zur Folge haben sollen, ist physikalisch zumindest kein Widerspruch: Wo grundsätzlich hohe Einschraubdrehmomente zu überwinden sind und hohe Ausziehwiderstände wirken, sind auch die höchsten Spaltkräfte zu erwarten. Dementsprechend werden die Verhältnisse, die durch Gewindeform und Einschraubdrehmoment bzw. Ausziehwiderstand in den Darstellungen im Bild 18, oben und mittig, gegeben sind, überhaupt nicht reflektiert. Da die Versuche in der Schmalfläche von Buchenfurnierschichtholz den Abschluss bildeten, können auch von Versuch zu Versuch entstandene lokale Schäden an den mehrfach verwendeten Exemplaren der Prototypen zu einer Verzerrung der Verhältnisse beigetragen haben.

Auf Grundlage der beiden aussagekräftigen und verlässlichen Entscheidungshilfen im Bild 18, oben und mittig, wurde für die festzulegende Prototypschraube ein Nenn-

durchmesser von 8 mm, eine Gesamtlänge (L) von 190 mm, eine Gewindesteigung von 5,6 mm und ein Verhältnis α von 0,68 festgelegt. Damit ist ein zügiges Einschrauben gewährleistet und zugleich ein niedriges Einschraubdrehmoment zu erwarten. Die in weitgehender Übereinstimmung mit diesen Festlegungen hergestellte Prototypschraube ist im Bild 19 dargestellt. Sie liegt den weiteren technischen Untersuchungen im AP 2 zugrunde. In diesem Prototypstadium beträgt die Gewindelänge 70 mm.

Das AP 1 ist mit der Festlegung dieser Prototypschraube bzw. mit ihrer Gewinde-Parameterkombination erfolgreich abgeschlossen worden. Es steht damit eine Prototypschraube zur Verfügung, die sich grundsätzlich ohne Vorbohren in die dichtesten und härtesten Bereiche von Buchenfurnierschichtholz eindrehen lässt, dabei keinen Schaden nimmt und tragfähige Verbindungen zwischen verschraubten Bauteilen gewährleistet.



Bild 19 Prototypschraube für das Einschrauben ohne Vorbohren in Buchenfurnierschichtholz; $d_{nenn} = 8 \text{ mm}$, $L = 190 \text{ mm}$, $l_g = 70 \text{ mm}$, $p \approx 5,6 \text{ mm}$, blau verzinkt

2.2 AP 2 – Validierung des Schraubenprototyps

Im Bild 20 sind implizit 40 Einschraubdrehmomentverläufe für die Prototypschraube (Bild 19) dargestellt. Es entfallen jeweils 10 Einschraubversuche auf Buchenfurnierschichtholz-Prüfkörper mit einer Rohdichte von 816 bzw. 827 kg/m³ und jeweils 10 auf Buchenschnittholzprüfkörper mit einer Rohdichte von 697 bzw. 707 kg/m³. Die Schrauben wurden stets rechtwinklig zur Faserrichtung in die Schmalfläche eingedreht. Bei den Buchenfurnierschichtholz-Prüfkörpern wurden sie den Erkenntnissen aus AP 1 folgend direkt in die Sekundärklebefuge eingebracht, was die höchsten Einschraubdrehmomente erwarten lässt.

Die Bruchdrehmomentversuche betreffend, sind im Bild 21 und Bild 22 die Bruchstellen bzw. die Längen der abgedrehten Gewindeteile bzw. die Bruchstellen in den Schaftbereichen dargestellt; Tabelle 1 enthält die Zahlenwerte der entsprechenden Bruchdrehmomente. Die Zugtragfähigkeiten, die im Gewindegang ermittelt wurden, sind ebenfalls in Tabelle 1 zusammengefasst. Diese Ergebnisse warfen die Frage auf, inwieweit bei der praktischen Beur-

teilung der Schraube berücksichtigt werden kann, dass in einem Bereich (zwischen 56 und 59 mm ab der Schraubenspitze) das Einschraubdrehmoment 17 Nm nicht übersteigt und damit deutlich unter dem an dieser Stelle vorhandenen mittleren Bruchdrehmoment von etwa 30 Nm liegt.

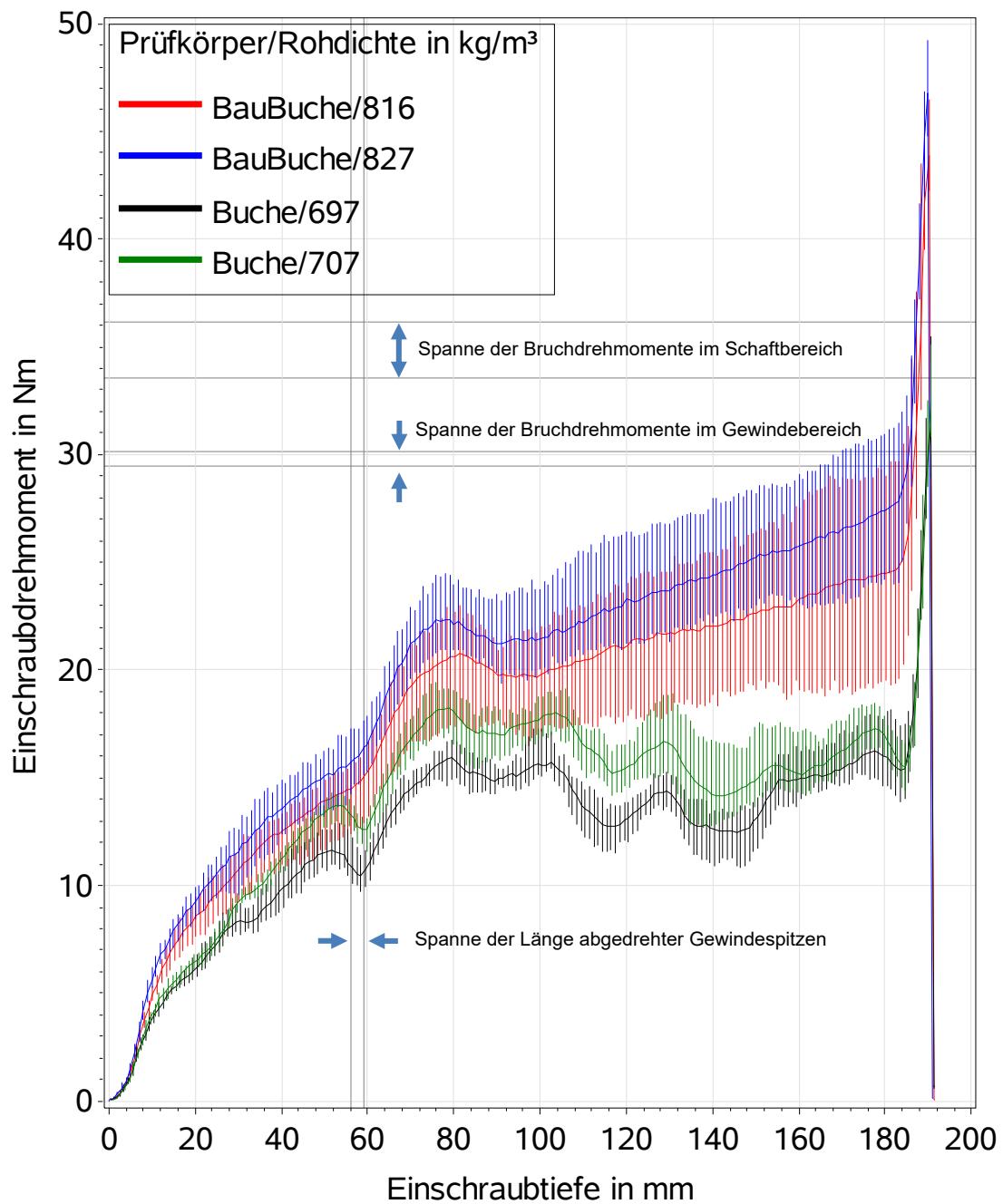


Bild 20 Einschraubdrehmomente in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe; 10 Einschraubversuche je Prüfkörper; die vertikalen Hilfslinien kennzeichnen die kleinste bzw. größte Länge der in den Bruchdrehmomentversuchen abgedrehten Gewindeteile (Bild 21); die horizontalen Hilfslinien kennzeichnen das kleinste bzw. größte Bruchdrehmoment im Gewinde- bzw. Schaftbereich (Tabelle 1)

Im Zusammenhang mit dieser Überlegung muss sichergestellt sein, dass das im Schaftbereich unmittelbar vor dem Kopf wirkende Einschraubdrehmoment das im Schaftbereich ermittelte Bruchdrehmoment mit einem gewissen Sicherheitsabstand nicht erreicht. Es ist außerdem der Einfluss einer unmittelbar nach dem Versenken des Kopfes entstehenden Zugbeanspruchung in der Schraube zu berücksichtigen (Interaktion).

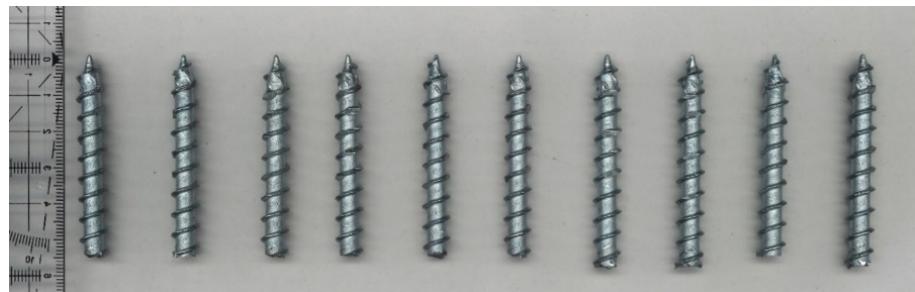


Bild 21 Abgedrehte Gewindeteile bzw. Schraubenspitzen



Bild 22 Bruchstellen im Schaftbereich

Tabelle 1 Bruchdrehmomente und Zugtragfähigkeit

Gewinde	Bruchdrehmoment in Nm Schaft	Zugtragfähigkeit (Gewinde) in kN
30,14 (max.)	35,22	24,75
29,95	36,18 (max.)	24,75
29,53 (min.)	33,53 (min.)	24,17
29,78	35,43	24,10
29,77	36,14	24,71
29,54	35,34	24,23
29,71	35,36	24,17
29,50	34,71	24,42
29,67	35,53	24,96
30,07	36,02	24,22
Mittel	29,80	24,45

Tabelle 2 enthält die nach Material, Einschraubwinkel (zwischen Schraubenachse und Faserrichtung) und anatomischer Richtung, radial (rad.) und tangential (tang.), aufgeschlüsselten Ausziehversuche. Das Rohdichtespektrum von Buchenfurnierschichtholz ist durch 808-824 kg/m³ und dasjenige von Buchenschnittholz durch 627-716 kg/m³ eingegrenzt. Die Ermittlung des Ausziehparameters erfolgte mit dem Nenndurchmesser 8 mm und der Einschraubtiefe von 48 mm, die die Schraubenspitze mit einschließt. Im Bild 23 bzw. Bild 24 sind die einzelnen Ausziehparameter für beide Materialien in Abhängigkeit vom Einschraubwinkel und in Abhängigkeit von den beiden weiteren anatomischen Richtungen dargestellt.

Tabelle 2 Anzahl der Ausziehversuche

Material	15°		45°		90°	
	rad.	tang.	rad.	tang.	rad.	tang.
Buchenfurnierschichtholz	10	10	10	10	10	10
Buchenschnittholz	11	11	11	11	10	10

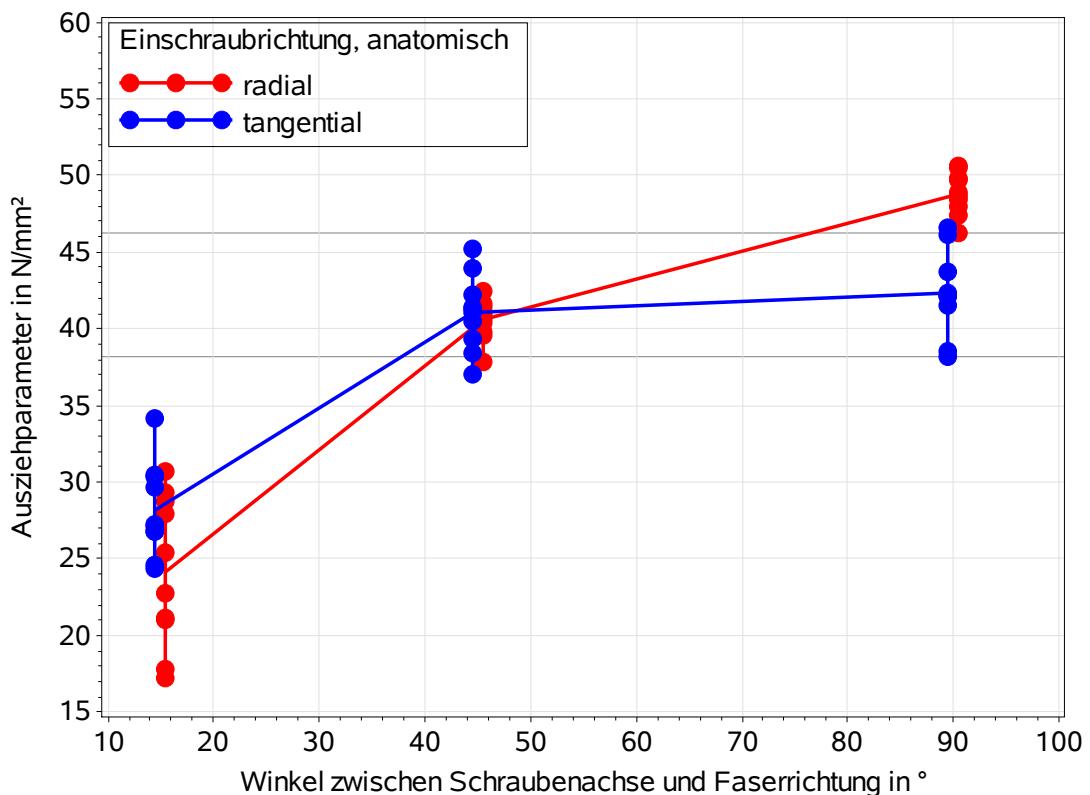


Bild 23 Ausziehversuche mit Buchenfurnierschichtholz

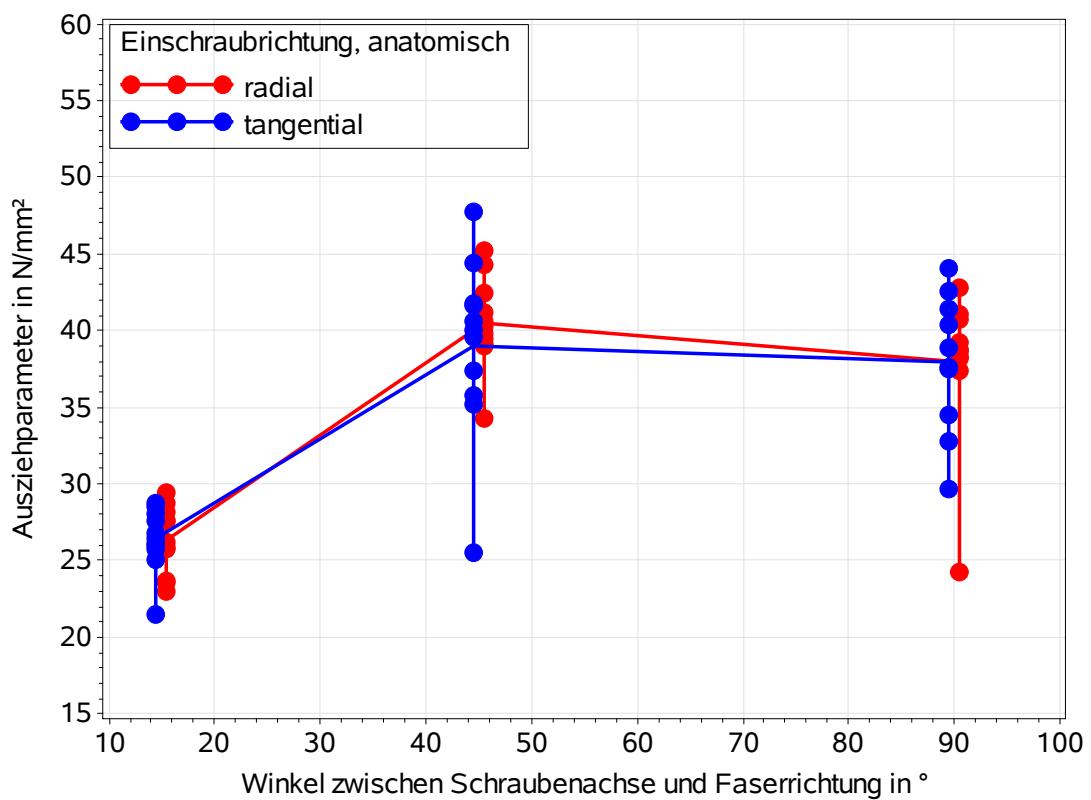


Bild 24 Ausziehversuche mit Buchenschnittholz

Damit ergibt sich in Buchenfurnierschichtholz ein Bemessungswert der Ausziehtragfähigkeit rechtwinklig zur Deckfläche von etwa 18 kN und rechtwinklig zur Schmalseite (im Bereich der Lamellenmitte mit vergleichsweise niedriger Rohdichte) von etwa 15 kN. Beide Werte decken einen Großteil der tatsächlich zu erwartenden Bemessungssituationen ab. Der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit von 15,4 bzw. 16 kN wird in der beschriebenen Schmalseitenposition fast erreicht; bei der beschriebenen Deckflächenposition wird die Zugtragfähigkeit der Schraube um 2-3 kN überschritten. Insofern wurde mit der im Bild 19 dargestellten Schraube eine Form gefunden, die einem im AP 1 zu entwickelndem Optimum hinsichtlich der Ausziehtragfähigkeit bereits sehr nahekommt. Als Nachweis sind die folgenden Berechnungsschritte aufgeführt.

Bemessungswert der Schrauben-Zugtragfähigkeit

$$R_{ax,d} = \frac{f_{tens,k}}{\gamma_M^{**}} = \frac{20^*}{1,30 \text{ bzw. } 1,25} = 15,4 \text{ kN bzw. } 16,0 \text{ kN}$$

$f_{tens,k}$: Charakteristischer Wert der Zugtragfähigkeit (ETA-11/0190:2013, A1)

* wie für ASSY 3.0, vgl. auch Tabelle 1

** $\gamma_M = 1,30$ (zutreffendere Festlegung nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08)

$\gamma_M = \gamma_{M2} = 1,25$ (DIN EN 1993-1-1/NA:2015-08, NDP zu 6.1(1) Anmerkung 2B)

Bemessungswert des Ausziehwiderstands rechtwinklig zur Faserrichtung

$$F_{ax,90,Rd} = f_{ax,k} \cdot d \cdot \ell_{ef} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$f_{ax,k}$: Charakteristischer Wert einer Verteilung von Ausziehparametern

ℓ_{ef} : Eindringtiefe des Gewindes

Buchenfurnierschichtholz (Typ S) rechtwinklig zur Deckfläche (radial)

$f_{ax,k} > 46,2 \text{ N/mm}^2$ (Bild 23)

$$F_{ax,90,Rd} = 46,2 \cdot 8 \cdot 70 \cdot \frac{0,9}{1,3} = 17,9 \text{ kN}$$

Buchenfurnierschichtholz (Typ S) rechtwinklig zur Schmalseite, Lamellenmitte (tangential)

$f_{ax,k} > 38,2 \text{ N/mm}^2$ (Bild 23)

$$F_{ax,90,Rd} = 38,2 \cdot 8 \cdot 70 \cdot \frac{0,9}{1,3} = 14,8 \text{ kN}$$

Vergleich

$$F_{ax,90,Rd,min} = 14,8 \text{ kN} < R_{ax,d} = 15,4 \text{ kN} < F_{ax,90,Rd,max} = 17,9 \text{ kN}$$

Der vorangehende Vergleich zwischen Ausziehtragfähigkeiten und Schraubenzugtragfähigkeit ist ein Beleg dafür, dass mit der im AP 2 untersuchten Prototypschraube unterschiedliche Verbindungen zwischen Buchenfurnierschichtholzbauteilen einer Bemessung tatsächlich zugänglich sind und praktisch hergestellt werden können. Der die Ausziehtragfähigkeit zahlenmäßig kennzeichnende Ausziehparameter beträgt bei Buchenfurnierschichtholz etwa das 3-fache im Vergleich zu Fichtenholz der Festigkeitsklasse C24. Durch diese Leistungssteigerung ist die erfolgreiche Zielerreichung des AP 2 belegt. Die im AP 2 gewonnenen Ergebnisse bieten überdies die wissenschaftliche Grundlage für den Entwurf von Schrauben, die für reines Buchenschnittholz oder für eine ausschließliche Verwendung in einer der untersuchten Oberflächen (Deckfläche/Schmalfläche) von Buchenfurnierschichtholz optimiert sind.

2.3 AP 3 – Prüfverfahren

Bei der Bearbeitung des AP 3 gab es im Vergleich mit den geplanten Arbeiten Abweichungen. Im Zuge der Bearbeitung der AP'e 1 und 2 wurde für erforderlich erachtet, mehr Arbeitsaufwand in die Analyse der Einschraubvorgänge handelsüblicher Schrauben, in die Darstellung der Rohdichteprofile und die positionsabhängigen Einschraubdrehmomente

bei Buchenfurnierschichtholz zu investieren. Teile des für das AP 3 vorgesehenen Arbeitsaufwands wurden auch zugunsten einer umfangreicher Untersuchung von Beschichtungen verwendet, die ein leichtgängiges Einschrauben gewährleisten.

Aufgrund der experimentellen Untersuchungen und der gewonnenen Erfahrungen zum Spaltverhalten sind für zukünftige Bemessungsregeln die folgenden qualitativen Festlegungen zunächst von besonderer Relevanz. Buchenfurnierschichtholz ohne Querlagen ist beim Einschrauben rechtwinklig zur Deckfläche grundsätzlich anders zu behandeln als solches mit Querlagen: Bei Buchenfurnierschichtholz mit Querlagen sind geringere Rand- und Zwischenabstände möglich als bei solchem ohne Querlagen. Das Spaltverhalten und die dafür erforderlichen Messmethoden von Buchenholz und buchenholzbasierten Werkstoffen sollten dann vertieft untersucht werden, wenn einzelne für die tatsächliche Verwendung vorgesehene Schrauben unmittelbar vor der technischen Regelung stehen. Dann erst sollten zielgerichtete Untersuchungen erfolgen, die direkt auf die zu erwartende Vielfalt der Schrauben, Durchmesser usw. abgestimmt sind.

2.4 AP 4 – Parametrische Modellierung

Das AP 4 wurde weitgehend planmäßig bearbeitet. Die Programmierung des Prä- und Postprozessors im Strukturanalyseprogramm ANSYS ist abgeschlossen, so dass in technisch sinnvollen Grenzen beliebig festgelegte Schraubengeometrien modelliert und elementare Versuche (z. B. Ausziehversuche) mit Holz- und Holzwerkstoffen simuliert werden können. Die Darstellung der dafür erforderlichen Hintergründe und die APDL-Programmierung sind in [3] veröffentlicht. Da sich die Programmieraktivitäten aufwändiger als geplant herausstellten, wurden die vorgesehenen Parameterstudien lediglich im Ansatz, jedoch nicht wie vorgesehen vollständig durchgeführt.

Das modellhafte Abbilden einer beliebigen Schraubengeometrie gelingt unabhängig von den endgültigen Prototypen entweder durch Einlesen von 3D-Datensätzen oder durch das zahlenmäßige Festlegen von vorab definierten Geometrieparametern und das automatische Auswerten durch entsprechend programmierte Algorithmen. Bei beiden Verfahren wird das im AP 4 vorgesehene Programm ANSYS verwendet, ein Programm zur Analyse komplexer Strukturprobleme. Die im Bild 25 dargestellten Gewindeabschnitte verdeutlichen für das Verfahren des Einlesens das generierte 3D-Modell einer 8-mm-ASSY-Schraube und die automatisch durchgeführte Vernetzung ihres Volumens als Voraussetzung für eine Finite-Elemente-Berechnung.

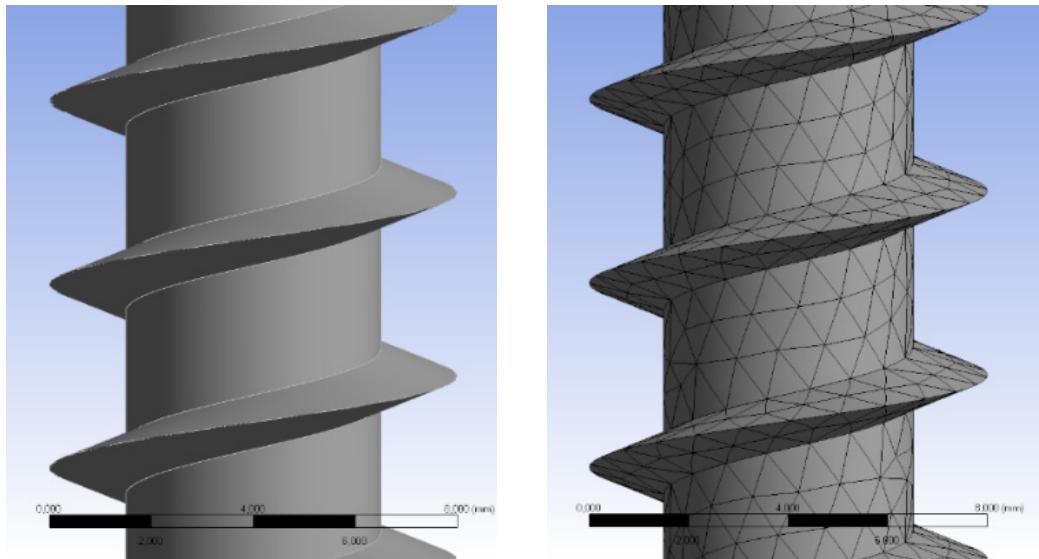


Bild 25 Volumenmodell einer ASSY-Schraube (links) und zweckmäßige Vernetzung (rechts); Modelliert mit ANSYS Workbench auf Grundlage eines von Würth entwickelten 3D-Datensatzes; Darstellungen: C. Bertram nach [3 S. 20ff].

Die Visualisierung im Bild 26 vermittelt eine Vorstellung vom Verformungsverhalten eines Schraube-Holz-Systems in einer Schnitt- bzw. Symmetrieebene. In diesem System ist die Schraube auf Zug beansprucht (schwarzer Pfeil) und das umgebende Holz ist an der Oberfläche der Schraubenaustrittsseite entsprechend fixiert (rote Pfeile).

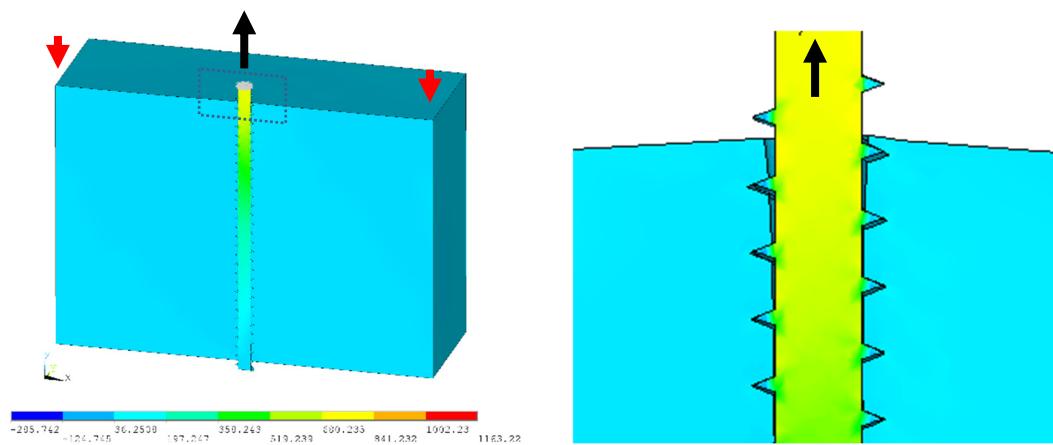


Bild 26 Schnitt- bzw. Symmetrieebene eines modellierten Prüfkörpers mit zugbeanspruchter Schraube (links) und Relativverformungen zwischen Gewinde und Holz unterhalb des Schraubenaustritts (rechts bzw. Vergrößerung des links gekennzeichneten Bereichs); Darstellungen: C. Bertram nach [3 S. 32ff].

Die zu variierenden Geometrieparameter sind der Nenn- und Kerndurchmesser, die Gewindesteigung, die jeweiligen Flankenwinkel (Bild 25) und die Einbindetiefe. Die mechanischen Eigenschaften des die modellierte Schraube umgebenden Materials werden mit entsprechenden Elastizitätszahlen erfasst; unterschiedliche Holzarten und

Holzwerkstoffe lassen sich auf diese Weise zutreffend repräsentieren. Die Kontaktprobleme zwischen den Oberflächen der modellierten Schraubenflanken und des umgebenden Materials werden über Haft- und Gleitbedingungen definiert, so dass im Gebrauchslastbereich realistische Relativverformungen stattfinden (Bild 26, rechts). Die Konfiguration des Postprozessors liefert u. a. Aussagen über den axialen Verlauf der Schraubenbeanspruchung bzw. über die Schubbeanspruchung in der zylindrischen, den Nenndurchmesser umschließenden Mantelfläche. Die im Bild 27 für eine spezielle Fallkonstellation (Holzart und Schraubengeometrie betreffend) dargestellte Spannungsverteilung in einer auf Herausziehen beanspruchten Schraube verdeutlicht, dass über 60 % der anfänglichen Zugspannung in der ersten Hälfte der Einbindetiefe über Schub ins umgebende Holz abfließt.

Die im AP 4 vorgesehene prozessorbasierte Programmierung eines Simulationsmodells wurde für axiale und laterale Beanspruchung erfolgreich abgeschlossen. Das Durchführen der Parameterstudien zur Quantifizierung von tragfähigkeitsrelevanten Einflüssen muss jedoch zukünftigen wissenschaftlichen Auseinandersetzungen vorbehalten bleiben.

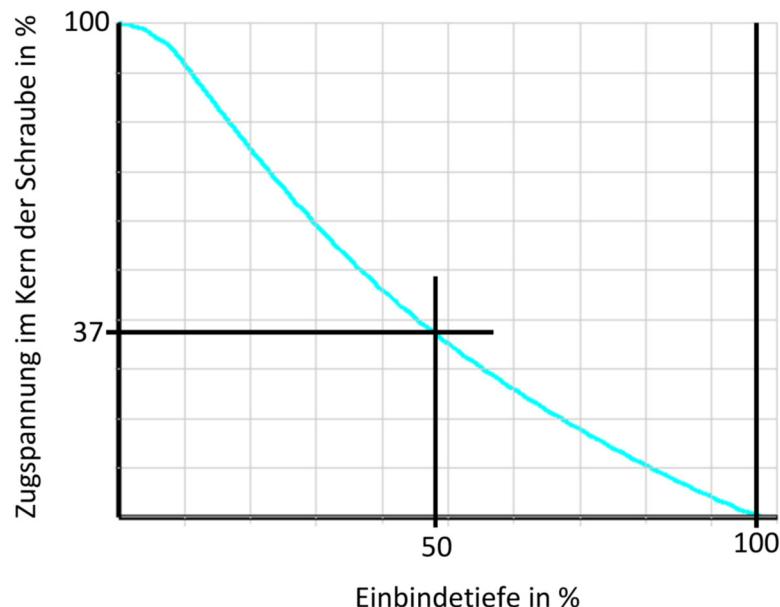


Bild 27 Spannungsverlauf entlang der Einbindetiefe (jeweils prozentual); Darstellung: C. Bertram nach [3 S. 38ff]

3 Zusammenfassung

Selbstbohrende Schrauben für Laubhölzer höherer Dichte, wie Buchenholz oder Buchenfurnierschichtholz, sollten eine akzentuierte Spitze besitzen. Sie benötigen ein von dieser Spitze ab kontinuierlich entwickeltes Gewinde, dessen Flanken klein beginnen und nach etwa zwei Umdrehung vollständig ausgeprägt sind. Dadurch wird begünstigt, dass das Gewinde bereits nach wenigen Umdrehungen im Holz „greift“ und die Schraube danach nur durch Drehen ohne zusätzlichen Axialdruck auf den Kopf in das Holz eindringt. Am Anfang und am Ende des Gewindes können Frässrippen zwischen den ersten und letzten beiden Gewindegängen eingeprägt werden. In Hölzern höherer Rohdichte sind moderate Gewindesteigungen von Vorteil. Bezogen auf einen Nenn-durchmesser von 8 mm liegen sie nachweislich zwischen 5 und 6 mm.

Schrauben mit langen Bohrspitzen und gewindeschneidenden Spitzen mit Furchen erwiesen sich in Hölzern mit höherer Rohdichte hinsichtlich kleiner Einschraubdrehmomente als unzweckmäßig.

Auf Grundlage von Einschraubversuchen mit gefrästen Versuchsschrauben, die insbesondere unterschiedliche Gewindesteigungen und Verhältnisse aus Kern- zu Nenn-durchmesser aufwiesen, wurden für eine Prototypschraube mit Nenndurchmesser von 8 mm eine Gewindesteigung von 5,6 mm, ein Verhältnis zwischen Kern- und Nenn-durchmesser von 0,68 und eine Gewindelänge von 70 mm festgelegt. Damit sind ein zügiges Greifen im Holz und Einschrauben gegeben, ein relativ niedriges Einschraub-drehmoment zu erwarten und eine auf die Zugtragfähigkeit der Schraube abgestimmte Ausziehtragfähigkeit gewährleistet.

4 Literatur

- [1] J. Stieger: Experimentelle Arbeiten, theoretische Untersuchungen und statistische Betrachtungen zur Entwicklung einer selbstbohrenden Hartholzschraube. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016, unveröffentlicht
- [2] R. Walter: Analyse von unterschiedlichen Gewindeformen für selbstbohrende Hartholzschrauben. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016, unveröffentlicht
- [3] C. Bertram: FE-Modellierung von Holzschraubenverbindungen in Buchen-Furnierschichtholz unter axialer und lateraler Beanspruchung. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016, doi: 10.5445/IR/1000091715
- [4] M. Frese: Density variations in beech LVL: influence on insertion moment and withdrawal capacity of screws. In R. Görlacher (Hrsg.): Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research (INTER), Meeting 52, Tacoma, WA, August 26-29, Timber Scientific Publishing, Karlsruhe, 2019
- [5] M. Frese: Selbstbohrende Holzschrauben: Einschraubdrehmoment bzw. Ausziehwiderstand und Lageimperfektionen. 25. Internationales Holzbau-Forum, Innsbruck, 2019
- [6] Adolf Würth GmbH & Co. KG: ETA-11/0190 – Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel. Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.), Berlin, 23. Juli 2018
- [7] Schmid Schrauben Hainfeld GmbH: ETA-12/0373 – Schrauben als Holzverbindungsmittel. Österreichisches Institut für Bautechnik (Hrsg.), Wien, 23. Dezember 2020