

Kevin Sven Hölz

**Analyse und Modellierung der
Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit
und den Gewindeparametern von
Holzschrauben durch die Entwicklung von
Analysetechniken**

Analysis and Modeling of the Relations between
Load-Bearing Capacity and Thread Parameters
of Wood Screw Connections through the
Development of Analysis Techniques

Band 145

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Analyse und Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern von Holzschrauben durch die Entwicklung von Analysetechniken

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Kevin Sven Hölz

Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2021

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 145

Eine zentrale Aufgabe in der Produktentwicklung ist die funktionsgerechte Gestaltung des Produktes. Dazu müssen in der Konstruktion die Zusammenhänge zwischen der beeinflussbaren Gestalt und der durch diese Gestalt erzeugten Funktionen bekannt sein.

Für die Auslegung einer Holzschraubenverbindung ist die Tragfähigkeit wesentlich. Diese hängt vom Zusammenwirken der Gestalt des Schraubengewindes und dem die Schraube umgebenden Holz ab. Für die Gestaltung besonders tragfähiger Holzschraubenverbindungen ist es wesentlich zu wissen, wie die einzelnen Parameter der Gewindegestalt mit der Funktion Tragfähigkeit der Holzschraubenverbindung zusammenhängen. Obwohl Holzschrauben schon seit Jahrzehnten genutzt werden und eines der Hauptverkaufskriterien die Tragfähigkeit der Schraube ist, fehlt es im Stand der Forschung an Wissen über die Zusammenhänge der einzelnen Gewindep Parameter in Wechselwirkung zum Holzuntergrund mit der Tragfähigkeit. Der Grund dafür besteht in den fehlenden Methoden, mit denen diese Zusammenhänge überhaupt ermittelbar sind.

Das wissenschaftliche Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen den Gewindep Parametern und der Tragfähigkeit der Holzschraubenverbindung erforschbar zu machen. Dazu werden von Herrn Kevin Hölz neben verschiedenen Analysetechniken wie „Continued Movement“ und „Sectional Imaging“, auch ein Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing entwickelt. Außerdem wird ein Bilderkennungsalgorithmus entwickelt, mit dem die Rissgeometrie in von Kevin Hölz hergestellten Holzprüfkörpern automatisiert vermessen werden kann und damit Zusammenhänge der Gewindep Parameter mit der Rissbildung im Holzuntergrund erforscht werden können. Erforsch- und beobachtbar wird diese Rissbildung erst dadurch, dass es Kevin Hölz gelingt, die Beobachtungsbarriere zu überwinden und die Störgröße Faserverlauf des Holzuntergrundes zu reduzieren und die Gewindep Parameter separat zur Holzfaser untersuchbar zu machen. Außerdem leistet die vorgelegte Arbeit einen wichtigen Beitrag zur agilen Produktentwicklung, da es Kevin Hölz gelingt, die zeitaufwändige Fertigung von Prototypen gewindegewalzter Holzschrauben durch Opferstrategien in der Gestalt und durch die Entwicklung eines zweidimensionalen Testobjektes für Gewindep Parameter zu überwinden. Es gelingt ihm dadurch erstmals, verschiedene Gewindep Parameter auf ihren Einfluss auf das Haltevermögen untersuchbar zu machen. Wichtiges Ergebnis ist der Nachweis, dass Faserrichtung, Profilhöhe und Gewindesteigung Haupteinflüsse auf das Haltevermögen sind. Außerdem weist er nach, dass die Interaktion des Flankenwinkels mit der Profilhöhe einen signifikanten Einfluss mit starker Effektgröße in der Ebene zur Holzfaser RT zeigt. Bei der höheren Profilhöhe von 1,48 mm kann der Einfluss auf das Haltevermögen als unabhängig von dem Flankenwinkel angesehen werden. Dieses Ergebnis ist überraschend, wissenschaftlich interessant und hat eine hohe Bedeutung für die Praxis, weil ein bisher sehr genau spezifiziertes Maß anders als erwartet keinen nachweisbaren Einfluss auf das Haltevermögen hat und damit bei gleicher Funktion die Herstellungskosten dramatisch reduziert werden können.

Damit liefert die vorliegende Forschungsarbeit sowohl zur methodischen Entwicklung als auch zur Gestalt von Holzschrauben wichtige neue Erkenntnisse und geht über das bisher im Stand der Forschung übliche Vorgehen zur Ermittlung der Tragfähigkeit weit hinaus.

November, 2021

Sven Matthiesen

Kurzfassung

In der Gestaltung ist die zentrale Aufgabe, ein Produkt so zu gestalten, dass es die geforderten Funktionen erfüllt. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei Bauteilverbindungen dar und hier insbesondere die Holzschraubverbindungen. Bei diesen kann im Gewindegewindekontakt zwischen Schraube und Holz nur die Gestalt der Schraube verändert werden, um die Funktion zu erfüllen. Für die Auslegung der Holzschraubverbindung ist die Tragfähigkeit wesentlich und daher eine Entwicklungszielgröße in der Gestaltung. Die Tragfähigkeit basiert auf den Wechselwirkungen zwischen Schraubengewinde und Holz. Für die Gestaltung ist das Wissen zu den Zusammenhängen zwischen Tragfähigkeit und Gewindegestalt, welches in Modellen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen gebildet wird, notwendig. Bislang fehlen jedoch sowohl dieses Wissen zu den Zusammenhängen als auch Methoden zur Ermittlung dieser Zusammenhänge. Mit diesem Wissen kann die Gestaltung von Holzschrauben hin zu einer höheren Tragfähigkeit unterstützt sowie nachgeordnet ein Beitrag zum ressourcenschonenden Bauen mit dem nachwachsenden Baustoff Holz erzielt werden.

Das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit ist die Analyse und Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindepaparametern von Holzschrauben. In dieser Forschungsarbeit werden zunächst Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindegewindekontakt identifiziert. Dafür werden die Analysetechniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* entwickelt. Die Holzfaserrichtung wird als Einflussgröße auf das Versagenverhalten identifiziert und nachfolgend bei der Ermittlung des Einflusses der Gewindepaparameter auf die Tragfähigkeit berücksichtigt. Dazu wird ein neuer *Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing* entwickelt. Wesentlich an diesem Aufbau ist ein Gewinde-Testobjekt mit geraden Flanken, wodurch die Einflüsse der Gewindepaparameter in gezielten Ebenen zur Faserrichtung untersucht werden können. Mit diesem Aufbau kann erstmals der Einfluss der Gewindesteigung nachgewiesen werden. Durch einen Algorithmus wird die Wirkung der Gewindesteigung auf das Versagen gemessen. Mit diesen Ergebnissen werden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge des Flankenabstands, des Steigungswinkels, der Profilhöhe und des Flankenwinkels modelliert. Zur Validierung dieser Modelle wird die korrekte Vorhersage dieser Gewindepaparameter auf das Haltevermögen untersucht. Die ermittelten Zusammenhänge werden für die Synthese von optimierten Holzschraubengewinden genutzt.

Zentrale Ergebnisse dieser Arbeit sind die Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstand, Profilhöhe, Steigungswinkel sowie Flankenwinkel, wodurch die Gestaltung von Holzschrauben unterstützt wird. Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist die Bereitstellung von Analysetechniken zur Analyse des Versagenverhaltens im Gewindegewindekontakt sowie der Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing zur Ermittlung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen.

Abstract

In design, the central task is to define the product embodiment such that required functions can be fulfilled. This is particularly challenging in the case of wood screw connections. To fulfill the function, only the screw can be designed in the thread contact between the screw and the wood. In the design of wood screw connections, a target value is the load-bearing capacity, which is based on the bonding mechanisms between the screw thread and the wood. For the design, knowledge of the relations between thread embodiment and load-bearing capacity, which is formed in models of embodiment function relations, is necessary. So far, however, there is a lack of both: knowledge about the relations and methods for determining these relations. This knowledge can be used to support the design of wood screws for higher load-bearing capacity and subsequently to contribute to resource-saving construction with wood as a renewable building material.

The scientific objective of this work is therefore the analysis and modeling of the relations between load-bearing capacity and thread parameters of wood screws. First influencing variables on the failure behavior in the thread contact are identified. For this purpose, the *Continued Movement* and *Sectional Imaging* analysis techniques are developed. The wood fiber direction is identified as an influencing variable on the failure behavior and is therefore subsequently controlled in the determination of the influence of the thread parameters on the load-bearing capacity. For this purpose, a new *experimental setup for screw testing* was developed. An essential feature of this setup is the thread with straight flanks. This allows the influences of the thread parameters to be investigated in specific planes to the fiber direction. In a study, the embodiment function relation of the thread pitch and the load-bearing capacity can be shown for the first time. Using an algorithm, the effect of thread pitch on failure is measured and the embodiment function relations of flank distance, lead angle, thread height, and thread angle are modeled. To validate these models, a further study is conducted to determine the influences of the thread parameters on the load-carrying capacity. The determined relations are used for the synthesis of optimized wood screw threads.

The major results of this work are the relations between load-bearing capacity and flank distance, thread height, lead angle, and thread angle. The embodiment function relations are used to support the design of wood screws. Another result of this work are the developed analysis techniques to analyze failure behavior in thread contact and the *experimental setup for screw testing* to determine embodiment function relations between thread parameters and load-carrying capacity.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen, welcher mich durch das entgegengebrachte Vertrauen, die Gestaltungsfreiräume und die mir übertragene Verantwortung wissenschaftlich und persönlich weiterentwickelt hat.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin für die Übernahme des Korreferats und die tollen Impulse beim gegenseitigen wissenschaftlichen Austausch.

Zu großem Dank bin ich dem IPEK-Team für die vielen wissenschaftlichen Diskussionen und Anregungen aber auch für die produktive und unterhaltsame Arbeitsatmosphäre verpflichtet. Hier gilt mein besonderer Dank an meine Bürokollegen Frank Bremer, Markus Döllken, Matthias Eisenmann, Patric Grauberger, Thomas Gwosch, Thomas Nelius, Sebastian Schmidt, Michael Steck und Andreas Wettstein sowie meiner Kollegin Carolin Sturm. Viele Ideen und Denkanstöße von Ihnen sind in diese Arbeit mit eingeflossen.

Mein Dank geht außerdem an die Mitarbeiter des Industrieunternehmens, welche mich sowohl durch Ihren fachlichen Rat, als auch durch Ihre Fertigungsmöglichkeiten und durch die Leihgabe von Versuchsgeräten unterstützt haben.

Ein großes Dankeschön möchte ich an meine studentischen Abschlussarbeiter richten. Ohne Ihre Forschung und die vielzähligen Versuche, die Sie für mich durchgeführt haben, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie - meiner Frau Christine und meinen Eltern. Ihr habt mir einen sicheren Rückhalt gegeben, auf den ich mich stets verlassen konnte und seid mir immer zur Seite gestanden. Zuletzt gilt mein Dank meinen Freunden für die Ablenkungen, den stetigen Zuspruch sowie die immerwährenden Erinnerungen „dran“ zu bleiben.

Für das Korrekturlesen möchte ich mich auch bei Norbert, Katharina und Johannes bedanken. Trotz meiner vielen Kommafehler, wurden diese nicht müde mir konstruktives Feedback zu geben und meine Arbeit zu korrigieren.

Vielen Dank!

Karlsruhe, November 2021 Kevin Hölz

*Ich wollte nicht nur Namen von Dingen wissen.
Ich erinnere mich, dass ich wirklich wissen wollte,
wie alles funktioniert hat.*
Elizabeth Helen Blackburn

*Eine der Lektionen, die ich in den verschiedenen Phasen meiner Karriere gelernt habe,
ist, dass Wissenschaft nicht alleine gemacht wird.
Fortschritte werden erst durch Gespräche und den Austausch mit anderen erzielt.*
Carol Widney Greider

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xxiii
Abkürzungsverzeichnis	xxv
Symbolverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Gestalten auf Basis des Verständnisses zu den Gestalt-Funktion- Zusammenhängen	5
2.1.1 Analyse des Systemverhaltens durch Beobachtung	7
2.1.2 Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	12
2.2 Holzschraubverbindungen	16
2.2.1 Gestalt der Holzschraube	18
2.2.2 Parameter des Werkstoffs Holz	21
2.2.3 Funktion Tragfähigkeit und Versagensart	24
2.2.4 Versagenverhalten im Gewindekontakt	27
2.3 Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen	30
2.3.1 Experimentelle Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen Haltevermögen und Schraubenparameter	31
2.3.2 Modelle des Gewindekontakts von Holzschraubverbindungen	37
2.4 Fazit zum Stand der Forschung	41
3 Motivation und Zielsetzung	43
3.1 Motivation	43
3.2 Zielsetzung	44
4 Forschungsfragen und Forschungsdesign	47
4.1 Vorgehen und Forschungsfragen	47

4.2	Forschungsdesign	51
5	Identifikation von Einflussgrößen auf das Versagenverhalten	55
5.1	Entwicklung der Analysetechniken	56
5.1.1	Analysetechnik Continued Movement zur Beobachtung des Versagenverhaltens	56
5.1.2	Analysetechnik Sectional Imaging zur Beobachtung des Versagenverhaltens bei unterschiedlichen Zuständen	61
5.1.3	Quantitative Evaluation der Analysetechniken	65
5.2	Studiendesign und Versuchsaufbau der Ausziehversuche	71
5.3	Ergebnisse	73
5.3.1	Ergebnisse mittels der Analysetechnik Continued Movement	73
5.3.2	Ergebnisse mittels der Analysetechnik Sectional Imaging	77
5.4	Diskussion der Einflussgrößen auf das Versagenverhalten und Diskussion der Analysetechniken	81
5.5	Fazit zur Untersuchung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt	87
6	Quantitative Ermittlung und Modellierung der Gestalt-Funktion- Zusammenhänge	91
6.1	Zusammenhänge zwischen Haltevermögen und Gewindeparametern	91
6.1.1	Entwicklung des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing	92
6.1.2	Studiendesign: gewählte Faktorstufen und Parameter	98
6.1.3	Ergebnisse	101
6.1.4	Diskussion	106
6.2	Zusammenhänge zwischen Versagenverhalten und Gewindeparametern	110
6.2.1	Studiendesign und Versuchsaufbau der Ausziehversuche	111
6.2.2	Quantitative Analyse der Rissgeometrie	112
6.2.3	Ergebnisse	117
6.2.4	Diskussion	118
6.3	Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	119
6.3.1	Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit und der Gewindesteigung	120
6.3.2	Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit und des Flankenwinkels	124
6.3.3	Erweitertes Druckkegel-Zugring-Modell	126
6.4	Fazit zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge sowie deren Modellierung	127
7	Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	131
7.1	Experimentalaufbau und Studiendesign	132

7.2	Ergebnisse	136
7.3	Diskussion	146
7.4	Validierung der Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	150
7.5	Fazit zur Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge....	155
8	Nutzung der Ergebnisse zur Synthese von Holzschraubengewinden....	159
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
9.1	Zusammenfassung.....	163
9.2	Ausblick	166
	Literaturverzeichnis.....	I
	Glossar	XIII
	Anhang	XV
	Forschungsdaten Teilforschungsfrage 1	XV
	Forschungsdaten Teilforschungsfrage 2	XVII
	Forschungsdaten Teilforschungsfrage 3	XIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Angewandte Analysetechniken zur Beobachtung des Gewindekontakts einer Holzschraubverbindung.....	10
Abbildung 2.3:	White-Box- und Black-Box-Modelle sowie unterschiedliche Grey-Box-Modelle, je nach Verhältnis an theoretischem und experimentellem Anteil.....	14
Abbildung 2.4:	Typische Anwendungen von selbstbohrenden Holzschrauben im Holzbau nach Ayoubi (2014): Holzschrauben als Verbindungselement (a, b) sowie als Verstärkungselement eines Auflagers (c), einer Trägerschulter (d) und bei Brettchichholzträgern (e).	17
Abbildung 2.5:	Vergleich der Elemente von Holzschrauben unterschiedlicher Hersteller.....	18
Abbildung 2.6:	Hauptelemente von Holzschrauben nach Sydor (2019) und die relevanten Gewindep Parameter nach Hölz, Kleinhans und Matthiesen (2021): Außendurchmesser d , Kerndurchmesser d_1 , Gewindesteigung P , Flankenwinkel α , Steigungswinkel φ und Profilhöhe a . Die Flankenbreite r ist geometrisch von der Profilhöhe und dem Flankenwinkel abhängig.	19
Abbildung 2.7:	Der axialsymmetrische Aufbau eines Baumstamms ergeben a) natürliche Schnittrichtungen und b) anatomische Hauptrichtungen (T, L, R) sowie Ebenen zur Holzfaserrichtung (RT, TL, LR).	22
Abbildung 2.8:	Mikroskopischer Aufbau der Holzzellen von Nadelholz. Frühholz weist gegenüber Spätholz Zellen mit größerem Porenvolumen, dünnwandigen Zellen und geringerer Festigkeit auf.	23
Abbildung 2.9:	Versagensarten einer Holzschraubverbindungen bei axialer Belastung: a) Stahlbruch, b) Durchzugsversagen und c) Ausziehversagen des Gewindeteils.....	25
Abbildung 2.10:	Ausziehversuch nach DIN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) zur Bestimmung des Haltevermögens.....	26
Abbildung 2.11:	Vorgehen nach Uibel (2012) zur Untersuchung des Versagens durch den Einschraubvorgang. Durch Einfärben des	

	Schraubkanals mittels Holzbeize wird die Rissbildung im Holz beobachtbar.....	28
Abbildung 2.12:	Sägeschnitte entlang der Schraubenachse zur Untersuchung des Versagens im Gewindekontakt bei axialer Belastung für unterschiedliche Einschraubwinkel.....	29
Abbildung 2.13:	Drei der angefertigten Schraubentypen nach Gaunt (1997), welche in Gewindesteigung P , Profilhöhe a und Flankenbreite r variieren.....	33
Abbildung 2.14:	Boxplots des Auszieh Widerstandes R_{ax} für die unterschiedlichen Gewindesteigungen (fein, mittel und grob), Einschraubwinkel α und die Holzarten a) Fichte und b) Buche. Der Auszieh Widerstand entspricht dem Haltevermögen. Die Versuchsanzahl n ist angegeben. Die Ausreißer werden nicht beschrieben.....	34
Abbildung 2.15:	Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen bezogen auf die Einschraubtiefe für eine a) radiale und b) tangentielle Einschraubrichtung.....	36
Abbildung 2.16:	Darstellung des Druckkegel-Zugring-Modells für einen Einschraubwinkel a) parallel zur Faser und b) rechtwinklig zur Holzfaser.....	39
Abbildung 2.17:	Darstellung des Kragenscheiben-Modells. Links die Holzfaserebene TL in welcher die ersten Risse entstehen. Im Schnitt A-A (Ebene RL) die unterbrochenen Holzfasern, welche die Kragenscheiben bilden. Im Schnitt B-B (Ebene RL) die Holzfasern, welche neben dem Schraubenkern entlanglaufen.....	40
Abbildung 2.18:	Erkenntnisse des Stands der Forschung zu den Zusammenhängen zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern.....	42
Abbildung 2.19:	Übliches im Stand der Forschung beschriebenes Vorgehen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. Holzschraubverbindungen werden als Black-Box-Modelle mit Holzschraubentypen als Eingangs- und den Haltevermögen als einzelne Werte der Tragfähigkeit als Ausgangsgrößen betrachtet.....	42
Abbildung 4.1:	Unterschiedliche Vorgehen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter und Haltevermögen. Der Pfad 1 beschreibt das Vorgehen aus dem Stand der Forschung. Der Pfad 2 beschreibt das Vorgehen	

	dieser Arbeit, bei welchem zusätzlich das Versagenverhalten analysiert wird.	47
Abbildung 4.2:	Teilforschungsfragen und die jeweils zu erwartenden Erkenntnisse zu den modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen im Vergleich zu dem Wissen aus dem Stand der Forschung.	49
Abbildung 4.3:	Forschungsdesign zur Beantwortung der Forschungsfragen. Dargestellt sind die Methoden der jeweiligen Teilforschungsfragen.	51
Abbildung 5.1:	<i>Selection Matrix</i> mit bewerteten Analysetechniken sowie die mögliche Kombination Video mit gesägtes Schnittmodell zur neuen Analysetechnik <i>Continued Movement</i>	57
Abbildung 5.2:	Prüfkörper für die Analysetechnik <i>Continued Movement</i> : Draufsicht (a), Vorderansicht (b), 3D-Ansicht (c) mit drei Positionen für die Beobachtung des Versagenverhaltens. In der mittleren Position ist eine Holzschraube dargestellt.	58
Abbildung 5.3:	Der Aufbau der Analysetechnik <i>Continued Movement</i> (links: schematischer Aufbau, mittig: realer Aufbau) sowie die Perspektive der Videokamera (rechts). Dies erlaubt die Beobachtung des Versagenverhaltens des Gewindekontakts.	59
Abbildung 5.4:	Bewertung der Analysetechnik <i>Continued Movement</i> . Die Bewertung der Anforderungen minimale Veränderung des Verhaltens und Reproduzierbarkeit erfolgt im Folgenden auf Basis von quantitativen Daten.	60
Abbildung 5.5:	Versuchsaufbau zur Untersuchung von einzelnen Versagenszuständen bei Verbundankern.	61
Abbildung 5.6:	Prüfkörper für die Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i> : Eine Hälfte des Prüfkörpers (a), beide Hälften mit Halterung und Holzschraube in der Vorderansicht (b) sowie 3D-Ansicht des Aufbaus mit Holzschraube an der mittleren der drei möglichen Prüfpositionen (c).	62
Abbildung 5.7:	Die Vorgehensweise der Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i> für den Vergleich unterschiedlicher Versagenszustände. Der Gewindekontakt kann nach be- und entlasten durch Öffnen und Schließen des Versuchsaufbaus bei unterschiedlichen Zuständen beobachtet werden.	64
Abbildung 5.8:	Evaluation der Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i> . Die Bewertung der Anforderungen <i>minimale Veränderung des</i>	

	<i>Verhaltens</i> und <i>Reproduzierbarkeit</i> erfolgt im Folgenden auf Basis von quantitativen Daten.	65
Abbildung 5.9:	Evaluationsergebnisse der Analysetechnik <i>Continued Movement</i> . Das relative Haltevermögen (<i>RWC</i>) bei Anwendung der Analysetechnik beträgt bei den drei geprüften Schraubentypen etwa 75 % der Referenz. Der Unterschied der Standardabweichung des relativen Haltevermögens (σRWC) beträgt für Schraubentyp A 0,6 %, für Typ B 1,7 % und für Typ C 0,1 %.....	67
Abbildung 5.10:	Evaluationsergebnisse der Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i> . Das relative Haltevermögen (<i>RWC</i>) bei Anwendung der Analysetechnik zeigt für die drei geprüften Schraubentypen einen ähnlichen Wert von ungefähr 90 %. Der Unterschied der Standardabweichung des relativen Haltevermögens (σRWC) beträgt für Schraubentyp A 0,6 %, für Typ B 0,9 % und für Typ C 2,5 %.....	69
Abbildung 5.11:	Gesamtbewertung der Analysetechniken <i>Continued Movement</i> und <i>Sectional Imaging</i> mit einer höheren Bewertung der erfüllten Anforderungen im Vergleich zu den bekannten Analysetechniken.	70
Abbildung 5.12:	Verwendete Schraubentypen (A - E) mit den jeweiligen Gewindeparameter als Mittelwert aus fünf Messungen.....	71
Abbildung 5.13:	Ausziehversuche angelehnt an DIN EN 26891:1991-07 (DIN EN 26891).	73
Abbildung 5.14:	Ergebnis aus der Anwendung von <i>Continued Movement</i> . Unterschiedliche Zustände im Gewindekontakt während des Ausziehversuchs in Kombination mit der gemessenen Ausziehkraft.....	74
Abbildung 5.15:	Messung der Schraubenbewegung mittels Motion Tracking (rechts) auf Basis des beobachtbaren Versagenverhaltens mittels <i>Continued Movement</i> (links). Durch Motion Tracking kann die Bewegung der Holzschraube (rosa Kreise) im Vergleich zum umgebenden Holz (rote Kreise) gemessen werden. Die Ausziehrichtung aus dem Holz ist nach rechts....	75
Abbildung 5.16:	Verschiebung-Zeit-Diagramm eines Einzelversuchs von Holzschraubentyp A. Vergleich zwischen gemessener und beobachteter Verschiebung.	76
Abbildung 5.17:	Schraubenbewegung von Schrauben des Typs B und C mittels der Technik <i>Continued Movement</i> . Schraubentyp B erreicht ein	

	vergleichbares Haltevermögen bei deutlich geringerer Verschiebung als Typ C.	77
Abbildung 5.18:	Ergebnis der Anwendung <i>Sectional Imaging</i> bei Holzschraubentyp C: Vergleich desselben Gewindekontaktes vor und nach dem Ausziehversuch. In Position 1 ist das Risswachstum durch den Ausziehversuch zu erkennen. Position 2 zeigt die Verformungen des Holzes in den Gewindezwischenräumen.	78
Abbildung 5.19:	Versagenverhalten der verschiedenen Holzschraubentypen nach dem Ausziehvorgang. Die rechteckige Markierung zeigt die Wicklung der Fasern um die Schraubenachse. Die verschiedenen Pfeiltypen zeigen unterschiedliche Verhalten der Rissbildung.....	79
Abbildung 5.20:	Vergleich des Versagens der Gewindekontakte von Holzschrauben der Schraubentypen D und E mit unterschiedlichen Gewindesteigungen.	80
Abbildung 5.21:	Darstellung der unterschiedlichen Einschraubwinkel (1, 2). Bei gleichem Einschraubwinkel sind die Beobachtungsebenen RT (1a) und RL des Gewindekontakts (1b) unterschiedlich zur Holzfasern orientiert.	84
Abbildung 5.22:	Prüfaufbau nach Horn et al. (2020) zur Untersuchung der Versagensvorgänge eines Verbundankers mittels eines ausgesägten Prüfkörpers (a) zur Erzeugung eines Beobachtungsfensters (b). Dargestellt ist das Ergebnis (c) bei geringer Last und bei Versagen.	86
Abbildung 5.23:	Entwickelte Analysetechniken zur Untersuchung des Versagenverhaltens.	87
Abbildung 5.24:	Erkenntnisse zu den Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt, die sich auf die Tragfähigkeit von Holzschraubverbindungen auswirken.	88
Abbildung 6.1:	A: An Position 1 und 2 entstehen aufgrund der Orientierung der Holzfasern zur Gewindeflanke unterschiedliche Versagenverhalten, welche die Tragfähigkeit bestimmen. B: Durch eine abgewinkelte Gewindeflanke können diese überlagerten Einflüsse in spezifischen Ebenen zur Holzfasern (1 oder 2) getrennt untersucht werden.....	93
Abbildung 6.2:	Gewinde-Testobjekt des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing. Das abgewinkelte Gewinde ermöglicht die Untersuchung von Gewindeparametern in spezifischen	

	Richtungen zur Holzfaser. Die zu variierenden Gewindep Parameter sind die Gewindesteigung P und der Flankenwinkel α	94
Abbildung 6.3:	Prüfkörperhälften, in welche die Gewinde-Testobjekte für die Untersuchung des Haltevermögens eingelegt wurden.	96
Abbildung 6.4:	Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing: Einspannung der Gewinde-Testobjekte in die Prüfkörperhälften. Draufsicht in (a), 3D-Ansicht in (b). Die gleichmäßige und reproduzierbare Verspannung erfolgt über Schraubendruckfedern.	97
Abbildung 6.5:	Gewählte Faktorstufen der Ebenen zur Holzfaserrichtung RT und TL entsprechend einer tangentialen Einschraubrichtung.	100
Abbildung 6.6:	Experimentell ermittelter Gestalt-Funktion-Zusammenhang (Gesamtanzahl an Versuchen $N = 313$): Einfluss der Gewindesteigung auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens. Für beide Holzfaserrichtungen gemittelt ist ein linearer Verlauf ersichtlich. Eine kleinere Gewindesteigung führt zu höherem Haltevermögen.....	105
Abbildung 6.7:	Experimentell ermittelter Einfluss der Gewindesteigung auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens getrennt nach der Ebene zur Holzfaserrichtung (Versuchszahl $N = 313$). In beiden Ebenen zeigt sich, dass eine kleinere Gewindesteigung zu höherem Haltevermögen führt. Dieser Einfluss ist in der Ebene TL größer als in der Ebene RT.	106
Abbildung 6.8:	Vorgehen dieses Kapitels zur Untersuchung der Wirkung der Gewindesteigung auf das Versagenverhalten, um die Zusammenhänge zwischen der Gewindeggestalt und der Tragfähigkeit zu verstehen. Dazu wird die Rissgeometrie untersucht.....	110
Abbildung 6.9:	Verwendete Gewinde-Testobjekte mit unterschiedlichen Gewindesteigungen (a), Prüfkörperhälften mit Nut (b), Eingespannte Probe mit Gewinde-Testobjekt (c).....	111
Abbildung 6.10:	Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie in RT-Ebene. Links: Schnittebene A-A der Prüfkörperhälfte, Mitte: Rissbild ohne Färbung, Rechts: gefärbtes Rissbild. Die Rissbildung ist durch die Färbung deutlich erkennbar.	113
Abbildung 6.11:	Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie für Prüfkörperhälften in TL-Ebene. Links: Schnittebene B-B der Prüfkörperhälfte, Rechts: gefärbtes Rissbild an der	

	Schnittebene B-B. Es ist im Vergleich zur RT-Ebene eine sehr geringe Rissbildung zu erkennen.	114
Abbildung 6.12:	Schritte des Algorithmus für die Messung der Rissgeometrie. Die Risse werden in den verschiedenen Schritten (b - d) erkannt, aufbereitet, vermessen und in Schritt e mit einem roten Rechteck markiert.	115
Abbildung 6.13:	Beispiele für korrekte Erkennungen (a, b) und unzureichende Erkennungen der Rissgeometrie (c - e) durch den Algorithmus. Die erkannte Rissgeometrie durch Risslänge und Rissbreite ist durch ein Rechteck gekennzeichnet.	116
Abbildung 6.14:	Ergebnis des Algorithmus für die Analyse der Risslänge und der Rissbreite der erkannten Risse für die drei Gewindesteigungen (3,04: N = 178, 4,5: N = 175, 5,9: N = 138 Risse bei N = 61 Versagensbildern nach dem Erreichen des Haltevermögens). Es kann keine Wirkung der Gewindesteigung auf die Risslänge, jedoch auf die Rissbreite erkannt werden.	118
Abbildung 6.15:	Modell des Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit und des Steigungswinkels φ auf Basis der veränderlichen Anteile von Scher- und Reibverbund anhand der Gewinde-Testobjekte. Bei kleineren Steigungswinkeln ist der Anteil des Scherverbunds größer und dies resultiert in einer höheren Tragfähigkeit.	121
Abbildung 6.16:	Links: Scherverbund und Druckkegel nach Ayoubi (2014), Rechts: Modelle zum Zusammenhang der Tragfähigkeit und des Flankenabstands. Modellierung auf Basis der Spannungsverteilung: Versagen der Krafteinleitung aufgrund der kegelförmigen Spannungsverteilung. Ein kleinerer Flankenabstand P_1 erhöht die Anzahl der Krafteinleitungspunkte und führt somit zu einer höheren Tragfähigkeit. Modellierung auf Basis der Scherfläche: Das Versagen der Krafteinleitung führt zu einer kleineren Scherfläche (gepunktet in rot) bei kleineren Flankenabstände P_1 und somit zu einer niedrigeren Tragfähigkeit.	122
Abbildung 6.17:	Modell zum Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel basierend auf dem Druckkegel-Modell. Der Druckkegel wird senkrecht zur Gewindeflanke gebildet. Bei einem größeren Flankenwinkel α (Grün im Vergleich zu Rot) vergrößert sich der Druckkegel und erhöht somit die Tragfähigkeit.	124

Abbildung 6.18:	Modell zum Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel basierend auf dem Druckkegel-Model. Der Druckkegel wird in Verlängerung zur Gewindeflanke gebildet. In Grün ist die Verkleinerung des Flankenwinkels α_{FWG} , im Vergleich zum Flankenwinkel α_{FW} und die damit einhergehende Vergrößerung des Druckkegels und somit der Tragfähigkeit dargestellt.....	125
Abbildung 6.19:	Erweiterung des Druckkegel-Zugring-Modells. Dargestellt ist der Druckkegel mit einem Winkel α_{DK} und einer ellipsenförmigen Helix ($a \neq b$) in Abhängigkeit von dem Rotationswinkel um die Schraubenachse Φ sowie von der Einschraubtiefe ($a(x)$, $b(x)$) für eine Holzschraube (Parameter: P , α , $d1$, d).....	127
Abbildung 6.20:	Entwickelte Methoden zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen den Gewindep parameter, der Rissgeometrie im Versagen und des Haltevermögens.	128
Abbildung 6.21:	Erkenntnisse zu den modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zwischen Gewindesteigung, Versagenverhalten und Tragfähigkeit sowie der Ebene zur Holzfaserrichtung.....	129
Abbildung 7.1:	Verwendetes Gerät zur Durchführung der Ausziehversuche.	133
Abbildung 7.2:	Untersuchte Ebenen RT und TL zur Holzfaserrichtung bei tangentialer Einschraubrichtung.	133
Abbildung 7.3:	Gewinde-Testobjekte des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing zur Untersuchung der Gewindep parameter: Flankenabstand P , Profilhöhe a , Flankenwinkel α und Steigungswinkel φ . Abhängig von diesen Parametern ist die Gewindelänge $lg1$	134
Abbildung 7.4:	Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und der Profilhöhe (a) sowie des Flankenabstands (b) für die Ebenen RT und TL.....	143
Abbildung 7.5:	Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und des Flankenwinkels (a) sowie des Steigungswinkels (b) für die Ebenen RT und TL. .	144
Abbildung 7.6:	Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und der Interaktion des Flankenabstands und der Profilhöhe (a) sowie des Flankenabstands und des Steigungswinkels (b) für die Ebenen RT und TL.....	144

Abbildung 7.7:	Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzte Randmittel des Haltevermögens und der Interaktion des Flankenabstands und des Flankenwinkels (a) sowie der Profilhöhe und des Flankenwinkels (b) für die Ebenen RT und TL.....	145
Abbildung 7.9:	Vergleich des Einflusses der Gewindesteigung (a) sowie der Interaktion von Flankenabstand und Steigungswinkel (b) auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens. Vergleichbar sind die roten Trendlinien, welche in der Ebene TL eine größere Steigung aufweisen.....	149
Abbildung 7.10:	Stellschrauben für die Gestaltung von Holzschrauben mit hohem Haltevermögen. Dargestellt sind die ermittelten Einflüsse der Gewindeparameter und deren Effektgröße sowie die validierten Modellierungen, welche die Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindeparameter erklären. Diese Modellierungen bauen auf dem Druckkegel-Zugring-Modell auf und basieren auf dem gleichen physikalischen Effekt der mechanischen Spannung in den Druckkegeln.....	154
Abbildung 7.11:	Angewandte Methode zur Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen.....	155
Abbildung 7.12:	Erkenntnisse zu den Modellierungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge: Validierte Modellierungen sind Flankenabstand, Flankenwinkel und Profilhöhe. Die Modellierung des Steigungswinkels wurde falsifiziert.	156
Abbildung 8.1:	Im Flachbackenwalzverfahren hergestellte optimierte Gewindegestalten (a, b) sowie eine Referenzgewindegestalt (c). Diese Holzschrauben wurden anhand der in Tabelle 16 vorgestellten Gewindeparameter gefertigt.	161
Abbildung A.1:	Gewindekontakt des Schraubentyps A der Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i>	XV
Abbildung A.2:	Gewindekontakt der Schraubentypen D und E der Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i>	XVI
Abbildung A.3:	Visualisierte Rissbilder unterschiedlicher Gewindesteigungen für die Auswertung mittels Bilderkennungsprogramm.	XVIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Konstruktionshypothesen als methodisches Werkzeug zur Prüfung von Vermutungen.	15
Tabelle 2:	Konstruktionshypothese zum Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen.	83
Tabelle 3:	Gewählte Faktorstufen der Faktoren Gewindesteigung P und Flankenwinkel α dieser Untersuchung sowie die davon abhängigen Parameter Steigungswinkel φ und Gewindelänge $lg1$ der gefertigten Gewinde-Testobjekte.	99
Tabelle 4:	Anzahl an Ausziehversuchen N getrennt nach Gewinde-Testobjekt und Ebene zur Holzfaserrichtung.	101
Tabelle 5:	Prüfung der Gewinde-Testobjekte auf Normalverteilung ($\alpha = 0,05$).....	102
Tabelle 6:	Ergebnis der mehrfaktoriellen Varianzanalyse.	103
Tabelle 7:	Haltevermögen für die Ebenen zur Faserrichtung RT und TL. Angegeben sind Versuchsanzahl (N), die Minima (Min), Maxima (Max), Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD).	104
Tabelle 8:	Verwendete Gewinde-Testobjekte zur Untersuchung der Auswirkung der Gewindesteigung P auf das Versagenverhalten.	112
Tabelle 9:	Faktorstufen der Faktoren Flankenabstand P , Steigungswinkel φ , Flankenwinkel α und Profilhöhe a sowie die davon abhängige Gewindelänge $lg1$ für die Gewinde-Testobjekte GP_A bis GP_P.	135
Tabelle 10:	Anzahl auswertbarer Versuche N aufgelistet nach Gewinde-Testobjekt und Ebene zur Holzfaser.....	137
Tabelle 11:	Prüfung der Gewinde-Testobjekte auf Normalverteilung ($\alpha = 0,05$). Angegeben sind für die Holzfaserrichtungen RT und TL jeweils die Signifikanzwerte p für den Kolmogorov-Smirnov- sowie den Shapiro-Wilk-Test.....	138
Tabelle 12:	Ergebnis der ANOVA für die Ebene zur Holzfaser RT.	139
Tabelle 13:	Ergebnis der ANOVA für die Ebene zur Holzfaser TL.	140

Tabelle 14:	Effektgrößen für die signifikanten Effekte und Interaktionen der beiden mehrfaktoriellen Varianzanalysen der Ebene RT und TL.	141
Tabelle 15:	Haltevermögen für die Ebenen zur Faserrichtungen RT und TL. Angegeben ist die Versuchsanzahl (N), Minima (Min), Maxima (Max), Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD).	142
Tabelle 16:	Optimierte Gewindegestalten auf Basis des beschriebenen Vorgehens.	160
Tabelle 17:	Geschätzte Randmittel des Haltevermögens für die Faktorstufen der Gewindesteigung. Angegeben sind das geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM), sowie die untere und obere Grenze der 95 % Konfidenzintervalle.....	XVII
Tabelle 18:	Risslänge und Rissbreite für die unterschiedlichen Gewindesteigungen.	XVIII
Tabelle 19:	Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die untersuchten Haupteffekte (a , P , α , φ) in der Ebene RT.	XIX
Tabelle 20:	Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Interaktionen der Gewindep parameter in der Ebene RT.	XX
Tabelle 21:	Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die untersuchten Haupteffekte (a , P , α , φ) in der Ebene TL.	XXI
Tabelle 22:	Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Interaktionen der Gewindep parameter in der Ebene TL.	XXII

Abkürzungsverzeichnis

GFZ	Gestalt-Funktion-Zusammenhang
Cont.-M.	Analysetechnik <i>Continued Movement</i>
Sec.-I.	Analysetechnik <i>Sectional Imaging</i>
RT / TL	Ebenen zur Holzfaserrichtung
ANOVA	Varianzanalyse (engl. <u>a</u> nalysis <u>o</u> f <u>v</u> ariance)

Symbolverzeichnis

d	in mm	Gewindeparameter: Außendurchmesser
d_1	in mm	Gewindeparameter: Kerndurchmesser
a	in mm	Gewindeparameter: Profilhöhe
P	in mm	Gewindeparameter: Gewindesteigung, Flankenabstand
φ	in °	Gewindeparameter: Steigungswinkel
α	in °	Gewindeparameter: Flankenwinkel
r	in mm	Gewindeparameter: Flankenbreite
l_{ef}	in mm	Einschraubtiefe
ρ_K	in kg/m ³	Rohdichte von Holz
RWC	in %	Relatives Haltevermögen
σRWC	in %	Standardabweichung des relativen Haltevermögens
$R_{ax, Technik}$	in N	Haltevermögen einer Holzschraube bei Anwendung einer Analysetechnik
$R_{ax, Referenz}$	in N	Haltevermögen einer Holzschraube ohne Anwendung einer Analysetechnik
N		Versuchszahl
M		Mittelwert
SD		Standardabweichung
SEM		Standardfehler
R^2		Bestimmtheitsmaß
p		p-Wert
α		Konfidenzniveau

1 Einleitung

Die Gestaltung ist eine zentrale Tätigkeit in der Produktentwicklung, in welcher gewünschte Funktionen in eine Produktgestalt überführt werden (Matthiesen, 2021; Weber, 2012). Die Gestaltung ist dabei für die Güte der Funktionserfüllung der technischen Produkte maßgebend. Die Funktionen technischer Produkte entstehen durch die Wechselwirkungen in den Details der Produktgestalt. Die Güte der Funktionserfüllung hängt folglich von den geometrischen und stofflichen Details der Produktgestalt ab (Matthiesen, 2017). Eine Schwierigkeit in der Gestaltung ist, dass gewünschte Funktionen ausschließlich indirekt über die Definition der Produktgestalt realisiert werden können (Matthiesen, 2016). Daher ist es in der Gestaltung notwendig, dass die Zusammenhänge zwischen der zu erfüllenden Funktion und der zu definierenden Gestalt verstanden werden. Fehlt das Wissen zu diesen Zusammenhängen wird auch die Gestaltung einfacher Produkte zu einem großen Problem (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Dieses Wissen zu den sogenannten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen ist daher der Schlüssel zu einer zielgerichteten Gestaltung und damit einer erfolgreichen Produktentwicklung. Das Wissen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen wird in Phasen der Analyse aufgebaut und in Phasen der Synthese für die Definition der Produktgestalt genutzt. Gebildet wird dieses Wissen in Modellen. (Matthiesen, 2021)

Bei Holzschraubverbindungen ist die Ermittlung der für die Gestaltung notwendigen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge in der Analyse sowie das Modellieren von diesen Zusammenhängen mit besonderen Herausforderungen verbunden. Dies liegt unter anderem daran, dass im Gewindekontakt zwischen Holzschraube und Holz nur die Produktgestalt der Schraube definiert werden kann, um die gewünschten Funktionen zu realisieren. Dabei sind Holzschraubverbindungen im Holzbau eine wesentliche Bauteilverbindung für Holz-Holz- oder Metall-Holz-Verbindungen. Für die Gestaltung von Holzschrauben sind daher Modelle zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen notwendig. Das Problem ist, dass bekannte Modelle für die Gestaltung unzureichend sind, da Gestalt-Funktion-Zusammenhänge bisher nicht abgebildet werden.

Die maßgebliche Funktion von Holzschraubverbindungen ist die axiale Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit der Schraubverbindung wird durch die Wechselwirkungen zwischen Schraubengewinde und Holz bestimmt. Neben den Materialeigenschaften des Holzes sind für die Tragfähigkeit die geometrischen und stofflichen Parameter des Schraubengewindes bestimmend (Ringhofer, Brandner & Schickhofer, 2015).

Für die Gestaltung sind daher quantitative Modelle für die Zusammenhänge zwischen der Gestalt des Schraubengewindes und der Funktion Tragfähigkeit notwendig. Da die Tragfähigkeit durch das Versagen der Verbindung begrenzt wird, muss auch das Versagenverhalten untersucht werden, um die Mechanismen zu ermitteln. Für die Untersuchung des Versagens sind Analysetechniken notwendig. Mit dem Wissen zu diesen zugrundeliegenden Mechanismen können sogenannte White-Box-Modelle erarbeitet werden. In diesen Modellen können die Einflüsse der Gewindeparameter auf das Haltevermögen unter Berücksichtigung des Versagens nicht nur beschrieben, sondern auch erklärt werden. White-Box-Modelle sind aus diesem Grund gegenüber Black-Box-Modellen übertragbarer und gegenüber Anforderungsänderungen in der Gestaltung robuster. Mit diesen Modellen kann die Gestaltung von Holzschrauben unterstützt und die Optimierung von Holzschrauben hin zu höheren Tragfähigkeiten ermöglicht werden.

Hier ergibt sich eine Forschungslücke dadurch, dass eine geeignete Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern von Holzschrauben sowie den zugrundeliegenden Mechanismen im Versagen für die Gestaltung fehlen. Zudem fehlen Analysetechniken, mit welchen diese Zusammenhänge ermittelt werden können.

Das Schließen dieser Forschungslücke wird in Zukunft immer relevanter. Aufgrund der erfolgreichen Weiterentwicklung zu selbstbohrenden Holzschrauben hat deren Verwendung in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen (Frese, Fellmoser & Blaß, 2010). Zudem ist die Bedeutung von Holzschrauben durch die vermehrte Verwendung von Holz als Konstruktionswerkstoff im Bauwesen gestiegen. Architekten und Planer schätzen die natürliche Struktur und die guten raumklimatischen Eigenschaften von Holz. Holz weist als Baumaterial auch einige Umweltvorteile auf. Der Werkstoff ist nachwachsend und wiederverwendbar. Die Leistungsfähigkeit von Holzkonstruktionen wird dabei weniger von den Eigenschaften der Holzelemente, sondern von den Holzschraubverbindungen begrenzt. Besonders für die Konstruktion von immer filigraneren und schlankeren Holzbauteilen werden leistungsfähige Schraubverbindungen gefordert.

In dieser Forschungsarbeit wird untersucht, welche Gewindeparameter die Tragfähigkeit im Gewindekontakt von Holzschrauben bestimmen und wie sich diese Gewindeparameter auf das Versagenverhalten auswirken. Diese Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter und Tragfähigkeit werden in Modellen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen erklärt. Um dies zu ermöglichen, müssen entsprechende Analysetechniken bereitgestellt werden.

1.1 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in neun Kapitel, welche im Folgenden kurz beschrieben werden. Nach der Einleitung in *Kapitel 1* werden die Grundlagen und der Stand der Forschung in *Kapitel 2* beschrieben. *Kapitel 2* unterteilt sich in drei Teile. Im ersten Teil werden zunächst die Grundlagen der Gestaltung beschrieben und die für die Gestaltung notwendigen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge erläutert. Diese Grundlagen sind für das Verständnis der Gestaltung von Holzschraubverbindung notwendig. Im zweiten Teil werden Holzschraubverbindungen vorgestellt und die Gestalt der Holzschraube sowie die Funktion Tragfähigkeit beschrieben. Im dritten Teil werden die bekannten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen erläutert. Basierend auf dem Stand der Forschung wird in *Kapitel 3* das wissenschaftliche Ziel der Arbeit abgeleitet. In *Kapitel 4* werden dann das Vorgehen in der Arbeit, die Forschungsfragen und das Forschungsdesign vorgestellt.

Kapitel 5 beschreibt die experimentelle Ermittlung von Einflussgrößen auf das Versagenverhalten von Holzschraubverbindungen. Dazu werden die Analysetechniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* zur qualitativen Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt vorgestellt. Die identifizierten Einflussgrößen der Gewindegestalt und des Werkstoffs Holz werden in nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt, um Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt ermitteln zu können.

In *Kapitel 6* wird die Ermittlung des quantitativen Einflusses der identifizierten Gewindeparameter auf das Haltevermögen beschrieben. Dazu wird der Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing vorgestellt. Wesentlich an diesem Aufbau ist das abgewinkelte Schraubengewinde auf einen flachen Grundkörper, welches die identifizierten Einflüsse des Holzwerkstoffs aus *Kapitel 5* berücksichtigt und somit die Einflüsse der Gewindeparameter auf das Haltevermögen messbar macht. Weiterhin wird die quantitative Wirkung der Gewindeparameter auf das Versagenverhalten untersucht. Für diesen Zweck wird ein Vorgehen zur quantitativen Analyse der im Versagen gebildeten Risse entwickelt. Die Einflüsse der Gewindeparameter auf das Versagenverhalten und das Haltevermögen werden in Modellen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen abgebildet. Weiterhin wird eine Modellerweiterung für die im Stand der Forschung bekannten Modelle vorgeschlagen, um die Realität genauer abzubilden. Diese Modellierungen ermöglichen die Vorhersage des Einflusses der Gewindeparameter auf das Haltevermögen.

In *Kapitel 7* werden die Modellierungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge validiert. Um die Modellierungen zu validieren werden die vorhergesagten Einflüsse

der Gewindeparameter auf das Haltevermögen in einer Studie experimentell geprüft. Hierzu kommt der in *Kapitel 6* entwickelte Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing zur Anwendung.

Kapitel 8 zeigt die Bedeutung der Ergebnisse für die Gestaltung von Holzschraubengewinden auf. Die experimentell ermittelten Zusammenhänge zwischen Haltevermögen und Gewindeparametern werden für die Synthese von optimierten Gewindegestalten genutzt.

Kapitel 9 fasst die Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen sowie der relevante Stand der Forschung dargestellt. Zunächst wird die Gestaltung auf Basis des in dieser Arbeit verwendeten Verständnisses zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen erläutert. Hierzu wird der Fokus auf die Analyse sowie die Modellierung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen gelegt. Der folgende Stand der Forschung zu Holzschraubverbindungen baut auf diesem Verständnis zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen auf. Dazu wird eine Übersicht über Holzschraubverbindungen, der Holzschraubengestalt sowie der Parameter des Werkstoffs Holz gegeben. Daneben wird die Funktion Tragfähigkeit und das Versagenverhalten von Holzschraubverbindungen beleuchtet. Darauf aufbauend werden die bekannten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge bei Holzschrauben beschrieben. Der Fokus dieses Teilkapitels liegt auf experimentellen Untersuchungen sowie Modellen zum Gewindekontakt. Abschließend werden die Inhalte des Kapitels in einem Fazit zum Stand der Forschung zusammengefasst.

2.1 Gestalten auf Basis des Verständnisses zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen

Die Aufgabe der Gestaltung ist eine erwünschte Funktion für ein technisches Produkt in eine Produktgestalt zu überführen (Weber, 2012). Dazu müssen sowohl die geometrischen als auch die stofflichen Parameter des Produkts festgelegt werden (VDI 2223). Dementsprechend umfasst die Gestaltung mehrere Aktivitäten der Produktentwicklung. Die Einordnung der Gestaltung in die Produktentwicklung erfolgt innerhalb der VDI 2221-1:2019-11 (VDI 2221 Blatt 1) in die dort beschriebenen Aktivitäten: Gliedern in Module, Gestalten der Module sowie Integrieren des gesamten Produktes (Matthiesen, 2021).

Die Gestaltung ist eine herausfordernde Aufgabe in der Produktentwicklung und entscheidet über die Herstellkosten sowie die Güte der Funktionserfüllung eines Produkts (Matthiesen, 2021). Die Güte der Funktionserfüllung wird hierbei maßgeblich von den Details der Produktgestalt bestimmt. Auch die Gestaltung einfacher Produkte wird bei fehlenden Informationen zum Zusammenhang zwischen den Details der Gestalt und der Funktion zu einer Herausforderung (Ehrlenspiel & Meer-kamm, 2017). Das zentrale Element der Gestaltung zur Begegnung dieser Herausforderung ist das Wissen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (Matthiesen, 2021).

Unter Gestalt wird die Summe aller Gestaltparameter bezeichnet, welche die Produktgestalt beschreiben (Matthiesen, 2021). Unterschieden werden Gestaltparameter in Gestaltmerkmale und -eigenschaften. Gestaltmerkmale können direkt beeinflusst werden, während Gestalteeigenschaften von Gestaltmerkmalen abhängig sind und daher nur indirekt beeinflusst werden können (Weber, 2005). Die Funktion hat in der Gestaltung zwei unterschiedliche Aspekte. Einerseits die Soll-Funktion, welche den Zweck eines Produkts beschreibt, und andererseits die Ist-Funktion, welche das Verhalten eines Produkts und dessen Teilsystemen beschreibt (Matthiesen, 2021).

Der Gestalt-Funktion-Zusammenhang beschreibt den Zusammenhang der Gestaltparameter mit einer Funktion oder einem Systemverhalten. Da das für die Festlegung der Produktgestalt notwendige Wissen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen häufig zu Beginn nicht vollständig bekannt ist, entsteht die Produktgestalt iterativ. In den Iterationen entsteht neben der Produktgestalt auch das Wissen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen, welches kontinuierlich erweitert, geprüft und verbessert wird. Dieses Wissen wird in Modellen abgebildet und wird daher Modell der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge genannt. (Matthiesen, 2021)

Zentrale Aktivitäten in diesen Iterationen ist ein Wechsel aus Phasen der Analyse und der Synthese (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017). Das Ziel in der Analyse ist, Wissen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen aufzubauen. In der Synthese ist das Ziel, eine Produktgestalt zu definieren, mit der die gewünschte Soll-Funktion erfüllt wird. Für die Synthese wird das Modell zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen genutzt. Um synthesesfähig zu sein, muss das Modell zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen in ausreichender Güte vorliegen. Ist die Modellgüte nicht ausreichend, also der Zusammenhang zwischen den Gestaltparametern und der zu erfüllenden Funktion nicht hergestellt, ist zuerst ein Analyseschritt notwendig (Matthiesen, 2017). Da die Analyse in der Gestaltung immer mit dem Ziel der Synthesefähigkeit durchgeführt wird, wird diese auch synthesegetriebene Analyse genannt (Matthiesen, 2021; Ruckpaul, Kritz & Matthiesen, 2014).

Zusammenfassend ist die Aufgabe in der Gestaltung, eine Produktgestalt zu definieren, welche die gewünschten Funktionen erfüllt. Die Überführung der Funktionen in eine Produktgestalt erfolgt in der Synthese durch die Nutzung des Modells der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. In der synthesegetriebenen Analyse werden die funktionsrelevanten Gestaltparameter identifiziert und das Modell der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge aufgebaut. Zentrales Element der Gestaltung ist daher das Modell der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge, ohne welches keine zielgerichtete Gestaltung möglich ist. Das Ermitteln dieses Modells in der Analyse ist jedoch eine Herausforderung für die Gestaltung.

Nachfolgend wird daher zuerst auf die Phase der Analyse mit dem Fokus auf die Beobachtung des Systemverhaltens eingegangen. Danach werden die Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge betrachtet.

2.1.1 Analyse des Systemverhaltens durch Beobachtung

Ein Ziel des Vorgehens in der Analyse ist es, herauszufinden, wie sich ein Produkt verhält (Weber, 2012). Das Verhalten eines Produkts entsteht durch die Wechselwirkung des Produkts zur Systemumgebung sowie aus der Interaktion der Gestaltparameter miteinander (Matthiesen, 2021). Das tatsächliche Verhalten kann von dem erwarteten Systemverhalten, beispielsweise aufgrund von Verschleiß, unbekanntem Materialeigenschaften oder unklaren Reibungseffekten, abweichen. In diesen Fällen ist es nicht immer möglich, genau vorherzusagen, welches Verhalten ein Teilsystem oder ein Produkt im Betrieb aufweist und welche Auswirkungen sich daraus ergeben (Badke-Schaub & Frankenberger, 2004). Auch wenn die Ermittlung des Verhaltens mittels Berechnung und Simulation aus Ressourcengründen zwar zu bevorzugen ist, ist bei unbekanntem Eigenschaften die Analyse des tatsächlichen Verhaltens des Produkts notwendig (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017).

Um das Verhalten des Produkts zu analysieren, kann dieses beobachtet werden. Unter Beobachtung wird im Kontext dieser Arbeit das Betrachten des Systemverhaltens durch qualitative Methoden verstanden. Die Beobachtung des Systemverhaltens kann direkt, beispielsweise durch Hochgeschwindigkeitsvideos, oder indirekt, beispielsweise durch Röntgenbildgebung, erfolgen (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b).

Durch die Beobachtung des Verhaltens können unbekannte Wechselwirkungen und Einflussgrößen identifiziert werden (Matthiesen, 2021). Es ist oft nur möglich, Fehler und Schwachstellen in der Konstruktion zu erkennen, indem das Produkt in Wechselwirkung zur Systemumgebung beobachtet wird (Lindemann, 2009). Die Analyse des tatsächlichen Systemverhaltens durch Beobachtung ist somit notwendig, um Erkenntnisse zu den Zusammenhängen von Gestalt und Funktion zu erlangen (Matthiesen, 2021).

2.1.1.1 Überwinden der Beobachtungsbarriere durch Analysetechniken

Die Beobachtung des Systemverhaltens ist jedoch oft nicht einfach (Matthiesen, 2021), denn es können verschiedene Fehler auftreten (Rouse & Rouse, 1983; Zanker, 1999). Nach Zanker (1999) können drei Klassen von Fehlern unterschieden werden, die bei der Beobachtung eines Systems auftreten. Dies sind: **Informationen nicht verfügbar**, **fehlerhafte Beobachtung** und **falsche Interpretation**. Für

eine zielgerichtete Analyse sollten diese Fehler bei der Beobachtung des Systemverhaltens berücksichtigt und nach Möglichkeit ausgeschlossen werden (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b).

Die erste Fehlerklasse **Information nicht verfügbar** beinhaltet die grundlegende Herausforderung bei der Beobachtung des Systemverhaltens, wenn Teile eines Produkts nicht direkt beobachtbar und/oder nicht direkt zugänglich sind. Badke-Schaub und Frankenberger (2004) beschreiben dies als Intransparenz. Dadurch entsteht eine Barriere, welche die Beobachtung einschränkt. Wintergerst (2015) nennt diese Barriere eine Beobachtungsbarriere. Eine „Beobachtungsbarriere bezeichnet eine eingeschränkte Zugänglichkeit der Orte der Funktionserfüllung für eine Beobachtung oder Prognose von Wirkzusammenhängen in technischen Systemen“ (Wintergerst, 2015, S. 118). Wenn eine Beobachtungsbarriere auftritt und keine Beobachtung des Systemverhaltens möglich ist, muss sich die Gestaltung auf Annahmen zum Systemverhalten verlassen. Eine fehlende oder unzureichende Analyse des Systemverhaltens kann zu falschen Annahmen führen. Falsche Annahmen führen wiederum zu Iterationen, die den Entwicklungsprozess verzögern (Meboldt, Matthiesen & Lohmeyer, 2012; Wynn & Eckert, 2017).

Durch die Überwindung der Beobachtungsbarriere kann unbekanntes Systemverhalten untersucht werden und die funktionsrelevanten Gestaltparameter identifiziert werden (Matthiesen, 2021). Erst wenn die Beobachtungsbarriere überwunden ist, ist es möglich die Fehlerklassen **fehlerhafte Beobachtung** oder **falsche Interpretation** zu adressieren (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b).

Eine Möglichkeit, um Beobachtungsbarrieren zu überwinden, ist die Nutzung von Heuristiken (Wintergerst, 2015) und Analysetechniken (Matthiesen, 2021). Unter Heuristiken werden kognitive Abkürzungen verstanden, die aus erfolgreichen und intuitiven Vorgehensweisen und Erfahrungen resultieren (Thau, 2013; Yilmaz, Daly, Seifert & Gonzalez, 2015). Eine Vielzahl an allgemeinen Heuristiken und deren spezifische Beschreibung in Form von Analysetechniken werden von Thau (2013) beschrieben. Analysetechniken sind Methoden, mit welchen die Beobachtung des Systemverhaltens ermöglicht wird. Solche Methoden sind dann notwendig, wenn durch intuitive Vorgehensweisen eine Beobachtungsbarriere nicht überwunden wird und somit das Systemverhalten nicht oder nur ungenügend beobachtet werden kann. Beispiele für bekannte Analysetechniken sind Perspektivenwechsel, bildgebende Verfahren wie spannungsoptische Analysen, Schnittmodelle oder material-durchdringende Verfahren wie Röntgenbildgebung.

Eine Schwierigkeit bei der Anwendung von Analysetechniken ist, dass diese für eine erfolgreiche Beobachtung des Systemverhaltens meist an das konkrete System

angepasst oder mehrere Analysetechniken dafür kombiniert werden müssen (Thau, 2013). Dabei ist unklar, wann welche Analysetechnik für eine bestimmte Anwendung eingesetzt werden soll oder welche kombiniert werden können (Thau, 2013). Die Herausforderung ist daher die Auswahl geeigneter Analysetechniken für die Systembeobachtung (Matthiesen, Hölz & Grauberger, 2017). Dies ist für Kapitel 5 relevant, in welchem der Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen mit dafür geeigneten Analysetechniken untersucht werden soll.

2.1.1.2 Methode zur Auswahl und Kombination von Analysetechniken

Eine Methode für die Auswahl und die Kombination von Analysetechniken zur Überwindung der Beobachtungsbarriere wird von Hölz, Grauberger und Matthiesen (2020b) beschrieben. Diese Methode besteht aus der sogenannten *Selection Matrix* sowie einem dreistufigen Prozess zur Anwendung dieser Matrix.

Die *Selection Matrix* ist zweidimensional aufgebaut. In der ersten Dimension werden die Analysetechniken spaltenweise eingetragen. In der zweiten Dimension sind zeilenweise Anforderungen an die Analysetechniken angeordnet. Die Analysetechniken können anhand dieser Anforderungen bewertet werden. Eine Bewertung ist in den drei Stufen: *erfüllt*, *nicht erfüllt* oder *nicht bewertbar* möglich. Für jede Analysetechnik kann anschließend spaltenweise die Summe aus erfüllten und nicht erfüllten Anforderungen berechnet werden. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

Die Anforderungen an die Analysetechniken basieren auf den drei Fehlerklassen von Zanker (1999). Für jede Fehlerklasse wurden von Hölz, Grauberger und Matthiesen (2020b) verschiedene Anforderungen abgeleitet. Die Anforderungen an die erste Fehlerklasse **Informationen nicht verfügbar** sind: (1) ein beobachtbares Systemverhalten, (2) ein beobachtbarer Kontakt und (3) eine Kombination mit Messdaten. Die zweite Fehlerklasse **fehlerhafte Beobachtung** wird durch die Anforderungen (4) minimale Änderung des Verhaltens und (5) minimale Änderung des Kontakts beschrieben. Die dritte Fehlerklasse **falsche Interpretation** setzt sich aus den Anforderungen (6) Reproduzierbarkeit der Effekte und (7) sichtbare Effektstärke zusammen. Die Analysetechniken werden anhand dieser sieben Anforderungen bewertet, um ihre Eignung zur Beobachtung des Systemverhaltens zu bestimmen (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b). Dargestellt sind die Anforderungen in der *Selection Matrix* in Abbildung 2.2.

Im ersten Prozessschritt werden die Analysetechniken entsprechend der gestellten Anforderungen der *Selection Matrix* bewertet. Die Bewertung der Anforderungen erfolgt auf der Grundlage von Expertenwissen, Literatur oder der Anwendung der Analysetechniken in einer Vorstudie. Im zweiten Schritt können die Analysetechniken anhand der Summe der erfüllten und nicht erfüllten Anforderungen miteinander

verglichen und geeignete Analysetechniken ausgewählt werden. Im letzten Schritt wird geprüft, ob Kombinationen von Analysetechniken zielführend sind. Durch den Vergleich der Erfüllung der einzelnen Anforderungen der Analysetechniken können potentielle Kombinationsmöglichkeiten ermittelt werden. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

Als Anwendungsbeispiel wurde die *Selection Matrix* von Hölz, Grauberger und Matthiesen (2020b) an einer Holzschraubverbindung angewandt. Ziel der Anwendung war die Beobachtung des Gewindekontakts zur synthesegetriebenen Analyse. Dazu wurden die in Abbildung 2.1 dargestellten Analysetechniken untersucht.

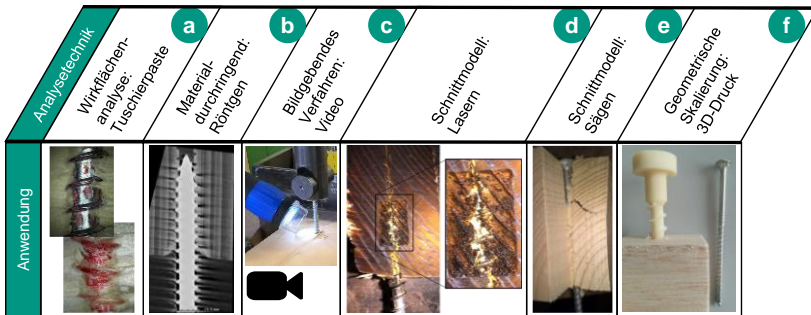


Abbildung 2.1: Angewandte Analysetechniken zur Beobachtung des Gewindekontakts einer Holzschraubverbindung. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

Die Analysetechnik zur Wirkflächenanalyse wurde mittels einer Tuscherpaste (a) zur Bestimmung von Wirkflächenpaaren im Gewindekontakt verwendet. An Stellen, die bei der Funktionserfüllung in Kontakt treten wird Farbe abgetragen und es können Wirkflächenpaare identifiziert werden. Durch die materialdurchdringende Beobachtung Röntgen (b) wurden Wirkflächenpaare in der Funktionserfüllung bestimmt. Mittels des bildgebenden Verfahrens Video (c) wurde der Ausziehvorgang der Schraubverbindung zeitkontinuierlich beobachtet. Durch das teilweise Entfernen des Gewindekontakts mittels eines Lasers wurde das gelaserte Schnittmodell (d) zur Beobachtung des Gewindekontakts erstellt. Die Analysetechnik gesägtes Schnittmodell (e) wurde durch das Aussägen eines Keils entlang der Schraubachse umgesetzt. Für eine für Menschen handhabbare Beobachtung der Bereiche

der Funktionserfüllung wurde die Schraubverbindung mit einem 3D-Druck-Prototyp geometrisch skaliert. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

Diese Analysetechniken wurden nach ihrer Anwendung anhand der Anforderungen der *Selection Matrix* bewertet. Als Beispiel ist die Bewertung der Anforderung beobachtbarer Kontakt beim Röntgen genannt. In Abbildung 2.1 können schwarze Streifen im Gewindekontakt, sogenannte Aufhärtungsartefakte, erkannt werden. Dies ist eine Bildstörung, welche durch den Dichteunterschied zwischen Holzschraube, Holz und Luft entsteht und bewirkt, dass der Gewindekontakt nicht beobachtet werden kann. Die *Selection Matrix* mit den bewerteten Anforderungen der Analysetechnik ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Fehlerklasse		Anforderung	Analysetechnik						
			Tuschierpaste	Röntgen	Video	Gelaseres Schnittmodell	Gesägtes Schnittmodell	Vergrößerter 3D-Druck Prototyp	
Informationen nicht verfügbar	Beobachtbares Systemverhalten	X	-	✓	-	✓	✓		
	Beobachtbarer Kontakt	X	X	X	X	✓	X		
	Kombination mit Messwert möglich	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Fehlerhafte Beobachtung	Minimale Veränderung des Verhaltens	-	✓	✓	-	-	X		
	Minimale Veränderung des Kontakts	X	✓	-	-	X	X		
Falsche Interpretation	Reproduzierbarkeit der Effekte	✓	✓	✓	X	X	✓		
	Sichtbare Effektstärke	X	X	X	X	✓	✓		
			2 ✓	4 ✓	4 ✓	1 ✓	4 ✓	4 ✓	
			4 X	2 X	2 X	3 X	2 X	3 X	

Abbildung 2.2: Bewertete Analysetechniken mittels der *Selection Matrix* zur Beobachtung einer Holzschraubverbindung. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

Die *Selection Matrix* zeigt, dass die Analysetechnik *gelasertes Schnittmodell* mit nur einer erfüllten Anforderung am schlechtesten bewertet wurde. Die Analysetechniken Röntgen, Video und vergrößerter 3D-Druck-Prototyp konnten jeweils vier Anforderungen erfüllen und zwei Anforderungen nicht erfüllen. Die untersuchten Analysetechniken erfüllen jedoch insgesamt nur wenige Anforderungen und zeigen somit große Schwächen zur Überwindung der Beobachtungsbarriere einer Holzschraubverbindung. Für eine Beobachtung des Systemverhaltens von Holzschraubverbindungen sind diese daher nur bedingt geeignet. Potential für eine mögliche Kombination zeigen die Analysetechniken Video und gesägtes Schnittmodell, bei welcher einige Schwächen durch Stärken der jeweils anderen Technik kompensiert werden können. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die für die Gestaltung notwendigen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge in der synthesegetriebenen Analyse erarbeitet werden. Ein Vorgehen in der Analyse ist die Beobachtung des Systemverhaltens. Aufgrund von Beobachtungsbarrieren ist diese Beobachtung nicht immer möglich. Beobachtungsbarrieren können mit Analysetechniken überwunden werden. Im Stand der Forschung ist eine *Selection Matrix* verfügbar, die eine Auswahl geeigneter Analysetechniken unterstützt. Die für Holzschraubverbindung vorgestellten Analysetechniken zeigen in der *Selection Matrix* nur eine geringe Anzahl an erfüllten Anforderungen. Diese Analysetechniken sind daher nicht geeignet, da sie die Beobachtungsbarriere nur unzureichend überwinden. Aus der *Selection Matrix* ergibt sich jedoch eine potentielle Kombination zweier Analysetechniken für die Beobachtung von Holzschraubverbindungen.

2.1.2 Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

Zentrale Elemente in der Gestaltung sind Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (Matthiesen, 2021). Im Folgenden werden die unterschiedlichen Ausprägungen dieser Modelle vorgestellt.

Unterschieden werden kann zwischen qualitativen und quantitativen Modellen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. **Qualitative Modelle** bilden qualitative, logische Abhängigkeiten ab und beschreiben, ob ein Parameter prinzipiell relevant ist. Eine mögliche Formulierung für qualitative Modelle ist die Verwendung von „Wenn-Dann“-Beziehungen (Bungartz, Zimmer, Buchholz & Pflüger, 2013). Mit einem solchen Modell können nur qualitative Aussagen zum Einfluss eines Gestaltparameters auf die Funktion getroffen werden. Im Gegensatz dazu werden in **quantitativen Modellen** den Variablen quantitative Werte zugewiesen (Bungartz et al., 2013). In quantitativen Modellen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge liegen sowohl die Gestaltparameter als auch die Funktionen in messbaren Größen vor

(Matthiesen, 2021). Für diese Quantifizierung ist eine geeignete Umgebung notwendig, in welcher der Einfluss definierter Gestaltparameter auf das messbare Systemverhalten analysiert werden kann (Matthiesen, 2021).

Weiterhin kann in Black-Box- und White-Box-Modelle unterschieden werden. Diese Unterscheidung basiert auf der Grundlage der Modellbildung, welche entweder auf Beobachtungen und Experimenten oder auf physikalischen Gesetzen aufbaut (Schmitt & Andres, 2019). Ein **Black-Box-Modell** wird anhand von experimentell bestimmten Parametern aus Ein- und Ausgangssignalen aufgebaut (Ashby, 1961; Günther & Velten, 2014). Der funktionale Zusammenhang mit den physikalischen Daten ist jedoch unbekannt (Isermann, 1999). Ein Black-Box-Modell beschreibt somit den Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion ohne Wissen zu den physikalischen Zusammenhängen. Diese Modelle werden auch phänomenologische Modelle, empirische Modelle, statistische Modelle, experimentelle Modelle oder datenbasierte Modelle genannt (Günther & Velten, 2014). **White-Box-Modelle** enthalten neben den Parametern auch den funktionalen Zusammenhang zwischen diesen Parametern (Isermann, 1999). Diese Modelle können durch das Wissen zu den physikalischen Vorgängen und den zugrundeliegenden Mechanismen die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge nicht nur beschreiben, sondern auch erklären. White-Box-Modelle werden auch mechanistische Modelle oder theoretische Modelle genannt. Eine Voraussetzung für White-Box-Modelle ist demnach, dass das Wissen zu den physikalischen Vorgängen bekannt ist. (Günther & Velten, 2014)

Ein Vorteil von Black-Box-Modellen ist, dass ihre Erstellung üblicherweise weniger Zeit und Ressourcen erfordern, jedoch ist ihr Anwendungsbereich sehr eingeschränkt. White-Box-Modelle erlauben durch das Wissen zu den funktionalen Zusammenhängen tiefere Einsichten in das Systemverhalten, genauere Vorhersagen, Vorhersagen auch außerhalb des geprüften Bereichs und sind auf andere Systeme übertragbarer (Günther & Velten, 2014).

Die Unterscheidung von Black-Box und White-Box-Modelle nach Isermann (1999) entsprechend des Verhältnisses zwischen theoretischem und experimentellem Anteil ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Da in der Praxis häufig das Gesamtverhalten eines Systems nicht ausschließlich anhand physikalischer Gesetze beschrieben werden kann, gibt es auch Mischungen aus Black-Box- und White-Box-Modellen (Schmitt & Andres, 2019). Diese sogenannten **Grey-Box-Modelle** basieren sowohl auf durch Messung gewonnenen Erkenntnissen als auch auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten (Schmitt & Andres, 2019). Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, können Grey-Box-Modelle in verschiedenen Grautönen feiner untergliedert werden.

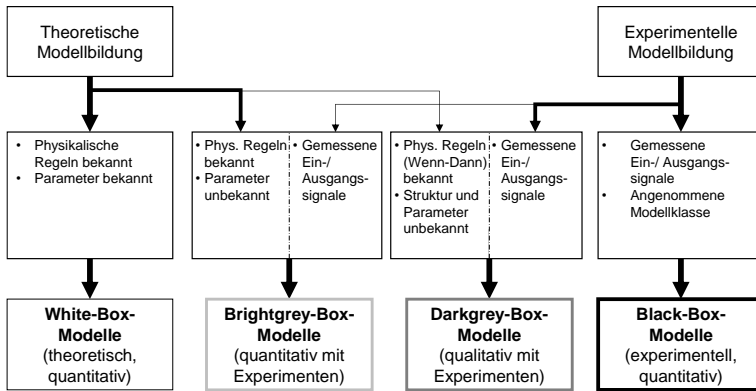


Abbildung 2.3: White-Box- und Black-Box-Modelle sowie unterschiedliche Grey-Box-Modelle, je nach Verhältnis an theoretischem und experimentellem Anteil. Übersetzt aus (Isermann, 1999)

Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung ist, dass Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge entweder als **Vermutungen** oder als **geprüfte Erkenntnis** vorliegen können (Matthiesen, 2021). Unter Vermutungen werden Annahmen zu den Zusammenhängen von Gestalt und Funktion verstanden, welche noch nicht geprüft sind. Durch geeignete Prüfung können diese validiert oder widerlegt werden und somit als geprüfte Erkenntnis vorliegen. Ein methodisches Werkzeug zur Prüfung dieser Vermutungen sind Konstruktionshypothesen. Konstruktionshypothesen folgen dem Leitsatz „Wenn-Dann-Weil“ und entsprechen somit dem Aufbau von wissenschaftlichen Hypothesen (Matthiesen, Grauberger, Nelius & Hölz, 2017).

In der „Wenn“-Beschreibung wird der quantitative Gestaltparameter als unabhängige Variable beschrieben. Der „Dann“-Teil enthält die messbare Funktionsänderung. Diese Zusammenführung des Gestaltparameters mit einem funktionalen Parameter entspricht einem Black-Box-Modell des Zusammenhangs. Im „Weil“-Abschnitt wird die Modellvorstellung zur Ursache des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs genannt (Matthiesen et al., 2017). Mit dieser Modellvorstellung der Ursache werden Vermutungen zu den physikalischen Vorgängen und den zugrundeliegenden Mechanismen verstanden. Durch diesen Leitsatz wird die Modellierung von White-Box-Modellen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen unterstützt. Abschließend wird die Prüfung der Modellvermutung sowie das Ergebnis dieser Prüfung expliziert (Matthiesen et al., 2017). In Tabelle 1 ist der Aufbau dieser Konstruktionshypothesen gezeigt.

Tabelle 1: Konstruktionshypothesen als methodisches Werkzeug zur Prüfung von Vermutungen. (Matthiesen et al., 2017)

Hypothesentitel: Nummer und Beschreibung des Gestaltparameters		
Leitsatz	Wenn	Konkreter Gestaltparameter mit Angabe der Referenz
	Dann	Erwartete messbare Funktionsveränderung im Vergleich zur Referenz
	Weil	Modellvorstellung der Ursache der Funktionsveränderung
Prüfung	Beschreibung des Experiments mit allen relevanten Randbedingungen	
Ergebnis	Ergebnis der Hypothesenprüfung. Hieraus entsteht eine Handlungsempfehlung	

Konstruktionshypothesen können somit für die strukturierte Erkenntnisgewinnung von quantifizierten White-Box-Modellen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen in der synthesegetriebenen Analyse genutzt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Modell der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge das zentrale Element der Gestaltung ist. Dieses Modell kann unterschiedlich ausgeprägt sein. Unterschieden werden kann in qualitativ und quantitativ, in White-Box, Black-Box und Grey-Box sowie in Vermutung und geprüfte Erkenntnis. Eine methodische Unterstützung zur Validierung von quantitativen White-Box-Modellen bieten Konstruktionshypothesen. Ein validiertes, quantitatives White-Box-Modell ist das in der Gestaltung zu bevorzugende Modell, um eine Produktgestalt zu definieren. Ein validiertes, quantitatives Black-Box-Modell zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen ist für die Synthesefähigkeit jedoch ausreichend. Durch das quantitative Modell, welche Gestaltparameter die Funktionserfüllung beeinflussen, kann die Produktgestalt definiert werden. Der Gestaltungsraum ist durch den Gültigkeitsbereich von Black-Box-Modellen jedoch eingeschränkt. Das Modell ist nur im geprüften Wertebereich gültig. Bei Änderungen muss dieses Wissen in Experimenten neu erzeugt werden. Auch ist die Übertragbarkeit von Black-Box-Modellen der Gestalt-Funktion-Zusammenhängen auf Entwicklungs- oder Produktgenerationen eingeschränkt. Durch das Verständnis der funktionalen Zusammenhänge und des Systemverhaltens kann mit White-Box-Modellen in der Gestaltung besser auf geänderte Anforderungen reagiert werden.

2.2 Holzschraubverbindungen

Holzschraubverbindungen sind eine Standardlösung für kraftschlüssige und lösbare Verbindungen im Holzbau und Ingenieurholzbau. Eine Holzschraubverbindung verwendet Holzschrauben aus Stahl für die Verbindung von Elementen aus Holz, Holzwerkstoffen sowie für Metall-Holz-Verbindungen (Sydor, 2019). Holzschraubverbindungen zeichnen sich durch ein breites Anwendungspotenzial aus und sind aus wirtschaftlicher Perspektive sehr attraktiv (Ballerini, 2012). Die Verwendung von Schrauben als Holzbefestigungsmittel geht dabei auf eine über 460 Jahre lange Tradition zurück (Sydor, 2019). Weltweit gibt es über 600 unterschiedliche Patente, die sich auf Schrauben für Holzwerkstoffe beziehen (Sydor, 2019). Gegenüber Maschinenschrauben unterscheiden sich Holzschrauben durch ihre Art und Form des Gewindes (Schweizer, 2003). Holzschrauben weisen ein tiefeingeschnittenes Gewinde mit großer Steigung und ausgeprägter Spitze auf (Schweizer, 2003). Für das Einschrauben ist kein vorhandenes Gegengewinde, zum Beispiel eine Gewindebohrung oder Mutter notwendig. Holzschrauben formen das für die Kraftübertragung notwendige Gewinde beim Einschraubvorgang.

Holzschrauben werden in genormte Holzschrauben und selbstbohrende Holzschrauben unterschieden. Genormte Holzschrauben, auch Holzbauschrauben genannt, werden beispielsweise in DIN 95:2016-12 (DIN 95), DIN 96:2016-12 (DIN 96), DIN 97:2016-12 (DIN 97) oder DIN 571:2016-12 (DIN 571) beschrieben. Diese Holzbauschrauben weisen eine Gewindeform nach DIN 7998:1975-02 (DIN 7998) auf.

Selbstbohrende Holzschrauben weisen gegenüber genormten Holzschrauben eine variable, nicht genormte Gewindegeometrie auf. Für die Verwendung in tragenden Holzverbindungen müssen diese Schrauben aus diesem Grund die Bauproduktverordnung auf Grundlage der CE-Kennzeichnung mittels Nachweises einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA) oder EN 14592:2012-07 (DIN EN 14592) erfüllen. Jede Zulassung bedingt eine eigene Versuchsserie mit der jeweiligen Holzschraube (Pirnbacher & Schickhofer, 2007). Auf Basis der in der Versuchsserie ermittelten Kennwerte wird die einzelne Zulassung erstellt. Selbstbohrende Holzschrauben konnten sich trotz höherer Stückkosten aufgrund der einfachen und wirtschaftlichen Montage am Markt durchsetzen. Bei diesen Schrauben ist kein Vorbohren des Holzes notwendig, was in der Regel zu erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen führt (Ballerini, 2012). Obwohl kein Vorbohren notwendig ist, wird eine hohe Tragfähigkeit und Steifigkeit in axialer Richtung ermöglicht (Ringhofer, Brandner & Schickhofer, 2015). Seit der Entwicklung von selbstbohrenden Holzschrauben werden genormte Holzschrauben daher immer weniger verwendet (Racher, 2016).

Selbstbohrende Holzschrauben werden neben ihrer Anwendung als Verbindungselement zunehmend auch als Verstärkungselement eingesetzt (Ringhofer, Brandner & Schickhofer, 2015). Typische Anwendungen von selbstbohrenden Holzschrauben im Holzbau sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

In Abbildung 2.4 a, b sind Holzschrauben als Verbindungselement für eine Hauptträger-Nebenträger-Verbindung dargestellt. Die Holzschrauben werden bevorzugt schräg angeordnet, wodurch die Holzschraube insbesondere in Achsrichtung und weniger rechtwinklig zur Schraubenachse beansprucht wird (Frese et al., 2010). Somit kann die hohe axiale Tragfähigkeit der Holzschraube effizient ausgenutzt werden (Ayoubi, 2014). Gegenüber der traditionellen Verbindungstechnik mit rechtwinkliger Einschraubrichtung können dadurch deutlich tragfähigere und steifere Verbindungen erzeugt werden (Blaß, Bejtka & Uibel, 2006). In Abbildung 2.4 c - e sind Holzschrauben als Verstärkungselement dargestellt. Holzschrauben werden als Verstärkungselement hauptsächlich rechtwinklig zur Faserrichtung eingesetzt (Blaß et al., 2006). So werden Holzschrauben an Auflagern (c) zur Querdrukverstärkung eingesetzt, um die Drucktragfähigkeit des Holzes senkrecht zur Faserrichtung zu erhöhen und eine größere Auflagerkraft zu erzielen (Ayoubi, 2014).

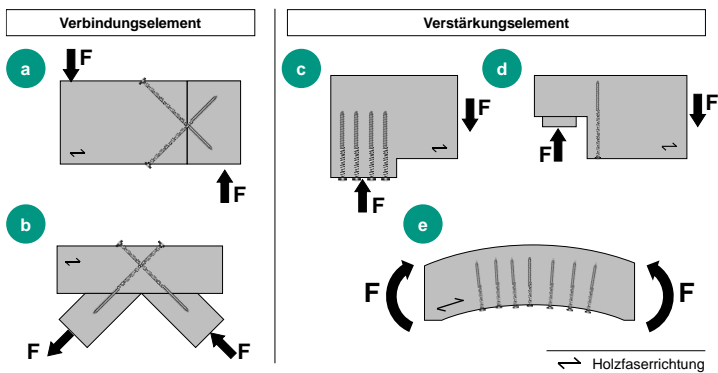


Abbildung 2.4: Typische Anwendungen von selbstbohrenden Holzschrauben im Holzbau nach Ayoubi (2014): Holzschrauben als Verbindungselement (a, b) sowie als Verstärkungselement eines Auflagers (c), einer Trägersausklinkung (d) und bei Brettstichholzträgern (e).

Eine mit Holzschrauben verstärkte Trägerschulter ist in Abbildung 2.4 d dargestellt. Dort wirken Holzschrauben als Verstärkungselement gegenüber einer Querkraftbeanspruchung zur Vermeidung des Spaltens des Holzes (Ayoubi, 2014). Eine weitere Anwendung stellt die Verwendung von Holzschrauben in gekrümmten Holzträgern (e) dar. Auch dort werden Holzschrauben zur Querkraftverstärkung eingesetzt, um ein Aufreißen der Brettschichtholzträger quer zur Faserlängsrichtung zu verhindern. Durch diese Verstärkung mit selbstbohrenden Holzschrauben kann die Tragfähigkeit der Holzträger um bis zu 50 % gesteigert werden. (Ayoubi, 2014)

Im Folgenden wird zuerst auf das Verbindungs- und Verstärkungselement Holzschraube und dessen Gestaltungsparameter eingegangen. Danach wird der Werkstoff Holz mit Fokus auf Aufbau und Parameter beschrieben. Am Ende werden die für eine axiale Belastung der Schraubverbindung relevanten Versagensarten und die Funktion axiale Tragfähigkeit erläutert.

2.2.1 Gestalt der Holzschraube

Aufgrund der Variabilität in der Schraubengestalt gibt es viele verschiedene Schraubentypen (Pirnbacher & Schickhofer, 2007). Die große Formvielfalt hat daher zu etlichen Zulassungen geführt (Frese & Blaß, 2009). Selbstbohrende Holzschrauben sind mit einem Gewindeaußendurchmesser bis zu 14 mm und einer Länge von über 1,5 m erhältlich (Racher, 2016). Allgemein können bei Holzschrauben nach Sydor (2019) die fünf unterschiedlichen Elemente Kopf, Schaft, Fräsrippen, Gewinde und Spitze unterschieden werden. In Abbildung 2.5 sind diese Hauptelemente für Holzschrauben verschiedener Hersteller gezeigt.

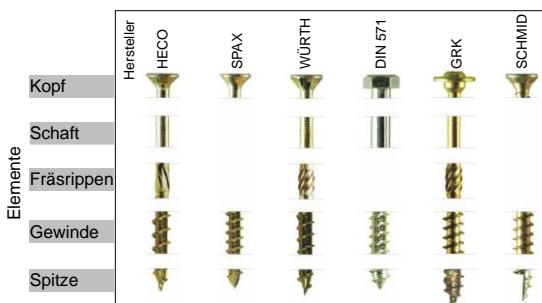


Abbildung 2.5: Vergleich der Elemente von Holzschrauben unterschiedlicher Hersteller. Eigene Darstellung nach Pirnbacher und Schickhofer (2007).

Selbstbohrende Holzschrauben, welche ein durchgehendes Gewinde zwischen Spitze und Kopf, ohne Fräsrippen und Schaft aufweisen, werden Vollgewindeschrauben genannt. Selbstbohrende Holzschrauben mit Schaft werden Teilgewindeschrauben genannt (Blaß, 2007). Schrauben können auch zusätzliche Nebenelemente aufweisen, beispielsweise Fräsrippen innerhalb des Gewindes. Die in Abbildung 2.5 dargestellten Holzschrauben der Hersteller HECO, WÜRTH und GRK sind Teilgewindeschrauben, dementsgegen sind die Schrauben von SPAX sowie SCHMID Vollgewindeschrauben. Daneben ist auch eine genormte Holzschraube nach DIN 571:2016-12 (DIN 571) abgebildet.

Die Elemente der Holzschraube sind für unterschiedliche Funktionen relevant. Die Spitze der Schraube formt das Gegengewinde und sorgt bei selbstbohrenden Holzschrauben für das Vorbohren (Sydor, 2019). Das Gewinde überträgt die Kräfte in das Holz (Sydor, 2019). Definiert werden kann das Gewinde nach ISO 5408:2009-06 (ISO 5408) durch verschiedene Gestaltparameter. In Abbildung 2.6 sind diese relevanten Parameter des Holzschraubengewindes dargestellt.

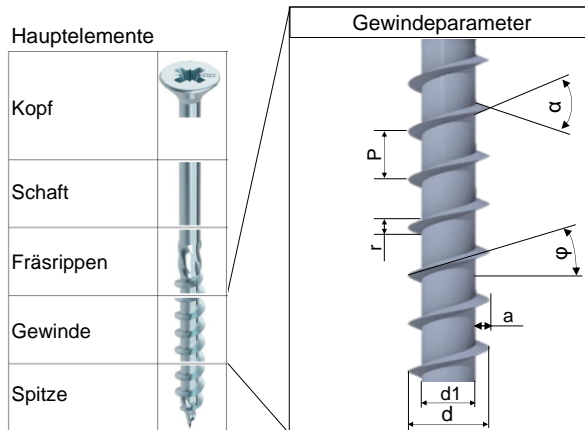


Abbildung 2.6: Hauptelemente von Holzschrauben nach Sydor (2019) und die relevanten Gewindeparameter nach Hölz, Kleinhans und Matthiesen (2021): Außendurchmesser d , Kerndurchmesser d_1 , Gewindesteigung P , Flankenwinkel α , Steigungswinkel ϕ und Profilhöhe a . Die Flankenbreite r ist geometrisch von der Profilhöhe und dem Flankenwinkel abhängig.

Der Außendurchmesser d , auch Gewindedurchmesser genannt, ist der Durchmesser einer imaginären zylindrischen Fläche, welche die Gewindespitzen des Gewindes tangiert (ISO 5408).

Der Innen- oder Kerndurchmesser d_1 ist der Durchmesser einer imaginären zylindrischen Fläche, der den Gewindegrund des Gewindes tangiert (ISO 5408). Als charakteristische Größe zur Beschreibung von Gewinden wird in der Literatur oftmals das Verhältnis von Kerndurchmesser zu Außendurchmesser d_1/d verwendet. Diese Größe wird auch für eine Abschätzung des Umformgrads bei der Herstellung der Schraubengewinde genutzt.

Die Profilhöhe a ist durch den radialen Abstand zwischen der Gewindespitze und des Gewindegrunds einer Gewindeflanke definiert (ISO 5408:2009). Die Profilhöhe entspricht der halben Differenz zwischen Außendurchmesser und Kerndurchmesser.

Die Gewindesteigung P , oder kurz Steigung genannt, ist die veränderte Höhe einer Gewindeflanke während einer Umdrehung. Der Flankenabstand ist der axiale Abstand zwischen einer Gewindeflanke und der unmittelbar benachbarten Flanke. Bei eingängigen Gewinden sind die Steigung und der Flankenabstand gleich groß. Bei mehrgängigen Gewinden gehören die nebeneinander liegenden Gewindeflanken nicht zu einer Steigung. (ISO 5408)

Der Flankenwinkel α ist der Winkel, welcher von zwei benachbarten Flanken in einer axialen Ebene gebildet wird (ISO 5408). Bei asymmetrischen Flanken wird der Flankenwinkel in einen oberen α_1 und unteren α_2 Flankenwinkel, bezogen auf eine Senkrechte zur Schraubenachse, unterschieden. Der Flankenwinkel α bildet in diesem Fall die Summe aus dem oberen α_1 und unteren α_2 Flankenwinkel.

Die Flankenbreite r ist die Breite der Gewindeflanke auf Höhe des Gewindegrunds. Die Flankenbreite, Profilhöhe und Flankenwinkel sind durch das dreieckige Grundprofil der Flanke geometrisch voneinander abhängig.

Der Steigungswinkel φ ergibt sich aus der Steigung des Gewindes. Er ist der spitze Winkel durch die Tangente der Helix und der Ebene senkrecht zur Achse des Zylinders (ISO 5408). Dieser Winkel kann nach ISO 5408:2009-06 (ISO 5408) entsprechend der abgewickelten Schraubenhelix mit Formel 1 berechnet werden.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{P}{\pi \cdot d}\right) \quad 1$$

Zusammenfassend wird das eingängige Gewinde einer Holzschraube durch die folgenden Parameter beschrieben:

- Außendurchmesser: d
- Kerndurchmesser: d_1
- Profilhöhe: a
- Gewindesteigung: P (bei mehrgängig: Unterscheidung zu Flankenabstand)
- Flankenwinkel: α (bei asymmetrischen Flanken: α_1 und α_2)
- Steigungswinkel: φ

2.2.2 Parameter des Werkstoffs Holz

Im Folgenden wird der Werkstoff Holz erläutert, da die Tragfähigkeit der Schraubverbindung von dem Aufbau und den Parametern des Holzes abhängt. Holz ist ein natürlicher, anisotroper und inhomogener Werkstoff, welcher durch das Wachstum von Bäumen entsteht (Hoffmeyer, 2016). Die im Bauwesen in Mitteleuropa am meisten verwendeten Holzarten sind Nadelhölzer (Hoffmeyer, 2016). Holzschrauben werden daher häufig in die Nadelhölzer Fichte und Tanne als Verbindungselement sowie als Verstärkungselement eingesetzt (Blaß et al., 2006). Aus diesem Grund wird im Folgenden der Fokus auf diese Holzarten gelegt.

Bei Betrachtung eines Baumstamms kann zwischen mehreren Schichten unterschieden werden. Von außen nach innen besteht ein Baumstamm aus Borke, Bast, Kambium, Holzkörper und in der Mitte das Mark (Höffler et al., 2016). Ein Baum wächst sowohl in Längs- als auch Dickenrichtung. Im Kambium wird der Holzkörper gebildet, welcher das Wachstum in Dickenrichtung darstellt. Dieses Wachstum des Holzkörpers folgt einem jährlichen Zyklus – Jahrringe genannt. Entsprechend den Jahrringen kann der Holzkörper in Früh- und Spätholz unterteilt werden (Höffler et al., 2016). Durch den axialsymmetrischen Aufbau des runden Baumstammes und das Wachstum in Jahrringen, ergeben sich natürliche Schnittebenen und Hauptrichtungen im Holz (Hoffmeyer, 2016). Die Parameter des Holzes sind von diesen anatomischen Hauptrichtungen abhängig (Ambrozy & Giertlová, 2005). In Abbildung 2.7 sind diese Schnittebenen und Hauptrichtungen an einem Baumstamm (a) und an einem Holzquader (b) gezeigt. Der Querschnitt verläuft rechtwinklig zur Stammachse (Hoffmeyer, 2016). In diesem Schnitt sind die Jahrringe erkennbar. Umgangssprachlich wird diese Schnittebene auch als Hirnholzschnitt bezeichnet. Die Achse, die senkrecht auf dieser Ebene steht ist die Längs- oder Longitudinalrichtung. Der Radialschnitt verläuft entlang des Radius des Baumstammes durch das Mark hindurch. Die Jahrringe sind in diesem Schnitt als parallele Linien erkennbar (Ambrozy & Giertlová, 2005). Der Radialschnitt wird durch die

Längs- und die Radialrichtung gebildet und die Tangentialrichtung steht senkrecht zu dieser Ebene.

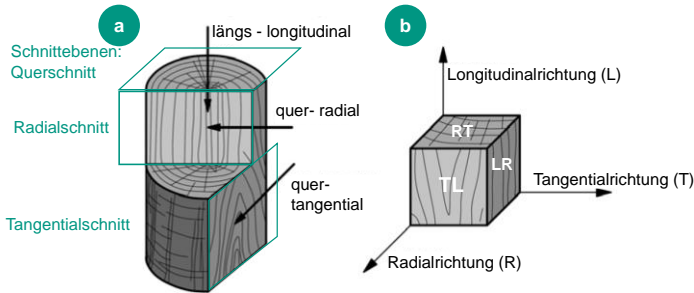


Abbildung 2.7: Der axialsymmetrische Aufbau eines Baumstamms ergeben a) natürliche Schnittrichtungen und b) anatomische Hauptrichtungen (T, L, R) sowie Ebenen zur Holzfaserrichtung (RT, TL, LR). Darstellung auf Grundlage von (Ambrozy & Giertlová, 2005; Höfferl et al., 2016)

Der Tangentialschnitt liegt tangential zu den Jahrringen. Die Jahrringe erscheinen in diesem Schnitt meist als bogenförmige Linien (Ambrozy & Giertlová, 2005). Wird der Werkstoff Holz nicht in Stammform, sondern als Schnittholz betrachtet, dann wird nicht von Schnittebenen, sondern von Holzfaserebenen gesprochen. Diese Ebenen werden entsprechend den Hauptrichtungen gebildet. Wie in Abbildung 2.7 b gezeigt, wird beispielsweise die Holzfaserebene TL durch die Tangential- und Longitudinalrichtung gebildet und die Radialrichtung steht senkrecht zur Ebene.

Mikroskopisch betrachtet ist Holz ein organischer, aus Zellen aufgebaute Stoff mit einem vielfältigen chemischen Aufbau. Die Struktur der Holzzellen hat einen großen Einfluss auf die Eigenschaft des Holzes als Baustoff. Die Anisotropie des Werkstoffs resultiert aus der Orientierung der Zellwände und den unterschiedlichen Zellgrößen einer Wachstumsperiode (Hoffmeyer, 2016). In Abbildung 2.8 sind die Zellen eines Nadelholzes, welche auch Holzfasern genannt werden, mikroskopisch im Querschnitt dargestellt. Die Holzzellen weisen einen vier oder fünfeckigen Querschnitt auf. Die unterschiedlichen Zellgrößen für die Wachstumsperioden im Frühjahr und im Herbst sind in Abbildung 2.8 zu erkennen. Im Frühjahr wird das Frühholz gebildet, welches sich durch großes Porenvolumen und dünnwandige Zellen auszeichnet. Dagegen werden im Spätsommer und Herbst besonders dickwandige Zellen mit kleinen Zellhohlräumen gebildet. Dieses hat eine hohe Festigkeit und wird Spätholz

genannt. Der Unterschied der Zellwanddicken von Früh- und Spätholz wirkt sich auch in Farb-, Rohdichte- und Härteunterschieden aus. Bei Nadelbäumen ist der Anteil des Frühholzes gegenüber dem Spätholz innerhalb eines Jahrringes deutlich größer. (Hoffmeyer, 2016)

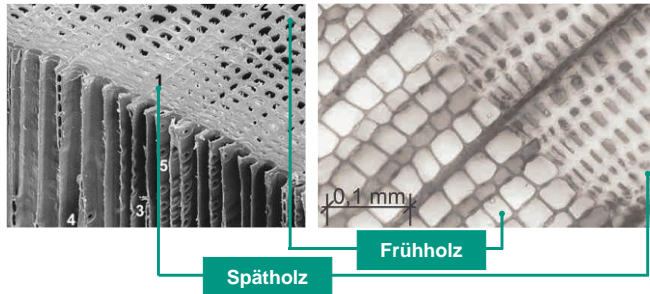


Abbildung 2.8: Mikroskopischer Aufbau der Holzzellen von Nadelholz. Frühholz weist gegenüber Spätholz Zellen mit größerem Porenvolumen, dünnwandigen Zellen und geringerer Festigkeit auf. Links: I. Čunderlík (Ambrozy & Giertlová, 2005), Rechts: (Schmid, 2002)

Der Aufbau der Holzzellen ist länglich in Longitudinalrichtung und führt zu einer 20- bis 40-fach höheren Steifigkeit des Holzes bezogen auf die Querrichtung (Hoffmeyer, 2016). Das Volumen dieser Zellen ist nicht gefüllt, wodurch das Holz eine sehr große innere Oberfläche besitzt. Dieses Hohlräumeystem ist hygroskopisch (Hoffmeyer, 2016). Das bedeutet Holz kann Feuchtigkeit aus der Umgebung in diese Zellen einlagern und wieder abgeben (Höfferl et al., 2016). Durch die Holzfeuchte werden viele Eigenschaften des Holzes beeinflusst (Hoffmeyer, 2016). So wird die Festigkeit, das Verformungsverhalten, die Masse und auch die Abmessungen von der Feuchtigkeit beeinflusst (Höfferl et al., 2016).

Die Eigenschaften des Holzes hängen neben dem makroskopischen Aufbau auch von dem mikroskopischen und submikroskopischen Aufbau und ab und werden anhand der Hauptrichtungen radial, longitudinal und tangential charakterisiert. Der Werkstoff Holz stellt durch diese vielschichtige Holz Anatomie und die unterschiedlichen Einflüsse auf die Eigenschaften eine Herausforderung bei der Analyse der Wechselwirkungen zwischen Holz und Holzschrauben dar (Hölz, Kleinhaus & Matthiesen, 2021).

Makroskopisch ist die Festigkeit des Holzes von Wuchseigenschaften wie Rohdichte, Jahrringbreite und Astigkeit abhängig. Beispielsweise werden die Holzfasern in direkter Umgebung zu Ästen umgelenkt, wodurch sich Festigkeitsverluste an diesen Stellen ergeben (Höffler et al., 2016). Da Holz ein natürlich gewachsenes Material ist, passt sich dieses immer an die jeweiligen Bedingungen am Standort an. Dadurch ergeben sich weitere Fehler wie Krümmungen der Stammform, Drehwuchs oder Wuchsunregelmäßigkeit, wie Harzeinschlüsse, Risse oder Löcher durch Fäule sowie Insektenfraß. Bei fehlerfreiem Holz ist die Zugfestigkeit mehr als 10-fach so hoch wie bei Bauholz geringer Qualität. (Hoffmeyer, 2016)

Die beschriebenen Fehler führen dazu, dass Holz als Bauholz besondere Voraussetzungen erfüllen muss. Dies ist auch für Untersuchungen von Holzschraubverbindungen relevant, in welchen Bauholz als Versuchsmaterial genutzt wird. Für die Verwendung als Bauholz wird Nadelholz nach unterschiedlichen Kriterien nach DIN 4074-1:2012-06 (DIN 4074-1) bei einer maximalen Holzfeuchtigkeit von 20 % bewertet. Sortierkriterien sind beispielsweise Astigkeit, Faserneigung, Jahrringbreite, Risstiefen, Krümmung, Verfärbungen oder Insektenfraß. Nur bei Erfüllung dieser Sortierkriterien darf das Holz als Bauholz für tragende Zwecke verwendet werden. Konstruktionsvollholz KVH® bezeichnet Bauholz, welches über DIN 4074-1:2012-06 (DIN 4074-1) hinaus strengere Anforderungen, beispielsweise an die Holzfeuchtigkeit, erfüllt. Aufgrund der strengeren Anforderungen an die Werkstoffqualität ist daher Konstruktionsvollholz für die Untersuchung von Holzschraubverbindungen besonders geeignet. Die Markröhre wird für Bauholz in der Regel nicht verwendet (Höffler et al., 2016). Eine radiale Einschraubrichtung ist aus diesem Grund selten. Untersuchungen von Holzschraubverbindungen sollten daher eine tangentielle Einschraubrichtung fokussieren.

2.2.3 Funktion Tragfähigkeit und Versagensart

Holzschrauben werden als Verbindungs- sowie als Verstärkungselement axial belastet. Bei Belastung einer Holzschraube in axialer Richtung kann nach Ringhofer, Brandner und Schickhofer (2015) zwischen den in Abbildung 2.9 dargestellten drei Versagensarten (a, b, c) unterschieden werden.

Die erste Versagensart (a) ist das Stahlversagen auf Zug und Druck. Die zweite Versagensart (b) ist das Durchzugsversagen des Schraubenkopfes. Die dritte Versagensart (c) beschreibt das Ausziehversagen des Gewindeteils der Schraube. Die bestimmende Versagensart bei axial belasteten Schrauben ist das Ausziehversagen des Gewindeteils (Pirnbacher, Brandner & Schickhofer, 2009). Dieses Versagen basiert auf den Wechselwirkungen zwischen Schraubengewinde und Holz und wird daher sowohl durch die Gestalt des Schraubengewindes als auch

durch die Parameter des Holzes bestimmt (Ringhofer, Brandner & Schickhofer, 2015).

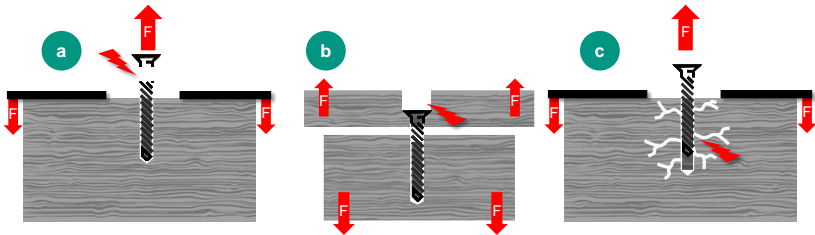


Abbildung 2.9: Versagensarten einer Holzschraubverbindungen bei axialer Belastung: a) Stahlbruch, b) Durchzugsversagen und c) Ausziehversagen des Gewindeteils. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Die axiale Tragfähigkeit, auch Ausziehtragfähigkeit genannt, steht dem Ausziehversagen gegenüber. Die Funktion Tragfähigkeit ist der Widerstand der Holzschraubverbindung gegen das Versagen des Gewindekontakts bei axialer Belastung. Quantifiziert wird die Tragfähigkeit durch das Haltevermögen. Das Haltevermögen ist der maximale Kraftwert bevor die Schraubverbindung versagt. Das Haltevermögen ist ein wesentlicher Kennwert für die bauaufsichtliche Zulassung und wird auch für die Auslegung der Schraubverbindung im Holzbau benötigt. Daher ist das Haltevermögen eine wesentliche Entwicklungszielgröße für die Gestaltung von Holzschrauben.

Das Haltevermögen wird in experimentellen Versuchen ermittelt. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Ausziehkraft sind in DIN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) definiert. Für die Versuche wird die zu untersuchende Holzschraube in das Holz oder den Holzwerkstoff eingetrieben. Die Holzschraube ist auf eine Tiefe, bezogen auf den Außendurchmesser, zwischen $8d$ und $20d$ einzuschrauben. Bei genormten Schrauben ist ein Vorbohren erforderlich. Das zu prüfende Holz ist auf Gleichgewichtsfeuchte zu konditionieren und die Holzfeuchte sowie die Rohdichte sind zu bestimmen. Der Holzprüfkörper muss die angegebenen Mindestmaße erfüllen und die Achse der Holzschraube muss entsprechende Randabstände einhalten. (DIN EN 1382)

Trotz der beschriebenen bevorzugt schrägen Anordnung der Holzschrauben als Verbindungselement, erfolgt die Prüfung des Haltevermögens bei einem Winkel von

90° zur Holzoberfläche (DIN EN 1382). Die Ausziehkraft muss in Achsrichtung auf den Schraubenkopf aufgebracht werden. Das Haltevermögen kann bei einem Einschraubwinkel α zwischen 0° und 90° ermittelt werden (DIN EN 1382). Wie in Abbildung 2.10 dargestellt, ist der Einschraubwinkel α zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung definiert (DIN EN 1995-1-1). Ein Einschraubwinkel von 90° entspricht entweder einer radialen oder einer tangentialen Einschraubrichtung. Ein Einschraubwinkel α von 0° entspricht einem longitudinalen, d.h. faserparallelen Einschrauben. Die Auslegung von Holzschrauben nach Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1) schreibt für eine Beanspruchung von Holzschrauben in axialer Richtung einen Einschraubwinkel α zur Holzfaserrichtung von mindestens 30° vor. Bei Verwendung als Verstärkungselement ist ein rechtwinkliger Winkel zur Holzfaserrichtung üblich. In Abbildung 2.10 ist der Versuchsaufbau für die Ausziehversuche gezeigt.

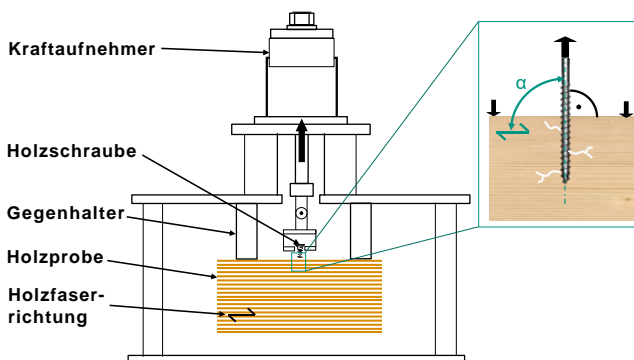


Abbildung 2.10: Ausziehversuch nach DIN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) zur Bestimmung des Haltevermögens. Abbildung auf Grundlage von (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Die Holzprobe wird über einen Gegenhalter abgestützt. Der Gegenhalter muss mindestens einen Abstand von $3d$ zur Schraubenachse aufweisen (DIN EN 1382). Der Ausziehversuch wird mit einer gleichmäßigen Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt und wird beendet, wenn die Schraubverbindung versagt. Die maximal erreichte Ausziehkraft wird Haltevermögen genannt. Die Belastungsgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass das Haltevermögen in 60 ± 15 s erreicht wird. Das Haltevermögen ist

mittels Kraufnehmer auf 1 % Genauigkeit zu bestimmen. Als Ergebnis des Prüfberichts wird der Ausziehparameter als Quotient aus Haltevermögen und dem Produkt aus Schraubendurchmesser und Einschraublänge bestimmt. (DIN EN 1382)

2.2.4 Versagenverhalten im Gewindekontakt

Die Analyse des Versagens ist ein wichtiger Teil der Gestaltung und dient neben der Klärung der Schadensursache auch der Ermittlung der dahinterliegenden Mechanismen. Unter dem Versagenverhalten im Gewindekontakt wird dessen Reaktion auf die einwirkenden axialen Ausziehkräfte verstanden, die entsprechend der Versagensart des Ausziehversagens zu einer Veränderung des Gewindekontakts führt und durch welche die Tragfähigkeit beeinträchtigt und gegebenenfalls nicht mehr erfüllt wird. Das Haltevermögen ist der maximale Kraftwert bevor die Schraubverbindung versagt. Das Versagen der Holzmatrix beginnt jedoch bereits bei einer geringeren Belastung der Schraubverbindung.

Die Durchführung einer Schadensanalyse kann entlang der VDI 3822:2011–11 (VDI 3822) erfolgen. In dieser wird die Erfassung der Fehlfunktionen für die Schadensbeschreibung beschrieben. Dazu wird die Bestimmung der Lage, des Aussehens und des Ausgangspunkts von Verformungen und Rissen gefordert. Kriterien zu diesen Angaben werden jedoch nicht genannt. Beispielsweise erfolgt keine Beschreibung, wie das Aussehen von Rissen charakterisiert werden kann. Gültig ist diese Richtlinie für die Analyse von Produkten aller Werkstoffgruppen, auch für Verbundwerkstoffe oder Werkstoffverbunden, (VDI 3822) und kann somit auch für die Analyse des Versagenverhaltens im Gewindekontakt von Holzschrauben angewendet werden.

Nach Ayoubi (2014) bilden die Versagensmechanismen im Holz die Grundlage für die Beschreibung des Versagenverhaltens der Schraubverbindung. Im Folgenden wird daher auf das Versagenverhalten des Werkstoffs Holz und nachfolgend auf das Versagen der Schraubverbindung eingegangen. Dabei wird zuerst auf das Versagen durch den Einschraubvorgang und dann bei axialer Belastung fokussiert. Relevant ist sowohl das Wissen zu dem Versagen im Gewindekontakt als auch zu den Methoden zur Beobachtung und der Untersuchung.

Das **Versagenverhalten von Holz** wurde unter anderem von Bodner, Schlag und Grüll (1997a, 1997b, 1998) untersucht. Dazu wurden kleine Holzproben (ca. 35 mm x 6 mm x 2 mm) belastet und die auftretende Rissbildung mit einem Rasterelektronenmikroskop beobachtet. Es konnte gezeigt werden, dass bei Zugbelastung die Rissbildung an Schwachstellen in der Holzstruktur beginnt und das Risswachstum schrittweise voranschreitet (Bodner et al., 1997a). Diese Untersuchungen

sind für die Analyse des Versagenverhaltens im Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen jedoch kaum nutzbar, da die Erkenntnisse durch die für die Untersuchung genutzten kleinen und zweidimensionalen Holzproben sowie die Verschiedenheit der Lastfälle nur schwer auf Holzschraubverbindungen übertragbar sind (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2021).

Das **Versagen von Holzschraubverbindungen** durch den **Einschraubvorgang** wurde von Uibel (2012) betrachtet. Durch das Einschrauben von selbstbohrenden Holzschrauben spaltet das Holz auf und versagt. Ziel der Untersuchung war die Rissbildung durch das Spaltverhalten messen zu können. Dazu wurde die Beobachtungsbarriere durch eine Analysetechnik zur Visualisierung der Rissbildung überwunden. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Nach dem Einschraubvorgang wird die Holzschraube wieder ausgedreht. Im ersten Schritt (a) wird der entstandene Schraubkanal im Holz gefärbt. Für die Färbung wird Holzbeize verwendet, da diese sich lediglich im Bereich der Risse ausbreitet (Uibel, 2012). Nach der Trocknung der Holzbeize wird das Holz aufgespaltet (b) und das Rissbild entlang der Schraubenachse wird sichtbar (c). Dieses Rissbild kann, wie in Abbildung 2.11 d gezeigt, untersucht und vermessen werden (Uibel, 2012).

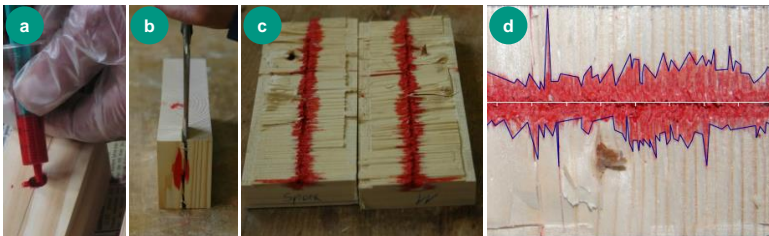


Abbildung 2.11: Vorgehen nach Uibel (2012) zur Untersuchung des Versagens durch den Einschraubvorgang. Durch Einfärben des Schraubkanals mittels Holzbeize wird die Rissbildung im Holz beobachtbar. (Uibel, 2012), veränderte Darstellung

Durch die Auswertung der Größe der Rissfläche sowie der mittleren Risslänge kann das Spaltverhalten der selbstbohrenden Holzschraube charakterisiert werden (Uibel, 2012). Dieses Verfahren wird auch in der Zulassung zur Bestimmung der notwendigen Rand- und Mindestabstände für axial belastete Holzschrauben gefordert (EAD 130118-00-0603). Das Rissbild der jeweiligen Schraubengestalt wird

dabei nur zur Bewertung des Spaltverhaltens benutzt. Unterschiede in den Rissbildern hinsichtlich verschiedener Gewindeparameter wurden nicht untersucht.

Obwohl diese Analysetechnik die Untersuchung des Rissbilds ermöglicht, ist das Ermitteln von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen schwierig. Eine Schwierigkeit des Verfahrens ist, dass Risse, die bereits vor dem Schraubvorgang im Holz vorhanden sind und Risse, die durch das Ausdrehen der Schraube entstehen, nicht von Rissen unterschieden werden, die durch das Einschrauben der Schraube entstehen. Dadurch kann die Auswirkung der Gewindegestalt auf das zu untersuchende Rissbild nicht einer definierten Funktion zugeordnet werden (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a). Für die Gestaltung ist jedoch relevant, ob die Risse durch die Gewindegestalt verursacht wurden und ob diese entweder durch das Ein- oder das Ausschrauben entstanden sind. Zur Untersuchung der Einflüsse der Gewindegestalt ist diese Analysetechnik nicht geeignet, da die Einflüsse des Einschraubvorgangs nicht von den Einflüssen auf die Tragfähigkeit unterschieden werden können.

Bei **axialer Belastung** der **Holzschraubverbindungen** wurde das **Versagenverhalten** von Ayoubi (2014) untersucht. Durch sogenannte Sägeschnitte wurde die Beobachtungsbarriere überwunden und das Versagen im Gewindekontakt beobachtbar gemacht. Dazu wurden bei unterschiedlichen Einschraubwinkeln Ausziehversuche durchgeführt. Nach den Ausziehversuchen wurden die Holzprüfkörper entlang der Schraubenachse aufgesägt (Ayoubi, 2014). Das Versagen ist somit im Sägeschnitt entlang der Schraubenachse beobachtbar. Für einen Einschraubwinkel von 60° und 90° sind diese in Abbildung 2.12 dargestellt.



Abbildung 2.12: Sägeschnitte entlang der Schraubenachse zur Untersuchung des Versagens im Gewindekontakt bei axialer Belastung für unterschiedliche Einschraubwinkel. (Ayoubi, 2014), veränderte Darstellung

Die Sägeschnitte zeigen die Verformungen der Holzfasern sowie das Versagen der Holzmatrix im Gewindekontakt (Ayoubi, 2014, 2016). Das Versagenverhalten wird als eine Serie von Delaminations- bzw. Zerfaserungsprozesse beschrieben. Bei Versuchen mit kleinen Einschraubwinkeln ($\alpha < 30^\circ$) konnte ein sprödes Versagen der Holzfasern beobachtet werden. Bei Versuchen mit einem Einschraubwinkel $\alpha > 30^\circ$ war eine große Verformung der Holzfasern sichtbar. Das Bruchverhalten wurde für diesen Fall als quasi-duktil oder pseudo-plastisch charakterisiert (Ayoubi, 2014). Eine detaillierte Beschreibung des Versagenverhaltens oder eine Auswertung der Rissbildung wurde jedoch nicht vorgenommen. Auch wurde das Versagenverhalten nicht in Bezug auf unterschiedliche Gewindegestalten untersucht. Wie die Gewindeparameter das Versagenverhalten beeinflussen ist daher weiter unklar.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Versagenverhalten von Holzschraubverbindungen für den Ausziehvorgang bei axialer Belastung bisher kaum erforscht ist. Mit den Sägeschnitten von Ayoubi (2014) kann der Zustand des Gewindekontakts nach dem Ausziehvorgang betrachtet werden. Allerdings kann nur der Zustand nach dem Versagen der Schraubverbindung nicht die Veränderungen im Gewindekontakt untersucht werden. Es sind somit keine geeigneten Methoden bekannt, um die Beobachtungsbarriere zu überwinden und das Versagenverhalten im Gewindekontakt in Bezug zur Tragfähigkeit zu beobachten. Die Analysetechnik von Uibel (2012) zur Untersuchung des Einschraubvorgangs ermöglicht eine Vermessung des Rissbilds, ist aktuell jedoch für die Untersuchung der Einflüsse der Gewindegestalt auf die Tragfähigkeit nicht geeignet. Beschrieben werden kann das Versagen durch das Aussehen und die Lage von Rissen und Verformungen.

2.3 Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen

In diesem Kapitel werden die bekannten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt vorgestellt. Dazu wird zuerst auf die experimentell ermittelten Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Schraubenparameter eingegangen. Danach werden Modelle erläutert, welche den Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen basierend auf physikalischen Zusammenhängen erklären.

2.3.1 Experimentelle Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen Haltevermögen und Schraubenparameter

Im Folgenden werden zuerst die experimentell ermittelten und in der Auslegung berücksichtigten Einflüsse im Gewindekontakt der Schraubverbindung auf das Haltevermögen beschrieben. Die meisten Untersuchungen zum Gewindekontakt fokussieren den Einfluss der Holzeigenschaften oder Eigenschaften der Verbindung auf das Haltevermögen. Darauf folgend werden die bekannten Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern beschrieben.

Der Einfluss der Parameter des **Werkstoffs Holz** auf das Haltevermögen wurde bereits vielfach untersucht (Sydor, 2019). Dies betrifft beispielsweise den Einfluss der Rohdichte (Frese & Blaß, 2009) oder der Holzfeuchtigkeit (Pirnbacher et al., 2009) für verschiedene Holzarten auf das Haltevermögen.

Auch gibt es einige Untersuchungen zum Einfluss der **Einschraubtiefe** l_{ef} , bzw. der eingeschraubten Gewindelänge auf das Haltevermögen. So wurde in Untersuchungen von Ayoubi und Trautz (2015) in Brettschichtholz oder Pirnbacher et al. (2009) in Vollholz der Holzart Fichte nicht lineare Zusammenhänge zwischen Einschraubtiefe und Haltevermögen festgestellt. Dieser Einfluss wird auch bereits in der Auslegung nach Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1) berücksichtigt.

Weiterhin ist auch der Einfluss des **Einschraubwinkels** α auf das Haltevermögen bekannt. Dieser Einfluss wurde beispielsweise von Frese et al. (2010) in Nadelholz, von Blaß et al. (2006) in Fichte oder von Pirnbacher und Schickhofer (2007) in Fichte untersucht. So stellten Pirnbacher und Schickhofer (2007) bei einem Schraubendurchmesser von 8 mm fest, dass das Haltevermögen für einen Einschraubwinkel zwischen 30° und 90° konstant bleibt und das Haltevermögen für kleinere Winkel als 30° deutlich sinkt. Blaß et al. (2006) konnte eine Abhängigkeit dieses Einflusses vom Schraubendurchmesser ermitteln. Auch dieser bekannte Einfluss wird in Auslegungsverfahren nach Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1) berücksichtigt.

Der Einfluss des **Außendurchmessers** d auf das Haltevermögen wurde von Pirnbacher et al. (2009) untersucht. Für eine Vergrößerung des Außendurchmessers im Bereich zwischen 8 - 12 mm konnte in Brettschichtholz und in Fichte eine Zunahme des Haltevermögens beobachtet werden (Pirnbacher et al., 2009). Eine Vergrößerung des Schraubendurchmessers ist jedoch oft durch die Anwendung begrenzt. Beispielsweise bei Metall-Holz-Verbindungen ist der maximale Schraubendurchmesser durch die Bohrung im Metall-Anschluss vorgegeben. Oder

um das Spalten von Holz zu vermeiden, sollte der kleinstmögliche Durchmesser verwendet werden.

Beschrieben werden diese Einflüsse auf das Haltevermögen in verschiedenen Berechnungsmodellen. Solche Modelle dienen der Auslegung der Schraubverbindung und werden beispielsweise von Frese et al. (2010), Ringhofer, Brandner und Schickhofer (2015), Blaß et al. (2006) oder Ringhofer, Brandner, Flatscher und Schickhofer (2015) beschrieben. Zur Berechnung des Ausziehwidestands $R_{ax,k}$ wird von Frese et al. (2010) das Regressionsmodell nach Formel 2 vorgeschlagen. Der Ausziehwidestand ist die rechnerische Beanspruchbarkeit gegenüber dem Ausziehversagen (Frese et al., 2010) und ist somit das Pendant zum gemessenen Haltevermögen.

$$\ln(R_{ax,k}) = 6,54 + (0,03265 - 1,173 \cdot 10^{-4} l_{ef}) l_{ef} + 2,35 \cdot 10^{-4} d \rho_k \quad 2$$

Dieses Modell enthält als unabhängige Variablen zur Berechnung des Ausziehwidestands $R_{ax,k}$ in Newton die Einschraubtiefe l_{ef} in mm, die Rohdichte des Holzes ρ_k in kg/m^3 und den Außendurchmesser d in mm der Holzschraube. Dazu wurden 2400 Ausziehversuche ausgewertet. Gültig ist dieses für selbstbohrende Holzschrauben mit Durchmessern d von 4 mm bis 14 mm und Einschraubtiefen l_{ef} von 20 mm bis 140 mm, in Nadelholz bei einem Einschraubwinkel zwischen 45° und 90° . (Frese et al., 2010)

Auch die Auslegung nach Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1) enthält zur Berechnung des Ausziehwidestands die Variablen Einschraubtiefe, Rohdichte und den Außendurchmesser der Holzschraube ($6 \text{ mm} < d < 12 \text{ mm}$). Zusätzlich ist die wirksame Anzahl an Schrauben sowie der Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung (mit $\alpha > 30^\circ$) anzugeben.

Somit sind der Außendurchmesser und die eingeschraubte Gewindelänge die einzigen Gewindeparameter, welche die Gewindegeometrie bei der Auslegung der Tragfähigkeit darstellen. Für die Gestaltung von Holzschrauben sind diese Gestaltungsparameter jedoch keine geeigneten Entwicklungszielgrößen, da diese oft durch die Anwendung oder die Auslegung vorgegeben sind. Das Ziel dieser Berechnungsmodelle ist den Ausziehwidestand von selbstbohrenden Schrauben für die Auslegung von Schraubverbindungen herstellerunabhängig zu berechnen. Aus diesem Grund ist eine möglichst allgemeine Form der Gleichung erwünscht. Da diese Modelle nicht das Ziel haben, die Zusammenhänge zwischen der Gewindegestalt und der Tragfähigkeit abzubilden, sind diese für die Gestaltung von Holzschrauben nicht geeignet (Hölz, Ayoubi, Gwosch & Matthiesen, 2021). Auch wenn die Einflüsse

auf das Haltevermögen vielfach unter den Gesichtspunkten der Parameter des Werkstoffs untersucht werden, so sind Untersuchungen unter dem Gesichtspunkt der Schraubengestalt selten (Sydor, 2019). Nachfolgend werden daher die für die Gestaltung relevanten Forschungsvorhaben, welche den Einfluss der **Gewindegestalt** auf das Haltevermögen untersucht haben, vorgestellt.

Gaunt (1997) untersuchte in Ausziehversuchen den Einfluss der **Gewindegestalt** von sechs Schraubentypen auf das Haltevermögen, die in Kiefer parallel zur Faser eingeschraubt wurden. Ziel der Untersuchung war Zusammenhänge zwischen Haltevermögen und Gewindesteigung, Profilhöhe sowie Flankenbreite zu ermitteln. Gaunt (1997) vermutete einen positiven Effekt eines großen Verhältnisses zwischen Profilhöhe und Flankenbreite auf das Haltevermögen. Dazu wurden Schraubentypen, welche in diesen Parameter variieren, eigens gefertigt. In Abbildung 2.13 sind drei dieser gefertigten Schraubentypen gezeigt.

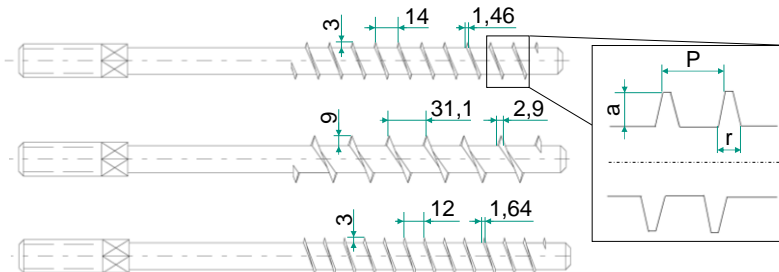


Abbildung 2.13: Drei der angefertigten Schraubentypen nach Gaunt (1997), welche in Gewindesteigung P , Profilhöhe a und Flankenbreite r variieren.

Für die untersuchten Schraubentypen konnte kein signifikanter Unterschied der Gewindegestalt auf das Haltevermögen nachgewiesen werden. Der Schraubentyp mit der größten Profilhöhe versagte im Gewinde und konnte daher nicht untersucht werden. (Gaunt, 1997)

Pirnbacher und Schickhofer (2007) untersuchten in Ausziehversuchen den Einfluss der **Gewindegestalt** auf das Haltevermögen anhand von kommerziellen selbstbohrenden Schrauben. Dazu wurden Schrauben mit einem Außendurchmesser von 8 mm von unterschiedlichen Herstellern verwendet. Diese unterschieden sich neben ihren Gewindeparametern wie Gewindesteigung, Profilhöhe, Kerndurchmesser

oder Flankenwinkel auch in der Geometrie der Schraubenspitze oder der Fräsrippen. Die Untersuchung wurde in Vollholz der Holzart Fichte für die Einschraubwinkel von 0° und 45° sowie in Brettschichtholz mit einem Einschraubwinkel von 90° durchgeführt. Für einen Einschraubwinkel von 0° konnte kein Einfluss der Gestaltparameter auf das Haltevermögen gezeigt werden. Dagegen war für 90° zur Holzfaser sowie unter 45° Winkel ein Einfluss der Schraubentypen auf das Haltevermögen sichtbar. Zwischen den untersuchten Schrauben konnte ein Unterschied von ca. 10 % auf das Haltevermögen ermittelt werden (Pirnbacher & Schickhofer, 2007). Welche Gewindeparameter diesen Effekt verursachen, konnte jedoch nicht gezeigt werden. Statistische Tests für den Nachweis des Einflusses wurden nicht angewendet.

In einer Untersuchung von Hübner (2014) wurde der Einfluss der **Gewindesteigung** auf das Haltevermögen in Ausziehversuchen untersucht. Dazu wurden kommerzielle selbstbohrende Holzschrauben mit einem Außendurchmesser von 7,5 mm verwendet, welche neben der Gewindesteigung auch im Kerndurchmesser, Flankenwinkel sowie der Ganganzahl variierten. Die Gewindesteigung wurde mit Werten von 2,6 mm (fein), 3,16 mm (mittel) und 5,2 mm (grob) untersucht. Die Untersuchung wurde für einen Einschraubwinkel von 0° sowie von 90° sowohl in Fichte als auch in Buche vorgenommen. (Hübner, 2014)

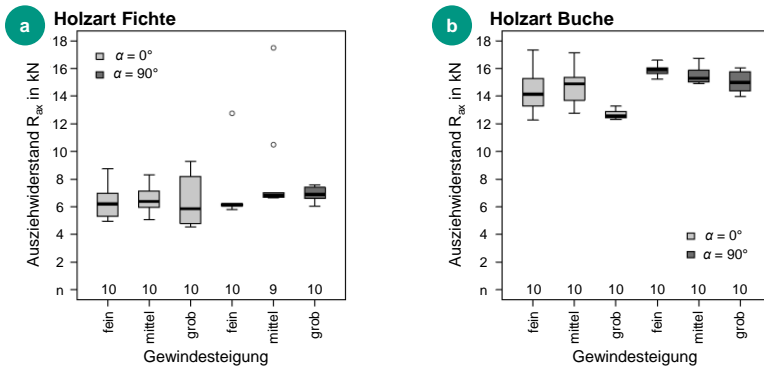


Abbildung 2.14: Boxplots des Ausziehwerstandes R_{ax} für die unterschiedlichen Gewindesteigungen (fein, mittel und grob), Einschraubwinkel α und die Holzarten a) Fichte und b) Buche. Der Ausziehwerstand entspricht dem Haltevermögen. Die Versuchsanzahl n ist angegeben. Die Ausreißer werden nicht beschrieben. (Hübner, 2014)

Die für die unterschiedlichen Holzarten und Einschraubwinkel sehr differenzierten Ergebnisse sind in Abbildung 2.14 dargestellt. In der Holzart Fichte ist der Median des Haltevermögens für einen Einschraubwinkel von 0° bei der mittleren Gewindesteigung am höchsten. Bei einem Einschraubwinkel von 90° konnte bei der feinen und der mittleren Gewindesteigung der höchste Median des Haltevermögens ermittelt werden. In der Holzart Buche erreicht bei einem Einschraubwinkel von 0° die mittlere Gewindesteigung, bei einem Einschraubwinkel von 90° die feine Gewindesteigung den höchsten Median. Die Ausreißer, insbesondere in Fichte bei einem Einschraubwinkel von 90°, werden nicht beschrieben. (Hübner, 2014)

Die Versuchsdaten wurden auch statistisch untersucht. Für die Holzart Fichte konnte für keinen Einschraubwinkel einen Einfluss der Gewindesteigung gezeigt werden. Für die Holzart Buche kann für die beiden Einschraubwinkel nur zwischen feiner und grober Gewindesteigung sowie bei einem Einschraubwinkel von 0° zwischen mittlerer und grober Steigung ein signifikanter Einfluss gezeigt werden. Hübner (2014) folgerte, dass aus diesen differenzierten Versuchsergebnissen mangels statistischer Signifikanz nur begrenzt Aussagen möglich sind. Gründe, warum der statistische Nachweis nicht gelang, ist die geringe Versuchsanzahl in Kombination mit der großen Streuung der Versuchsergebnisse. Ein Teil der Streuung resultiert daraus, dass die Gewindesteigung nicht gezielt variiert wird, sondern Gewindeparametersätze von Schraubenvarianten verwendet werden.

Der Einfluss der **Gewindesteigung** auf das Haltevermögen wurde auch von Sydor, Zmyślony, Pinkowski und Szymański (2016) in Ausziehversuchen untersucht. Dazu wurden Holzschrauben mit einem Durchmesser von 7 mm verwendet. Die Gewindesteigung wurde auf den Faktorstufen 2,5 mm, 3 mm und 3,5 mm variiert. Diese wurden in einem Einschraubwinkel von 90° zur tangentialen Hauptebene (radiale Einschraubrichtung) als auch zur radialen Hauptebene (tangentiale Einschraubrichtung) in der Holzart Kiefer untersucht (Sydor et al., 2016). In Abbildung 2.15 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung für den Quotienten des Haltevermögens bezogen auf die Einschraubtiefe dargestellt. Ergebnis der Untersuchung ist, dass in radialer Einschraubrichtung die Gewindesteigung von 3 mm das höchste Haltevermögen erzielte. In tangentialer Einschraubrichtung konnte für die Gewindesteigung mit 2,5 mm das höchste Haltevermögen ermittelt werden. Sydor et al. (2016) schlossen daraus, dass für die radiale Einschraubrichtung kein starker Zusammenhang zwischen Gewindesteigung und Haltevermögen besteht, während bei der tangentialen Einschraubrichtung das Haltevermögen mit zunehmender Gewindesteigung abnimmt. Es wurden jedoch keine statistischen Tests angewandt um diesen Zusammenhang nachzuweisen.

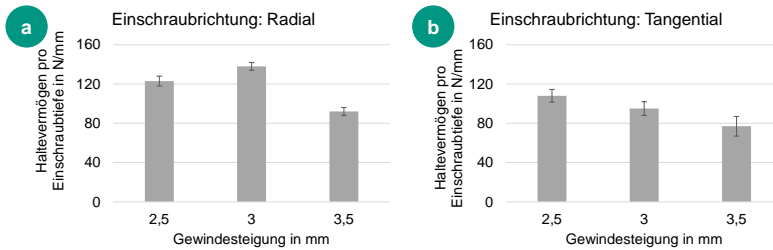


Abbildung 2.15: Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen bezogen auf die Einschraubtiefe für eine a) radiale und b) tangentiale Einschraubrichtung. Abbildung auf Grundlage von Sydor et al. (2016).

Werden die Versuchsergebnisse von Sydor et al. (2016) mit den Ergebnissen bei Nadelholz (Einschraubwinkel 90°) von Hübner (2014) verglichen, dann sind gegensätzliche Trends ersichtlich. Entsprechend ist der Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen weiter unklar. Beide Untersuchungen wurden jedoch nur mit einer kleinen Stichprobe von ca. 10 Wiederholungen durchgeführt und die jeweiligen Ergebnisse wurden statistisch nicht nachgewiesen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Einflüsse des Werkstoffs Holz auf das Haltevermögen der Schraubverbindung sowie der Parameter der Schraubverbindung, wie beispielsweise den Einschraubwinkel oder die eingeschraubte Gewindelänge, bereits vielfach untersucht wurden. Während der Einfluss des Gewindeparsameters Außendurchmesser bereits bekannt ist, sind die Einflüsse weiterer Gewindeparsameter bislang noch unklar. Dabei zeigen Untersuchungen einen Einfluss unterschiedlicher Gewindegestalten auf das Haltevermögen, diese werden jedoch in Berechnungsmodell nicht abgebildet. Dies liegt vor allem am Fokus der Modelle für eine herstellerunabhängige Auslegung. Die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparsametern sind bislang nicht ausreichend erforscht. Obwohl der Einfluss dieser Gewindeparsameter in wenigen Studien vermutet wurde, konnte bisher kein signifikantes Ergebnis gezeigt werden (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021). Mit Ausnahme des Außendurchmessers ist bislang unbekannt, welche weiteren Gewindeparsameter einen Einfluss auf das Haltevermögen haben sowie die Höhe, Form und Richtung dieser Einflüsse.

Gemein ist diesen wenigen Untersuchungen das Vorgehen zur Bestimmung des Einflusses der Gewindeparsameter in Ausziehversuchen, in welchen die Holzschraubverbindung als Black-Box-Modell betrachtet wird. Die Ausgangsgröße dieses Modells ist der einzelne Funktionswert Haltevermögen. Weiterhin können

ermittelte Unterschiede in den Haltevermögen oftmals nicht auf einzelne Gewindeparameter zurückgeführt werden. Dies liegt daran, dass Gewindeparameter nicht einzeln variiert und untersucht werden, sondern meist Schraubentypen mit Gewindeparametersätzen verwendet werden. Die Gewindeparameter werden nur indirekt durch Schraubentypen untersucht.

2.3.2 Modelle des Gewindekontakts von Holzschraubverbindungen

Es sind unterschiedliche theoretische Modelle bekannt, welche den Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen erklären. Dazu werden nachfolgend drei Modelle vorgestellt, bei welchen diese Erklärung auf verschiedenen Mechanismen basiert.

2.3.2.1 Modell der Verbundmechanismen

Nach Ayoubi (2014) und Ayoubi und Trautz (2015) basiert die Tragfähigkeit einer Holzschraubverbindung auf unterschiedlichen Verbundmechanismen. Diese Verbundmechanismen wirken sowohl im direkten Kontakt zwischen Holzschraube und Holz als auch im Mantelbereich des Schraubengewindes. Es wird zwischen den drei Verbundmechanismen Haftverbund, Scherverbund und Reibverbund unterschieden. (Ayoubi, 2014)

Haftverbund: Der Haftverbund wird durch die Haftreibungskraft zwischen Schraubengewinde und Holzfasern bestimmt. Durch die Selbsthemmung des spiralförmigen Gewindes entsteht bei axialer Belastung ein Widerstand gegenüber der Holzmatrix im Gewindezwischenbereich. Die Haftreibung verhindert die Relativbewegung zwischen Gewinde und umgebender Holzmatrix. Aufgrund der Anatomie und Anisotropie des Holzes wirken entlang der Holzrichtungen unterschiedliche Widerstände. (Ayoubi & Trautz, 2015) Der Haftverbund entspricht damit dem Kraft- bzw. Reibschluss.

Scherverbund: Der Scherverbund entsteht durch den Formschluss zwischen Schraubengewinde und Holzmatrix. Die Kraftübertragung erfolgt durch die mechanische Verzahnung des Schraubengewindes mit dem Holz. Bei axialer Belastung wird die Holzmatrix in den Gewindezwischenbereichen sowie benachbarte Holz-zellen auf Abscheren beansprucht (Ayoubi, 2014). Der Scherverbund ist bei zunehmender Relativverschiebung zwischen Holzschraube und Holz maßgebend für die Tragfähigkeit (Ayoubi, 2014). Die Beanspruchung der Holzmatrix zwischen den Gewindeflanken sowie dem umliegenden Holz auf Abscheren wird auch von Pirnbacher und Schickhofer (2007) beschrieben. Der Scherverbund wird neben dem Verformungsverhalten, dem Abscherwiderstand des Holzes sowie dem dreidimen-

sionalen Spannungszustand im Gewindegewindekontakt auch durch die Gewindegewindegestalt, beispielsweise durch die Gewindesteigung, beeinflusst. (Ayoubi, 2014)

Reibverbund: Der Reibverbund entsteht durch die Relativverschiebung zwischen Schraubengewinde und Holzmatrix. Dieser Verbund wirkt an den Kontaktflächen zwischen Gewindeaußenfläche und Holzmatrix, aber auch an den Kontaktflächen innerhalb des Holzes. Der Reibverbund wird durch die Oberfläche und die Rauigkeit der in Relativverschiebung befindlichen Elementen sowie durch die Querpressung aufgrund der Verdrängung der Holzfasern bestimmt. (Ayoubi, 2014)

Diese Verbundmechanismen wirken zu verschiedenen Zeitpunkten im Ausziehvorgang. Der Haftverbund ist nur gering belastbar und wird bei einer geringen Relativverschiebung überwunden. Durch die entstehende Relativverschiebung wird der Reibverbund aktiviert. Parallel werden Scherverbundspannungen hervorgerufen. Durch die Relativverschiebung der Flächen sowie den resultierenden Spannungszustand entstehen Risse und die vorhandenen Risse im Gewindegewindekontakt werden vergrößert. Bei Erreichen der maximalen Tragfähigkeit wird die Holzmatrix im Gewindegewindezwischenbereich abgeschert und umgebende Holzfasern voneinander getrennt. Nach dem Überschreiten des Haltevermögens wirkt ausschließlich der Reibverbund, welcher die Resttragfähigkeit ergibt. (Ayoubi, 2014; Ayoubi & Trautz, 2015)

Die Tragfähigkeit ist nach diesem Modell abhängig von diesen drei Verbundmechanismen und deren Güte. Dabei wird auch der Bezug der Gewindegewindegestalt auf die Güte der Verbundmechanismen hergestellt. Diese Einflüsse stehen jedoch nicht im Fokus des Modells. So wird ein Einfluss der Gewindesteigung auf den Scherverbund genannt. Es wird jedoch nicht beschrieben, wie sich die Gewindesteigung auswirkt und ob eine kleinere oder größere Gewindesteigung einen positiven Einfluss auf den Scherverbund hat. Der Einfluss einer größeren Profilhöhe auf eine höhere Tragfähigkeit wird über eine größere Reibfläche begründet. Im üblichen Reibmodell von Coulomb ist die Reibkraft jedoch unabhängig von der Größe der Kontaktfläche. Die Einflüsse weiterer Gewindeparameter werden im Modell nicht beschrieben.

2.3.2.2 Druckkegel-Zugring-Modell

Ein qualitatives Modell zur Darstellung der Tragfähigkeit einer Holzschraubverbindung ist das Druckkegel-Zugring-Modell nach Ayoubi (2014). Dieses Modell wurde ursprünglich für gerippte Bewehrungsstäbe von Tepfers (1973) entwickelt. Ziel des Modells ist eine realitätsnahe Darstellung der Beanspruchung der Holzschraubverbindung. Eine schematische Darstellung des Modells ist in Abbildung 2.16 gezeigt.

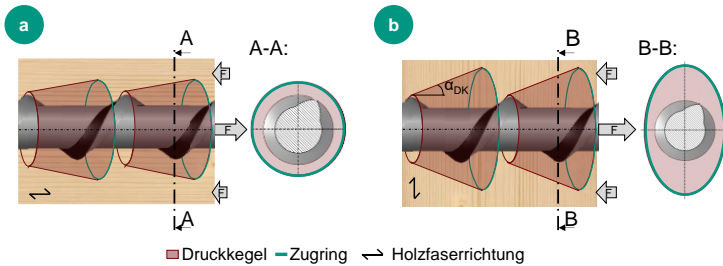


Abbildung 2.16: Darstellung des Druckkegel-Zugring-Modells für einen Einschraubwinkel a) parallel zur Faser und b) rechtwinklig zur Holzfaser. Eigene Darstellung nach Ayoubi (2014)

Unter axialer Last stützt sich die Holzschraube über die Gewindeflanken gegenüber dem Holz ab. Diese Abstützung erfolgt in einem Winkel α_{DK} . Daraus resultieren kegelförmige Druckspannungen – sogenannte Druckkegel. Um das Kräftegleichgewicht zu gewährleisten, entstehen infolge der Druckkegel ringförmige Zugspannungen. Diese Spannungen werden auch Zugringe genannt. Bei axialer Belastung der Schraubverbindung resultiert aus einer Materialverformung der Druckkegel eine Relativverschiebung. Die Zugspannungen führen nach Überschreitung der Holzfestigkeit zu einer Initiierung und Vergrößerung der Risse, wodurch der Versagensprozess beginnt. (Ayoubi, 2014)

Die Form der Druckkegel und der Zugringe ist abhängig vom Einschraubwinkel. Bei einem Einschraubwinkel parallel zur Faser entsteht ein kreiskegelförmiger Druckkegel sowie ein kreisförmiger Zugring. Dies ist in Abbildung 2.16 a im Schraubquerschnitt dargestellt. Dagegen wird bei einem Einschraubwinkel α von 90° eine elliptische Verteilung erwartet. Die längere Halbachse verläuft dabei in Richtung der Holzfaser. Aufgrund der höheren Tragfähigkeit senkrecht zur Faser weist die elliptische Form eine größere Fläche auf (Ayoubi, 2014). Eine Abhängigkeit des Modells von Gewindeparametern der Holzschraube wurde nicht beschrieben.

2.3.2.3 Krag Scheiben-Modell

Ein qualitatives Modell von Hübner (2014) beschreibt die Tragfähigkeit von Holzschrauben basierend auf Materialkennwerten von Holz für die radiale Einschraubrichtung bei einem Einschraubwinkel von 90° . Für dieses Modell werden die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen anatomischen Holzfaserrichtungen verwendet. Dieses Modell ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Es wird beschrieben, dass bei axialer Belastung die ersten Risse an den Gewindeflanken in der Holzfaserebene

TL aufgrund von Querzugversagen entstehen. In longitudinaler Richtung werden die Holzfasern durch den Schrauben kern unterbrochen (A-A). Die unterbrochenen Holzfasern bilden durch die von den Gewindeflanken ausgehenden Risse sogenannte „Kratscheiben“ (vgl. Biegebalken). Die Holzfasern, welche in longitudinaler Richtung neben dem Schrauben kern entlanglaufen (B-B) werden in Ausziehrichtung aufgebogen. (Hübner, 2014)

Sowohl die Kratscheiben als auch die durchlaufenden Faserbündel werden durch die Flanken in longitudinaler Richtung auf Querdruck und auf Schub beansprucht. Quer zur Holzfaserrichtung entstehen durch die Flanken sowohl Querdruckspannungen als auch Rollschubspannungen. Rollschubspannungen sind Schubspannungen, welche rechtwinklig zur Holzfaserrichtung auftreten und zu einem Abrollen der Holzfasern führen. Die Querdruckspannungen verdichten die Holzfasern lokal, welche darum im Bruchzustand abscheren. Aufgrund der geringen Festigkeits- und Schubmodulwerte für Rollschub im Vergleich zum Schub wird der größte Kraftanteil in longitudinaler Richtung übertragen. (Hübner, 2014)

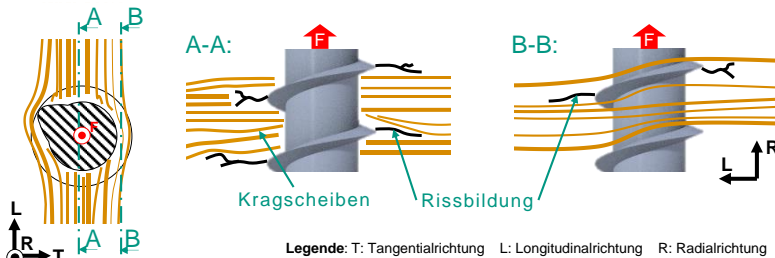


Abbildung 2.17: Darstellung des Kratscheiben-Modells. Links die Holzfaserebene TL in welcher die ersten Risse entstehen. Im Schnitt A-A (Ebene RL) die unterbrochenen Holzfasern, welche die Kratscheiben bilden. Im Schnitt B-B (Ebene RL) die Holzfasern, welche neben dem Schrauben kern entlanglaufen. (Eigene Darstellung)

Diese beschriebenen Mechanismen beginnen dabei an der Holzoberfläche und durch ein schrittweises Versagen der Holzmatrix wiederholen sich die Mechanismen in größerer Einschraubtiefe. Basierend auf diesem Modell wurde die Schubfestigkeitsverteilung zur Schraubenachse quantitativ modelliert, welche faserparallel als Rechteck mit abgerundeten Ecken und senkrecht zur Faser als schmetterlingsförmig beschrieben wird. (Hübner, 2014)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die vorgestellten Modelle den Gewindekontakt von Holzschrauben auf vielfältige Weise modellieren. Übereinstimmend beschreiben sowohl das Druckkegel-Zugring-Modell von Ayoubi (2014) als auch das Kragsscheiben-Modell von Hübner (2014) eine Abhängigkeit der Spannungsverteilung zum Rotationswinkel um die Schraubenachse und eine größere Ausbreitung der Last bzw. der Schubfestigkeit in longitudinaler Ausrichtung. Allerdings ist die Form dieser Abhängigkeit zum Rotationswinkel unklar (Hölz, Ayoubi et al., 2021). Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Gewindegestalt mit den vorgestellten Modellen nur unzureichend beschrieben. Die Unterschiede der Tragfähigkeit bei verschiedenen Gewindeformen können mit diesen qualitativen Modellen nicht erklärt werden. Für die Gestaltung sind die vorgestellten Modelle aus diesem Grund nicht geeignet (Hölz, Ayoubi et al., 2021).

2.4 Fazit zum Stand der Forschung

Bei Holzschraubverbindungen ist die axiale Tragfähigkeit eine wesentliche Entwicklungszielgröße für die Gestaltung von Holzschrauben. Die Tragfähigkeit basiert auf den Wechselwirkungen zwischen Schraubengewinde und Holz und wird sowohl durch die Holzparameter als auch durch die Gewindegestalt der Holzschraube beeinflusst. Im Stand der Forschung wurden die bekannten Modelle vorgestellt, welche die Tragfähigkeit im Gewindekontakt beschreiben. Die Zusammenhänge zwischen Gewindeparametern und der Tragfähigkeit werden in diesen Modellen jedoch weder quantitativ noch qualitativ erklärt und sind für die Gestaltung von Holzschrauben daher ungeeignet. Um konstruktionsfähig zu werden fehlen Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der Gewindegestalt sowie Methoden zum Ermitteln dieser Einflüsse.

Die Bewertungsgröße der Tragfähigkeit ist das Haltevermögen. Das Haltevermögen stellt in Ausziehversuchen den maximalen Kraftwert dar, bevor die Schraubverbindung versagt. Die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern sind weitgehend unbekannt. Der Einfluss des Außendurchmessers auf das Haltevermögen konnte nachgewiesen werden. Da der Außendurchmesser jedoch meist durch die Anwendung oder die Auslegung vorgegeben ist, ist dies keine Entwicklungszielgröße für die Gestaltung. Die Zusammenhänge weiterer Gewindeparameter auf das Haltevermögen sind bisher unbekannt. Der Einfluss einzelner Gewindeparameter, beispielsweise die Gewindesteigung, wird vermutet, ein statistisch signifikanter Nachweis konnte jedoch nicht erbracht werden. In Abbildung 2.18 sind die Erkenntnisse des Stands der Forschung zu diesen Gestalt-Funktion-Zusammenhängen dargestellt.

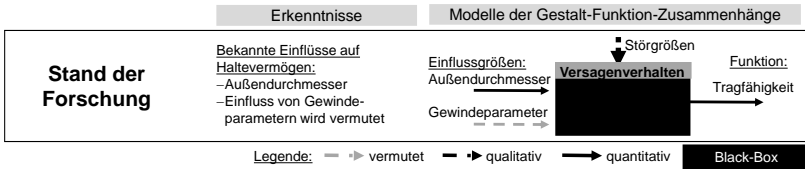


Abbildung 2.18: Erkenntnisse des Stands der Forschung zu den Zusammenhängen zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern.

Eine Herausforderung dabei ist, dass bestehende Vorgehensweisen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge bisher nicht zielführend sind. Ein Grund dafür ist, dass die ermittelten Einflüsse, durch die Nutzung von kommerziellen Holzschraubentypen mit Gewindeparametersätzen, nicht auf einzelne Gewindeparameter zurückgeführt werden können. Ein weiterer Grund ist, dass Holzschraubverbindungen lediglich als Black-Box-Modelle betrachtet werden. Neben der Eingangsgröße der Holzschraubentypen wird als Ausgangsgröße nur das Haltevermögen als quantitativer Wert der Tragfähigkeit berücksichtigt. Das innere Verhalten, wie beispielsweise das Versagenverhalten, wird nicht betrachtet. Das Versagen von Holzschraubverbindungen ist bisher kaum erforscht und die im Stand der Forschung beschriebenen Analysetechniken sind nicht geeignet, um das Versagenverhalten im Gewindekontakt zu beobachten. Diese übliche Vorgehensweise, bei welcher Schraubverbindungen ohne Kenntnisse des Versagenverhaltens als Black-Box betrachtet werden ist in Abbildung 2.19 abgebildet.

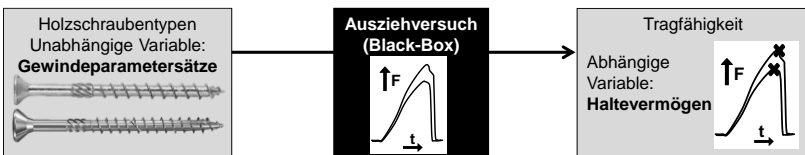


Abbildung 2.19: Übliches im Stand der Forschung beschriebenes Vorgehen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. Holzschraubverbindungen werden als Black-Box-Modelle mit Holzschraubentypen als Eingangs- und den Haltevermögen als einzelne Werte der Tragfähigkeit als Ausgangsgrößen betrachtet.

3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden auf Basis des Stands der Forschung der Forschungsbedarf dargestellt und die Zielsetzung für die vorliegende Arbeit formuliert.

3.1 Motivation

In der Gestaltung ist die zentrale Aufgabe die Produktgestalt so zu definieren, dass sie geforderte Funktionen erfüllt. Diese Funktionen können nur indirekt durch die Gestaltung des Produkts realisiert werden, denn nur die Gestalt ist in der Konstruktion direkt beeinflussbar. Dies ist bei Bauteilverbindungen wie bei Holzschraubverbindungen besonders herausfordernd, da nur ein Teil der Gestalt der Schraubverbindung konstruktiv verändert werden kann. Im Gewindegewindekontakt zwischen Holzschraube und Holz können nur die geometrischen und die stofflichen Parameter der Schraube gestaltet werden. Die andere Seite des Wirkflächenpaares formt die Holzschraube während des Einschraubvorgangs selbst. Die Funktionen können daher allein durch die Gestaltung der Holzschraube beeinflusst werden. Notwendig für die Gestaltung ist das Verständnis, wie die geforderten Funktionen durch eine geeignete Gestalt erfüllt werden können.

Eine Entwicklungszielgröße für die Gestaltung von Holzschrauben ist die Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit basiert auf den Wechselwirkungen zwischen Schraubengewinde und Holz und wird sowohl durch die Holzparameter als auch durch geometrische und stoffliche Parameter des Schraubengewindes beeinflusst. Für die Gestaltung von Holzschrauben sind daher Modelle zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zwischen Tragfähigkeit und Gewindegestalt notwendig. Black-Box-Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge beschreiben, welche Parameter des Gewindes einen Einfluss auf die Tragfähigkeit haben und wie diese Parameter ausgeprägt sein müssen, um eine hohe Tragfähigkeit zu erzielen. Black-Box-Modelle sind jedoch nur im geprüften Wertebereich gültig. Bei Änderungen von Anforderungen sind diese Modelle nicht mehr anwendbar, da deren Übertragbarkeit unklar ist. Für eine Übertragbarkeit fehlen die zugrundeliegenden Mechanismen dieser Zusammenhänge. Für eine gegenüber Anforderungsänderungen robustere Gestaltung von Holzschrauben sind sogenannte White-Box-Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge notwendig. Diese Modelle beschreiben zusätzlich das Wissen zu den zugrundeliegenden Mechanismen der Zusammenhänge zwischen Gestaltparametern und Funktionserfüllung und unterstützen die Gestaltung damit nachhaltig. Diese Modelle zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen ermöglichen

eine gezielte Optimierung von Holzschrauben hin zu höheren Haltevermögen. Aufgrund der höheren Haltevermögen können höhere Lasten über die Verbindungsstellen übertragen werden. Dadurch entsteht nachgeordnet ein Beitrag zum ressourcenschonenden Bauen mit dem klimaneutralen und nachwachsenden Baustoff Holz.

Wie im Stand der Forschung gezeigt, ist bislang jedoch nur der Einfluss des Außendurchmessers von Holzschrauben auf das Haltevermögen bekannt. Für weitere Gewindep Parameter ist sowohl unbekannt, ob diese einen Einfluss auf das Haltevermögen haben als auch die Höhe und Richtung dieser Einflüsse. Das System Holzschraubverbindung wird dabei lediglich als Black-Box-Modell betrachtet. Eine Herausforderung in der Ermittlung dieser Einflüsse ist, dass das bestehende Vorgehen bisher keinen Erfolg zeigt.

Zusammengefasst fehlt es sowohl an in Modellen abgebildetem Wissen zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang in Holzschraubverbindungen als auch an Methoden, um diese Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu ermitteln und zu modellieren.

3.2 Zielsetzung

Zur Unterstützung der Gestaltung von Holzschrauben sollen Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge entwickelt werden. Diese Modelle sollen die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindep Parametern von Holzschrauben erklären. Dazu sollen Gewindep Parameter mit einem signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen ermittelt werden. Zudem sollen Richtung und Höhe des Einflusses ermittelt werden. Diese Einflüsse sind bislang unbekannt und werden für die Holzart Fichte in tangentialer Einschraubrichtung bei einem Einschraubwinkel von 90° erarbeitet. Ein weiteres Ziel ist es, die Einflüsse in theoretischen Modellen zu erklären. Die erzeugten Erkenntnisse sollen die Synthese von Holzschraubengewinden unterstützen. Daraus ergibt sich folgende Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit:

Das Ziel ist die Analyse und Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindep Parametern von Holzschrauben. Die Modellierung verfolgt den Zweck die Synthese von Holzschraubengewinden mit höherer Tragfähigkeit zu ermöglichen.

Die Zielsetzung schließt auch die Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit ein. Da bestehende Vorgehen für diese Zielsetzung bisher nicht erfolgreich waren, sollen neue Vorgehen

und Analysetechniken entwickelt werden. Diese betreffen insbesondere die Identifikation unbekannter Einflussgrößen sowie die Quantifizierung des Einflusses der Gestaltparameter im Gewinde auf die Funktion Tragfähigkeit.

Der angestrebte, methodische Beitrag dieser Arbeit kann daher wie folgt zusammengefasst werden:

Durch zu entwickelnde Analysetechniken sollen die Analyse und die Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ermöglicht werden. Dazu soll das Verhalten im Gewindekontakt analysiert, Einflussgrößen darauf identifiziert sowie unbekannte Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ermittelt und modelliert werden können.

4 Forschungsfragen und Forschungsdesign

Aus der in Kapitel 3 beschriebenen Zielsetzung wird zunächst das Vorgehen dieser Arbeit und anschließend die Forschungsfragen abgeleitet. Die Forschungsfragen adressieren die notwendigen Erkenntnisse, um die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge in Modellen erklären zu können. Anschließend wird das Forschungsdesign zur Erzielung dieser Erkenntnisse beschrieben.

4.1 Vorgehen und Forschungsfragen

Das im Stand der Forschung aufgezeigte übliche Vorgehen für die Ermittlung der Einflüsse der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit ist die Verwendung von kommerziellen Schraubentypen in Ausziehversuchen, bei denen lediglich das Haltevermögen betrachtet wird. In Abbildung 4.1 ist dieses Vorgehen aus dem Stand der Forschung in Pfad 1 in blau dargestellt. Das Haltevermögen ist der maximale Kraftwert der Funktion Tragfähigkeit und somit eine Bewertungsgröße der Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit wird jedoch sowohl durch das quantitative Haltevermögen und als auch durch das Verhalten im Versagen beschrieben.

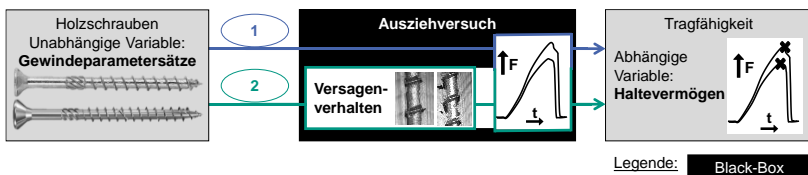


Abbildung 4.1: Unterschiedliche Vorgehen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter und Haltevermögen. Der Pfad 1 beschreibt das Vorgehen aus dem Stand der Forschung. Der Pfad 2 beschreibt das Vorgehen dieser Arbeit, bei welchem zusätzlich das Versagenverhalten analysiert wird.

In dieser Arbeit wird ein neues Vorgehen zur Erreichung der Zielsetzung gewählt. Das Vorgehen dieser Arbeit, bei welchem auch das Versagenverhalten berücksichtigt wird, ist in Abbildung 4.1 in Pfad 2 in grün dargestellt. Durch das Versagen des Holzes im Gewindekontakt wird die Tragfähigkeit beeinträchtigt und gegebenenfalls nicht mehr erfüllt. Um die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und der

Gewindegestalt zu verstehen, ist es daher notwendig, das Versagen im Gewindekontakt zu analysieren. Dies wurde für unterschiedliche Gewindeparameter jedoch bisher nicht untersucht. Im Stand der Forschung wird der Zusammenhang zwischen der Tragfähigkeit und der Gewindegestalt über den einzelnen Funktionswert Haltevermögen ermittelt. Das Verhalten des Systems Holzschraubverbindung bleibt unberücksichtigt. Der Prozess, wie es zum Versagen kommt und welche Vorgänge zwischen Schraubengewinde und Holz ablaufen sind unbekannt und werden bislang nicht betrachtet. Damit wird das System Holzschraubverbindung nur als Black-Box-Modell berücksichtigt.

Daher soll in dieser Arbeit ein Vorgehen verfolgt werden, welches auch das Versagenverhalten berücksichtigt. Damit können Einflussgrößen im Gewindekontakt während dem Versagensprozess identifiziert werden. Das Versagen kann als Zwischenschritt angesehen werden, um die Ursache-Wirkung-Beziehung zwischen Gestaltparameter und Tragfähigkeit zu verstehen. Diese Beziehung kann in Modellen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen im Gewindekontakt abgebildet werden. Das System Holzschraubverbindung wird dadurch in einem White-Box-Modell beschreibbar.

Damit leitet sich die folgende übergeordnete Forschungsfrage für diese Arbeit ab:

Wie können die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern von Holzschraubverbindungen mit Modellen erklärt werden?

Zur Beantwortung dieser übergeordneten Forschungsfrage werden drei Teilforschungsfragen definiert:

1. Welche Parameter des Gewindekontakts beeinflussen das Versagenverhalten und wirken sich damit auf die Tragfähigkeit der Holzschraubverbindung aus?
2. Wie können die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern modelliert werden?
 - 2.1. Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern?
 - 2.2. Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Versagenverhalten und einem Gewindeparameter?
3. Welche Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern können mit den in Teilforschungsfrage 2 erarbeiteten Modellen erklärt werden?

Eine gliedernde Übersicht der Teilforschungsfragen mit den jeweils zu erwartenden Erkenntnissen ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit

sind die Erkenntnisse in Erweiterung zum bekannten Stand der Forschung dargestellt. Durch die Berücksichtigung des Versagenverhaltens wird die Black-Box „Holzschraubverbindung“ als White-Box beschreibbar. Über die Teilforschungsfragen hinweg werden die vermuteten Einflussgrößen (graue Pfeile) stufenweise qualitativ (gestrichelte Pfeile) und dann quantitativ (durchgezogene Pfeile) ermittelt sowie darauf aufbauend die Modelle der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge erarbeitet (grauer Rahmen) und validiert (schwarzer Rahmen).

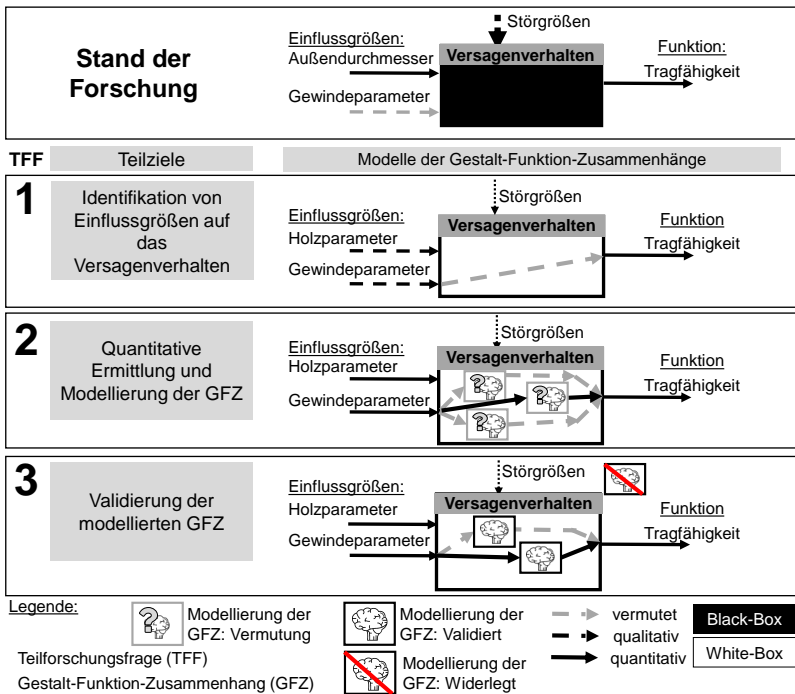


Abbildung 4.2: Teilforschungsfragen und die jeweils zu erwartenden Erkenntnisse zu den modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen im Vergleich zu dem Wissen aus dem Stand der Forschung.

Die erste Teilforschungsfrage adressiert die Untersuchung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt von Holzschrauben. Hierzu soll die Beobachtungsbarriere überwunden, unterschiedliche Gewindegeometrien von kommerziellen Holzschrauben beim Versagen im Ausziehvorgang beobachtet und Einflussgrößen auf das Versagen identifiziert werden. Für die Gestaltung von Holzschrauben sind nur die beeinflussbaren Einflüsse des Schraubengewindes auf die Tragfähigkeit relevant. Identifizierte Einflüsse des Holzes sind aus Sicht des Ziels der Arbeit als Störgrößen zu betrachten und in Untersuchungen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge möglichst konstant zu halten. Ergebnis dieser Untersuchung sind identifizierte, qualitative Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt von Holzschrauben.

Die zweite Teilforschungsfrage adressiert den quantitativen Zusammenhang zwischen der Funktion Tragfähigkeit und den Gestaltparametern. Im ersten Schritt soll der Einfluss von Gewindeparametern auf das Haltevermögen in einer Untersuchung bestimmt werden. Diese Gewindeparameter sollen gezielt variiert und nicht in Form von Gewindeparametersätzen kommerzieller Schraubentypen untersucht werden. Dies erfolgt entsprechend dem Vorgehen aus Abbildung 4.1, anhand dessen der Einfluss der Gewindeparameter auf das Haltevermögen unter Berücksichtigung des Versagenverhaltens bestimmt wird. Daher werden die Einflussgrößen des Schraubengewindes und des Holzes auf das Versagenverhalten aus der ersten Teilforschungsfrage berücksichtigt. Die dahinterliegende Annahme ist, dass Gewindeparameter, die einen Einfluss auf das Versagenverhalten haben, ebenfalls einen Einfluss auf das Haltevermögen aufweisen sollten, da die Tragfähigkeit durch das Versagen beeinträchtigt wird. Die Holzparameter sind Einflussgrößen und werden in der Untersuchung möglichst konstant gehalten. Ergebnis dieser Untersuchung sind Einflüsse der untersuchten Gewindeparameter auf das Haltevermögen. Im zweiten Schritt soll die Wirkung der Gewindeparameter auf das Versagenverhalten quantitativ untersucht werden. Durch die Verknüpfung der Gewindeparameter mit dem Versagenverhalten können Vermutungen zu den Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgestellt werden. Die ermittelten Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter, Versagenverhalten und Haltevermögen werden anschließend in Modellen abgebildet. Ergebnisse der Teilforschungsfrage sind Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen Gewindeparametern, Haltevermögen und Versagenverhalten sowie Modellierungen, welche die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern abbilden.

Die dritte Teilforschungsfrage adressiert die Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen. Die Modelle aus der zweiten Teilforschungsfrage erklären die Einflüsse der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit und ermöglichen damit die Vorhersage des Einflusses von Gewindeparametern auf das Halte-

vermögen. Um die Modelle zu validieren, soll daher der vorhergesagte Einfluss der Gewindep Parameter auf das Haltevermögen durch experimentelle Untersuchungen geprüft werden. Dadurch können die Modelle validiert oder falsifiziert werden. Als Ergebnis des dritten Teilziels ergeben sich Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu weiteren Gewindep Parametern von Holzschrauben sowie validierte oder falsifizierte Modelle, welche die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindep Parametern erklären. Schlussendlich sollen auf Basis dieser Ergebnisse Vorschläge zu optimierten Holzschraubengewinden erarbeitet werden.

4.2 Forschungsdesign

Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt nach dem in Abbildung 4.3 dargestellten Forschungsdesign. Dieses Forschungsdesign basiert auf den Teilforschungsfragen und stellt die für die Beantwortung notwendigen Methoden dar.

TFF	Teilziele	Methoden
1	Identifikation von Einflussgrößen auf das Versagenverhalten	<ul style="list-style-type: none"> Experimentelle Untersuchungen des Versagenverhaltens mittels der Analysetechniken: <i>Sectional Imaging</i> und <i>Continued Movement</i> Untersuchung an kommerziellen Holzschrauben 
2	Quantitative Ermittlung und Modellierung der GFZ	<ul style="list-style-type: none"> Experimentelle Untersuchungen des Haltevermögens in Abhängigkeit von definierten Gewindep Parametern Verwendung des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing Experimentelle Untersuchungen des Versagenverhaltens in Abhängigkeit von definierten Gewindep Parametern Analyse der Rissbildung mittels Algorithmus Quantifizierung der Rissbreite und Risslänge Modellierungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindep Parametern 
3	Validierung der modellierten GFZ	<ul style="list-style-type: none"> Experimentelle Untersuchungen des Haltevermögens in Abhängigkeit von definierten Gewindep Parametern Verwendung des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing Validierung der Modellierungen durch Prüfung der vorhergesagten Einflüsse 

Legende: Teilforschungsfrage (TFF), Gestalt-Funktion-Zusammenhänge (GFZ)

Abbildung 4.3: Forschungsdesign zur Beantwortung der Forschungsfragen. Dargestellt sind die Methoden der jeweiligen Teilforschungsfragen.

Zur Beantwortung von Teilforschungsfrage 1 wird das Versagenverhalten experimentell untersucht. Dies folgt dem in Kapitel 4.1 vorgestellten Vorgehen dieser Arbeit. Bislang ist das Versagenverhalten von Holzschrauben nur wenig erforscht und es wurde nur der Zustand nach dem Versagen nicht die Veränderung im Gewindekontakt untersucht. Daher ist zuerst die Entwicklung von geeigneten Analysetechniken für die Beobachtung des Versagenverhaltens und zur Überwindung der Beobachtungsbarriere notwendig. Durch die qualitative Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt sollen Einflussgrößen darauf identifiziert werden. Dazu werden unterschiedliche kommerzielle Holzschrauben verwendet. Teilziel dieser Teilforschungsfrage ist die Identifikation von Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt.

Zur Beantwortung von Teilforschungsfrage 2 werden Modelle erarbeitet, welche die Zusammenhänge zwischen Gewindeparametern und der Wirkung auf das Versagenverhalten sowie das Haltevermögen abbilden. Dazu wird in einer experimentellen Untersuchung der Einfluss von definierten Gewindeparametern auf das Haltevermögen ermittelt. Hierzu werden die aus Teilforschungsfrage 1 identifizierten Einflussgrößen berücksichtigt. Einflussgrößen auf das Versagenverhalten, welche aus den Holzparametern resultieren, sind aus Sicht des Ziels der Arbeit Störgrößen. Um Gestalt-Funktion-Zusammenhänge des Gewindekontakts statistisch signifikant ermitteln zu können, müssen diese bisher unbekanntenen Störgrößen berücksichtigt werden. Dazu ist die Entwicklung eines Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing notwendig. Die Gewindeparameter der Schraube werden in dieser Untersuchung gezielt eingestellt und der Einfluss auf das Haltevermögen quantitativ untersucht. In einer zweiten Untersuchung wird das Versagenverhalten in Abhängigkeit dieser definierten Gewindeparameter untersucht. Um eine quantitative Analyse des Versagens zu ermöglichen, soll die Rissbildung im Gewindekontakt mit einem Algorithmus gemessen werden. Die Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter, Versagen und Haltevermögen werden in Modellen abgebildet. Teilziele dieser Teilforschungsfrage sind die quantitative Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Gewindeparametern, dem Haltevermögen und der Wirkung auf das Versagenverhalten sowie die Modellierung dieser Gestalt-Funktion-Zusammenhänge.

Zur Beantwortung von Teilforschungsfrage 3 wird die Vorhersage der erarbeiteten Modellierungen geprüft. Dazu werden experimentelle Untersuchungen zum Haltevermögen in Abhängigkeit von weiteren Gewindeparametern durchgeführt. Der in Teilforschungsfrage 2 entwickelte Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing wird auch in dieser Untersuchung verwendet. Die zu untersuchenden Gewindeparameter werden auf Grundlage der in Teilforschungsfrage 2 aufgebauten Modellierungen gezielt ausgewählt, um die beschriebenen Vorhersagen dieser Modelle zu

prüfen. Teilziel dieser Teilforschungsfrage sind validierte oder falsifizierte Modellierungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindegewindekontakt sowie die ermittelten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu weiteren Gewindeparametern.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit der Beantwortung der drei Teilforschungsfragen die Zielsetzung dieser Arbeit erreicht wird. Darauf aufbauend werden Vorschläge für optimierte Holzschraubengewinde vorgestellt. Als Ergebnis ergeben sich neben den systemspezifischen Erkenntnissen auch das entwickelte methodische Vorgehen und neue Analysetechniken, welche die Analyse und Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ermöglichen.

5 Identifikation von Einflussgrößen auf das Versagenverhalten

Für die Gestaltung von Holzschrauben ist es notwendig, den Einfluss der Gewindeparameter im Gewindekontakt auf die Tragfähigkeit zu verstehen. Im Stand der Forschung konnte gezeigt werden, dass dieser Zusammenhang bisher über Ausziehversuche ermittelt wird. Dabei wird lediglich der maximale Kraftwert der Tragfähigkeit, das sogenannte Haltevermögen, betrachtet. Die Tragfähigkeit wird durch das Versagen im Gewindekontakt der Holzschraubverbindung begrenzt. Daher muss das Versagenverhalten untersucht werden. Das Versagenverhalten im Gewindekontakt sowie Einflussgrößen auf dieses Versagenverhalten sind bisher weitgehend unbekannt.

Daher befasst sich dieses Kapitel mit der ersten Teilforschungsfrage:

Welche Parameter des Gewindekontakts beeinflussen das Versagenverhalten und wirken sich damit auf die Tragfähigkeit von Holzschraubverbindung aus?

Ziel ist somit die Untersuchung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt und die Ermittlung von Einflussgrößen auf das Versagenverhalten. Für die Identifikation der Einflussgrößen wird das Versagenverhalten in Ausziehversuchen für unterschiedliche Holzschraubentypen beobachtet. Da dies mit bestehenden Analysetechniken nicht untersucht werden kann, werden neue Analysetechniken entwickelt und bezüglich ihrer Eignung evaluiert. Anschließend wird das Versagenverhalten mit den Analysetechniken beobachtet und es werden Einflussgrößen auf dieses ermittelt. Letztlich erfolgt die Diskussion der Ergebnisse.

Die Bewertung der Analysetechniken mittels Selection Matrix dieses Kapitel basiert zu Teilen auf der Veröffentlichung:

- *„Methodical support for investigation of system behaviour by means of analysis techniques - Overcoming non-transparency in embodiment design” (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)*

Die quantitative Bewertung der Analysetechniken und die Untersuchung des Versagenverhaltens dieses Kapitel basieren zu Teilen auf der Veröffentlichung:

- *„Investigation of failure behavior in the thread contact of wood screws during the pull-out process” (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)*

Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus den beiden Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

5.1 Entwicklung der Analysetechniken

Für die Ermittlung der Einflussgrößen muss das Versagenverhalten der Holzschraubverbindung beobachtbar gemacht werden. Eine Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt ist aufgrund der Intransparenz des Holzes nicht möglich. Dadurch liegt eine Beobachtungsbarriere vor. In Kapitel 2.1.1.2 wurde gezeigt, dass adäquate Analysetechniken für die Überwindung der Beobachtungsbarriere bisher fehlen. Daher ist zuerst eine Entwicklung neuer Analysetechniken notwendig. Die Entwicklung dieser Techniken wird nachfolgend vorgestellt. Diese Entwicklung erfolgte im Rahmen eines Projektes in Zusammenarbeit mit einem industriellen Hersteller von Holzschrauben sowie einem wissenschaftlichen Institut mit Fokus Holzbau und Baukonstruktionen.

Die erste Analysetechnik wird auf Basis bekannter und mittels der *Selection Matrix* bewerteten Analysetechniken entwickelt und nennt sich *Continued Movement*. Die zweite Analysetechnik wird mittels Vorarbeiten von Appl (2009) weiterentwickelt und wird als *Sectional Imaging* bezeichnet. Beide Analysetechniken werden auf ihre Eignung für das vorliegende Entwicklungsziel bewertet. Dazu werden die Analysetechniken entlang der in Kapitel 2.1.1.2 vorgestellten Anforderungen der *Selection Matrix* evaluiert.

5.1.1 Analysetechnik Continued Movement zur Beobachtung des Versagenverhaltens

In Kapitel 2.1.1.2 wurde die Bewertung vorhandener Analysetechniken mittels der *Selection Matrix* vorgestellt. Diese Matrix ermöglicht den Vergleich von Analysetechniken. Durch den Vergleich der Erfüllung einzelner Anforderungen können Analysetechniken zur Überwindung einer Beobachtungsbarriere ausgewählt und mögliche Kombinationen identifiziert werden.

Die Kombination aus der Analysetechnik Video mit der Analysetechnik gesägtes Schnittmodell nutzt die Stärken und kompensiert die Schwächen der jeweiligen Technik. Die durch diese Kombination neue Analysetechnik wird *Continued Movement* genannt und ermöglicht die Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt. In Abbildung 5.1 ist diese Kombination dargestellt.

		Analysetechnik							Continued Movement
Fehlerklasse		Tuschleipaste	Röntgen	Video	Gelaseres Schnittmodell	Gesägtes Schnittmodell	Vergrößerter 3D-Druck Prototyp		
Informationen nicht verfügbar	Beobachtbares Systemverhalten	X	-	✓	-	✓	✓	✓	
	Beobachtbarer Kontakt	X	X	X	X	✓	X	✓	
	Kombination mit Messwert möglich	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Fehlerhafte Beobachtung	Minimale Veränderung des Verhaltens	-	✓	✓	-	-	X		
	Minimale Veränderung des Kontakts	X	✓	-	-	X	X		
Falsche Interpretation	Reproduzierbarkeit der Effekte	✓	✓	✓	X	X	✓		
	Sichtbare Effektstärke	X	X	X	X	✓	✓		
		2 ✓ 4 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 2 X	1 ✓ 3 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 3 X		

Abbildung 5.1: *Selection Matrix* mit bewerteten Analysetechniken sowie die mögliche Kombination Video mit gesägtes Schnittmodell zur neuen Analysetechnik *Continued Movement*.

Im Folgenden wird die Eignung dieser kombinierten Analysetechnik beurteilt. Die Technik *Continued Movement* nutzt die Möglichkeit der Analysetechnik gesägtes Schnittmodell, um den Kontakt zwischen Schraubengewinde und Holz zu beobachten. Um dies zu ermöglichen, wird ein Teil des Holzes, welches die Verschraubung umgibt, entfernt. Damit kann der Gewindekontakt der Verschraubung beobachtet werden. Dies wird mit einer zeitkontinuierlichen Datenerfassung der Analysetechnik Video kombiniert. Mittels Videomikroskopie wird das Verhalten des Gewindekontakts während des Versagens sichtbar. Die neue Analysetechnik *Continued Movement* erlaubt somit die Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt. Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, sind die drei Anforderungen der Fehlerklasse **Informationen nicht verfügbar** dadurch erfüllt.

Der für diese Analysetechnik genutzte Holzprüfkörper ist in Abbildung 5.2 in der Draufsicht (a), Vorderansicht (b) und in isometrischer Darstellung (c) gezeigt. Der Prüfkörper weist drei Prüfpositionen für die Beobachtung des Versagenverhaltens von Holzschrauben auf. In der Darstellung ist in der mittleren Position eine Holzschraube eingeschraubt.

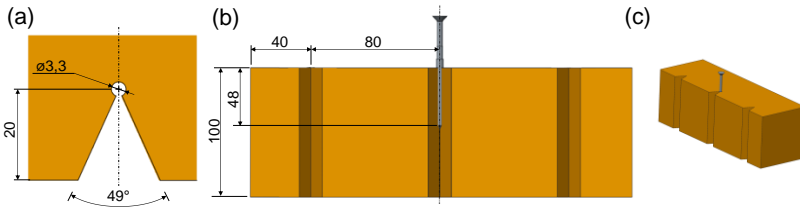


Abbildung 5.2: Prüfkörper für die Analysetechnik *Continued Movement*: Draufsicht (a), Vorderansicht (b), 3D-Ansicht (c) mit drei Positionen für die Beobachtung des Versagenverhaltens. In der mittleren Position ist eine Holzschraube dargestellt. (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Um diese Prüfkörper herzustellen, werden aus dem Holz keilförmige Ausschnitte mit einem Winkel von 49° herausgetrennt. Dazu wurde eine Bandsäge verwendet. Dieser Winkel wurde bei allen Prüfkörpern mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5^\circ$ eingehalten. Anschließend wird ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 3,3 mm an der Spitze des Keils erzeugt. Der Abstand des Bohrlochs von der Vorderkante des Holzbalkens beträgt 20 mm. Die zu untersuchende Holzschraube wird anschließend in dieses Bohrloch eingeschraubt. Für das Einschrauben der Holzschraube wurde eine Lehre benutzt, um die Parallelität der Schraube zum Bohrloch zu gewährleisten. Diese Prüfkörpergeometrie wurde in Vorversuchen iterativ ermittelt und erlaubt mit Hilfe des entfernten Keils, dass ein Teil des Gewindekontakts beobachtbar ist.

Der Gewindekontakt wird während der Ausziehversuche mit einer Videokamera kontinuierlich gefilmt. Somit kann das Verhalten im Gewindekontakt untersucht werden. Diese Videoaufnahmen wurden mit der Kamera MIRAZOOM MZ-204¹ aufgenommen. Der Vorteil der Nutzung einer Videoaufnahme ist, dass das Versagenverhalten zu beliebigen Zeitpunkten gestoppt, in schnellerer oder langsamerer Geschwindigkeit abgespielt werden oder auch mit Versagenverhalten anderer Gewindegeometrien verglichen werden kann. Abbildung 5.3 zeigt links schematisch den Aufbau, in der Mitte ein Bild des realen Aufbaus sowie rechts die Perspektive aus Sicht der Videokamera.

Die Videoaufnahmen werden mit den gemessenen Werten der Ausziehmaschine kombiniert. Dazu wurde das Video mit der Software MATLAB² zeitsynchron mit den

¹ Hersteller: OWL Tech Ltd., Gillingham, England

² Hersteller: The MathWorks Inc., Version 8.1 (R2017)

Messwerten (Ausziehkraft, Zeit und Maschinenweg) verknüpft. Dies erlaubt das Verhalten im Gewindekontakt zu bestimmten Zeitpunkten des Versagens oder bei charakteristischen Kraftwerten zu bestimmen.

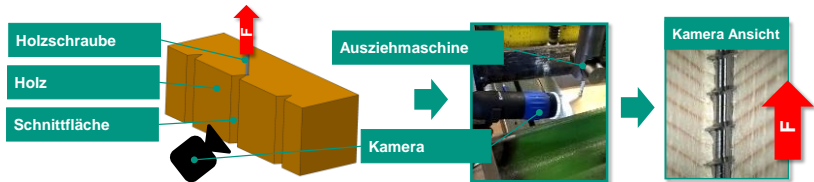


Abbildung 5.3: Der Aufbau der Analysetechnik *Continued Movement* (links: schematischer Aufbau, mittig: realer Aufbau) sowie die Perspektive der Videokamera (rechts). Dies erlaubt die Beobachtung des Versagenverhaltens des Gewindekontakts. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Zusätzlich wurde mit der Motion-Tracking-Videoanalysesoftware Tracker³ innerhalb der Videos die reale Verschiebung der Schraube in Bezug zum umgebenden Holz ermittelt. Dadurch kann das Verhalten des Gewindekontakts sowie die aufgebrachte Ausziehkraft nicht nur mit dem Maschinenweg der Ausziehmaschine, sondern auch orts aufgelöst mit der Verschiebung der Holzschraube in Verbindung gebracht werden.

Die Anforderungen der ersten Fehlerklasse (siehe Abbildung 5.1) wurden bereits bewertet und sind erfüllt. Die Beurteilung der Eignung der Analysetechnik entlang der weiteren Anforderungen der *Selection Matrix* wird auf Grundlage von ersten Anwendungen durch qualitative Daten vorgenommen. Die Bewertung der Anforderungen ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Das aufgenommene Versagenverhalten ist über den erzeugten Keil beobachtbar. Es kann das Verhalten der auftretenden Rissbildung als auch die Verformungen des Holzes untersucht werden. Sowohl Verformungen als auch Rissbildungen sind deutlich zu beobachten und daher wird die Anforderung der **sichtbaren Effektstärke** als erfüllt beurteilt. Die Anforderung **minimale Veränderung des Kontakts** muss als nicht erfüllt bewertet werden.

³ Werkzeug zur Videoanalyse und -modellierung: Tracker, Version 4.96 von D. Brown. Zugriff unter: <http://physlets.org/tracker/> (22.09.2020)

Durch das mechanische Entfernen des Keils aus dem Prüfkörper wird die Oberfläche des Holzes an dieser Stelle verändert. Bei der Beobachtung des Kontakts wird die veränderte Kontaktfläche betrachtet.

Die Bewertung der Anforderung erfolgte bisher auf Basis von qualitativen Anwendungsdaten. Die Anforderung der **minimalen Veränderung des Verhaltens** soll, aufgrund des Ziels der Technik der Beobachtung des Versagenverhaltens mittels quantitativer Daten erfolgen. Die Bewertung der **Reproduzierbarkeit** kann nicht qualitativ auf Basis von einzelnen Versuchen bestimmt werden. Die Bewertungen dieser beiden, in Abbildung 5.4 grün markierten, Anforderungen wird daher quantitativ untersucht. Diese Bewertung erfolgt nach der Vorstellung der zweiten Analysetechnik für beide Techniken gemeinsam in Kapitel 5.1.3.

		Analysetechnik							Continued Movement
Fehlerklasse	Anforderung	Tuschlerpaste	Röntgen	Video	Gelaseres Schnittmodell	Gesägtes Schnittmodell	Vergrößerter 3D-Druck Prototyp		
Informationen nicht verfügbar	Beobachtbares Systemverhalten	X	-	✓	-	✓	✓	✓	
	Beobachtbarer Kontakt	X	X	X	X	✓	X	✓	
	Kombination mit Messwert möglich	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Fehlerhafte Beobachtung	Minimale Veränderung des Verhaltens	-	✓	✓	-	-	X	-	
	Minimale Veränderung des Kontakts	X	✓	-	-	X	X	X	
Falsche Interpretation	Reproduzierbarkeit der Effekte	✓	✓	✓	X	X	✓	-	
	Sichtbare Effektstärke	X	X	X	X	✓	✓	✓	
		2 ✓ 4 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 2 X	1 ✓ 3 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 3 X		

Abbildung 5.4: Bewertung der Analysetechnik *Continued Movement*. Die Bewertung der Anforderungen **minimale Veränderung des Verhaltens** und **Reproduzierbarkeit** erfolgt im Folgenden auf Basis von quantitativen Daten. Auf Grundlage von (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b)

5.1.2 Analysetechnik *Sectional Imaging* zur Beobachtung des Versagensverhaltens bei unterschiedlichen Zuständen

Die entwickelte Analysetechnik *Sectional Imaging* erlaubt die Beobachtung des Versagensverhaltens des Gewindegewindkontakts auf Basis des Vergleichs unterschiedlicher Versagenszustände. Da bei der Technik *Continued Movement* die Anforderung der **minimalen Kontaktveränderung** nicht erfüllt ist, wurde eine weitere Analysetechnik gesucht, welche die Beobachtung des Gewindegewindkontakts ohne Veränderung von diesem erlaubt. Diese Analysetechnik basiert auf Vorarbeiten von Appl (2009) zur Beobachtung von Versagenszuständen bei Verbundankern. Appl (2009) verwendet für die Untersuchungen einen geteilten Betonprüfkörper. In den geschlossenen Spalt zwischen den aneinander gepressten Prüfkörpern wird ein Verbundanker eingesetzt. Dieser Anker wird mit einer vorher definierten Ausziehkraft belastet und nach Erreichen dieser Kraft entlastet. Wird der Spalt des Betonblocks geöffnet, so wird die innere Rissbildung für den Zustand nach dieser Last sichtbar. Dieser Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.5 im Gesamten (a) und im Detail (b) zu sehen.

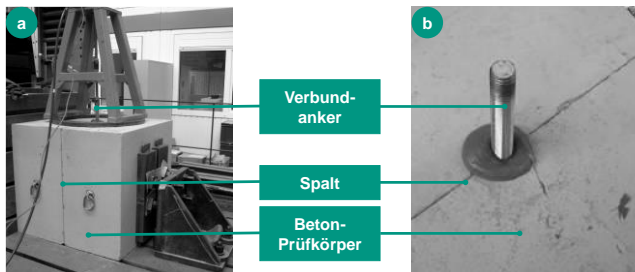


Abbildung 5.5: Versuchsaufbau zur Untersuchung von einzelnen Versagenszuständen bei Verbundankern. Appl (2009), veränderte Darstellung.

Dieses Vorgehen wurde in dieser Arbeit auf Holzverschraubungen übertragen und zur Analysetechnik *Sectional Imaging* weiterentwickelt. Um die Beobachtung der Versagenszustände zu ermöglichen, wurde ein Holzprüfkörper in zwei Hälften gesägt und diese Hälften mit Hilfe einer Halterung wieder zusammengepresst. In den hierdurch entstehenden, geschlossenen Spalt zwischen beiden Hälften wurden die zu untersuchenden Holzschrauben eingeschraubt. Durch ein Öffnen des Spalts der Prüfkörperhälften konnte der Gewindegewindkontakt beobachtet werden.

Der für diese Analysetechnik notwendige Prüfkörper ist in Abbildung 5.6 gezeigt. In (a) ist eine bemaßte Prüfkörperhälfte dargestellt. Diese werden hergestellt, indem der Holzprüfkörper mit einer Tischkreissäge in zwei Hälften zerteilt wird. Die beiden Hälften werden anschließend mit einer Halterung wieder zusammengepresst. Eine Vorderansicht der zusammengepressten Hälften mit Halterung ist in (b) und eine 3D-Ansicht des Aufbaus in (c) abgebildet. Dieser Prüfkörper erlaubt die Beobachtung von Versagenszuständen für Schrauben an drei Positionen. In der mittleren Position ist in (b) und (c) eine Holzschraube dargestellt. Für ein gleichmäßiges Verspannen der Hälften erfolgt dies an mehreren Positionen über die gesamte Schnittfläche verteilt. Dazu hat der Prüfkörper mehrere gleichmäßig verteilte Bohrungen mit einem Durchmesser von 12 mm. Es wird eine Halterung aus Aluminium mit einer Stärke von 15 mm genutzt. Diese Halterung ist mit einem deckungsgleichen Bohrmuster versehen wie der Prüfkörper. Diese Bohrungen werden genutzt, um die Hälften mittels der Halterung, mit Befestigungsschrauben zu verspannen. Dazu werden acht Befestigungsschrauben des Typs M10x150 mit Festigkeitsklasse 8.8 nach ISO 4014:2011-06 (DIN EN ISO 4014) verwendet. Der vertikale Achsabstand der Bohrungen zueinander beträgt 40 mm, der Abstand zur Probenerkante 25 mm und der Abstand zwischen den Befestigungsschrauben und den Holzschrauben 40 mm.

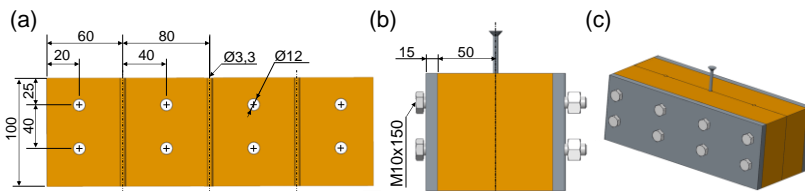


Abbildung 5.6: Prüfkörper für die Analysetechnik *Sectional Imaging*: Eine Hälfte des Prüfkörpers (a), beide Hälften mit Halterung und Holzschraube in der Vorderansicht (b) sowie 3D-Ansicht des Aufbaus mit Holzschraube an der mittleren der drei möglichen Prüfpositionen (c). (Hölz, Grauburger & Matthiesen, 2020a)

Der Prüfkörper hat drei Positionen für Holzschrauben, welche jeweils einen Durchmesser von 3,3 mm aufweisen. Diese haben einen Abstand von 60 mm vom Rand des Prüfkörpers und 80 mm zueinander. Die Holzschrauben werden im verspannten Zustand in die Prüfpositionen eingeschraubt. Für das Einschrauben der Holzschrauben wird eine Lehre benutzt.

Um die beiden Hälften auf reproduzierbare Weise zu verspannen, werden die Befestigungsschrauben mit einem Drehmoment von 10 Nm mittels Drehmomentschlüssel angezogen. Dabei ist zu beachten, dass durch Druckspannungen die Festigkeit des Werkstoffs Holz erhöht werden kann. Durch das Verspannen der Holzhälften wird somit das Haltevermögen der Holzschraube verändert. Daher wurde in Vorversuchen das Grenzdrehmoment ermittelt, bei welchem das Haltevermögen durch den Versuchsaufbau nicht verändert wird und mit dem Haltevermögen von eingeschraubten Holzschrauben vergleichbar ist. Es wurde ein Grenzdrehmoment von 10 Nm ermittelt.

Durch das Öffnen der Halterung kann der Gewindegewindekontakt zwischen der Probekörperhälfte und der Holzschraube bei verschiedenen Lastniveaus des Ausziehversuchs beobachtet werden. Die Anforderung eines **beobachtbaren Kontakts** ist damit erfüllt. Durch das Verspannen der Halterungen kann das Schnittmodell wieder geschlossen werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Holzschraube in den vorhandenen Gewindeeindruck eingelegt wird, um das Versagensbild nicht zu verfälschen. Dies unterscheidet sich zu Appl (2009), bei welchem ein wiederholtes Schließen nicht möglich ist, da der Verbundanker mit dem Mörtel in den Beton eingeklebt wird und durch das Öffnen der Verbund zerstört wird. Es kann somit jeweils nur ein einzelner Zustand beobachtet werden und es ist bei Appl (2009) notwendig für verschiedene Versagenszustände unterschiedliche Probekörper zu verwenden. Bei *Sectional Imaging* ist jedoch ein mehrmaliges Untersuchen desselben Gewindegewindekontakts bei verschiedenen Zuständen möglich. Der Spalt des Probekörpers kann mittels der Halterung wieder geschlossen werden, so dass mit einem einzigen Probekörper unterschiedliche Zustände vor und nach axialen Belastungen der Holzschraube beobachtet werden können. Dadurch wird der Einfluss von Störungen aus unterschiedlichen Probekörpern, wie unterschiedliche Holzdichten, Festigkeiten oder Astlöcher, vermieden. Unterschiede in den Versagenverhalten können durch die Beobachtung der Veränderungen innerhalb eines Probekörpers besser untersucht werden, wodurch die Anforderung der **sichtbaren Effektstärke** erfüllt wird.

Dies ermöglicht die Untersuchung des Versagenverhaltens durch den Vergleich der Zustände einer Holzschraube. Durch Kombination mit den Ausziehkräften der Ausziehmaschine ist es möglich, die Veränderung des Gewindegewindekontakts in Bezug zur Tragfähigkeit zu untersuchen. Die Vorgehensweise dieser Analysetechnik für die Untersuchung von verschiedenen Zuständen ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

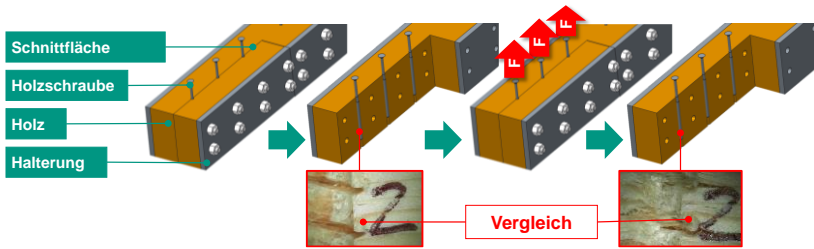


Abbildung 5.7: Die Vorgehensweise der Analysetechnik *Sectional Imaging* für den Vergleich unterschiedlicher Versagenszustände. Der Gewindefkontakt kann nach be- und entlasten durch Öffnen und Schließen des Versuchsaufbaus bei unterschiedlichen Zuständen beobachtet werden. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Die folgende Untersuchung konzentriert sich auf den Vergleich von zwei unterschiedlichen Zuständen. Dies ist zum einen der unbelastete Zustand nach dem Einschrauben und zum anderen der Zustand nach Erreichen des Haltevermögens der Verschraubung. Die nach dem Entlasten verbleibenden plastischen Veränderungen im Gewindefkontakt sind sichtbar. Elastische Verformungen können mit dieser Analysetechnik nicht beobachtet werden.

Die qualitative Bewertung der Anforderungen der Analysetechnik *Sectional Imaging* bezüglich Ihrer Eignung zur Beobachtung des Versagenverhaltens von Holzschrauben ist in Abbildung 5.8 zusammengefasst. Ein direktes Beobachten des Systemverhaltens ist mit dieser Technik nicht möglich, weshalb die Anforderung nicht erfüllt wird. Wie zuvor bei der Analysetechnik *Continued Movement* ist auch hier eine quantitative Prüfung der Anforderungen **Reproduzierbarkeit** sowie **Veränderung des Verhaltens** notwendig. Wird das Versagenverhalten durch Anwendung der Analysetechnik wesentlich verändert, so sind die damit erzeugten Erkenntnisse nicht verwertbar. Die Bewertung dieser beiden Anforderungen wird daher im folgenden Kapitel im Detail durchgeführt.

Legende:		Analysetechnik							Continued Movement	Sectional Imaging
Anforderung erfüllt: ✓		Tuschierpaste	Röntgen	Video	Gelaseres Schnittmodell	Gesägtes Schnittmodell	Vergrößerter 3D-Druck Prototyp			
Anforderung nicht erfüllt: X										
Anforderung nicht bewertbar: -										
Fehlerklasse	Anforderung									
Informationen nicht verfügbar	Beobachtbares Systemverhalten	X	-	✓	-	✓	✓	✓	X	
	Beobachtbarer Kontakt	X	X	X	X	✓	X	✓	✓	
	Kombination mit Messwert möglich	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Fehlerhafte Beobachtung	Minimale Veränderung des Verhaltens	-	✓	✓	-	-	X	-	-	
	Minimale Veränderung des Kontakts	X	✓	-	-	X	X	X	✓	
Falsche Interpretation	Reproduzierbarkeit der Effekte	✓	✓	✓	X	X	✓	-	-	
	Sichtbare Effektstärke	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓	
		2 ✓ 4 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 2 X	1 ✓ 3 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 3 X			

Abbildung 5.8: Evaluation der Analysetechnik *Sectional Imaging*. Die Bewertung der Anforderungen *minimale Veränderung des Verhaltens* und *Reproduzierbarkeit* erfolgt im Folgenden auf Basis von quantitativen Daten.

5.1.3 Quantitative Evaluation der Analysetechniken

Für die Evaluation der Analysetechniken bezüglich ihrer Eignung müssen die verbleibenden Anforderungen der **minimalen Veränderung des Verhaltens** und der **Reproduzierbarkeit** der Effekte bewertet werden. Es ist wichtig, dass das Versagenverhalten durch die Anwendung der Analysetechnik nicht wesentlich verändert wird. Weiterhin müssen die Analysetechniken reproduzierbare Ergebnisse liefern, um Einflussgrößen auf das Versagenverhalten ermitteln zu können. In diesem Kapitel wird die quantitative Evaluation dieser beiden Anforderungen vorgestellt. Ziel der quantitativen Evaluation ist, die Bewertung der Anforderungen und somit die Bewertung der Aussage, ob die Analysetechniken für das Untersuchungsziel geeignet sind oder ob deren Anwendung die Ergebnisse verfälscht.

Das Studiendesign für die quantitative Evaluation wird im Folgenden vorgestellt. Es werden Ausziehversuche durchgeführt. Die absoluten Haltevermögen von Holzschrauben sind mit und ohne Anwendung der Analysetechniken nicht direkt

vergleichbar. Bei der Analysetechnik *Continued Movement* hat der keilförmige Ausschnitt und bei der Analysetechnik *Sectional Imaging* der verspannte Prüfkörper einen Einfluss auf den Absolutwert des Haltevermögens. Für die Bewertung der Anforderung der **Änderung des Verhaltens** werden aus diesem Grund die relativen Veränderungen des Haltevermögens (*RWC*, engl.: relative withdrawal capacities) verwendet. Das relative Haltevermögen wird für jeden Holzschraubentyp nach Formel **3** berechnet. Dazu wird die prozentuale Abweichung des Haltevermögens eines Holzschraubentyps mit Anwendung der Analysetechnik ($R_{ax,Technik}$) von dem Haltevermögen ohne Anwendung der Technik ($R_{ax,Referenz}$) bestimmt. Zur Berücksichtigung der Versuchswiederholungen wird der Median berechnet. Dazu werden Holzschraubentypen mit unterschiedlichen Gewindeparametern verwendet.

$$RWC = \frac{\text{Median}(R_{ax,Technik})}{\text{Median}(R_{ax,Referenz})} \times 100 \quad \mathbf{3}$$

Um die Anforderung der **minimalen Veränderung des Verhaltens** zu erfüllen, müssen Holzschrauben mit unterschiedlichen Gewindeparametern zueinander vergleichbare relative Haltevermögen aufweisen. Die Standardabweichung wird in Prozent zu dem berechneten *RWC*-Wert angegeben. Dadurch können Änderungen in der Streuung identifiziert werden. Für eine erfolgreiche Bewertung der Anforderung der Reproduzierbarkeit müssen die unterschiedlichen Holzschraubentypen vergleichbare Streuungen (σRWC) aufweisen.

Für die Evaluation wurden drei der Holzschraubentypen verwendet, welche auch in der nachfolgenden Identifikation der Einflussgrößen verwendet werden. Die verwendeten drei kommerziellen Holzschraubentypen A, B und C werden in Abbildung 5.12 beschrieben. Um die Auswirkung der Streuungen der Holzparameter so gering wie möglich zu halten, wurden alle Schraubentypen (A, B, C) in jeder Holzprobe einmal geprüft. Dadurch werden systematische Fehler, beispielsweise aufgrund von Festigkeitsunterschieden der Holzbalken, vermieden. Der Versuchsaufbau der Ausziehversuche entspricht dem Aufbau zur Ermittlung der Einflussgrößen und wird in Kapitel 5.2 beschrieben.

Die Ergebnisse der Evaluation der Techniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* werden im Folgenden vorgestellt und die Anforderungen der **Änderung des Verhaltens** und der **Reproduzierbarkeit** bewertet.

5.1.3.1 Evaluation der Analysetechnik *Continued Movement*

In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse der Analysetechnik *Continued Movement* gezeigt. Die Haltevermögen der Holzschraubentypen A, B und C sind in den

Boxplots dargestellt. In jedem Diagramm stellt der linke Boxplot das Haltevermögen bei Anwendung der Analysetechnik *Continued Movement* (Cont.-M.) und der rechte Boxplot den entsprechenden Referenzversuch ohne Anwendung der Analysetechnik für den entsprechenden Holzschraubentyp dar.

In der unteren Hälfte der Abbildung 5.9 ist die Anzahl der Versuche (N), das relative Haltevermögen (RWC) und die Standardabweichung des relativen Haltevermögens (σ RWC) dargestellt. Die Berechnung des RWC erfolgte nach Formel 3. Für die Versuche wurde eine Stichprobengröße von neun Versuchen festgelegt. Die Referenz des Schraubentyps C enthält nur acht Versuche, da ein Versuch aufgrund einer Fehlfunktion der Ausziehmaschine fehlschlug. Der Versuch konnte aufgrund der Bedingung, dass für die Vergleichbarkeit der Haltevermögen alle drei Schraubentypen im gleichen Holzbalken ausgezogen werden müssen nicht wiederholt werden.

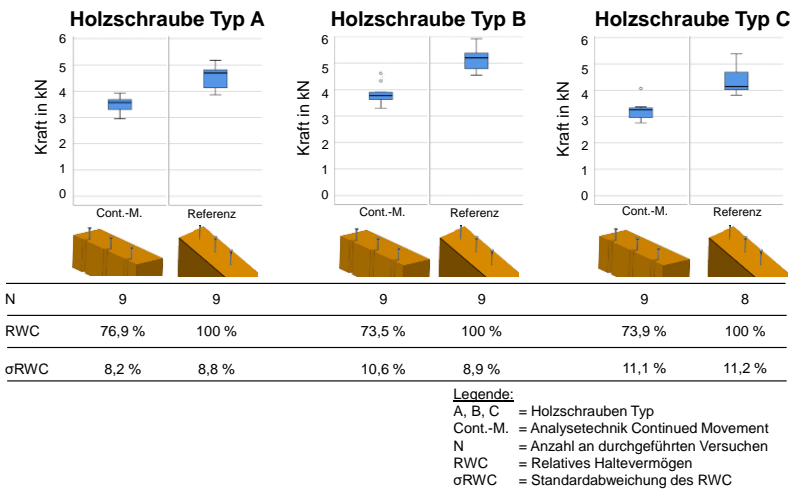


Abbildung 5.9: Evaluationsergebnisse der Analysetechnik *Continued Movement*. Das relative Haltevermögen (RWC) bei Anwendung der Analysetechnik beträgt bei den drei geprüften Schraubentypen etwa 75 % der Referenz. Der Unterschied der Standardabweichung des relativen Haltevermögens (σ RWC) beträgt für Schraubentyp A 0,6 %, für Typ B 1,7 % und für Typ C 0,1 %. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

In den Boxplots ist ersichtlich, dass die Haltevermögen bei Anwendung der Analysetechnik im Vergleich zu den Referenzversuchen für alle Schraubentypen niedriger sind. Für die Analysetechnik *Continued Movement* wird ein keilförmiger Ausschnitt für die Beobachtung des Versagens mittels Videokamera benötigt. Aufgrund dessen wurde erwartet, dass das Haltevermögen durch den fehlenden Teil des umgebenden Holzes reduziert wird.

Das relative Haltevermögen beträgt für den Holzschraubentyp A 76,9 %, für Typ B 73,5 % und für Typ C 73,9 %, also bei allen geprüften Schraubentypen etwas 75 % der Referenz. Der Unterschied der relativen Haltevermögen zwischen den verschiedenen Holzschraubentypen wird daher als gering eingeschätzt. Da das relative Haltevermögen, welches durch das Versagenverhalten beeinträchtigt wird, bei allen Schraubentypen ähnlich ist, kann angenommen werden, dass sich das Verhalten durch die Anwendung der Analysetechnik nicht wesentlich verändert hat. Die Anforderung der **minimalen Veränderung des Verhaltens** ist somit erfüllt.

Die Standardabweichung bei Holzschraubentyp A beträgt bei Anwendung der Technik 8,2 % und in den Referenzversuchen 8,8 %. Bei Typ B beträgt diese bei Anwendung der Technik 10,6 % und in den Referenzversuchen 8,9 %. Die Standardabweichung bei Typ C beträgt bei Anwendung der Technik 11,1 % und in den Referenzversuchen 11,2 %. Der Unterschied der Standardabweichung des relativen Haltevermögens zwischen Anwendung der Technik und den Referenzversuchen beträgt für alle Schraubentypen somit zwischen 0,1 % bis 1,7 %. Für die Anwendung in dieser Arbeit wird dies als gering eingestuft und die Anforderung der **Reproduzierbarkeit** wird somit erfüllt.

5.1.3.2 Evaluation der Analysetechnik Sectional Imaging

Abbildung 5.10 zeigt die Ergebnisse der Analysetechnik *Sectional Imaging*. Die Abbildung ist entsprechend der Evaluation der Technik *Continued Movement* dargestellt. Der linke Boxplot stellt jeweils die Haltevermögen bei Anwendung der Analysetechnik *Sectional Imaging* (Sec.-I.) dar, der rechte Boxplot die Haltevermögen für den Referenzversuch ohne Anwendung der Analysetechnik. In der unteren Hälfte von Abbildung 5.10 ist die Anzahl der Stichprobengröße (N), das relative Haltevermögen (RWC) und die Standardabweichung des relativen Haltevermögens (σRWC) dargestellt. Für eine repräsentative Anwendung der Technik wurden alle Probekörper vor Erhebung der Haltevermögen einmal geöffnet und wieder geschlossen.

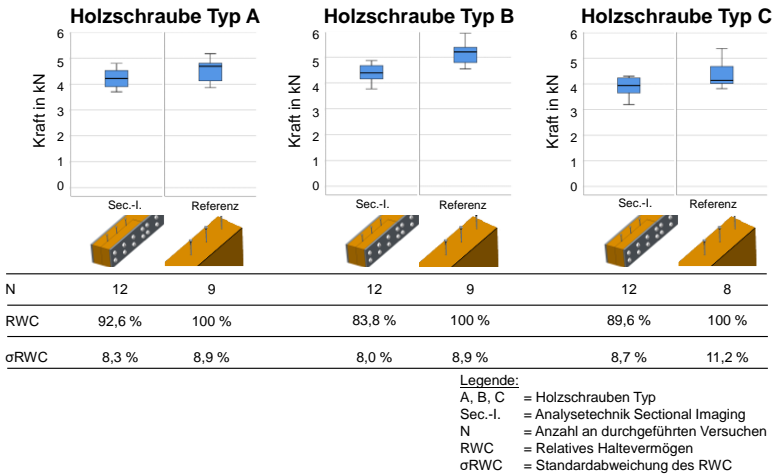


Abbildung 5.10: Evaluationsergebnisse der Analysetechnik *Sectional Imaging*. Das relative Haltevermögen (*RWC*) bei Anwendung der Analysetechnik zeigt für die drei geprüften Schraubentypen einen ähnlichen Wert von ungefähr 90 %. Der Unterschied der Standardabweichung des relativen Haltevermögens (σ *RWC*) beträgt für Schraubentyp A 0,6 %, für Typ B 0,9 % und für Typ C 2,5 %. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Die Evaluation der Referenzversuche erfolgt entsprechend der Evaluation von *Continued Movement* anhand von neun Versuchen. Die Versuchsanzahl für die Referenz des Schraubentyps C ist aufgrund einer Fehlfunktion der Ausziehmaschine um einen Versuch reduziert. Durch die anspruchsvolle Versuchsvorbereitung für die Anwendung der Analysetechnik wurde eine größere Fehlerrate erwartet, weshalb der Stichprobenumfang für die Evaluation erhöht wurde. Für die Technik *Sectional Imaging* wurde die Stichprobengröße daher auf zwölf Versuche erhöht. Eine höhere Fehlerrate ist jedoch nicht aufgetreten, sodass alle zwölf Versuche je Schraubentyp ausgewertet werden konnten.

In den Boxplots ist ersichtlich, dass die Haltevermögen bei Anwendung der Technik *Sectional Imaging* nur geringfügig niedriger sind. Dies bestätigt die in den Vorversuchen ermittelte Vorspannkraft, welche mit dem Drehmoment von 10 Nm der Befestigungsschrauben gewährleistet wird. Das relative Haltevermögen beträgt für den Holzschraubentyp A 92,6 %, für Typ B 83,8 % und für Typ C 89,6 %. Beim Vergleich des relativen Haltevermögens der Anwendung der Technik mit der Referenz zeigt

sich eine ähnliche Tendenz und ein ähnlicher Wert bei allen drei untersuchten Holzschraubentypen. Das Verhalten der Holzschrauben wird durch die Anwendung der Analysetechnik als nicht wesentlich verändert bewertet und die Anforderung der **minimalen Veränderung des Verhaltens** ist erfüllt.

Die Standardabweichung für Holzschraubentyp A beträgt bei Anwendung von *Sectional Imaging* 8,3 % und im Referenzversuch 8,9 %. Für Holzschraubentyp B bei Anwendung 8,0 % und im Referenzversuch 8,9 %. Die Standardabweichung bei Typ C beträgt bei Anwendung der Technik 8,7 % und im Referenzversuch 11,2 %. Bei Schraubentyp A und B ist mit einem Unterschied von 0,6 % und 0,9 % lediglich eine minimale Veränderung der Streuung zu beobachten. Diese Abweichung in den Streuungen ist vergleichbar mit der Technik *Continued Movement*. Bei Schraubentyp C ist der Unterschied der Streuung mit 2,5 % etwas größer. Dies kann auf die kleinere Stichprobengröße im Referenzversuch zurückzuführen sein. Da die Streuung des Schraubentyps C bei Anwendung der Technik vergleichbar ist zu der Streuung der anderen Schraubentypen, ist somit die Anforderung der **Reproduzierbarkeit** erfüllt.

Die Anforderungen für die Analysetechniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* sind somit alle bewertet. Die Bewertung ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

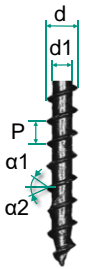
Legende:		Analysetechnik							Continued Movement	Sectional Imaging
Anforderung erfüllt: ✓		Tuschierpaste	Röntgen	Video	Geläsertes Schnittmodell	Gesägtes Schnittmodell	Vergrößerter 3D-Druck Prototyp			
Fehlerklasse	Anforderung									
	Beobachtbares Systemverhalten	X	-	✓	-	✓	✓	✓	✓	X
	Beobachtbarer Kontakt	X	X	X	X	✓	X	X	✓	✓
Informationen nicht verfügbar	Kombination mit Messwert möglich	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Minimale Veränderung des Verhaltens	-	✓	✓	-	-	-	X	✓	✓
Fehlerhafte Beobachtung	Minimale Veränderung des Kontakts	X	✓	-	-	X	X	X	X	✓
	Reproduzierbarkeit der Effekte	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓
Falsche Interpretation	Sichtbare Effektstärke	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
		2 ✓ 4 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 2 X	1 ✓ 3 X	4 ✓ 2 X	4 ✓ 3 X	6 ✓ 1 X	6 ✓ 1 X	

Abbildung 5.11: Gesamtbewertung der Analysetechniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* mit einer höheren Bewertung der erfüllten Anforderungen im Vergleich zu den bekannten Analysetechniken.

Es ist zu erkennen, dass beide Techniken im Vergleich zu den bekannten Analysetechniken eine sehr hohe Anzahl an erfüllten Anforderungen und eine geringe Anzahl von nicht erfüllten Anforderungen aufweisen. Es konnte gezeigt werden, dass beide Techniken für die Ermittlung der Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt von Holzschrauben geeignet sind. Die Analysetechnik *Continued Movement* weist Vorzüge bei der direkten Beobachtung des Verhaltens und die Technik *Sectional Imaging* bei der Beobachtung des Verhaltens für unterschiedliche Zustände auf. Es werden daher beide Analysetechniken für die Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage genutzt.

5.2 Studiendesign und Versuchsaufbau der Ausziehversuche

Für die Ermittlung der Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt werden kommerzielle selbstbohrende Holzschrauben mit unterschiedlichen Gewindeparametern verwendet. In Abbildung 5.12 sind die verwendeten Schraubentypen der Unternehmen Adolf Würth GmbH & Co. KG (A, D und E), HECO-Schrauben GmbH & Co. KG (B) und fischerwerke GmbH & Co. KG (C) aufgeführt. Es sind neben den Bezeichnungen auch die jeweiligen Gewindeparameter und entsprechende Bilder der Schraubengewinde dargestellt. Zur Beantwortung der Teilforschungsfrage konzentriert sich die Untersuchung dabei nur auf das Schraubengewinde. Schraubenparameter der Spitze, des Kopfs oder dem Schaftfräser werden nicht betrachtet und werden in Abbildung 5.12 daher nicht aufgeführt.






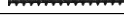

Typ	Bezeichnung	Holzschraube	$d1$ in mm	d in mm	$d1/d$	P in mm	$\alpha1$ in °	$\alpha2$ in °
A	WÜRTH ASSY 3.0 6,0x120, Grobgewinde		3,98	5,94	0,67	3,60	5	30
B	HECO-TOPIX 6,0x120		3,91	6,18	0,63	4,47	20	20
C	Fischer Powerfast 6,0x120		3,84	5,78	0,66	4,52	20	20
D	WÜRTH ASSY fein 3.0 6,0x80		3,94	5,96	0,66	2,64	5	30
E	WÜRTH ASSY-D 6,0x80, Grobgewinde		4,00	5,83	0,69	3,6	5	30

Abbildung 5.12: Verwendete Schraubentypen (A - E) mit den jeweiligen Gewindeparametern als Mittelwert aus fünf Messungen. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Die Gewindeparameter stellen die Mittelwerte von fünf Schrauben aus einem Los dar. Die vermessenen Gewindeparameter sind der Kerndurchmesser d_1 , der Gewindedurchmesser d , das Verhältnis von Kerndurchmesser zu Außendurchmesser d_1/d , die Gewindesteigung P sowie der obere α_1 und untere α_2 Flankenwinkel. Diese Schrauben stammen von unterschiedlichen Schraubenherstellern und weisen eine möglichst breite Variation an Gewindeparametern auf. Die Variation der Parameter soll dazu dienen, unterschiedliche Versagenverhalten hervorzurufen, um Einflussgrößen auf das Versagen identifizieren zu können.

Ein Einfluss weiterer Schraubenparameter wie Spitze, Kopf oder anderen Elementen der Holzschrauben auf die Untersuchung muss vermieden werden. Um den Einfluss der Geometrien der Schraubenspitze zu eliminieren, wurde vorgebohrt. Es wurde für alle Schraubentypen mit einem Durchmesser von 3,3 mm vorgebohrt, da das Vorbohren mit einem Durchmesser kleiner als der Kerndurchmesser der Schrauben keinen Einfluss auf das Haltevermögen hat (Pirnbacher & Schickhofer, 2010). Um den Einfluss des Schafffräasers auf die Untersuchung zu vermeiden, wurde eine Einschraubtiefe der Holzschrauben von 48 mm gewählt und mit einem Messschieber überprüft. Bei dieser Einschraubtiefe weist der Schafffräser keinen Kontakt zum Holz auf und hat dadurch keinen Einfluss auf die Untersuchung. Die Einschraubtiefe entspricht der in der Norm geforderten Mindesttiefe von dem achtfachen des Gewindedurchmessers $8d$ (DIN EN 1382). Schraubenspezifische Besonderheiten im Gewindebereich konnten nicht ausgeschlossen werden. Wie in Abbildung 5.12 zu sehen, weist beispielsweise Schraubentyp C Fräsrippen zwischen den Gewindeflanken auf und bei Schraubentyp E sind fertigungsbedingte Vertiefungen im Gewindegrund ersichtlich.

Das verwendete Holz war Fichte (lat. *Picea abies*) mit einem Querschnitt von 100 mm x 100 mm. Das Holz wurde vor der Verwendung auf eine Holzfeuchte von 15 % geprüft. Proben mit Astlöchern, Harzeinschlüssen und anderen Fehlern wurden aussortiert.

Für die Ausziehversuche wurde der in Abbildung 5.13 gezeigte Versuchsaufbau verwendet. Dieser ist angelehnt an DIN EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) und DIN EN 26891:1991-07 (DIN EN 26891). Für den Versuch wurde die in einem Holzprüfkörper eingeschraubte Holzschraube mit einer axialen Kraft am Schraubkopf beaufschlagt. Die Axialkraft der Ausziehmaschine wurde von einem Kraftaufnehmer aufgezeichnet, während die Verschiebung der Schraube über die Einspannung mit einem Wegaufnehmer gemessen wurde. Die Ausziehversuche wurden mit einer gleichmäßigen Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Der Einschraubwinkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung betrug bei den Versuchen 90°.

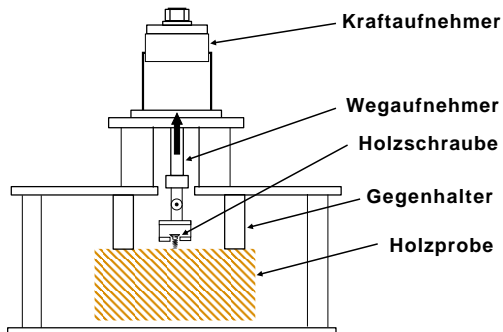


Abbildung 5.13: Ausziehversuche angelehnt an DIN EN 26891:1991-07 (DIN EN 26891). Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Zur Abstützung der Holzproben gegenüber der Ausziehmaschine wurde ein Gegenhalter verwendet, welcher einen Achsabstand von 40 mm zur Holzschraube hatte. Damit kann eine Beeinflussung des Gegenhalters auf das Versagen und die Tragfähigkeit der Holzschraube ausgeschlossen werden.

5.3 Ergebnisse

Um das Versagenverhalten beobachten zu können und Einflussgrößen auf das Versagenverhalten identifizieren zu können, wurden die beiden entwickelten und bewerteten Analysetechniken genutzt. Die Analysetechniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* wurden entsprechend der Versuchsdurchführung angewandt. Insgesamt wurden dazu 224 Ausziehversuche durchgeführt. Durch die Beobachtung des Versagenverhaltens der vorgestellten Holzschraubentypen werden Einflussgrößen auf dieses Versagen im Gewindekontakt identifiziert.

5.3.1 Ergebnisse mittels der Analysetechnik *Continued Movement*

Im Folgenden werden die Ergebnisse bei Anwendung der Analysetechnik *Continued Movement* gezeigt. Entsprechend dem Aufbau der Analysetechnik wurden während der Ausziehversuche Videoaufnahmen des Gewindekontakts der Holzschraube erstellt, um das Versagenverhalten zu analysieren.

Ein Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass Ausziehversuche in drei unterschiedliche Zustände unterteilt werden können. Diese Zustände unterscheiden sich durch die an der Funktionserfüllung beteiligten Flächen sowie den Eigenschaften der Holzmatrix. Die Zustände weisen unterschiedliche Versagen auf und sind unterschiedlichen Kraftbereichen zuzuordnen. Diese Zustände sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Es ist für jeden Zustand ein Standbild des Gewindekontakts aus den Videoaufnahmen mit dem Zeitpunkt im Kraft-Zeit-Verlauf des Ausziehversuchs abgebildet. Die Ausziehrichtung aus dem Holz ist nach rechts.

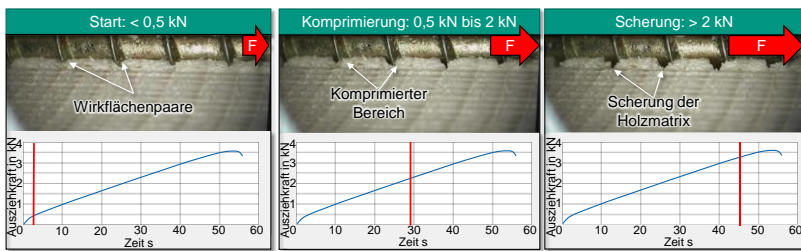


Abbildung 5.14: Ergebnis aus der Anwendung von *Continued Movement*: Unterschiedliche Zustände im Gewindekontakt während des Ausziehversuchs in Kombination mit der gemessenen Ausziehkraft. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

In dem ersten Zustand ist zu sehen, dass sich Wirkflächenpaare zwischen der Flankenoberseite der Holzschraube und dem Holz in den Gewindezwischenräumen ausbilden. Der Kontakt zur Unterseite der Gewindeflanke wird bereits bei geringer Belastung im Bereich von 0 kN bis 0,5 kN eliminiert. Die Last der Gewindeflanke wird über die Wirkflächenpaare auf der Oberseite der Gewindeflanke übertragen. In dem zweiten Zustand zwischen 0,5 kN bis 2 kN wird die Holzmatrix lokal im Bereich der Wirkflächenpaare komprimiert und die Leitstützstruktur des Holzes versagt aufgrund der Belastung. Durch die Komprimierung der Holzmatrix findet eine Relativverschiebung der Holzschraube statt. In diesem Zustand ist der Kraftverlauf linear ansteigend. Im dritten Zustand im Bereich über 2 kN findet eine Scherung der Holzmatrix im Gewindezwischenraum statt. Es ist somit ein anderes Versagenverhalten beobachtbar. Dies bewirkt eine weitere Relativverschiebung der Holzschraube und schließlich das Versagen der Schraubverbindung. Das Haltevermögen ist zum Zeitpunkt des Versagens der Schraubverbindung erreicht. Abschließend nimmt der

Kraftverlauf ab. Ergebnis dieser Analyse ist, dass der Ausziehversuch in drei unterschiedliche Zustände eingeteilt werden kann. In Zustand 2 und 3 sind unterschiedliche Versagensmechanismen beobachtbar. Ein weiteres Ergebnis ist, dass die Unterseite der Gewindeflanken im Versuchsverlauf kein Wirkflächenpaar und somit keine Einflussgröße im Versagenverhalten darstellt. Eine Interaktion der Flankenunterseite mit der Holzmatrix konnte ab Versuchsbeginn in keinem Zustand beobachtet werden.

Die Relativverschiebung wird durch den Einsatz der Motion-Tracking-Software messbar. Grundlage des Motion Tracking ist die Videoaufnahme des Verhaltens im Gewindekontakt. In Abbildung 5.15 ist auf der linken Seite das Versagenverhalten mittels *Continued Movement* und auf der rechten Seite die Anwendung des Motion Tracking zur Messung der Schraubenbewegung dargestellt.

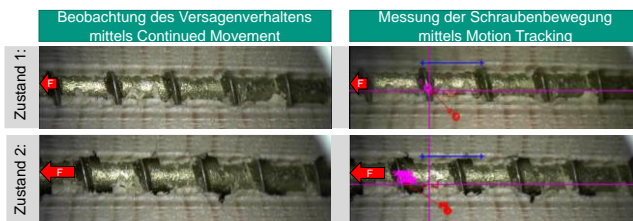


Abbildung 5.15: Messung der Schraubenbewegung mittels Motion Tracking (rechts) auf Basis des beobachtbaren Versagenverhaltens mittels *Continued Movement* (links). Durch Motion Tracking kann die Bewegung der Holzschraube (rosa Kreise) im Vergleich zum umgebenden Holz (rote Kreise) gemessen werden. Die Ausziehrichtung aus dem Holz ist nach rechts.

Zur Messung der Relativverschiebung wird die Spitze einer Gewindeflanke in den Bildern getrackt. Der Abstand des verschobenen Bildpunkts (rosa Kreise) zu einem festen Punkt im umgebenden Holz (roter Kreise) wird entlang der Schraubenachse (horizontale rosa Linie) gemessen. Dies ist für den unbelasteten Zustand 1 und den Zustand 2 kurz vor Erreichen des Haltevermögens dargestellt.

In Abbildung 5.16 ist die Relativverschiebung einer Holzschraube von Typ A über der Zeit dargestellt. Dabei wird die gemessene Verschiebung der Ausziehmaschine mit der beobachteten Verschiebung der Holzschraube mittels der Analysetechnik *Continued Movement* und Motion-Tracking-Software verglichen.

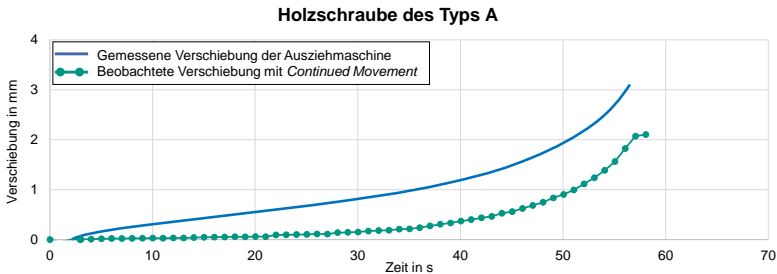


Abbildung 5.16: Verschiebung-Zeit-Diagramm eines Einzelversuchs von Holzschraubentyp A. Vergleich zwischen gemessener und beobachteter Verschiebung. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Die mit dem Wegaufnehmer gemessene Verschiebung der Ausziehmaschine ist als durchgezogene, blaue Linie abgebildet. Die grüne Linie mit grünen Markern stellt die mit der Motion-Tracking-Software gemessene Relativbewegung der Holzschraube dar. Die qualitative Form der beiden Kurven ist vergleichbar. Allerdings weist die Verschiebung der Ausziehmaschine im Vergleich zu den Daten aus der Analysetechnik einen Versatz auf. Zu Beginn des Ausziehversuchs ist die Verschiebung bei der Ausziehmaschine höher. Bei Erreichen des Haltevermögens wird mittels der Ausziehmaschine eine ca. 1 mm größere Verschiebung gemessen. Der Wegaufnehmer der Ausziehmaschine misst neben der Schraubenbewegung auch die Deformation der Holzprobe und das vorhandene Spiel im Prüfaufbau. Mittels Motion-Tracking wird die in der Videoaufnahme aufgezeichnete Schraubenbewegung im Vergleich zum direkt umgebenden Holz gemessen. Die beobachtete Schraubenverschiebung ist somit deutlich direkter und stellt daher die Schraubenverschiebung präziser dar, die nun erstmals untersucht werden kann. Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass die gemessene Verschiebung mittels Ausziehmaschine deutlich größer ist als die Schraubenbewegung, welche mittels Motion Tracking ermittelt wird.

Es werden daher die Bewegungsdaten mittels der aufgezeichneten Videos verwendet, um den Einfluss der unterschiedlichen Gewindeparameter der Holzschraubentypen zu vergleichen. Abbildung 5.17 vergleicht Einzelversuche von Schraubentyp B und Schraubentyp C in einem Kraft-Verschiebungs-Diagramm. Holzschraubentyp B ist mit eckigen Messpunkten als blaue Kurve dargestellt. Das Haltevermögen dieser Schraube wird bei 3,2 kN und einer Schraubenverschiebung von 0,9 mm erreicht.

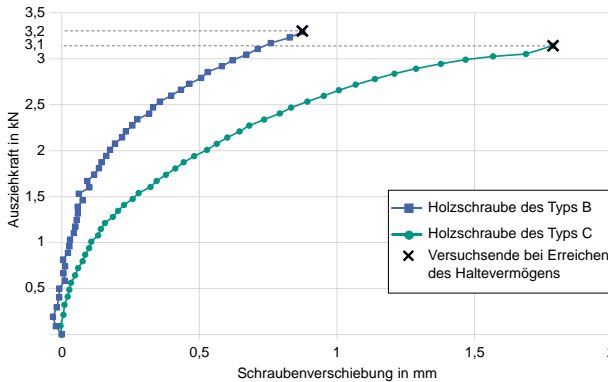


Abbildung 5.17: Schraubenbewegung von Schrauben des Typs B und C mittels der Technik *Continued Movement*. Schraubentyp B erreicht ein vergleichbares Haltevermögen bei deutlich geringerer Verschiebung als Typ C. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Die Schraubverbindung mit Schraubentyp C, als grüne Linie mit runden Messpunkten dargestellt, versagt bei 1,8 mm Verschiebung und erreicht eine Ausziehkraft von 3,1 kN. Schraubentyp B weist also eine geringere Verschiebung bis zum Versagen auf und hat dabei ein mit Schraubentyp C vergleichbares Haltevermögen. Die Schraubverbindung mit Schraubentyp B kann daher als steifere Verbindung angesehen werden. Bei ähnlichem Haltevermögen tritt aufgrund der verschiedenen Gewindeparameter unterschiedliche Relativverschiebungen auf. Dies deutet darauf hin, dass bei Schraubentyp B und C unterschiedliche Versagensmechanismen zum Tragen kommen, welche längere bzw. kürzere Verschiebungen erlauben. Das Ergebnis ist, dass bei unterschiedlichem Verhalten vergleichbare Haltevermögen erzielt werden können. Die tatsächliche Schraubenverschiebung scheint in diesem Fall keine Korrelation zum Haltevermögen aufzuweisen.

5.3.2 Ergebnisse mittels der Analysetechnik *Sectional Imaging*

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Anwendung der Analysetechnik *Sectional Imaging* gezeigt. Der vorgestellte Prüfaufbau erlaubt die Analyse des Versagensverhaltens durch den Vergleich desselben Gewindekontaktes zu unterschiedlichen Versagenszuständen. Dabei wird der unbelastete Zustand nach dem Einschrauben mit dem Zustand bei Erreichen des Haltevermögens verglichen.

In Abbildung 5.18 ist dieser Vergleich für Holzschraubentyp C dargestellt. Die linke Seite zeigt einen Bildausschnitt des Gewindekontakts vor dem Ausziehversuch und die rechte Seite zeigt denselben Gewindekontakt bei Erreichen des Haltevermögens nach dem Ausziehversuch. In diesem Versuch wurde ein Haltevermögen von 4,29 kN erreicht. Die Holzschraube, welche vertikal nach oben herausgezogen wurde, ist in dieser Abbildung nicht dargestellt.

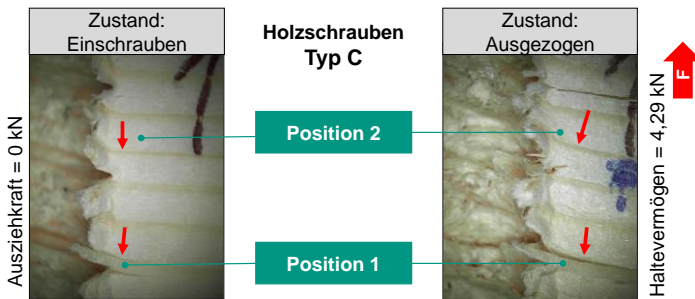


Abbildung 5.18: Ergebnis der Anwendung *Sectional Imaging* bei Holzschraubentyp C: Vergleich desselben Gewindekontaktes vor und nach dem Ausziehversuch. In Position 1 ist das Risswachstum durch den Ausziehversuch zu erkennen. Position 2 zeigt die Verformungen des Holzes in den Gewindezwischenräumen. Auf Grundlage von (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Der Zustand nach dem Einschrauben zeigt die klare Kontur des Gewindeindrucks der Holzschraube. Weiterhin sind einzelne Risse an den Gewindeflanken (Position 1) zu erkennen, die durch den Einschraubvorgang entstanden sind. Für den zweiten Zustand kann auf der rechten Seite in Position 1 derselbe Riss beobachtet werden. Dieser Riss ist durch die Belastung im Ausziehversuch gewachsen. Der Zustand nach Erreichen des Haltevermögens weist keine klare Kontur des Eindrucks der Gewindeflanken auf. An Position 2 sind die Verformungen des Holzes im Bereich zwischen den Flanken und die Verschiebung in Ausziehrichtung zu erkennen.

Um den Einfluss der Gewindeparameter zu untersuchen, wird das Versagenverhalten von verschiedenen Holzschrauben verglichen. Abbildung 5.19 zeigt das Versagenverhalten von Holzschrauben des Typs A (links) bis E (rechts) nach dem

Ausziehvorgang. Die Bildausschnitte zeigen den Gewindegewindekontakt in 40 mm Einschraubtiefe. Bei allen Schraubentypen ist eine Wicklung der Holzfasern um die Schraubenachse sichtbar (rechteckige Markierung). Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 5.18 in beiden Zuständen zu erkennen. Daraus kann geschlossen werden, dass diese Ausrichtung der Holzfasern während des Einschraubvorgangs durch die Drehung der Holzschraube stattfindet.

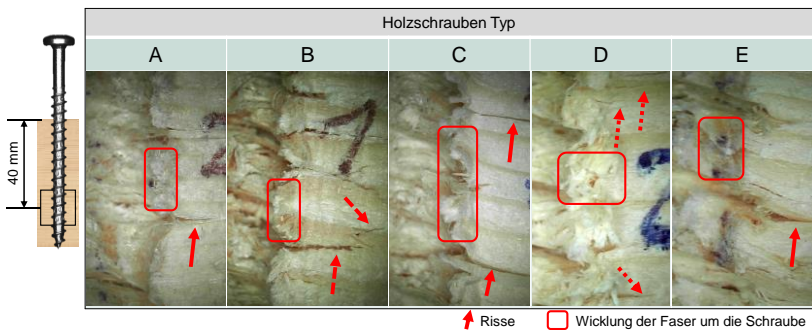


Abbildung 5.19: Versagenverhalten der verschiedenen Holzschraubentypen nach dem Ausziehvorgang. Die rechteckige Markierung zeigt die Wicklung der Fasern um die Schraubenachse. Die verschiedenen Pfeiltypen zeigen unterschiedliche Verhalten der Rissbildung. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Unterschiede zeigen sich im Detail der Rissbildung. In Abbildung 5.19 sind die Unterschiede in der Rissbildung für die verschiedenen Schraubentypen dargestellt. Die verschiedenen Pfeiltypen (durchgezogen, gestrichelt, gepunktet) zeigen unterschiedliche Verhalten der Rissbildung. Bei den Schraubentypen A, C und E treten einzelne lange Risse auf (durchgezogener Pfeil). Auch bei Schraubentyp B treten längere Risse auf, aber diese Risse verzweigen sich in einiger Entfernung von dem Gewindegewindekontakt. Dadurch entstehen Bereiche im Holz, die von Rissen umgeben sind (gestrichelte Pfeile). Bei Schraubentyp D entsteht eine große Anzahl kleiner, kurzer Risse (gestrichelter Pfeil). Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich das Versagenverhalten bezüglich der Rissbildung bei unterschiedlichen Gewindegeometrien unterscheidet.

Die Holzschraubentypen D und E unterscheiden sich hauptsächlich durch den Parameter Gewindesteigung. Abbildung 5.20 vergleicht die Rissbildung im Gewindegewindekontakt für die Schraubentypen D und E nach dem Ausziehversuch. Für jeden Holzschraubentyp sind jeweils zwei Bildausschnitte des Gewindegewindekontakts abgebildet. Der obere Bildausschnitt ist jeweils in einem Abstand von ca. 8 mm von der Holzoberfläche aufgenommen, während der untere Ausschnitt ca. 40 mm Einschraubtiefe entspricht. Die Holzschraube des Typs D weist ein Haltevermögen von 6,33 kN auf, wohingegen die Schraube des Typs E ein Haltevermögen von 6,22 kN erreicht. Die angegebenen Haltevermögen entsprechen den Werten der Einzelversuche, da die Übereinstimmung zwischen dem beobachtbaren Versagen des einzelnen Gewindegewindekontakts mit dem zugehörigen erzielten Kraftwert entscheidend ist, um kausale Effekte zu erkennen.

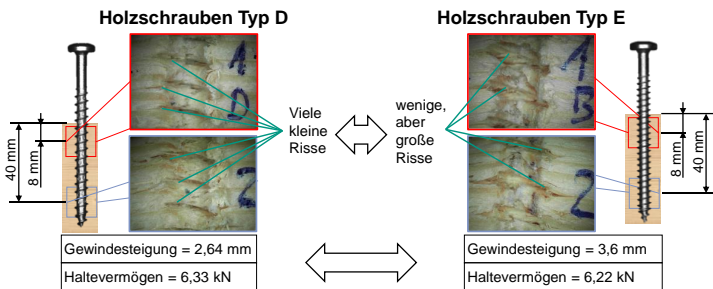


Abbildung 5.20: Vergleich des Versagens der Gewindegewindekontakte von Holzschrauben der Schraubentypen D und E mit unterschiedlichen Gewindesteigungen. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

In Abbildung 5.20 zeigt der Kontakt des Schraubentyps D mit einer Gewindesteigung von 2,64 mm viele kleine Risse an den Flanken und einen gut erhaltenen Gewindeeindruck. Der Kontakt des Schraubentyps E mit einer höheren Gewindesteigung von 3,6 mm wird diesem gegenübergestellt. Im Vergleich zum Schraubentyp D zeigt der Kontakt wenige, aber große Risse mit einem unscharfen Gewindeeindruck. Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass die Rissbildung von der Gewindesteigung abhängt. Damit ist die Gewindesteigung eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten im Gewindegewindekontakt.

5.4 Diskussion der Einflussgrößen auf das Versagenverhalten und Diskussion der Analysetechniken

Zur Beantwortung der Teilforschungsfrage wurden zwei Analysetechniken zur Beobachtung des Gewindekontakts entwickelt und bewertet. Auf Grundlage des beobachteten Versagenverhaltens konnten Einflussgrößen auf das Versagenverhalten ermittelt werden. Nachfolgend werden zuerst die vorgestellten Ergebnisse diskutiert, bevor auf die Einschränkungen der verwendeten Holzschrauben und am Ende auf die Diskussion der entwickelten Analysetechniken eingegangen wird.

Nutzen der Erkenntnisse für bestehende Modelle

Mit der Analysetechnik *Sectional Imaging* können Zustände des Gewindekontakts vor, während und nach dem Ausziehvorgang verglichen werden. Auf diese Weise können auch durch das Einschrauben verursachte Versagen identifiziert werden. Jensen, Nakatani, Quenneville und Walford (2011) haben ein analytisches Modell für das Ausziehen von Zugankern vorgestellt. Für dieses Modell wurde angenommen, dass der Einschraubprozess das Holz, welches das Schraubengewinde umgibt, beschädigt. Diese Annahme konnte von Jensen et al. (2011) aufgrund des unbekannteren Versagenverhaltens nicht verifiziert werden. In Abbildung 5.18 konnte in Position 1 dargestellt werden, dass einzelne Risse durch den Einschraubvorgang entstehen. Daher kann diese Annahme von Jensen et al. (2011) durch die Ergebnisse der Technik *Sectional Imaging* bestätigt werden. Jensen et al. (2011) verwenden für das Modell eine experimentell ermittelte Anfangsschubspannung, von der angenommen wird, dass sie die Beschädigung des Holzes durch das Gewinde beim Einschrauben in das Holz berücksichtigt. Es ist zu prüfen, ob die Analysetechniken verwendet werden können, um diese Annahme weiter zu untersuchen und den experimentellen Wert zu präzisieren.

Messung der tatsächlichen Schraubenverschiebung

Die Analyse des Versagenverhaltens mit *Continued Movement* zeigt, dass die Schraubenbewegung während des Ausziehvorgangs kleiner ist als die von der Ausziehmaschine gemessene Verschiebung. Die Elastizität des Prüfaufbaus, wie beispielsweise die Verformung der Holzprobe, kann eine mögliche Ursache für diese Differenz sein. Die Analyse des Verhaltens kann nicht mit den Messdaten des Wegaufnehmers der Ausziehmaschine erfolgen. Eine geeignete Möglichkeit stellt hier die beobachtete Schraubenverschiebung bei Anwendung von *Continued Movement* mit Motion-Tracking-Software dar. Dies ermöglicht auch weitere Untersuchungen zu Einflüssen, welche die Steifigkeit der Schraubverbindung beeinflussen.

Die Analyse mit *Continued Movement* ergab, dass die tatsächliche Schraubenbewegung bei Schraubentyp B deutlich geringer ist als bei Schraubentyp C (Abbildung 5.17). Das Versagenverhalten des Schraubentyps B scheint daher bei gleichem Haltevermögen eine steifere Schraubverbindung zu ergeben als das Versagenverhalten des Schraubentyps C. Dies könnte auf die Fräsrippen im Gewindebereich des Schraubentyps C zurückzuführen sein.

Einflüsse auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt

Durch die Analysetechnik *Continued Movement* konnten drei unterschiedliche Zustände im Ausziehversuch identifiziert werden. In Zustand 1 bis 0,5 kN bilden sich die Wirkflächenpaare im Gewindekontakt. Bei dem darauffolgenden Zustand 2 von 0,5 kN bis 2 kN wird die Holzmatrix im Gewindezwischenbereich komprimiert. Ab 2 kN kann in Zustand 3 das Abscheren der Holzmatrix erkannt werden, welches zum Versagen der Verbindung führt. Es sind somit unterschiedliche Versagenverhalten in Zustand 2 und 3 beobachtbar. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Unterseite der Gewindeflanke keine Einflussgröße auf das Versagenverhalten im Ausziehversuch darstellt, da diese nie Teil eines Wirkflächenpaares ist.

Als weiteres Ergebnis der Untersuchung konnten verschiedene Versagenverhalten bestimmt werden. Es konnte in Abbildung 5.19 gezeigt werden, dass sich das Versagen der verschiedenen Schraubentypen (A - E) hinsichtlich der Rissbildung unterscheidet. Die Schrauben des Typs A, C und E weisen lange Risse auf, während Schrauben des Typs B Bereiche im Holz aufweisen, die von Rissen umgeben sind. Holzschraubentyp D verursacht eine Vielzahl kleiner, kurzer Risse. Die Gewindegeometrie ist daher eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt.

Holzschraubentyp D und Typ E unterscheiden sich bezüglich ihrer Gewindeparameter hauptsächlich in der Gewindesteigung. Unterschiede im Versagenverhalten können somit auf den Parameter Gewindesteigung zurückgeführt werden. Dies legt nahe, dass eine kleine Gewindesteigung zu vielen kleinen Rissen führt, während bei höheren Steigungen wenige, aber großen Risse entstehen. Die Gewindesteigung ist somit eine Einflussgröße auf die Rissbildung im Versagenverhalten.

Konstruktionshypothese zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang

Die Analyse des Versagenverhaltens erlaubt es weiterhin Annahmen über die Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern zu treffen. Diese Annahme für den Gestalt-Funktion-Zusammenhang wird nachfolgend als Konstruktionshypothese formuliert. Die aus der Analyse von Abbildung 5.20 abgeleitete Konstruktionshypothese ist in Tabelle 2 gezeigt. Diese Konstruktions-

hypothese beschreibt den Einfluss des Gewindeparsameters Gewindesteigung auf das Haltevermögen.

Tabelle 2: Konstruktionshypothese zum Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen. Übersetzt aus (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Wenn	die Gewindesteigung kleiner als 3,6 mm ist
Dann	erhöht sich das Haltevermögen im Vergleich zu Gewindesteigungen größer als 3,6 mm
Weil	sich die Wirkfläche der Gewindeflanke durch die kleinere Gewindesteigung vergrößert und somit die Spannung in der Holzumgebung über die Einschraubtiefe gleichmäßiger verteilt wird.
Prüfung	durch Holzschrauben, welche sich einzig im Parameter Gewindesteigung unterscheiden.

Diese Konstruktionshypothese muss durch Versuche verifiziert oder falsifiziert werden. Die Prüfung kann mit Holzschrauben, die sich nur im Parameter Gewindesteigung unterscheiden, erfolgen. Bei einer Verifizierung dieser Konstruktionshypothese kann das Ergebnis direkt für die Optimierung von Holzschraubengewinden verwendet werden. Weiterhin können etablierte Auslegungsverfahren, wie beispielsweise Frese et al. (2010) oder Zarnani und Quenneville (2014), um den Einfluss der Gewindesteigung erweitert werden. Dadurch kann die Genauigkeit der Verfahren gesteigert und die Systemzuverlässigkeit von Holzschrauben verbessert werden.

Einfluss der Holzfaserorientierung

Ein weiteres Ergebnis der Analyse des Versagenverhaltens ist, dass die Orientierung der Holzfaser zum Schraubengewinde eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten darstellt. Im Stand der Forschung ist bisher bekannt, dass der Einschraubwinkel bezogen zur Holzfaser einen Einfluss auf das Versagen und das Haltevermögen hat. In Abbildung 5.21 ist ein Einschraubwinkel von 90° in radialer Einschraubrichtung (R) in Position 1 und ein faserparalleler Einschraubwinkel von 0° in longitudinaler Richtung (L) in Position 2 dargestellt. In der Untersuchung wurde daher der Einschraubwinkel eingestellt und das Versagenverhalten in einem Einschraubwinkel von 90° zur Holzfaser untersucht.

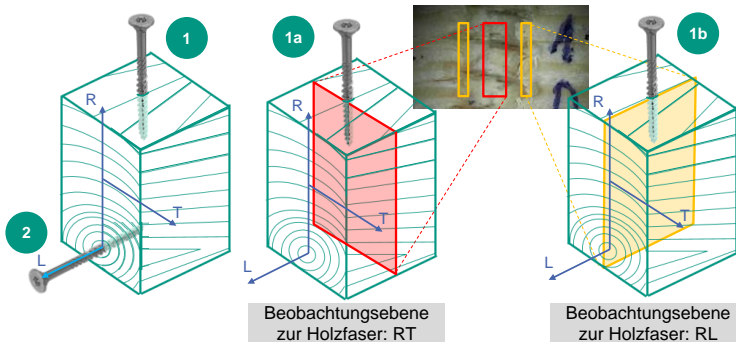


Abbildung 5.21: Darstellung der unterschiedlichen Einschraubwinkel (1, 2). Bei gleichem Einschraubwinkel sind die Beobachtungsebenen RT (1a) und RL des Gewindekontakts (1b) unterschiedlich zur Holzfaser orientiert. Abbildung auf Grundlage von (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a)

Bislang unbekannt ist, dass die Holzfaserorientierung bezogen zum Schraubengewinde eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten darstellt. Dies konnte durch die Beobachtungen des Versagenverhaltens, welches innerhalb eines Schraubentyps bei unterschiedlichen Holzproben eine große Varianz aufweist, ermittelt werden. Die Beobachtungen wurden in unterschiedlichen Orientierungen zur Holzfaser angestellt. In diesen verschiedenen Beobachtungsebenen können unterschiedliche Versagenverhalten beobachtet werden. In Abbildung 5.21 sind bei gleichem Einschraubwinkel in radialer Richtung die zwei unterschiedlichen Beobachtungsebenen RT in Position 1a und RL in Position 1b dargestellt. Diese Beobachtungsebenen werden durch die Hauptrichtungen des Holzes aufgespannt.

Das beobachtbare Versagenverhalten unterscheidet sich bei konstantem Einschraubwinkel durch unterschiedliche Orientierungen der Holzfaser in Bezug zum Schraubengewinde. Dies kann damit erklärt werden, dass die Holzeigenschaften sich in den unterschiedlichen Richtungen unterscheiden und dadurch unterschiedliche Versagensmechanismen in der Schraubverbindung zum Tragen kommen. Die wirkenden Versagensmechanismen sind somit von der Orientierung des Schraubengewindes zur Holzfaser abhängig.

Für eine bessere Analyse des Versagenverhaltens und um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sollte daher die Orientierung der Holzfaser zum Schrauben-

gewinde konstant gehalten werden. Dies ist im Stand der Forschung bislang unbekannt. Die Orientierung der Holzfaser wurde bei der vorgestellten Untersuchung nicht eingestellt und ist somit eine Einflussgröße auf die beobachteten Versagenverhalten. Die Berücksichtigung dieser Einflussgröße ermöglicht den Einfluss der Gewindeparameter auf die spezifischen Versagensmechanismen und das Versagenverhalten im Gewindekontakt zu ermitteln. Damit kann es möglich werden, bisher unbekannt Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern zu identifizieren.

Einschränkungen der verwendeten Schraubentypen

Eine Einschränkung der Untersuchung ergibt sich aus der Verwendung der kommerziellen Schrauben. Der Einfluss von besonderen Parametern der Schrauben, wie beispielsweise unterschiedliche Geometrien in der Schraubenspitze oder Schafffräser zum besseren Einschrauben, wurde durch Einschrauben in vorgebohrte Löcher und einer geringen Einschraubtiefe ausgeschlossen. Diese Parameter haben jedoch auch einen Einfluss auf das Versagen und somit auf das Haltevermögen. Untersucht werden kann dies mit den vorgestellten Analysetechniken *Sectional Imaging* und *Continued Movement*.

Die Vielfalt der Gewindeparameter der untersuchten Schraubentypen eignet sich, um möglichst unterschiedliche Versagenverhalten und Einflussgrößen darauf zu untersuchen. Die Identifikation von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen hat sich jedoch als herausfordernd erwiesen. Aufgrund von fertigungsbedingten Randbedingungen sind keine kommerziellen Holzschrauben verfügbar, welche sich nur in einzelnen Parametern unterscheiden. Die Schraubentypen weisen verschiedene Gewindeparametersätze auf. Dies erschwert oder verhindert einen kausalen Zusammenhang zwischen dem beobachteten Versagenverhalten und einzelnen Gestaltparametern herzustellen. Für die Identifikation von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen sind weitere Untersuchungen mit speziellen Prototypen erforderlich, die sich nur in einzelnen, definierten Gewindeparameter unterscheiden.

Diskussion der Analysetechniken

Zur Beobachtung des Versagenverhaltens wurden zwei Analysetechniken entwickelt. Diese Analysetechniken sowie die Anwendung dieser Techniken an ähnlichen Systemen soll im Folgenden diskutiert werden.

Die Anwendung der Techniken beeinflusst das Haltevermögen der Holzschraubverbindung. Dieser Einfluss auf das Haltevermögen wurde mittels qualitativer und quantitativer Untersuchungen bewertet und die Eignung bezüglich dem Untersuchungsziel nachgewiesen. Durch die Analysetechniken konnte die

Beobachtungsbarriere im Gewindekontakt der Holzschraubverbindung überwunden und bislang unbekannte Einflussgrößen identifiziert werden.

Die Analysetechniken wurden in ähnlicher Art bereits in anderen Systemen angewandt und bieten daher Potential für eine Übertragbarkeit auf weitere Systeme. Die Technik *Continued Movement* wurde in abgewandelter Form von Horn, Hölz, Schwabe und Matthiesen (2020) bei dem Befestigungselement Verbundanker angewandt. Das Ziel dieser Technik ist hier ebenfalls die Untersuchung des Versagens. Horn et al. (2020) verwendeten zur Untersuchung einen präparierten Betonwürfel. In den Betonblock wird ein zentrales Loch gebohrt und ein Viertel des Betonwürfels sowie ein Viertel des Ankers entfernt. Der Anker wird anschließend in das Bohrloch eingeklebt, sodass der in Abbildung 5.22 a dargestellte Prüfkörper erzeugt wird.



Abbildung 5.22: Prüfaufbau nach Horn et al. (2020) zur Untersuchung der Versagensvorgänge eines Verbundankers mittels eines ausgesägten Prüfkörpers (a) zur Erzeugung eines Beobachtungsfensters (b). Dargestellt ist das Ergebnis (c) bei geringer Last und bei Versagen. (Horn et al., 2020), veränderte Darstellung

Durch diesen Prüfkörper wird ein Beobachtungsfenster erzeugt über welches der Kontakt zwischen Anker, Mörtel und Beton beobachtbar wird. Als Ergebnis der Untersuchung kann das Versagenverhalten bei geringer Last und bei Versagen dargestellt werden.

Die Technik *Sectional Imaging* basiert auf Vorarbeiten von Appl (2009) zur Untersuchung von Verbundankern. Im Vergleich bietet die Technik *Sectional Imaging* bei Holzschraubverbindungen den Vorteil nicht nur die Untersuchung eines Zustands zu ermöglichen, sondern die Untersuchung und den Vergleich von mehreren Zuständen bei einem Probekörper.

Trotz einiger Unterschiede zeigt dieser Vergleich der Analysetechnik *Continued Movement* mit der Methode von Horn et al. (2020) sowie *Sectional Imaging* mit den Untersuchungen von Appl (2009) die Übertragbarkeit der Techniken mittels weniger Anpassungen auf andere Systeme. Sowohl die Holzschraube als auch der Verbundanker sind den Befestigungselementen zuzuordnen und die untersuchte Funktion ist die Tragfähigkeit in Ausziehversuchen. Weiterhin ist den Techniken das Ziel der Untersuchung des Versagens gemein. Eine Übertragbarkeit auf andere Befestigungselemente oder weitere Systeme mit diesen Kriterien sollte daher untersucht werden. Dazu kann das von Hussy, Schreier und Echterhoff (2013) beschriebene induktive Vorgehen durch eine Verallgemeinerung der Analysetechniken angewendet werden.

5.5 Fazit zur Untersuchung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt

Zur Identifikation der Einflussgrößen auf das Versagenverhalten wurden Ausziehversuche mit unterschiedlichen kommerziellen Holzschrauben durchgeführt. Zur Beobachtung des Versagenverhaltens des Gewindekontakts von Holzschrauben während des Ausziehvorgangs wurden die in Abbildung 5.23 dargestellten Analysetechniken *Continued Movement* und *Sectional Imaging* entwickelt. Mit diesen konnte die Beobachtungsbarriere überwunden und Einflussgrößen auf das Versagenverhalten identifiziert werden.



Abbildung 5.23: Entwickelte Analysetechniken zur Untersuchung des Versagenverhaltens.

- Mit der Analysetechnik *Continued Movement* kann das Versagenverhalten durch ein Beobachtungsfenster kontinuierlich beobachtet und mittels Motion-Tracking-Software die tatsächliche Schraubenbewegung erfasst werden. Sowohl elastische als auch plastische Verformungen können beobachtet werden.

- Mit der Analysetechnik *Sectional Imaging* kann das Versagenverhalten durch den Vergleich unterschiedlicher Versagenszustände untersucht werden. Der Gewindegewindekontakt kann im Ausziehvorgang an frei wählbaren Zuständen beobachtet werden und die plastischen Veränderungen im Versagen erfasst werden.

Beide Techniken wurden bezogen auf ihre Eignung zur Beantwortung der Forschungsfrage sowohl qualitativ als auch quantitativ mittels *Selection Matrix* bewertet. Die Übertragbarkeit der Analysetechniken auf andere Befestigungselemente für die Beobachtung des Versagens bietet weiteres Potential und ist in weiteren Untersuchungen zu prüfen.

Um die Teilforschungsfrage zu beantworten, wurde mit den Analysetechniken das Versagenverhalten im Gewindegewindekontakt untersucht. Dazu wurde das Versagenverhalten unterschiedlicher Gewindegeometrien verglichen. In dieser Untersuchung konnten die in Abbildung 5.24 dargestellten Erkenntnisse gewonnen werden.

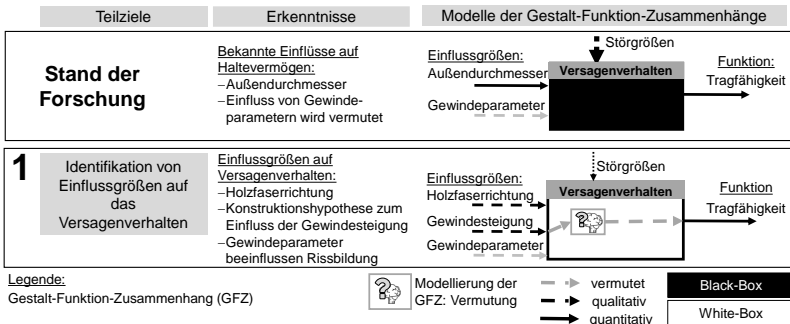


Abbildung 5.24: Erkenntnisse zu den Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindegewindekontakt, die sich auf die Tragfähigkeit von Holzschraubverbindungen auswirken.

Zusammenfassend konnten folgende Parameter identifiziert werden, welche das Versagenverhalten beeinflussen und sich auf die Tragfähigkeit auswirken:

- Die Gestalt der Unterseite der Gewindeflanke ist keine Einflussgröße auf das Versagenverhalten, da diese im Ausziehvorgang nie Wirkfläche wird.

- Im Ausziehvorgang sind drei unterschiedliche Zustände beobachtbar. Daher kann geschlossen werden, dass unterschiedliche Versagensmechanismen Einfluss auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt haben.
- Das Versagen der untersuchten Schraubentypen unterscheidet sich hinsichtlich der Rissbildung. Die Schraubentypen variieren in ihrer Gewindegeometrie. Daher ist die Gewindegeometrie eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt.
- Die Gewindesteigung ist eine Einflussgröße auf die Rissbildung im Versagenverhalten. Es wurde eine Konstruktionshypothese zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang der Gewindesteigung und des Haltevermögens formuliert. Diese Konstruktionshypothese ist noch zu prüfen.
- Die Ebene der Holzfaserrichtung in Bezug zum Schraubengewinde ist eine weitere Einflussgröße auf das Versagenverhalten. Da die Ebene der Faserrichtung in dieser Untersuchung nicht eingestellt wurde, war dies eine Störgröße der Untersuchung. In den unterschiedlichen Orientierungen der Holzfaser zum Schraubengewinde wirken verschiedene Versagensmechanismen. Um Einflüsse der Gewindeparameter auf das Versagenverhalten zu untersuchen, sollte daher der Einfluss der Faserrichtung in zukünftigen Untersuchungen reduziert oder kontrolliert werden.

Mit den vorgestellten Ergebnissen, welche durch die entwickelten Analysetechniken erzielt wurden, konnte somit die erste Teilforschungsfrage

Welche Parameter des Gewindekontakts beeinflussen das Versagenverhalten und wirken sich damit auf die Tragfähigkeit der Holzschraubverbindung aus?

beantwortet werden.

6 Quantitative Ermittlung und Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

Motiviert aus den in Kapitel 5 identifizierten Einflussgrößen auf das Versagenverhalten im Gewindekontakt von Holzschrauben werden die Zusammenhänge zwischen der Funktion Tragfähigkeit und den Gewindeparametern ermittelt und diese Zusammenhänge in Modellen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen abgebildet.

Daher befasst sich dieses Kapitel mit der zweiten Teilforschungsfrage:

Wie können die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern modelliert werden?

In Teilforschungsfrage 1 wurde die Holzfaserrichtung als Einflussgröße auf das beobachtbare Versagenverhalten identifiziert. Für die Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage wird daher ein neuer Experimentalaufbau entwickelt, in welchem die Holzfaserrichtung berücksichtigt werden kann.

Die Beantwortung der Teilforschungsfrage erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt wird der Einfluss der Gewindeparameter auf das Haltevermögen quantitativ bestimmt. Im zweiten Schritt wird die Wirkung des Gewindeparameters Gewindesteigung auf die Rissbildung im Versagen quantitativ untersucht. Im darauffolgenden Schritt erfolgt die Modellbildung. Dazu werden die ermittelten Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter, Versagenverhalten und Haltevermögen auf Grundlage der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Modelle abgebildet.

6.1 Zusammenhänge zwischen Haltevermögen und Gewindeparametern

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Gewindeparameter auf das Haltevermögen von Holzschrauben untersucht. Ziel der Untersuchung sind Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern.

In diesem Kapitel wird daher die Unterforschungsfrage beantwortet:

Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern?

In Kapitel 5 konnte die Gewindesteigung als Einflussgröße auf das Versagenverhalten qualitativ identifiziert werden. Die Gewindesteigung wird daher als Parameter dieser Untersuchung gewählt, um den Einfluss auf das Haltevermögen zu untersuchen. Als zweiter Gestaltparameter wird der Flankenwinkel untersucht. Für die Untersuchung wird ein neuer Experimentalaufbau zur Berücksichtigung der Holzfaserrichtung entwickelt.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst die Entwicklung des neuen Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing sowie das verwendete Studiendesign vorgestellt. Anschließend folgen die Ergebnisse und deren Diskussion.

Der Versuchsaufbau, das Studiendesign, die Ergebnisse und die Diskussion dieses Kapitels basieren zu Teilen auf der nachfolgenden Veröffentlichung:

- „Wood screw design: Influence of thread parameters on the withdrawal capacity“ (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus der Veröffentlichung übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

6.1.1 Entwicklung des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing

Für die Untersuchung des Einflusses der Gewindeparameter auf das Haltevermögen werden die ermittelten Einflussgrößen auf das Versagenverhalten berücksichtigt. In bisherigen Untersuchungen zur Ermittlung dieser Zusammenhänge wurden diese Einflussgrößen nicht berücksichtigt. In Kapitel 5 wurde die Holzfaserrichtung als Einflussgröße auf das beobachtete Versagenverhalten identifiziert. Um den Einfluss der Gewindeparameter auf das Haltevermögen untersuchbar zu machen, wird daher ein neuer Experimentalaufbau entwickelt, in welchem die Orientierung der Gewindeflanke zur Holzfaserrichtung eingestellt werden kann.

Im Stand der Forschung wurde gezeigt, dass die Unterschiede in den Haltevermögen nicht auf Gewindeparameter zurückgeführt werden können. Ein Grund dafür ist das Gewindeparameter nicht einzeln variiert, sondern Schraubentypen mit Gewindeparametersätzen verwendet werden. Dieses Vorgehen erschwert die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern. Eine gezielte Variation der Gewindeparameter von Holzschrauben ist fertigungsbedingt jedoch nicht oder nur schwer möglich und sehr aufwendig. Als Anforderung an den neuen Experimentalaufbau leitet sich daher eine gezielte Variation der Gewindeparameter sowie eine vereinfachte Fertigung ab.

Der neue Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing wird im Folgenden vorgestellt. Dazu werden die verwendeten Gewinde-Testobjekte und Materialien sowie der Experimentalaufbau und der Versuchsaufbau für die Durchführung von Ausziehversuchen beschrieben.

6.1.1.1 Gewinde-Testobjekte und Materialien

Die Orientierung der Holzfaser zur Gewindeflanke ist eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten. Nach ISO 5408:2009-06 (ISO 5408) ist die Gewindeflanke ein durchgehender und vorstehender wendelförmiger Steg mit gleichmäßigem Querschnitt auf einer zylindrischen Oberfläche. Aufgrund dieser Wendelform interagiert die Gewindeflanke im Holz in unterschiedlichen Orientierungen mit den Holzfasern. In diesen verschiedenen Orientierungen der Holzfasern zum Schraubengewinde sind unterschiedliche Versagensmechanismen und unterschiedliche mechanische Eigenschaften des Holzes bestimmend. Die Einflüsse der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit werden durch diese unterschiedlichen Versagensmechanismen in Abhängigkeit von der Orientierung der Holzfaserrichtung beeinflusst. Dies ist in Abbildung 6.1 A gezeigt.

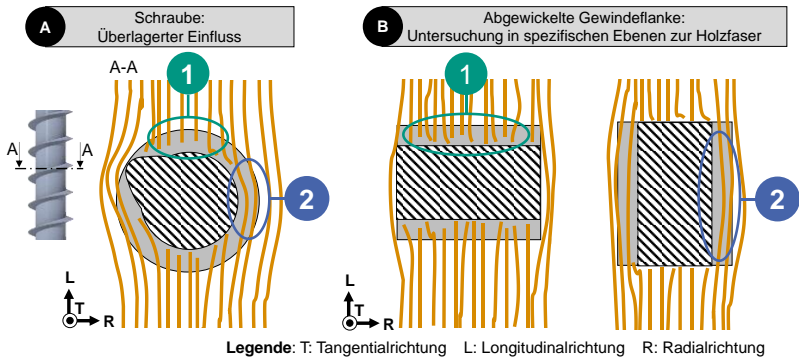


Abbildung 6.1: A: An Position 1 und 2 entstehen aufgrund der Orientierung der Holzfasern zur Gewindeflanke unterschiedliche Versagenverhalten, welche die Tragfähigkeit bestimmen. B: Durch eine abgewinkelte Gewindeflanke können diese überlagerten Einflüsse in spezifischen Ebenen zur Holzfaser (1 oder 2) getrennt untersucht werden.

Die Orientierungen der Holzfasern im Holz können über Ebenen beschrieben werden. Diese Ebenen werden zwischen den Hauptrichtungen des Holzes (longitudinal (L), radial (R) und tangential (T)) nach Höfferl et al. (2016) aufgespannt. Für eine tangentielle Einschraubrichtung interagieren die Flanken des Schraubengewindes in Holz in den Ebenen radial-tangential (RT) und tangential-longitudinal (TL).

Um die Einflussgröße Holzfaserrichtung zu reduzieren und die bezüglich der Holzfaserrichtung überlagerten Einflüsse der Gewindeparameter auf das Versagenverhalten und die Haltevermögen zu untersuchen, soll das Schraubengewinde nur jeweils in einer Ebene mit dem Holz interagieren. Wie in Abbildung 6.1 B dargestellt, wird das Schraubengewinde daher abgewickelt. Das abgewickelte Schraubengewinde wird auf einen flachen Grundkörper aufgebracht. Mit den dadurch entstehenden, geraden Gewindeflanken können die Einflüsse der Gewindeparameter spezifisch für die verschiedenen Ebenen im Holz untersucht werden. Der flache Grundkörper mit geraden Flanken wird Gewinde-Testobjekt genannt und ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Um Querkräfte beim Ausziehvorgang zu vermeiden, sind die Gewindeflanken auf der Vorder- und Rückseite gegenläufig zueinander angeordnet.

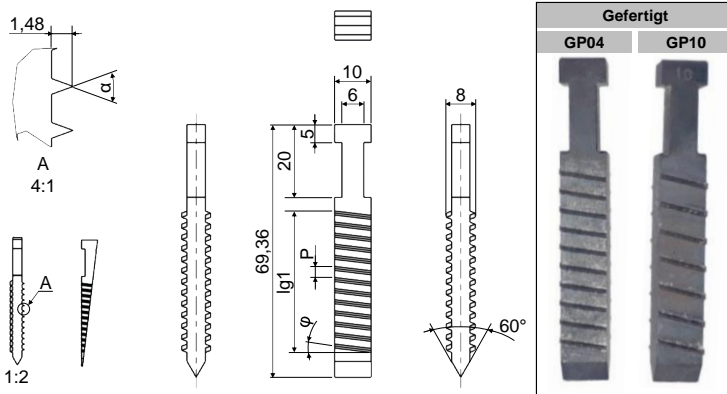


Abbildung 6.2: Gewinde-Testobjekt des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing. Das abgewickelte Gewinde ermöglicht die Untersuchung von Gewindeparametern in spezifischen Richtungen zur Holzfaser. Die zu variierenden Gewindeparameter sind die Gewindesteigung P und der Flankenwinkel α . Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

In der vorliegenden Untersuchung wurden diese Gewinde-Testobjekte verwendet, um den Einfluss der Gewindeparameter Steigung P und Flankenwinkel α zu ermitteln. Bei Schraubengewinden sind die Parameter Steigung, Außendurchmesser und Steigungswinkel geometrisch abhängig. Für die Gewinde-Testobjekte kann der Steigungswinkel φ und die Steigung P auch unabhängig gewählt werden. Für diese Untersuchung wurde der Steigungswinkel φ jedoch mit Formel 4 der Schraubenlinie unter Annahme eines Außendurchmessers d von 8 mm für eine eingängige Schraube berechnet.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{P}{\pi \cdot d}\right) \quad 4$$

Bei eingängigen Gewinden gehören die aneinander angrenzenden Flanken zu einem Gewindegang. Bei eingängigen Gewinden sind die Parameter Steigung und Flankenabstand daher gleich, bei mehrgängigen jedoch nicht. Für die Gewinde-Testobjekte ist die Unterscheidung zwischen ein- und mehrgängig nicht relevant. In Abbildung 6.2 entspricht die Gewindesteigung P daher auch dem Flankenabstand. Aufgrund dieser geometrischen Besonderheiten bei den Gewinde-Testobjekten sind die Bezeichnungen Steigungswinkel und Flankenabstand eindeutiger als die Gewindesteigung. Die Bezeichnung Gewindesteigung ist in der Praxis jedoch üblicher. Die Profilhöhe a wurde konstant mit 1,48 mm gewählt. Die Werte für die Parameter Steigung P und Flankenwinkel α wurden entsprechend den Werten des Studiendesigns nach Kapitel 6.1.2 variiert. Die davon abhängigen Werte Steigungswinkel φ und Gewindelänge $lg1$ wurden dazu entsprechend gewählt. Zwei verschiedene Varianten der hergestellten Gewinde-Testobjekte (GP04 und GP10) sind in Abbildung 6.2 rechts dargestellt. Es wurde darauf geachtet, dass nur vollständige Flanken, die sich über die gesamte Breite des Testobjekts erstrecken, abgebildet werden. Das T-Profil am Kopf des Gewinde-Testobjekts dient der Verbindung zur Ausziehmaschine. Die Gewinde-Testobjekte wurden aus 90MnCrV8 (Nr. 1.2842) gefertigt. Diese wurden bei 840 °C gehärtet und bei einer Temperatur von 420 °C für 50 min mit anschließender Ofenabkühlung angelassen.

Für die Untersuchung wurde die Holzart Fichte (lat. *Picea abies*) verwendet. Gemäß EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) müssen die verwendeten Prüfkörper eine Mindestbreite und -dicke in Einschraubrichtung von der Summe aus der Schraubenlänge und dem fünffachen Schraubendurchmesser aufweisen. Für den Schraubendurchmesser wird die größte Seite des Gewinde-Testobjekts mit 10 mm angesetzt. Daher wurde Holz mit einem Querschnitt von 100 mm x 100 mm verwendet. Das Holz wurde auf eine Holzfeuchte von 15 % geprüft. Die Festigkeitsklasse des Konstruktionsvollholzes beträgt nach EN 338:2016-07 (DIN EN 338) C24. Das Holz wurde

sortiert, sodass alle Untersuchungen in tangentialer Einschraubrichtung durchgeführt werden konnten. Es wurde nur Holz verwendet, das keine sichtbaren natürlichen Fehler wie Astlöcher, Harzeinschlüsse oder Risse aufwies.

6.1.1.2 Experimentalaufbau

Aufgrund der Gewindeabwicklung, durch welche eine Untersuchung in spezifischen Holzfaserrichtungen ermöglicht wird, ist ein Einschrauben der Gewinde-Testobjekte nicht mehr möglich. Zur Messung des Haltevermögens der Gewinde-Testobjekte wurde daher ein neu entwickelter Experimentalaufbau benötigt. Die Gewinde-Testobjekte wurden nicht in das Holz eingeschraubt, sondern eingelegt. Dazu wurden die in Abbildung 6.3 dargestellten Prüfkörperhälften verwendet. Die Prüfkörperhälften waren 50 mm tief. Die Gewinde-Testobjekte wurden in die Nut der jeweiligen Prüfkörperhälften eingelegt. Die Nut wurde in einem Fräsvorgang hergestellt.

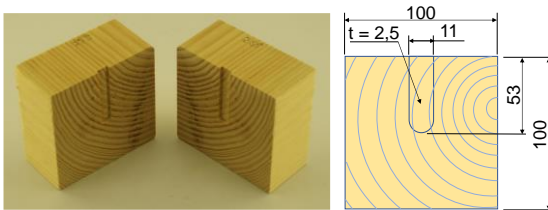


Abbildung 6.3: Prüfkörperhälften, in welche die Gewinde-Testobjekte für die Untersuchung des Haltevermögens eingelegt wurden. (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Vorbohren ist bei Holzschrauben üblich. Nach Brandner, Ringhofer und Reichinger (2019) führt ein Vorbohren mit einem Durchmesser, welcher dem Kerndurchmesser oder kleiner entspricht nicht zu einem Verlust des Haltevermögens. Es wurde angenommen, dass die Nut der Prüfkörperhälfte, in welche die Gewinde-Testobjekte eingelegt werden, dem Vorbohren äquivalent ist. Die Tiefe der gefrästen Nut betrug 2,5 mm. Die Gesamtnuttiefe beider Hälften zusammen betrug daher 5 mm. Die Tiefe der Gewinde-Testobjekte, welche mit dem Kerndurchmesser von Schrauben verglichen werden kann, betrug 5,04 mm. Die Nuttiefe beider Hälften war somit etwas geringer als der Kerndurchmesser der Gewinde-Testobjekte. Nach Brandner et al. (2019) ist somit nicht mit einer Veränderung des Haltevermögens zu rechnen.

EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) definiert, dass die Achse des Verbindungselements senkrecht zur Holzoberfläche stehen muss. Die Nut wurde entsprechend diesem Einschraubwinkel von 90° angeordnet. Um Reibung an den Seiten der Gewinde-Testobjekte zu vermeiden, war die Nutbreite mit 11 mm breiter als die Gewinde-Testobjekte mit 10 mm. Die Nutlänge war mit 53 mm länger als die Gewindelänge inklusive Spitze der Gewinde-Testobjekte gewählt. Zur Ermittlung des Haltevermögens in Ausziehversuchen wurden die beiden Prüfkörperhälften mit eingesetztem Gewinde-Testobjekt verspannt. Dies entspricht einem der Analysetechnik *Sectional Imaging* ähnlichen Versuchsaufbau. In Kapitel 5.1.3.2 wurde gezeigt, dass durch das Verspannen das Versagenverhalten zu in Vollholz eingedrehten Schrauben vergleichbar ist. Das absolute Haltevermögen wird durch diesen Aufbau allerdings verändert (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020a). Das zu erzielende Haltevermögen des Prüfaufbaus kann daher nicht direkt mit dem Haltevermögen von Holzschrauben verglichen werden.

Abbildung 6.4 zeigt den Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing. Es sind die Gewinde-Testobjekte in den Prüfkörperhälften und die Einspannung der Gewinde-Testobjekte in die Prüfkörperhälften gezeigt. Die Einspannung bestand aus zwei 5 mm starken Blechen aus S235JR, die mit vier Sechskantschrauben M10x170 der Festigkeitsklasse 8.8 (nach ISO 4014:2011-06 (DIN EN ISO 4014)) verbunden wurden. Der Aufbau wurde mit Schraubendruckfedern vorgespannt (Sodemann Industriefedre A/S, Produkt: R205-408, 94,2 N/mm, Hinnerup, Dänemark). Durch die Verspannung wurde das Gewinde des Gewinde-Testobjekts in den Nutgrund der Prüfkörperhälften gedrückt. Die Vorspannkraft betrug 3,2 kN.

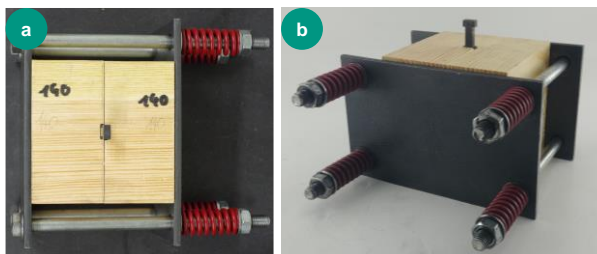


Abbildung 6.4: Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing: Einspannung der Gewinde-Testobjekte in die Prüfkörperhälften. Draufsicht in (a), 3D-Ansicht in (b). Die gleichmäßige und reproduzierbare Verspannung erfolgt über Schraubendruckfedern. (Hölz, Kleinhaus & Matthiesen, 2021)

Dieser Kraftwert wurde in Vorversuchen ermittelt. Kriterien für die Mindestvorspannung waren der spaltfreie Kontakt der Prüfhälften über die gesamte Fläche und das vollständige Eindringen des Gewindes in das Holz. Dies wurde bei allen Proben nach Aufbringung der Vorspannkraft geprüft. In Einzelfällen wurde eine höhere Vorspannkraft als 3,2 kN aufgebracht bis eine spaltfreie Berührung vorlag. Anschließend wurden die Federn weggesteuert entlastet um die Nennkraft zu erreichen.

Die maximale Vorspannkraft muss geringer sein als die zulässige Kraft, die zum Versagen des Holzes führt. Nach EN 338:2016-07 (DIN EN 338) entspricht die Festigkeitsklasse C24 des verwendeten Holzes einer Druckfestigkeit in Faserrichtung von 21 N/mm² und 2,5 N/mm² quer zur Faser. Für einen Querschnitt von 100 mm x 100 mm ist demnach eine maximale Druckkraft von 25 kN für Druck quer zur Faser zulässig. Die Vorspannung von 3,2 kN liegt deutlich unterhalb der durch die Druckfestigkeitswerten von Holz definierten maximalen Vorspannung. Zudem ist zu beachten, dass EN 338:2016-07 (DIN EN 338) die Werte für Bauholz definiert und die Werte somit als sehr konservative Abschätzungen für kleine, fehlerfreie Holzprüfkörper zu sehen sind.

6.1.1.3 Versuchsaufbau für Ausziehversuche

Das Haltevermögen wurde in Ausziehversuchen angelehnt an EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) gemessen. Die Ausziehversuche wurden mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit durchgeführt. Die Kraft wurde mit einem Kraftaufnehmer (Hersteller: HBM, Produkt: U2B/50 kN, Darmstadt, Deutschland) und der Weg mit einem potentiometrischen Wegaufnehmer gemessen (Hersteller: novotechnik, Produkt: TE1-0050-102-411-101, Ostfildern, Deutschland). Sowohl Kraft als auch Weg wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Die Proben wurden gegenüber der Ausziehmaschine abgestützt. In EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) wird definiert, dass für die Abstützung ein Abstand von dem Befestigungsmittel von mindestens dem dreifachen Schraubendurchmesser erforderlich ist. Der Abstand der Abstützung betrug daher 80 mm bei einer Breite des Gewinde-Testobjekts von 10 mm und 62 mm bei einer Tiefe von 8 mm.

6.1.2 Studiendesign: gewählte Faktorstufen und Parameter

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss von Gewindeparametern auf das Haltevermögen zu bestimmen. In diesem Kapitel wird das Studiendesign für dieses Ziel vorgestellt. Für die Untersuchung wurden die Faktoren Gewindesteigung und Flankenwinkel variiert. Aus Praxisberichten mit Industriepartnern in diesem Umfeld wurden nichtlineare Zusammenhänge dieser Faktoren auf das Haltevermögen angenommen. Um diese nichtlinearen Zusammenhänge ermitteln zu können, wurde

die Gewindesteigung P in sechs Faktorstufen zwischen 3,04 mm und 5,9 mm sowie der Flankenwinkel α in drei Stufen zwischen 35° und 45° untersucht. Die verwendeten Faktorstufen sind in Tabelle 3 aufgeführt. Da im Wertebereich von kommerziellen Schrauben lokale Maxima vermutet werden, werden die Faktorstufen in diesem Bereich variiert. Dies erhöht die Praxisrelevanz, da eine kommerzielle Verwertung der Ergebnisse ermöglicht wird.

Es wurden insgesamt elf Gewinde-Testobjekte für die genannten Faktorstufen gefertigt. Wie in Kapitel 6.1.1.1 erläutert sind die Parameter Steigungswinkel φ und Gewindelänge $lg1$ von den gewählten Faktoren abhängig. Die abhängigen Werte dieser Parameter für die gewählten Faktorstufen sind ebenfalls in Tabelle 3 dargestellt. Aufgrund von Fertigungsproblemen konnte Gewinde-Testobjekt GP09 für die Versuche nicht verwendet werden.

Tabelle 3: Gewählte Faktorstufen der Faktoren Gewindesteigung P und Flankenwinkel α dieser Untersuchung sowie die davon abhängigen Parameter Steigungswinkel φ und Gewindelänge $lg1$ der gefertigten Gewinde-Testobjekte. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Gewinde-Testobjekt	Faktorstufen		Abhängige Parameter		Kommentar
	P in mm	α in $^\circ$	φ in $^\circ$	$lg1$ in mm	
GP01	3,04	40	6,8	38,76	
GP03	3,64	40	8,1	38,91	
GP04	4,03	40	8,9	38,93	
GP05	4,5	35	10	38,71	
GP06	4,5	40	10	38,86	
GP07	4,5	45	10	39,01	
GP08	5,11	40	11,3	38,87	
(GP09)	5,9	35	13	38,67	Nicht verwendet
GP10	5,9	40	13	38,81	
GP11	5,9	45	13	38,97	

Das abgewinkelte Schraubengewinde ermöglicht die Untersuchung in unterschiedlichen Ebenen zur Holzfasern. Bei konstanter Einschraubrichtung kann durch axiale Drehung des Gewinde-Testobjekts die Richtung zur Holzfasern verändert werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde daher die Orientierung zur Holzfaserrichtung

als zusätzlicher Faktor mit einbezogen. Es wurden für eine tangentiale Einschraubrichtung die beiden Ebenen RT und TL als Faktorstufen untersucht. In Abbildung 6.5 sind die Ebenen des Faktors Holzfaserrichtung dargestellt. Jeweils schematisch ist die Orientierung des Gewinde-Testobjekts in den Prüfkörperhälften für die tangentiale Einschraubrichtung sowie Fotoaufnahmen der beiden Faktorstufen der Ebenen zur Holzfaserrichtungen RT und TL dargestellt.

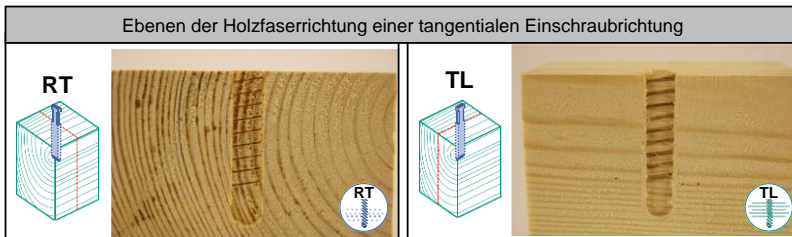


Abbildung 6.5: Gewählte Faktorstufen der Ebenen zur Holzfaserrichtung RT und TL entsprechend einer tangentialen Einschraubrichtung. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Um den Einfluss der Faktoren auf das Haltevermögen zu ermitteln, wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die unabhängigen Faktoren dieser Untersuchung sind die Gewindesteigung, der Flankenwinkel und die Ebene zur Holzfaserrichtung. Der abhängige Faktor ist das Haltevermögen. Der Steigungswinkel ist kein Faktor, da er geometrisch von der Gewindesteigung abhängig ist. Um den Prüfaufwand zu reduzieren, wurde für dieses Studiendesign ein Versuchsplan mit D-Optimalitätskriterium verwendet. Der Versuchsplan wurde randomisiert.

Für die Untersuchung sollten die Einflüsse der Holzparameter möglichst konstant sein. Trotz der Sorgfalt bei der Auswahl des Holzes wurde davon ausgegangen, dass die Eigenschaften des Holzes von Balken zu Balken variieren. Diese Eigenschaft kann innerhalb der Versuche jedoch nicht gezielt eingestellt werden. Um die Variation der Holzparameter zwischen den Holzbalken zu berücksichtigen, wurde Blockbildung angewendet. Die Blockbildung ist ein Verfahren in der Statistik, um den Einfluss bekannter, aber nicht kontrollierbarer Faktoren bei der Auswertung zu reduzieren. Jeder Holzbalken stellt einen eigenen Block dar. Die Versuche wurden auf diese Blöcke verteilt. Die Holzbalken stellen in der Auswertung Faktorstufen dar.

Dadurch können die unterschiedlichen Holzparameter der Holzbalken, beispielsweise die Holzfestigkeit, in der Auswertung berücksichtigt werden ohne sie zu messen. Aus diesem Grund wurde der Holzbalken als zusätzlicher Faktor berücksichtigt.

6.1.3 Ergebnisse

Die statistische Analyse wurde mit dem Programm SPSS Statistics⁴ durchgeführt. Es konnten insgesamt 313 Ausziehversuche ausgewertet werden. Tabelle 4 zeigt die Anzahl der auswertbaren Versuche nach Gewinde-Testobjekt und Ebene zur Faserrichtung. Versuche, welche offensichtliche Fehler aufwiesen, wurden nicht berücksichtigt. Dies war beispielsweise der Fall bei Versuchen, bei denen die Gewinde-Testobjekte an der Verbindung zur Ausziehmaschine gebrochen sind.

Tabelle 4: Anzahl an Ausziehversuchen N getrennt nach Gewinde-Testobjekt und Ebene zur Holzfaserrichtung. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Gewinde-Testobjekt	Holzfaserebene		Gesamt N
	RT	TL	
GP01	17	16	33
GP03	15	17	32
GP04	15	17	32
GP05	17	16	33
GP06	26	26	52
GP07	16	17	33
GP08	17	16	33
GP10	16	17	33
GP11	17	15	32
Gesamt N	156	157	313

Eine Voraussetzung für das Anwenden der ANOVA ist, dass die abhängigen Variablen normalverteilt sind. Dazu werden die Gewinde-Testobjekte für die beiden Holzfaserrichtungen RT und TL untersucht. Tabelle 5 zeigt für die Prüfung auf

⁴ Hersteller: IBM, Version 25.0.0.1

Normalverteilung ($\alpha = 0,05$) die Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov- sowie des Shapiro-Wilk-Tests. In Holzfaserrichtung RT zeigen im Kolmogorov-Smirnov-Test alle Faktorgruppen eine Signifikanz von $p > 0,05$. Auch mit dem Shapiro-Wilk-Tests sind die Signifikanzwerte für die Gewinde-Testobjekte GP03 bis GP11 größer als $p > 0,05$. Eine Ausnahme bildet hier das Gewinde-Testobjekt GP01, welches im Shapiro-Wilk-Test unterhalb der Signifikanzgrenze liegt, im Kolmogorov-Smirnov-Test aber eine Normalverteilung zeigt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass alle Faktorgruppen innerhalb der Faserrichtung RT normalverteilt sind. Im nächsten Schritt wird die Normalverteilung auch in Faserrichtung TL überprüft. Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test wird für alle Faktorgruppen eine Signifikanz größer als $p > 0,05$ gezeigt. Im Shapiro-Wilk-Test sind die Gewinde-Testobjekte GP01 bis GP05 sowie GP07 bis GP11 oberhalb der Signifikanzgrenze. Das Gewinde-Testobjekt GP06 liegt im Shapiro-Wilk-Test knapp unter der Signifikanzgrenze, zeigt aber im Kolmogorov-Smirnov-Test die Normalverteilung. Daher können auch in Faserrichtung TL alle Faktorgruppen als normalverteilt angesehen werden.

Tabelle 5: Prüfung der Gewinde-Testobjekte auf Normalverteilung ($\alpha = 0,05$). Angegeben sind für die Holzfaserrichtungen RT und TL jeweils die Signifikanzwerte p für den Kolmogorov-Smirnov- sowie den Shapiro-Wilk-Test. (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Gewinde-Testobjekt	Holzfaserrichtung RT		Holzfaserrichtung TL	
	Kolmogorov-Smirnov: p	Shapiro-Wilk: p	Kolmogorov-Smirnov: p	Shapiro-Wilk: p
GP01	0,065	0,021	0,200	0,272
GP03	0,173	0,447	0,200	0,294
GP04	0,200	0,836	0,171	0,186
GP05	0,200	0,599	0,114	0,144
GP06	0,200	0,736	0,097	0,048
GP07	0,200	0,601	0,200	0,172
GP08	0,200	0,781	0,200	0,953
GP10	0,157	0,214	0,200	0,916
GP11	0,116	0,230	0,123	0,826

Eine weitere Voraussetzung ist die Homogenität der Varianzen, welche mit dem Levene-Test ($\alpha = 0,05$) gezeigt wird. Der Levene-Test ist nicht signifikant

($F(225.87) = 0,707$; $p = 0,978$), daher kann Varianzhomogenität angenommen werden. Damit sind die Bedingungen für eine mehrfaktorielle Varianzanalyse erfüllt.

Das Ergebnis der mehrfaktoriellen Varianzanalyse ist in Tabelle 6 gezeigt. Das Gesamtmodell ist signifikant ($F(37.275) = 85,52$; $p < 0,001$; korrigiertes $R^2 = 0,909$; $N = 313$). Es können drei Haupteffekte auf das Haltevermögen nachgewiesen werden. Die Faktoren Faserrichtung ($F(1.275) = 361,85$; $p < 0,001$), Holzbalken ($F(22.275) = 61,09$; $p < 0,001$) und die Gewindesteigung ($F(5.275) = 7,64$; $p < 0,001$) haben einen signifikanten Effekt auf das Haltevermögen. Für den Faktor Flankenwinkel lässt sich kein signifikanter Zusammenhang zeigen ($F(2,275) = 1,27$; $p = 0,283$). Sowohl die Interaktion der Gewindesteigung mit der Faserrichtung ($F(5.275) = 1,51$; $p = 0,187$) als auch des Flankenwinkels mit der Faserrichtung ($F(2.275) = 1,382$; $p = 0,252$) sind nicht signifikant.

Tabelle 6: Ergebnis der mehrfaktoriellen Varianzanalyse. Signifikante Effekte auf das Haltevermögen können für die Faserrichtung, den Holzbalken und die Gewindesteigung gezeigt werden. Für den Flankenwinkel und die Interaktionen lassen sich keine signifikanten Effekte ermitteln. (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Abhängige Variable: Haltevermögen

	F	p-Wert	Partielles Eta ²
korrigiertes Modell	85,519	< 0,001	0,920
Gewindesteigung	7,643	< 0,001	0,122
Flankenwinkel	1,269	0,283	-
Holzfaserrichtung	361,851	< 0,001	0,568
Holzbalken	61,090	< 0,001	0,830
Gewindesteigung*Holzfaserrichtung	1,510	0,187	-
Flankenwinkel*Holzfaserrichtung	1,384	0,252	-

$R^2 = 0,920$ (korrigiertes $R^2 = 0,909$)

Die Effektgröße wird nach Cohen (1988, 1992) anhand des partiellen Eta² berechnet. Die Effektgrößen sind für die Faserrichtung ($f = 1,15$) und für den Faktor Holzbalken ($f = 2,21$) als stark zu bewerten. Die Gewindesteigung hat eine mittlere Effektgröße ($f = 0,37$).

Holzfaserrichtung

In Tabelle 7 ist das Haltevermögen für die beiden Ebenen zur Holzfaserrichtungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ebene TL ein deutlich niedrigeres Haltevermögen im Vergleich zur Ebene RT aufweist.

Tabelle 7: Haltevermögen für die Ebenen zur Faserrichtung RT und TL. Angegeben sind Versuchsanzahl (N), die Minima (Min), Maxima (Max), Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD). In Faserrichtung TL ist ein deutlich niedrigeres Haltevermögen zu verzeichnen. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Abhängige Variable: Haltevermögen					
Holzfaserrichtung	N	Min in kN	Max in kN	M in kN	SD in kN
RT	156	5,535	11,804	7,945	1,370
TL	157	2,960	8,571	5,447	1,119

Gewindesteigung

Die Gewindesteigung hat einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Um zu ermitteln, welche der Faktorstufen der Gewindesteigung einen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable haben, wurden Post-hoc-Tests angewendet. Dazu kann das konservative Verfahren der Bonferroni-Korrektur angewendet werden. Bonferroni korrigierte Tests ($\alpha = 0,05$) zeigen, dass das Haltevermögen bei einer Gewindesteigung von 5,9 mm ($M = 6,300$; $SD = 1,776$) signifikant geringer ist, als bei den Gewindesteigungen 3,04 mm ($M = 6,923$; $SD = 1,593$), 3,64 mm ($M = 6,686$; $SD = 1,742$), 4,03 mm ($M = 6,754$; $SD = 1,830$) und 4,5 mm ($M = 6,848$; $SD = 1,775$). Zwischen den anderen Gewindesteigungen kann mittels der Bonferroni-Korrektur kein statistisch signifikanter Unterschied im Haltevermögen gezeigt werden.

Um den zu erwartenden Durchschnittswert für die einzelnen Faktorstufen der Gewindesteigung darzustellen, werden die geschätzten Randmittel des Haltevermögens verwendet. Die geschätzten Randmittel werden bei der Varianzanalyse verwendet, um die Effekte aus experimentell ermittelten Daten auf Signifikanz zu prüfen und geben nicht die gemessenen Mittelwerte, sondern die zu erwartenden Mittelwerte an.

Der Einfluss der Gewindesteigung auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens wird nachfolgend in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Fehlerbalken geben die 95 % Konfidenzintervalle an. Das Diagramm zeigt somit den Gestalt-Funktion-Zusammenhang der Gewindesteigung einer Holzschraubverbindungen. Die Datengrundlage ist dem Anhang in Kapitel *Forschungsdaten Teilforschungsfrage 1* zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass die Gewindesteigung von 5,9 mm das niedrigste geschätzte Randmittel des Haltevermögens aufweist. Die Gewindesteigung von 3,04 mm zeigt das höchste geschätzte Randmittel des Haltevermögens. Bei einer Gewindesteigung von 3,04 mm ist das Haltevermögen, gegenüber der Steigung von 5,9 mm, um 10,1 % höher. Bei der Gewindesteigung von 4,5 mm ist ein scheinbar lokales Maximum ersichtlich. In einer Nachuntersuchung wurde dies gesondert geprüft. Es konnte jedoch kein lokales Maximum erkannt werden.

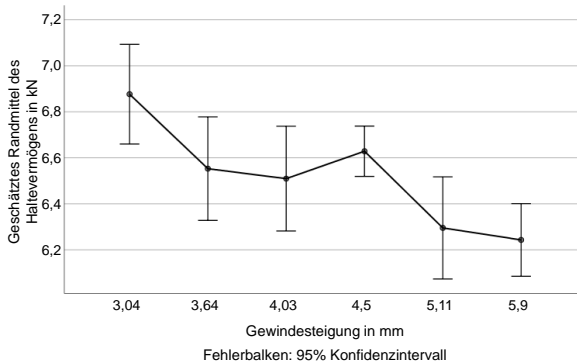


Abbildung 6.6: Experimentell ermittelter Gestalt-Funktion-Zusammenhang (Gesamtanzahl an Versuchen $N = 313$): Einfluss der Gewindesteigung auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens. Für beide Holzfaserrichtungen gemittelt ist ein linearer Verlauf ersichtlich. Eine kleinere Gewindesteigung führt zu höherem Haltevermögen. Das scheinbar lokale Maximum bei einer Gewindesteigung von 4,5 mm wurde in einer Nachuntersuchung gesondert geprüft. Der Zusammenhang ist auch in der Nachuntersuchung linear. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Der Einfluss der Gewindesteigung ist für die beiden Holzfaserrichtungen gemittelt dargestellt. In Abbildung 6.7 wird dieser Zusammenhang getrennt nach den beiden Holzfaserrichtungen RT und TL dargestellt.

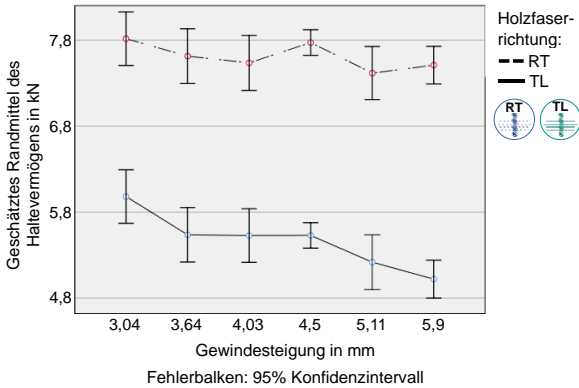


Abbildung 6.7: Experimentell ermittelter Einfluss der Gewindesteigung auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens getrennt nach der Ebene zur Holzfaserrichtung (Versuchszahl N = 313). In beiden Ebenen zeigt sich, dass eine kleinere Gewindesteigung zu höherem Haltevermögen führt. Dieser Einfluss ist in der Ebene TL größer als in der Ebene RT.

Es zeigt sich in beiden Ebenen, dass die Gewindesteigung von 3,04 mm das höchste geschätzte Randmittel des Haltevermögens aufweist. In beiden Ebenen kann ein vergleichbarer Zusammenhang zwischen Gewindesteigung und Haltevermögen erkannt werden. Die Interaktion zwischen der Gewindesteigung und der Ebene zur Faserrichtung auf das Haltevermögen konnte in der ANOVA nicht nachgewiesen werden. Dennoch kann in Abbildung 6.7 eine Abhängigkeit erkannt werden. Es ist zu sehen, dass der Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen in der Ebene TL größer ist als in der Ebene RT.

6.1.4 Diskussion

Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse diskutiert. Dazu wird zuerst auf den Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing und danach auf die ermittelten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge eingegangen.

Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing

In Kapitel 5 wurde festgestellt, dass die Faserrichtung eine Einflussgröße bei der Untersuchung des Versagenverhaltens ist. Aus diesem Grund wurde der Experi-

mentalaufbau zum Schrauben-Testing entwickelt, welcher eine Untersuchung in spezifischen Holzfaserrichtungen ermöglicht. Die Funktion Einschrauben wurde geoptert, um die Funktion Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Faserrichtung untersuchbar zu machen. Es wurden dazu Gewinde-Testobjekte mit geraden Gewindeflanken verwendet. Der Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing ermöglicht so den statistischen Nachweis des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs zwischen dem Haltevermögen und der Gewindesteigung.

Ein weiterer Vorteil des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing ist, dass die zu untersuchenden Gewindeparameter mit den Gewinde-Testobjekten, im Vergleich zum bisher üblichen Vorgehen mittels Schraubentypen, gezielt eingestellt werden können. Die Gewinde-Testobjekte können gefräst werden. Dies erwies sich im Vergleich zu bisher üblichen Fertigungsverfahren, beispielsweise mittels Flachbackenwalzen oder Polieren, als besonders effektiv und effizient.

Der Einfluss der Holzfaserrichtung auf das beobachtbare Versagenverhalten wurde bei der Bearbeitung von Teilforschungsfrage 1 qualitativ ermittelt. Der Einfluss auf das Haltevermögen konnte durch den neuen Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing an Gewinde-Testobjekten quantifiziert werden. In der Ebene RT werden höhere Haltevermögen erreicht als in der Ebene TL. Das Verhältnis der Haltevermögen der Ebene RT zur Ebene TL liegt bei 1,87. Diese Erkenntnis wird von Hübner (2014) unterstützt, welcher beschreibt, dass aufgrund der Materialeigenschaften von Holz in Längsrichtung höhere Kräfte über die Gewindeflanken übertragen werden. Die Längsrichtung entspricht in dieser Untersuchung dem Haltevermögen in RT-Ebene. Auch Ayoubi (2016) beschreibt die Kraftverteilung der Schraube zum Rotationswinkel um die Schraubenachse als nicht achsensymmetrisch. Es wird von einer elliptischen Verteilung mit einer größeren Ausdehnung entsprechend der Ebene RT dieser Untersuchung ausgegangen. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse unterstützen die Beschreibungen von Hübner (2014) und Ayoubi (2016).

Eine Einschränkung des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing ergibt sich durch die Veränderung der Absolutwerte des Haltevermögens. Durch das Verspannen der Probekörperhälften werden die Absolutwerte verändert. Auch durch die geometrischen Abmaße der Gewinde-Testobjekte werden die Absolutwerte verändert. Üblicherweise beträgt die geprüfte Gewindelänge $8d$ und der Kreisumfang πd . Für eine Übertragbarkeit der Werte auf Holzschrauben sollten die geometrischen Abmaße der Gewinde-Testobjekte daran ausgerichtet werden, um Skaleneffekte zu berücksichtigen und eine Berechnungsformel dafür entwickelt werden.

Im Studiendesign wurde davon ausgegangen, dass die Holzparameter der unterschiedlichen Holzbalken variieren und somit einen Einfluss auf die Versuche haben.

In der ANOVA wurde für den Faktor Holzbalken ein signifikanter Einfluss auf das Haltevermögen ermittelt. Dieser Einfluss wurde durch Blockbildung berücksichtigt, indem der Einfluss der einzelnen Holzbalken auf das Haltevermögen der Gewinde-Testobjekte quantifiziert und von der Berechnung der Faktoreffekte getrennt wurde.

Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

Der Einfluss des Flankenwinkels auf das Haltevermögen konnte zwischen 35° und 45° nicht nachgewiesen werden. In der Praxis ist dies für Hersteller von Holzschrauben dennoch relevant. Der Flankenwinkel kann innerhalb dieses Bereichs ohne einen Einfluss auf das Haltevermögen variieren. Somit kann bei gleichbleibendem Haltevermögen bei einem Flankenwinkel von 40° eine Fertigungstoleranz von $\pm 5^\circ$ gewählt werden. Eine engere Tolerierung ist nicht notwendig. Diese Erkenntnis ist im untersuchten Bereich zwischen 35° - 45° gültig. Der Einfluss des Flankenwinkels sollte jedoch auch außerhalb des untersuchten Wertebereichs analysiert werden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Gewindesteigung im Bereich von 3,04 mm bis 5,9 mm und einem Steigungswinkel zu Schrauben mit Durchmesser d von 8 mm einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen aufweist. Eine kleinere Gewindesteigung führt zu einem höheren Haltevermögen. Obwohl dies vermutet wurde, konnte ein Optimum in den gewählten Grenzen nicht gefunden werden. In anschließenden Studien sollte daher der Einfluss von Gewindesteigungen kleiner als 3,04 mm auf das Haltevermögen untersucht werden. Es kann im gewählten Bereich von einem linearen Zusammenhang zwischen Gewindesteigung und Haltevermögen ausgegangen werden. Dieser lineare Zusammenhang ist in beiden Ebenen sichtbar. Der Effekt der Gewindesteigung scheint in der Ebene TL jedoch größer zu sein als in der Ebene RT. Dies ist vergleichbar mit den Ergebnissen von Sydor et al. (2016), welcher in tangentialer Richtung ebenfalls einen linearen Zusammenhang für die Gewindesteigung im Bereich 2,5 mm bis 3,5 mm ermitteln konnte. Dagegen können die Ergebnisse von Hübner (2014), welcher für einen Einschraubwinkel von 90° und die Holzart Fichte einen positiven Einfluss einer größeren Gewindesteigung auf das Haltevermögen vermutete, nicht bestätigt werden. Der statistische Nachweis wurde sowohl von Sydor et al. (2016) als auch von Hübner (2014) nicht erbracht und konnte erstmals über diese Untersuchung nachgewiesen werden. Ermöglicht wurde dies durch die Verwendung des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing durch die Untersuchung von einzelnen Gewindeparametern und keinen Gewindeparametersätzen in spezifischen Holzfaserrichtungen.

Um das Haltevermögen einer Schraube mit einem Durchmesser d von 8 mm zu optimieren, ist eine kleinere Steigung zu bevorzugen. Mit Einbezug der Ergebnisse von Sydor et al. (2016) kann vermutet werden, dass Gewindesteigungen kleiner als

2,5 mm zu einer weiteren Steigerung des Haltevermögens führen. Für Hersteller von Holzschrauben bedeutet dies Gewindesteigungen von $P < 3$ mm und somit niedriger als bisher üblich zu wählen, um höhere Haltevermögen zu erzielen.

Mit diesem Wissen können auch die Verfahren zur Schraubenauslegung verbessert werden. Die Steigung und der Steigungswinkel sollten Teil der Produktbeschreibung in EN 14592:2012-07 (DIN EN 14592) sowie der Europäischen Bewertungsdokumenten (EADs) sein, um sicherzustellen, dass die Prüfverfahren für die Ermittlung des Haltevermögens gültig sind. Wenn Hersteller Holzschrauben mit Steigungen oder Steigungswinkeln entwickeln, die das Haltevermögen signifikant beeinflussen, dann sollten diese Parameter in der Schraubenauslegung berücksichtigt werden. (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

In Kapitel 5 wurde eine Konstruktionshypothese zum Gestalt-Funktion-Zusammenhang zwischen Gewindesteigung und Haltevermögen aufgestellt. Es wurde vermutet, dass sich das Haltevermögen bei einer Gewindesteigung kleiner 3,6 mm erhöht. Dieser Zusammenhang wird durch dieses Untersuchungsergebnis bestätigt. Erklärt wurde diese Konstruktionshypothese mit der größeren Wirkfläche der Gewindeflanken sowie einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung über die Einschraubtiefe in die Holzumgebung. Die Erklärung zur Ursache ist in dieser Form allerdings nicht prüfbar, da zwei unterschiedliche Aspekte adressiert werden. So wird die Wirkfläche der Gewindeflanke bei einer kleineren Gewindesteigung sowohl über den Parameter Flankenabstand (größere Anzahl an Gewindeflanken) als auch den Parameter Steigungswinkel (kleinerer Winkel) vergrößert. Eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Einschraubtiefe wird jedoch nur durch eine größere Anzahl an Gewindeflanken erreicht. Bei einer Veränderung des Steigungswinkels wird die Spannungsverteilung über die Einschraubtiefe nicht verändert. Eine Prüfung der Erklärung ist aus diesem Grund nicht möglich und somit sind die zugrundeliegenden Mechanismen dieser Zusammenhänge weiterhin unbekannt. Eine Konstruktionshypothese sollte so formuliert werden das nur ein Mechanismus adressiert wird. Dadurch wird die Hypothese sowohl im Wenn-Dann-Aspekt als auch in der Erklärung prüfbar.

Es ergeben sich somit Einschränkungen aus den getesteten Gewinde-Testobjekten. Die Parameter Flankenabstand und Steigungswinkel sind korreliert. Ohne die Erklärungen zu den physikalischen Effekten der Gestalt-Funktion-Zusammenhängen gelten die Einflüsse der Gewindesteigung nur für den in Tabelle 3 aufgeführten Wertebereich inklusive abhängigen Steigungswinkeln. In Kapitel 6.3 werden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge daher in übertragbareren Modellen abgebildet.

6.2 Zusammenhänge zwischen Versagenverhalten und Gewindeparametern

Um die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und der Gestalt des Schraubengewindes erklären zu können, ist es notwendig, das Versagen im Gewindekontakt zu analysieren. In diesem Kapitel wird daher die Wirkung der Gewindeparameter auf das Versagenverhalten quantitativ untersucht.

Daher befasst sich dieses Kapitel mit der Unterforschungsfrage:

Welche Zusammenhänge bestehen zwischen dem Versagenverhalten und einem Gewindeparameter?

In Teilforschungsfrage 1 konnte ermittelt werden, dass sich das Versagen der untersuchten Schrauben hinsichtlich der Rissbildung unterscheidet. Weiterhin konnte die Gewindesteigung als qualitative Einflussgröße auf die Rissbildung identifiziert werden. In der vorherigen Untersuchung konnte der Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen ermittelt werden. Dem in Abbildung 6.8 gezeigten Vorgehen des Forschungsdesigns folgend wird daher der Einfluss der Gewindesteigung auf die Rissgeometrie quantitativ untersucht.

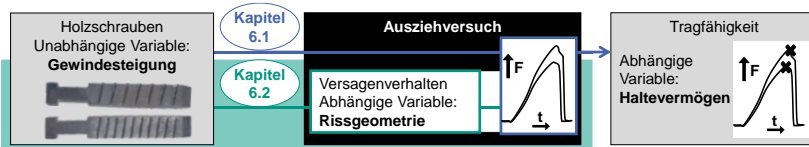


Abbildung 6.8: Vorgehen dieses Kapitels zur Untersuchung der Wirkung der Gewindesteigung auf das Versagenverhalten, um die Zusammenhänge zwischen der Gewindegestalt und der Tragfähigkeit zu verstehen. Dazu wird die Rissgeometrie untersucht.

Das Ziel ist die Untersuchung der Rissgeometrie bei unterschiedlichen Gewindesteigungen, um die Wirkung des Gewindeparameters auf das Versagen zu ermitteln. In dem nachfolgenden Kapitel wird daher zuerst auf die verwendeten Materialien und den Versuchsaufbau eingegangen. Um die Wirkung in spezifischen Holzfaserrichtungen zu untersuchen, wird auch hier der entwickelte Experimental-aufbau zum Schrauben-Testing verwendet. Eine Schwierigkeit bei der Beobachtung

des Versagenverhaltens in Teilforschungsfrage 1 war die große Varianz in den qualitativen Beobachtungen. Um eine quantitative Analyse der Rissgeometrie zu ermöglichen wird ein Verfahren zur Messung der Rissgeometrie entwickelt und evaluiert. Im Anschluss werden die mit diesem Verfahren erzeugten Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

Der Versuchsaufbau, der Algorithmus, das Studiendesign, die Ergebnisse und die Diskussion dieses Kapitels basieren zu Teilen auf der nachfolgenden Veröffentlichung:

- „Analyse des Versagens mittels Bilderkennung für die Gestaltung von Holzschrauben“ (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2021)

Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung aus der Veröffentlichung übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

6.2.1 Studiendesign und Versuchsaufbau der Ausziehversuche

In Teilforschungsfrage 1 wurde die Holzfaserrichtung als Einflussgröße auf das beobachtbare Versagenverhalten identifiziert. Um eine Untersuchung in spezifischen Richtungen zur Holzfaser zu ermöglichen, wurde im vorherigen Kapitel der Experimental Aufbau zum Schrauben-Testing entwickelt. Dieser Aufbau wird auch in der Untersuchung des Versagenverhaltens verwendet. Entsprechend diesem Aufbau werden die in Abbildung 6.9 a gezeigten Gewinde-Testobjekte mit abgewinkelten Schraubengewinden verwendet.



Abbildung 6.9: Verwendete Gewinde-Testobjekte mit unterschiedlichen Gewindesteigungen (a), Prüfkörperhälften mit Nut (b), Eingespannte Probe mit Gewinde-Testobjekt (c). (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2021)

Die Gewinde-Testobjekte werden in Prüfkörper, in die jeweils eine Nut eingefräst wurde, eingelegt (Abbildung 6.9 b). Die Prüfkörperhälften werden über die Vorrichtung aus Abbildung 6.9 c mit einer Vorspannkraft von 3,2 kN fixiert. Für die

Prüfkörper wird auch hier die Holzart Fichte (lat. *Picea abies*) verwendet. Die Prüfung des Haltevermögens erfolgt mittels einer Ausziehmaschine angelehnt an DIN 1382:2016-07 (DIN EN 1382). Das Vorgehen und die Abmessungen sind identisch mit Kapitel 6.1.1.

Für die Analyse der Rissgeometrie werden Gewinde-Testobjekte mit unterschiedlichen Gewindesteigungen genutzt. In Tabelle 8 sind die für die Untersuchung verwendeten Gewinde-Testobjekte GP01, GP06 und GP10 aufgelistet. Die Gewindesteigung P wird als Faktor in den drei Stufen 3,04 mm, 4,5 mm und 5,9 mm variiert. Der Steigungswinkel φ und die Gewindelänge $lg1$ sind entsprechend davon abhängig. Alle Gewinde-Testobjekte weisen einen Flankenwinkel α von 40° auf. Es wurden beide Ebenen RT und TL für die tangentielle Einschraubrichtung als Faktorstufen untersucht.

Tabelle 8: Verwendete Gewinde-Testobjekte zur Untersuchung der Auswirkung der Gewindesteigung P auf das Versagenverhalten.

Gewinde-Testobjekt	Faktor	Parameter		
	P in mm	α in $^\circ$	φ in $^\circ$	$lg1$ in mm
GP01	3,04	40	6,8	38,76
GP06	4,5	40	10	38,86
GP10	5,9	40	13	38,81

6.2.2 Quantitative Analyse der Rissgeometrie

Bei der Beobachtung des Versagenverhaltens in Teilforschungsfrage 1 war die große Varianz in den qualitativen Beobachtungen eine Schwierigkeit. Weiterhin wurde das Versagenverhalten zeitaufwendig manuell ausgewertet, wodurch nur eine kleine Stichprobengröße untersucht werden konnte. Der für den Werkstoff Holz und dessen streuende Parameter erforderliche Stichprobenumfang mit entsprechender Auswertegüte kann jedoch nicht manuell erreicht werden. Zur Vermeidung einer fehlerhaften Analyse ist eine maschinelle Analyse notwendig.

Um eine quantitative Analyse der Rissgeometrie zu ermöglichen, wird deshalb das Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie angepasst. Diese Visualisierung ermöglicht eine Analyse der Rissgeometrie mittels Bilderkennung. Anschließend wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher eine Messung der Rissgeometrie im Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen mittels Bilderkennung ermöglicht.

6.2.2.1 Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie

Die ausgezogenen Prüfkörperhälften werden zur Untersuchung der Rissgeometrie verwendet. Bei konventionellen Holzschrauben verändern Geometrieparameter, wie Gegengewinde oder Schafffräser, durch das Ausschrauben die Rissbildung. Durch den entwickelten Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing ist ein Herausnehmen der Gewinde-Testobjekte möglich, ohne dass die Rissgeometrie, beispielsweise durch das Ausschrauben, verändert wird. Darüber hinaus zeigt sich ein weiterer Vorteil des Experimentalaufbaus mit den Gewinde-Testobjekten mit geraden Gewindeflanken. Das Versagen bezogen auf eine Holzfaserrichtung lässt sich gezielt untersuchen, da dieses über die gesamte Breite der Gewindeflanke auftritt. Bei Holzschrauben lässt sich das Versagen bezogen auf eine Holzfaserrichtung nur an einzelnen Punkten der gewundenen Flanke untersuchen. Bei den Gewinde-Testobjekten mit 10 mm Breite ist dies an einer größeren Länge möglich. Die Rissgeometrie wird daher sowohl in der Nutmitte als auch 3 mm seitlich dazu untersucht.

Für die Visualisierung der Risse wird das Vorgehen nach Uibel (2012) auf die Funktion Tragfähigkeit angewendet. Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, wird bei diesem Vorgehen durch Einfärben und Aufspalten eines Holzes, in das eine Schraube ein- und wieder ausgedreht wurde, die innere Rissbildung sichtbar gemacht. Für die Färbung wird Holzbeize verwendet. Es wurde von Uibel (2012) ermittelt, dass sich die Beize lediglich im Bereich der Risse ausbreitet. Nach Bodner et al. (1997a) beginnt die Rissbildung an Schwachstellen in der Holzstruktur. Durch das Einlegen der Gewindeflanken in das Holz ist aufgrund der Kerbwirkung das Holz in der Nähe der Flanken die Schwachstelle. Zur Beobachtung der entstandenen Risse werden die Prüfkörper quer zu den Flankeneindrücken aufgesägt. In Abbildung 6.10 ist diese Schnittebene A-A der Prüfkörperhälften in RT-Ebene dargestellt.

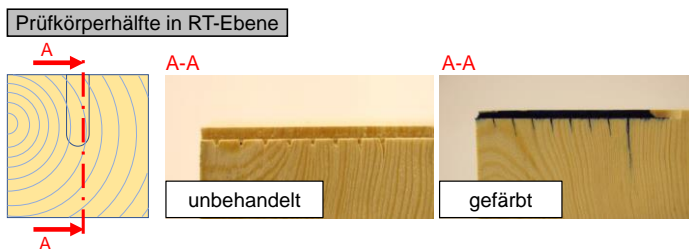


Abbildung 6.10: Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie in RT-Ebene. Links: Schnittebene A-A der Prüfkörperhälften, Mitte: Rissbild ohne Färbung, Rechts: gefärbtes Rissbild. Die Rissbildung ist durch die Färbung deutlich erkennbar. (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2021)

In Abbildung 6.10 ist in der Mitte das unbehandelte Rissbild entlang der Schnittebene A-A und rechts das mit dem Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie gefärbte Schnittbild dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch dieses Vorgehen die Sichtbarkeit der Rissgeometrie deutlich verbessert wird.

Für die Prüfkörper in TL-Ebene ist die Schnittebene B-B quer zu den Flankeneindrücken auf der linken Seite in Abbildung 6.11 dargestellt. Rechts ist durch eine Färbung die Rissgeometrie entlang der Schnittebene sichtbar.

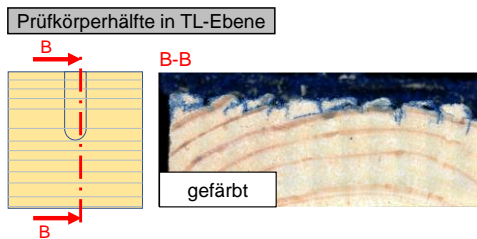


Abbildung 6.11: Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie für Prüfkörperhälften in TL-Ebene. Links: Schnittlinie B-B der Prüfkörperhälfte, Rechts: gefärbtes Rissbild an der Schnittlinie B-B. Es ist im Vergleich zur RT-Ebene eine sehr geringe Rissbildung zu erkennen.

Es ist zu sehen, dass in der RT-Ebene im Holz deutliche Risse an den Positionen der Flankenspitzen des Gewinde-Testobjekts entstehen. In der TL-Ebene dagegen entstehen durch das Versagen im Gewindekontakt kaum Risse. Für die Analyse der Rissgeometrie im Gewindekontakt werden daher nur die Prüfkörperhälften in RT-Ebene verwendet, um die Wirkung der Gewindesteigung zu ermitteln. Als messbare Parameter für die Beschreibung der Rissgeometrie wurden die Rissbreite und die Risslänge verwendet.

6.2.2.2 Entwicklung eines Algorithmus zur Messung der Rissgeometrie

Durch das Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie wird eine Auswertung mittels Bilderkennung ermöglicht. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher die Messung der Rissgeometrie über die Parameter Rissbreite und Risslänge ermöglicht. In Abbildung 6.12 ist das digitalisierte Versagensbild (a) sowie die Schritte des Algorithmus (b - e) zur Messung der Rissgeometrie gezeigt.

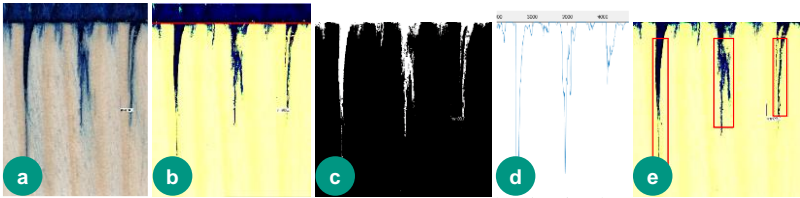


Abbildung 6.12: Schritte des Algorithmus für die Messung der Rissgeometrie. Die Risse werden in den verschiedenen Schritten (b - d) erkannt, aufbereitet, vermessen und in Schritt e mit einem roten Rechteck markiert. (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2021)

Die gefärbten Versagensbilder wurden mit dem Digitalmikroskop (Keyence Corporation, Produkt: VHX 6000, Osaka, Japan) aufgenommen (a). Im ersten Schritt des Algorithmus (b) wird mittels Kantenerkennung der Gewindegrund identifiziert sowie der Kontrast zwischen Holz und Riss verstärkt. Dazu werden die Farben im RGB-Farbraum verändert, indem Rot- und Grünwerte gefiltert werden. Blauwerte werden aufgrund der blauen Holzbeize nicht gefiltert. Dadurch können Spätholzschichten mit einem höheren Rotanteil in nachfolgenden Schritten besser von Rissen im Schwarz-Weiß-Bild unterschieden werden.

Im Anschluss (c) wird das gefilterte Bild in ein Schwarz-Weiß-Bild umgewandelt. Diese Umwandlung erfolgt über das HSV-Farbformat, da hier jede Farbe durch die drei Koordinaten Farbwert, Farbsättigung und Hellwert definiert werden kann und dadurch die blaue Färbung der Risse besser identifiziert werden kann. Bei der Umwandlung wird jedem Pixel eine der beiden Farben Weiß oder Schwarz zugeordnet. Die Farbe Weiß entspricht dabei der Kategorie „Riss“ und die Farbe Schwarz der Kategorie „kein Riss“. Die Einstufung als Riss erfolgt über den Farbwert und über den Hellwert. Um die Diffusion der Holzbeize am Gewindegrund zu reduzieren, wird das Bild mit einem sogenannten Opening-Operator verarbeitet.

Im nächsten Schritt (d) erfolgt die Risserkennung. Dazu werden die als Riss eingeteilten Pixel spaltenweise summiert. Über einen Schwellwert wird diese Summe zur Filterung genutzt, um nur Risse einer gewissen Länge zu berücksichtigen. Durch den sogenannten Closing-Operator werden falsch eingestufte Bereiche innerhalb eines Risses erkannt und bereinigt.

Im letzten Schritt (e) erfolgt die Auswertung der Risse nach Länge und Breite. Aufgrund von Fehlstellen am Gewindegrund wird die Breite der Risse bei 200 Pixeln unterhalb des Gewindegrunds gemessen und danach die Risslänge bestimmt. Es

wird eine Konvertierung der Rissbreite und Risslänge in Millimeter auf Basis der Skalierung der Digitalisierung durchgeführt. Die erkannten Risse werden im Bild mit einem Rechteck dargestellt.

Der Algorithmus wurde mit der Software MATLAB⁵ programmiert. Dieser ist mit entsprechend verwendeten Parameterwerten über das folgende Repository KITopen mittels Creative Commons Lizenz verfügbar: (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2020).

6.2.2.3 Evaluierung der Visualisierung und Messung der Rissgeometrie

Durch die Darstellung der Rissbreite und -länge im Versagensbild mithilfe eines Rechtecks kann die Fehlerrate des Algorithmus manuell geprüft werden. In Abbildung 6.13 a und b sind Beispiele für korrekte Identifikationen und in c - e für unzureichende Risserkennungen abgebildet. Diese Fehler entstanden bei allen Gewindesteigungen und führen somit zu einer größeren Streuung der Ergebnisse.

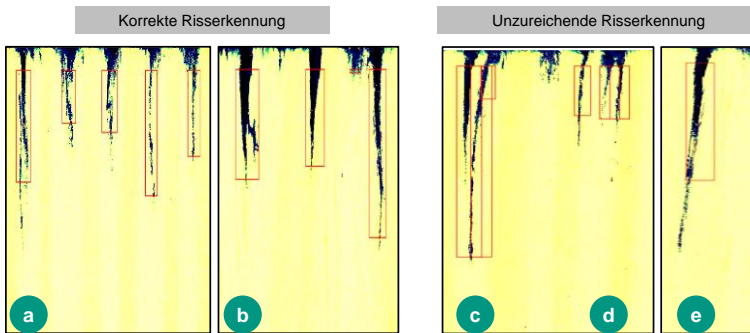


Abbildung 6.13: Beispiele für korrekte Erkennungen (a, b) und unzureichende Erkennungen der Rissgeometrie (c - e) durch den Algorithmus. Die erkannte Rissgeometrie durch Risslänge und Rissbreite ist durch ein Rechteck gekennzeichnet. (Hölz, Dörner & Matthiesen, 2021)

Bei einer unvollständigen Färbung der Risse ist die Bestimmung der Risslänge zu kurz (Abbildung 6.13 a, e). Verzweigt ein Riss, dann kann dies dazu führen, dass dieser durch den Algorithmus als einer oder als zwei getrennte Risse erkannt wird

⁵ Hersteller: The MathWorks Inc., Version 9.6 (R2019a)

und die Risszuordnung nicht eindeutig ist (Abbildung 6.13 b bzw. d). Dies ist auf eine fehlende eindeutige Bewertungsgröße für den Algorithmus zurückzuführen. Die korrekte Erkennung von Rissen ist auf einen bestimmten Winkel des Risses zum Gewindegrund begrenzt. Dies liegt an einer Einschränkung des Suchbereichs des Algorithmus in Schritt e und kann daher zu einer unvollständigen Erkennung führen (Abbildung 6.13 c, e). Die beschriebenen Fehler treten unabhängig von der Gewindesteigung auf und verzerren die Ergebnisse daher nicht.

Durch die manuelle Prüfung der markierten Rissgeometrie mittels Rechteckdarstellung kann qualitativ bestätigt werden, dass der Algorithmus eine gute Risserkennung und -vermessung ermöglicht. Die Auswertung bietet bezüglich der Effizienz viele Vorteile gegenüber einer manuellen Auswertung. Der Algorithmus wird daher für die nachfolgende Untersuchung angewandt. Die beschriebenen Fehler bieten Potential für eine zukünftige Verbesserung des Algorithmus.

6.2.3 Ergebnisse

Die Auswirkung der Gewindesteigung auf die Rissgeometrie wird anhand der hergestellten und gefärbten Versagensbilder untersucht. Die Versagensbilder bilden die Risse nach dem Erreichen des Haltevermögens im Ausziehversuch ab. Diese Rissgeometrie wurde von insgesamt 61 Versagensbildern in RT-Ebene mit dem entwickelten Algorithmus quantitativ ausgewertet.

In Abbildung 6.14 sind die Ergebnisse für die Risslänge (links) sowie die Rissbreite (rechts) für jeden erkannten Riss aus allen 61 Versagensbildern in Abhängigkeit von der Gewindesteigung in Box-Plots dargestellt. Die Datengrundlage dieser beiden Diagramme kann dem Anhang in Kapitel *Forschungsdaten Teilforschungsfrage 2* entnommen werden. Es wurden 178 Risse für die Gewindesteigung 3,04 mm, 175 Risse für 4,5 mm und 138 Risse für die Gewindesteigung 5,9 mm erkannt. Die ermittelten Risslängen sowie die Rissbreiten für jeden erkannten Riss sind in Millimeter für die unterschiedlichen Gewindesteigungen angegeben. Für die Risslänge ist kein eindeutiger Zusammenhang zur Gewindesteigung erkennbar. Für die Rissbreite wird der Median mit zunehmender Gewindesteigung höher. Die Ausdehnung der Box der Rissbreite ist bei höheren Gewindesteigungen größer, wobei über alle Gewindesteigungen hinweg auch sehr kleine Rissbreiten gemessen wurden.

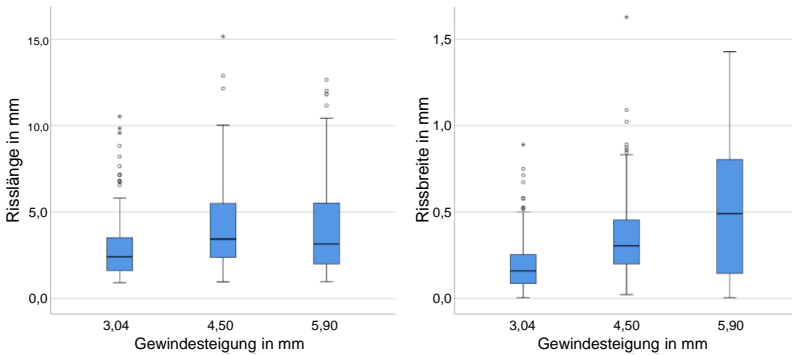


Abbildung 6.14: Ergebnis des Algorithmus für die Analyse der Risslänge und der Rissbreite der erkannten Risse für die drei Gewindesteigungen (3,04: N = 178, 4,5: N = 175, 5,9: N = 138 Risse bei N = 61 Versagensbildern nach dem Erreichen des Haltevermögens). Es kann keine Wirkung der Gewindesteigung auf die Risslänge, jedoch auf die Rissbreite erkannt werden. (Hölz, Dörner & Matthesen, 2021)

6.2.4 Diskussion

Für die Beobachtung der Risse wurde das Vorgehen zur Rissfärbung von Uibel (2012) auf die Funktion Tragfähigkeit übertragen. Dieses Vorgehen ermöglicht durch die Visualisierung die Erfassung der Rissgeometrie mittels Bilderkennungsalgorithmus. Der Algorithmus ermöglicht eine zeitsparendere Auswertung gegenüber der manuellen Auswertung aus Teilforschungsfrage 1 oder beispielsweise von Uibel (2012), Ayoubi (2014) oder Ayoubi (2016). Dies ermöglicht eine quantitative Untersuchung von größeren Stichproben.

Durch eine Erweiterung des Algorithmus um weitere Auswerteparameter wird es auch möglich, die in der Zulassung (EAD 130118-00-0603) geforderte Analyse der Rissfläche zur Bestimmung der Mindestabstände für Holzschrauben zu unterstützen. Die Übertragbarkeit des Algorithmus auf weitere Systeme ist zu prüfen. In einer Untersuchung von Bruchbildern konnte Hübner (2014) Ähnlichkeiten im Versagen zwischen eingeklebten Gewindestangen in Holz und in kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) feststellen. Daher kann eine Übertragbarkeit auf Verschraubungen in faserverstärktem Kunststoff vermutet werden. Durch eine Anwendung in diesem Feld könnte ein Beitrag zum Leichtbau geleistet werden.

Die Forschungsfrage zur Auswirkung der Gewindep parameter konnte durch die Auswertung der Versagensbilder beantwortet werden. Ein Einfluss der Gewindesteigung auf die Risslänge ist nicht ersichtlich, jedoch kann eine Wirkung der Gewindesteigung auf die Rissbreite erkannt werden. Dies bestätigt das Ergebnis aus Teilforschungsfrage 1, wonach die Gewindesteigung die Rissbildung beeinflusst. Dieses Ergebnis wurde auf Basis von qualitativen Untersuchungen des Versagens aufgestellt und kann nun quantitativ nachgewiesen werden. Bisher unbekannt war, dass die Rissbreite im Untersuchungsbereich scheinbar linear mit der Gewindesteigung zunimmt. Bei kleinen Gewindesteigungen ist die Rissbreite im Vergleich zu großen Gewindesteigungen kleiner. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Gewinde von Holzschrauben den Holzuntergrund nicht auf Zug und daraus resultierenden Rissen radial zu den Flanken belastet, sondern auf Scherung.

Einschränkungen der Untersuchung ergeben sich durch die große Streuung der Rissbreite und Risslänge. Ein Teil der Streuung kann auf die in der Evaluierung beschriebenen Fehler der Visualisierung und des Algorithmus zurückgeführt werden. Ein weiterer Teil wird durch aufgetretene Verzögerungen bei der Erkennung des Erreichens des Haltevermögens und der damit folgenden manuellen Abschaltung der Ausziehmaschine verursacht. Die verzögerte Abschaltung führt zu einer größeren Streuung der auftretenden Risse. Weitere Untersuchungen sollten mit einem objektiven Abschaltkriterium und einer umfangreicheren Stichprobengröße durchgeführt werden. Ein Abgleich der auftretenden Rissgeometrie der Gewinde-Testobjekte mit Holzschrauben ist ausstehend.

6.3 Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

In diesem Kapitel erfolgt die Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. In Kapitel 6.1 wurde der Zusammenhang zwischen dem Haltevermögen und den Gewindep arametern untersucht. In Kapitel 6.2 wurde die Wirkung des Gewindep arameters Gewindesteigung auf das Versagenverhalten, welches durch die Rissgeometrie operationalisiert wurde, untersucht. Diese ermittelten Zusammenhänge zwischen Gewindep arameter, Versagenverhalten und Haltevermögen werden für die Abbildung in Modellen zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen genutzt.

Diese theoretischen Modelle sollen die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge erklären und entgegen den Black-Box-Modellen auch außerhalb des geprüften Wertebereichs gültig sein und Vorhersagen erlauben. Dazu wird auf dem Modell der Verbundmechanismen nach Ayoubi und Trautz (2015) sowie dem Druckkegel-Zugring-Modell nach Ayoubi (2014) aus Kapitel 2.3.2 aufgebaut. In Kapitel 6.3.3 wird auf Basis des Stands der Forschung eine Erweiterung des Druckkegel-Zugring-Modells

vorgestellt. Ergebnis der Teilforschungsfrage sind modellierte Gestalt-Funktion-Zusammenhänge für die Gewindesteigung und den Flankenwinkel.

Die Modellierungen dieses Kapitels basieren zu Teilen auf der Veröffentlichung:

- „Wood screw design: Influence of thread parameters on the withdrawal capacity“ (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Die Modellerweiterung dieses Kapitels basiert auf der Veröffentlichung:

- „Theoretische Modelle zum Verbundtragverhalten von Holzschrauben für die Schraubengestaltung“ (Hölz, Ayoubi et al., 2021)

Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus den beiden Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

6.3.1 Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit und der Gewindesteigung

Die Gewindesteigung ist die veränderte Höhe einer Gewindeflanke während einer Umdrehung, also der Abstand zwischen zwei Gewindeflanken. Daher führt die Änderung der Gewindesteigung zu einer Änderung des Steigungswinkels sowie des Flankenabstands. Bei den Gewinde-Testobjekten können diese beiden Parameter unabhängig voneinander variiert werden. Im Folgenden wird daher anstelle der Gewindesteigung die spezifischeren Begriffe Steigungswinkel sowie Flankenabstand für die Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge verwendet.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Steigungswinkel: Nach Ayoubi und Trautz (2015) wird zwischen den Verbundmechanismen Haftverbund, Scherverbund und Reibverbund unterschieden. Bis zum Erreichen des Haltevermögens wirken sowohl der Scherverbund als auch der Reibverbund. Nach Ayoubi (2014) ist beim Scherverbund die auf Scherung beanspruchte mechanische Verzahnung zwischen Gewindeflanken und die dazwischen liegende Holzmatrix maßgebend. Der Scherverbund entsteht daher durch den Formschluss der Gewindeflanken mit dem umgebenden Holz. Dazu relevant ist unter anderem der Abscherwiderstand der Holzmantelfläche der Schrauben. Der Reibverbund entsteht durch die Verschiebung zwischen den Wirkflächenpaaren der Gewinde- und Schaftoberfläche mit dem Holz. Dazu ist neben der Rauheit der Wirkflächen auch die Querverpressungen aufgrund der Verdrängungen der Holzfasern durch die Schraube von großer Bedeutung (Ayoubi, 2014).

Wie in Abbildung 6.15 dargestellt, lässt sich erkennen, dass eine Änderung des Steigungswinkels zu veränderlichen Anteilen der wirkenden Verbundmechanismen

führt. Es kann angenommen werden, dass in den Extremwerten beim Steigungswinkel $\varphi = 0^\circ$ aufgrund des Formschlusses der Gewindeflanken hauptsächlich der Scherverbund wirksam, während bei $\varphi = 90^\circ$ nur der Reibverbund wirksam ist.

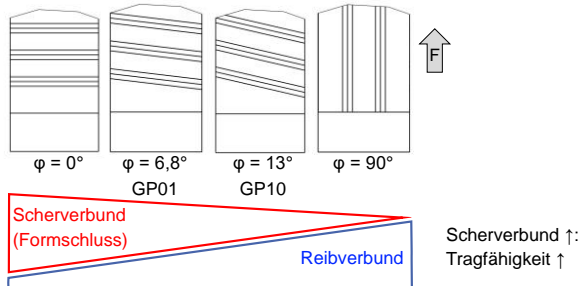


Abbildung 6.15: Modell des Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit und des Steigungswinkels φ auf Basis der veränderlichen Anteile von Scher- und Reibverbund anhand der Gewinde-Testobjekte. Bei kleineren Steigungswinkeln ist der Anteil des Scherverbunds größer und dies resultiert in einer höheren Tragfähigkeit. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthiesen, 2021)

Der Anteil des Scherverbundes nimmt bei größeren Steigungswinkeln ab. Für die Tragfähigkeit ist nach Ayoubi (2014) vor allem der Anteil des Scherverbunds maßgebend. Beim Gewinde-Testobjekt GP01 ($P = 3,04$ mm) ist der Steigungswinkel mit $\varphi = 6,8^\circ$ kleiner als beim Gewinde-Testobjekt GP10 ($P = 5,6$ mm, $\varphi = 13^\circ$). Das höhere Haltevermögen konnte mit dem Gewinde-Testobjekt GP01 ermittelt werden. Dies lässt sich daher durch den höheren Anteil an Scherverbund erklären, der durch den kleineren Steigungswinkel verursacht wird. Daher führt bei konstantem Flankenabstand ein kleinerer Steigungswinkel zu einem höheren Haltevermögen. Basierend auf diesem Modell sollte für die Schraubengestaltung ein kleinerer Steigungswinkel gewählt werden, um höhere Tragfähigkeiten zu erzielen.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstand: Der Scherverbund versagt durch das Abscheren der Holzmantelfläche (Ayoubi, 2014). Die Scherfläche bestimmt den Abscherwiderstand. Wie in Abbildung 6.16 links dargestellt, kann die Scherfläche als Holzmantelfläche der Schraube gesehen werden. Für unterschiedliche Flankenabstände ist die Scherfläche jedoch

zunächst deckungsgleich. Daher kann der Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstand zunächst nicht mit dem Scherverbund erklärt werden.

Daher wird das Druckkegel-Modell einer kegelförmigen Spannungsverteilung von Ayoubi (2014) verwendet (Abbildung 6.16 links). Mit diesem Modell wird der Einfluss des Flankenabstandes erklärt. Es werden im Folgenden die zwei unterschiedlichen Modelle Spannungsverteilung und Scherfläche vorgestellt.

Modellierung auf Basis der Spannungsverteilung: Unter axialer Belastung stützt sich die Holzschraube über die Gewindeflanken gegen das Holz ab. Diese Kraftabstützung erfolgt in einem Winkel zu den Gewindeflanken, wodurch sogenannte Druckkegel entstehen (Ayoubi 2014). Die Spannung nimmt mit dem Abstand zur Gewindeflanke aufgrund des zunehmenden Kegeldurchmessers kontinuierlich ab. Daher ist die mechanische Spannung in der Nähe der Flanken am höchsten und das Holz versagt an dieser Stelle zuerst. Dies ist in Abbildung 6.16 dargestellt.

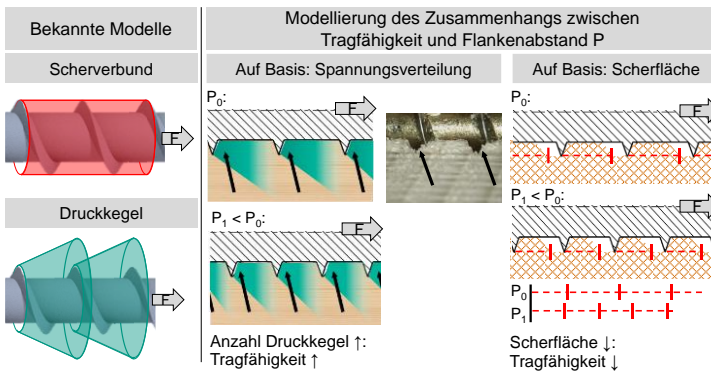


Abbildung 6.16: Links: Scherverbund und Druckkegel nach Ayoubi (2014), Rechts: Modelle zum Zusammenhang der Tragfähigkeit und des Flankenabstands. Modellierung auf Basis der Spannungsverteilung: Versagen der Krafteinleitung aufgrund der kegelförmigen Spannungsverteilung. Ein kleinerer Flankenabstand P_1 erhöht die Anzahl der Krafteinleitungspunkte und führt somit zu einer höheren Tragfähigkeit. Modellierung auf Basis der Scherfläche: Das Versagen der Krafteinleitung führt zu einer kleineren Scherfläche (gepunktet in rot) bei kleineren Flankenabständen P_1 und somit zu einer niedrigeren Tragfähigkeit. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhaus & Matthiesen, 2021)

Dieses Versagen des Holzes in Flanken­nähe wurde bereits in Teil­for­schungs­frage 1 beobachtet. Diese Beobachtung ist im Foto in Ab­bil­dung 6.16 durch Pfeile dar­ge­stellt. Durch das Ver­sa­gen kommt es zu einer Relativ­ver­schie­bung der Schraube und die ver­sa­gten Be­re­iche be­fin­den sich hinter der Flanke. In der Un­ter­suchung aus Ka­pitel 6.1 wurde er­mit­telt, dass die Ge­win­de-Test­ob­jek­te mit klei­nerem Flanken­ab­stand (korreliert mit dem Stei­gungswinkel) ein hö­he­res Halte­ver­mögen er­zielen. Ein klei­nerer Flanken­ab­stand er­höht bei konstanter Ein­schraub­tiefe die Flanken­anzahl. Eine hö­he­re Flanken­anzahl be­deutet eine grö­ße­re An­zahl von Last­ein­lei­tungs­punk­ten. Die Span­nung an den ein­zel­nen Flanken wird da­durch re­duziert und das Holz ver­sa­gt spä­ter. Dies wird durch die Un­ter­suchung zur Aus­wir­kung auf die Riss­ge­o­metrie un­ter­stützt. Es wurde ge­zeigt, dass die Ge­win­de-Test­ob­jek­te mit hö­he­rem Flanken­ab­stand P zu einer grö­ße­ren Riss­breite föhren. Die Er­geb­nisse deuten da­rauf hin, dass das Ver­sa­gen der Holz­ma­trix in Flanken­nähe als grö­ße­re Riss­breite messbar ist. Ein klei­nerer Flanken­ab­stand föhrt somit zu einem hö­he­ren Halte­ver­mögen.

Modellierung auf Basis der Scherfläche: Das Ver­sa­gen des Holzes in Flanken­nähe re­sul­tiert in einer Relativ­ver­schie­bung der Holz­schraube. Da­durch ver­kleinert sich der Flanken­zwei­chen­raum an jeder Ge­win­de­flanke. Die Holz­mantel­fläche und somit der Teil des Holzes für die Kraft­über­tra­gung des Scher­verbunds wird klei­ner. Bei gleicher Ein­schraub­tiefe föhrt eine klei­nere Ge­win­de­stei­gung zu einer grö­ße­ren An­zahl an Flanken. Bei einer Relativ­ver­schie­bung der Schraube ist die Scher­fläche für un­ter­schiedliche Ge­win­de­stei­gungen da­her nicht mehr deckungsgleich. Ab­bil­dung 6.16 (rechts) zeigt die Scher­fläche für zwei un­ter­schiedliche Stei­gungen (P_0 , P_1) als ge­punktete Linien. Bei gleicher Relativ­ver­schie­bung der Schraube ver­kleinert sich die Scher­fläche ent­sprechend der Flanken­anzahl (Ver­gleich der gestrichelten Linien für P_0 und P_1). Da­her kann mit einer klei­neren Flanken­anzahl ein hö­he­rer Aus­ziehweg er­reicht werden bevor die Scher­fläche unter eine kri­ti­sche Grenze fällt und der Scher­verbund ver­sa­gt. Folglich föhrt ein grö­ße­rer Flanken­ab­stand zu einem hö­he­ren Halte­ver­mögen. Diese Vor­her­sa­ge des Modells kann durch den ex­per­imen­te­ll er­mit­telten Ein­fluss der Ge­win­de­stei­gung auf das Halte­ver­mögen aus Ka­pitel 6.1 je­doch nicht ge­zeigt werden. Die im Ex­per­iment un­ter­suchte Ge­win­de­stei­gung wird aus den ge­o­metrisch ab­hän­gigen Pa­ra­metern Flanken­ab­stand und Stei­gungswinkel ge­bil­det. Dieses Modell kann da­her gültig sein, wenn die Wir­kung des Stei­gungswinkels stärker ist als die Wir­kung des Flanken­ab­standes.

Die Vali­dierung dieser vor­ge­stellten Modelle er­folgt in Ka­pitel 7. Dazu werden die Ein­flüsse der Ge­win­de­pa­ra­meter Stei­gungswinkel und Flanken­ab­stand un­ab­hän­gig voneinander ex­per­imen­te­ll un­ter­sucht und die Vor­her­sa­ge der Mo­del­lierungen ge­prüft. Durch die Prü­fung der korrekten Vor­her­sa­ge der Ge­win­de­pa­ra­meter können die Mo­del­lierungen je­weils vali­diert werden.

6.3.2 Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Tragfähigkeit und des Flankenwinkels

Der Einfluss des Flankenwinkels zwischen 35° und 45° auf das Haltevermögen konnte in Kapitel 6.1 nicht gezeigt werden. Nach Tepfers (1973) ist der Winkel der Druckkegel, unter welchem die Kraftabstützung gegenüber dem Holz erfolgt abhängig von der Geometrie der Flanken. Anhand des Druckkegel-Modells lässt sich daher erklären, dass der Flankenwinkel die Tragfähigkeit beeinflusst. Dazu lassen sich zwei konkurrierende Modelle ableiten.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel

Modell 1: Der Druckkegel wird, wie in Abbildung 6.17 dargestellt, in einem Winkel senkrecht zu den Gewindeflanken gebildet. Ein größerer Flankenwinkel führt somit zu einem größeren Volumen des Druckkegels. Bei gleicher Belastung ist die Spannung im Druckkegel bei einem kleineren Flankenwinkel geringer. Dies erhöht die Tragfähigkeit. Bei einem größeren Flankenwinkel kann daher ein höheres Haltevermögen erzielt werden.

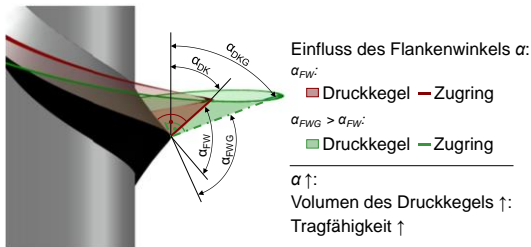


Abbildung 6.17: Modell zum Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel basierend auf dem Druckkegel-Modell. Der Druckkegel wird senkrecht zur Gewindeflanke gebildet. Bei einem größeren Flankenwinkel α (Grün im Vergleich zu Rot) vergrößert sich der Druckkegel und erhöht somit die Tragfähigkeit.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel

Modell 2: Der Druckkegel wird in einem Winkel der Kraftabstützung durch die Verlängerung der Gewindeflanke gebildet. In Abbildung 6.18 ist diese Kraftabstützung dargestellt. Durch eine Verkleinerung des Flankenwinkels α_{FWG} vergrößert sich das

Volumen des Druckkegels (grün). Bei gleicher Belastung ist die Spannung im Druckkegel somit bei einem kleineren Flankenwinkel geringer. Dies erhöht die Tragfähigkeit. Es kann daher bei einem kleineren Flankenwinkel ein höheres Haltevermögen erreicht werden.

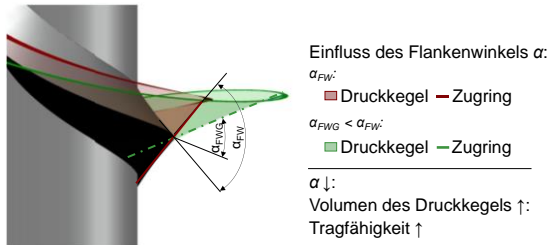


Abbildung 6.18: Modell zum Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel basierend auf dem Druckkegel-Modell. Der Druckkegel wird in Verlängerung zur Gewindeflanke gebildet. In Grün ist die Verkleinerung des Flankenwinkels α_{FWG} , im Vergleich zum Flankenwinkel α_{FW} und die damit einhergehende Vergrößerung des Druckkegels und somit der Tragfähigkeit dargestellt. (Hölz, Ayoubi et al., 2021)

Auf Basis des Druckkegel-Modells können zwei plausible aber konkurrierende Modelle abgeleitet werden. Beide Modelle basieren auf der Prämisse, dass ein größeres Druckkegelvolumen zu einer höheren Tragfähigkeit führt. Das Druckkegelvolumen kann auch durch andere Parameter, wie beispielsweise die Profilhöhe, vergrößert werden.

Die Validierung der vorgestellten Modellierungen erfolgt in Kapitel 7. Dazu werden die Einflüsse des Flankenwinkels und der Profilhöhe auf das Haltevermögen experimentell untersucht. Durch die Prüfung der korrekten Vorhersage der Einflüsse der Gewindep Parameter können die Modellierungen validiert werden. Der Einfluss des Flankenwinkels auf die Tragfähigkeit scheint jedoch klein zu sein und konnte aus diesem Grund in dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Die theoretischen Modelle sagen vorher, dass der Einfluss des Flankenwinkels bei größeren Werten des Flankenwinkels zunimmt. Der Flankenwinkel wird in Kapitel 7 daher außerhalb des untersuchten Wertebereichs von $35^\circ - 45^\circ$ analysiert, um einen Nachweis zu ermöglichen.

6.3.3 Erweitertes Druckkegel-Zugring-Modell

Die vorgestellten Modellierungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhängen bauen auch auf dem Druckkegel-Zugring-Modell von Ayoubi (2014) auf. Einige Aspekte dieses bekannten Modells bilden die Realität bislang jedoch verkürzt ab (Hölz, Ayoubi et al., 2021). Um die Realität besser abzubilden, wird daher das Modell auf Grundlage des Stands der Forschung erweitert. Diese Erweiterung betrifft die folgenden Aspekte: helixförmige Spannungsverteilung, Spannungsverteilung in Abhängigkeit zum Rotationswinkel um die Schraubenachse sowie die Abhängigkeit von der Verankerungslänge.

Helixförmige Spannungsverteilung: Wie in Kapitel 2.3.2.2 vorgestellt, werden die Druckkegel bzw. die Zugringe bislang rotationssymmetrisch als Kegel bzw. Ringe abgebildet. Durch die helixförmige Gewindegeometrie entstehen bei einer konsequenten Abbildung der Druck- und Zugspannungen helixförmige Druckkegel und helixförmige Zugringe. Die Spannungsverteilung muss daher, wie in Abbildung 6.19 gezeigt, helixförmig dargestellt werden.

Spannungsverteilung in Abhängigkeit zum Rotationswinkel: Die Tragfähigkeit ist in den Ebenen RT und TL verschieden. Dementsprechend beschreibt Ayoubi (2014) und auch Hübner (2014) die Schubfestigkeit bzw. Lastausbreitung bei rechtwinkliger Einschraubrichtung zum Rotationswinkel Φ um die Schraubenachse nicht kreisförmig sondern elliptisch bzw. schmetterlingsförmig. Bislang werden die Druckkegel und Zugringe jedoch kreisförmig dargestellt. Ayoubi (2014) beschreibt die Lastausbreitung rechtwinklig zur Einschraubrichtung als elliptisch. Die Spannungsverteilung der Druckkegel muss daher in Abhängigkeit zum Rotationswinkel dargestellt werden. Diese Abhängigkeit wird durch die Halbachsen a und b der Ellipse beschrieben.

Spannungsverteilung in Abhängigkeit zur Einschraubtiefe: Der nichtlineare Einfluss der Einschraubtiefe auf die Tragfähigkeit wurde in Kapitel 2.3.1 erläutert. Bislang sind die Druckkegel und Zugringe jedoch unabhängig von der Einschraubtiefe dargestellt. Um die Abhängigkeit von der Verankerungstiefe x darzustellen, müssen die Halbachsen $a(x)$ und $b(x)$ von dieser abhängig sein.

In Abbildung 6.19 ist die Erweiterung des Druckkegel-Zugring-Modells abgebildet. Durch die Berücksichtigung dieser Aspekte aus dem Stand der Forschung wird die Realität durch das Druckkegel-Zugring-Modells detaillierter abgebildet und die Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindegestalt können detaillierter beschrieben werden.

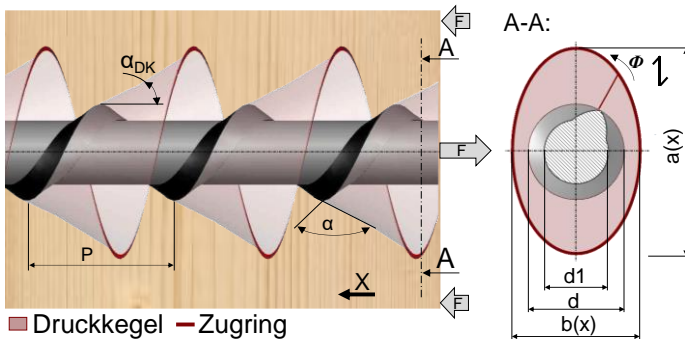


Abbildung 6.19: Erweiterung des Druckkegel-Zugring-Modells. Dargestellt ist der Druckkegel mit einem Winkel α_{DK} und einer ellipsenförmigen Helix ($a \neq b$) in Abhängigkeit von dem Rotationswinkel um die Schraubenchse Φ sowie von der Einschraubtiefe ($a(x)$, $b(x)$) für eine Holzschraube (Parameter: P , α , $d1$, d). (Hölz, Ayoubi et al., 2021)

Die Modellparameter ($a(x)$, $b(x)$, α_{DK}) müssen in zukünftigen Studien experimentell ermittelt werden, um das Modell an spezifische Randbedingungen anzupassen.

6.4 Fazit zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge sowie deren Modellierung

Zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge der Gewindesteigung sowie dem Flankenwinkel wurden Ausziehversuche mit dem entwickelten Experimental-aufbau zum Schrauben-Testing durchgeführt. Die Auswirkung der Gewindesteigung auf das Versagenverhalten wurde quantitativ untersucht. Die damit gewonnenen Erkenntnisse zwischen Gewindeparameter, Versagenverhalten und Haltevermögen wurden in Modellen zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen beschrieben.

Die für die Beantwortung der Teilforschungsfragen entwickelten Methoden sind in Abbildung 6.20 gezeigt.



Abbildung 6.20: Entwickelte Methoden zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen den Gewindepameter, der Rissgeometrie im Versagen und des Haltevermögens.

- Mit dem Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing können die Einflüsse von Gewindepametern auf das Haltevermögen für Holzschrauben statistisch nachgewiesen werden. Charakteristisch für diesen Aufbau ist das abgewinkelte Schraubengewinde der Gewinde-Testobjekte mit geraden Gewindeflanken. Die Funktion Einschrauben wurde geopfert, um die Tragfähigkeit in unterschiedlichen Richtungen zur Holzfaser untersuchbar zu machen. Der Aufbau ermöglicht das definierte Einstellen von Gewindepametern.
- Mit der quantitativen Analyse der Rissgeometrie kann die Wirkung der Gewindepameter auf das Versagenverhalten untersucht werden. Dazu wurde ein Verfahren zur Visualisierung der Rissgeometrie basierend auf dem Vorgehen von Uibel (2012) entwickelt. Mit dem entwickelten Algorithmus erfolgt die Messung der Risslänge und -breite der visualisierten Rissgeometrie per Bilderkennung. Die Übertragbarkeit der Methoden auf Schraubverbindungen in faserverstärkten Kunststoff ist zu prüfen.

Um die Teilforschungsfrage zu beantworten, wurden mit diesen Methoden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen Gewindepameter, Haltevermögen und deren Auswirkung auf das Versagenverhalten quantitativ ermittelt. Für die Untersuchung wurden die Gewindesteigung sowie der Flankenwinkel gewählt. Es wurden 313 Versuche in den Ebenen RT und TL zur Holzfaserrichtung durchgeführt und mit einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse ausgewertet. Der Einfluss der Gewindesteigung auf die Rissgeometrie wurde experimentell untersucht. Dazu wurden 61 Versagensbilder ausgewertet. In diesen beiden Untersuchungen konnten für Fichtenholz in tangentialer Richtung und einem Winkel von 90° zur Holzoberfläche, die in Abbildung 6.21 dargestellten Erkenntnis gewonnen werden.

Fazit zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge sowie deren Modellierung

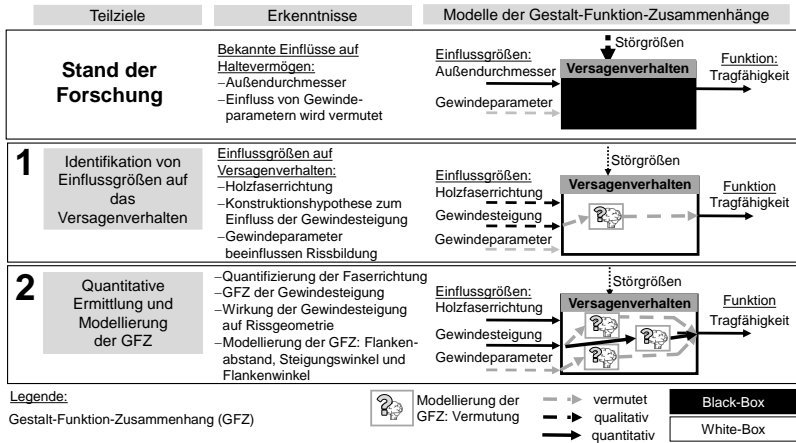


Abbildung 6.21: Erkenntnisse zu den modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zwischen Gewindesteigung, Versagenverhalten und Tragfähigkeit sowie der Ebene zur Holzfaserrichtung.

Zusammenfassend konnten die folgenden quantitativen Zusammenhänge zwischen Gewindeparameter, Versagenverhalten und Haltevermögen gezeigt werden:

- Die Gewindesteigung hat im Bereich von 3,04 mm und 5,9 mm einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Dieser Einfluss kann als linear angesehen werden und zeigt eine mittlere Effektgröße.
- Eine kleinere Gewindesteigung führt zu einem höheren Haltevermögen. Mit dem Experimentalaufbau ergibt sich für den Wertebereich ein ca. 10 % höheres Haltevermögen. Diese Ergebnisse der Gewindesteigung gelten für die korrelierten Steigungswinkel und einen Außendurchmesser d von 8 mm. Die in Teilforschungsfrage 1 auf qualitativen Daten aufgestellte Wenn-Dann-Beziehung der Konstruktionshypothese kann quantitativ belegt werden.
- Die Gewindesteigung wirkt sich auf die Rissgeometrie auf. Es ist für eine größere Gewindesteigung im Bereich zwischen 3,04 mm und 5,9 mm eine lineare Zunahme der Rissbreite ersichtlich. Einen Einfluss der Gewindesteigung auf die Risslänge kann nicht erkannt werden.

Diese Erkenntnisse folgen dem Vorgehen aus Abbildung 4.1, bei welchem auch das Versagenverhalten berücksichtigt wird und das System Holzschraubverbindung nicht nur als Black-Box-System betrachtet wird. Weitere Erkenntnisse sind:

- Die Holzfaserrichtung hat einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Der Effekt ist stark. In der Ebene RT werden höhere Haltevermögen im Vergleich zur Ebene TL erzielt. Interaktionen der Gewindep Parameter und den Ebenen zur Holzfaserrichtungen können nicht gezeigt werden.
- Für den Flankenwinkel konnte im untersuchten Bereich von 35° - 45° kein Einfluss auf das Haltevermögen gezeigt werden. Wirtschaftlich ist diese Erkenntnis für die Wahl der Fertigungstoleranzen relevant. Bei einem Flankenwinkel von $40 \pm 5^\circ$ werden gleichbleibende Haltevermögen erzielt.

Darauf aufbauend wurden die folgenden theoretischen Modellierungen erarbeitet, welche die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge erklären:

- Für die Gewindesteigung wurden Modellierungen für den Flankenabstand und den Steigungswinkel aufgestellt. Der Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Steigungswinkel wurde auf Basis der Verbundmechanismen modelliert. Für den Zusammenhang zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstand wurde mit dem Druckkegel-Zugring-Modell Modellierungen auf Basis der Spannungsverteilung sowie der Scherfläche erarbeitet. Zur Validierung der Modelle sollten die vorhergesagten Einflüsse des Flankenabstands und des Steigungswinkels unabhängig voneinander untersucht werden.
- Im untersuchten Wertebereich konnte kein Einfluss des Flankenwinkels gezeigt werden. Basierend auf dem Druckkegel-Modell wurden jedoch zwei Modellierungen erarbeitet, welche einen Einfluss vorhersagen. Zur Validierung dieser Modellierungen sollte der vorhergesagte Einfluss des Flankenwinkels in einem größeren Wertebereich untersucht werden.
- Für das Druckkegel-Zugring-Modell wurde eine Modellerweiterung entwickelt. Dazu wurden die Druckkegel als ellipsenförmige Helix dargestellt, welche an die Verankerungslänge angepasst werden kann.

Mit den vorgestellten Ergebnissen konnte somit die zweite Teilforschungsfrage

Wie können die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindep Parametern modelliert werden?

beantwortet werden.

7 Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

In Kapitel 6 wurde ein Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing entwickelt. Mit diesem war es möglich den bisher unbekanntem Zusammenhang zwischen Haltevermögen und Gewindesteigung zu ermitteln. Darauf aufbauend wurden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge modelliert, um den Einfluss von Gewindeparametern zu erklären. Die Validierung dieser Modellierungen erfolgt in diesem Kapitel. Für die Validierung werden die vorhergesagten Einflüsse der Gewindeparameter dieser theoretischen Modellierungen auf das Haltevermögen experimentell geprüft.

Daher befasst sich dieses Kapitel mit der dritten Teilforschungsfrage:

Welche Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern können mit den in Teilforschungsfrage 2 entwickelten Modellen erklärt werden?

Ziel des Kapitels ist die Validierung der erarbeiteten Modelle zu Gestalt-Funktion-Zusammenhängen im Gewindekontakt. Zur Validierung der Modelle werden die aus dem Modell vorhergesagten Einflüsse der Gewindeparameter Steigungswinkel, Flankenabstand, Flankenwinkel und Profilhöhe auf das Haltevermögen geprüft. Dazu wird der entwickelte Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing genutzt.

Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird der Versuchsaufbau für die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Gewindeparameter auf das Haltevermögen vorgestellt. Danach werden die Untersuchungsergebnisse vorgestellt. Im dritten Schritt werden diese Ergebnisse diskutiert und die modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge validiert.

Der Versuchsaufbau, das Studiendesign, die Ergebnisse und die Diskussion dieses Kapitel basieren zu Teilen auf der Veröffentlichung:

- „Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity of Wood Screws to Optimize the Thread Geometry“ (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Abbildungen und Teile des folgenden Textes sind ohne Veränderung in übersetzter Form aus den Veröffentlichungen übernommen. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gesondert gekennzeichnet.

7.1 Experimentalaufbau und Studiendesign

Die Prüfung der vorhergesagten Einflüsse der Gewindeparameter auf das Haltevermögen erfolgt in einer experimentellen Untersuchung. Für die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse wird der entwickelte Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing aus Kapitel 6.1 verwendet. Geändert wurden, entsprechend dem Untersuchungsziel, die zu untersuchenden Gewinde-Testobjekte sowie die verwendete Ausziehmaschine. Im Folgenden werden daher der Versuchsaufbau und das Studiendesign kurz beschrieben und die Änderungen vorgestellt.

Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing

Der verwendete Experimentalaufbau besteht aus zwei gegeneinander verspannten Prüfkörperhälften, in welche die Gewinde-Testobjekte eingelegt werden. Die Prüfkörperhälften weisen mit 100 mm x 100 mm und einer Tiefe von 50 mm mit Kapitel 6.1.1 übereinstimmende Abmessungen auf. Auch die eingefräste Nut wurde mit 11 mm Breite, 53 mm Länge und einer Tiefe von 2,5 mm gleich gewählt. Die Nut ist mittig in der Prüfkörperhälfte und senkrecht zur Oberfläche (Einschraubwinkel 90°) angeordnet.

Die Verspannung der Prüfkörperhälften erfolgt mit der in Kapitel 6.1.1.2 vorgestellten Einspannung. Die Prüfkörperhälften werden mittels zweier Stahlbleche über vier Sechskantschrauben mit jeweils einer Schraubenfeder vorgespannt. Die Stahlbleche aus S235JR haben eine Dicke von 5 mm. Die M10x170 Sechskantschrauben haben eine Festigkeitsklasse von 8.8. Die Schraubendruckfedern (Sodemann Industrifjedere A/S, Produkt: R205-408, 94,2 N/mm, Hinnerup, Dänemark) werden weggesteuert vorgespannt, um eine Vorspannkraft von 3,2 kN zu erzeugen. Um eine spaltfreie Berührung der Prüfkörperhälften zu gewährleisten, wurde die Vorspannung in Einzelfällen erhöht und danach auf den Soll-Weg entlastet um die Nennkraft zu erreichen.

Die Ausziehversuche wurden angelehnt an EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) durchgeführt. Gegenüber Kapitel 6.1.3 wurde eine andere Ausziehmaschine gewählt. Für diese Versuche wurde die in Abbildung 7.1 dargestellte Universalprüfmaschine (TesT GmbH, Produkt: Modell 112, Maximalkraft 50 kN, Erkrath, Deutschland) genutzt. Sowohl Kraft als auch Weg wurden kontinuierlich aufgezeichnet. Die Ausziehversuche wurden entsprechend EN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt. Die Probekörper wurden gegenüber der Ausziehmaschine abgestützt. Um die Mindestabstände zum Befestigungsmittel einzuhalten betrug der Abstand der Abstützung 90 mm zur Breite und 70 mm zur Tiefe der Gewinde-Testobjekte.

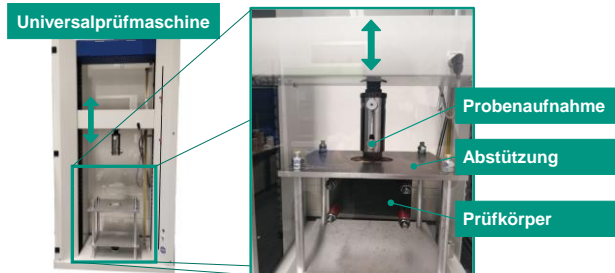


Abbildung 7.1: Verwendetes Gerät zur Durchführung der Ausziehversuche.

Werkstoff Holz

Für die Untersuchung wurde entsprechend den vorherigen Untersuchungen die Holzart Fichte (lat. *Picea abies*) verwendet. Die Festigkeitsklasse des verwendeten Konstruktionsvollholzes beträgt nach EN 338:2016-07 (DIN EN 338) C24. Die Holzfeuchte wurde auf 15 % geprüft. Das Holz wurde vorsortiert und es wurde nur optisch fehlerfreies Holz ohne Astlöcher oder Risse verwendet.

Die Gewinde-Testobjekte wurden in tangentialer Richtung zum Holz mit einem Einschraubwinkel von 90° untersucht. Der Einfluss der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit wurde sowohl in der Ebene RT als auch in der Ebene TL zur Holzfaserrichtung betrachtet. Beide Ebenen wurden, wie Abbildung 7.2 gezeigt, zur Ermittlung der Einflüsse der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit berücksichtigt.

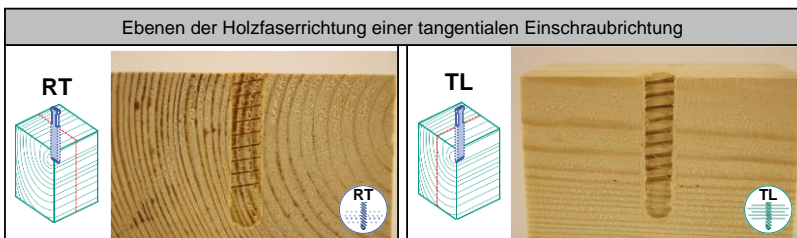


Abbildung 7.2: Untersuchte Ebenen RT und TL zur Holzfaserrichtung bei tangentialer Einschraubrichtung. Übersetzt aus (Hölz, Kleinhans & Matthesen, 2021)

Gewinde-Testobjekte

Für die Untersuchung wurden Gewinde-Testobjekte entsprechend der Charakteristik aus Kapitel 6.1.1.1 verwendet. Wie in Abbildung 7.3 gezeigt, weist der Gewindeabschnitt der Gewinde-Testobjekte vergleichbare Abmessungen zur vorherigen Untersuchung auf. Um Seitenkräfte zu vermeiden, wurden die Gewindeflanken auf der Vorder- und Rückseite gegenläufig angeordnet. Es wurden nur vollständige Flanken über die Breite des Gewinde-Testobjekts abgebildet.

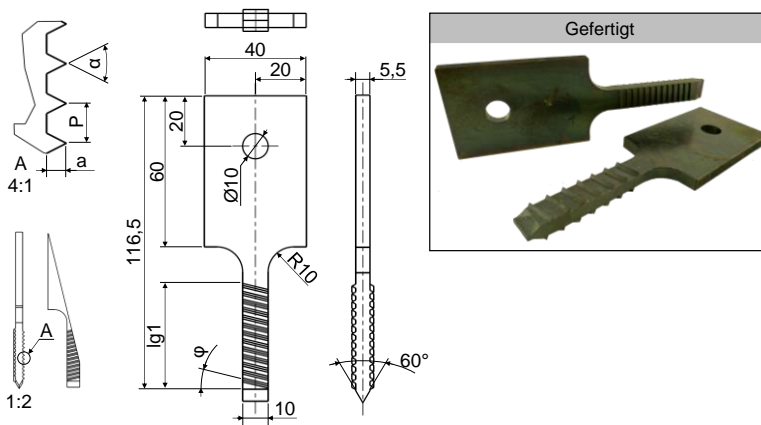


Abbildung 7.3: Gewinde-Testobjekte des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing zur Untersuchung der Gewindeparameter: Flankenabstand P , Profilhöhe a , Flankenwinkel α und Steigungswinkel φ . Abhängig von diesen Parametern ist die Gewindelänge $lg1$. Darstellung auf Grundlage von (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Die Verbindung des Gewinde-Testobjekts zur Ausziehmaschine wurde geändert. Die Fläche am oberen Abschnitt des Gewinde-Testobjekts ermöglicht eine reibschlüssige, die Bohrung eine formschlüssige Verbindung zur Prüfmaschine. Die formschlüssige Verbindung zeigte in der Untersuchung eine geringere Ausfallrate. Gefertigt wurden die Gewinde-Testobjekte entsprechend den vorhergehenden Modellen aus 90MnCrV8 (Nr. 1.2842). Diese wurden bei 840 °C gehärtet und bei 420 °C für 50 min mit anschließender Ofenauskuhlung angelassen. In Abbildung 7.3 sind zwei der gefertigten Gewinde-Testobjekte exemplarisch dargestellt.

Die zu variierenden Gewindep Parameter der Gewinde-Testobjekte sind der Flankenabstand P , die Profilhöhe a , der Flankenwinkel α sowie der Steigungswinkel φ , welche auf zwei Faktorstufen unabhängig und vollfaktoriell variiert wurden. Daraus ergeben sich insgesamt 16 unterschiedliche Gewinde-Testobjekte. Im Unterschied dazu wurde in der vorherigen Untersuchung die Profilhöhe a mit 1,48 mm konstant gewählt. Der Steigungswinkel φ wurde in der vorherigen Studie von der Gewindesteigung abhängig variiert.

In Tabelle 9 sind die gewählten Faktorstufen der jeweiligen Gewinde-Testobjekte dargestellt. Von diesen Faktoren abhängig ist der Parameter Gewindelänge $lg1$, welcher ebenfalls dargestellt ist. Die gezeigten 16 Gewinde-Testobjekte wurden für diese Untersuchung gefertigt.

Tabelle 9: Faktorstufen der Faktoren Flankenabstand P , Steigungswinkel φ , Flankenwinkel α und Profilhöhe a sowie die davon abhängige Gewindelänge $lg1$ für die Gewinde-Testobjekte GP_A bis GP_P. Übersetzt aus (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Gewinde-Testobjekt	Faktorstufen				Abhängiger Parameter
	P in mm	φ in °	α in °	a in mm	$lg1$ in mm
GP_A	3,04	6,8	30	1	38,471
GP_B	3,04	6,8	30	1,48	38,730
GP_C	3,04	6,8	55	1	38,979
GP_D	3,04	6,8	55	1,48	39,483
GP_E	3,04	13,6	30	1	40,503
GP_F	3,04	13,6	30	1,48	40,768
GP_G	3,04	13,6	55	1	41,023
GP_H	3,04	13,6	55	1,48	41,537
GP_I	6,08	6,8	30	1	38,471
GP_J	6,08	6,8	30	1,48	38,730
GP_K	6,08	6,8	55	1	38,979
GP_L	6,08	6,8	55	1,48	39,483
GP_M	6,08	13,6	30	1	40,503
GP_N	6,08	13,6	30	1,48	40,768
GP_O	6,08	13,6	55	1	41,023
GP_P	6,08	13,6	55	1,48	41,537

Studiendesign

Die abhängige Variable der Untersuchung ist das Haltevermögen. Die unabhängigen Faktoren des Gewindes sind entsprechend Tabelle 9 der Flankenabstand P , der Flankenwinkel α , der Steigungswinkel φ sowie die Profilhöhe a . Diese Faktoren werden auf zwei Faktorstufen untersucht. In der Untersuchung in Kapitel 6.1 wurde der Einfluss der Gewindesteigung auf sechs Faktorstufen untersucht, da nicht-lineare Zusammenhänge vermutet wurden. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass der Einfluss der Gewindesteigung zwischen 3,04 mm und 5,9 mm als linear angenommen werden kann. Daher wird auch der Einfluss der voneinander unabhängigen Parameter Flankenabstand und Steigungswinkel als linear angenommen und in dieser Studie auf zwei Faktorstufen untersucht.

Die Ebene der Holzfaserrichtung wird nicht als unabhängige Variable untersucht. In Kapitel 6.1 wurde gezeigt, dass dieser Faktor einen starken Effekt aufweist. Um die Einflüsse der Gewindeparameter mit eventuell geringerer Effektgröße nicht zu verzerrern, werden für die beiden Ebenen der Holzfaserrichtung zwei unabhängige Untersuchungen durchgeführt. Die Einflüsse der Gewindeparameter auf das Haltevermögen werden daher für die beiden Ebenen RT und TL in getrennten, aber vergleichbar aufgebauten Untersuchungen ermittelt.

Weiterhin konnte in der vorherigen Untersuchung der Einfluss des Holzbalkens gezeigt werden. Diese Störgröße wurde in der Untersuchung durch die Anwendung der Blockbildung berücksichtigt. Die Blockbildung wird daher auch in dieser Untersuchung angewandt. Es wurde eine Blocklänge von zwölf Versuchen angestrebt. Aufgrund der natürlichen Struktur der Holzbalken und entsprechender Holzfehler konnte diese Blocklänge nicht immer eingehalten werden. Es wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan mit randomisierter Reihenfolge verwendet.

7.2 Ergebnisse

Die Versuche wurden mit dem Programm SPSS Statistics⁶ statistisch analysiert. Um den Einfluss der Gewindeparameter auf das Haltevermögen zu ermitteln, wurde für jede Ebene der Holzfaserrichtung jeweils eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt.

⁶ Hersteller: IBM, Version 26.0.0.0

Es wurden 242 Versuche für die Holzfaserebene RT und 286 Versuche für die Ebene TL ausgewertet. Insgesamt wurden für diese Untersuchungen somit 528 Versuche ausgewertet. Für jedes Gewinde-Testobjekt wurden mindestens 15 Wiederholungen je Ebene erzielt. Versuche, bei denen in der Versuchsvorbereitung oder in der Versuchsdurchführung offensichtliche Fehler auftraten, wurden aussortiert. Dies war beispielsweise in Probekörpern der Fall, wenn innerhalb der Probekörperhälften Astlöcher sichtbar wurden oder wenn die reibschlüssige Einspannung der Probe in der Prüfmaschine nicht fehlerfrei war und der Ausziehversuch somit nicht ordnungsgemäß durchgeführt wurde. Die Tabelle 10 zeigt die Anzahl auswertbarer Versuche aufgelistet nach Gewinde-Testobjekt und Ebene zur Holzfaserrichtung.

Tabelle 10: Anzahl auswertbarer Versuche N aufgelistet nach Gewinde-Testobjekt und Ebene zur Holzfaser. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Gewinde-Testobjekt	Holzfaserebene		Gesamt N
	RT	TL	
GP_A	15	19	34
GP_B	16	19	35
GP_C	15	17	32
GP_D	15	18	33
GP_E	15	17	32
GP_F	15	15	30
GP_G	16	18	34
GP_H	15	19	34
GP_I	15	17	32
GP_J	15	16	31
GP_K	15	18	33
GP_L	15	20	35
GP_M	15	19	34
GP_N	15	17	32
GP_O	15	18	33
GP_P	15	19	34
Gesamt N	242	286	528

Für die Anwendung einer ANOVA, muss die Anforderung erfüllt sein, dass die abhängigen Variablen normalverteilt sind. Zur Prüfung dieser Normalverteilung ($\alpha = 0,05$) werden die Faktorgruppen, welche den Gewinde-Testobjekten entsprechen, mittels Kolmogorov-Smirnov- sowie Shapiro-Wilk-Test untersucht. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind in Tabelle 11 gezeigt. Diese beiden Tests werden zuerst

für die Ebene RT zur Holzfaser angewandt. Die Signifikanzwerte des Kolmogorov-Smirnov-Tests sind für alle Gewinde-Testobjekte, mit Ausnahme von GP_D und GP_I, größer als $p > 0,05$. Mit dem Shapiro-Wilk-Test kann für alle Faktorgruppen die Signifikanz größer als $p > 0,05$ gezeigt werden. Die Gewinde-Testobjekte GP_D und GP_I sind im Kolmogorov-Smirnov-Test unterhalb der Signifikanzgrenze, zeigen jedoch im Shapiro-Wilk-Test die Normalverteilung. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass alle Faktorgruppen der Ebene RT normalverteilt sind. Im Kolmogorov-Smirnov-Test zeigen für die Ebene TL zur Holzfaserrichtung alle Gewinde-Testobjekte eine Signifikanz größer als $p > 0,05$. Auch im Shapiro-Wilk-Test sind die Signifikanzwerte für alle Gewinde-Testobjekte, mit Ausnahme von GP_E und GP_I, größer als $p > 0,05$. Die beiden Gewinde-Testobjekte GP_E und GP_I liegen im Shapiro-Wilk-Test unterhalb der Signifikanzgrenze, zeigen jedoch im Kolmogorov-Smirnov-Test eine Normalverteilung. Daher kann auch für die Ebene TL für alle Faktorgruppen eine Normalverteilung angenommen werden.

Tabelle 11: Prüfung der Gewinde-Testobjekte auf Normalverteilung ($\alpha = 0,05$). Angegeben sind für die Holzfaserrichtungen RT und TL jeweils die Signifikanzwerte p für den Kolmogorov-Smirnov- sowie den Shapiro-Wilk-Test. (Hölz, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Gewinde-Testobjekt	Holzfaserrichtung RT		Holzfaserrichtung TL	
	Kolmogorov-Smirnov: p	Shapiro-Wilk: p	Kolmogorov-Smirnov: p	Shapiro-Wilk: p
GP_A	0,200	0,204	0,200	0,651
GP_B	0,190	0,138	0,200	0,384
GP_C	0,200	0,105	0,200	0,965
GP_D	0,024	0,111	0,121	0,180
GP_E	0,200	0,324	0,117	0,023
GP_F	0,200	0,863	0,200	0,898
GP_G	0,200	0,414	0,200	0,866
GP_H	0,200	0,884	0,200	0,591
GP_I	0,026	0,111	0,078	0,018
GP_J	0,200	0,709	0,200	0,383
GP_K	0,200	0,759	0,075	0,388
GP_L	0,200	0,396	0,200	0,239
GP_M	0,200	0,175	0,129	0,067
GP_N	0,200	0,827	0,196	0,410
GP_O	0,200	0,678	0,200	0,355
GP_P	0,200	0,937	0,200	0,231

Die Homogenität der Varianzen ist eine weitere Voraussetzung für das Anwenden einer ANOVA. Dies kann mit einem Levene-Test ($\alpha = 0,05$) geprüft werden. Der Levene-Test ist sowohl für die Ebene RT ($F(215,26) = 1,231$; $p = 0,271$), als auch für die Ebene TL ($F(201,84) = 1,167$; $p = 0,211$) nicht signifikant, womit Varianzhomogenität angenommen werden kann. Die Bedingungen für das Anwenden einer ANOVA sind somit für beide Untersuchungen entsprechend den Ebenen RT und TL zur Holzfaserrichtung erfüllt. Für beide Ebenen zur Faserrichtung wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt. Für diese wurde ein einheitliches statistisches Modell gewählt. Dieses einheitliche Modell berücksichtigt die gleichen Faktoren und Interaktionen. Das Modell wurde basierend auf den signifikanten Faktoren und Interaktionen der jeweiligen Einzel-Modelle erarbeitet. Ein einheitliches Modell ist für die Nutzung in der Synthese vorteilhaft. In der Synthese eines Holzschraubengewindes kann bei der Definition der Gewindeparameter nicht zwischen beiden Ebenen zur Holzfaserrichtung unterschieden werden, sondern diese müssen für beide Ebenen gemeinsam definiert werden. Im Folgenden werden daher die Auswertungen der beiden mehrfaktoriellen Varianzanalysen mit einheitlichem Modell vorgestellt. Das Ergebnis der mehrfaktoriellen Varianzanalyse für die Ebene RT ist in Tabelle 12 gezeigt.

Tabelle 12: Ergebnis der ANOVA für die Ebene zur Holzfaser RT. Alle Haupteffekte sowie alle Interaktionen des Modells sind signifikant. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Abhängige Variable: Haltevermögen

	F	p-Wert	Partielles Eta ²
korrigiertes Modell	16,782	< 0,001	0,712
Flankenabstand	48,151	< 0,001	0,187
Flankenwinkel	10,436	0,001	0,047
Profilhöhe	120,697	< 0,001	0,365
Steigungswinkel	11,777	0,001	0,053
Holzbalken	12,223	< 0,001	0,561
Flankenabstand*Steigungswinkel	4,259	0,040	0,020
Flankenabstand*Profilhöhe	46,524	< 0,001	0,181
Flankenabstand*Flankenwinkel	3,956	0,048	0,018
Flankenwinkel*Profilhöhe	8,468	0,004	0,039
Flankenwinkel*Steigungswinkel	5,139	0,024	0,024

$R^2 = 0,712$ (korrigiertes $R^2 = 0,670$)

Das Gesamtmodell ist signifikant ($F(31.210) = 16,78$; $p < 0,001$; korrigiertes $R^2 = 0,670$; $N = 242$). Es kann für alle Haupteffekte sowie alle Interaktionen ein signifikanter Einfluss auf das Haltevermögen gezeigt werden. Der Faktor Flankenabstand ($F(1.210) = 48,151$; $p < 0,001$), der Flankenwinkel ($F(1.210) = 10,436$; $p = 0,001$), die Profilhöhe ($F(1.210) = 120,697$; $p < 0,001$), der Steigungswinkel ($F(1.210) = 11,777$; $p = 0,001$) sowie der Holzbalken ($F(22.210) = 12,223$; $p < 0,001$) haben einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Weiterhin können die signifikanten Interaktionen zwischen Flankenabstand und Steigungswinkel ($F(1.210) = 4,259$; $p = 0,04$), Flankenabstand und Profilhöhe ($F(1.210) = 46,524$; $p < 0,001$), Flankenabstand und Flankenwinkel ($F(1.210) = 3,956$; $p = 0,048$), Flankenwinkel und Profilhöhe ($F(1.210) = 8,468$; $p = 0,004$) sowie Flankenwinkel und Steigungswinkel ($F(1.210) = 5,139$; $p = 0,024$) nachgewiesen werden.

Das Ergebnis für die Ebene TL ist in Tabelle 13 dargestellt. Das Gesamtmodell ist signifikant ($F(25.260) = 20,95$; $p < 0,001$; korrigiertes $R^2 = 0,636$; $N = 286$).

Tabelle 13: Ergebnis der ANOVA für die Ebene zur Holzfaser TL. Signifikanten Einfluss haben die Effekte Flankenabstand, Flankenwinkel, Profilhöhe sowie Holzbalken. Signifikanz kann auch für die Interaktion Flankenabstand und Flankenwinkel gezeigt werden. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthies, 2022)

Abhängige Variable: Haltevermögen

	F	p-Wert	Partielles Eta ²
korrigiertes Modell	20,946	< 0,001	0,668
Flankenabstand	96,206	< 0,001	0,270
Flankenwinkel	9,776	0,002	0,036
Profilhöhe	183,446	< 0,001	0,414
Steigungswinkel	3,354	0,068	-
Holzbalken	14,512	< 0,001	0,472
Flankenabstand*Steigungswinkel	0,888	0,347	-
Flankenabstand*Profilhöhe	1,896	0,170	-
Flankenabstand*Flankenwinkel	4,718	0,031	0,018
Profilhöhe*Flankenwinkel	1,819	0,179	-
Steigungswinkel*Flankenwinkel	1,898	0,169	-

$R^2 = 0,668$ (korrigiertes $R^2 = 0,636$)

Der Faktor Flankenabstand ($F(1.260) = 96,206$; $p < 0,001$), der Flankenwinkel ($F(1.260) = 9,776$; $p = 0,002$), die Profilhöhe ($F(1.260) = 183,446$; $p < 0,001$) sowie der Holzbalken ($F(16.260) = 14,512$; $p < 0,001$) haben einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Weiterhin kann eine signifikante Interaktion zwischen Flankenabstand und Flankenwinkel ($F(1.260) = 4,718$; $p = 0,031$) nachgewiesen werden. Für den Steigungswinkel, die Interaktionen Flankenabstand und Steigungswinkel, Flankenabstand und Profilhöhe, Flankenwinkel und Profilhöhe sowie Flankenwinkel und Steigungswinkel können keine signifikanten Effekte gezeigt werden.

Die Bestimmung der Effektgröße erfolgt nach Cohen (1988, 1992) in schwache, mittlere und starke Effekte. Für die Berechnung werden die partiellen η^2 aus Tabelle 12 und Tabelle 13 verwendet. Die Effektgrößen für die signifikanten Haupteffekte und die signifikanten Interaktionen der beiden mehrfaktoriellen Varianzanalysen in der Ebene RT und TL sind in Tabelle 14 aufgeführt. Mittlere Effektgrößen wurden nicht ermittelt.

Tabelle 14: Effektgrößen für die signifikanten Effekte und Interaktionen der beiden mehrfaktoriellen Varianzanalysen der Ebene RT und TL. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthesen, 2022)

Effektgröße	RT		TL	
	Stark	Schwach	Stark	Schwach
Flankenabstand	0,479		0,608	
Flankenwinkel		0,222		0,193
Profilhöhe	0,758		0,839	
Steigungswinkel		0,237		-
Holzbalken	1,132		0,945	
Flankenabstand*Steigungswinkel		0,142		-
Flankenabstand*Profilhöhe	0,470			-
Flankenabstand*Flankenwinkel		0,137		0,134
Profilhöhe*Flankenwinkel		0,201		-
Steigungswinkel*Flankenwinkel		0,156		-

Die Effektgrößen sind in der Ebene RT für den Flankenabstand ($f = 0,479$), die Profilhöhe ($f = 0,758$), den Holzbalken ($f = 1,132$) sowie die Interaktion Flankenabstand und Profilhöhe ($f = 0,470$) als stark zu bewerten. Die Effekte Flankenwinkel ($f = 0,222$) und Steigungswinkel ($f = 0,237$) sind als schwache Effekte zu beurteilen.

Weiterhin weisen die Interaktionen Flankenabstand und Steigungswinkel ($f = 0,142$), Flankenabstand und Flankenwinkel ($f = 0,137$), Profilhöhe und Flankenwinkel ($f = 0,201$) und Steigungswinkel und Flankenwinkel ($f = 0,156$) eine schwache Effektgröße auf. Für die Ebene TL sind die stark zu bewertenden Haupteffekte der Flankenabstand ($f = 0,608$), die Profilhöhe ($f = 0,839$) und der Holzbalken ($f = 0,945$). Der Flankenwinkel hat eine schwache Effektgröße ($f = 0,193$). Die Interaktion Flankenabstand und Flankenwinkel ($f = 0,134$) ist ebenfalls als schwach zu bewerten.

Holzfaserrichtung

In Tabelle 15 ist das Haltevermögen für die beiden Ebenen RT sowie TL zur Holzfaserrichtung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der Ebene TL im Vergleich zur Ebene RT geringere Haltevermögen erzielt werden.

Tabelle 15: Haltevermögen für die Ebenen zur Faserrichtungen RT und TL. Angegeben ist die Versuchsanzahl (N), Minima (Min), Maxima (Max), Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD). In Faserrichtung TL ist ein deutlich geringeres Haltevermögen zu verzeichnen. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Abhängige Variable: Haltevermögen

Holzfaserrichtung	N	Min in kN	Max in kN	M in kN	SD in kN
RT	242	4,107	10,140	7,480	1,174
TL	286	2,929	7,905	5,440	0,981

Gewindeparameter: Flankenabstand, Flankenwinkel, Profilhöhe und Steigungswinkel

Die ermittelten Effekte der untersuchten Gewindeparameter sowie der Interaktionen werden anhand der folgenden Profildiagramme betrachtet. Dies erfolgt auf Grundlage der geschätzten Randmittel des Haltevermögens. Die Fehlerbalken entsprechen dem 95 % Konfidenzintervall. Die Datenbasis der Effekte und Interaktionen können dem Anhang in Kapitel *Forschungsdaten Teilforschungsfrage 3* entnommen werden. Dort sind das geschätzte Randmittel, der Standardfehler sowie die Grenzen des 95 % Konfidenzintervalls jeweils für die Ebene RT und TL zur Holzfaserrichtung angegeben.

In Abbildung 7.4 a sind die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen der Profilhöhe und des geschätzten Randmittels des Haltevermögens für beide Ebenen zur Holzfaserrichtung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die größere Profilhöhe von 1,48 mm ein höheres Haltevermögen aufweist. Dieser Einfluss ist in beiden Ebenen zur Holzfaserrichtung zu erkennen. In der Ebene RT führt die größere Profilhöhe zu einer Steigerung von 14 % und in der Ebene TL zu einer Steigerung von 19 % des geschätzten Randmittels. In Abbildung 7.4 b ist der Einfluss des Flankenabstands für beide Ebenen RT und TL dargestellt. Der kleinere Flankenabstand zeigt in beiden Ebenen ein höheres geschätztes Randmittel des Haltevermögens. In der Ebene RT führt der geringere Flankenabstand zu einer 9 %igen und in der Ebene TL zu einer 14 %igen Steigerung des geschätzten Randmittels.

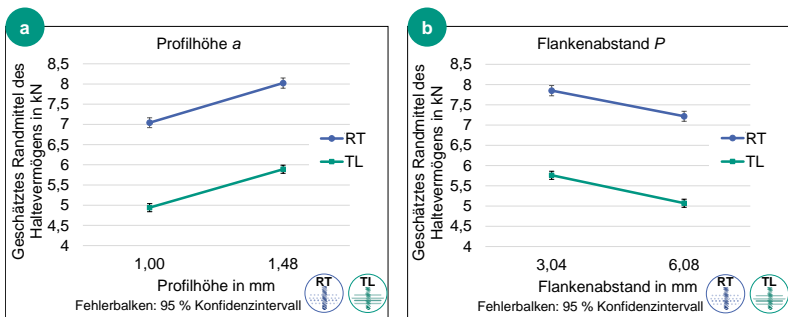


Abbildung 7.4: Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und der Profilhöhe (a) sowie des Flankenabstands (b) für die Ebenen RT und TL. Basiert auf einer Anzahl von insgesamt $N = 528$ Versuchen. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Die Diagramme in Abbildung 7.5 zeigen die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und dem Flankenwinkel (a) sowie dem Steigungswinkel (b). Der spitzere Flankenwinkel zeigt in beiden Ebenen ein höheres Haltevermögen. Der Flankenwinkel von 30° führt im Vergleich zum Winkel von 55° in beiden Ebenen zu einer 4 %igen Steigerung des geschätzten Randmittels. Der Einfluss des Steigungswinkels ist in der Ebene TL kaum erkennbar und konnte in der Varianzanalyse nicht nachgewiesen werden. In der Ebene RT zeigt der Steigungswinkel von $13,6^\circ$ das höhere Haltevermögen. Das geschätzte Randmittel steigt bei dem Steigungswinkel von $6,8^\circ$ um 4 %.

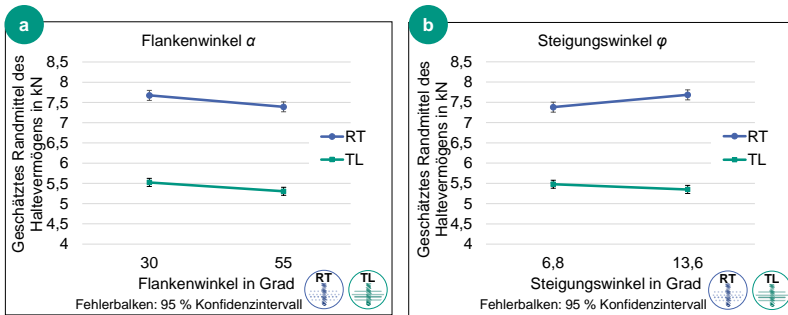


Abbildung 7.5: Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und des Flankenwinkels (a) sowie des Steigungswinkels (b) für die Ebenen RT und TL. Basiert auf einer Anzahl von insgesamt N = 528 Versuchen. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

In Abbildung 7.6 a ist die Interaktion des Flankenabstands und der Profilhöhe auf das geschätzte Randmittel dargestellt. Es ist die Wechselwirkung der beiden Parameter in der Ebene RT deutlich zu erkennen. Bei einer Profilhöhe von 1,48 mm hat der Flankenabstand keinen Einfluss auf das Haltevermögen. Bei der Profilhöhe von 1,0 mm ist ein positiver Einfluss des kleineren Flankenabstands auf die Tragfähigkeit deutlich zu erkennen.

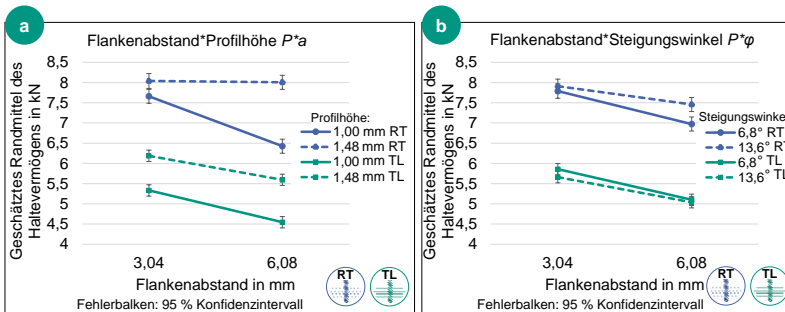


Abbildung 7.6: Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und der Interaktion des Flankenabstands und der Profilhöhe (a) sowie des Flankenabstands und des Steigungswinkels (b) für die Ebenen RT und TL. Basiert auf einer Anzahl von insgesamt N = 528 Versuchen. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

In der Ebene TL zeigt sich der Einfluss des Flankenabstands von der Profilhöhe unabhängig. Auch statistisch konnte diese Interaktion nicht gezeigt werden. In Abbildung 7.6 b ist die Interaktion des Flankenabstands und des Steigungswinkels auf das Haltevermögen dargestellt. In der Ebene RT zeigt der kleinere Steigungswinkel einen größeren Einfluss auf das Haltevermögen. In der Ebene TL ist kaum eine Interaktion der Parameter zu erkennen und diese konnte auch in der Varianzanalyse nicht gezeigt werden.

In Abbildung 7.7 a ist die Interaktion des Flankenabstands und des Flankenwinkels auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens dargestellt. Der Flankenabstand von 3,04 mm sorgt für ein höheres Haltevermögen. Der Flankenwinkel von 30° verstärkt diesen Trend. Bei dem größeren Flankenabstand ist die positive Verstärkung des Flankenwinkels nicht stark ausgeprägt. Dieser Effekt ist in beiden Ebenen RT und TL ersichtlich. Beide Interaktionen konnten statistisch nachgewiesen werden. In Abbildung 7.7 b ist die Interaktion der Profilhöhe und des Flankenwinkels auf das Haltevermögen zu sehen. Es ist ersichtlich, dass bei der Profilhöhe von 1,48 mm der Flankenwinkel kaum einen Einfluss auf das Haltevermögen aufweist. Bei der geringeren Profilhöhe sorgt der kleinere Flankenwinkel für ein höheres Haltevermögen. In der Ebene TL konnte dieser Einfluss nicht nachgewiesen werden.

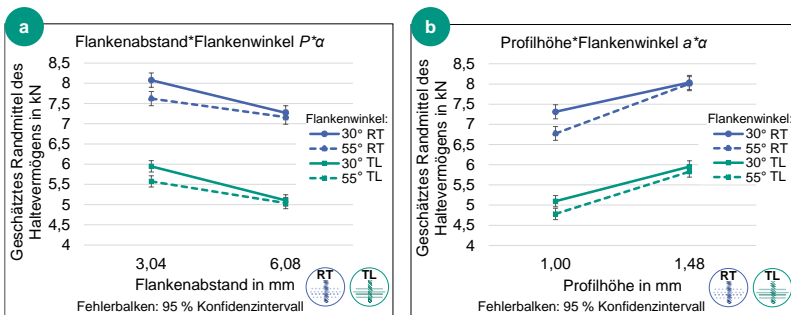


Abbildung 7.7: Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen dem geschätzten Randmittel des Haltevermögens und der Interaktion des Flankenabstands und des Flankenwinkels (a) sowie der Profilhöhe und des Flankenwinkels (b) für die Ebenen RT und TL. Basiert auf einer Anzahl von insgesamt $N = 528$ Versuchen. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

Im Diagramm in Abbildung 7.8 ist die Interaktion des Steigungswinkels mit dem Flankenwinkel auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens dargestellt. In beiden Ebenen zeigt der kleinere Flankenwinkel bei einem höheren Steigungswinkel ein höheres Haltevermögen. In der TL-Ebene konnte die Interaktion statistisch nicht gezeigt werden.

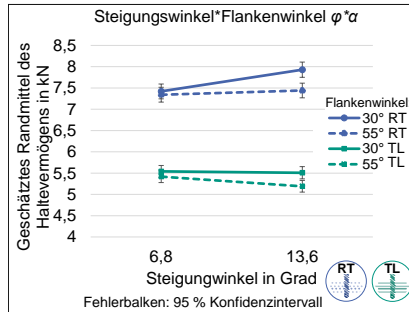


Abbildung 7.8: Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen geschätzten Randmitteln des Haltevermögens und der Interaktion des Steigungswinkels und des Flankenwinkels für die Ebenen RT und TL. Basiert auf einer Anzahl von insgesamt N = 528 Versuchen. (Hölz, Dörner, Hohlweg & Matthiesen, 2022)

7.3 Diskussion

Nachfolgend werden die erzielten Ergebnisse diskutiert und der Bezug zu den Ergebnissen aus Teilforschungsfrage 2 gezogen. Zuerst wird auf den Experimental-aufbau zum Schrauben-Testing und das Studiendesign, anschließend auf die ermittelten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge der Gewindeparameter eingegangen.

Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing und Studiendesign

Es wurde der Einfluss der Ebene zur Holzfaserrichtung auf das Haltevermögen quantifiziert. Dieser Einfluss wurde bereits in Kapitel 6.1 in der Untersuchung zum Einfluss der Gewindesteigung und des Flankenwinkels quantifiziert. In beiden Untersuchungen wurde übereinstimmend ein höheres Haltevermögen in der Ebene RT ermittelt. Auch die Mittelwerte der Haltevermögen und die Standardabweichungen sind für beide Untersuchungen für die Ebene RT und TL vergleichbar.

Die Einflüsse der Gewindeparameter wurden in getrennten Untersuchungen, je nach Ebene der Holzfaserrichtung, ermittelt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Einflüsse der Gewindeparameter durch den starken Effekt der Ebenen nicht zu verzerren. Zur Vergleichbarkeit der Untersuchungen wurde für die Auswertung der beiden Ebenen ein einheitliches Modell für die mehrfaktorielle Varianzanalysen verwendet. In beiden Varianzanalysen konnte ein vergleichbares Bestimmtheitsmaß (korrigiertes R^2 : RT 0,712; TL 0,668) mit angemessener Güte erzielt werden. In den Untersuchungen konnte in beiden Ebenen RT und TL der Einfluss der Holzbalken gezeigt werden. Dieser Effekt wird durch die Methode der Blockbildung berücksichtigt und konnte bereits in der Untersuchung zum Einfluss der Gewindesteigung und des Flankenwinkels gezeigt werden. Auch dort wurde die Methode der Blockbildung zur Berücksichtigung des Effekts angewandt.

Durch die unabhängige Variation der Gewindeparameter der Gewinde-Testobjekte konnte mit dem Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing erstmals der Einfluss des Flankenabstands, Steigungswinkel, Flankenwinkel und Profilhöhe sowie Interaktionen dieser Parameter auf das Haltevermögen nachgewiesen werden.

Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

Die Haupteffekte Profilhöhe, Flankenabstand und Flankenwinkel zeigen in den Untersuchungen gleichgerichtete, annähernd parallele Trends. Dies lässt vermuten, dass die Mechanismen, welche den Haupteffekten zugrunde liegen, ähnlich sind. In der Ebene RT konnten verschiedene Interaktionen zwischen den Gewindeparametern nachgewiesen werden. Dagegen konnte in der Ebene TL nur die Interaktion Flankenabstand und Flankenwinkel gezeigt werden. Eine Möglichkeit ist, dass in der Ebene RT, im Gegensatz zur Ebene TL, eine größere Anzahl an Versagensmechanismen an der Funktionserfüllung beteiligt sind, welche die Interaktionen zwischen den Gewindeparametern und der Tragfähigkeit entstehen lassen.

Die Haupteffekte und Interaktionen der Gewindeparameter sind in beiden Ebenen zur Holzfaserrichtung gleichgerichtet oder neutral. Dies ist für die Gestaltung von Holzschrauben positiv. Die Gestaltung des Holzschraubengewindes muss aufgrund des umlaufenden Gewindes beide Ebenen zur Holzfaserrichtung berücksichtigen. Gegenläufige Trends der Gewindeparameter für die Ebenen würden ein Zielkonflikt in der Gestaltung bedeuten. Die Steigungen der Interaktionen der Gewindeparameter sind für die beiden Holzfaserrichtungen oft verschieden. Diese unterschiedlichen Steigungen können nur durch die Untersuchung in getrennten Holzfaserrichtungen mittels Gewinde-Testobjekte ermittelt werden.

Profilhöhe

Der positive Einfluss einer größeren Profilhöhe auf das Haltevermögen wurde von Ayoubi (2014) vermutet. Dieser Einfluss der Profilhöhe konnte für die Werte 1,0 mm und 1,48 mm nachgewiesen werden. Eine höhere Profilhöhe führt zu einem höheren Haltevermögen. Die Effektgröße ist als stark zu bewerten.

Gaunt (1997) vermutete einen Einfluss des Verhältnisses zwischen Profilhöhe und Flankenbreite auf das Haltevermögen. Die Flankenbreite ist die Breite der Gewindeflanke auf Höhe des Gewindegrunds und korreliert durch das dreieckige Grundprofil der Gewindeflanke mit dem Flankenwinkel. Da die Parameter Profilhöhe und Flankenwinkel untersucht wurden kann die Vermutung von Gaunt (1997) zum Verhältnis zwischen Profilhöhe und Flankenbreite geprüft werden. In der Untersuchung konnte eine Interaktion der Profilhöhe und des Flankenwinkels für die Ebene RT gezeigt werden. Gaunt (1997) stellte diese Vermutung auf Basis von Untersuchungen mit Profilhöhen im Bereich von 3 mm bis 9 mm und Verhältnissen von Profilhöhe und Flankenbreite im Bereich zwischen 1 und 2 auf. In dieser Studie liegt das Verhältnis bei den Gewinde-Testobjekten mit einer Profilhöhe von 1 mm und einem Flankenwinkel von 55° bei 0,55. Die Gewinde-Testobjekte mit einer Profilhöhe von 1,48 mm und einem Flankenwinkel von 30° erreichen ein kleineres Verhältnis von 0,5. Trotz dieser Unterschiede in den Verhältnissen kann die Vermutung von Gaunt (1997) eines positiven Einflusses eines kleineren Verhältnisses auf das Haltevermögen durch die gezeigte Interaktion von Profilhöhe und Flankenwinkel unterstützt werden.

Flankenwinkel

Der Einfluss des Flankenwinkels auf das Haltevermögen konnte in Kapitel 6.1 im Bereich zwischen 35° und 45° nicht gezeigt werden. In der Modellierung wird jedoch ein Einfluss vorhergesagt. Daher wurde der Einfluss des Flankenwinkels in diesem Kapitel in einem größeren Wertebereich untersucht. Der Einfluss dieses Gewindeparameters kann für die Werte 30° und 55° nun nachgewiesen werden. Ein kleinerer Flankenwinkel sorgt für ein höheres Haltevermögen. Die Effektgröße ist schwach.

Im Interaktionsdiagramm Profilhöhe und Flankenwinkel ist ersichtlich, dass bei einer Profilhöhe von 1,48 mm der Flankenwinkel keinen oder kaum einen Einfluss auf das Haltevermögen aufweist. In Kapitel 6.1 wurde der Einfluss des Flankenwinkels bei einer konstanten Profilhöhe von 1,48 mm untersucht. Dies ist ein möglicher Grund, warum der Einfluss des Flankenwinkels in Kapitel 6.1 nicht gezeigt werden konnte.

Steigungswinkel

Der Einfluss des Steigungswinkels konnte für die Winkel 6,8° und 13,6° auf das Haltevermögen in der Ebene RT gezeigt werden. Im Stand der Forschung wurde der Einfluss des Steigungswinkels bislang nicht untersucht. Ein größerer Steigungswinkel führt zu einem höheren Haltevermögen. Allerdings ist die Effektgröße schwach. Zudem konnte dieser Effekt in der TL Ebene nicht gezeigt werden.

Flankenabstand

Der Einfluss des Flankenabstands kann für die Werte 3,04 mm und 6,08 mm gezeigt werden. Ein kleinerer Flankenabstand führt zu einem höheren Haltevermögen. Die Effektgröße ist stark. Es konnte in der Ebene RT eine starke Abhängigkeit dieses Einflusses von der Gewindetiefe nachgewiesen werden. Für eine größere Profilhöhe ist der Einfluss auf das Haltevermögen unabhängig vom Flankenabstand. Dies gilt jedoch nicht in der Ebene TL, in welcher diese Interaktion nicht gezeigt werden kann. Für die Gestaltung bedeutet dies, dass bei einer größeren Profilhöhe die Gewindesteigung einen deutlich kleineren Einfluss auf das Haltevermögen aufweist.

In Kapitel 6.1 wurde der Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen untersucht. Die Parameter Flankenabstand und Steigungswinkel waren somit voneinander abhängig. Dieser Einfluss ist in Abbildung 7.9 a gezeigt.

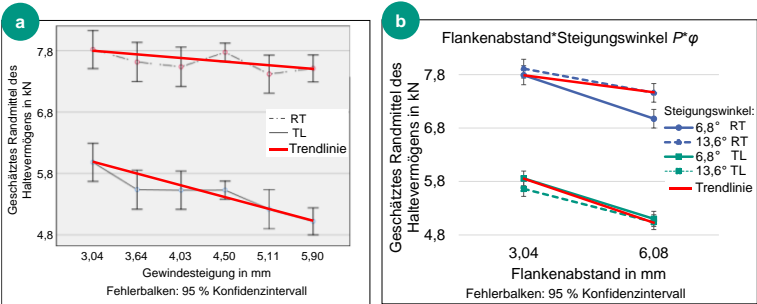


Abbildung 7.9: Vergleich des Einflusses der Gewindesteigung (a) sowie der Interaktion von Flankenabstand und Steigungswinkel (b) auf das geschätzte Randmittel des Haltevermögens. Vergleichbar sind die roten Trendlinien, welche in der Ebene TL eine größere Steigung aufweisen.

Es wurde gezeigt, dass der Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen in der Ebene TL größer ist als der Einfluss in RT Ebene. Dieser Effekt, welcher statistisch nicht gezeigt werden konnte, ist in den roten Trendlinien in Abbildung 7.9 a abgebildet. Dieser Effekt wird auch in dieser Teilforschungsfrage im Interaktionsdiagramm Flankenabstand und Steigungswinkel in Abbildung 7.9 b deutlich. Die roten Trendlinien bilden die geometrische Abhängigkeit des Flankenabstands und des Steigungswinkels aus Kapitel 6.1 ab. Es ist ersichtlich, dass die Trendlinie in beiden Untersuchungen in Ebene TL im Vergleich zur Ebene RT eine größere Steigung aufweist. Dies deutet daraufhin, dass die Gewindep Parameter in der Ebene TL einen größeren Einfluss auf einen dahinterliegenden Mechanismus haben, welcher für die Tragfähigkeit bestimmend ist.

7.4 Validierung der Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

In diesem Kapitel werden die Modellierungen der Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindep Parameter validiert. Diese Modellierungen erlauben die Vorhersage zu den Einflüssen Gewindep Parametern auf das Haltevermögen außerhalb des geprüften Wertebereichs. Daher werden die experimentell ermittelten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge der Profilhöhe, Flankenabstand, Steigungswinkel und Flankenabstand zur Prüfung der Vorhersage und somit zur Validierung der Modellierungen verwendet. Nach Isermann (1999) ergänzen sich theoretische Modellierungen und experimentelle Ergebnisse zur gegenseitigen Prüfung. Ergebnis dieser Prüfung sind die validierten oder falsifizierten Modellierungen der Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindep Parameter.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Steigungswinkel:

Auf Basis des Modells der Verbundmechanismen von Ayoubi (2014) wurde in Kapitel 6.3.1 der Gestalt-Funktion-Zusammenhang des Steigungswinkels erklärt. Es wurde beschrieben, dass eine Änderung des Steigungswinkels zu veränderlichen Anteilen der Verbundmechanismen Scherverbund und Reibverbund führt. Wie in Abbildung 6.15 dargestellt, wird mit spitzerem Steigungswinkel der Formschluss der Gewindeflanken mit dem Holz größer und somit nimmt der Anteil des Scherverbunds zu. Nach Ayoubi (2014) ist für die Tragfähigkeit vor allem der Anteil des Scherverbunds maßgebend. Daher wurde vorhergesagt, dass bei konstantem Flankenabstand ein kleinerer Steigungswinkel zu einem höheren Haltevermögen führt.

In den experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Einfluss des Steigungswinkels nur in der Ebene RT zur Holzfaserrichtung signifikant ist. Ein größerer Steigungswinkel führt in dieser Ebene zu einem höheren Haltevermögen.

- Die Vorhersage der Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Steigungswinkels kann durch die Experimente nicht bestätigt werden. Eine steigende Tragfähigkeit durch einen größer werdenden Steigungswinkel widerspricht der Modellvorhersage. Diese Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ist somit falsifiziert.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstand:

Die Modellierung des Flankenabstands erfolgte in Kapitel 6.3.1 auf Basis des Druckkegel-Zugring-Modells von Ayoubi (2014). Dazu wurden die zwei unterschiedlichen Modellierungen Spannungsverteilung und Scherfläche erarbeitet und in Abbildung 6.16 vorgestellt.

Das Modell der **Spannungsverteilung** geht davon aus, dass die Holzmatrix in Flankennähe versagt und durch dieses Versagen die Tragfähigkeit beeinträchtigt wird. Eine höhere Anzahl an Lasteinleitungspunkten, bedingt durch einen geringen Flankenabstand und konstanter Gewindelänge, resultiert in einer Aufteilung der Last und damit in einer geringeren Spannung in den Druckkegeln an den einzelnen Lasteinleitungspunkten. Es wurde vorhergesagt, dass daher ein kleinerer Flankenabstand zu einem höheren Haltevermögen führt.

Experimentell konnte der Einfluss des Flankenabstands als starker Effekt in beiden Ebenen ermittelt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der kleinere Flankenabstand von 3,04 mm zu einem höheren Haltevermögen führt.

- ✓ Die Vorhersage der Modellierung kann im Untersuchungsbereich bestätigt werden. Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstands kann daher validiert werden.

Das Modell der **Scherfläche** basiert auf einer Kombination aus Druckkegel-Zugring-Modell und dem Modell der Verbundmechanismen. Es wird von einer Relativverschiebung der Holzschraube gegenüber dem umgebenden Holz ausgegangen. Bei einem geringeren Flankenabstand versagt bei einer Relativverschiebung durch die höhere Anzahl an Flanken bei gleicher Gewindelänge ein größerer Volumenanteil der Holzmatrix. Durch die resultierende kleinere Scherfläche versagt die Holzschraubverbindung früher. Ein größerer Flankenabstand führt nach diesem Modell zu einem höheren Haltevermögen. Es wurde jedoch angemerkt, dass dieses Modell

nur dann gültig sein kann, wenn die Effektgröße des Steigungswinkels kleiner ist als die Effektgröße des Flankenabstands.

Experimentell konnten die Effektgrößen des Flankenabstands und des Steigungswinkels bestimmt werden. Der Flankenabstand hat eine starke Effektgröße. Der Steigungswinkel ist nur in der Ebene RT signifikant und weist eine schwache Effektgröße auf.

- Die Bedingungen zu den Effektgrößen werden nicht erfüllt. Die Vorhersage der Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstands basierend auf der Scherfläche kann durch die Experimente nicht bestätigt werden. Die Modellierung ist somit falsifiziert.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel:

Für den Flankenwinkel wurden zwei konkurrierende Modelle auf Grundlage des Druckkegel-Zugring-Modells nach Ayoubi (2014) vorgestellt. Beide Modelle zielen darauf ab, dass ein größeres Volumen des Druckkegels bei gleicher Belastung der Holzschraube zu einer geringeren Spannung in den Druckkegeln führt. Durch ein größeres Druckkegel-Volumen kann daher eine höhere Tragfähigkeit erzielt werden, bevor die Holzmatrix in den Druckkegeln durch die Spannung deformiert und versagt.

Die **Modellierung 1** beschreibt, dass der Druckkegel rechtwinklig zu den Gewindeflanken gebildet wird. Wie in Abbildung 6.17 dargestellt, vergrößert ein größerer Flankenwinkel das Volumen der Druckkegel und führt somit zu einem höheren Haltevermögen.

Die **Modellierung 2** beschreibt, dass der Druckkegel in Verlängerung zum Winkel der Gewindeflanke gebildet wird. Wie in Abbildung 6.18 abgebildet, führt ein kleinerer Flankenwinkel zu einem größeren Druckkegel und resultiert in einem höheren Haltevermögen.

Experimentell konnte der Einfluss des Flankenwinkels nachgewiesen werden. Der kleinere Flankenwinkel von 30° führt zu einem höheren Haltevermögen. Der Effekt ist schwach.

- ✓ Die Vorhersage der Modellierung 2 kann im Untersuchungsbereich bestätigt werden. Die Modellierung 2 des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Flankenwinkel kann daher validiert werden. Die Vorhersage aus Modell 1 kann nicht bestätigt werden. Die Modellierung 1 ist falsifiziert.

Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und Profilhöhe:

Auf Basis der Modellierung des Flankenwinkels wurde in Teilforschungsfrage 2 auch der Einfluss der Profilhöhe vorhergesagt. Das Volumen des Druckkegels kann durch eine größere Profilhöhe vergrößert werden. Eine größere Profilhöhe führt demnach zu einem höheren Haltevermögen.

Experimentell konnte der Einfluss der Profilhöhe auf das Haltevermögen als starker Effekt gezeigt werden. Die größere Profilhöhe von 1,48 mm erzielt ein höheres Haltevermögen.

- ✓ Die Vorhersage der Modellierung kann im Untersuchungsbereich bestätigt werden. Die Modellierung des Zusammenhangs zwischen Tragfähigkeit und der Profilhöhe ist somit validiert.

Somit können mit den Modellierungen die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und des Flankenabstands, des Flankenwinkels und der Profilhöhe erklärt werden. Der Einfluss des Steigungswinkels auf die Tragfähigkeit kann bislang nicht erklärt werden.

Zusammenfassend ist in Abbildung 7.10 eine Grafik zu den ermittelten Einflüssen der Gewindep parameter sowie den validierten Modellierungen der Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindep parameter dargestellt. Links in der Grafik sind die untersuchten Gewindep parameter grafisch dargestellt. Rechts daneben ist abgebildet wie die Gewindep parameter für ein hohes Haltevermögen gewählt werden müssen und wie deren Effektgröße ist. Dies ist für die Haupteffekte und die Wechselwirkung mit der größten Effektgröße gezeigt. Der Einfluss des Steigungswinkels und der Wechselwirkung konnte nur für die Holzfaserebene RT nachgewiesen werden. Weiterhin sind die validierten Modellierungen für die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und des Flankenabstands, des Flankenwinkels sowie der Profilhöhe wiedergegeben. Diese Modellierungen bauen auf dem Druckkegel-Zugring-Modell auf und basieren auf dem gleichen physikalischen Effekt, der mechanischen Spannung in den Druckkegeln. Durch die Gewindep parameter ist eine Vergrößerung der Druckkegel beziehungsweise eine höhere Anzahl an Druckkegel anzustreben um eine niedrigere Spannung in den Druckkegeln zu erzeugen und somit höhere Tragfähigkeiten zu erzielen.

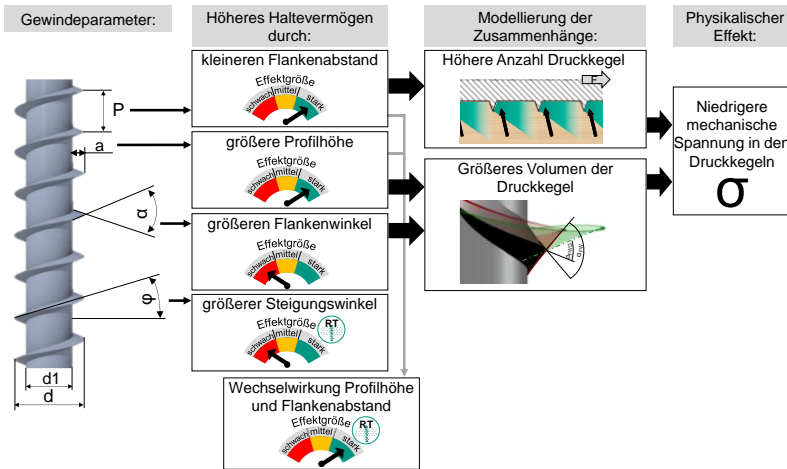


Abbildung 7.10: Stellschrauben für die Gestaltung von Holzschrauben mit hohen Haltevermögen. Dargestellt sind die ermittelten Einflüsse der Gewindeparameter und deren Effektgröße sowie die validierten Modellierungen, welche die Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindeparameter erklären. Diese Modellierungen bauen auf dem Druckkegel-Zugring-Modell auf und basieren auf dem gleichen physikalischen Effekt der mechanischen Spannung in den Druckkegeln.

In den Modellierungen wurde zwischen den beiden Holzfaserebenen nicht differenziert. Basierend auf der Erkenntnis, dass die Haupteffekte Flankenabstand, Flankenwinkel und Profilhöhe in der Ebene RT und der Ebene TL gleichgerichtete und annähernd parallele Trends aufweisen, kann angenommen werden, dass die physikalischen Effekte in beiden Faserebenen ähnlich sind. Obwohl für die Holzfaserebenen unterschiedliche Haltevermögen erzielt werden, sind daher für die Ebenen keine differenzierten Modellierungen der Haupteffekte notwendig.

Potential für eine Weiterentwicklung bietet neben der noch fehlenden Modellierung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs des Steigungswinkels auch die Modellierung der Interaktionen der Gewindeparameter. Aus den gezeigten Interaktionen der Gewindeparameter kann vermutet werden, dass in der Ebene RT zur Holzfaserrichtung eine andere Anzahl an den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen zugrundeliegenden Mechanismen wirken. Diese Mechanismen sind bisher unbekannt, wodurch diese Interaktionen nicht erklärt werden können. Weitere Mechanismen beschreibt das Kragsscheiben-Modell von Hübner (2014). In diesem Modell wird das

Versagen der Verbindung mittels der Verformungen der Holzfasern erklärt. Solche Verformungen von Fasern werden durch die gezeigte Modellerweiterung noch nicht berücksichtigt. Durch Einbezug dieser Verformungen und der Wechselwirkungen der Gewindeparameter kann die Güte der Modelle weiter verbessert werden. Dazu sollte auch der anatomische Aufbau des Holzes in die Betrachtung miteinbezogen werden und der Gültigkeitsbereichs beziehungsweise die Vorhersagegrenzen der Modellierungen ermittelt werden.

Die drei validierten Modellierungen bauen auf dem Druckkegel-Zugring-Modell von Ayoubi (2014) auf. In Kapitel 6.3.3 wurde eine Erweiterung dieses Modells entwickelt. Um die Anwendbarkeit des Modells in der Gestaltung zu erhöhen, sollte dieses mit etablierten Modellbildungsmethoden dargestellt oder mit diesen kombiniert werden. Eine Möglichkeit bietet hier die Nutzung des Contact&Channel-Ansatzes (Matthiesen, 2021). Durch Anwendung dieses Ansatzes können Gestalt-Funktion-Zusammenhänge in Contact&Channel-Modellen abgebildet werden, um synthesesfähig zu werden. Dazu ist eine Ergänzung des Ansatzes zur Darstellung von Spannungsverteilungen sowie Nicht-Funktionen, wie beispielsweise das Versagen, zu prüfen.

7.5 Fazit zur Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge

Zur Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt von Holzschrauben wurden die aus den Modellen vorhergesagten Einflüsse der Gewindeparameter auf das Haltevermögen geprüft. Wie in Abbildung 7.11 gezeigt, wurden dazu Ausziehversuche mit dem Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing durchgeführt. Die Parameter der Gewinde-Testobjekte des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing wurden angepasst, um die vorhergesagten Gewindeparameter untersuchen zu können. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Modellierungen validiert.



Abbildung 7.11: Angewandte Methode zur Validierung der modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen.

Um die Teilforschungsfrage zu beantworten, wurden mit dieser Methode die Einflüsse der Gewindeparameter Profilhöhe, Flankenabstand, Flankenwinkel und Steigungswinkel auf das Haltevermögen quantitativ ermittelt. Die Gewindeparameter wurden jeweils auf zwei Faktorstufen für die Ebenen zur Holzfaserrichtung RT und TL betrachtet. Es wurden 528 Versuche durchgeführt, die getrennt nach den beiden Ebenen in jeweils einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse ausgewertet wurden. Für beide Varianzanalysen wurde für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse ein einheitliches statistisches Modell verwendet. In diesen beiden Untersuchungen konnten für die Holzart Fichte in tangentialer Richtung und einem Winkel von 90° zur Holzoberfläche die in Abbildung 7.12 dargestellten Erkenntnisse zu den Gestalt-Funktion-Zusammenhängen gewonnen werden.

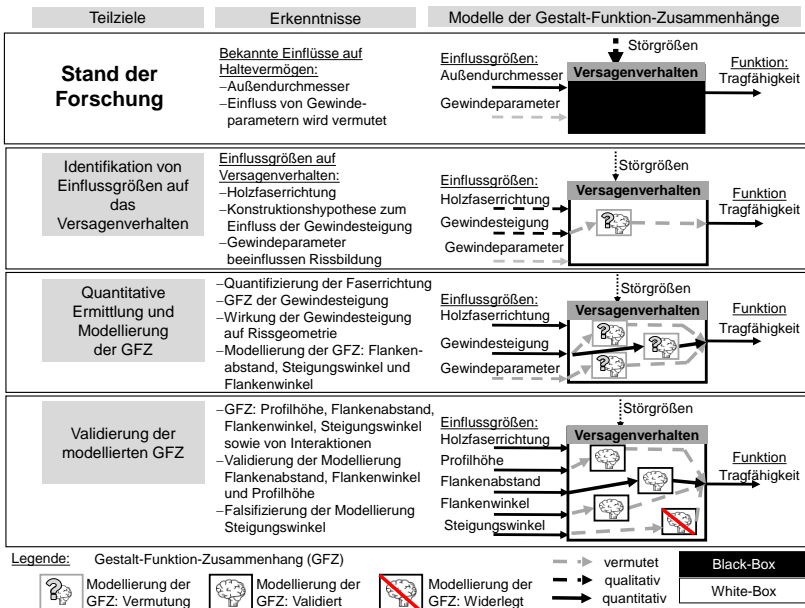


Abbildung 7.12: Erkenntnisse zu den Modellierungen der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge: Validierte Modellierungen sind Flankenabstand, Flankenwinkel und Profilhöhe. Die Modellierung des Steigungswinkels wurde falsifiziert.

Um die Modelle validieren zu können, wurden die folgenden quantitativen Gestalt-Funktion-Zusammenhänge experimentell ermittelt:

- Die Profilhöhe hat für die Werte 1,0 mm und 1,48 mm einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Dieser Einfluss zeigt eine starke Effektgröße. Eine größere Profilhöhe führt zu einem höheren Haltevermögen. Für die Profilhöhe wurde mit dem Experimentalaufbau im genannten Wertebereich eine Steigerung des Haltevermögens zwischen 14 - 19 % erzielt.
- Der Flankenabstand weist für die untersuchten Werte 3,04 mm und 6,08 mm einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen auf. Die Effektgröße wurde als stark beurteilt. Ein kleinerer Flankenabstand erzielt ein höheres Haltevermögen. Mit dem Experimentalaufbau konnte für den Wertebereich eine Steigerung des Haltevermögens zwischen 9 - 14 % erzielt werden.
- Die Interaktion Flankenabstand und Profilhöhe zeigt einen signifikanten Einfluss mit starker Effektgröße in der Ebene zur Holzfaserrichtung RT. Bei der höheren Profilhöhe von 1,48 mm kann der Einfluss auf das Haltevermögen als unabhängig vom Flankenabstand angesehen werden. Für die Ebene TL ist dieser Effekt nicht zu beobachten.
- Die Vermutung von Gaunt (1997) zum positiven Einfluss eines kleineren Verhältnisses der Profilhöhe zur Flankenbreite auf das Haltevermögen kann durch die Daten unterstützt werden.
- Der Flankenwinkel zeigt im Untersuchungsbereich von 30° bis 55° einen signifikanten Einfluss auf das Haltevermögen. Der Effekt ist als schwach zu beurteilen. Ein spitzer Flankenwinkel führt zu einem höheren Haltevermögen. Es konnte mit dem Experimentalaufbau im Wertebereich eine Steigerung von 4 % ermittelt werden. Bei der höheren Profilhöhe von 1,48 mm kann das Haltevermögen als unabhängig vom Flankenwinkel angesehen werden.
- Der Steigungswinkel zeigt im Bereich von 6,8° bis 13,6° nur in der Ebene RT einen schwachen Einfluss auf das Haltevermögen. In der Ebene TL kann kein Einfluss nachgewiesen werden.

Zusammengefasst können folgende Erkenntnisse zu den qualitativen Modellierungen, welche die Gestalt-Funktion-Zusammenhängen erklären, erzielt werden:

- Es können die Zusammenhänge des Flankenabstands, des Flankenwinkels und der Profilhöhe mit den modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhängen auf Basis der physikalischen Vorgänge erklärt werden. Die Modellierung erfolgte auf Grundlage des bekannten Druckkegel-Zugring-Modells und basiert auf dem physikalischen Effekt der mechanischen Spannung in den Druckkegeln.

Mit den vorgestellten Ergebnissen konnte somit die dritte Teilforschungsfrage

Welche Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern können mit den in Teilforschungsfrage 2 entwickelten Modellen erklärt werden?

beantwortet werden.

8 Nutzung der Ergebnisse zur Synthese von Holzschraubengewinden

In diesem Kapitel wird beschrieben wie die erzielten Ergebnisse für die Synthese von Holzschraubengewinden mit hohen Haltevermögen genutzt werden können. Für die Synthese werden die experimentell ermittelten Zusammenhänge zwischen dem Haltevermögen und den Gewindeparametern genutzt. Dazu werden auch die **Fertigbarkeit** der Holzschrauben und die **Vergleichbarkeit** zwischen den synthetisierten Holzschraubengewinden beachtet.

Dieses Kapitel basiert auf der von Kevin Hölz co-betreuten Bachelorarbeit von Hohlweg (2021)⁷.

Um eine **fertigbare** Gewindegestalt zu erzeugen, müssen einerseits die geometrischen Abhängigkeiten zwischen Steigungswinkel und Flankenabstand eingehalten werden. Andererseits darf ein maximaler Umformgrad, gemessen am Verhältnis zwischen Kerndurchmesser und Außendurchmesser d_1/d , nicht überschritten werden. Nach Hübner (2014) liegt dieses Verhältnis in der Praxis bei bauaufsichtlich zugelassenen Holzschrauben zwischen 0,57 und 0,72. Eine fertigbare Gewindegestalt sollte daher innerhalb dieses Verhältnisses liegen.

Um eine **Vergleichbarkeit** der Haltevermögen zwischen den synthetisierten Gewinden zu ermöglichen, wird das Drahtvolumen der verschiedenen Holzschraubengewinde gleich gewählt. Holzschrauben werden aus dem Volumen eines Draht-Rohlings gewalzt. Um die Haltevermögen unterschiedlicher Gewindegestalten miteinander vergleichen zu können, sollten die Gewinde das gleiche Volumen aufweisen und somit mit dem gleichen Draht-Rohling hergestellt werden können.

Vorgehen zur Synthese: Die Optimierung erfolgte anhand der dargestellten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge der Profildiagramme in vier Schritten. Im **ersten Schritt** wurden die Effekte anhand ihrer Effektgröße priorisiert. Die stärksten fünf Effekte der Untersuchung sind entsprechend ihrer Priorität: Profilhöhe, Flankenabstand, Flankenabstand*Profilhöhe, Flankenwinkel, Flankenabstand*Flankenwinkel.

Im **zweiten Schritt** wurden die Haupteffekte zugunsten ähnlich priorisierter Interaktionen der Haupteffekte ersetzt. In Interaktionsdiagrammen liegen die Informationen

⁷ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

der Haupteffektdiagramme um die Wechselwirkungen ergänzt vor. Daher wurden Interaktionsdiagramme bevorzugt betrachtet. Dies bedeutet das nicht die jeweiligen Profildiagramme der Profilhöhe und des Flankenabstands, sondern das entsprechende Interaktionsdiagramm genutzt wurde. Dementsprechend wurde das Profildiagramm des Flankenwinkels zugunsten des Interaktionsdiagramms Flankenabstand*Flankenwinkel ersetzt. Die zu betrachtenden Diagramme waren daher die Interaktionsdiagramme Flankenabstand*Profilhöhe sowie Flankenabstand*Flankenwinkel.

Im **dritten Schritt** wurden die Werte der Gewindeparameter festgelegt. Dies erfolgte iterativ anhand der beiden priorisierten Interaktionsdiagrammen unter Berücksichtigung der Fertigbarkeit und der Volumenkonstanz. In Tabelle 16 sind zwei auf Basis dieses Vorgehens optimierte Gewindegestalten sowie eine Referenzgewindegestalt dazu abgebildet.

Tabelle 16: Optimierte Gewindegestalten auf Basis des beschriebenen Vorgehens.
In Anlehnung an Hohlweg (2021)⁸

<i>Gewindeparameter</i>	Optimierung 1	Optimierung 2	Referenz
Profilhöhe a	1,48 mm	1,48 mm	1,12 mm
Flankenabstand	3,04 mm	3,04 mm	6,08 mm
Steigungswinkel φ	6,8°	13,6°	13,6°
Anzahl Gänge	1	2	1
Gewindesteigung P	3,04 mm	6,08 mm	6,08 mm
Flankenwinkel α	56°	54°	30°
<i>Anforderungen</i>			
Außendurchmesser d	8 mm	8 mm	8 mm
Umformgrad $d1/d$	0,63	0,63	0,72
Volumen ($l_{g1} = 64$ mm)	1747 mm ³	1744,06 mm ³	1743,14 mm ³

Der Zielkonflikt zwischen optimalen Gewindeparametern und der Fertigung sowie der Vergleichbarkeit musste durch Kompromisse in der Optimierung gelöst werden. Die Gewindeparameter wurden unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs innerhalb und auch außerhalb des geprüften Wertebereichs definiert. Beispielsweise musste die Profilhöhe der Referenz erhöht werden, um den maximalen Umformgrad nicht zu überschreiten.

⁸ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Im **vierten Schritt** wurde eine Einschätzung der prozentualen Verbesserung der beiden Optimierungen bezüglich der Referenzgestalt vorgenommen. Diese Einschätzung wurde für die Holzfaserebenen getrennt vorgenommen, da das Verhältnis der beiden Ebenen am Gesamthaltevermögen noch unbekannt ist. Die Einflüsse der einzelnen Gewindep Parameter wurden für eine Gesamteinschätzung addiert. Dazu wurden alle signifikanten Interaktionen und nicht nur die beiden priorisierten aus Schritt 2 berücksichtigt.

Für die optimierte Gewindegestalt 1 kann in der Ebene RT eine Verbesserung von 10,5 % und in der Ebene TL von 24,9 % zur Referenz berechnet werden. Für die optimierte Gewindegestalt 2 kann eine etwas höhere Verbesserung von 12 % in der Ebene RT und 25,3 % in der Ebene TL ermittelt werden. Die Optimierung 2 ermöglicht, durch das doppelgängige Gewinde eine höhere Gewindesteigung sowie einen größeren Steigungswinkel bei gleichem Flankenabstand im Vergleich zu einer eingängigen Gewindegestalt. Dies resultiert bezogen zur Optimierung 1 in einem höheren zu erwartenden Haltevermögen sowie durch den größeren Steigungswinkel auch in einer kürzeren Einschraubdauer.

Anhand der Werte für die Gewindep Parameter aus Tabelle 16 wurden Holzschrauben im Flachbackenwalzverfahren hergestellt. Die gefertigten optimierte Gewindegestalten sowie die Referenzgewindegestalt sind in Abbildung 8.1 dargestellt.



Abbildung 8.1: Im Flachbackenwalzverfahren hergestellte optimierte Gewindegestalten (a, b) sowie eine Referenzgewindegestalt (c). Diese Holzschrauben wurden anhand der in Tabelle 16 vorgestellten Gewindep Parameter gefertigt.

Die optimierten Gewindegestalten basieren auf den linearen Zusammenhängen zwischen Haltevermögen und Gewindeparameter. Durch weitere experimentelle Untersuchungen mit mehr Faktorstufen sollte geprüft werden, ob eine lineare Annahme gültig ist. Die Berechnung der Verbesserung in Schritt 4 unterstützt die Gestaltung in der Vermittlung von Zielkonflikten zwischen Gewindeparametern. Allerdings sind diese Berechnungen nur für die Gewinde-Testobjekte und den Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing gültig. Inwieweit diese prozentualen Veränderungen auf Holzschrauben mit umlaufendem Gewinde in Vollholz übertragbar sind ist unklar. Für diese Prüfung sollen die optimierten Gewindegestalten sowie die Referenzgestalt geprüft werden. Zukünftig sollten die Untersuchungsergebnisse für eine Regressionsanalyse genutzt werden. Durch das Bilden einer Regressionsgleichung könnten die Ergebnisse für die Optimierung von Gewindegestalten in der Praxis einfacher genutzt werden.

Zusammengefasst können folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Für die Synthese von Gewindegestalten wurden die experimentell ermittelten Zusammenhänge zwischen Haltevermögen und Gewindeparameter genutzt. Mit dem vorgestellten Vorgehen wurden zwei Vorschläge für hinsichtlich der Haltevermögen optimierte Gewindegestalten von Holzschrauben erarbeitet. Die Prüfung dieser Gewindegestalten steht noch aus.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst und anhand der drei Forschungsfragen diskutiert. Abschließend werden im Ausblick weiterführende wissenschaftliche Fragestellungen und Forschungsthemen vorgestellt.

9.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern von Holzschrauben analysiert und modelliert. Es wurde auf die Holzart Fichte, eine tangential Einschraubrichtung zur Holzfaserrichtung sowie einen Einschraubwinkel von 90° zur Holzoberfläche fokussiert. Um das Ziel der Arbeit zu erreichen, wurden Analysetechniken und Vorgehen entwickelt und somit auch ein methodischer Beitrag geleistet.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde die zentrale Forschungsfrage bearbeitet:

Wie können die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern von Holzschraubverbindungen mit Modellen erklärt werden?

Im Stand der Forschung wurden bestehende Vorgehen zur Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge aufgezeigt. Das Verhalten im Gewindekontakt von Holzschraubverbindungen wurde bisher nicht betrachtet, sondern lediglich der in Ausziehversuchen ermittelte Funktionswert Haltevermögen. Daher wurde in dieser Arbeit ein Vorgehen gewählt, in welchem zusätzlich auch das Versagenverhalten untersucht und in der Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge berücksichtigt wurde.

Davon ausgehend wurde die erste Teilforschungsfrage formuliert:

1. Welche Parameter des Gewindekontakts beeinflussen das Versagenverhalten und wirken sich damit auf die Tragfähigkeit der Holzschraubverbindung aus?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurden die Analysetechniken *Sectional Imaging* und *Continued Movement* entwickelt. Diese Analysetechniken ermöglichen

die Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt. Durch die Untersuchung des Versagenverhaltens von kommerziellen Holzschrauben wurden Einflussgrößen auf das Versagenverhalten identifiziert, welche sich auf die Tragfähigkeit auswirken. Eine Einflussgröße auf das Versagenverhalten ist die Gewindegestalt. Insbesondere die Gewindesteigung, welche sich auch auf die Rissbildung auswirkt. Eine weitere Einflussgröße ist die Ebene zur Holzfaserrichtung.

Diese Parameter wurden bei der Beantwortung der zweiten Teilforschungsfrage berücksichtigt:

2. Wie können die Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern modelliert werden?

Zur Berücksichtigung der Einflussgröße Holzfaserrichtung in der Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge wurde ein Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing entwickelt. Dieser basiert auf der Prämisse, dass ein umlaufendes Gewinde mit unterschiedlichen Ebenen zur Holzfaserrichtung interagiert. Um die Einflüsse der Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit in diesen Ebenen getrennt untersuchen zu können, wurde das Schraubengewinde abgewickelt und auf einen rechteckigen Grundkörper aufgebracht. Dieser Grundkörper mit geraden Gewindeflanken wird Gewinde-Testobjekt genannt und erlaubt die Ermittlung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge für spezifische Ebenen zur Holzfaserrichtung. Da ein Einschrauben dieser Gewinde-Testobjekte nicht mehr möglich ist, werden diese in verspannte Holzprüfkörperhälften eingelegt. Dieser entwickelte Aufbau wird als Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing bezeichnet. In der experimentellen Untersuchung mit diesem Aufbau wurde der Einfluss der Gewindesteigung und des Flankenwinkels auf das Haltevermögen untersucht. In einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse konnte erstmalig der Einfluss der Gewindesteigung auf das Haltevermögen im Bereich von 3,04 mm bis 5,9 mm statistisch signifikant gezeigt sowie der Einfluss der Ebene zur Holzfaserrichtung quantifiziert werden. Der Einfluss des Flankenwinkels konnte im Bereich von 35° - 45° nicht nachgewiesen werden. Durch einen Algorithmus wurde die Wirkung der Gewindesteigung auf die Rissbildung mittels Bilderkennung ermittelt. Es wurde gezeigt, dass eine größere Gewindesteigung zu einer größeren Rissbreite führt. Mit diesen Ergebnissen wurden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge modelliert. Darauf aufbauend wurde die Gewindesteigung in Flankenabstand und Steigungswinkel unterschieden. Es wurden theoretische Modelle erarbeitet, welche die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge für die Parameter Steigungswinkel, Flankenabstand, Flankenwinkel und Profilhöhe erklären und Vorhersagen dieser Parameter auf das Haltevermögen ermöglichen.

Zur Validierung dieser Modelle wurde die dritte Teilforschungsfrage formuliert:

3. Welche Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewindeparametern können mit den in Teilforschungsfrage 2 entwickelten Modellen erklärt werden?

Für die Validierung der erarbeiteten Modelle wurde die Vorhersage der Gewindeparameter auf das Haltevermögen geprüft. Dazu wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es wurde die Profilhöhe, der Steigungswinkel, der Flankenabstand und der Flankenwinkel auf zwei Faktorstufen variiert und mit dem Experimentalaufbau zum Schrauben-Testing untersucht. Dazu wurden zwei unabhängige experimentelle Untersuchungen in den beiden Ebenen zur Holzfaserrichtung RT und TL durchgeführt. Es konnten die Einflüsse der Profilhöhe, des Flankenabstands und des Flankenwinkels auf das Haltevermögen in beiden Ebenen statistisch gezeigt werden. Der Einfluss des Steigungswinkels konnte nur in der Ebene RT nachgewiesen werden. Weiterhin wurden Interaktionen der Gewindeparameter ermittelt. Mit diesen Ergebnissen konnten die Vorhersagen der Modellierungen zu den Zusammenhängen zwischen Tragfähigkeit und Flankenabstand, Profilhöhe sowie Flankenwinkel aus Teilforschungsfrage 2 geprüft und die Modelle somit validiert werden. Die validierten Modelle bauen auf dem im Stand der Forschung bekannten Druckkegel-Zugring-Modell auf.

Anschließend wurden die Ergebnisse für die Gestaltung von Holzschraubengewinden genutzt. Anhand der ermittelten Zusammenhänge zwischen Haltevermögen und Gewindeparametern wurden zwei Vorschläge für hinsichtlich des Haltevermögens optimierte Holzschraubengewinde erarbeitet. Damit stehen nun zwei zusammenfassende Gestaltvorschläge zur Verfügung die sowohl fertigbar sind als auch die experimentellen Ergebnisse verwerten. Diese müssen in späteren Ausziehversuchen bezüglich ihrer Haltevermögen validiert werden.

Durch die Beantwortung der drei Teilforschungsfragen konnte die zentrale Forschungsfrage beantwortet werden. Mit den erarbeiteten Erkenntnissen wird die Gestaltung von Holzschrauben unterstützt. Darüber hinaus ermöglichen die erarbeiteten Analysetechniken und Vorgehen die Analyse und Modellierung der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt. Damit stehen hier Beispiele zur Verfügung wie Beobachtungsbarrieren zur Untersuchung des Versagenverhaltens überwunden sowie unbekannte Gestalt-Funktion-Zusammenhänge ermittelt und modelliert werden können. Diese können auch als Anregung für ähnliche Fragestellungen bei weiteren Systemen dienen. Eine Übertragbarkeit des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing und der Analysetechniken auf andere Befestigungselemente oder Verschraubungen in anderen Materialien ist anzunehmen.

9.2 Ausblick

Die Erkenntnisse der vorliegenden Forschungsarbeit zeigen weiterführende wissenschaftliche Fragestellungen und Forschungsthemen auf.

In dieser Arbeit wurden die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt für einen definierten Wertebereich ermittelt. Dabei wurden die Faktoren Profilhöhe, Flankenabstand, Steigungswinkel und Flankenwinkel auf zwei Faktorstufen untersucht, wodurch nur lineare Beziehungen ermittelt werden können. Extremwerte, wie beispielsweise lokale Maxima, können dadurch nicht identifiziert werden. Eine Ermittlung dieser Zusammenhänge für eine größere Anzahl an Faktorstufen würde nichtlineare Zusammenhänge – falls diese vorhanden sind – und somit die Identifikation von Maxima ermöglichen. Dadurch könnte die Gestaltung von Holzschrauben noch weiter unterstützt werden. Weiterhin sollten diese Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt auch insbesondere für spitze Einschraubwinkel ermittelt werden. Einschraubwinkel kleiner als 90° wurden bisher nur wenig untersucht und weisen durch ihre schräge Anordnung als Verbindungselement eine hohe Praxisrelevanz auf.

Um die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt zu erklären wurden theoretische, qualitative Modelle erarbeitet. Ein notwendiger Schritt ist die quantitative Bestimmung der Modellparameter in experimentellen Untersuchungen. In einem geplanten Vorhaben sollen die modellierten Gestalt-Funktion-Zusammenhänge weiterentwickelt werden. In der Weiterentwicklung muss die anatomische Holzstruktur zur Abbildung der versagenden Holzfasern noch stärker berücksichtigt werden. Dies könnte einen Ansatz bieten, um auch die Wechselwirkungen zwischen den Gewindeparametern erklären zu können. Durch verbesserte Modelle profitieren neben den Herstellern von Holzschrauben auch der Holzbau durch Schraubverbindungen mit höheren Tragfähigkeiten und einer höheren Zuverlässigkeit. Auch ist die Entwicklung eines wirtschaftlichen und gleichzeitig sicheren Auslegungsansatzes auf dieser Wissensbasis denkbar.

Notwendig sind solche Modelle, welche die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge im Gewindekontakt erklären, neben der mechanischen Gestaltung der Holzschrauben auch im Hinblick auf die Digitalisierung. Ein aktueller Trend der Produktentwicklung sind sensorintegrierte Maschinenelemente. Dieser Trend setzt sich auch in der Gestaltung von Befestigungselementen fort. Möglich sind beispielsweise sensorintegrierte Holzschrauben zur Vorspannkraftmessung oder der automatisierten Erkennung von Schädigungen, wie beispielsweise Holzfäule. Für eine Sensorentwicklung sind Modelle notwendig, die beschreiben welche Mechanismen im Gewindekontakt wirken und wie diese durch die Gewindeparameter beeinflusst werden.

Für eine gezielte Unterstützung in der Gestaltung ist eine Kombination dieser Modelle mit etablierten Modellbildungsmethoden der Produktentwicklung anzustreben. Eine Möglichkeit bietet der Contact&Channel-Ansatz. Für eine Modellierung der White-Box-Modelle ist hierzu eine Weiterentwicklung oder Erweiterung des Ansatzes um die Darstellung von Spannungsverteilungen oder Nicht-Funktionen, wie beispielsweise das Versagenverhalten, anzudenken. Offene wissenschaftliche Fragestellungen sind hier: Wie können eine Spannungsverteilung oder ein Versagen modelliert werden? Wie müssen diese Modelle aufgebaut sein, um für die Gestaltung geeignet zu sein? Welche Informationen werden benötigt, um solche Modelle entwickeln zu können?

In der Arbeit wurden die Ergebnisse für die Synthese von Holzschraubengewinden vorgestellt. Eine Prüfung der vorgestellten Vorschläge für optimierte Gewindegestalten ist in einem anschließenden Vorhaben geplant. Dazu wurden die optimierten Gewindegestalten sowie die vorgestellte Referenzgestalt im Flachbackenwalzverfahren gefertigt. Durch das Ermitteln der Haltevermögen dieser Holzschrauben können die optimierten Holzschraubengestalten validiert werden. Andererseits kann das vorgestellte Vorgehen zur Synthese der Gewindegestalten geprüft werden.

Da das Versagenverhalten der Schraubverbindung bislang unbekannt ist, ist eine simulative Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Tragfähigkeit und Gewindeparameter nicht aussagekräftig. Mit den entwickelten Analysetechniken ist eine Beobachtung des Versagenverhaltens im Gewindekontakt möglich. Dadurch wird die Entwicklung eines Materialmodells des Werkstoffs Holz ermöglicht, welches ein realitätsnahes Versagenverhalten abbildet. Dieses Materialmodell kann in FEM-Simulationen genutzt werden, um die Einflüsse von Gewindeparameter auf die Tragfähigkeit zu ermitteln. Dadurch könnte der Aufwand für die Ermittlung dieser Einflüsse deutlich gesenkt und eine größere Vielfalt an Parametern untersucht werden.

Eine Übertragbarkeit der entwickelten Analysetechniken und des Experimentalaufbaus zum Schrauben-Testing auf weitere Befestigungselemente und andere Verschraubungen wurde im Rahmen der Arbeit erwartet. Entsprechend dem induktiven Vorgehen von Hussy et al. (2013) sollte die Übertragbarkeit der erarbeiteten Analysetechniken weiter untersucht werden. Ein potentielles Forschungsfeld hierfür sind beispielsweise Verschraubungen im Leichtbau mit Multimaterialdesign und faserverstärkten Kunststoffen. Sehr relevant ist auch die Übertragbarkeit auf Knochenschrauben. Die im medizinischen Bereich verwendeten Knochenschrauben weisen eine ähnliche geometrische Form zu Holzschrauben auf. Der Aufbau und die Eigenschaften von menschlichen Knochen ähneln dem Aufbau von Holz. Dadurch ist eine Übertragbarkeit sehr wahrscheinlich.

Literaturverzeichnis

- Ambrozy, H. G. & Giertlová, Z. (2005). *Planungshandbuch Holzwerkstoffe. Technologie - Konstruktion - Anwendung*. Wien: Springer-Verlag.
<https://doi.org/10.1007/b138949>
- Appl, J.-J. (2009). *Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung*. Dissertation. Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Stuttgart.
<http://dx.doi.org/10.18419/opus-321>
- Ashby, W. R. (1961). *An introduction to cybernetics* (4. Aufl.). London: Chapman and Hall.
- Ayoubi, M. (2014). *Zum Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben mit großen Einbindelängen beim Einsatz als Bewehrung in Brettschichtholzbauteilen*. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH), Lehrstuhl für Tragkonstruktionen, Aachen.
- Ayoubi, M. (2016). Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben in Brettschichtholzbauteilen. Teil 2: Analytische und numerische Untersuchungen sowie die Ableitung eines Verbundmodells zur Berechnung der Verankerungslänge. *Bautechnik*, 93(11), 817–827. <https://doi.org/10.1002/bate.201500086>
- Ayoubi, M. & Trautz, M. (2015). Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben in Brettschichtholzbauteilen. Teil 1: Experimentelle Untersuchungen zum Einsatz der Schrauben mit großen Einbindelängen als Bewehrung in Brettschichtholzbauteilen. *Bautechnik*, 92(11), 790–799.
<https://doi.org/10.1002/bate.201400098>
- Badke-Schaub, P. & Frankenberger, E. (2004). *Management Kritischer Situationen. Produktentwicklung erfolgreich gestalten*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-18702-5>
- Ballerini, M. (2012). Experimental investigation on parallel-to-grain wood-to-wood joints with self-tapping screws. In P. Quenneville (Hrsg.), *Proceedings of World Conference on Timber Engineering 2012 (WCTE 2012)* (Bd. 4, S. 173–182). Red Hook, NY: Curran.
- Blaß, H. J. (2007). Selbstbohrende Schrauben als hochwirksames Verbindungsmittel. In G. Pirnbacher & G. Schickhofer (Hrsg.), *Tagungsband zur 6. Grazer*

Holzbau-Fachtagung (6. GraHFT'07): Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau (S. D1–D20). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz

- Blaß, H. J., Bejtka, I. & Uibel, T. (2006). Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde. In H. J. Blaß (Hrsg.) *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau* (Bd. 4). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000004810>
- Bodner, J., Schlag, M. G. & Grüll, G. (1997a). Fracture initiation and progress in wood specimens stressed in tension. Part I. Clear wood specimens stressed parallel to the grain. *Holzforschung*, 51(5), 479–484. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.5.479>
- Bodner, J., Schlag, M. G. & Grüll, G. (1997b). Fracture initiation and progress in wood specimens stressed in tension. Part II. Compression wood specimens stressed parallel to the grain. *Holzforschung*, 51(6), 571–576. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.6.571>
- Bodner, J., Schlag, M. G. & Grüll, G. (1998). Fracture initiation and progress in wood specimens stressed in tension. Part III. Clear wood specimens with various slopes of grain. *Holzforschung*, 52(1), 95–101. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1998.52.1.95>
- Brandner, R., Ringhofer, A. & Reichinger, T. (2019). Performance of axially-loaded self-tapping screws in hardwood: Properties and design. *Engineering Structures*, 188(1), 677–699. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.018>
- Bungartz, H.-J., Zimmer, S., Buchholz, M. & Pflüger, D. (2013). *Modellbildung und Simulation – Eine anwendungsorientierte Einführung* (2., überarbeitete Aufl.). Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Aufl.). Hillsdale, NJ: Erlbaum. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155>
- DIN 7998:1975-02. *Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben*. Berlin: Beuth-Verlag.

- DIN EN 26891:1991-07. *Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens* (ISO 6891:1983). Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN 1995-1-1:2010-12. *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN ISO 4014:2011-06. *Sechskantschrauben mit Schaft – Produktklassen A und B* (ISO 4014:2011). Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN 4074-1:2012-06. *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadel-schnittholz*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN 14592:2012-07. *Holzbauwerke – Stifförmige Verbindungsmittel – Anforderungen*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN 338:2016-07. *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN EN 1382:2016-07. *Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmiteln*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN 96:2016-12. *Halbrund-Holzschrauben mit Schlitz*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN 95:2016-12. *Linsensenk-Holzschrauben mit Schlitz*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN 571:2016-12. *Sechskant-Holzschrauben*. Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN 97:2016-12. *Senk-Holzschrauben mit Schlitz*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkbahnläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (6. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.
- EAD 130118-00-0603:2016-10. *Screws for use in timber constructions*. Brüssel: Europäische Organisation für Technische Bewertung (EOTA)
- Frese, M. & Blaß, H. J. (2009). Models for the calculation of the withdrawal capacity of self-tapping screws. In H. J. Blaß (Hrsg.), *Proceedings of International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Working*

- Commission W18 - Timber Structures (CIB-W18)* (Nr. 42-7-3). Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Frese, M., Fellmoser, P. & Blaß, H. J. (2010). Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(4), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0378-1>
- Gaunt, D. (1997). The effect of thread geometry on screw withdrawal strength. *New Zealand Timber Design Journal*, 6(3), 12–20.
- Günther, M. & Velten, K. (2014). *Mathematische Modellbildung und Simulation. Eine Einführung für Wissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen*. Berlin: Wiley-VCH.
- Höfferl, B., Hollinsky, K., Passer, A., Teibinger, M., Woschitz, R., Pech, A. et al. (2016). 2. Holztechnologie – Baustoffe und Produkte. In A. Pech (Hrsg.), *Holz im Hochbau. Theorie und Praxis* (S. 19–68). Berlin, Boston: Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783035607529-004>
- Hoffmeyer, P. (2016). Holzanatomie. In H. J. Blaß & C. Sandhaas (Hrsg.), *Ingenieurholzbau - Grundlagen der Bemessung* (S. 21–36). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000054023>
- Hölz, K., Ayoubi, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Theoretische Modelle zum Verbundtragverhalten von Holzschrauben für die Schraubengestaltung. *Bautechnik*, 98(S2), 86–94. <https://doi.org/10.1002/bate.202100003>
- Hölz, K., Dörner, P.-T., Hohlweg, J. & Matthiesen, S. (2022). Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity of Wood Screws to Optimize the Thread Geometry. *European Journal of Wood and Wood Products*. Manuskript eingereicht zur Publikation.
- Hölz, K., Dörner, P.-T. & Matthiesen, S. (2020). *Algorithmus zur objektiven Analyse des Einflusses von Gewindep Parametern von Holzschrauben auf die Rissbildung* [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000122036>
- Hölz, K., Dörner, P.-T. & Matthiesen, S. (2021). Analyse des Versagens mittels Bilderkennung für die Gestaltung von Holzschrauben. *Konstruktion*, 73(01-02), 64–69. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2021-01-02-64>

- Hölz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020a). Investigation of failure behavior in the thread contact of wood screws during the pull-out process. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 4020211. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002784)
- Hölz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020b). Methodical support for investigation of system behaviour by means of analysis techniques - Overcoming non-transparency in embodiment design. *Forschung im Ingenieurwesen*, 84(4), 323–331. <https://doi.org/10.1007/s10010-020-00417-y>
- Hölz, K., Hohlweg, J. & Matthiesen, S. (2022) *Research Data on the Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity of Wood Screws* [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000141497>
- Hölz, K., Kleinhans, L. & Matthiesen, S. (2021). Wood screw design: Influence of thread parameters on the withdrawal capacity. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 773–784. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01668-4>
- Horn, S., Hölz, K., Schwabe, M. & Matthiesen, S. (2019). Experimentelle Untersuchung von Versagensvorgängen an Verbundankern mit einem In-Situ-Ver suchsmodell. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115(1), 45–53. <https://doi.org/10.1002/best.201900013>
- Hübner, U. (2014). Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robi nienholz für lastabtragende Bauteile. In G. Schickhofer & R. Brandner (Hrsg.), *Monographic Series TU Graz / Timber Engineering & Technology* (Bd. 3). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.
- Hussy, W., Schreier, M. & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psycho logie und Sozialwissenschaften für Bachelor* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- ISO 5408:2009-06. *Screw threads – Vocabulary*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Isermann, R. (1999). *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Jensen, J. L., Nakatani, M., Quenneville, P. & Walford, B. (2011). A simple unified model for withdrawal of lag screws and glued-in rods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(4), 537–544. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0478-y>

- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (3., korrigierte Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Matthiesen, S. (2016). Editorial: Konstruktion entsteht im Kopf! *Konstruktion*, 68(04), 3.
- Matthiesen, S. (2017). Editorial: Gut konstruieren kann nur, wer die Details versteht! *Konstruktion*, 69(07-08), 3.
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (9. Aufl., S. 397 – 465). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Nelius, T. & Hölz, K. (2017). Methodische Unterstützung des Erkenntnisgewinns in der Produktentwicklung durch Konstruktionshypothesen. In Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.) *KIT Scientific Working Papers* (Bd. 61). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000071901>
- Matthiesen, S., Hölz, K. & Grauberger, P. (2017). Systemverständnis durch Analysemethoden. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 28. DfX Symposium* (S. 263–274). Hamburg: TuTech Verlag.
- Meboldt, M., Matthiesen, S. & Lohmeyer, Q. (2012). The dilemma of managing iterations in time-to-market development processes. In P. Heisig & J. Clarkson (Hrsg.), *DS 72: Modelling and Management of Engineering Processes - Concepts, Tools and Case Studies* (S. 127–139). Cambridge: University of Cambridge.
- Pirnbacher, G., Brandner, R. & Schickhofer, G. (2009). Base parameters of self-tapping screws. In H. J. Blaß (Hrsg.), *Proceedings of International Council for Research and Innovation in Building and Construction. Working Commission W18 - Timber Structures (CIB-W18)* (Nr. 42-7-1). Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Pirnbacher, G. & Schickhofer, G. (2007). Schrauben im Vergleich – eine empirische Betrachtung. In G. Pirnbacher & G. Schickhofer (Hrsg.), *Tagungsband zur 6. Grazer Holzbau-Fachtagung (6. GraHFT'07): Verbindungstechnik im Ingenieurholzbau* (S. F1–F22). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz

- Pirnbacher, G. & Schickhofer, G. (2010). Load bearing- and optimization potential of self-tapping wood screws. In A. Ceccotti (Hrsg.), *Proceedings of World Conference on Timber Engineering 2010 (WCTE 2010)* (Bd. 2, S. 1228–1237). Red Hook, NY: Curran.
- Racher, P. (2016). Verbindungen im Holzbau. In H. J. Blaß & C. Sandhaas (Hrsg.), *Ingenieurholzbau - Grundlagen der Bemessung* (S. 325–346). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000054023>
- Ringhofer, A., Brandner, R., Flatscher, G. & Schickhofer, G. (2015). Axial beanspruchte Holzschrauben in Vollholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz. *Bautechnik*, 92(11), 770–782. <https://doi.org/10.1002/bate.201500075>
- Ringhofer, A., Brandner, R. & Schickhofer, G. (2015). A universal approach for withdrawal properties of self-tapping screws in solid timber and laminated timber products. In R. Görlacher (Hrsg.), *Proceedings of INTER – International Network on Timber Engineering Research* (Nr. 48-7-01). Karlsruhe: Timber Scientific Publishing.
- Rouse, W. B. & Rouse, S. H. (1983). *Analysis and classification of human error*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(4), 539–549. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313142>
- Ruckpaul, A., Krilitz, A. & Matthiesen, S. (2014). Using eye tracking to understand the engineering designers' behavior in synthesis-driven analyzing processes - Experiences in study design. In M. Meboldt, S. Matthiesen, P. Badke-Schaub & Q. Lohmeyer (Hrsg.), *Analyzing Cognitive Processes During Design: Proceedings of the HBiD 2014* (o. S.). Zürich: ETH Zürich.
- Schmid, M. (2002). *Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz*. Dissertation. Universität Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VAKA), Karlsruhe.
- Schmitt, T. L. & Andres, M. (2019). *Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme. Bondgraphen, objektorientierte Modellierungstechniken und numerische Integrationsverfahren*. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25089-8>
- Schweizer, H. H. (2003). *1500 Fragen und Antworten - Elektrowerkzeuge und ihre Anwendung* (1. Aufl.). Konstanz: Christiani.

- Sydor, M. (2019). Geometry of wood screws: A patent review. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(1), 93–103. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1362-4>
- Sydor, M., Zmyślony, G., Pinkowski, G. & Szymański, W. (2016). The influence of pitch on the holding power of screws in scots pine wood. *Annals of WULS – SGGW, Forestry and Wood Technology*, 96(1), 151–156.
- Tepfers, R. (1973). *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars*. Dissertation. Chalmers University of Technology, Division of Concrete Structures, Göteborg.
- Thau, S. (2013). Heuristiken zur Analyse und Synthese technischer Systeme mit dem C&C2-Ansatz auf Basis von Entwicklungsprojekten im industriellen Umfeld. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 66). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Uibel, T. (2012). Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. In H. J. Blaß (Hrsg.), *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau* (Bd. 20). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- VDI 2221 Blatt 1:2019-11. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 3822:2011-11. *Schadensanalyse – Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse*. Berlin: Beuth-Verlag.
- VDI 2223:2004-01. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth-Verlag.
- Weber, C. (2006). CPM/PDD – An extended theoretical approach to modelling products and product development processes. In H. Bley, et al. (Hrsg.), *Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes* (S. 159–179). Stuttgart: Fraunhofer-IRB.
- Weber, C. (2012). Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften – eine kritische Zwischenbilanz. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 23. DfX Symposium* (S.25–62). Hamburg: TuTech Verlag.

- Wintergerst, E. (2015). Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK – Institut für Produktentwicklung* (Bd. 86). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Wynn, D. C. & Eckert, C. M. (2017). Perspectives on iteration in design and development. *Research in Engineering Design*, 28(2), 153–184. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0226-3>
- Yilmaz, S., Daly, S. R., Seifert, C. M. & Gonzalez, R. (2015). How do designers generate new ideas? Design heuristics across two disciplines. *Design Science*, 1, E4. <https://doi.org/10.1017/dsj.2015.4>
- Zanker, W. (1999). Situative Anpassung und Neukombination von Entwicklungsmethoden. In U. Lindemann (Hrsg.), *Reihe Konstruktionstechnik München* (Bd. 36). München: Shaker Verlag.
- Zarnani, P. & Quenneville, P. (2014). Strength of timber connections under potential failure modes: An improved design procedure. *Construction and Building Materials*, 60(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.049>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor Co-betreut wurden:

- Bennewitz, P. (2020) *Studienplanung und Durchführung zur Bestimmung des Einflusses von Gewindeparametern einer Holzschraube auf das Haltevermögen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Dörner, P.-T. (2020) *Automatisierte Analyse des Versagenverhaltens von Holzschraubverbindungen bei Variation der Gewindesteigung zur Bildung des GFZ*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Grycz, P. (2020) *Analyse des Ausziehweges von Holzschraubverbindungen unter Variation der Gewindesteigung und des Flankenwinkels*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Hanstein, V. (2018) *Analyse von Versagensmechanismen einer Holzschraubverbindung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Heineke, P. (2020) *Analyse des Haltevermögens von Holzschraubverbindungen unter Variation von Gewindesteigung, Flankenwinkel, Steigungswinkel und Gewindehöhe*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Hohlweg, J. (2021) *Untersuchung des Einflusses der Gewindesteigung sowie Synthese von optimierten Holzschraubengewinden basierend auf Einflussgrößen von Gewindeparametern*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kastner, E. (2019) *Analyse und Vergleich der Schadensbilder von Holzschraubverbindungen nach Ausziehversuchen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kleinhans, L. (2020) *Analyse des Haltevermögens von Holzschraubverbindungen unter Variation der Gewindesteigung und Flankenwinkel*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kleinschrot, M. (2019) *Versuchsplanung für die Untersuchung der Geometrie eines Holzschraubenersatzmodells*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Müller, M. (2020) *Experimentelle Untersuchung von Gewindeparametern zum Einfluss auf das Haltevermögen von selbstbohrenden Holzschrauben*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Nieder, I. (2019) *Experimentelle Untersuchung von Einflussparametern auf das Haltevermögen von selbstbohrenden Holzschrauben*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Vatansever, B. (2020) *Untersuchungen von Gewindeparametern (Steigung, Steigungswinkel, Flankenwinkel, Gewindetiefe) auf das Haltevermögen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Vorveröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind:

- Hölz, K., Ayoubi, M., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2021). Theoretische Modelle zum Verbundtragverhalten von Holzschrauben für die Schraubengestaltung. *Bautechnik*, 98(S2), 86–94. <https://doi.org/10.1002/bate.202100003>
- Hölz, K., Dörner, P.-T., Hohlweg, J. & Matthiesen, S. (2022). Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity of Wood Screws to Optimize the Thread Geometry. *European Journal of Wood and Wood Products*. Manuskript eingereicht zur Publikation.
- Hölz, K., Dörner, P.-T. & Matthiesen, S. (2020). *Algorithmus zur objektiven Analyse des Einflusses von Gewindeparametern von Holzschrauben auf die Rissbildung* [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000122036>
- Hölz, K., Dörner, P.-T. & Matthiesen, S. (2021). Analyse des Versagens mittels Bilderkennung für die Gestaltung von Holzschrauben. *Konstruktion*, 73(01-02), 64–69. <https://doi.org/10.37544/0720-5953-2021-01-02-64>
- Hölz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020a). Investigation of failure behavior in the thread contact of wood screws during the pull-out process. *Journal of Structural Engineering*, 146(10), 4020211. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002784)
- Hölz, K., Grauberger, P. & Matthiesen, S. (2020b). Methodical support for investigation of system behaviour by means of analysis techniques - Overcoming non-transparency in embodiment design. *Forschung im Ingenieurwesen*, 84(4), 323–331. <https://doi.org/10.1007/s10010-020-00417-y>
- Hölz, K., Hohlweg, J. & Matthiesen, S. (2022) *Research Data on the Influence of Thread Parameters on the Withdrawal Capacity of Wood Screws* [Forschungsdaten]. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000141497>
- Hölz, K., Kleinhans, L. & Matthiesen, S. (2021). Wood screw design: Influence of thread parameters on the withdrawal capacity. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 773–784. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01668-4>

Horn, S., Hölz, K., Schwabe, M. & Matthiesen, S. (2019). Experimentelle Untersuchung von Versagensvorgängen an Verbundankern mit einem In-Situ-Ver-suchmodell. *Beton- und Stahlbetonbau*, 115(1), 45–53.
<https://doi.org/10.1002/best.201900013>

Matthiesen, S., Grauberger, P., Nelius, T. & Hölz, K. (2017). Methodische Unterstützung des Erkenntnisgewinns in der Produktentwicklung durch Konstruktionshypothesen. In Karlsruhe Institut für Technologie (Hrsg.) *KIT Scientific Working Papers* (Bd. 61). Karlsruhe: Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000071901>

Matthiesen, S., Hölz, K. & Grauberger, P. (2017). Systemverständnis durch Analysemethoden. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Design for X. Beiträge zum 28. DfX Symposium* (S. 263–274). Hamburg: TuTech Verlag.

Glossar

Begriff	Definition
Beobachtung	Unter Beobachtung wird im Kontext dieser Arbeit die gezielte Betrachtung des Systemverhaltens durch qualitative Methoden verstanden. Die Beobachtung des Systemverhaltens kann direkt, beispielsweise durch Hochgeschwindigkeitsvideos, oder indirekt, beispielsweise durch Röntgenbildgebung, erfolgen (Hölz, Grauberger & Matthiesen, 2020b). Für die Beobachtung müssen oftmals Beobachtungsbarrieren überwunden werden.
Beobachtungsbarriere	„Eine Beobachtungsbarriere bezeichnet eine eingeschränkte Zugänglichkeit der Orte der Funktionserfüllung für eine Beobachtung oder Prognose von Wirkzusammenhängen in technischen Systemen“ (Wintergerst, 2015, S. 118).
Black-Box-Modell der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	Ein Black-Box-Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen Gestalt und Funktion ohne Wissen zu den physikalischen Zusammenhängen. Diese Modelle werden auch phänomenologische Modelle, empirische Modelle, statistische Modelle, experimentelle Modelle oder datenbasierte Modelle genannt (Günther & Velten, 2014).
White-Box-Modell der Gestalt-Funktion-Zusammenhänge	White-Box-Modelle können durch das Wissen zu den physikalischen Vorgängen und den zugrundeliegenden Mechanismen die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge nicht nur beschreiben, sondern auch erklären. White-Box-Modelle werden auch mechanistische Modelle oder theoretische Modelle genannt.
Holzschraubverbindung	Bei einer Holzschraubverbindung werden Holzschrauben aus Stahl für die Verbindung von Elementen aus Holz und Holzwerkstoffen sowie für Metall-Holz-Verbindungen verwendet. (Sydor, 2019).

Tragfähigkeit	Die Funktion Tragfähigkeit ist der Widerstand einer Schraubverbindung gegen das Versagen des Gewindekontakts bei axialer Belastung (Ausziehversagen). Die Tragfähigkeit wird auch Ausziehtragfähigkeit genannt. Die Bewertungsgröße der Tragfähigkeit ist das Haltevermögen.
Haltevermögen	Der maximale Kraftwert der Tragfähigkeit, bevor die Schraubverbindung versagt, wird Haltevermögen genannt. Das Haltevermögen wird in definierten Versuchen nach DIN 1382:2016-07 (DIN EN 1382) bestimmt.
Versagenverhalten	Unter dem Versagenverhalten im Gewindekontakt wird dessen Reaktion auf die einwirkenden axialen Ausziehkräfte verstanden, die entsprechend der Versagensart des Ausziehversagen zu einer Veränderung des Gewindekontakts führt und durch welche die Tragfähigkeit beeinträchtigt und gegebenenfalls nicht mehr erfüllt wird.

Anhang

Diese Arbeit verwendet Inhalte die von Freepik von Flaticon bereitgestellt werden.

Forschungsdaten Teilforschungsfrage 1

Im Folgenden werden exemplarisch Versagensbilder unterschiedlicher Schraubentypen aus Teilforschungsfrage 1 dargestellt. In Abbildung A.1 ist der Gewindekontakt des Schraubentyps A für zwei Zustände und zwei Einschraubtiefen dargestellt.

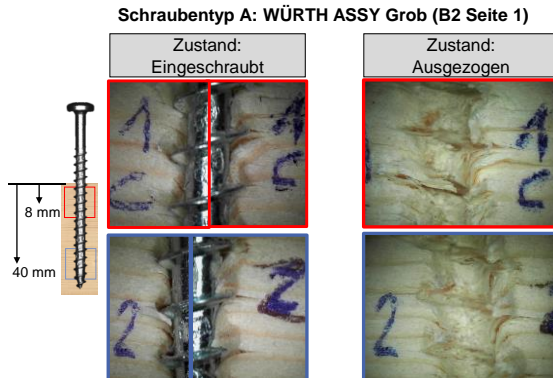


Abbildung A.1: Gewindekontakt des Schraubentyps A der Analysetechnik *Sectional Imaging*.

In Abbildung A.2 ist der Gewindekontakt der Schraubentypen D und E für jeweils zwei Zustände und zwei Einschraubtiefen dargestellt.

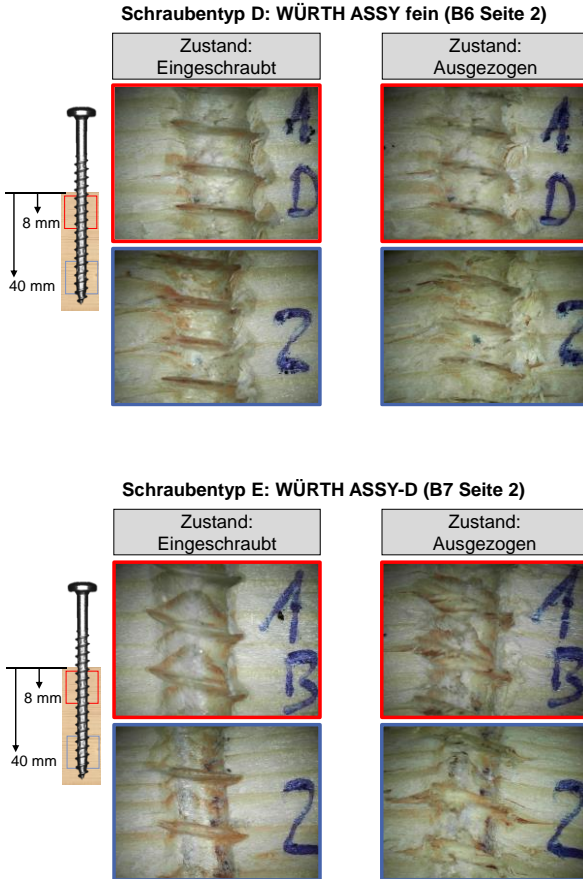


Abbildung A.2: Gewindekontakt der Schraubentypen D und E der Analysetechnik *Sectional Imaging*.

Forschungsdaten Teilforschungsfrage 2

Die Datenerhebung und -auswertung dieser Teilforschungsfrage erfolgte teilweise im Rahmen der von Kevin Hölz Co-betreuten Abschlussarbeiten von Hanstein (2018)⁹, Kastner (2019)¹⁰, Kleinschrot (2019)¹¹, Nieder (2019)¹², Dörner (2020)¹³ und Kleinhans (2020)¹⁴.

Im Folgenden werden die geschätzten Randmittel des Haltevermögens für die Faktorstufen der Gewindesteigung aus Teilforschungsfrage 2.1 angegeben. In Tabelle 17 sind die geschätzten Randmittel, der Standardfehler sowie das 95 % Konfidenzintervall angegeben.

Tabelle 17: Geschätzte Randmittel des Haltevermögens für die Faktorstufen der Gewindesteigung. Angegeben sind das geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM), sowie die untere und obere Grenze der 95 % Konfidenzintervalle.

Abhängige Variable: Haltevermögen				
Gewindesteigung in mm	Geschätztes Randmittel in kN	SEM in kN	95 % Konfidenzintervall in kN	
			Untere Grenze	Obere Grenze
3,04	6,876	0,110	6,660	7,093
3,64	6,553	0,114	6,328	6,778
4,03	6,509	0,116	6,282	6,737
4,50	6,629	0,056	6,519	6,738
5,11	6,295	0,113	6,073	6,517
5,90	6,243	0,080	6,085	6,401

Im Folgenden sind die visualisierten Rissbilder, welche in Teilforschungsfrage 2.2 für die Auswertung mittels Bilderkennungsalgorithmus genutzt wurden, dargestellt.

⁹ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁰ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹¹ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹² Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹³ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁴ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

In Abbildung A.3 sind exemplarisch für die unterschiedlichen Gewindesteigungen jeweils zwei Rissbilder dargestellt.

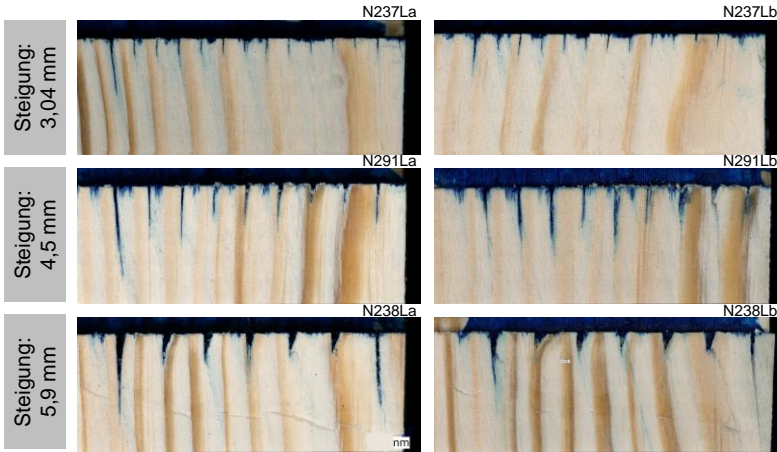


Abbildung A.3: Visualisierte Rissbilder unterschiedlicher Gewindesteigungen für die Auswertung mittels Bilderkennungsprogramm.

Im Folgenden werden die Risslängen und Rissbreiten für die Faktorstufen der Gewindesteigung, welche durch den Algorithmus ermittelt wurden, angegeben. In Tabelle 18 sind die Versuchsanzahl (N) sowie der Median und die Standardabweichung (SD) jeweils für die Risslänge und Rissbreite angegeben.

Tabelle 18: Risslänge und Rissbreite für die unterschiedlichen Gewindesteigungen.

Gewindesteigung	Riss Anzahl N	Abhängige Variable: Risslänge		Abhängige Variable: Rissbreite	
		Median in mm	SD in mm	Median in mm	SD in mm
3,04	178	2,42	1,843	0,159	0,154
3,64	175	3,441	2,431	0,305	0,238
4,03	138	3,152	2,795	0,491	0,356

Forschungsdaten Teilforschungsfrage 3

Die Datenerhebung und -auswertung dieser Teilforschungsfrage erfolgte teilweise im Rahmen der von Kevin Hölz Co-betreuten Abschlussarbeiten von Bennewitz (2020)¹⁵, Grycz (2020)¹⁶, Heineke (2020)¹⁷, Müller (2020)¹⁸, Vatansever (2020)¹⁹ und Hohlweg (2021)²⁰.

Im Folgenden werden die geschätzten Randmittel des Haltevermögens für die Gewindep Parameter aus den beiden mehrfaktoriellen Varianzanalysen aus Teilforschungsfrage 3 angegeben.

Ebene zur Holzfaserrichtung RT

In Tabelle 19 sind die geschätzten Randmittel, der Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Haupteffekte der Gewindep Parameter angegeben.

Tabelle 19: Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die untersuchten Haupteffekte (a , P , α , φ) in der Ebene RT.

Parameter		Geschätztes Randmittel in kN	SEM in kN	95 % Konfidenzintervall in kN	
				Untere Grenze	Obere Grenze
a	1,00 mm	7,043	0,062	6,921	7,165
	1,48 mm	8,022	0,063	7,897	8,148
P	3,04 mm	7,849	0,064	7,722	7,977
	6,08 mm	7,216	0,062	7,092	7,339
α	30°	7,674	0,062	7,551	7,797
	55°	7,391	0,062	7,269	7,513
φ	6,8°	7,381	0,062	7,257	7,505
	13,6°	7,684	0,062	7,561	7,807

¹⁵ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁶ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁷ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁸ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁹ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

²⁰ Co-Betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

In Tabelle 20 sind die geschätzten Randmittel, der Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Interaktionen der Gewindeparameter in der Ebene RT angegeben.

Tabelle 20: Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Interaktionen der Gewindeparameter in der Ebene RT.

Abhängige Variable: Haltevermögen		Geschätztes Randmittel in kN	SEM in kN	95 % Konfidenzintervall in kN	
Parameter				Untere Grenze	Obere Grenze
<i>a</i>	<i>P</i>				
1,00 mm	3,04 mm	7,660	0,087	7,488	7,832
	6,08 mm	6,426	0,088	6,251	6,601
1,48 mm	3,04 mm	8,039	0,092	7,856	8,222
	6,08 mm	8,006	0,088	7,832	8,179
φ	<i>P</i>				
6,08°	3,04 mm	7,788	0,090	7,610	7,965
	6,08 mm	6,974	0,088	6,799	7,148
13,6°	3,04 mm	7,911	0,088	7,736	8,086
	6,08 mm	7,457	0,088	7,283	7,632
α	<i>P</i>				
30°	3,04 mm	8,078	0,089	7,900	8,255
	6,08 mm	7,270	0,088	7,096	7,444
55°	3,04 mm	7,621	0,088	7,447	7,795
	6,08 mm	7,161	0,088	6,987	7,335
α	<i>a</i>				
30°	1,00 mm	7,312	0,088	7,138	7,485
	1,48 mm	8,036	0,088	7,861	8,212
55°	1,00 mm	6,774	0,087	6,602	6,946
	1,48 mm	8,008	0,088	7,833	8,183
α	φ				
30°	6,8°	7,420	0,088	7,246	7,594
	13,6°	7,928	0,090	7,749	8,106
55°	6,8°	7,342	0,088	7,166	7,517
	13,8°	7,440	0,087	7,268	7,612

Ebene zur Holzfaserrichtung TL

In Tabelle 21 sind die geschätzten Randmittel, der Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Haupteffekte der Gewindeparameter in der Ebene TL angegeben.

Tabelle 21: Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die untersuchten Haupteffekte (a , P , α , φ) in der Ebene TL.

Parameter		Geschätztes Randmittel in kN	SEM in kN	95 % Konfidenzintervall in kN	
				Untere Grenze	Obere Grenze
a	1,00 mm	4,939	0,051	4,839	5,039
	1,48 mm	5,891	0,051	5,791	5,990
P	3,04 mm	5,760	0,051	5,660	5,860
	6,08 mm	5,069	0,051	4,970	5,169
α	30°	5,525	0,051	5,424	5,625
	55°	5,305	0,050	5,206	5,404
φ	6,8°	5,479	0,051	5,379	5,579
	13,6°	5,350	0,051	5,250	5,450

In Tabelle 22 sind die geschätzten Randmittel, der Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Interaktionen der Gewindeparameter in der Ebene TL angegeben.

Tabelle 22: Geschätzte Randmittel, Standardfehler (SEM) sowie das 95 % Konfidenzintervall für die Interaktionen der Gewindeparameter in der Ebene TL.

Parameter		Geschätztes Randmittel in kN	SEM in kN	95 % Konfidenzintervall in kN	
				Untere Grenze	Obere Grenze
Abhängige Variable: Haltevermögen					
<i>a</i>	<i>P</i>				
1,00 mm	3,04 mm	5,333	0,071	5,192	5,473
	6,08 mm	4,545	0,071	4,406	4,685
1,48 mm	3,04 mm	6,187	0,071	6,047	6,328
	6,08 mm	5,594	0,071	5,454	5,733
φ	<i>P</i>				
6,08°	3,04 mm	5,857	0,070	5,719	5,996
	6,08 mm	5,101	0,071	4,960	5,241
13,6°	3,04 mm	5,662	0,072	5,520	5,805
	6,08 mm	5,038	0,070	4,900	5,176
α	<i>P</i>				
30°	3,04 mm	5,946	0,072	5,805	6,087
	6,08 mm	5,103	0,072	4,961	5,245
55°	3,04 mm	5,574	0,071	5,434	5,713
	6,08 mm	5,036	0,069	4,899	5,173
α	<i>a</i>				
30°	1,00 mm	5,096	0,071	4,957	5,235
	1,48 mm	5,953	0,073	5,809	6,097
55°	1,00 mm	4,782	0,071	4,641	4,922
	1,48 mm	5,828	0,069	5,693	5,963
α	φ				
30°	6,8°	5,540	0,071	5,400	5,681
	13,6°	5,509	0,073	5,366	5,652
55°	6,8°	5,418	0,070	5,279	5,557
	13,8°	5,192	0,070	5,054	5,329

