Erhöhung der Positionierungsgenauigkeit von Vollgewindeschrauben durch pyrolytisches Vorbohren

Von der Fakultät für Architektur

der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Denis Grizmann

aus Nikolski

Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Kurzfassung

Vollgewindeschrauben sind verbreitete Verbindungsmittel des modernen Ingenieurholzbaus und werden insbesondere für die lokale Verstärkung von Bauteilen verwendet. In alternativen Anwendungsszenarien wie beispielsweise dem Fügen von Bauteilen zur Erstellung leistungsstarker Verbindungen, stellt die genaue Positionierung der Schrauben immer wieder ein bisher ungelöstes Problem dar. Die Schrauben werden beim Eindrehen durch die strukturelle Beschaffenheit des Holzes von ihrer vorgesehenen Achse abgelenkt, wodurch relevante Abweichungen in Bezug auf die Positionierungsgenauigkeit resultieren. Diese stehen in Kontrast zur hohen Präzision des Holzbaus und beschränken die Einsatzmöglichkeiten von Vollgewindeschrauben.
Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird untersucht inwiefern die Positionierungsgenauigkeit von Vollgewindeschrauben durch initiales Vorbohren erhöht werden kann. Im Vordergrund steht dabei das neu entwickelte Verfahren des pyrolytischen Vorbohrens mithilfe von Laserstrahlung, das in Forschungsprojekten begleitend zur dieser Arbeit entwickelt wurde. Die Arbeit gibt einen Einblick in die Entwicklung des neuen Verfahrens und thematisiert die damit verbunden Fragestellungen.
Zunächst werden experimentelle Untersuchungen zum Verlaufen von mechanischen Bohrern und Vollgewindeschrauben ohne und mit initialer Vorbohrung vorgestellt. Bei der Durchführung der Versuche erfolgt die Aufzeichnung des Drehmomentes. Es wird untersucht, inwieweit aus dem Drehmoment Rückschlüsse auf das lokale Gefüge der Holzmatrix gezogen und Aussagen über den mit dem pyrolytischen Bohrverfahren erzielten Bohrdurchmesser gemacht werden können.
Basierend auf den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen wird ein numerisches Modell entwickelt, mit dem sich der Verlauf von Vollgewindeschrauben beim Eindrehen ins Holz abbilden lässt und sich die resultierenden Abweichungen in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussparameter berechnen lassen. Das Modell bietet die Möglichkeit die Eingangsparameter über den Umfang der experimentellen Untersuchungen zu variieren und Abschätzungen zu erforderlichen Mindestabständen oder Vorbohrtiefen zur Einhaltung einer defi-

nierten Positionierungsgenauigkeit vorzunehmen.
Im letzten Teil wird das Tragverhalten pyrolytisch vorgebohrter Vollgewindeschrauben mit nicht nicht vorgebohrten Schrauben verglichen. Die im Rahmen von Ausziehversuchen über den Entwicklungszeitraum gesammelten Ergebnisse erlauben die Abschätzung des Einflusses des pyrolytischen Vorbohrens auf das Tragverhalten von Vollgewindeschrauben.

Abstract

Fully threaded screws are common fasteners in modern timber engineering and are used in particular for the local reinforcement of components. In application scenarios such as the joining of components to create high-performance connections, the exact positioning of the screws is a problem that has not yet been solved. The screws are deflected from their intended axis during screwing due to the structural nature of the wood, resulting in relevant deviations in terms of positioning accuracy. These are in contrast to the high precision of timber construction and limit the possible applications of fully threaded screws.
This thesis examines the extent to which the positioning accuracy of fully threaded screws can be increased by initial pre-drilling. The focus is on the newly developed process of pyrolytic pre-drilling using laser radiation, which was developed in research projects accompanying this thesis. The work provides an insight into the development of the new process.
First, experimental studies on the straying of mechanical drills and fully threaded screws without and with initial pre-drilling are presented. During the experiments, the torque is recorded. It is investigated to what extent the torque can be used to draw conclusions about the internal structure and to make statements about the drilling diameter achieved with the pyrolytic drilling process.
Based on the findings of the experimental studies, a numerical model is developed with which the course of fully threaded screws during screwing into the wood can be mapped and the resulting deviations can be calculated as a function of the embedment depth. The model makes it possible to vary the input parameters over the scope of the experimental investigations and to estimate the minimum distances or pre-drilling depths required to maintain a defined positioning accuracy.
In the last part, the load-bearing behavior of pyrolytically pre-drilled full-thread screws is discussed and compared with non-pre-drilled screws. The results collected in pull-out tests allow to estimate the influence of pyrolytic pre-drilling on the load-bearing behavior of fully threaded screws.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

2 Grundlagen **5**

2.1 Struktureller Aufbau von Holz 5

2.1.1 Fasern 7

2.1.2 Äste 8

2.1.3 Risse 8

2.2 Gütesortierung von Holz 9

2.3 Einsatz von Vollgewindeschrauben im Ingenieurholzbau 12

2.3.1 Verstärken 13

2.3.2 Fügen 15

2.3.3 Bewehren 19

2.3.4 Ertüchtigen 20

2.4 Tragverhalten von Vollgewindeschrauben 21

2.5 Übersicht der Forschungstätigkeiten 26

3 Vorbohren für Vollgewindeschrauben **29**

3.1 Stand der Technik zum Vorbohren von Schrauben 29

3.2 Mechanisches Vorbohren 33

3.3 Laserstrahlbohren und pyrolytisches Vorbohren 34

3.3.1 Grundlagen der Lasertechnik 36

3.3.2 Anwendungsbereiche von Lasertechnik 38

3.3.3 Laser in der Holzbearbeitung 39

3.4 Tiefbohrungen für Vollgewindeschrauben 40

3.4.1 Aufbau des pyrolytischen Bohrprozesses 41
3.4.2 Entwicklung der Bohrverfahren und Auswahl der Laser . . 41
3.4.3 Optimierung der Prozessparameter 45

4 Verlaufen von mechanischen Bohrern und Vollgewindeschrauben 53

4.1 Verlaufen von Bohrern 53
4.1.1 Versuchsaufbau und Untersuchungsmethodik 54
4.1.2 Ergebnisse 57
4.2 Verlaufen von Vollgewindeschrauben 62
4.2.1 Versuchsaufbau und Untersuchungsmethodik 62
4.2.1.1 Abgrenzung zu bestehenden Untersuchungen zum Drehmoment beim Eindrehen von Vollgewindeschrauben 64
4.2.2 Ergebnisse der durchgeführten Versuche 65
4.2.2.1 Vorbohrtiefe 66
4.2.2.2 Einschraubdrehmoment 67
4.2.2.3 Ausschraubdrehmoment 78
4.2.2.4 Verlaufen 79
4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 83

5 Numerisches Modell zur Abbildung des Verlaufens von Vollgewindeschrauben 85

5.1 Anforderungen und Aufbau des Modells 85
5.1.1 Ablauf der Berechnung 88
5.1.2 Modellierung der Schraube 91
5.1.3 Abbildung des Schrauben-Faser Winkels 91
5.1.4 Abbildung des eingebundenen Bereichs 92
5.2 Validierung 92
5.2.1 Federsteifigkeiten zur Abbildung der Faserneigung 93
5.2.2 Validierung der Federsteifigkeiten für den eingebundenen, vorgebohrten Bereich 96
5.3 Anwendung 97

5.3.1 Abbildung einer Streuung der Austrittspositionen 98
5.3.2 Einfluss der Einbindetiefe 99
5.3.3 Einfluss der Vorbohrtiefe 100
5.4 Evaluierung der Umsetzung des Modells 102

6 Tragverhalten pyrolytisch vorgebohrter Vollgewindeschrauben 105
6.1 Charakterisiserung des Tragverhaltens 105
6.1.1 Untersuchung des Tragverhaltens im Ausziehversuch 107
6.2 Rückblick auf die Untersuchungen zum Tragverhalten pyrolytisch vorgebohrter Vollgewindeschrauben 109
6.3 Untersuchung des Tragverhaltens nach Optimierung der Prozessparameter 110
6.3.1 Einfluss des Vorbohrens auf das Tragverhalten 111
6.3.2 Korrelation des Drehmoments mit der Ausziehtragfähigkeit 117
6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 120

7 Zusammenfassung und Ausblick 121

Abbildungsverzeichnis 135

Tabellenverzeichnis 137

A Grundlagen 139
A.1 Sortierkriterien nach DIN 4074 140
A.2 Produktdatenblätter der verwendeten Vollgewindeschrauben . . . 144

B Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen 147
B.1 Verlaufen von Bohrern 147
B.2 Verlaufen von Vollgewindeschrauben 151
B.3 Drehmomentverläufe aller Einschraubungen 155
B.4 Drehmomentverläufe ausgewählter Einschraubungen 173
B.5 Protokolle der Ausziehversuche 235

Literaturverzeichnis 251

Kapitel 1

Einleitung

In Zusammenhang mit der Diskussion um nachhaltige Bauweisen und der Nutzung von natürlichen Baumaterialien, genießt der Holzbau aktuell große Akzeptanz. Beim Bauen mit Holz ist die Frage nach der Verbindungstechnik eine ganz zentrale, da die notwendigen Fügungen und Verbindungen der einzelnen Bauteile untereinander entscheidend für die Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion sind. Die gängigen Verbindungstechniken des Holzbaus beruhen klassischerweise auf dem Einsatz von metallischen Verbindungsmitteln, die in den Knoten bzw. Fügepunkten angeordnet sind und die Kraftübertragung zwischen den Bauteilen gewährleisten. Zu diesen Verbindungsmitteln gehören unter anderem die Vollgewindeschrauben, die sich insbesondere als Verstärkungselemente im modernen Holzbau etabliert haben. Seit ihrem Aufkommen sind sie ein fester Bestandteil der Forschungslandschaft des Holzbaus. Die im Rahmen der Forschungsaktivitäten gesammelten Erkenntnisse, gemeinsam mit den praktischen Erfahrungen sowie den Weiterentwicklungen seitens der Hersteller führen stetig zu einer Erweiterung der Akzeptanz und Verbreitung des Einsatzes der Vollgewindeschrauben. Dieses lässt sich ebenfalls an der neuen Version des Eurocodes 5 erkennen, zu deren wesentlichen Neuerungen die Einführung eines Kapitels zur Verstärkung und Fügung mittels Vollgewindeschrauben gehört.

Die Einsatzgebiete von Vollgewindeschrauben sind vielseitig. Die Anordnung von Vollgewindeschrauben zur lokalen Verstärkung von quer zur Faserrichtung beanspruchten Stellen ist gängige Praxis bei der Auslegung von Details und Anschlusspunkten im Holzbau. Angefangen beim einfachen Einfamilienhaus findet man heutzutage kaum einen Holzbau, der ohne die Verwendung von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben auskommt. Hinzu kommen Anwendungen aus dem Bereich der Tragwerkssanierung, bei denen sich insbesondere der Vorteil des einfachen Einbringens der Schrauben bemerkbar macht.

Vollgewindeschrauben können nicht nur zur lokalen Verstärkung sondern auch als Verbindungsmittel zur Fügung von Bauteilen angewendet werden. Anders als beispielsweise Nägel oder Stabdübel, die in der Regel quer zu ihrer Achse und somit biegebeansprucht werden, sind Vollgewindeschrauben darauf ausgelegt durch Normalkräfte entlang ihrer Achse (axial) beansprucht zu werden. Die Kraftübertragung erfolgt dabei durch den Formschluss des durchgehenden Gewindes über die gesamte Länge der Schrauben direkt in die umgebende Holzmatrix. Dadurch lässt sich die hohe Zugfestigkeit der Schrauben effizient ausnutzen. Es lassen sich kraftschlüssige Verbindungen herstellen, die ebenfalls eine einfache Verarbeitbarkeit aufweisen und mit geringem Aufwand ausgeführt werden können. Die Verfügbarkeit von langen Schrauben, die je nach Hersteller in Längen von über einem Meter angeboten werden, erhöht die Möglichkeiten der Ausführung besonders leistungsfähiger Verbindungen auch bei großen BSH-Querschnitten.

Insbesondere in solchen Fällen, bei denen mehrere, lange Vollgewindeschrauben mit engen Abständen zum Einsatz kommen, ist eine exakte geometrische Positionierung der Schrauben erforderlich. Dies lässt sich nur schwer erreichen, da aufgrund der natürlichen Inhomogenitäten des Holzes, wie beispielsweise der Faserigkeit oder dem Einschluss von Ästen, die Schraube beim Eindringen in das Holz von der vorgesehenen Achse abgelenkt wird, sie „verläuft“ im Prozess des Eindrehens. Das Verlaufen von Vollgewindeschrauben ist ein bekanntes und bislang ungelöstes Problem des konstruktiven Ingenieurholzbaus, welches ihre Einsatzmöglichkeiten stark begrenzt. Die Herstellung einer geradlinigen Führungsbohrung ist dabei genauso herausfordernd, da beim mechanischen Vorbohren die Bohrer tendenziell noch stärker verlaufen als die Vollgewindeschrauben selbst. Alternativ zu den konventionellen Möglichkeiten des mechanischen Vorbohrens steht im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein pyrolytisches Verfahren des Vorbohrens im Vordergrund, bei dem die Führungslöcher mithilfe von Laserstrahlung hergestellt werden. Es wird untersucht, inwiefern sich das entwickelte Verfahren des pyrolytischen Vorbohrens eignet die Positionierungsgenauigkeit von Vollgewindeschrauben zu erhöhen und welchen Einfluss eine Vorbohrung auf das Verbundverhalten der Schrauben aufweist.

Kapitel 2

Grundlagen

Das Kapitel widmet sich, den für die Bearbeitung des Themas notwendigen Grundlagen. Es werden die relevanten materialspezifischen Eigenschaften von Holz erläutert. Dabei liegt der Fokus auf dem strukturellen Aufbau des Holzes, da dieser den wesentlichen Einflussfaktor für das Verlaufen von Vollgewindeschrauben beim Einbringen darstellt. Die anschließende Übersicht zum Stand der Technik beschreibt die Einsatzgebiete von Vollgewindeschrauben in der Praxis, bietet eine Beschreibung des Tragverhaltens, beleuchtet die Regeln der Bemessung nach aktueller Normung und stellt die aktuellen Forschungstätigkeiten unterschiedlicher Akteure vor.

2.1 Struktureller Aufbau von Holz

Holz ist ein gewachsenes, natürliches Material mit einem komplexen strukturellen Aufbau. Die Untersuchung und Beschreibung der Struktur von Holz bildet einen eigenen Forschungszweig, namentlich die Holzanatomie und Holzchemie. Mit dem Ziel, Zusammenhänge zwischen der Struktur und den Eigenschaften des Materials zu identifizieren, erfolgt die Beschreibung und Analyse auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen (makroskopische, mikroskopische und submikroskopische Ebene; Abbidung 2.1). Auf makroskopischer Ebene (mit dem Auge sichtbar) ist die Struktur geprägt durch die zylindrischen Jahresringe mit unterschiedlich dichten Schichten von Früh- und Spätholz, einem stark gerichteten Faserverlauf entlang der Wachstumsrichtung, sowie eingeschlossenen Ästen und Rissen. Diese Merkmale führen zu einer stark ausgeprägten Inhomogenität und Anisotropie des Werkstoffes, welche in inhomogenen und anisotropen mechanischen Eigenschaften resultieren. Insbesondere die Berechnung und die Vorhersage des Tragverhaltens

von Holz- und Holzwerkstoffen ist dadurch weitaus schwieriger als bei anderen konstruktiven Baumaterialien, wie beispielsweise Stahl.

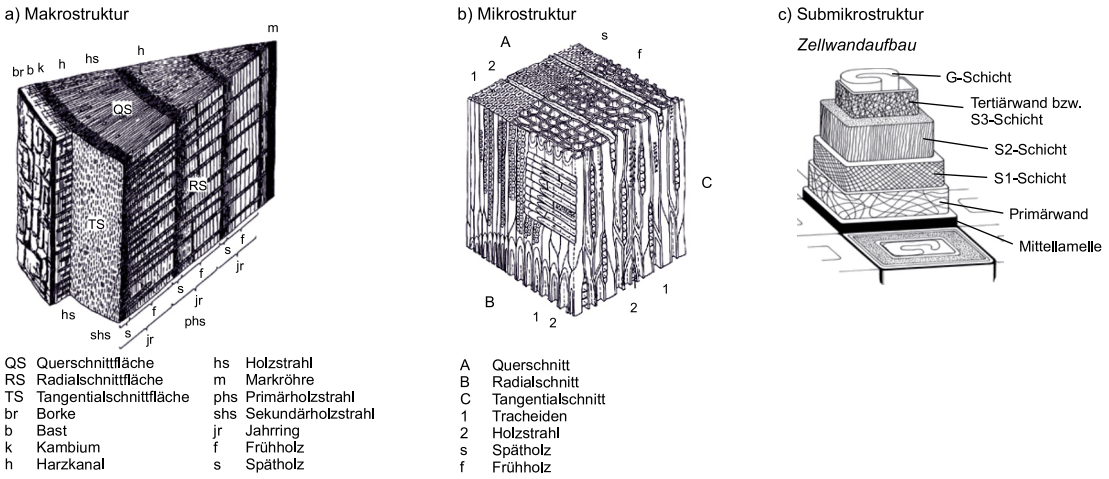


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz; a) Makrostruktur (nach Kollmann), b) Mikrostuktur (nach Olivia) c) Submikrostruktur (nach Kucera) [89]

Um den Einfluss des strukturellen Aufbaus des Holzes auf das mechanische Verhalten zu minimieren, werden unterschiedliche Methoden angewendet. Durch eine gezielte Auswahl bzw. eines gezielten Weglassens von Fehlstellen sowie einer definierten Konfektionierung wurden unterschiedliche Holzwerkstoffe auf Basis von Vollholz, Furnieren und Spänen entwickelt. Die wichtigsten Vertreter dieser Werkstoffe für den Ingenieurholzbau sind das Konstruktionsvollholz, das Brettschicht- sowie das Brettsperrholz. Für diese Produkte existieren Normen mit festgelegten Regeln u.a. zur Auswahl, Trocknung und Konfektionierung, sodass definierte mechanische Eigenschaften erreicht werden können, die eine Berechenbarkeit gewährleisten und so den Einsatz in konstruktiver Sicht ermöglichen. Trotz dieser Vorgaben bleiben die wesentlichen Strukturmerkmale vorhanden und entfalten ihre Wirkung, insbesondere bei dem Versuch einer exakten Positionierung von langen Vollgewindeschrauben. Der strukturelle Aufbau gehört zu den wesentlichen, das Verlaufen beeinflussenden Faktoren.

Die im Folgenden aufgeführten Merkmale des strukturellen Aufbaus beschränken sich auf eine Auswahl derer Faktoren, die im Folgenden für die Beschreibung des Verlaufens von Bohrern und Vollgewindeschrauben beim Eindrehprozess aufgegriffen werden. Für eine detailliertere Beschreibung der Holz- bzw. Holzwerkstoffstruktur sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen, an die auch die Beschreibungen in diesem Kapitel angelehnt sind [115], [88].

2.1.1 Fasern

Auf Mikroebene besteht die Struktur von Nadelholz zu 90 - 95% aus längst zur Stammachse ausgerichteten, langgestreckten Zellen, den sogenannten Längstracheiden. Diese sind in radialen Reihen um die Mittelachse des Baumes angeordnet und übernehmen zunächst den axialen Wassertransport, bis sie durch eine Verholzung durch Lignineinlagerung absterben und dann wesentlich für die Festigkeit des Baumes sorgen. Die Wachstumsgeschwindigkeit und die Form der Tracheiden variiert je nach Wachstumsperiode, wobei zu Beginn einer Periode weitlumige Tracheiden mit großen Durchmessern (Frühholz) und anschließend im späteren Verlauf englumige Tracheiden mit kleinerem Durchmesser (Spätholz) gebildet werden. Durch diese alternierende Schichtung ergeben sich die typischen Jahresringe des Holzes. Je nach Holzart, Standort und Wachstumsbedingungen unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften von Früh- und Spätholz; es lässt sich jedoch grundsätzlich festhalten, dass das Spätholz durch die feinere Geometrie der Zellen und deren engere Anordnung höhere Rohdichten und somit auch Festigkeiten aufweist. Der beschriebene Aufbau führt zu der Charakterisierung der Strukturmerkmale auf der makroskopischen Ebene, die im Wesentlichen die Faserrichtung parallel zur Stammachse sowie den Aufbau der Jahresringe berücksichtigt. Hieraus ergibt sich das typische, anisotrope Materialverhalten mit unterschiedlichen Festigkeiten und Steifigkeiten in Axial-, Radial- und Tangentialrichtung des Holzes, entsprechend Abbildung 2.2.

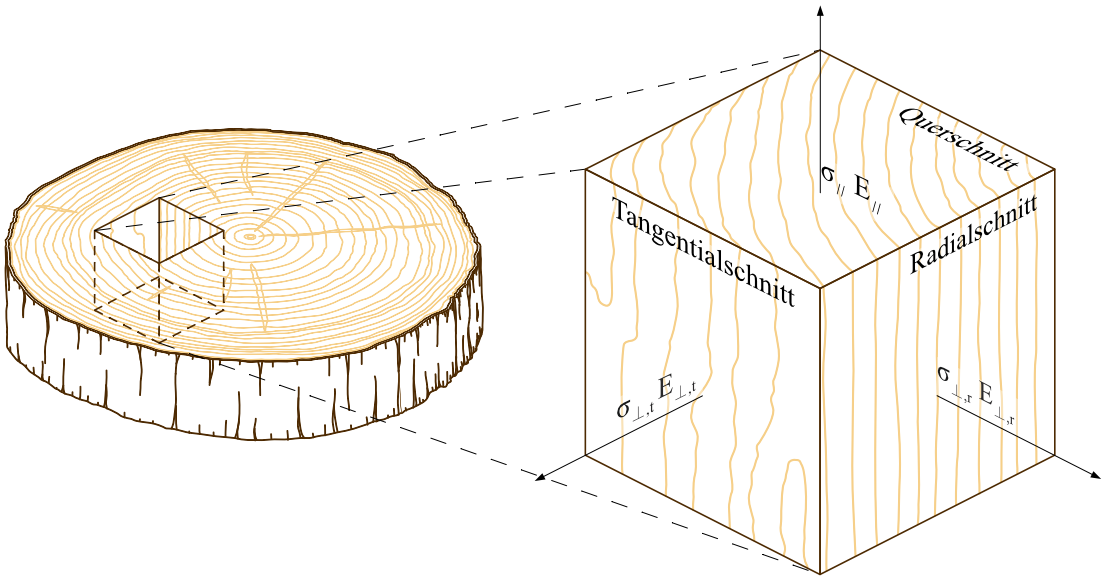


Abbildung 2.2: Schnittfläche von Holz mit Unterscheidung der Festigkeiten und Steifigkeiten in Axial-, Radial-, und Tangenzialrichtung

Die Richtung in welche das Holz eine Beanspruchung erfährt, spielt somit eine zentrale Rolle und muss beim Konstruieren und bei der Bemessung von Holzbauteilen berücksichtigt werden. Der Last-Faser-Winkel oder im Falle von axial beanspruchten Vollgewindeschrauben: der Winkel zwischen der Schraubenachse und der Faserrichtung (im Folgenden vereinfacht Schrauben-Faser Winkel α) ist ein maßgebender, das Tragverhalten beeinflussende Parameter. Auch für die Positionierung von langen Schrauben ist der Faserwinkel ein entscheidender Einflussparameter.

2.1.2 Äste

Die Äste eines Baumes sind im Inneren des Baumquerschnittes mit dem Stammholz verwachsen und verlaufen rechtwinklig zur Längsachse des Baumes vom Kern bis zum Rand des Querschnitts. Durch ihren, im Vergleich zum Reinholz, kompakteren strukturellen Aufbau unterscheiden sich die eingeschlossenen Äste von dem Holz, das sie umgibt in ihrer Rohdichte und somit auch der Festigkeit und Steifigkeit. In Bezug auf die globalen mechanischen Eigenschaften wirken die eingeschlossenen Äste als diskrete Unstetigkeitsstellen, an denen sich unter einer Beanspruchung Spannungen vermehrt ansammeln und es so zu Spannungsspitzen kommt, die maßgebend die Festigkeit eines Bauteils bestimmen können. Bei Nadelholz ist die Rohdichte von Ästen 5 -6 % höher; bei Laubholz können es bis zu 150 % sein [88]. Einhergehend mit der unterschiedlichen Dichte weisen Äste auch ein anderes Schwindverhalten auf, wodurch es während des Trocknungsprozesses von Holz zu einem Lösen bzw. Herausfallen eingeschlossener Äste kommen kann. Diese Fehlstellen werden Ausfalläste oder Astlöcher genannt.

2.1.3 Risse

Risse sind Trennungen von Fasern entlang der Faserlängsrichtung. Je nach Ursache der Entstehung können Risse in die in Abbildung 2.3 schematisch gezeigten Kategorien eingeteilt werden [83]:

Blitzrisse
Blitzrisse, auch als Kern- oder Sternrisse bezeichnet, sind radial gerichtete Risse am stehenden Stamm, die während der Standzeit des Baumes durch eine externe Einwirkung wie beispielsweise Frost entstehen. Blitzrisse verlaufen in der Regel über den ganzen Querschnitt vom Kern bis zum Splintholz mit großer Ausdehnung in Längsrichtung eines Baumstammes.

Ringschäle
Als Ringschäle werden Risse entlang eines Jahresrings bezeichnet. In der Regel

verlaufen diese in den ersten Schichten des Frühholzes und können nur einen Teil des Jahresrings oder den ganzen Jahresring erfassen. Die Risse werden durch Wachstumsspannungen oder starke mechanische Beanspruchungen des Baumes während seiner Lebenszeit hervorgerufen.

Schwindrisse
Schwindrisse, oder auch Trocknungsrisse genannt, sind lastunabhängige Risse, die infolge einer Änderung der Holzfeuchte entstehen. Für die Verwendung von Holz im technischen Sinne wird der Wassergehalt durch technisches Trocknen auf einen Anteil von ca. 11-12 % reduziert. So kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, dass das verwendete Bauholz von Pilzen oder Schädlingen befallen wird. Aufgrund des richtungsbezogenen unterschiedlichen Schwindverhaltens des Holzes entstehen beim Trocknen Spannungen, die bei Überschreiten der Zugfestigkeit orthogonal zur Faserrichtung zu einem Auftrennen der Faser und somit dem Entstehen eines Risses führen.

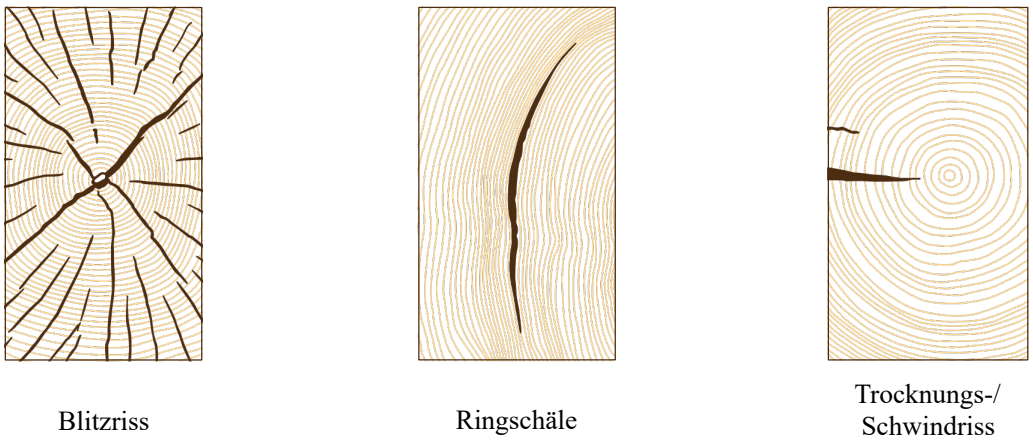


Abbildung 2.3: Unterschiedliche Arten von Rissen, von links nach rechts: Blitzriss, Ringschäle, Trocknungs-/Schwindriss

2.2 Gütesortierung von Holz

Für die Verwendung von Holz im konstruktiven Kontext werden einzelne Elemente unterschiedlicher Form aus Holzstämmen herausgeschnitten, die insgesamt als Schnittholz bezeichnet werden. Je nach dem Querschnitt und dem Seitenverhältnis wird zwischen Latten, Brettern, Bohlen oder Kanthölzern unterschieden (siehe Abbildung 2.4).

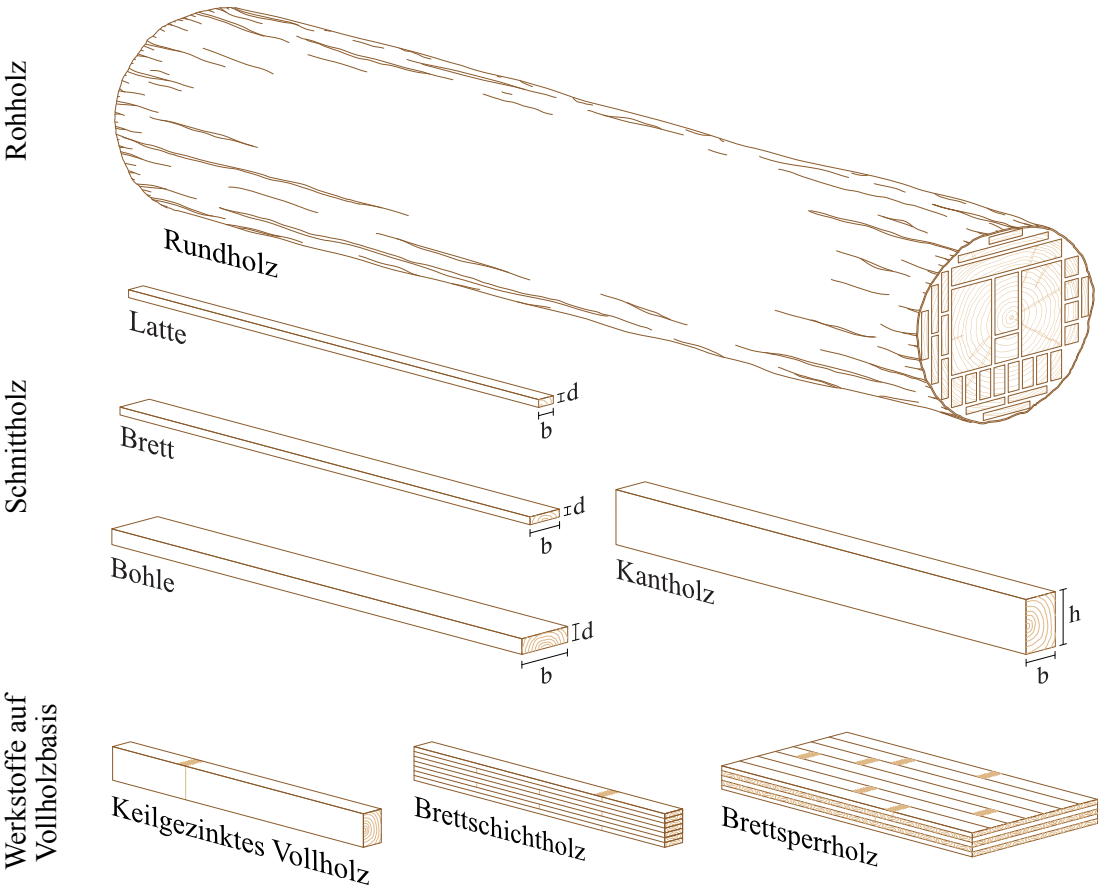


Abbildung 2.4: Charakterisierung unterschiedlicher Produkte aus Holz für den konstruktiven Einsatz

Durch die Verleimung mehrerer Querschnitte entstehen die im konstruktiven Holzbau verwendeten Produkte, die „Werkstoffe auf Vollholzbasis“. Hierzu zählen unter anderem das Konstruktionsvollholz (KVH), das Brettschichtholz (BSH) sowie das Brettsperrholz (BSP). Durch entsprechende Maßnahmen wie der Sortierung der Querschnitte nach ihrer Rohdichte, dem gezieltem Weglassen von Fehlstellen sowie einer speziellen Anordnung der einzelnen Querschnitte wird die Streuung der mechanischen Eigenschaften verringert und somit eine Homogenisierung der Endprodukte erzielt. Die hierfür notwendige Sortierung von Schnittholz ist normativ geregelt und wird je nach Anwendungsfall in nationalen Normen festgelegt. Die für das konstruktive Bauholz zugehörige Norm ist die DIN EN 4074-1 [35]. In dieser wird entsprechend definierter Parameter das Schnittholz in drei Sortierklassen (S7 bis S9) eingeteilt. Die Verwendung der einzelnen Sortierklassen für die Herstellung von Vollholzprodukten geben anschließend die Festigkeitsklassifizierungen. Beispielsweise die für Nadelholz festgelegten Festigkeitsklassen C16 - C30, mit definierten Festigkeiten in Abhängigkeit von Art und

Richtung der Belastung [41]. Die Zuordnung der Sortierklassen zu den jeweiligen Festigkeitsklassen erfolgt nach DIN EN 1912 [39]. Für Brettschichtholz werden die Festigkeitsklassen GL(c/h) 20 - 32 verwendet [37]. Dabei müssen die Bauteile nicht zwingend aus Lamellen nur einer Sortierklasse bestehen. Während dies bei homogenen Querschnitten (GLh) der Fall ist, werden bei kombinierten Querschnitten (GLc) im unteren und/oder oberen Bereich des Querschnitts Lamellen höherer Sortierklassen verwendet. Auf diese Weise können, insbesondere bei einer Biegebeanspruchung, die Festigkeiten an die höheren Spannungen im Randbereich angepasst werden.

Sortiermerkmale

Ein wichtiger Parameter für die Sortierung des Schnittholzes ist das Vorhandensein von Fehlstellen in Form von Ästen oder Rissen. Der Astanteil eines Holzquerschnitts wird als Ästigkeit bezeichnet und ist eins der maßgebenden Kriterien bei der Gütesortierung von Holz. Die Norm unterscheidet bei der Bestimmung der Ästigkeit zwischen Kanthölzern und Brettern bzw. Bohlen (siehe Abbildung 2.5).

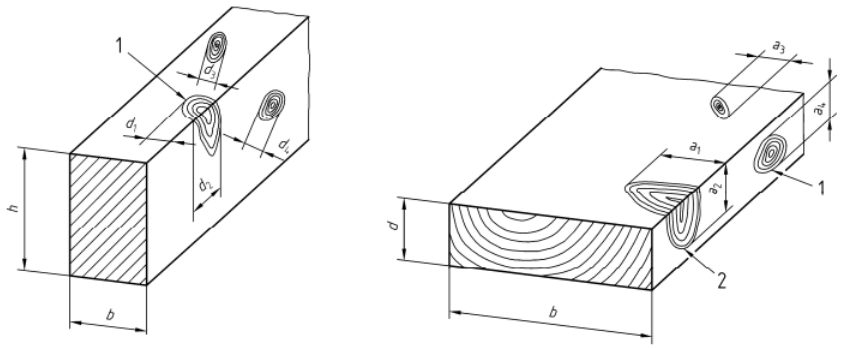


Abbildung 2.5: Bestimmung der Ästigkeit nach DIN EN 4047 für links: Kantholz; rechts: Brett und Bohle [35]

Für Kanthölzer wird die Ästigkeit als das Maximum der Verhältnisse eines Astdurchmessers zur Kantenlänge angegeben:

$$A = max\left(\frac{d_1}{b}; \frac{d_2}{h}; \frac{d_3}{b}; \frac{d_4}{h}\right) \tag{2.1}$$

Bei Brettern und Bohlen werden alle Äste berücksichtigt und die Ästigkeit ergibt sich aus der Summe der Astmaße aller Astschnittflächen bezogen auf das doppelte Maß der Breite:

$$A = \sum \frac{a_i}{2 \cdot b} \tag{2.2}$$

Befinden sich auf einer Messlänge von 150 mm mehrere Äste, handelt es sich um eine Astansammlung deren Ästigkeit analog zu 2.2 bestimmt wird. Grundsätzlich findet bei der Bestimmung der Ästigkeit keine Unterscheidung zwischen Ästen und Astlöchern statt, sodass Astlöcher genauso wie eingeschlossene Äste behandelt werden. Ebenfalls werden Astmaße unter 5 mm nicht berücksichtigt.

Während das Vorhandensein von Blitzrissen und Ringschäle nach der Norm [35] für keine der Sortierklassen zulässig sind, wird für Schwind- bzw. Trockenrisse das Sortiermerkmal R herangezogen. Nach diesem werden die Risse entsprechend dem Verhältnis der Risstiefe zur Querschnittsseite klassifiziert. Die zulässigen Risstiefen an der Oberfläche von Brettschichtholz werden zusätzlich durch die Vorgaben der Studiengemeinschaft Holzleimbau definiert [101]. Sowohl bei Voll- als auch Brettschichtholz spielen Risse bei der Beurteilung der Schubfestigkeit eine besondere Rolle und müssen bei der statischen Auslegung gesondert nachgewiesen werden.

Weitere Merkmale zur Sortierung von Holz sind beispielsweise die Krümmung oder Verdrehung der einzelnen Schnittholzelemente, die Jahrringbreite oder die Faserneigung innerhalb des Querschnitts. Eine Übersicht aller Kriterien zur Sortierung von Pfosten, Brettern und Latten nach DIN EN 4047 [35] ist im Anhang A.1 vorhanden.

2.3 Einsatz von Vollgewindeschrauben im Ingenieurholzbau

Selbstbohrende Vollgewindeschrauben entstanden als eine Weiterentwicklung von eingeklebten Gewindestangen, die in den 1980er Jahren als neue Verbindungsmittel im Holzbau etabliert wurden [11]. In bis dato konventionellen Verbindungen waren die metallischen Verbindungsmittel wie Nägel, Schrauben, Klammern oder Stabdübel überwiegend quer zu ihrer Achse belastet. Die Krafteinleitung erfolgt somit über die Biegung der Verbindungsmittel welche einen Lochleibungsdruck im Holz erzeugen, was mit stark konzentrierten Beanspruchungen und großen Verformungen einhergeht.

Die Besonderheit von eingeklebten Gewindestangen und des damit einhergehenden neuen Prinzips bestand in der axialen Beanspruchung der Verbindungsmittel mit einer über Schubkräfte entlang der Schraubenachse resultierenden Kraftübertragung in das Holz. Auf diese Weise können Kräfte ohne eine Umlenkung

zwischen Bauteilen übertragen und somit steifere und leistungsfähigere Verbindungen umgesetzt werden. Durch die Ausbildung eines angepassten Gewindes sowie einer selbstbohrenden Spitze wurde das Produkt an die Spezifikationen des Materials Holz angepasst und der Verbund konnte auch ohne das Einkleben der Verbindungsmittel hergestellt werden.

Selbstbohrende Vollgewindeschrauben werden insbesondere durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Bei der Herstellung wird das Gewinde auf den Schaft der Schraube aufgerollt wodurch Durchmesser bis zu 14 mm und Schraubenlängen von über einem Meter ermöglicht werden.
- Nach dem Aufrollen des Gewindes werden die Schrauben gehärtet, sodass sie höhere Zugfestigkeiten (bis zu 1000 Nmm^2) aufweisen.
- Die Schrauben besitzen eine kegelförmige selbstbohrende Spitze sowie ein Schneidegewinde, sodass sie in der Regel ohne ein zusätzliches Vorbohren in das Holz eingebracht werden können.

Im Vergleich zu klassischen Holzschrauben, deren Herstellung, Anwendung und Bemessung in Normen festgelegt ist, ist die Verwendung von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben ausschließlich über bauaufsichtliche Zulassungen geregelt. Sowohl die Liste der Hersteller als auch die der angebotenen Produkte ist seit der ersten Entwicklung der Schrauben stark gewachsen. Der Markt bietet aktuell eine große Bandbreite von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben, die je nach Hersteller durch unterschiedliche Ausführungen, wie der Beschaffenheit des Zylinderkopfes, der Bohrspitze, des Gewindes oder der Beschichtung an unterschiedliche Anforderungen angepasst sind. Nichtsdestotrotz ist der Einsatz von Vollgewindeschrauben im Ingenieurholzbau überschaubar und kann in die folgend aufgeführten Bereiche unterteilt werden.

2.3.1 Verstärken

Bedingt durch die Anisotropie des Werkstoffs Holz ergeben sich hohe Unterschiede zwischen den Festigkeiten entlang der Faserrichtung im Vergleich zu denen quer dazu. Beim Konstruieren mit Holz entstehen zwangsläufig Punkte, an denen Bauteile eine Beanspruchung in die schwache Achse erfahren und dadurch sowohl bei der Detailausbildung und vor allem bei der statischen Auslegung und Bemessung besonderer Beachtung und entsprechenden Lösungen bedürfen. Die Anordnung

von Vollgewindeschrauben ist nach aktuellem Stand der Technik die Standardlösung zur Verstärkung von Querdruck bzw. Querzug beanspruchten Bauteilen. Dieses zeigt auch die Einführung des neuen Abschnitts des Eurocodes 5, wodurch ein definiertes Vorgehen zur Verstärkung von Bauteilen mit Vollgewindeschrauben für unterschiedliche Szenarien festgeschrieben wird [40], [30].
Lediglich bei höher belasteten Knotenpunkten, wie sie insbesondere beim mehrgeschossigen Holzbau vorkommen, stößt die Herangehensweise derzeit noch an ihre Grenzen, sodass in solchen Fällen weiterhin individuelle Lösungen, in der Regel durch die Verwendung von Stahlprothesen, zum Einsatz kommen [92]. Abbildung 2.6 zeigt eine Übersicht von Verstärkungsmaßnahmen bei denen Vollgewindeschrauben zum Einsatz kommen.

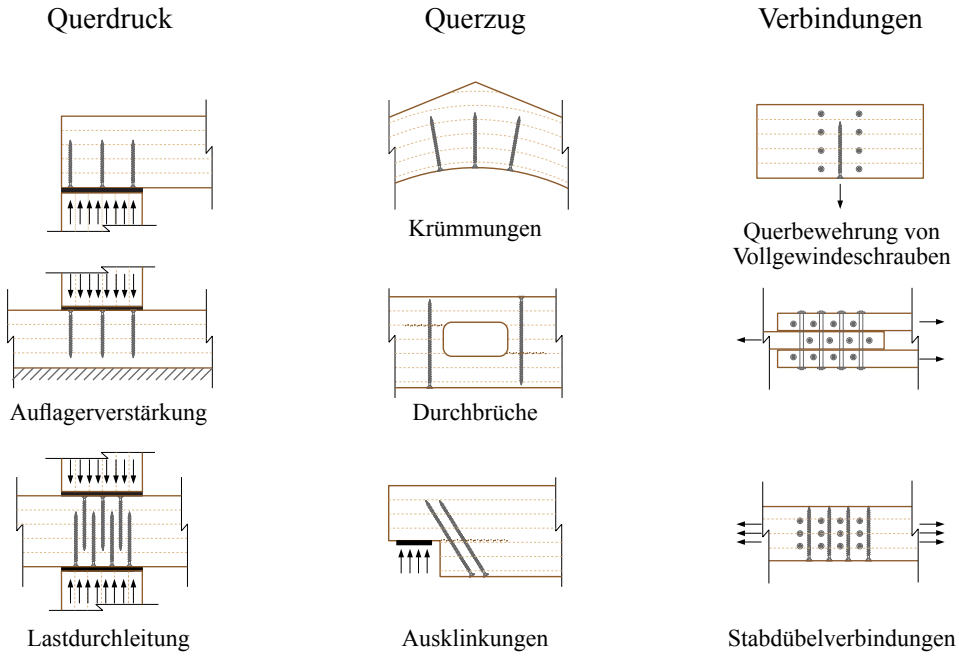


Abbildung 2.6: Einsatz von VGS zur lokalen Verstärkung von Bauteilen

Querzug/Querdruck

Die Ausführung von Auflagerbereichen, Durchbrüchen oder Ausklinkungen kommt in der Regel nicht ohne Verstärkungsmaßnahmen aus. In all diesen Fällen treten konzentrierte Druck- bzw. Zugkräfte auf, die quer zur Faserrichtung wirken. Ohne jegliche Maßnahmen stellen diese Bereiche die für die Bemessung maßgebenden Stellen dar, sodass die eigentliche Tragfähigkeit eines Querschnittes nicht vollends ausgenutzt werden kann. Die Anordnung von Vollgewindeschrauben bietet eine einfache und schnelle Methode diese Schwachstellen zu verstärken und so das lokale Versagen auszuschließen. Mit ihrer im Vergleich zum Holz viel

größeren Festigkeit und Steifigkeit, helfen die Vollgewindeschrauben dabei die entstehenden Querkräfte zu verteilen und so sicher aufzunehmen. Die Schrauben werden, unter Berücksichtigung von Mindestabständen, innerhalb des Querschnittes angeordnet; die erforderliche Anzahl kann dabei aus den vorhandenen Schnittgrößen ermittelt werden [33]. Die Anwendung von Vollgewindeschrauben zur Verstärkung von Holzträgern oder Decken zur Lastdurchleitung ist insbesondere für den mehrgeschossigen Holzbau von Interesse, in dem das Problem der Querpressung in den Kreuzungspunkten von Stützen mit Trägern oder Decken eine besondere Herausforderung darstellt. Auch hier können die Schrauben verwendet werden um lokal die erforderliche Querdruckfestigkeit des Bauteils sicherzustellen.
Ein weiterer Anwendungsfall ist die Verstärkung von gekrümmten Bindern [64]. Gegeben aus der Geometrie entstehen im oberen Bereich von gekrümmten Bindern, Querzugspannungen, die aufgrund der geringen Festigkeit des Materials quer zur Faserrichtung, zwingend maßgebend werden und so bei jeder Anwendung verstärkt werden müssen. Durch die Anordnung von Vollgewindeschrauben lassen sich die entstehenden Querzugspannungen effektiv aufnehmen. Im Vergleich zu anderen Maßnahmen, wie den eingeklebten Gewindestangen zeichnet sich diese Lösung auch hier durch ihre einfache und schnelle Verarbeitbarkeit aus.

Verstärkung von Verbindungen

Vollgewindeschrauben werden auch zur zusätzlichen Verstärkung von anderen metallischen Verbindungsmitteln verwendet. In solchen Fällen agieren die Vollgewindeschrauben zusätzlich zu den primär angeordneten Verbindungsmitteln. Hier sind in erster Linie mehrschichtige Stabdübelverbindungen zu nennen. Die Vollgewindeschrauben werden quer zur Wirkungsachse der Stabdübel angeordnet und tragen dazu bei, dem Lochleibungsversagen der Verbindung entgegenzuwirken [119]. Auch kann die zusätzliche Anordnung von Vollgewindeschrauben einen positiven Einfluss auf die Kriechverformungen aufweisen und so das Langzeitverhalten von einzelnen Vollgewindeschrauben oder von mit Vollgewindeschrauben ausgeführten Verbindungen zusätzlich verbessern [69], [94].

2.3.2 Fügen

Das Fügen von Bauteilen bildet eine weitere Kategorie der Einsatzmöglichkeiten von Vollgewindeschrauben. Diese werden entsprechend der Art und Richtung der auftretenden Schnittgrößen so angeordnet, dass sie die vorhandenen Kräfte entlang ihrer Längsachse von einem Bauteil in das nächste übertragen und eine kraftschlüssige Verbindung zwischen zwei oder mehreren Bauteilen herstellen. Durch den kontinuierlichen Verbund zwischen den Schrauben und dem Holz

zeichnen sich diese Verbindungen dadurch aus, dass die Kraft im Vergleich zu anderen Verbindungsmethoden (z.B. mit Stabdübeln) ohne Schlupf übertragen wird.

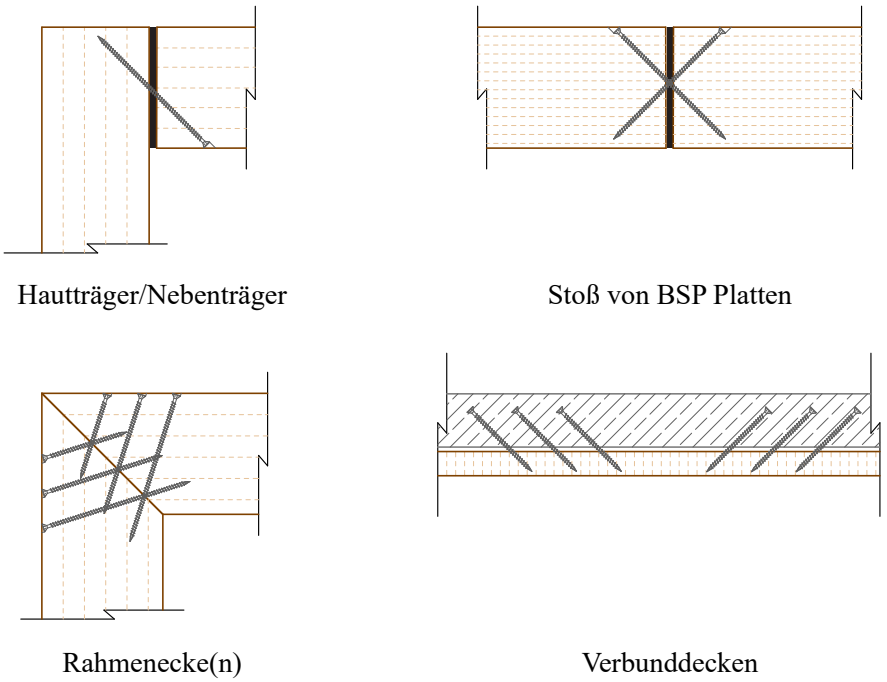


Abbildung 2.7: Einsatz von Vollgewindeschrauben zur Fügung von Bauteilen

Je nach Orientierung der Vollgewindeschrauben zur Faserrichtung innerhalb einer Fügung variiert die maximal übertragbare Kraft sowie die resultierende Steifigkeit. Über den Durchmesser der Schrauben sowie die Verbundlänge lässt sich die maximal übertragbare Kraft steuern. Bei ausreichender Einbindelänge können auch parallel zur Faserrichtung eingebrachte Vollgewindeschrauben eine Kraftübertragung ermöglichen was einen großen Spielraum bei der geometrischen Anordnung der zu verbindenden Bauteile mit sich bringt. Während der zulässige Faserwinkel von den meisten Herstellern zunächst auf eine Mindestneigung von 15° beschränkt war, sind die bautechnischen Zulassungen mittlerweile angepasst worden, sodass auch faserparallele Verschraubungen erlaubt sind. Die Verbindungen zeichnen sich durch eine schnelle und einfache Verarbeitbarkeit aus; eine kraftschlüssige Fügung kann problemlos auch auf der Baustelle erfolgen. Ebenfalls im Blick auf den Brandschutz bieten die Verbindungen Vorteile, da die Verbindungsmittel innerhalb der Holzquerschnitte liegen und so bei einer Brandeinwirkung durch diese geschützt sind. Die im Folgenden aufgeführten Beispiele bieten eine Übersicht über Einsatzgebiete für die Verwendung von Vollgewindeschrauben zur Fügung von Bauteilen.

Hauptträger/Nebenträger

Ein oft eintretender Fall ist der Anschluss eines Nebenträgers an den Hauptträger. Die Vollgewindeschrauben können dabei von unten durch den Nebenträger schräg, in der Regel unter einem Winkel von 45°, in den Hauptträger eingedreht werden, sodass die auf den Nebenträger einwirkende Kraft über eine Zugbeanspruchung der Schrauben in den Hauptträger eingeleitet wird. Alternativ können die Vollgewindeschrauben kreuzweise von oben eingebracht werden. Während die erste Variante als torsionsweich einzustufen ist, sichert das versetzt kreuzweise Anordnen der Schrauben auch gegen ein Verdrehen des Nebenträgers.

Stoß von BSP Platten

Das Aufkommen von flächigen massiven Bauteilen aus Holz in Form von kreuzweise verleimten Platten (Brettsperrholz, BSP) stellt einen entscheidenden Meilenstein in der Entwicklung des modernen Holzbaus dar. Mit solchen Platten können horizontale Deckenplatten und vertikale Wandscheiben zusammenhängend ausgebildet und aussteifend für eine Gebäudestruktur herangezogen werden [43]. Eine Grundvoraussetzung bei der Ausbildung solcher Platten bzw. Scheiben ist die sichere Kraftübertragung entlang der Fugen. Die Verwendung von Vollgewindeschrauben liefert auch hier eine einfache und praktikable Lösung. Die Vollgewindeschrauben werden unter einem Winkel mit einem definierten Abstand abwechselnd von beiden Seiten entlang eines Stoßes eingeschraubt und verbinden so die einzelnen Elemente einer Decke bzw. einer Wand zu einer zusammenhängenden Scheibe.

Rahmenecken

Der Einsatz von Vollgewindeschrauben zur Fügung von großformatigen, biegesteifen Rahmenecken wurde in [107], [109], [67] gezeigt. Die Brettschichtholz Querschnitte wurden in einem 45° Winkel angeschnitten und anschließend mit langen Vollgewindeschrauben gefügt. Zum Einsatz kamen unterschiedliche Schraubenanordnungen, angepasst an die Ausbildung des Eckmomentes aus der Belastung (siehe Abbildung 2.8, b)). Die Ergebnisse der durchgeführten Projekte zeigen das Potenzial und die Vorteile dieser Fügungsmethode im Vergleich zu den konventionellen Methoden wie beispielsweise dem Dübelkranz, einer Keilzinkung oder einer Verbindung mit eingeschlitzten Stahlblechen. Neben der erhöhten Tragfähigkeit zählen dazu die einfache Montage, die ohne Weiteres auf der Baustelle durchgeführt werden kann und somit keine Einschränkung in Bezug auf die Transportfähigkeit von Rahmenecken darstellt sowie das saubere optische Erscheinungsbild der Verbindung.
Insbesondere bei den Anwendungen, bei denen lange Schrauben in enger Anordnung zum Einsatz kommen, spielt die exakte Positionierung eine wichtige Vor-

aussetzung. Die am Lehrstuhl für Tragkonstruktionen durchgeführten Versuche an den Rahmenecken und die in diesem Zusammenhang aufgetretenen Schwierigkeiten der exakten Positionierung der Schrauben waren ausschlaggebend zur Etablierung der Forschungsprojekte zum pyrolytischen Vorbohren mittels Laserstrahlung.

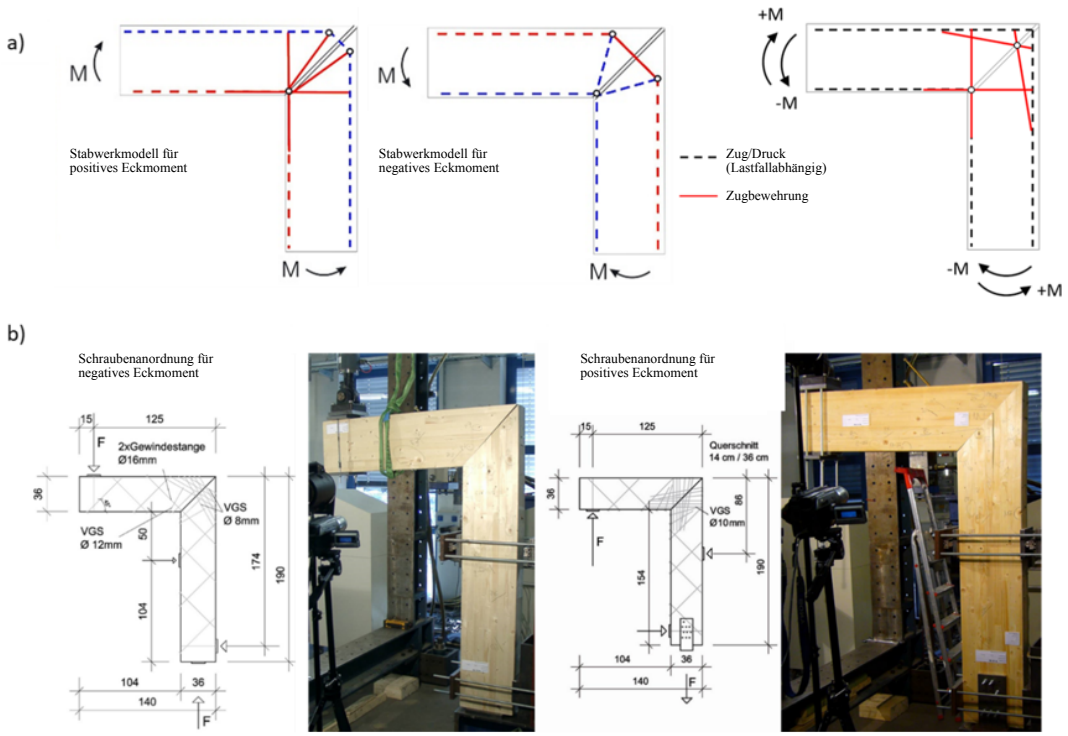


Abbildung 2.8: Fügung von biegesteifen Rahmenecken mit Vollgewindeschrauben; a) Stabwerkmodelle für unterschiedliche Anordnungen; b) Schraubenkonfigurationen und Versuchsdurchführung [109]

Verbunddecken

Holz-Beton-Verbunddecken sind hybride Deckensysteme bei denen eine Betondruckplatte, angeordnet im Druckbereich, mit einer darunter liegenden Holzlage bestehend aus linearen oder flächigen Elementen kombiniert wird. Diese Systeme stehen als Fertigteilvarianten zur Verfügung oder können auch mit Ortbeton ausgeführt werden [82]. Neben den statischen Vorteilen, zu denen eine optimierte Ausnutzung der Materialeigenschaften gehört, zeichnen sich die Deckensysteme insbesondere durch ihre guten bauphysikalischen Eigenschaften aus und erlauben eine praktikable Lösung im Hinblick auf Schall- und Brandschutz [8]. Zur Herstellung des Schubverbundes zwischen den Holzbalken bzw. der Holzplatte und der

Betonplatte kommen unterschiedliche Lösungen zum Einsatz. Neben kraftschlüssigen Formschlussverbindungen wie Kerven oder Versätzen kommen auch metallische Verbindungsmittel wie Stahldübel oder übliche bzw. speziell angepasste Vollgewindeschrauben zum Einsatz [77], [23]. Im Vergleich zu üblichen Vollgewindeschrauben unterscheiden sich die speziellen Schubverbinder vor allem durch eine abweichende Gewindegestaltung im oberen Bereich der Schraube, die für einen optimierten Verbund mit dem Beton angepasst ist [66], [65]. Die Schrauben sind ebenfalls selbstbohrend und können direkt in das Holz eingebracht werden.

2.3.3 Bewehren

Durch die systematische Anordnung von Vollgewindeschrauben lassen sich Tragelemente bewehren [107]. Ähnlich einer Bewehrung im Stahlbetonbau fungieren die innerhalb des Querschnitts angeordneten Vollgewindeschrauben als lokale Versteifungen der Holzmatrix, die zu einem konzentrierten Lastabtrag führen.

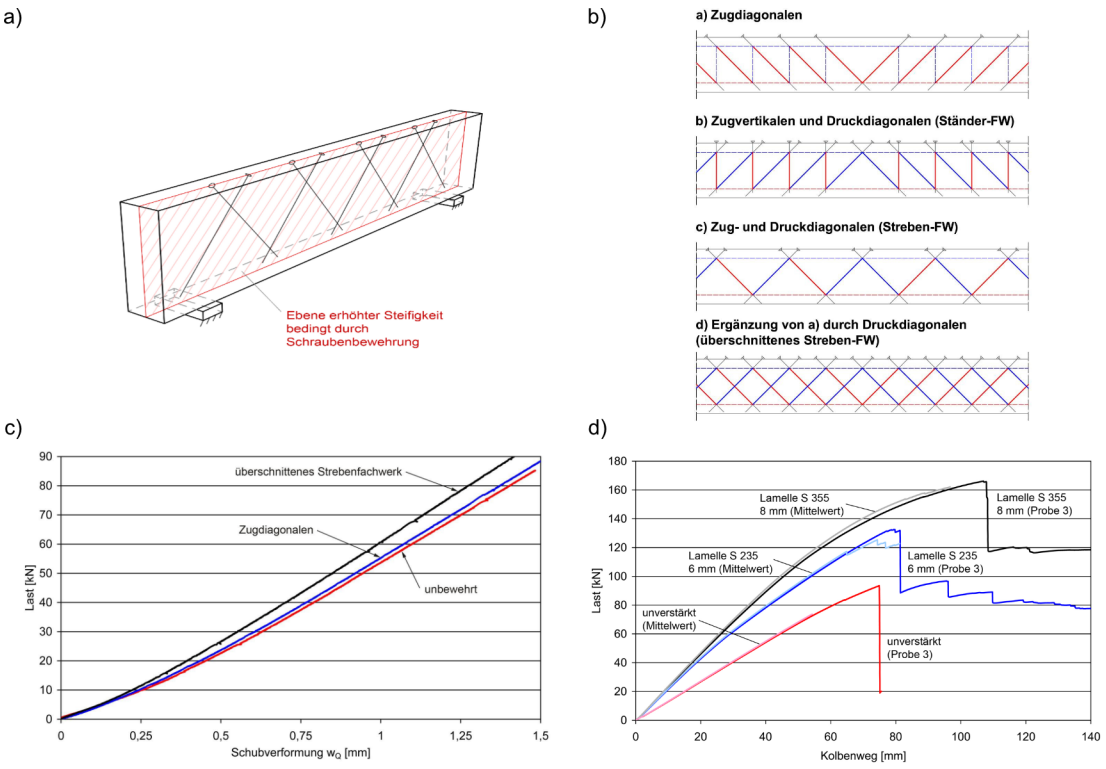


Abbildung 2.9: Bewehrung von Bauteilen mit Vollgewindeschrauben; a) Prinzipskizze, b) Anordnung von Vollgewindeschrauben im Querschnitt; c) Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlicher Schraubenanordnungen, d) Erhöhung der Tragfähigkeit durch die Anbringung einer Stahllamelle [109]

Durch unterschiedliche Anordnung der Schrauben (siehe Abbildung 2.9) in der Mittelachse eines Trägers lässt sich im Querschnitt eine Ebene höherer Steifigkeit herstellen, die einen positiven Einfluss auf die Steifigkeit aber auch Tragfähigkeit eines solchen Bauteils aufweist [109]. Zusätzlich können die Schrauben mit der Anbringung einer außenliegenden Stahllamelle kombiniert werden. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten Untersuchungen zeigen den Einfluss dieser Maßnahme deutlich.

2.3.4 Ertüchtigen

Durch das einfache Einbringen sind Vollgewindeschrauben auch für eine nachträgliche Anwendung bei bereits errichteten Tragwerken geeignet. So finden sich unterschiedliche Beispiele des Einsatzes von Vollgewindeschrauben für eine nachträgliche Ertüchtigung oder Instandsetzung einzelner Bauteile oder zusammenhängender Tragwerke. Je nach Anwendungsfall dienen die Schrauben als zusätzliche Verstärkung lokaler Schwachstellen, zur Befestigung und Verankerung von nachträglich angebrachten Holz- oder Stahlelementen, zur Ertüchtigung von Zimmermannsverbindungen oder zur Schließung einzelner Risse. Bei bestehenden Anforderungen an den Denkmalschutz, bieten Vollgewindeschrauben eine minimalinvasive Lösung, mithilfe derer die Tragfähigkeit bestehender Tragwerke wiederhergestellt werden kann, ohne den Bestand wesentlich zu verändern. Abbildung 2.10 zeigt Beispiele des Einsatzes von Vollgewindeschrauben zur Ertüchtigung bestehender Tragwerke.



Abbildung 2.10: Beispiele zur Instandsetzung und Ertüchtigung von Bauteilen mit Vollgewindeschrauben [19]

Das erste Bild (links) zeigt eine nachträgliche Schubverstärkung einer Pfette im Auflagerbereich durch diagonal eingebrachte Vollgewindeschrauben. Neben dem Versagen von unverstärkten Durchbrüchen und Ausklinkungen zählen Schäden in Auflagebereichen zu den am häufigsten vorkommenden Fällen bei bestehenden

Holztragwerken [19]. In der Regel kündigt sich die Überschreitung der Schubspannungen durch das Auftreten von Schubrissen an. Durch die Querarmierung mithilfe der Vollgewindeschrauben können die Risse geschlossen und die erforderliche Schubfestgikeit hergestellt werden [74]. Das zweite Bild (mitte) zeigt die Trägeraufdopplung eines bestehenden Trägers. Insbesondere bei Sanierungsmaßnahmen mit einer Umnutzung von Flächen, können so die erforderlichen Tragfähigkeiten gewährleistet werden. Das gleiche Prinzip wird bei einer Sparrenaufdopplung (Abbildung 2.10, rechts) angewendet, wenn beispielsweise Dächer für höhere Lasten aus Dämmung oder Photovoltaikanlagen ertüchtigt werden. Die Querschnittserhöhung kann dabei über die gesamte oder eine Teillänge eines Träger vorgenommen werden. Dabei wird der zusätzliche Trägerquerschnitt von unten oder oben an den bestehenden Träger mithilfe von Vollgewindeschrauben angebracht. Die typische Anordnung der Vollgewindeschrauben nach der Fachwerkanalogie in einem 45° Winkel, sorgt für eine sichere Übertragung der Schubkräfte zwischen den beiden Querschnitten.

2.4 Tragverhalten von Vollgewindeschrauben

Im Vergleich zu anderen metallischen stiftförmigen Verbindungsmitteln des Holzbaus, wie beispielsweise den Nägeln oder Stabdübeln, bei denen die Kraftübertragung über eine Scher- und Biegebeanspruchung der Verbindungsmittel erfolgt, tragen Vollgewindeschrauben Beanspruchungen in axialer Richtung ab. Aus dieser Tatsache resultiert eine besondere Konstruktionsmethodik, bei der die Verbindungsmittel so im Holz angeordnet werden müssen, dass sie bei der Beanspruchung der Bauteile, die sie verbinden oder verstärken, eine Beanspruchung entlang ihrer Achse erfahren. Die Schrauben schneiden sich durch das spezielle Gewinde in das Holz ein und bilden einen Formschluss mit der umgebenden Holzmatrix, wodurch die Kraftübertragung in das Holz über die gesamte Länge der Schraube erfolgt. So kann die hohe Zugfestigkeit der Schrauben optimal ausgenutzt und die zu übertragende Kraft durch die Einbindelänge gesteuert werden.
Neben den Materialkennwerten wie der Stahlfestigkeit der Schrauben oder der Rohdichte des Holzes, die einen direkten Einfluss auf den Verbund aufweisen, ist die Verbundwirkung und damit die maximal übertragbare Kraft von weiteren Parametern abhängig.

Die Einbaugeometrie weißt einen großen Einfluss auf das Tragverhalten der Schraube auf. Ja nach dem Winkel zwischen der Schraubenachse und dem Faserverlauf des Holzes (Schrauben-Faser Winkel) unterscheidet sich die grundsätzliche Einleitung der Kräfte von der Schraube in das Holz. Bei einer faserparallelen

Verbindung werden die Fasern entlang ihrer Längsrichtung einer Scherbeanspruchung ausgesetzt, die Lasteinleitung in das umgebende Holz erfolgt unmittelbar an der Grenzfläche des Schraubendurchmessers zum Holz. Im orthogonalen Fall ($\alpha = 90\,°$) werden die röhrenförmigen Mikroquerschnitte der Holzfasern auf Biegung beansprucht. Dadurch kann ein größerer Bereich um die Schraube herum aktiviert werden, sodass eine größere Lastausbreitung erfolgt.

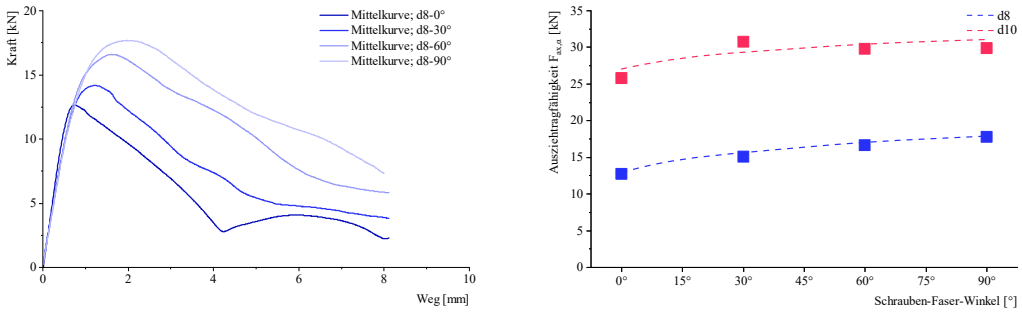


Abbildung 2.11: links: experimentell ermittelte Last-Verformungskurven von Vollgewindeschrauben für unterschiedliche Schrauben-Faser Winkel, Schraubendurchmesser d8, Einbindelänge $l_{eff} = 15d$; rechts: Ausziehtragfähigkeiten von Vollgewindeschrauben für zwei Schraubendurchmesser (d8 und d10) abhängig vom Schrauben-Faser Winkel

Das Tragverhalten einzelner Schrauben kann durch die Last-Verformungskurven charakterisiert werden, welche sich aus einem Ausziehversuch ergeben [104]. Abbildung 2.11 zeigt die aus mehreren durchgeführten Ausziehversuchen gemittelten Last-Verformungskurven von Schrauben in Abhängigkeit des Faserwinkels. Grundsätzlich zeigen die Kurven ähnliche Verläufe, unterscheiden sich jedoch in den einzelnen Teilbereichen durch unterschiedliche Ausprägungen. Zunächst zeigt sich ein annähernd linear ansteigender Bereich bis zum Erreichen eines Hochpunktes und Plateaus, innerhalb dessen die maximale Tragfähigkeit der Verbindung erreicht wird. Je nach Schrauben-Faser Winkel ist die Ausprägung des Plateaus unterschiedlich breit, was auf die Versagensmechanismen im Inneren der Holzmatrix zurückzuführen ist. Während sich bei einer faserparallelen Verbindung das Versagen durch eine Überschreitung der Scherbeanspruchung spröde d.h. plötzlich erweist, werden im orthogonalen Fall die Fasern zunächst gebogen, wodurch höhere Verformungen einhergehen. Nach dem Erreichen des Punktes der maximal übertragbaren Kraft, der die Ausziehtragfähigkeit der Verbindung kennzeichnet, folgt ein stetig abnehmender Verlauf der Last-Verformungskurven, bei dem die Schraube langsam aus dem Holz herausgezogen wird. Die dabei verbleibende übertragbare Kraft ist auf die Reibung zurückzuführen.

Aufgrund der unterschiedlichen Krafteinleitung und Versagensmechanismen infolge des Faserwinkels ergeben sich Unterschiede auch in Bezug auf die Steifigkeiten und Tragfähigkeiten der Verbindung. Faserparallele Verschraubungen weisen die höchsten Steifigkeit auf, bei gleichzeitig geringsten maximalen Tragfähigkeiten. Mit steigendem Winkel überlagern sich die Mechanismen, sodass die Steifigkeiten abnehmen und die Tragfähigkeiten ansteigen. Die Verbindung mit orthogonal eingedrehten Schrauben ($\alpha = 90°$) zeigt somit die höchste Duktilität bei höchster Ausziehtragfähigkeit.

Die maximale übertragbare Kraft lässt sich durch die Wahl des Schraubendurchmessers sowie die Einbindelänge steuern. Die Vollgewindeschrauben der meisten Hersteller sind dabei mit einem Außendurchmesser von 8, 10 oder 12 mm verfügbar. Der Anteil des Schaftes an dem Gesamtdurchmesser der Schraube liegt, je nach Schraubendurchmesser, bei 40-60 %. Mit größerem Schraubendurchmesser steigt der Gewindeanteil, sodass der Verbund über eine höhere Fläche erfolgen kann, was in höheren übertragbaren Kräften resultiert. Bei einer axialen Beanspruchung der Schraube verteilt sich die zu übertragende Kraft über die gesamte Länge der Schraube und kann somit über die Einbindelänge gesteuert werden. Die Kraft kann soweit gesteigert werden, bis die Zugfestigkeit der Schraube selbst erreicht wird und nicht mehr der Verbund, sondern das Versagen der Schraube (Stahlversagen) maßgebend wird.

Bemessung von Verbindungen mit Vollgewindeschrauben

Die Verwendung von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben ist nicht normativ festgeschrieben und wird durch produktspezifische Zulassungen wie der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder der Europäischen Technischen Bewertung (ETA) geregelt. Diese beinhalten herstellerspezifische Vorgaben für die Anwendung und Bemessung der Schrauben. Viele Hersteller bieten zusätzlich eigene Softwarelösungen an, in denen die in den Zulassungen formulierten Regeln implementiert sind und mit denen sich typische Verbindungen auslegen, bemessen und nachweisen lassen.
Die Zulassungen berufen sich dabei im Wesentlichen auf die im Eurocode 5 aufgeführten Methoden zur Bestimmung des Ausziehwiderstands sowie der Steifigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln. Für axial beanspruchte Schrauben bietet der Eurocode 5 einen Ansatz zur Ermittlung der Ausziehfestigkeit einzelner Schrauben sowie von Schraubenverbindungen mit mehreren Schrauben. Hierfür wird zunächst die charakteristische Ausziehfestigkeit einer Schraube, unter Berücksichtigung des Schraubendurchmessers d, der Einbindelänge l_{eff} sowie der

Rohdichte des Holzes ρ_k, rechtwinklig zur Faserrichtung durch folgende Gleichung ermittelt:

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k \tag{2.3}$$

Ausgehend von dieser Gleichung berechnet sich der charakteristische Wert des Ausziehwiderstands einer Schraubenverbindung bei Beanspruchung in Schraubenachse unter einem Winkel α mit:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1.2 \cdot cos^2(\alpha) + sin^2(\alpha)} \tag{2.4}$$

dabei sind:

n_{ef}	die wirksame Anzahl von Schrauben
l_{ef}	die Eindringtiefe des Gewindeteils
k_d	der Abminderungsfaktor für Schrauben mit einem Durchmesser $d < 8mm$
$f_{ax,k}$	der charakteristische Wert der Ausziehfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung

Für die Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit einer Verbindung wird der Verschiebungsmodul K_{ser} ermittelt. Hier wird seitens der Normung ebenfalls keine spezielle Vorgabe für Vollgewindeschrauben genannt und es wird die gleiche Formel wie auch für andere stiftförmige Verbindungsmittel, wie beispielsweise Stabdübel oder Nägel, verwendet.

$$K_{ser} = \frac{\rho^{1,5} \cdot d}{23} \tag{2.5}$$

Der genannte Verschiebungsmodul wird lediglich ausgehend von der Rohdichte des Holzes sowie dem Durchmesser der Schraube je Verbindungsmittel berechnet. Die Gesamtsteifigkeit einer Verbindung ergibt sich durch eine Summierung über die Anzahl der verwendeten Verbindungsmittel. Insbesondere bei der Bestimmung der Steifigkeit sind unterschiedliche Ansätze vorhanden; die genaue Bestimmung und entsprechende Berechnung der Steifigkeit gehört zu aktuellen Forschungsfragen des Holzbaus. Für eine umfassende Übersicht der verschiedenen Ansätze wird auf [15], [97] verwiesen.

Die für das Jahr 2025 angekündigte neue Version des Eurocodes 5 [40], welche zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit in einer Entwurfsfassung vorliegt,

beinhaltet einen neuen Umgang mit Vollgewindeschrauben, bei dem die neuesten Erkenntnisse der letzten Jahre einfließen [60], [30],[29],[31],[103]. In Bezug auf die Ausziehtragfähigkeit von Verbindungen mit Vollgewindeschrauben sind neue Ansätze aufgeführt, die auch für Winkel kleiner 30°, also auch für paralleles Verschrauben angewendet werden dürfen. Auch für die Bestimmung der Steifigkeit wird ein detaillierterer Ansatz aufgeführt. Der zuvor vorhandene ist immer noch enthalten, zählt aber nur für Dübel. Für Vollgewindeschrauben wird alternativ die Berechnung eines Verschiebungsmoduls $K_{SLS,v}$ quer sowie eines Verschiebungsmoduls in Axialrichtung $K_{SLS,ax}$ vorgeschlagen. Bei schräger Einschraubung können beide Anteile überlagert werden, sodass die Steifigkeit unter Berücksichtigung des Einschraubwinkels bestimmt werden kann. Weiterhin gilt die Einbeziehung von Bestimmungen zur Ausführung von Verstärkungen mit Vollgewindeschrauben als eine wesentliche Änderung der Überarbeitung des Eurocodes 5. Der veröffentlichte Entwurf enthält einen Abschnitt zur Anwendung von Vollgewindeschrauben für die Verstärkung von druckbeanspruchten Bauteilen, gewölbter oder gekrümmter Balken, Ausklinkungen, Durchbrüchen oder Stabdübelverbindungen. Je nach Anwendungsfall werden spezielle Vorgaben zur Ausführung der Verstärkung definiert und konkrete Vorgaben zur Berechnung der Tragfähigkeit des verstärkten Bereichs genannt.

2.5 Übersicht der Forschungstätigkeiten

Die steigende Verbreitung von Vollgewindeschrauben im Ingenieurholzbau ist auch auf die intensiven Forschungsarbeiten zurückzuführen, die innerhalb der letzten knapp 20 Jahre entstanden sind und immer noch einen aktiven eigenen Forschungszweig des Ingenieurholzbaus darstellen. Im Rahmen dieses Bereiches wurden und werden von unterschiedlichen Forschungsgruppen Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten und vor allem dem Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben durchgeführt. Trotz der bereits erfolgten Weiterentwicklungen, wird der Bereich weiterhin erforscht. Die im Folgenden dargestellte Übersicht liefert eine Zusammenfassung der wesentlichen Arbeiten zu Vollgewindeschrauben, gegliedert nach den Akteuren.

Karlsruher Institut für Technologie

Die Forschergruppe am *Institut für Holzbau und Baukonstruktionen* am *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* beschäftigt sich seit dem Aufkommen von Vollgewindeschrauben mit der Erforschung ihres Einsatzes. Die ersten Arbeiten thematisieren seit den frühen 2000er Jahren insbesondere das Verstärken [10], [9] [72] sowie die Möglichkeiten der Fügung von Bauteilen [13]. Anschließend wird gezielt die Tragfähigkeit und Steifigkeit sowohl von einzelnen Schrauben als auch von Schraubenverbindungen untersucht [50], [15]. Weitere Forschungsschwerpunkte waren das Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen der Schrauben [114], [113] sowie Phänomene wie beispielsweise das Blockscheren von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben [14]. In aktuellen Projekten wird die Entwicklung von mit Vollgewindeschrauben gefügten weitspannenden Fachwerksystemen sowie auch die Analyse von Lageimperfektionen von selbstbohrenden Schrauben in Holz durchgeführt [51], [7].

Technische Universtität Graz

Am *Institut für Holzbau und Holztechnologie* der *TU Graz* etablierte sich im Bereich der Verbindungstechnik ein Forschungsschwerpunkt zu axial beanspruchten Verbindungsmitteln, insbesondere Vollgewindeschrauben. So liefert beispielsweise Ringhofer eine umfassende Abhandlung zur axialen Tragfähigkeit von Vollgewindeschrauben in Brettschicht- und Brettsperrholz, in welcher die Berücksichtigung vieler Parameter thematisiert wird. Auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen beinhaltet die Arbeit ebenfalls die Formulierung eines Bemessungskonzepts [97]. Ein weiteres Forschungsthema ist die Untersuchung des Einflusses des Ermüdungsverhaltens von Holz auf die Ausziehtragfähigkeit von Schrauben [62]. Neben dem klassischen Nadelholz wird von der Forschungsgruppe auch parallel der Einsatz von Vollgewindeschrauben in Laubholz untersucht [18], [17]. In ak-

tuellen Untersuchungen wird in Zusammenhang mit dem Life-Cycle-Assessments die Berechnung der erforderlichen Energie zum Eintrag von Vollgewindeschrauben thematisiert [52].

RWTH Aachen

Seit 2006 wird am *Lehrstuhl für Tragkonstruktionen* der *RWTH Aachen* der Einsatz von Vollgewindeschrauben im Ingenieurholzbau untersucht [105]. Die ersten Arbeiten thematisierten die Möglichkeiten des systematischen Bewehrens von Brettschichtholzträgern sowie die Fügung von großformatigen Rahmenecken [108], [107], [109]. Anschließend wurde mithilfe photogrammetrischer Aufnahmen von Pull-Out Versuchen das Dehnungsverhalten beim Lasteintrag in die Holzmatrix gezeigt [3], [4], [5], [104]. Aufbauend auf diesen Ergebnissen liefert Mazen einen ersten Ansatz der Formulierung eines Verbundmodells für Vollgewindeschrauben mit langen Einbindelängen [2]. Anlehnend an Verbundmodelle des Stahlbetonbaus enthält die Arbeit einen Ansatz zur Berechnung der Dehnungsverteilung entlang der Schraube und somit einer spannungsbasierte Darstellung. Neben den Projekten zum pyrolytischen Vorbohren wird aktuell das Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben unter Langzeitbeanspruchung untersucht. Die experimentellen Untersuchungen in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen liefern Daten zum Verformungs- und Kriechverhalten einzelner Schrauben [68], [94].

Technische Universität München

Am *Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion* der *Technischen Universität München* entstanden Arbeiten zur Anwendung von Vollgewindeschrauben als Verstärkungselemente in Brettschichtholz und Brettsperrholz. Dabei wurden unterschiedliche Fälle wie die Schubverstärkung gesamter Träger [34], die Verstärkung punktgestützter Brettsperrholzplatten [80], [78], [79] oder lokale Verstärkungsmaßnahmen für Ausklinkungen, Auflager und Durchbrüche [32], [26] behandelt. Im Fokus der Arbeiten stehen insbesondere die Bemessung und Auslegung der verstärkten Bereiche, sodass die Ergebnisse sich in den aktuellen Anpassungen des Eurocodes 5 wiederfinden [60], [30], [31].

Weitere Themen waren das Brandverhalten von mit Vollgewindeschrauben ausgeführten Hauptträger-Nebenträger Anschlüssen [61], [54] sowie Untersuchungen zum Schwingverhalten von mit Vollgewindeschrauben verstärkten Brettschichtholzträgern [27].

Technische Universität Braunschweig

Von der Forschungsgruppe der *Technischen Universität Braunschweig* wurde in einem gemeinsamen Projekt mit der Universität Stuttgart das Ermüdungsverhalten von Verbindungen und Verstärkungen mit selbstbohrenden Vollgewindeschrauben

unter lateraler und axialer Beanspruchung untersucht [73]. Aktuell ist laut den Zulassungen der Hersteller der Einsatz auf statische Beanspruchungen begrenzt, was die Anwendung von Vollgewindeschrauben beispielsweise im Holzbrückenbau oder in Windenergieanlagen einschränkt. Zur Einschätzung des Ermüdungsverhaltens beinhalten die Arbeiten Versuche an einzelnen, ausschließlich axial beanspruchten Vollgewindeschrauben [85], [87] sowie an mit Vollgewindeschrauben gefügten Holz-Holz Verbindungen [86]. In einem aktuell laufendem Projekt wird das Ermüdungsverhalten selbstbohrender Vollgewindeschrauben zum Anschluss von Stahlblechen an Brettsperrholzbauteile untersucht [99], [112].

Technische Universität Kassel

Zur genaueren Bestimmung der Spannungsverteilung von Vollgewindeschrauben beim Ausziehversuch wurde am Fachbereich *Bauwerkserhaltung und Holzbau* der *Technischen Universität Kassel* die Sonderanfertigung einer Vollgewindeschraube vorgestellt. Durch im Inneren des Schraubenschaftes angeordnete faseroptische Sensoren können die Axialkräfte entlang der Schraube während ihrer Beanspruchung gemessen werden. Die Ergebnisse zeigen insbesondere den Einfluss des Schrauben-Faser Winkels auf die Spannungsverteilung entlang der Schraubenachse [24]

Nicht deutschsprachiges Ausland

Die Forschung an Vollgewindeschrauben, welche immer noch aktuell ist und zahlreiche Fragestellungen bietet, hat sich auch außerhalb des deutschsprachigen Raumes ausgeweitet und wird weltweit von unterschiedlichen Akteuren in unterschiedlichen Ländern bearbeitet. Zu diesen zählen insbesondere Kanada [43], [81], Großbritannien [43], Norwegen [103], Brasilien [20], Tschechien, Italien [77], USA [65], [81], Korea [91], und China [102], [76], [22], [118]. Die Akteure beschäftigen sich mit ähnlichen Fragestellungen rund um die Anwendungsmöglichkeiten sowie das Tragverhalten von Vollgewindeschrauben. Je nach Standort spezialisieren sich die Themen auf die lokal verfügbaren Holzarten.

Kapitel 3

Vorbohren für Vollgewindeschrauben

Das Vorbohren von Führungslöchern hat einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die Positionierungsgenauigkeit als auch auf das Verbundverhalten von Schrauben. Dieses Kapitel zeigt eine Übersicht des aktuellen Wissensstands zum Vorbohren für Holzschrauben allgemein und Vollgewindeschrauben im Speziellen. Es werden die Grundlagen des mechanischen Vorbohrens beschrieben und als Alternative dazu das neu entwickelte, pyrolytische Bohrverfahren mittels Laserstrahlung vorgestellt. Nach einer Einleitung zur Funktionsweise und den Anwendungsbereichen der Lasertechnik werden die speziell zur Herstellung von tiefen Führungslöchern entwickelten Prozesse vorgestellt und erläutert.

3.1 Stand der Technik zum Vorbohren von Schrauben

Erste Belege zu systematischen Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Schrauben in Holz finden sich in den 1920er Jahren. In den umfangreichen Untersuchungen von Fairchild (1926) [48], bei denen über 10.000 Ausziehversuche von Holzschrauben an unterschiedlichen Holzsorten durchgeführt wurden, wird der Vorbohrdurchmesser als ein wichtiger Einflussparameter für den Ausziehwiderstand identifiziert. Nach Fairchild sollte für eine Erhöhung des Ausziehwiderstands der Vorbohrdurchmesser optimalerweise 70 % des Gewindekerndurchmessers für Weichhölzer und 90 % des Gewindekerndurchmessers für Harthölzer betragen.
Zu ähnlichen Erkenntnissen gelangen Newlin und Gahagan 1938 [84]. Abhängig

von der Holzart nennen sie Werte von 40 % – 85 % des Schraubendurchmessers als den optimalen Vorbohrdurchmesser zur Maximierung des Ausziehwiderstands. Der Rechenansatz von Eckelman [45] aus dem Jahr 1988 für die Ermittlung des Ausziehwiderstands für Holzschrauben in MDF-Platten sieht bei Vorliegen des optimalen Vorbohrdurchmessers eine Erhöhung des Ausziehwiderstands um 13 % vor. Dabei entspricht der optimale Durchmesser dem Schaftdurchmesser der Schraube.
Die genannten Untersuchungen beziehen sich zunächst auf klassische Holzschrauben. Mit dem Aufkommen der Vollgewindeschrauben sind insbesondere die Themen zum Verbundverhalten Gegenstand der Forschungstätigkeiten (vgl. Abschnitt 2.5). Das Vorbohren spielt eine bislang eher untergeordnete Rolle, wird jedoch von einigen Akteuren thematisiert:

In der Arbeit von Reichelt [96], die den Einfluss des Schichtenaufbaus von Brettschicht- und Brettsperrholz auf das Tragverhalten von Vollgewindeschrauben untersucht, werden unter anderem auch vorgebohrte und nicht vorgebohrte Verbindungen mit Vollgewindeschrauben vergleichend geprüft. Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss des Vorbohrens auf die Steifigkeit der Verbindungen, wobei die nicht vorgebohrten Schrauben, je nach Schichtenanzahl, einen bis zu 16% höheren mittleren Verschiebungsmodul $K_{u,mean}$ aufweisen. Der Einfluss des Vorbohrens auf den Ausziehwiderstand wird in der Arbeit nicht thematisiert.
In der Arbeit von Ringhofer wird der Vorbohrdurchmesser ebenfalls als ein Parameter für das Verbundverhalten untersucht [97]. Im Rahmen einer Versuchsreihe wurde für einen Schraubendurchmesser (8 mm) der Vorbohrdurchmesser zwischen 5 mm und 7.5 mm variiert und der Einfluss in Ausziehversuchen beurteilt. Es wird berichtet, dass kein signifikanter Einfluss des Vorbohrdurchmessers auf die Ausziehtragfähigkeit festgestellt werden konnte. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass eine endgültige Aussage weiterführende Untersuchungen mit größerem Versuchsumfang erfordern.
Die Arbeit von Zhang [119] beinhaltet eine Versuchsreihe von Einschraubversuchen mit Vollgewindeschrauben ohne und mit initialer, mechanischer Vorbohrung in der Größe von 90 % des Schaftdurchmessers der Schraube. Es wird festgehalten, dass sich die Vorbohrung auf das Einschraubdrehmoment auswirkt und im Mittel in einer Reduzierung von bis zu 14 % resultiert. Es werden auch aufgeschnittene Probekörper gezeigt, an denen der Verlauf der Schraube deutlich zu erkennen ist. Es wird die Vermutung aufgestellt, dass die Krummheit der Schraube ebenfalls einen Einfluss auf das Tragverhalten aufweisen könnte, dieses Thema steht jedoch nicht im Fokus der Untersuchungen und wird nicht weiter behandelt.
Aussagen über die Auswirkungen des Vorbohrens auf das Verlaufen der Schrauben oder Empfehlungen von Vorbohrtiefen um das Verlaufen zu vermeiden oder

zu reduzieren sind in keinen der genannten Untersuchungen enthalten. Dabei ist das Problem der exakten Positionierung sowohl in der Praxis als auch in der Forschungslandschaft bekannt und wird von den Akteuren immer wieder benannt.

So wird beispielsweise von Blaß in [15] berichtet, dass aufgrund des Verlaufens des Bohrers bei der Durchführung der Vorbohrungen es in mehreren Versuchskörpern zu einer Kollision der anschließend eingebrachten Schrauben kam. Die Flanken der Schrauben wurden dabei deutlich beschädigt, was letztlich in einer Reduzierung der axialen Tragfähigkeit resultierte. Auch in anderen Arbeiten der Forschungsgruppe am Karlsruher Institut für Technik wird das Problem benannt und seit 2018 auch als eigenständiges Thema bearbeitet [51]. In dem aktuellen Projekt *Lageimperfektionen von selbstbohrenden Schrauben in Holz und Holzwerkstoffen* wird das Thema der exakten Positionierung explizit aufgegriffen [6], [7]. Im Rahmen des Projektes werden systematische Untersuchungen durchgeführt, die das Problem des Verlaufens von Schrauben beleuchten und Methoden zur Reduzierung von Lageimperfektionen untersuchen. Dabei stehen die konventionellen Methoden des mechanischen Vorbohrens oder der Verwendung von Führungsschienen im Vordergrund (vgl. Abbildung 3.1). Die durchgeführten Einschraubversuche berücksichtigen unterschiedliche Holzwerkstoffe als auch Ausführungen von Schrauben (Teil- und Vollgewinde) mit verschiedenen Spitzen. Aus der Auswertung der gemessenen Abweichungen wird festgehalten, dass eine geradlinig ausgeführte Pilotbohrung die effektivste Maßnahme zur Reduzierung des Verlaufens darstellt.

Normative Vorgaben

Für das Vorbohren von selbstbohrenden Schrauben werden in der aktuellen Version des Eurocodes 5 [40] folgende Angaben getroffen:

- Die Vorbohrung für den gewindefreien Schaftteil einer Schraube sollte im Durchmesser des Schaftdurchmessers erfolgen und die gleiche Länge wie die des Schaftteils aufweisen.
- Die Vorbohrung für den Gewindeteil sollte mit einem Durchmesser erfolgen, der bei etwa 70 % des Schaftdurchmessers liegt.

Diese Angaben gelten für sämtliche Holzschrauben in Laubholz sowie für Schrauben in Nadelholz mit einem Durchmesser von $d > 6$mm. Für Schrauben mit geringerem Durchmesser ist bei Nadelholz keine Vorbohrung erforderlich. Die Formulierung lässt darauf schließen, dass diese Angaben primär für Schrauben mit Teilgewinde vorgesehen sind, Vollgewindeschrauben werden nicht explizit erwähnt. Die Problematik des Verlaufens bzw. Methoden zur Gewährleistung einer exakten Positionierung finden seitens des Eurocodes 5 ebenfalls keine Erwähnung. Die

Mindestabstände sind als fixe Werte, unabhängig von der Einbindelänge definiert und können somit nicht ausreichend die Vermeidung einer Kollision bei der Verwendung von besonders langen Schrauben gewährleisten. Auch in dem Entwurf der aktuellen Neufassung des Eurocodes 5 [42] wird die exakte Positionierung nicht thematisiert.

Herstellerangaben

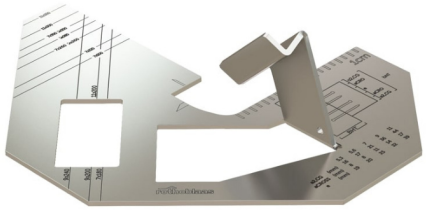
Alle aktuellen Versionen der Zulassungen der größten Hersteller von Vollgewindeschrauben beinhalten Vorgaben für einzuhaltende Mindestabstände zwischen den einzelnen Verbindungsmitteln sowie zu den Rändern der Holzquerschnitte.

HECO



Einschraubhilfe für 45° und 60°

Rothoblaas



Montagelehre für 45° Schraubverbindungen

Festool



Stufenlos schwenkbahrer Bohrständer

SFS



Setzvorrichtung für 45° Schraubverbindungen

Abbildung 3.1: Vorrichtungen unterschiedlicher Hersteller zur Positionierung langer Vollgewindeschrauben

Diese Abstände werden, analog zur Norm, als ein Vielfaches des Schraubendurchmessers angegeben und sind unabhängig von der Einbindetiefe der Schrauben. Bezüglich des Vorbohrens werden Vorgaben genannt, die sich zum größten Teil

mit den Vorgaben der Norm decken, mit der Ausnahme, dass Vorbohrungen für Nadelholz auch bei Durchmessern größer 6mm nicht notwendig sind. Laubholz muss laut den Zulassungen auch mit einem Durchmesser entsprechend des Kerndurchmessers der Schraube vorgebohrt werden. Das Verlaufen oder einzuhaltende Regeln zur exakten Positionierung werden auch seitens der Hersteller nicht explizit thematisiert. Allerdings finden sich bei den meisten Herstellern innerhalb der Produktpalette spezielle Vorrichtungen wie Führungsschienen oder Montagelehren, die eine Installation erleichtern bzw. die vorgesehene Positionierung gewährleisten sollen (siehe Abbildung 3.1).

3.2 Mechanisches Vorbohren

Beim mechanischen Bohren handelt es sich um einen abspanenden Prozess, bei dem Material durch die Spitze eines Bohrers abgetrennt und in Form von Spänen über die Länge des Bohrers aus dem Bohrloch nach außen befördert wird [28]. Dieses Grundprinzip ist für alle Materialien gleich, wobei sich die verwendeten Bohrer, je nach zu bearbeitendem Material, unterscheiden und für eine entsprechende Bearbeitung angepasst sind. Das charakteristische Merkmal von Holzbohrern ist die sogenannte Zentrierspitze, die für eine punktuelle und axiale Zentrierung des Bohrers während des Bohrvorgangs sorgt [90]. Außerdem besitzen die Bohrer zwei unterschiedliche Schneiden. Die Vorschneide ist am Rand angeordnet und leicht vorstehend, sodass dieser zunächst den Rand des Bohrlochs sauber herausschneidet, bevor die Abspanung des Materials über den kompletten Durchmesser mithilfe der horizontal angeordneten Hauptschneiden erfolgt. Für die Herstellung von Holzbohrern wird Carbonstahl oder Werkzeugstahl verwendet. Abbildung 3.2 zeigt die typische Geometrie von Holzbohrern auf die im Folgenden eingegangen wird.

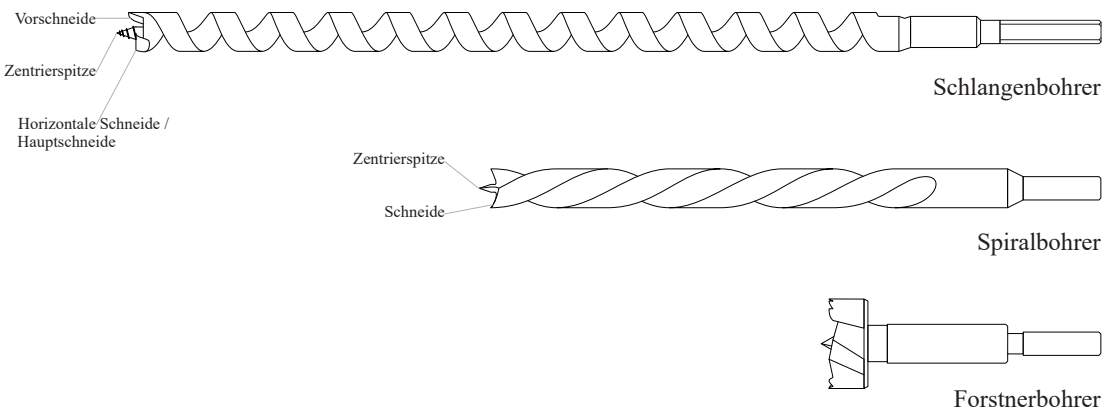


Abbildung 3.2: Kategorien von Holzbohrern

Spiralbohrer

Der Spiralbohrer ist das meist verwendete Bohrwerkzeug. Je nach zu bearbeitendem Material unterscheiden sich die Bohrer leicht in ihrer Ausführung. Im Fall der Holzbohrer entspricht die Ausführung der Spitze den oben beschriebenen Charakteristika mit dem Vorhandensein einer Zentrierspitze und den vorstehenden vertikalen Schneiden am äußeren Rand des Bohrers. Die Bohrer können mit einer oder mehreren ineinander liegenden Spiralen ausgeführt werden, wodurch die Spanförderung aus dem Bohrloch verbessert werden kann. Die Bohrer sind mit Durchmessern von 1mm bis 30mm mit Längen bis 20cm verfügbar.

Schlangenbohrer

Schlangenbohrer sind Bohrer, die nur für das Material Holz verfügbar und speziell für die Erstellung von tiefen Bohrlöchern angepasst sind. Ihr Gewinde ist schlangenförmig um den Kernstab angeordnet und weist, im Vergleich zu Spiralbohrern, eine geringere Steigung auf. Durch diese Spezifikationen wird eine optimierte Spanförderung erreicht, die bei der Erstellung von tiefen Bohrlöchern notwendig ist. Aufgrund des geometrischen Aufbaus weisen Schlangenbohrer, im Vergleich zu Spiralbohrern, bei gleichem Außendurchmesser eine größere Schlankheit auf, die das Verlaufen der Bohrer nachweislich beeinflusst (vgl. Kapitel 4). Zusätzlich besitzt die Zentrierspitze von Schlangenbohrern ein eigenes Gewinde, wodurch sich die Spitze zusätzlich in das Holz zieht, bevor die außenliegende Vorschneide das Holz am Bohrrand einschneidet. Gemeinsam mit der Bohrspirale ergibt sich daraus ein aus der Drehbewegung des Werkzeugs resultierender selbständiger Vorschub. Schlangenbohrer werden in der Regel zusätzlich gehärtet und sind typischerweise in den Durchmessern von 5 mm bis 50 mm sowie in Längen ab 16 cm bis maximal 100 cm erhältlich.

Forstenbohrer/Schneckenbohrer

Weitere Holzbohrer sind Forstner- oder Kunstbohrer die zur Erstellung von Löchern mit großen Durchmessern verwendet werden. Diese Bohrer werden nicht für die Erzeugung von tiefen Bohrlöchern verwendet und sind an dieser Stelle lediglich zur Vollständigkeit aufgeführt.

3.3 Laserstrahlbohren und pyrolytisches Vorbohren

Das Laserstrahlbohren mithilfe eines Laserstrahls ist ein nicht-spanendes thermisches Bearbeitungsverfahren, bei dem Material durch den konzentrierten Eintrag von Energie im Rahmen eines Sublimationsprozesses abgetragen wird. Durch die

Absorption von Laserstrahlung wird das zu bearbeitende Material gezielt erhitzt. Das Abtragen und damit das Bohren wird durch das Erreichen von kritischen Temperaturen wie der Schmelztemperatur, Zündtemperatur oder Verdampfungstemperatur erreicht.
Das Laserbohren ist überwiegend bei metallischen Materialien verbreitet, wobei im Wesentlichen die in Abbildung 3.3 dargestellten Verfahren zum Einsatz kommen [93], [59].

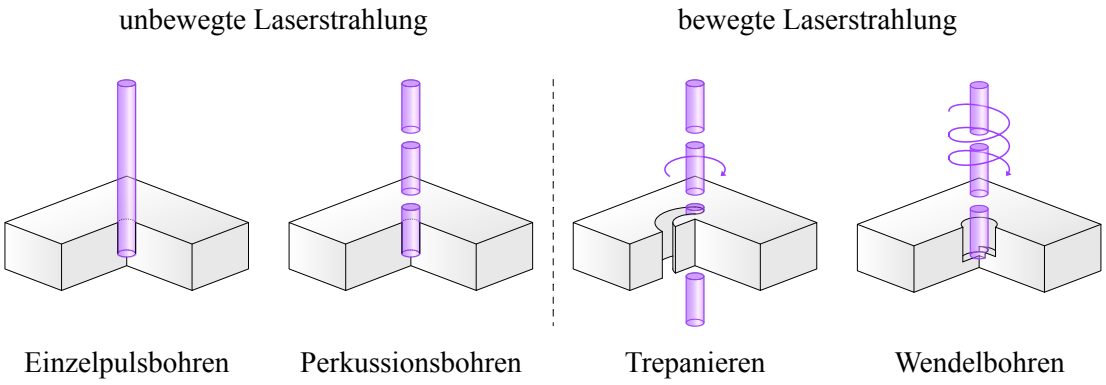


Abbildung 3.3: Wesentliche laserbasierte Bohrverfahren

Die Verfahren unterscheiden sich durch die Einwirkungsdauer der Strahlung sowie die Eigenschaft, ob der Laserstrahl während des Prozesses starr bleibt oder bewegt wird. So wird beim Einzelpulsbohren ein kontinuierlicher Laserstrahl verwendet, während sich das Perkussionsbohren dadurch auszeichnet, dass die Strahlung in mehreren, aufeinanderfolgenden, zeitlich begrenzten Pulsen eingebracht wird (gepulste Strahlung). Beim Trepanieren sowie dem Wendelbohren, bei denen in der Regel ebenfalls gepulste Strahlung verwendet wird, wird der Laserstrahl oder das Werkstück zusätzlich bewegt, wobei beim erstgenannten die Durchbohrung des Materials direkt über die gesamte Tiefe erfolgt, während beim Wendelbohren der Abtrag sukzessiv über das Abfahren (Scannen) des Bohrdurchmessers stattfindet. Die unterschiedlichen Verfahren bieten die Möglichkeit den Prozess an unterschiedliche Anforderungen anzupassen und begründen ebenfalls das breite Anwendungsfeld des Laserstrahlbohrens.
Ein Sonderfall des Laserbohrens ist das pyrolytische Bohren, welches sich dadurch auszeichnet, dass während des Bohrprozesses zusätzlich Stickstoff eingeleitet wird, um eine pyrolytische Zersetzung des Materials zu bewirken. Die Herstellung von Tiefbohrungen für Holz- und Holzwerkstoffe in einem pyrolytischen Prozess stellt einen neuen Anwendungsfall dar.
Zum besseren Verständnis der Beschreibung des entwickelten und angewendeten Verfahrens für das pyrolytische Vorbohren von tiefen Führungslöchern in Holz

wird im Folgenden zunächst auf einige grundlegende Prinzipien der Lasererzeugung sowie unterschiedliche Anwendungsgebiete eingegangen, bevor das angewendete Verfahren im Detail vorgestellt wird. Die Beschreibung beschränkt sich auf einen stark verkürzten, zusammenfassenden Überblick und dient insbesondere der Erläuterung der im späteren Verlauf verwendeten Begriffe. Für eine vertiefte Lektüre zu den Grundlagen der Lasertechnik sei auf Standardwerke [53] , [44] und [93] verwiesen.

3.3.1 Grundlagen der Lasertechnik

Als Laser wird zum einen ein Lichtstrahl mit besonderen Eigenschaften als auch das für die Erzeugung des Lichtstrahls verwendete Gerät bezeichnet. Der Begriff leitet sich aus der Beschreibung des Funktionsprinzips ab: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, was auf Deutsch mit „Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission“ übersetzt wird.
Die Laserstrahlung kann vereinfacht als stark gebündeltes, energiereiches Licht beschrieben werden. Genau wie Licht bestehen Laserstrahlen aus elektromagnetischen Wellen. Lichtstrahlung im Allgemeinen entsteht, wenn die Elektronen eines Atoms von einem höheren Energieniveau auf ein niedrigeres überspringen und dabei Photonen aussenden (Emission). In einer Glühlampe beispielsweise werden die Atome des Glühdrahts (thermische Quelle) durch das Anlegen eines elektrischen Stroms angeregt, wodurch die Elektronen auf eine höhere Umlaufbahn gebracht werden. Da dieser Zustand für das Atom nicht stabil ist, kehrt dieses nach einer gewissen Zeit (Lebensdauer) auf seinen Grundzustand zurück und entsendet dabei ein Lichtteilchen (Photon). Im Falle der Glühlampe, wie auch in allen anderen thermischen Lichtquellen, geschieht die Aussendung der Photonen spontan und von jedem Atom in eine beliebige Richtung. Diese sogenannte spontane Emission ist ein im Raum ablaufender statistisch verteilter Prozess. Die stimulierte Emission hingegen, so wie sie bei der Erzeugung eines Laserstrahls zum Einsatz kommt, ist räumlich ausgerichtet und entsprechend konzentriert. Stimulierte Emission entsteht wenn wenn ein Atom, welches sich durch eine vorherige Anregung in einem energiereichen Zustand befindet, zusätzlich ein Photon absorbiert. Beim Zurückkehren in den Grundzustand erfolgt die Emission im gleichen Takt und in die gleiche Richtung. Zusätzlich zu dem einstrahlenden Photon wird demnach ein zweites Photon ausgestrahlt, welches exakt gleich ist. Jedes dieser Photonen kann nun wieder weitere Atome anregen wodurch die Strahlung verstärkt wird (Lawineneffekt).

Die Erzeugung des Laserstrahls findet in einem Resonator statt, dessen Aufbau schematisch in Abbildung 3.4 gezeigt ist. Das Lasermedium kann in festem, flüssi-

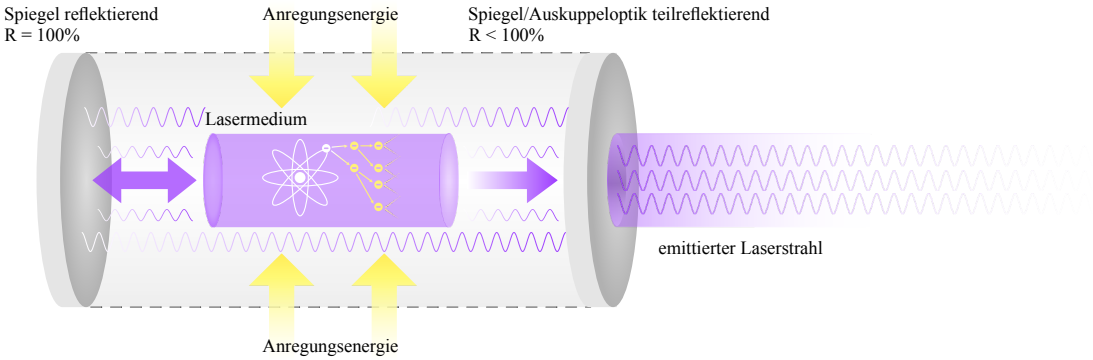


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau eines Resonators zur Erzeugung eines Lasers [55]

gem oder gasförmigen Zustand vorliegen und wird oft für die Unterscheidung und auch die Bezeichnung eines Lasers verwendet. Die Anregung erfolgt, je nach Bauart und Art des Lasermediums, durch das Anlegen eines elektrischen Stroms oder optisch durch die Einstrahlung von Licht. Dieser Prozess der portioniert eingespeisten Energie, wird als *Pumpen* bezeichnet. Dadurch werden die Elektronen des Lasermediums auf höhere Umlaufbahnen befördert und somit aus ihrem Grundzustand in einen energetisch höheren Zustand versetzt. Durch die genaue Anpassung der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts auf den Energiezustand der Atome des aktiven Mediums, kommt es zur Besetzungsinversion, einem Zustand bei dem der Anteil der energiereichen Atome dem der energiearmen überwiegt. Durch Abstimmung der Pumpenergie auf das Lasermedium wird die Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission erhöht. Durch den technischen Aufbau eines Resonators wird der Prozess zusätzlich verstärkt. Der Resonator besteht aus zwei sich gegenüberliegenden Spiegeln, von denen einer totalreflektierend und einer teildurchlässig ist. Durch die Reflexion der entstehenden Strahlung an diesen Spiegeln kommt es zu einem zusätzlichen Zirkulieren des Lichts wodurch die Lichtverstärkung im Gesamtsystem nochmals vergrößert wird. Durch den teilduchlässigen Spiegel wird schließlich ein Teil der Strahlung aus dem Resonator als ein Stahl ausgekoppelt, der dann seiner Nutzung zugeführt werden kann. Die besonderen Eigenschaften eines so erzeugten Lichtstrahls charakterisieren die Laserstrahlung:

- **Monochromie**
  Laserstrahlung besteht nur aus einer Wellenlänge und ist somit einfarbig.
- **Kohärenz**
  Laserstrahlung ist kohärent. Die durch die stimulierte Emission von den Atomen ausgesendeten Lichtwellen sind synchronisiert (gleichphasig) und strahlen alle in die gleiche Richtung mit gleicher Frequenz und gleicher

Wellenlänge. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Strahlung thermischer Lichtquellen oder auch der Strahlung der Sonne, bei der die Lichtwellen durch spontane Emission statistisch zu verschiedenen Zeiten und in alle Richtungen ausgestrahlt werden.

- **Gleichrichtigkeit**
  Durch die Richtungsselektion des Resonators ist der stark gebündelte Laserstrahl in eine Richtung orientiert, gerichtet.

3.3.2 Anwendungsbereiche von Lasertechnik

Nachdem das Prinzip der stimulierten Strahlung in den frühen 1950er Jahren zunächst erfolgreich für Mikrowellen angewendet werden konnte, erfolgte Anfang der 1960er die Weiterentwicklung des Prinzips auf Lichtwellen [12], [21]. Seit der Entwicklung von Maiman [75] wurde der Laser zu einer Schlüsseltechnologie, sodass heute eine lange Liste unterschiedlicher Lasersysteme besteht: Festkörperlaser, Gaslaser, Ionenlaser, Farbstofflaser, Halbleiter-Laser, Röntgenlaser und viele weitere mehr. So zahlreich die Varianten der unterschiedlichen Lasersysteme, so breit ist auch die Palette der Anwendungsmöglichkeiten. Die im Folgenden beschriebenen Anwendungsbereiche liefern, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, eine Übersicht der vielseitig genutzten Technologie. Die dort aufgeführten Beispiele sind im Wesentlichen den Literaturquellen [93], [47] und [12] entnommen.
In erster Linie weist die verarbeitende Industrie mit zahlreichen Prozessen ein breites Anwendungsfeld von Lasern auf. Der Laser zählt zu einem wichtigen Werkzeug, der bei zahlreichen Fertigungsprozessen, insbesondere bei der Materialbearbeitung eingesetzt wird. Für eine große Bandbreite an Materialien können viele Bearbeitungsschritte wie beispielsweise Umformen, Trennen, Fügen, Bohren und Beschichten mithilfe von laserbasierten Verfahren durchgeführt werden. Insbesondere im Hinblick auf die Steuerungsfähigkeit, Wiederholungsgenauigkeit und Präzision sind die laserbasierten Verfahren den mechanischen überlegen. Zudem findet keine Werkzeugabnutzung statt, da die Bearbeitung ohne mechanische Interaktion stattfindet.
Eine weitere wichtige Anwendung findet die Lasertechnologie in der Nachrichtenübertragung bzw. der Telekommunikation. Die Verwendung von Glasfaserleitungen stellt aktuell die schnellste Form der Datenübertragung dar. Diese basiert auf einem optischen Verfahren bei dem ein Laser als Sender eingesetzt wird. Durch Zwischenverstärker können die Entfernungen weiter gesteigert werden, sodass Glasfaserverbindungen auch als interkontinentale Verbindungen zum Einsatz kommen.
Seit den frühen Anfängen spielt der Laser auch in der Medizintechnik eine wichtige

Rolle. In der Augenheilkunde fand der Laser bereits im Jahr 1961, kurz nach seiner Entstehung, erste Anwendung. Heute kennt die Hornhautchirurgie zahlreiche Anwendungen wie zum Beispiel die Lasik-Prozedur (Laser-in-situ-Keratomileusis), die zu einem Standardeingriff beim Behandeln von Fehlsichtigkeiten zählt. Weitere Anwendungen aus dem Bereich der Medizin folgten. Heute werden laserbasierte Verfahren zu diagnostischen Zwecken und vor allem als destruierende Werkzeuge d.h. zur Durchführung von präzisen Schnitten an Knochen und Gewebe oder dem Zertrümmern von Ablagerungen und Steinen eingesetzt.
Auch im täglichen Leben ist die Laser-Technologie allgegenwärtig und hilft Messungen vorzunehmen, Speichermedien zu benutzen (CDs, DVDs, Festplatten) oder Computer zu bedienen. Nicht zuletzt begegnet uns der Laser auch in seiner puren Form: Als einfaches optisches Signal eines Laserpointers bei einem Vortrag oder der Bühnenshow einer Konzertveranstaltung.
Trotz der bereits zahlreichen Einsatzgebiete sind die Potenziale noch nicht ausgeschöpft. Die Forschungstätigkeiten rund um den Bereich Laser nehmen weiterhin kontinuierlich zu und werden stark gefördert [95], [1]. Durch die ständige Weiterentwicklung vorhandener Lasersysteme und der Entwicklung neuer, kommen kontinuierlich weitere Einsatzgebiete hinzu [49].

3.3.3 Laser in der Holzbearbeitung

Auch in der Holzverarbeitung- und Bearbeitung findet die Lasertechnologie Anwendung [63]. Im Vergleich zu den mechanischen Verfahren zeichnen sich die laserbasierte Prozesse insbesondere durch die präzise, kontaktfreie und schnelle Bearbeitung aus. Die Einsatzbereiche lassen sich grundsätzlich in die drei Kategorien Schneiden, Markieren/Gravieren und Holzmodifikation einteilen.
Das Schneiden von Holz bzw. Holzwerkstoffen ist sowohl in industriellen Anwendungen (Möbelbau) als auch dem Amateurbereich, wie beispielsweise dem Modellbau, verbreitet [25]. Durch eine hohe Präzision, ohne geometrische Einschränkungen in Bezug auf die Schneidradien, sowie einer spanfreien Bearbeitung ohne Werkzeugabnutzung, liefert das Verfahren wesentliche Vorteile gegenüber den mechanischen Schneidverfahren.
Für das Markieren bzw. Gravieren von Holzoberflächen können in der Regel die gleichen Laser wie für das Schneiden verwendet werden, sodass alle Bearbeitungsschritte von einem Gerät erledigt werden können [70].
Als Holzmodifikation wird die Beeinflussung der Materialeigenschaften von Holz durch die Anwendung thermischer, chemischer oder biologischer Verfahren bezeichnet. Ziel dieser Anwendungen ist die dauerhafte Veränderung der Materialeigenschaften und damit einhergehend die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit

des Materials gegenüber Witterungseinflüssen (Feuchtigkeit, UV-Strahlung), den Befall von Pilzen oder Schädlingen aber auch der Verbesserung mechanischer Eigenschaften wie Festigkeiten, Dimensions- oder Formstabilität [98]. Neben den typischen Verfahren der thermischen Behandlung oder der Imprägnierung von Holz mit Ölen, Harzen und Wachsen existieren auch laserbasierte Verfahren zur Holzmodifikation. Diese lassen sich in zwei Unterkategorien unterteilen: Den abtragenden und den schmelzenden Prozessen. Beide Prozesse konzentrieren sich auf die Oberflächenbehandlung von Holz, wobei die erzielten Effekte unterschiedlich sind. Durch den Abtrag dünner Holzschichten mithilfe pulsierender Laserstrahlung können beispielsweise Oberflächen gereinigt bzw. geglättet werden [100], [117]. Eine zuvor mechanisch bearbeitete Fläche kann durch den Abtrag so aufbereitet werden, dass ihre Permeabilität signifikant steigt und dadurch eine Versiegelung der Oberfläche durch den Auftrag einer Beschichtung deutlich effektiver wird. Eine weitere laserbasierte Methode zur Steigerung der Permeabilität ist die oberflächennahe Bohrung dünner Löcher. Diese werden in definierten Abständen eingebracht und vergrößern die Durchdringung der Holzoberfläche mit einem nachträglich aufgebrachten Schutzmittel [71].

3.4 Tiefbohrungen für Vollgewindeschrauben

Im Rahmen von gemeinsamen Forschungsprojekten des Lehrstuhls für Tragkonstruktionen mit dem Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT) und dem Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen wurden spezielle Prozesse für die Herstellung von tiefen Führungslöchern für Vollgewindeschrauben entwickelt. Angesichts der Problematik des Verlaufens von Vollgewindeschrauben sollte im Rahmen der Projekte untersucht werden, inwiefern sich ein pyrolytischer Prozess des Vorbohrens eignet, um eine exakte Positionierung von Vollgewindeschrauben zu gewährleisten. Die Projekte wurden von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) über einen Zeitraum von insgesamt vier Jahren gefördert. Die dafür durchgeführten Voruntersuchungen sowie die Zwischenstände der Bearbeitung wurden in mehreren Publikationen über die Projektlaufzeit veröffentlicht [110], [111], [56], [58], [106], [57], [116]. Die im Folgenden beschriebene Entwicklung der Prozesse gibt einen zusammenfassenden Einblick zu den im Rahmen der Projekte durchgeführten Arbeiten seitens der Lasertechnik.

3.4.1 Aufbau des pyrolytischen Bohrprozesses

Abbildung 3.5 zeigt einen für die Durchführung der Bohrungen verwendeten Aufbau. Die erzeugte Laserstrahlung wird, je nach Bohrverfahren, über ein System von hintereinanderliegenden optischen Linsen auf einen gewünschten Durchmesser eingestellt. Die Laserstrahlung trifft anschließend auf einen darunter positionierten Probekörper indem der tatsächliche Bohrvorgang stattfindet. Dabei wird das Material durch die Einwirkung der Laserenergie durch Pyrolyse thermisch zersetzt. Der Prozess der Pyrolyse von Holz stellt einen eigenen Forschungsschwerpunkt dar, bei dem die komplexen Zusammenhänge der thermischen Einwirkung unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung des Holzes beschrieben werden [117].

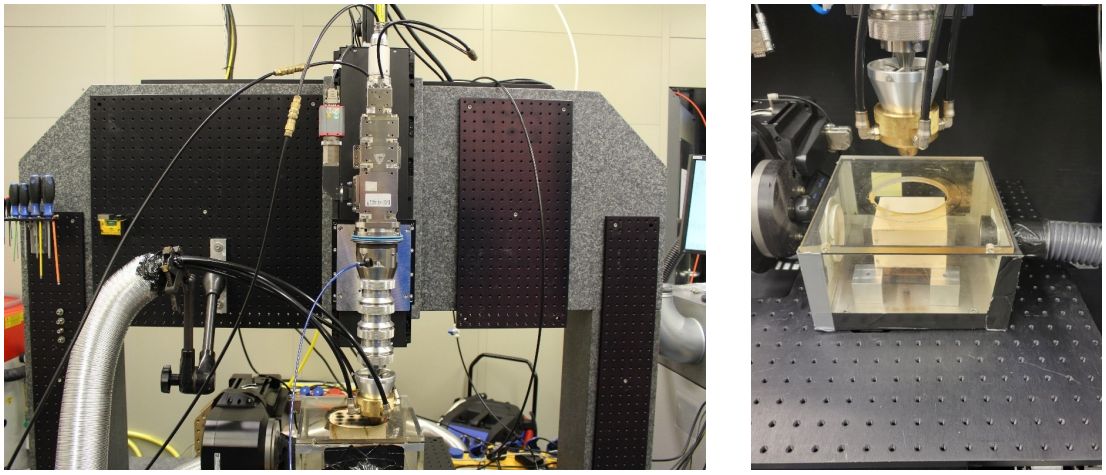


Abbildung 3.5: Aufbau zur Durchführung der pyrolytischen Bohrungen, links: Gesamtaufbau; rechts: Nahaufnahme

Die bei der Pyrolyse entstehenden Prozessemissionen, vor allem Gase wie beispielsweise CO2, Carbonmonoxid und Methan, werden an der Oberfläche des Probekörpers abgesaugt. Zur Vermeidung der Entstehung von unkontrollierten Flammen innerhalb des Bohrlochs, wird während des Bohrens ein Prozessgas (i.d.R. Stickstoff) in das Bohrloch eingeleitet.

3.4.2 Entwicklung der Bohrverfahren und Auswahl der Laser

Im Rahmen der Entwicklung wurden zunächst unterschiedliche Laser sowie verschiedene Bohrverfahren betrachtet und ihre grundsätzliche Eignung zur Herstel-

lung von tiefen Bohrungen in Holz untersucht. In der Sondierungsphase wurden ein CO_2-Laser, ein QCW-Faserlaser sowie ein ultrakurz gepulster Laser (UKP) auf ihre Eignung getestet. Für die unterschiedlichen Laser wurden verschiedene Bohrverfahren angewendet, die schematisch in Abbildung 3.6 dargestellt sind. Bei beiden dargestellten Bohrverfahren handelt es sich um Perkussionsbohrverfahren (vgl. Abschnitt 3.3, Abbildung 3.3). Für den CO_2- sowie den QCW-Faserlaser basiert der Prozess auf einem unbewegten Aufbau (Abbildung 3.6, links).

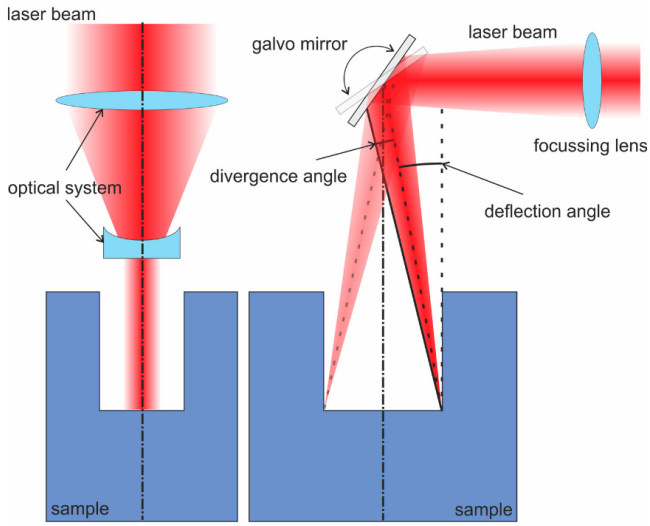


Abbildung 3.6: Entwickelte Bohrverfahren für unterschiedliche Laser; links: CO_2- und Faserlaser (kollimiert); rechts: UKP-Laser (fokussiert) [16]

Für die Bohrungen mit dem UKP-Laser wurde ein scannender Prozess umgesetzt (Abbildung 3.6 rechts). Hierbei wird der Laserstrahl mithilfe eines Spiegels in einer Wendelbewegung geführt, wodurch der Abtrag über den Bohrlochquerschnitt schrittweise erfolgt. Beim Verfahren für den CO_2- und den QCW-Faserlaser wird der Laserstrahl kollimiert, für den UKP-Laser findet eine Fokussierung statt. Im Vergleich zum unbewegten Verfahren für den CO_2- und den QCW-Faserlaser ist der Durchmesser des UKP-Lasers deutlich geringer.

Tabelle 3.1: Wellenlängen der untersuchten Laser

Laserquelle	Wellenlänge λ
CO2 Laser	10300 [nm]
UKP Laser	1030 [nm]
QCW-Faserlaser	1070 [nm]

Die Laser unterscheiden sich neben den unterschiedlichen angewendeten Bohrverfahren auch durch ihre Wellenlänge λ, die maßgeblich für die Absorption der Laserstrahlung ist und damit das Abtragverhalten des bearbeiteten Materials direkt beeinflusst. Die Wellenlängen der untersuchen Laser sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

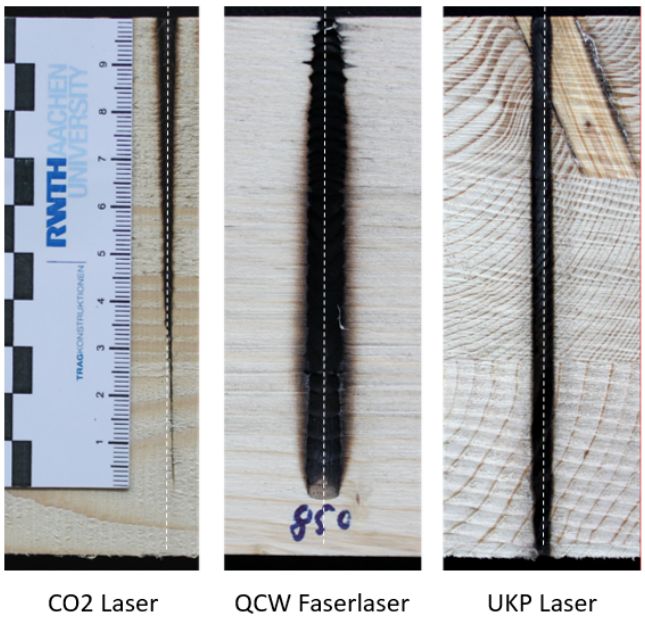


Abbildung 3.7: Charakteristische Bohrlochgeometrien der untersuchten Laser im Rahmen der Sondierungsphase [106]

Die Unterschiede der Laser und die verschiedenen Bohrverfahren haben einen direkten Einfluss auf die resultierende Bohrlochgeometrie, welche mit den jeweiligen Bohrprozessen erreicht wurden. Abbildung 3.7 zeigt die zum Ende der Sondierungsphase erzielten charakteristischen Bohrlochgeometrien der drei untersuchten Laser. Für die untersuchten Laser konnte dabei Folgendes festgehalten werden:

CO_2-Laser

Trotz der weiten Verbreitung der CO_2 Laser bei industriellen Anwendungen, zu denen auch das Schneiden von Holzwerkstoffen gehört, eignet sich der Laser nicht für die Herstellung von tiefen Bohrlöchern. Die vergleichbar große Aufweitung des Strahls (infolge einer kurzen Rayleigh-Länge, siehe Abbildung 3.11) beschränkt die Anwendung des Lasers in der Tiefe. Durch die Kaustik des Laserstrahls nimmt die Intensität mit der Tiefe stark ab, was zu den charakteristischen, konisch zulaufenden Bohrlochgeometrien führt. Nach Erreichen einer maximalen Tiefe reicht die am unteren Ende des Bohrlochs ankommende Energie nicht aus,

um weiteres Material abzutragen was zu einem Abbruch des Bohrfortschritts führt. Die maximale, mit dem CO_2 Laser erreichte Tiefe von ca. 120 mm wurde zum Ende der Sondierungsphase als zu gering bewertet, der CO_2-Laser als nicht geeignet eingestuft und bei der weiteren Entwicklung nicht verfolgt.

UKP-Laser

Die Anwendung des UKP-Lasers wurde mit einem scannenden Prozess umgesetzt, bei dem der Laserstrahl auf einen Durchmesser von 180 μm fokussiert wird. Die starke Fokussierung der Energie auf eine sehr geringe Fläche erlaubt einen präzisen Abtrag des Materials. Der Vortrieb in die Tiefe erfolgt schrittweise durch die Wendelbewegung des Fokuspunkts. Bis zu einer Tiefe von wenigen Zentimetern können mit dem Verfahren sehr präzise Bohrlöcher ohne jegliche Schmauchspuren erzeugt werden. Durch die kurze Pulsdauer werden die kritischen Temperaturen (Verdampfungstemperatur, Zersetzungstemperatur) so schnell erreicht, dass der Abtrag ohne eine starke Wärmebelastung an das umgebende Material erfolgt (kalter Abtrag). Mit zunehmender Tiefe erschwert sich der Abtransport der entstehenden Gase im Inneren des Bohrlochs, was zu Rußbildung an den Außenwänden des Bohrlochs führt. Zur Vermeidung einer kritischen Hitzeentwicklung muss der Prozess zwischenzeitlich immer wieder unterbrochen werden, um die entstehenden Gase aus dem Bohrloch zu befördern. Die schrittweise Bearbeitung sowie die erforderlichen Pausen führen zu langen Prozesszeiten mit Bohrgeschwindigkeiten von 0.1 - 0.2 mm/s. Zum Ende der Sondierungsphase konnten mit dem UKP-Laser Bohrlöcher mit einer Tiefe von bis zu 300 mm hergestellt werden. Für alle untersuchten Faserwinkel konnten dabei sehr präzise Bohrlochgeometrien realisiert werden. Aufgrund der sehr langen Prozesszeiten wurde das Lasersystem dennoch als nicht praxistauglich eingestuft und nicht weiter untersucht.

QCW-Faserlaser

Das angewendete Bohrverfahren für den QCW-Faserlaser basiert, genauso wie das Verfahren für den CO_2-Laser, auf einer Perkussionsbohrung mit kollimiertem Strahldurchmesser. Der Laserstrahl wird auf einen Spotdurchmesser von 2,5 mm und eine Rayleighlänge (siehe Abbildung 3.10) von 414 mm eingestellt. Der finale Durchmesser des Bohrlochs entsteht durch die kontrollierte Pyrolyse der Außenwände. Aufgrund des variierenden Abtragsverhaltens des unterschiedlich dichten Früh- und Spätholzes, entstehen die charakteristischen wellenförmigen Bohrlochgeometrien. Aufgrund der höheren Leistung im Vergleich zum CO_2-Laser konnten trotz der Verluste durch die Divergenz der fokussierten Strahlung, Bohrtiefen von bis zu 300 mm erreicht werden. Die deutlich höhere Leistung des QCW-Faserlasers, sowie der deutlich größere Durchmesser des Laserstrahls, resultieren in einer höheren Abtragsrate mit deutlich geringeren Prozesslaufzeiten im Ver-

gleich zum UKP-Laser. Je nach Faserwinkel und angewendeten Parametereinstellungen können Bohrgeschwindigkeiten von 5 mm/s bis 25 mm/s erreicht werden. Trotz der weniger präzisen Bohrlochgeometrien im Vergleich zum UKP-Laser wurde das Potenzial des QCW-Faserlasers für den spezifischen Anwendungsfall am höchsten eingestuft und für die weitere Optimierung des Bohrprozesses ausgewählt.

3.4.3 Optimierung der Prozessparameter

Im Anschluss an die Sondierungsphase wurde für die weitere Bearbeitung des Projektes lediglich der QCW-Faserlaser ausgewählt und der Prozess des Vorbohrens für eine weitere Anpassung und Optimierung der Prozessparameter herangezogen. Hierbei wurden in mehreren Versuchsreihen unterschiedliche Prozessparameter variiert und die erzeugten Bohrlochgeometrien beurteilt. Der starke Einfluss der Prozessparameter auf das Ergebnis einer Bohrung wird am Beispiel der Referenzbohrungen in Probekörper aus MDF-Platten (Mitteldichte Faserplatten) in Abbildung 3.8 deutlich.

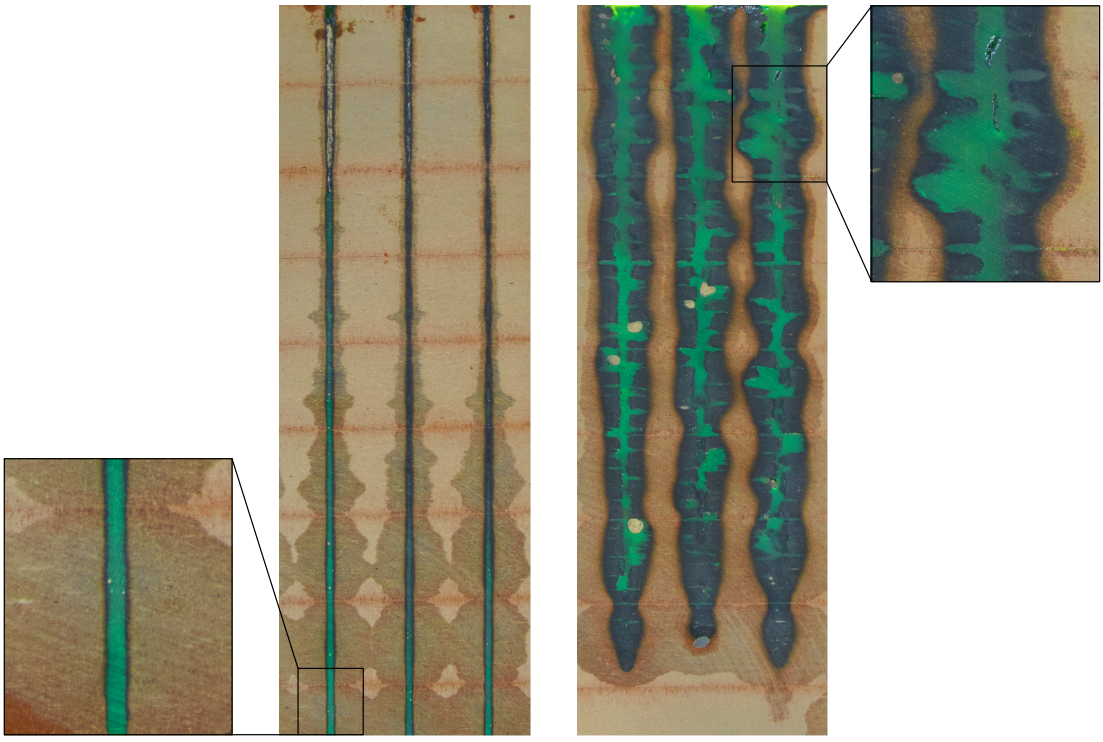


Abbildung 3.8: Bohrlochgeometrien pyrolytisch herstellter Bohrlöcher in MDF unter Anwendung unterschiedlicher Prozessparameter

Die unterschiedlichen Bohrungen wurden mit dem gleichen Laser bei Anwendung unterschiedlicher Prozessparameter erstellt. Zur besseren Sichtbarkeit der Bohrlochgeometrien wurden die Probekörper mit fluoreszierendem Harz getränkt und anschließend entlang der Bohrlöcher aufgeschnitten. Während die Bohrlöcher auf der linken Seite einen über die Tiefe zylindrischen konstanten Querschnitt aufweisen, sind die Bohrungen rechts stark ausgebrannt und unregelmäßig. Die Referenzbohrungen zeigen, dass durch die Einstellung der Prozessparameter die resultierende Bohrlochgeometrie maßgebend beeinflusst werden kann.
Die wesentlichen Parameter des pyrolytischen Bohrprozesses können in die zwei in Tabelle 3.2 genannten Gruppen unterteilt werden, wobei die erste spezifische Parameter des Lasersystems und die zweite die Strahlparameter sind, die auch durch den Aufbau des verwendeten optischen Systems vorgegeben werden. Für beide Gruppen gilt, dass einige der Parameter von der Wahl des Lasersystems vorgegeben sind, während andere variiert werden können.

Tabelle 3.2: Parameter des pyrolytischen Prozesses

	Laserparameter	**Strahlparameter**
fix	Wellenlänge λ	Strahlqualitätsfaktor M^2
variabel	Pulsspitzenleistung P_{peak}	
	Pulsdauer τ	Stahldurchmesser $2\omega_0$
	Repetitionsrate ν_{rep}	Rayleigh Länge z_R
	Mittlere Leistung P_{avg}	Brennweite der Linsen f

Die Wellenlänge λ ist eine feste, physikalische Größe des erzeugten Laserstrahls, die maßgebend von der Laserstrahlquelle vorgegeben ist. Der Strahlqualitätsfaktor M^2 charakterisiert die Güte der tatsächlichen Form eines Laserstrahls im Vergleich zu der Form eines idealen gaußschen Strahls. Diese Kenngröße ist ebenfalls eine feste Größe des gewählten Lasersystems und gibt an, wie gut ein Laserstrahl fokussiert werden kann.

Die Pulsdauer τ ist die Zeit zwischen dem Beginn und dem Ende eines Pulses bei mittlerer Leistung (Halbwertsbreite, siehe Abbildung 3.9). Die Pulsspitzenleistung P_{peak} gibt die maximale Leistung eines einzelnen Pulses an. Durch die Berücksichtigung der zeitlichen Abstände der Pulse, ergibt sich die mittlere Pulsleistung P_{avg} als Quotient der Pulsspitzenleistung mit der Repetitionsrate, die als der Kehrwert des zeitlichen Abstands zwischen zwei Pulsen definiert ist. Durch die Variation der Repetitionsrate kann somit die eingetragene Energie gesteuert werden.

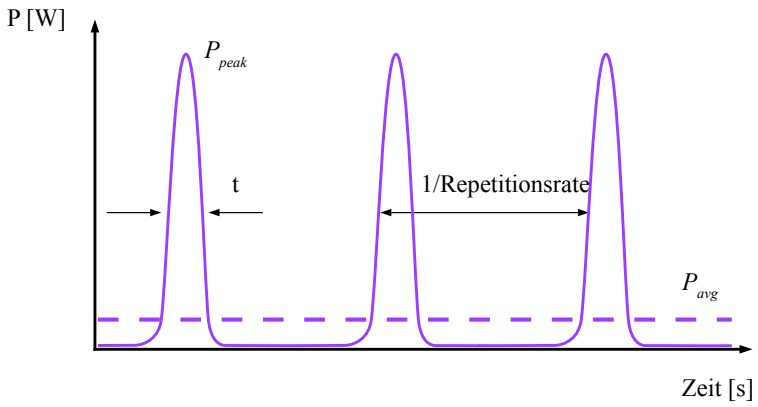


Abbildung 3.9: Leistung gepulster Strahlung über die Zeit

Der aus dem System erzeugte Laserstrahl mit seinem durch die verwendete Faser definierten Durchmesser wird durch die Aneinanderreihung von einem oder mehreren Linsen auf einen gewünschten Durchmesser eingestellt. Dies geschieht indem die Linsen unterschiedlicher Brennweiten f in definierten Abständen zueinander positioniert werden (siehe Abbildung 3.10). Der Strahldurchmesser $2\omega_0$ sowie die Rayleigh Länge sind geometrische Parameter, die sich aus dem Aufbau des optischen Systems und den dafür verwendeten Linsen ergeben. Die Zusammenhänge lassen sich anhand Abbildung 3.11 erläutern.

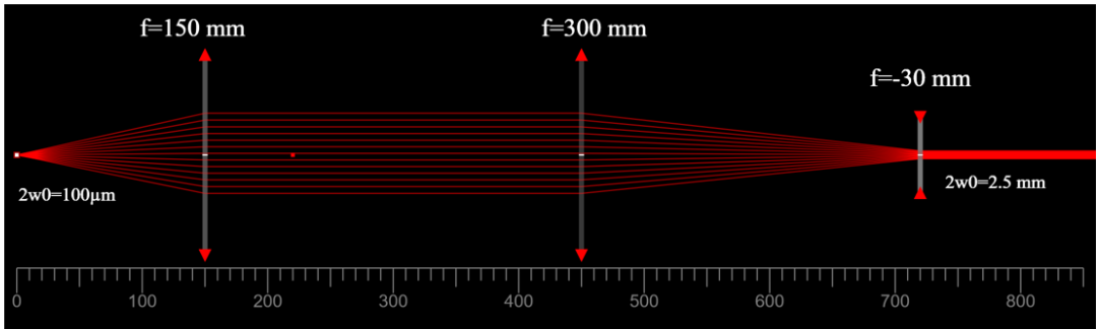


Abbildung 3.10: Einstellung des Strahldurchmessers durch das Optische System, Der Laserstrahl verläuft von links (Facette des Faserlasers) nach rechts.

Aufgrund der Kaustik des Strahls bezieht sich der Strahldurchmesser $2\omega_0$ auf einen fixen Punkt. Mit der Propagation des Laserstrahls weitet sich der Durchmesser des Strahls. Die Rayleigh Länge Z_R gibt dabei den Abstand an, bei dem sich die Querschnittfläche des Strahls ausgehend von dem Fokuspunkt verdoppelt und der Radius entsprechend um den Faktor $\sqrt{2}$ ansteigt.

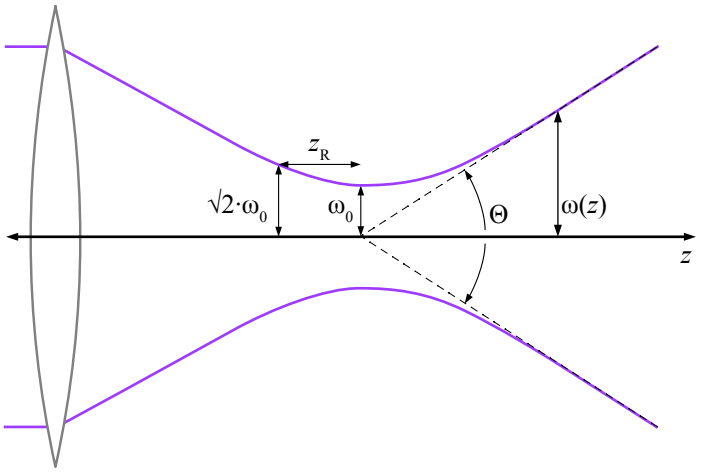


Abbildung 3.11: Kaustik eines Gausstrahls

In Zusammenhang mit der Entwicklung des Bohrprozesses erfolgte die Festlegung geeigneter Prozessparameter durch die Beurteilung der Geometrie des Bohrlochs. Unter Vorgabe eines möglichst zylindrischen, über die Tiefe konstanten Bohrlochs mit einem definierten Zieldurchmesser von 5 mm (entsprechend dem Kerndurchmesser einer Vollgewindeschraube mit einem Außendurchmesser von 8 mm) wurden, unter Verwendung unterschiedlicher Parametersets, Bohrungen erstellt und analysiert. Zusätzlich zu den Unterschieden der eingetragenen Energie durch die Variation der Prozessparameter unterscheidet sich das Abtragverhalten auch durch die Variation der Dichte von Früh und Spätholz sowie der Orientierung des Laserstrahls zur Faserrichtung des Holzes (Laser-Faser Winkel). Durch den in Abschnitt 2.1 beschriebenen röhrenförmigen, strukturellen Aufbau des Holzes variiert die Absorption und die Ausbreitung der Wärme innerhalb des Bohrquerschnitts, je nachdem ob die Fasern des Holzes parallel, orthogonal oder in einem entsprechenden Winkel bestrahlt werden. Diese Effekte führen zu einer Ovalisierung des Bohrdurchmessers und dem typischen wellenförmigen Verlauf der Bohrung über die Tiefe (siehe Abbildung 3.12. Die Auslegung der Prozessparameter dient somit auch der Steuerung dieser Effekte.

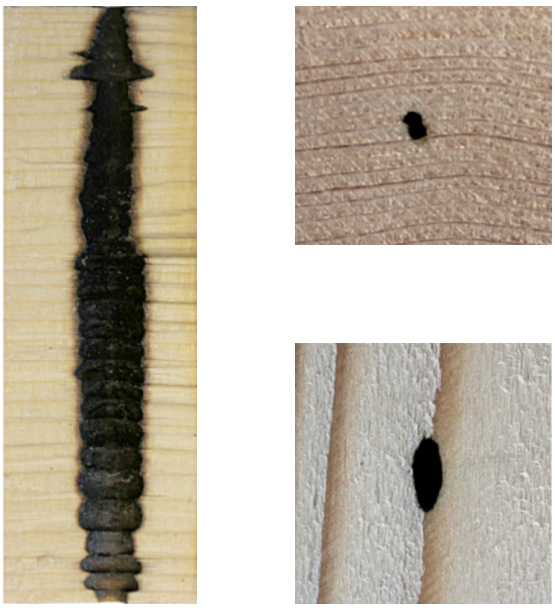
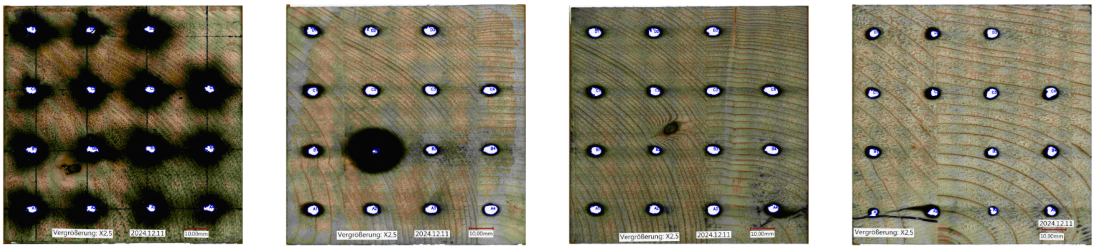


Abbildung 3.12: links: typischer Bohrverlauf einer pyrolytisch hergestellten Bohrung über die Tiefe bei $\alpha = 90\,°$, rechts: Effekt der Ovalisierung des Bohrdurchmessers anhand der Austrittslöcher für $\alpha = 90\,°$ (oben) und $\alpha = 0\,°$ (unten)

Zur Berücksichtigung dieses Umstandes wurden die Versuchsreihen zur Bestimmung geeigneter Prozessparameter mit drei unterschiedlichen Laser-Faser Winkeln (0°, 45°, 90°) durchgeführt. Die Bohrungen erfolgten an 20 cm hohen Probekörpern mit einer Grundfläche von 10 x 10 cm.
Nach der Durchführung der Bohrungen wurden die Probekörper in 5 mm dicke Scheiben aufgeschnitten. Mithilfe eines Mikroskops erfolgte die Aufnahme der Oberflächen der einzelnen Scheiben. Abbildung 3.13 zeigt die Aufnahmen eines Probekörpers in unterschiedlichen Bohrtiefen.



l = 0 mm *l = 20 mm* *l = 40 mm* *l = 180 mm*

Abbildung 3.13: Mikroskopische Aufnahmen der Oberflächen eines Probekörpers in unterschiedlichen Tiefen. [116]

Die Auswertung der Bohrlochgeometrien erfolgte durch eine automatisierte Rou-

tine, wobei die Geometrie des Bohrlochs der jeweiligen Scheiben durch eine programmierte Fotoerkennungssoftware ausgewertet wurde. Aus dieser Geometrie wurde durch die Umrechnung des Umfangs ein äquivalenter Durchmesser ermittelt. Die Diagramme in Abbildung 3.14 zeigen beispielhaft den Einfluss der Repetitionsrate auf die Bohrgeschwindigkeit (links) sowie auf den gemessenen mittleren Bohrlochdurchmesser (rechts) für die unterschiedlichen Laser-Faser Winkel gezeigt. Für alle Winkel gilt, dass durch die Erhöhung der Repetitionsrate, und mit ihr der eingebrachten mittleren Leistung, eine Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers resultiert, wobei eine deutliche Abhängigkeit von dem Laser-Faser Winkel zu erkennen ist.

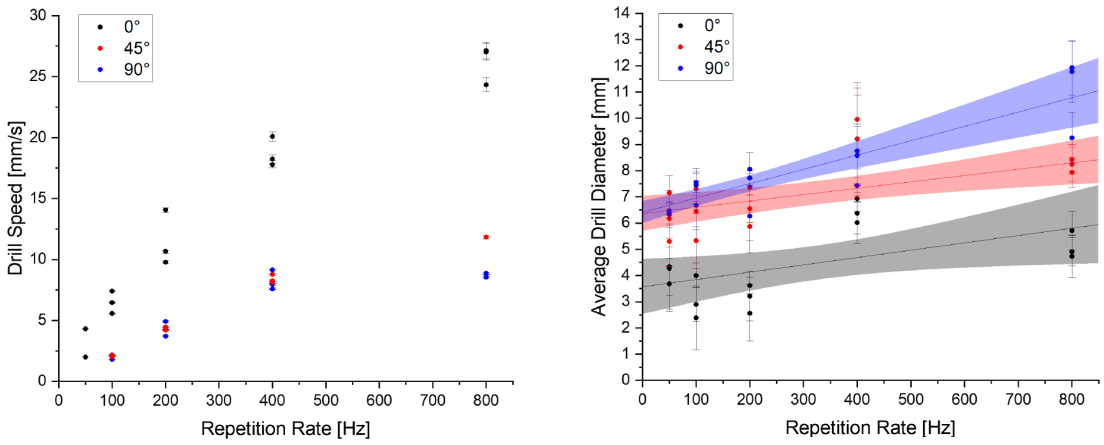


Abbildung 3.14: Einfluss der Repetitionsrate auf die Bohrgeschwindigkeit (links) und den Bohrlochdurchmesser (rechts) [116]

Bei geringen Repetitionsraten sind im Fall der Laser-Faser Winkel mit geringer Neigung Bohrlöcher mit einem mittleren Durchmesser im Bereich von 3-4 mm möglich, während die minimalen Durchmesser für 45° und 90° sich im Bereich von 6-7 mm bewegen. Nach erfolgter Durchführung der Versuchsreihen wurden auf Grundlage der Ergebnisse für die weiteren Untersuchungen zum Verlaufen der Vollgewindeschrauben (Kapitel 4.2) und dem Verbundverhalten (Kapitel 6) vier Parametersets zur Erstellung der Führungslöcher für die unterschiedlichen Laser-Faser Winkel und Schraubendurchmesser festgesetzt. Diese sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Festgelegte Parametersets des QCW-Faserlasers für unterschiedliche Schraubendurchmesser und zur Anpassung an die unterschiedlichen Abtragsmechanismen je nach Laser-Faser Winkel

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4
Schraubendurchmesser:	d8	d8	d10	d10
für Laser-Faser Winkel:	0° - 30°	45° - 90°	0° - 30°	45° - 90°
Wellenlänge λ	1070 [nm]	1070 [nm]	1070 [nm]	1070 [nm]
Strahlqualitätsfaktor M^2	11	11	11	11
Stahldurchmesser $2\omega_0$	2.5 [mm]	2.5 [mm]	2.5 [mm]	2.5 [mm]
Reyleigh Länge z_R	417 [mm]	417 [mm]	417 [mm]	417 [mm]
Pulsdauer τ	0,5 [ms]	0,5 [ms]	0,5 [ms]	0,5 [ms]
Repetitionsrate ν_{rep}	100 [Hz]	100 [Hz]	100 [Hz]	100 [Hz]
Pulsspitzenleistung P_{peak}	1,5 [kW]	1 [kW]	5 [kW]	2 [kW]
Mittlere Leistung P_{avg}	75 [W]	50 [W]	250 [W]	100 [W]

Die Steuerung der Prozessparameter bietet eine große Bandbreite zur Anpassung des Prozesses an die Gegebenheiten des Materials. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass damit auch auf die unterschiedlichen Abtragsmechanismen infolge unterschiedlicher Laser-Faser Winkel reagiert und der Bohrdurchmesser variiert werden kann, wodurch die gewünschte Durchbohrung mit annähernd konstantem Durchmesser reproduzierbar gewährleistet wird ist. Eine Ausnahme dazu bildet der Fall der faserparallele Bohrung, bei dem aufgrund der höheren Reflexion entlang der Spätholzschichten eine höhere Wahrscheinlichkeit des Aufbrennens des Bohrlochs beobachtet wird. Gemeinsam mit dem Ansatz der Beurteilung der Bohrlochqualität anhand des Verlaufs des Drehmoments (siehe Abschnitt 4.2.2.2) und den anschließenden Untersuchungen zum Verbundverhalten, die in Kapitel 7 vorgestellt werden, bietet die beschriebene Vorgehensweise einen ganzheitlichen Ansatz, die Entwicklung des Bohrprozesses zur Erstellung tiefer Führungslöcher in Holz weiter zu verfeinern.

Kapitel 4

Verlaufen von mechanischen Bohrern und Vollgewindeschrauben

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Verlaufen von langen Bohrern und Vollgewindeschrauben mit und ohne initialer, pyrolytischer Vorbohrungen vorgestellt. Die Untersuchungen beleuchten und quantifizieren das Phänomen des Verlaufens und dienen gleichzeitig zur Bestimmung und Beurteilung der wesentlichen Einflussfaktoren, die zum Verlaufen führen. Die experimentellen Daten bilden die Grundlage zur Erstellung und Validierung eines numerischen Modells zur Abbildung des Verlaufens von Vollgewindeschrauben im darauf folgenden Kapitel.

4.1 Verlaufen von Bohrern

Zur Einschätzung der Eignung des mechanischen Vorbohrens zur Herstellung gerader Führungslöcher wurde im Rahmen dieser Arbeit das Verlaufen von Bohrern untersucht. Für die Bohrungen wurden Schlangenbohrer des Herstellers FAMAG-Werkzeugfabrik GmbH verwendet. Der Umfang der Bohrversuche, siehe Abbildung 4.1, beinhaltete zwei unterschiedliche Durchmesser der Bohrer, 5 mm und 8 mm, sowie sieben Bohrer-Faser Winkel ($\alpha = 0\,°, 15\,°, 30\,°, 45\,°, 60\,°, 75\,°, 90\,°$). Für die Probekörper mit den Abmessungen von 20 x 20 cm in der Grundfläche und einer Höhe von 30 cm wurde Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h mit einer mittleren Rohdichte von 440 kg/m^3 verwendet. Zum Vergleich wurden zusätzlich Bohrungen in Probekörper aus MDF (Mitteldichte Holzfaserplatten)

durchgeführt. Die aus 2 cm dicken MDF-Platten geschichteten Probekörper haben eine höhere Dichte (ca. 720 kg/m^3) sind jedoch frei von Defekten und dienen als Vergleich zur inhomogenen Holzstruktur. Mit einer Wiederholung von 16 Bohrungen je Parameterkombination wurden in Summe 256 Bohrungen durchgeführt.

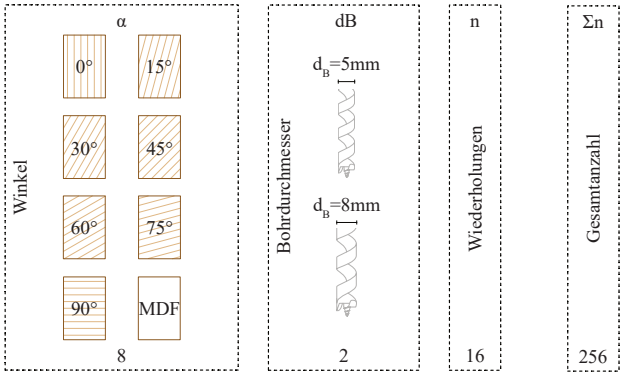


Abbildung 4.1: Umfang der Versuchsreihe zum Verlaufen von Bohrern

4.1.1 Versuchsaufbau und Untersuchungsmethodik

Für die Untersuchungen wurde der in Abbildung 4.2 abgebildete Versuchsstand verwendet. Die Bohrungen erfolgten mit einer handelsüblichen Bohrmaschine, deren gerade Führung durch die Verwendung eines Kernbohrständers gewährleistet wurde. Im Vergleich zu einer handgeführten Bohrung, so wie in der Regel in der Praxis üblich, konnte durch diesen Aufbau die Auswirkung einer initialen Schiefstellung durch den Bediener und somit der Einfluss des Handlings reduziert werden. Der Kernbohrständer wurde fest auf einem Tisch montiert, die Probekörper unterhalb des Bohrers in einer fest eingespannten Vorrichtung positioniert. Die anschließenden Bohrungen erfolgten durch die manuelle Bedienung des Bohrständers mit einem über alle Bohrungen gemittelten Vorschub von 12 mm pro Sekunde und einer konstanten Drehzahl von 650 U/min.
Der Zuschnitt der Probekörper erfolgte an einer Formatkreissäge, an der die Probekörper mit dem vorgesehenen Faserwinkel aus einem BSH-Träger herausgeschnitten wurden. Trotz der Verwendung eines großen Sägeblatts und eines Anschlags bei der Durchführung der Schnitte entstehen leichte Schiefstellungen der Schnittflächen. Damit diese Abweichungen bei der Auswertung der Ergebnisse nicht verfälschend wirken, ist die Berücksichtigung der exakten Geometrie der Probekörper notwendig. Aus diesem Grund wurde für die Auswertung ein systematisiertes Verfahren entwickelt. Die Geometrie der Probekörper wird dabei durch das Vermessen aller Kantenlängen und Diagonalen erfasst und anschließend

in ein 3D-Modell überführt. Anschließend werden die vermessenen Eintritts- und Austrittspositionen im Modell an ihre exakte Position eingefügt.

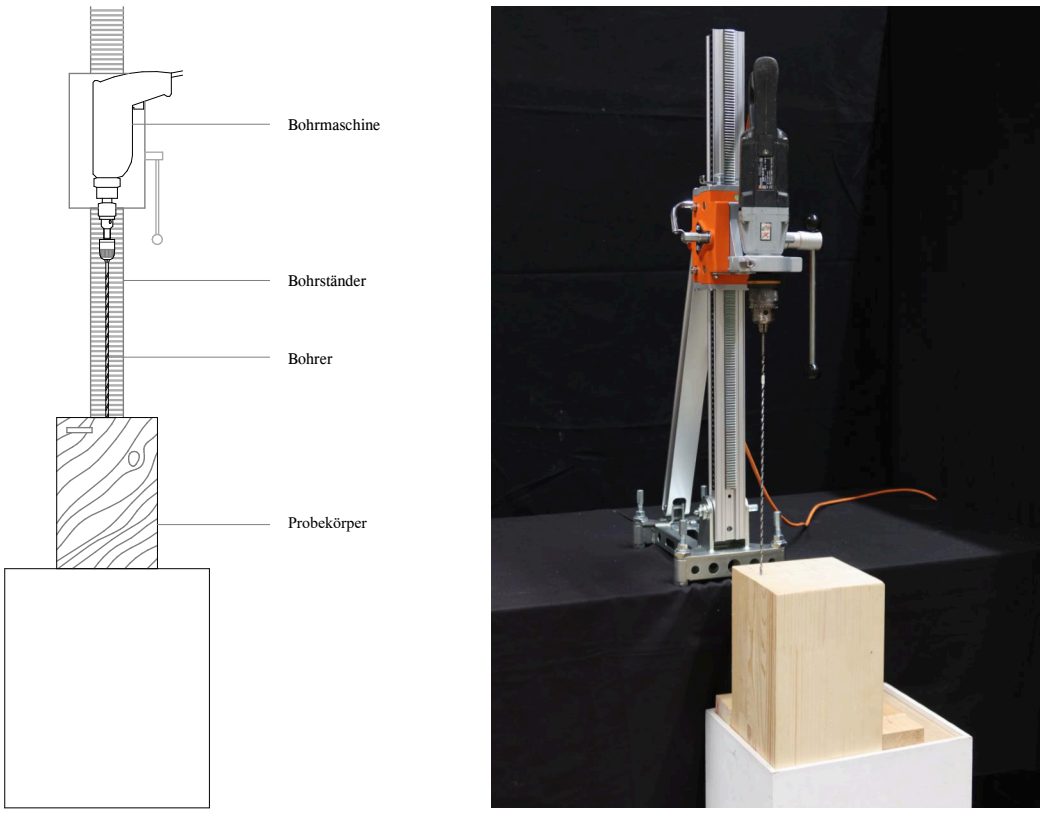


Abbildung 4.2: Versuchsstand zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Verlaufen von Bohrern

Zur Ermittlung des Verlaufs der Bohrungen über die Tiefe werden die Probekörper, deren Geometrie in Abbildung 4.3 gezeigt ist, entlang der Leimfugen aufgetrennt und die Positionen der Bohrlöcher an den einzelnen Scheiben in dem digitalen Modell ergänzt. Die zu einer Bohrung zugehörigen Punkte werden über die Tiefe durch eine Polylinie verbunden, wobei die Punkte der einzelnen Scheiben als Kontrollpunkte herangezogen werden.

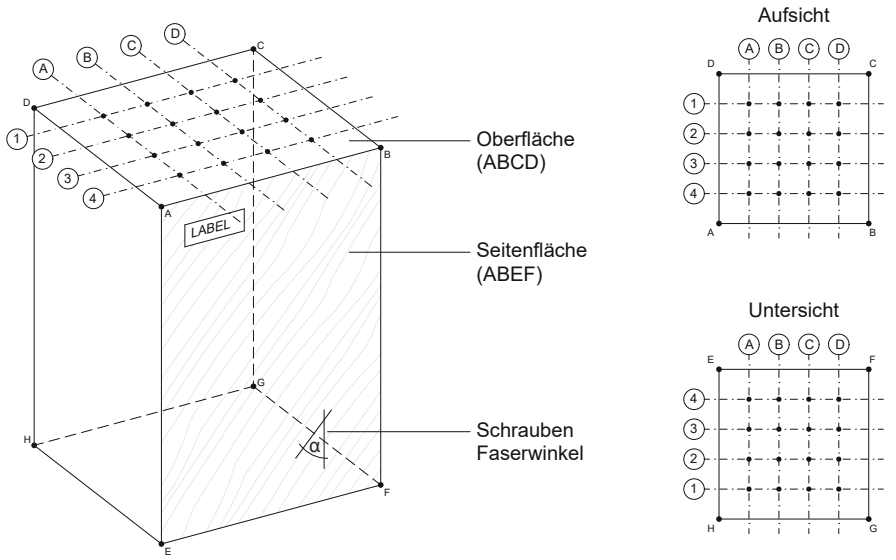


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Geometrie der Probekörper

Mit diesem Vorgehen lassen sich die Ungenauigkeiten durch die abweichende Geometrie der Probekörper sowie der tatsächliche Verlauf der Bohrung, inklusive der Krümmung, mit einer hohen Genauigkeit nachbilden. Die gesamte Auswertung erfolgt in einer automatisierten Routine mit der CAD Software Rhino in Kombination mit einem entwickelten Grasshopper-Skript. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Bohrversuche gezeigt und diskutiert.

4.1.2 Ergebnisse

Abbildung 4.4 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe der 5mm Bohrer in einer Aufsicht auf die jeweiligen Probekörper aus dem erstellten 3D-Modell.

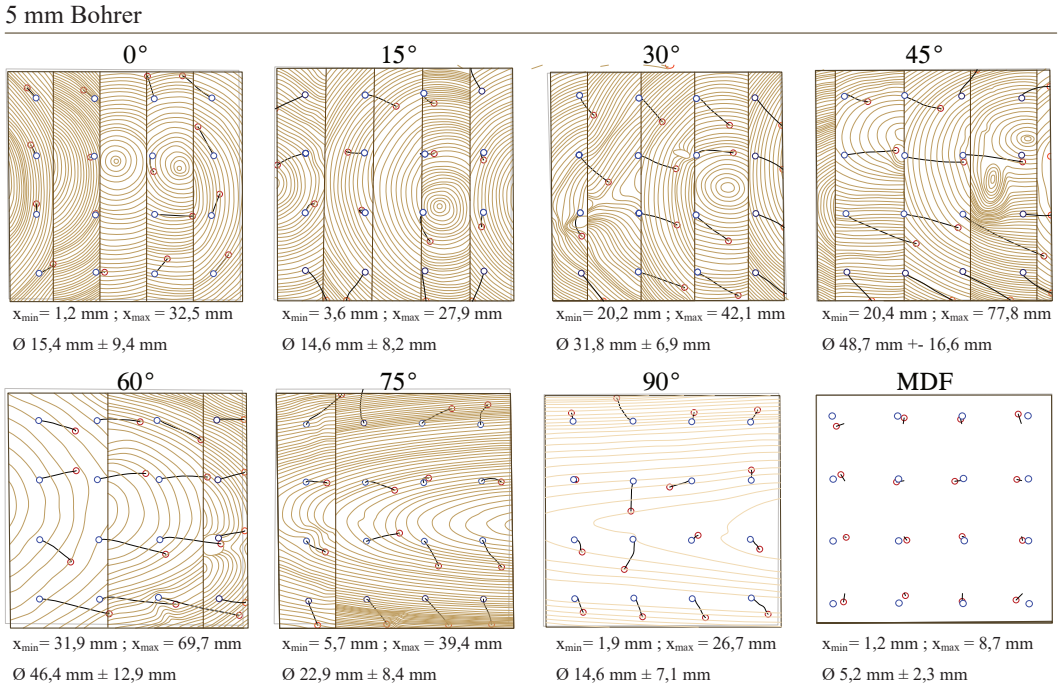


Abbildung 4.4: Oberfläche ABCD der Probekörper mit Eintritts- (blau) und Austrittspositionen (rot) der Bohrer in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels

Für die jeweiligen Probekörper ist die Oberfläche mit dem Verlauf der Jahresringe abgebildet. Die Umrisse der Unterseite des 30 cm hohen Probekörpers ist mit einer grauen Linie dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die beiden sich gegenüberliegenden Flächen nicht deckungsgleich sind, was die Ungenauigkeit bei die Herstellung der Probekörper verdeutlicht. Der Versatz der beiden Oberflächen variiert je nach Probekörper und beträgt in seiner maximalen Ausprägung mehrere Millimeter. Die Eintrittspositionen auf der oberen Seite des Probekörpers sind als blaue Kreise dargestellt, entsprechend des Durchmessers der Bohrer; die Austrittspositionen auf der Unterseite durch rote Kreise. Austritte der Bohrer an den Seitenflächen der Probekörper sind durch einen nicht geschlossen Kreis markiert. Die Abweichung a wird als direkte Verbindung zwischen dem Eintrittsloch und dem jeweiligen auf die Oberfläche des Probekörpers projizierten Austrittsloch definiert. Dabei wird von Mittelpunkt zum Mittelpunkt der beiden Kreise gemessen. Die Diagramme in Abbildung 4.5 fassen die Ergebnisse der gemessenen Abweichungen je nach Bohrer-Faser Winkel für die zwei Bohrdurchmesser

zusammen. Dabei ist anzumerken, dass für die Auswertung lediglich diejenigen Bohrungen berücksichtigt wurden, deren Austrittsposition auf der Unterseite des Probekörpers lagen und somit eine Bohrtiefe von 30cm aufweisen; die Anzahl je nach Bohrer-Faser Winkel variiert.

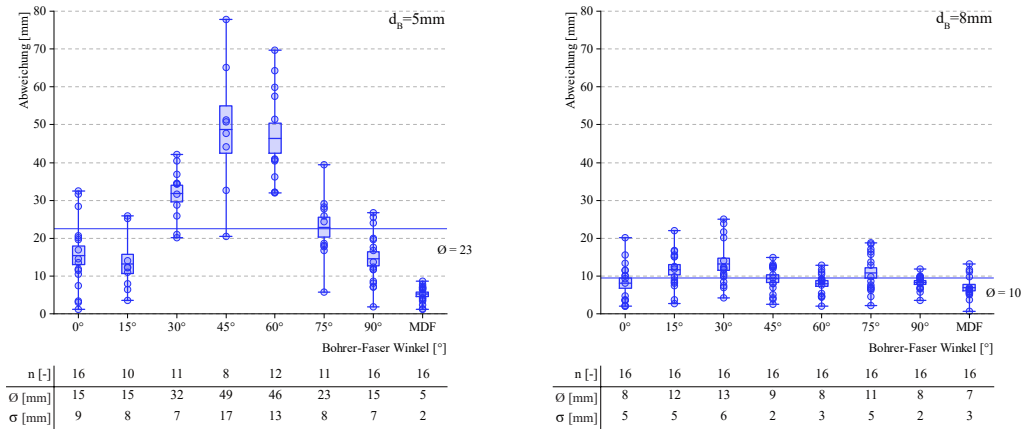


Abbildung 4.5: Gemessene Abweichungen in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels für 5 mm Bohrer (links) und 8 mm Bohrer (rechts)

Aus den gezeigten Ergebnissen können folgende Rückschlüsse gezogen werden:

- Der Einfluss des Durchmessers des Bohrers und damit seiner Steifigkeit lässt sich an dem über alle Winkel gemittelten Wert der Abweichungen festlegen. Bei der Verwendung des 5 mm Bohrers ist der Wert von $\varnothing_{a,d5}= 22,5$ mm, 2,4 mal höher als der des 8 mm Bohrers $\varnothing_{a,d8}= 9,5$ mm.
- Die Steifigkeit der Bohrer wirkt sich deutlich auf die Streuung der gemessenen Abweichungen aus. Mit einer mittleren Standardabweichung von 9 mm im Vergleich zu 3.9 mm ist die Streuung des dünneren Bohrers 2,3 höher als die des dickeren Bohrers.
- Für die dünneren Bohrer ist ein deutlicher Einfluss des Bohrer-Faser Winkels auf die resultierenden Abweichungen erkennbar. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Tendenz, bei dem die Abweichungen bei schrägen Winkeln über 15 ° deutlich zunehmen und ab einem Winkel größer als 60 ° wieder abnehmen. Die maximalen Abweichungen werden mit einem Maximalwert von 78 mm und einem Mittelwert von 49 mm bei 45 ° erreicht. Der Effekt verringert sich durch die Erhöhung der Steifigkeit des Bohrers und ist an den Ergebnissen der 8 mm Bohrer nicht erkennbar.

- Die Referenzbohrungen in die MDF-Probekörper verdeutlichen, dass die Abweichungen insbesondere aus der inhomogenen Struktur des Holzes und insbesondere der Faserneigung resultieren. Die Abweichungen im MDF sind für beide Durchmesser der Bohrer vergleichbar und liegen im Mittel bei 5 bzw. 7 mm bei Standardabweichungen von 2 bzw. 3 mm.

In Bezug auf die Richtung des Verlaufens lässt sich ein deutlicher Trend erkennen. Dies ist bereits bei der Betrachtung der Ein- und Austrittspositionen in Abbildung 4.5 zu erkennen und wird durch die Betrachtung der Bohrverläufe über die Tiefe in Abbildung 4.6 noch deutlicher. In dieser sind die Verläufe der Bohrer von der Seite dargestellt, wobei die Eintrittspositionen auf einen Punkt bezogen sind. Die Bohrungen parallel ($\alpha = 0\,^\circ$) und orthogonal ($\alpha = 90\,^\circ$) zur Faserrichtung, sowie die Bohrungen mit ($\alpha = 15\,^\circ$) verlaufen in beliebige Richtungen, eine vorwiegende Tendenz ist nicht zu erkennen. Die Bohrungen mit schrägen Faserwinkeln zwischen $\alpha = 30\,^\circ$ und $\alpha = 75\,^\circ$ weisen alle eine deutliche Vorzugsrichtung, entgegengesetzt der Faserorientierung, auf. Diese klare Tendenz wurde lediglich für die dünneren Bohrer (5mm) beobachtet. Für die Bohrungen mit dem dickeren Bohrer (8 mm) kann ein solch eindeutiges Verhalten nicht festgestellt werden. Eine entsprechende Darstellung der Ergebnisse für die 8 mm Bohrer ist in Anhang B.1 enthalten.

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, besitzen Holzbohrer eine Vorschneide mit der das Bohrloch vor der eigentlichen Abspanung des Materials am Rand ausgeschnitten wird. Die verwendeten Bohrer besitzen eine Vorschneide auf einer Seite des Bohrers. Beim Bohren parallel zur Faserrichtung werden die Fasern mit der Vorschneide in einem spitzen Winkel angeschnitten. Beim Bohren orthogonal zur Faserrichtung werden die Schichten des Holzes quer zu Ihrer Orientierung geschnitten und gleichmäßig abgetragen. Es ist anzunehmen, das sich der Bohrer beim Bohren unter einer schrägen Faserneigung an den geneigten Spätholzschichten festzieht und somit eine Ablenkung entgegengesetzt der Richtung der Faserorientierung erfährt. Es ist eine Tendenz der Orthogonalausrichtung festzustellen, bei dem sich der Bohrer solange in die Richtung entgegengesetzt des Faserverlaufs hinzieht bis die Bohrung möglichst quer zur Faserrichtung stattfindet.

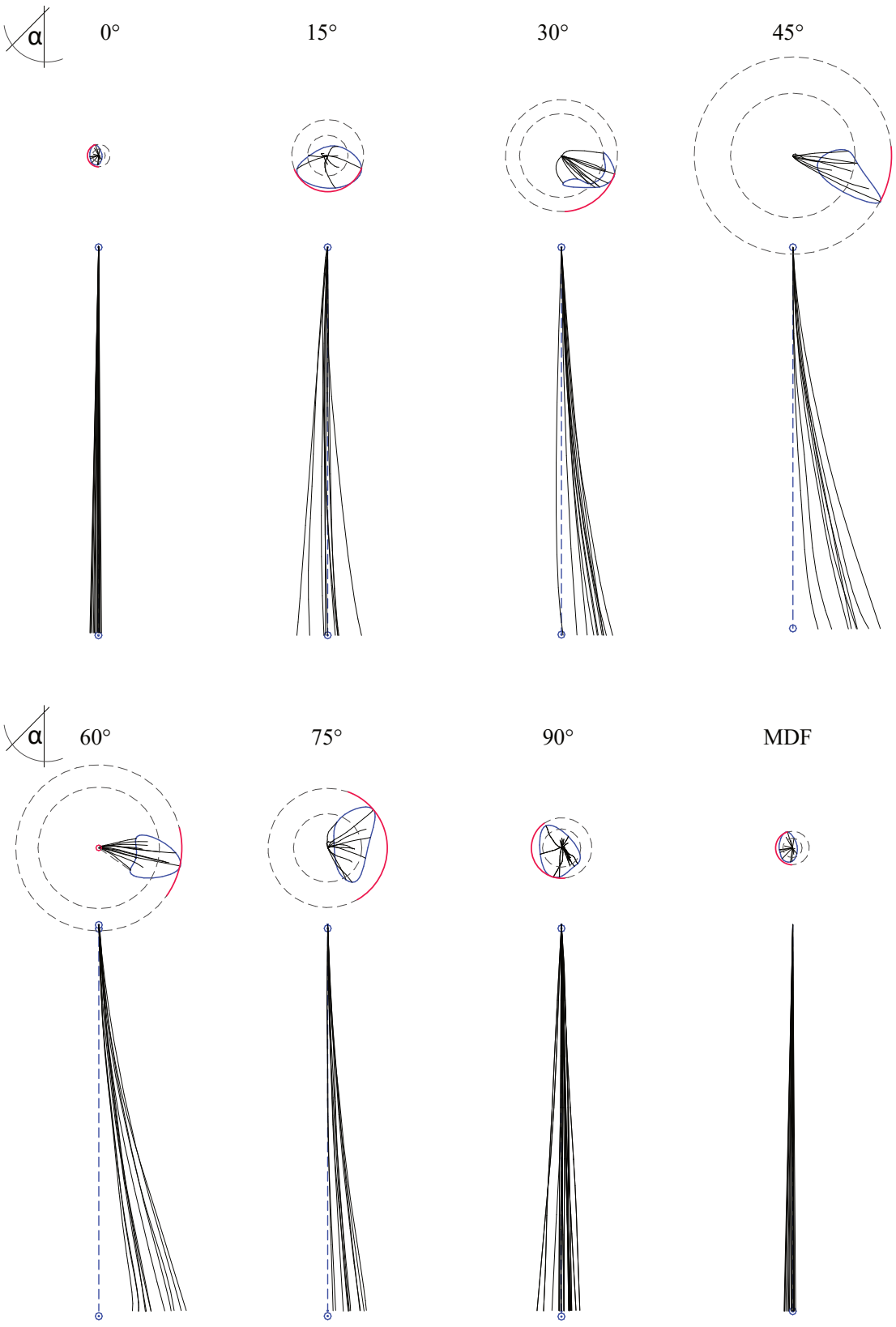


Abbildung 4.6: Bohrverläufe in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels; $d_B = 5\,mm$ als Ansicht der Seitenfläche ABEF

Ausschluss plastischer Verformungen der Bohrer als Einflussgröße

Für die Durchführung der 128 Bohrungen eines Bohrdurchmessers wurde derselbe Bohrer verwendet. Zur Überprüfung, inwiefern eine initiale plastische Verformung des Bohrers sukzessiv die Ergebnisse des Verlaufens beeinflusst, wurden die Geometrien der verwendeten Bohrer vor sowie nach Durchführung der Versuchsreihe verglichen. Hierfür erfolgte eine dreidimensionale Aufnahme der Bohrer mithilfe eines 3D-Scanners. Die Netze der generierten Scans wurden in ein Volumenmodell überführt aus welchem die Mittellinien der Geometrie ermittelt wurde. Durch Überlagerung der beiden Mittellinien aus den Scans vor und nach der Durchführung der Bohrungen kann die Abweichung der beiden Geometrien über den Verlauf der Länge bestimmt werden.
Die Auswertung der Ergebnisse ergab keine signifikanten Abweichungen, sodass davon auszugehen ist, dass trotz der gezeigten, starken Krümmungen der Bohrer während des Bohrprozesses, keine nennenswerten bleibenden Verformungen auf die Bohrer resultieren. Der Einfluss einer sukzessiv zunehmenden Vorverkrümmung des Bohrers durch plastische Verformung bei der Durchführung der gezeigten Versuche kann somit vernachlässigt werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Das Verlaufen von Bohrern wird wesentlich durch die Steifigkeit des Bohrers beeinflusst. Die Abweichungen des dickeren Bohrers ($d_B = 8\,mm$) im Vergleich zum dünneren Bohrer ($d_B = 5\,mm$) sind je nach Bohrer-Faser Winkel um das 1,2 bis das 5,8-fache reduziert.
- Bei dünnen Bohrern ist das Verlaufen stark vom Bohrer-Faser Winkel abhängig.
- Für dickere Bohrer hat der Bohrer-Faser Winkel keinen starken Einfluss.
- Für schräge Einschraubungen $\alpha = 15\,^\circ$ - $75\,^\circ$ weisen die Bohrungen eine eindeutige Tendenz des Verlaufen entgegen der Faserrichtung auf. Diese Tendenz ist auf die Beschaffenheit der Bohrspitze zurückzuführen, die sich beim Bohren in die Spätholzschichten hineindreht.
- Trotz der starken Krümmung der Bohrer während des Bohrprozesses verbleiben die Bohrer annähernd gerade, bleibende Verformungen der Bohrer wurden nicht festgestellt.

4.2 Verlaufen von Vollgewindeschrauben

Analog zu den Untersuchungen zum Verlaufen der Bohrer wurde eine Versuchsreihe zur Untersuchung des Verlaufens von Vollgewindeschrauben durchgeführt. Neben der Betrachtung nicht vorgebohrter Einschraubungen sollte insbesondere der Einfluss einer teilweisen Vorbohrung auf die resultierenden Abweichungen untersucht werden. Hierzu kamen unterschiedliche Vorbohrtiefen zum Einsatz, welche vorab mithilfe des entwickelten pyrolytischen Verfahrens aus Abschnitt 3.4 hergestellt wurden. Das Versuchsprogramm, siehe Abbildung 4.7, umfasste die gleichen 7 Schrauben-Faser Winkel wie bei der Versuchsreihe zum Verlaufen der Bohrer sowie Referenzversuche in MDF, vier Vorbohrtiefen und zwei Schraubendurchmesser. Die Produktdatenblätter der verwendeten Schrauben sind in Anhang A.2 enthalten. Es wurden Probekörper der gleichen Geometrie verwendet, die auf die gleiche Weise, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, hergestellt wurden. Die Versuche ohne Vorbohrung wurden mit einer Wiederholung von 16 Einschraubungen je Parameterkombination durchgeführt. Für Einschraubungen mit initialer, pyrolytischer Vorbohrung wurde die Anzahl auf jeweils 8 reduziert.

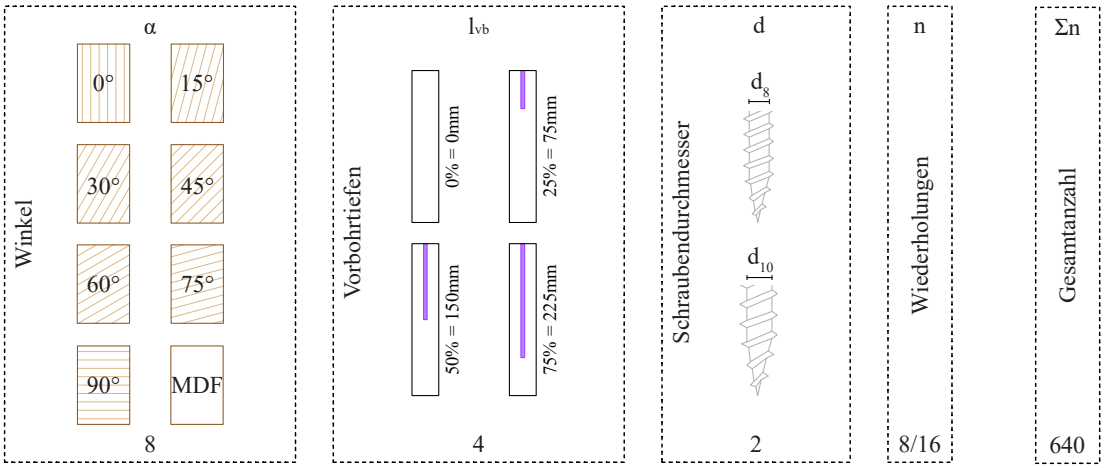


Abbildung 4.7: Umfang der Versuchsreihe zum Verlaufen von Vollgewindeschrauben ohne und mit initialer pyrolytischer Vorbohrung

4.2.1 Versuchsaufbau und Untersuchungsmethodik

Für die Einschraubversuche der Vollgewindeschrauben wurde am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) ein spezieller Versuchsstand entwickelt und aufgebaut, der die Aufzeichnung des zurückgelegten Weges sowie die des entstehenden Drehmoments beim Ein- und Ausschrauben der Schrauben ermöglicht (siehe Abbildung 4.8). Der Versuchsstand verfügt über einen Motor, der mit einer gleitenden

Lagerung an eine vertikale Stütze eines Stahlrahmens angebracht ist. Der Probekörper wird auf einer darunter liegenden starren Stahlplatte aufgelagert und mithilfe eines Schraubstockes in der Position fixiert. Durch das Verstellen der Platte können unterschiedliche Einschraubtiefen realisiert werden. Der Aufbau ermöglicht eine lineare nach unten gerichtete Bewegung mit einer konstanten Auflast, welche aus dem Eigengewicht des Motors resultiert und mithilfe eines Gegengewichts variiert werden kann. Die Untersuchungen wurden mit einer konstanten Auflast von 10 kg durchgeführt. In Voruntersuchungen ließ sich kein signifikanter Einfluss der Auflast auf das Drehmoment feststellen. Der verwendete Motor ermöglicht auch die Einstellung einer konstanten Einschraubgeschwindigkeit, die bei der Durchführung auf 50 Umdrehungen pro Minute eingestellt wurde. Dieser Wert entspricht einer typischen Geschwindigkeit, die im Schnitt auch beim händischen Einschrauben erreicht wird.

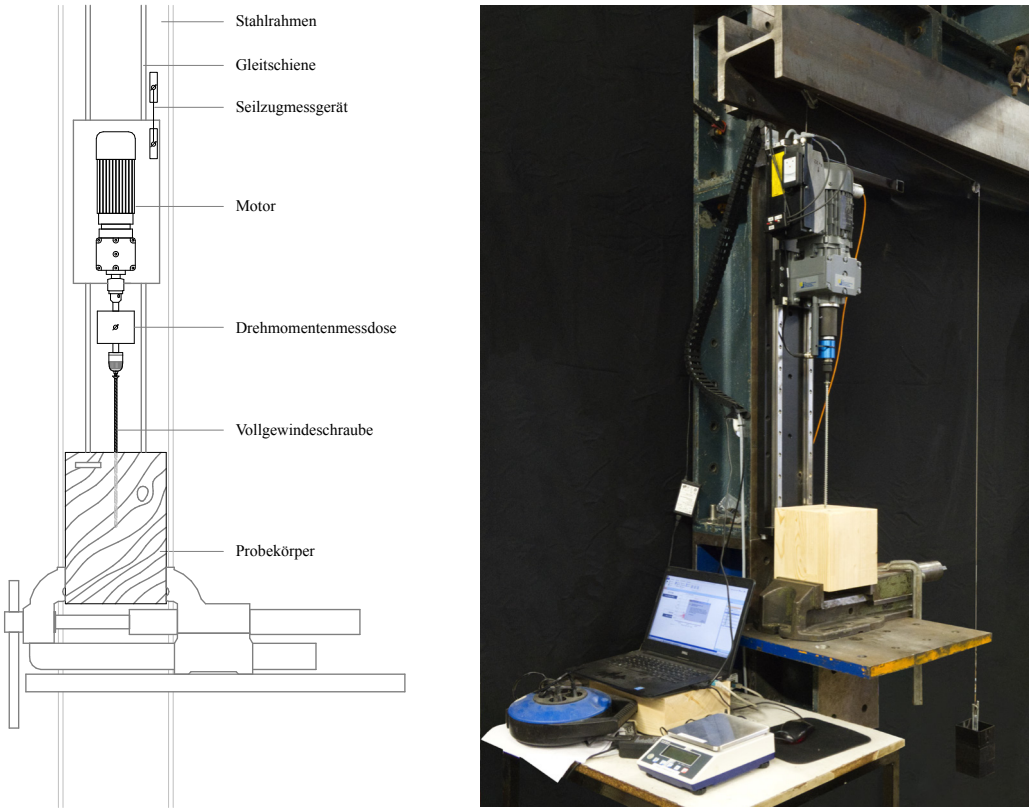


Abbildung 4.8: Versuchsstand zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Verlaufen von Vollgewindeschrauben

Die Aufzeichnung des zurückgelegten Weges des Motors gleichbedeutend mit der Einschraubtiefe der Schraube erfolgt über ein Seilzugmessgerät, welches an dem gleitenden Schlitten des Motors fest angebracht und mit einem fixen Punkt

der Stahlstütze verbunden ist. Das Drehmoment wird mit einer Drehmomenten-Messdose am Bohrfutter aufgezeichnet. Die Korrelation der gemessenen Werte der Einschraubtiefe und des dazugehörigen Drehmoments erfolgt über einen Messverstärker, indem beide Signale über die Zeit synchronisiert werden.

4.2.1.1 Abgrenzung zu bestehenden Untersuchungen zum Drehmoment beim Eindrehen von Vollgewindeschrauben

Im Rahmen der Versuchsreihe sollte überprüft werden, inwiefern sich die Betrachtung des Drehmoments eignet, um auf strukturelle Ausprägungen des Holzes im Inneren zu schließen. In Zusammenhang mit der Entwicklung des pyrolytischen Bohrprozesses sollte ebenfalls die Frage beantwortet werden, ob sich das Drehmoment auch für die Beurteilung der Bohrlochgeometrie und somit der Bohrlochqualität heranziehen lässt. Die Messung des Drehmoments könnte eine Abschätzung des Verbund- und Ausziehverhaltens bereits beim Eindrehen der Schrauben erlauben. So könnten die Auswirkungen der Bohrlochqualität, im Sinne eines ausreichend dünnen Bohrlochs, in Bezug auf das Verbundverhalten beurteilt werden.
Die Bestimmung des Drehmoments beim Eindrehen von Schrauben ist in der europäischen Norm DIN EN 15737:2009 geregelt [38]. In dieser wird ein Aufbau für einen Probekörper mit definierten Mindestmaßen und Mindestabständen definiert. Die Bohrung kann dabei mithilfe einer mechanischen Bohrmaschine, einer speziellen Einschraubmaschine oder mit einem handgeführten Schraubendreher unter Einhaltung einer maximalen Einschraubgeschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute erfolgen. Für die Messung des Drehmoments ist eine Drehmomenten-Messzelle vorgesehen die zwischen das Bohrfutter und der Schraube anzubringen ist. Konkrete Anwendungen der Messung des Drehmomentes beim Eindrehen von Schrauben sind bisher aus einzelnen Forschungsarbeiten bekannt:
In der Arbeit von Uibel [113] wird eine Einschraubvorrichtung vorgestellt mit der neben der Messung der Spaltkräfte auch das Drehmoment gemessen werden kann. Trotz der Aufzeichnung des Drehmoments bei insgesamt 655 durchgeführten Einschraubversuchen wird dieses nicht explizit ausgewertet und für die Beurteilung des Spaltverhaltens nicht weiter thematisiert.
In den durchgeführten Einschraubversuchen von Zhang [119], [120] wird ebenfalls das Drehmoment beim Eindrehen von Vollgewindeschrauben in Brettschichtholz aufgezeichnet. Das Versuchsprogramm beinhaltet unterschiedliche Schraubenarten (Voll- und Teilgewindeschrauben) sowie mechanisch vorgebohrte Einschraubungen. Das Einschrauben erfolgt händisch mit einer Akkubohrmaschine. Die Aufzeichnung findet mithilfe eines Drehmomentenadapters statt, bei dem der aktuelle Wert des Widerstands, ähnlich zu einem klassischen Drehmomentenschlüssel, über ein digitales Display angezeigt wird. Es erfolgt keine simultane

Aufzeichnung des zurückgelegten Weges. Die Korrelation des gemessenen Drehmoments mit der Einschraubtiefe wird vorgenommen, indem der aktuell angezeigte Wert des Widerstands mit einer Videokamera aufgezeichnet und anschließend über die Gesamtdauer der Bohrung in die entsprechende Tiefe umgerechnet wird. Trotz der Ungenauigkeiten, resultierend aus dieser Vorgehensweise, werden aus den Ergebnissen bestimmte Regelmäßigkeiten erkennbar. Es lassen sich grobe strukturelle Fehlstellen, wie Asteinschlüsse, ablesen. Auch wird der Effekt der initialen Vorbohrung auf das gemessene Drehmoment deutlich. Es wird festgehalten, dass Teilgewindeschrauben eine im Vergleich zu Vollgewindeschrauben einfachere Montage erlauben, was durch die Reduzierung des gemessenen Drehmoments begründet wird.
Aktuelle Untersuchungen der Forschungsgruppe des *Instituts für Holzbau und Holztechnologie* der TU Graz widmen sich der Beurteilung des Energieverbrauchs beim Einbringen von Vollgewindeschrauben. Es wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem über die Messung des Drehmoments beim Eindrehen von Schrauben die dafür erforderliche Energie berechnet wird, die im Rahmen eines Life Cycle Assessments für die Erstellung einer Energiebilanz verwendet werden kann [46], [52]. Die Berechnung der Energie erfolgt über die Integration des gemessenen Drehmoments über die Zeit. Es erfolgt keine explizite Beurteilung und Auseinandersetzung mit dem Verlauf des Drehmoments über die Tiefe der Einbringung. Die präsentierten Ergebnisse zeigen eine klare Abhängigkeit der berechneten Energie und somit auch des gemessenen Drehmoments von der Rohdichte des Holzes, dem Schrauben-Faser Winkel, sowie dem Durchmesser der Schraube.

4.2.2 Ergebnisse der durchgeführten Versuche

Die Ergebnisse der eigenen durchgeführten Versuche beinhalten die Auswertung der tatsächlich mit dem pyrolytischen Bohrverfahren realisierten Vorbohrtiefen, die Visualisierung und Diskussion des gemessenen Drehmoments beim Ein- und Ausdrehen der Schrauben sowie die Beurteilung des Verlaufens der Schrauben durch die Messung der Abweichungen zwischen Eintritts- und Austrittsposition, analog zum Vorgehen in Abschnitt 4.1.2.
Die Darstellung des Drehmoments erfolgt in Diagrammen, bei denen der gemessene Wert auf der x-Achse gegenüber der entsprechenden Einschraubtiefe mit negativem Vorzeichen auf der y-Achse aufgetragen wird. Diese Art der Darstellung entspricht der Einschraubrichtung der Versuchsdurchführung und ermöglicht eine Gegenüberstellung des Kurvenverlaufs mit der Schnittfläche und somit den inneren strukturellen Ausprägungen des Holzes. Zur detaillierteren Auswertung des Zusammenhangs zwischen dem Verlauf des Drehmomentes und den struktu-

rellen Merkmalen, wurden für ausgewählte Einschraubungen die Probekörper der Länge nach aufgeschnitten. Dafür wurden solche Einschraubungen ausgewählt, bei denen eine signifikante Abweichung zur gemittelten Kurve deutlich war. Das Aufschneiden erfolgte in Richtung des Verlaufens der Schraube, was von Fall zu Fall zwischen einem Radial- und einem Tangenzialschnitt variiert. Die Diagramme zeigen das Schnittbild der jeweiligen Einschraubung, den dazugehörigen gemessenen Drehmomentenverlauf (blau) sowie die Mittelkurve aller 8 bzw. 16 Messungen mit gleichen Parametern (rot). Die gezeigten und erläuterten Fälle stehen repräsentativ zur Beschreibung der Zusammenhänge, die aus der Analyse der Gesamtheit der Einschraubungen durch eine ausreichend hohe Anzahl belegt sind. Die Diagramme aller ausgewerteten Einschraubungen, inklusive der Schnittflächen sind in Anhang B.4 enthalten.

4.2.2.1 Vorbohrtiefe

Die vier Sollvorbohrtiefen für die pyrolytische Vorbohrung wurden jeweils als prozentualer Anteil der Gesamttiefe der Probekörper definiert. Für die 300 mm hohen Probekörper betrugen die Vorbohrtiefen 75 mm = 25 %, 150 mm = 50 % und 225 mm = 75 %.
Da der Vortrieb des Lasers durch die Struktur des Holzes beeinflusst wird, unterliegt der Prozess einer Streuung. Trotz dieser Streuung ist der Bohrvorgang annähernd linear zur Anzahl der eingebrachten Pulse, sodass eine definierte Vorbohrtiefe über die Einstellung der Anzahl der Pulse erreicht werden kann. Das Ergebnis der gemessenen Vorbohrtiefen der durchgeführten Bohrungen ist in den Diagrammen der Abbildung 4.9 im Vergleich zu den Sollvorgaben dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte mit Abweichungen von bis zu mehreren Zentimetern um die Sollvorgabe streuen. Je nach Laser-Faser Winkel liegen die Ergebnisse über oder unter der vorgegebenen Tiefe, sodass eine eindeutige Tendenz nicht identifiziert werden kann. Dies gilt auch in Bezug auf den über alle Bohrungen gemittelten Wert der erreichten Tiefen. Während dieser bei der 150 mm tiefen Vorbohrung nah an der Zielvorgabe liegt, weicht er bei der 75 mm Bohrung um 12 mm nach oben ab, bei der tieferen Vorbohrung von 225 mm liegt dieser 20 mm unter der Zielvorgabe. Die Referenzbohrungen in MDF weisen in allen drei Fällen die geringste Streuung auf. Die Ergebnisse bestätigen, dass das Verfahren zwar über die Einstellung der Pulsanzahl gesteuert werden kann, dieses jedoch einer Streuung unterliegt, sodass eine Vorbohrung in Bezug auf die Tiefe nicht millimetergenau durchgeführt werden kann. Trotz dieser Streuung ist der Prozess des pyrolytischen Vorbohrens über die Gesamtheit aller durchgeführten Bohrungen als kontrollierbar und reproduzierbar einzustufen.

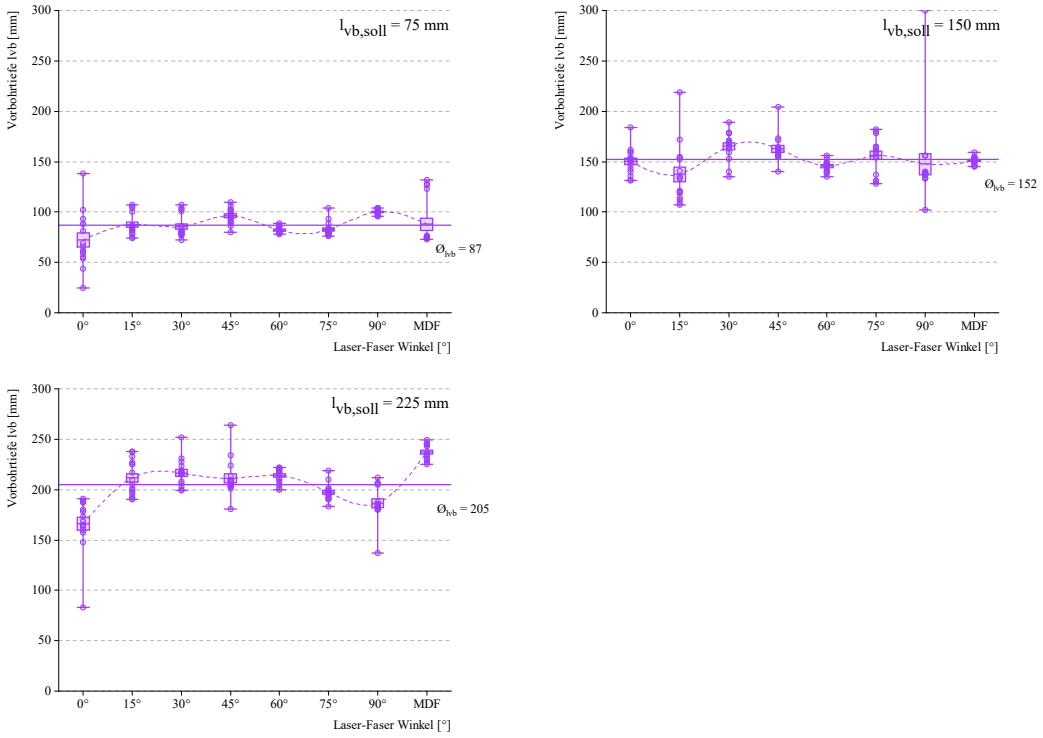


Abbildung 4.9: Gemessene Vorbohrtiefen $l_{vb,ist}$ für die unterschiedlichen Sollvorbohrtiefen $l_{vb,soll} = 75\,mm$, $150\,mm$ und $225\,mm$

4.2.2.2 Einschraubdrehmoment

Einfluss des Schrauben-Faser Winkels

Zur Ermittlung des Einflusses des Schrauben-Faser Winkels wurden aus den 16 (A1 - D4) bzw. 8 (A1 - B4, C1 - D4) durchgeführten Einschraubungen einer jeder Parameterkombination Mittelkurven gebildet. Abbildung 4.10 zeigt beispielhaft die Drehmomentverläufe aller Einschraubungen einer Parameterkombination (8 mm Schraube, nicht vorgebohrt) inklusive der gebildeten Mittelkurve für $\alpha = 0\,°$ und $\alpha = 45\,°$. Die Diagramme der gesamten Versuchsreihe sind in Anhang B.3 enthalten. Aufgrund der hohen Anzahl an Wiederholungen lässt sich erkennen, dass Ausreißer einzelner Einschraubungen nur einen geringen Einfluss auf den Verlauf der gemittelten Kurve aufweisen. Die Mittelkurven können also als charakteristische Kurven der jeweiligen Parameterkombination betrachtet werden.

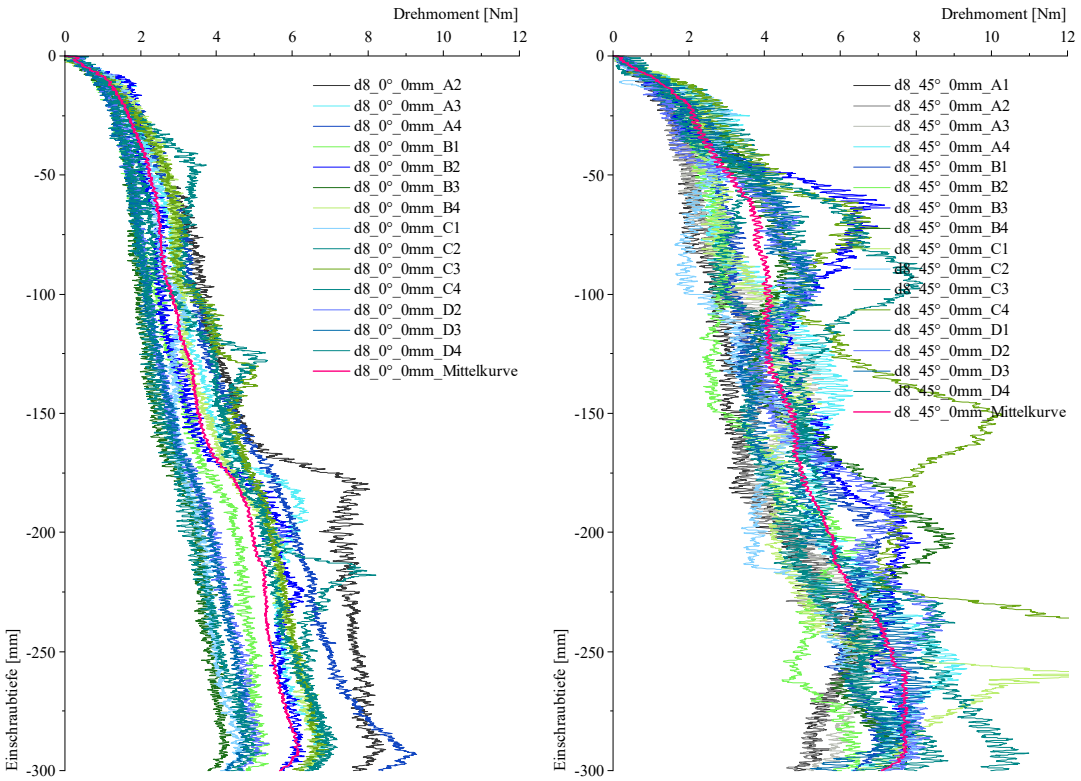


Abbildung 4.10: Bildung der Mittelkurven der Einschraubungen A1 - D4 einer Parameterkombination, repräsentativ anhand zweier Beispiele für Einschraubungen ohne Vorbohrung mit Schrauben-Faser Winkel von $\alpha = 0\,^\circ$ (links) und $\alpha = 45\,^\circ$ (rechts)

Die Darstellung der Mittelkurven für die jeweiligen Schrauben-Faser Winkel in Abbildung 4.11 verdeutlichen den Einfluss der Variation des Schrauben-Faser Winkels auf das Drehmoment. Alle Mittelkurven zeigen grundsätzlich einen ähnlichen Verlauf, der zu Beginn der Einschraubung einen steileren Bereich aufweist und anschließend nach einem Knick abflacht und annähernd linear über die Tiefe ansteigt. Im Fall der 8 mm Schrauben liegen die Kurven der unterschiedlichen Schrauben-Faser Winkel näher beieinander, während sie im Fall der 10 mm Schrauben größere Abstände aufweisen. In beiden Fällen ist jedoch die Erhöhung des Drehmoments mit steigendem Schrauben-Faser Winkel zu erkennen.

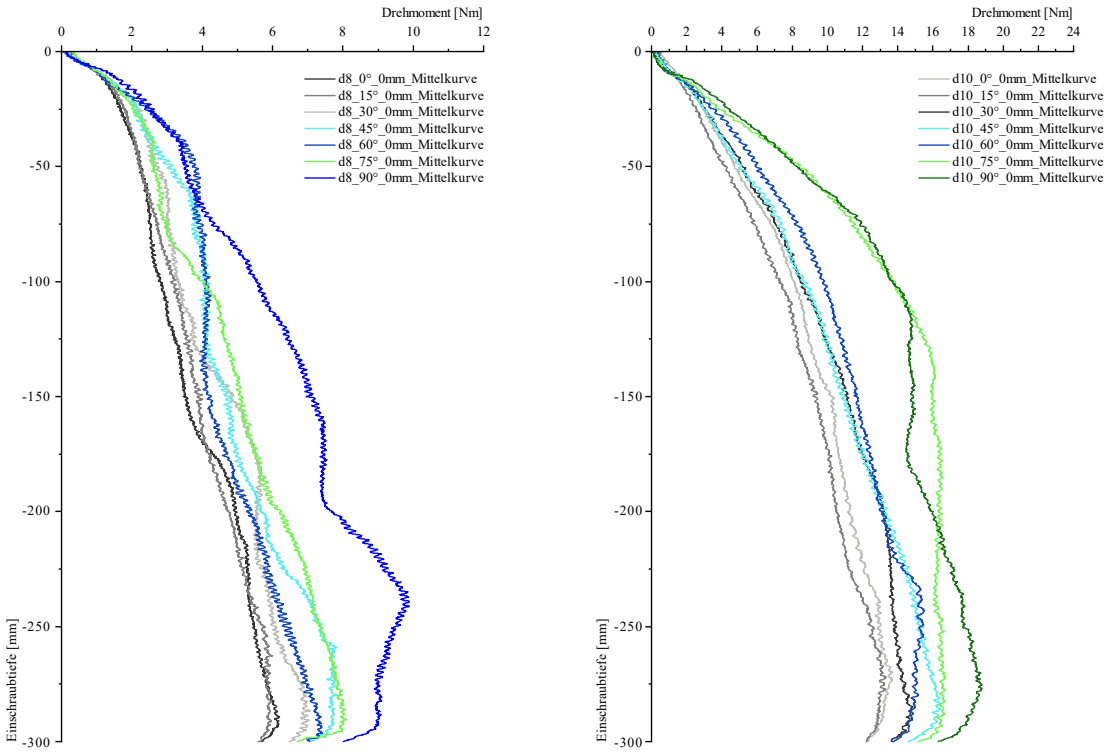


Abbildung 4.11: Vergleich der Mittelkurven der unterschiedlichen Schrauben-Faser Winkel für Schrauben d = 8 mm (links) und d = 10 mm (rechts)

Dies wird ebenfalls in den Diagrammen in Abbildung 4.12 deutlich. Das linke Diagramm zeigt die Werte der maximalen Drehmomente M_{max} der durchgeführten Einschraubungen je nach Schrauben-Faser Winkel, rechts sind die integrierten Flächen A_m unter den jeweiligen Kurven dargestellt.

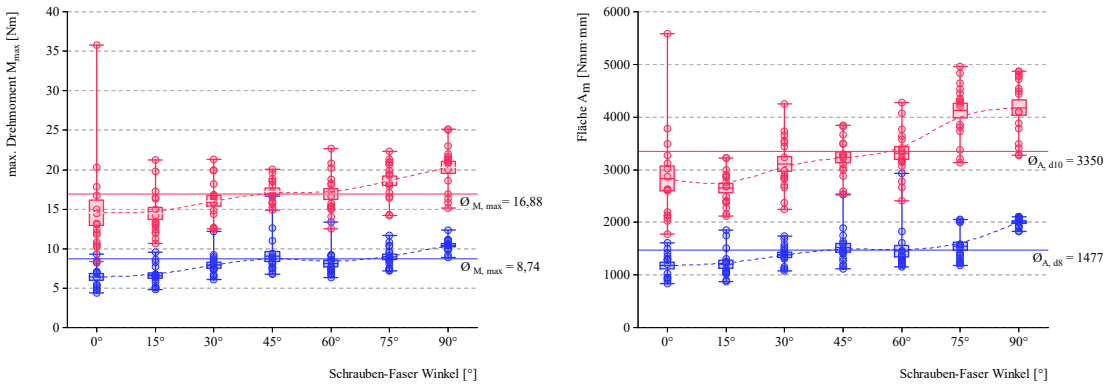


Abbildung 4.12: links: Vergleich der Maximalwerte; rechts: Vergleich der integrierten Flächen A_m

Die Fläche wird durch die Integration der Kurve ermittelt und ist die gesamte, aufzubringende Energie für das Einschrauben. Je nach Schrauben-Faser Winkel liegen die gemittelten Werte der 10 mm Schrauben 1,9 - 2,2 fach über denen der 8 mm Schrauben. Die Erhöhung der maximalen gemessenen Drehmomente je steigendem 15° Winkel betragen durchschnittlich 0.6 Nm für die 8 mm Schrauben und 0.8 Nm für die 10 mm Schrauben.

MDF

Analog zu der Versuchsreihe zum Verlaufen der Bohrer wurde für die Versuchsreihe zum Verlaufen der Vollgewindeschrauben Referenzprobekörper aus MDF hergestellt. Bei diesen konnten wie in Abschnitt 4.2.2.1 gezeigt, die Sollvorbohrtiefen deutlich genauer erreicht werden. Beim Eindrehen der Schrauben versagten die Probekörper jedoch durch horizontales Aufreißen. Dies ereignete sich in mehreren Fällen entlang einer Leimfuge, was auf eine unzureichende Verleimung bei der Herstellung hinweist. Vereinzelt trat das Aufreißen, wie in Abbildung 4.13 rechts zu sehen, aber auch durch die Überschreitung der Zugfestigkeit quer zur Plattenebene im freien Bereich einzelner MDF Schichten auf. Als Ergebnisse stehen lediglich die 8 Einschraubungen des nicht vorgebohrten Probekörpers mit der 8 mm Schrauben zur Verfügung. Das Diagramm in Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf des Drehmoments dieser Einschraubungen.

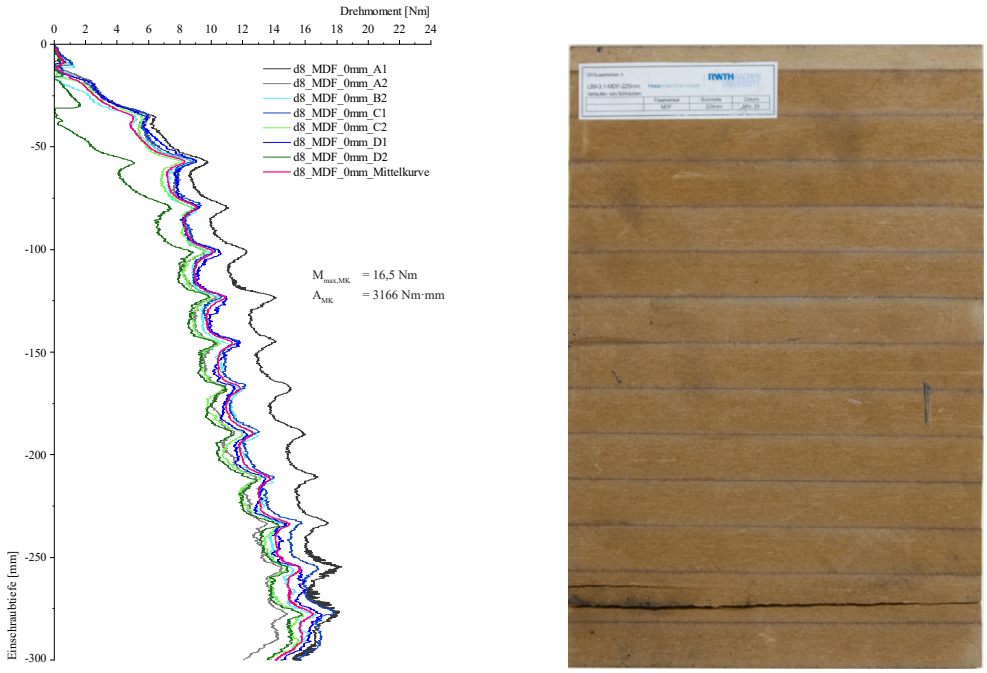


Abbildung 4.13: links: Kurven des Drehmoments der Einschraubversuche in MDF, d8, nicht vorgebohrt; rechts: aufgerissener Probekörper

An den Kurven lassen sich die Leimfugen deutlich ablesen. Die Kurven aller 8 Einschraubungen und somit auch die Mittelkurve weisen einen zackenförmigen Verlauf mit jeweils ausgebildeten Spitzen an den Stellen der Leimfugen auf. Es ist zu erkennen, dass die Kurven einzelner Einschraubungen der MDF Probekörper im Vergleich zu denen aus BSH näher beieinander liegen und weniger streuen. Aufgrund der höheren Dichte von MDF liegen sowohl die erreichten Maximalwerte, sowie die errechneten Flächen A_m deutlich über den Werten als der Probekörper aus BSH.

Dichteunterschiede

Die Dichte des Materials hat einen direkten Einfluss auf den Eindrehwiderstand und spiegelt sich somit auch in dem gemessenen Drehmoment wider. Dies wird an den Beispielen in Abbildung 4.14 deutlich. Das Diagramm links zeigt die Kurven der Drehmomente von nicht vorgebohrten 8 mm Schrauben bei einem Schrauben-Faser Winkel von $\alpha = 90\,°$. In dem Verlauf der Kurven ist bei einer Tiefe von etwa 200 mm ein deutlicher Anstieg zu erkennen, der auf einen Dichteunterschied in gleicher Tiefe zurückzuführen ist. Beim Betrachten der Seitenfläche des Probekörpers ist die engere Anordnung der Jahresringe erkennbar. Durch das Aufschneiden des Probekörpers entlang der Leimfugen konnten die unterschiedlichen Dichten der einzelnen Lamellen, die in der Abbildung eingetragen sind, ermittelt werden.

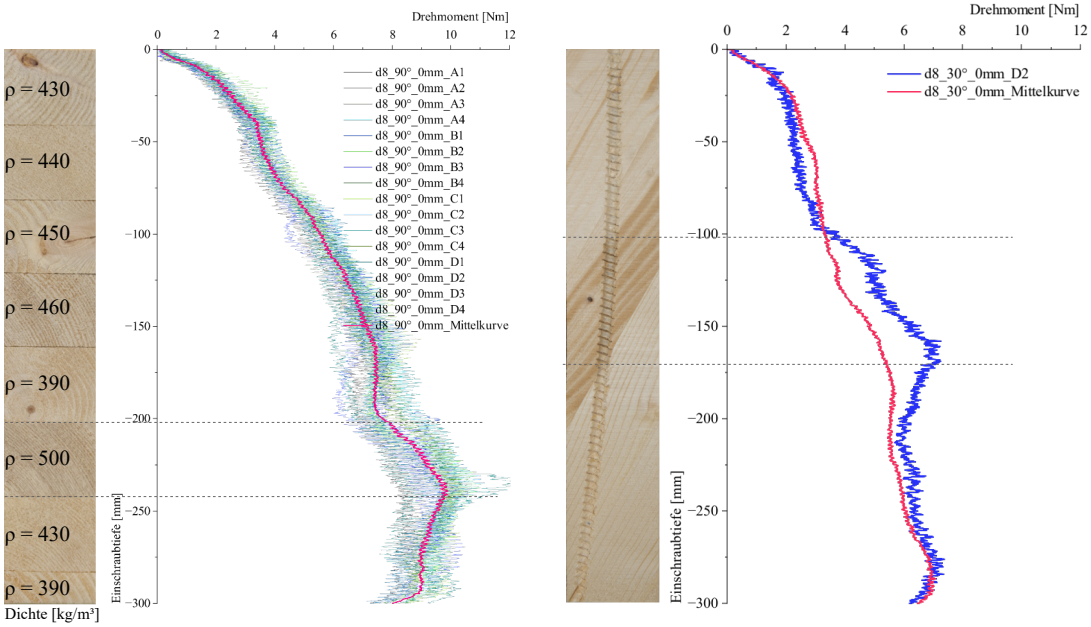


Abbildung 4.14: Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen; Dichteunterschiede

Die Steigerung der Dichte um 28 % im Vergleich zu der dichte der darüber liegenden Lamelle bewirkt im Mittel eine Erhöhung des Drehmoments um 2.1 Nm. Aufgrund der 90 °-Orientierung befindet sich die Lamelle für alle 16 Einschraubungen auf der gleichen Tiefe, sodass sich der Anstieg aller Kurven an dieser Stelle abzeichnet und sich auch in der Mittelkurve der 16 Bohrungen widerspiegelt.
Der Einfluss von Bereichen einer höheren Dichte lässt sich ebenfalls an einzelnen Einschraubungen feststellen, wenn der Verlauf einer Kurve „hubbelartig“ ansteigt. In diesen Fällen ist in der Regel eine Struktur mit dichter liegenden Jahresringen vorzufinden, die auf eine lokale Erhöhung der Dichte schließen, wie beispielhaft in Abbildung 4.14, rechts zu erkennen. In diesen Fällen ist eine deutliche Abweichung der Kurve von der Mittelkurve zu erkennen, die Erhöhung bezieht sich somit nur auf ein lokales Phänomen dieser einen Einschraubung.

Eingeschlossene Äste

Beim Durchdringen von eingeschlossenen Ästen lässt sich in allen Fällen ein deutlicher Anstieg des Drehmoments feststellen. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, weisen Äste 6-7 fach höhere Rohdichten im Vergleich zu dem sie umgebenden Holz auf, was sich ebenfalls in dem Eindrehwiderstand und somit dem Drehmoment abzeichnet. Je nach Größe des Astes und der Tatsache ob die Schraube direkt durch den eingeschlossenen Ast durchgeschraubt oder lediglich neben einem Ast verläuft, fällt die Erhöhung unterschiedlich hoch aus. Die Erhöhung des Drehmoments startet in der Regel kurz vor der tatsächlichen Durchdringung. Im Vergleich zu anderen Phänomenen zeichnet sich die Durchdringung eines Astes tendenziell durch einen sprunghaften Anstieg des Verlaufs aus. Bei Vorhandensein eines solchen Anstiegs in dem Verlauf der Kurve kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Durchdringung eines eingeschlossenen Astes geschlossen werden. Abbildung 4.15 zeigt ausgewählte Fälle der Durchdringung von eingeschlossenen Ästen.
An den Stellen A1, A7, A10 verläuft die Schraube in der Nähe eines eingeschlossenen Astes. In den restlichen Fällen werden die Äste direkt durchdrungen. Aus den ausgewerteten Fällen der nicht vorgebohrten Einschrauben beträgt die Erhöhung des Drehmoments bei einer direkten Durchdringung eines Astes 10 bis 160 % für den Schraubendurchmesser d8 und 6 - 80 % für den Schraubendurchmesser d10. In einigen Fällen (siehe A1, A8 oder A9) ist der Anstieg lokal, nach dem Durchschrauben des Astets fällt das Drehmoment wieder auf sein ursprügliches Niveau zurück. Bei anderen (A7, A4) bleibt die Kurve nach dem Durchdringen des Astes auf einem höheren Niveau. Der erhöhte Widerstand durch den Ast bleibt für die weitere Einschraubtiefe erhalten.

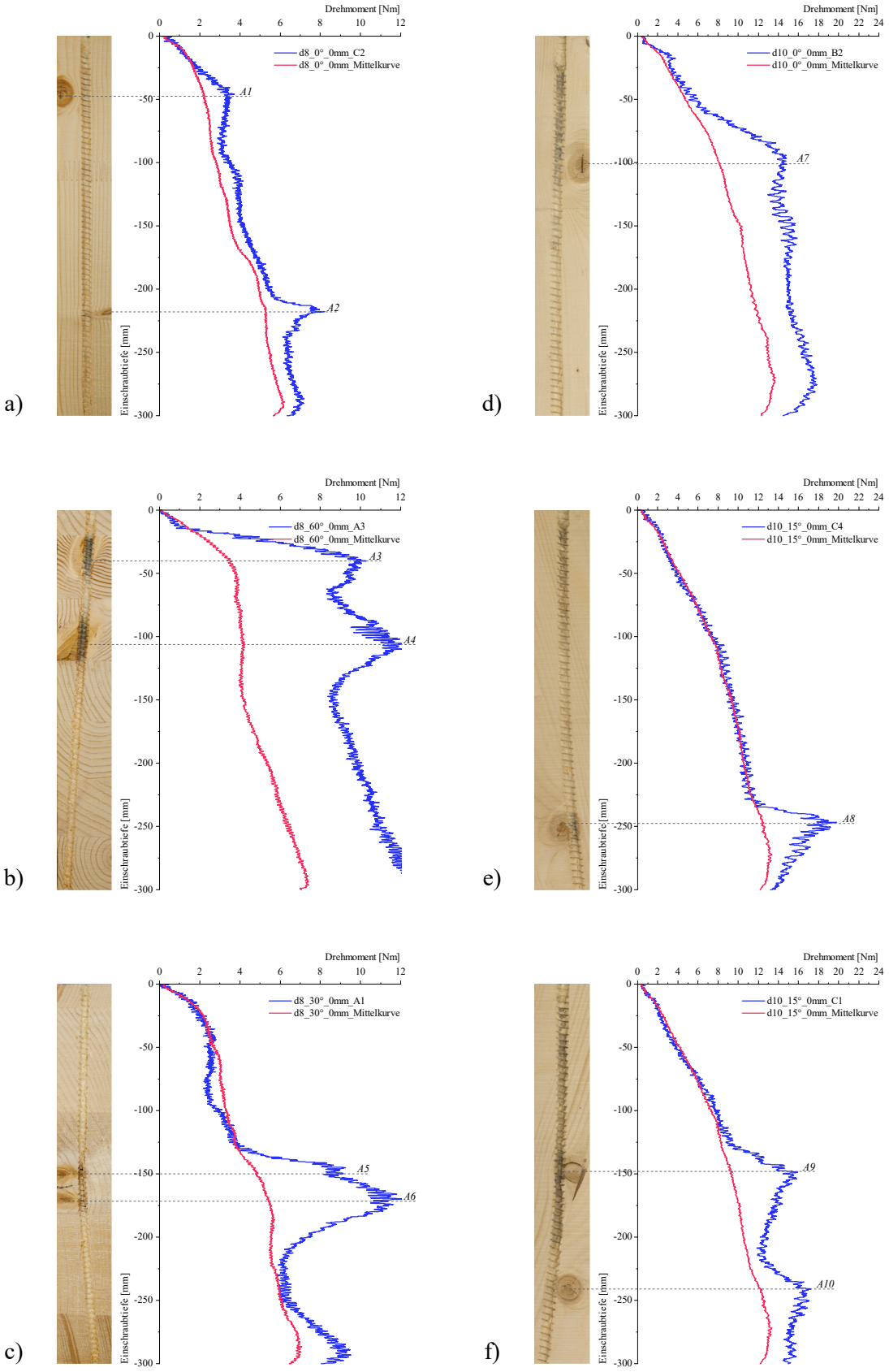


Abbildung 4.15: Ausgewählte Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen mit einer Durchdringung von eingeschlossenen Äste

Keilzinkungen

Keilzinkungen stellen ähnlich zu den eingeschlossenen Ästen lokale Diskontinuitäten höherer Dichte dar, die sich in dem Verlauf des Drehmoments abbilden.

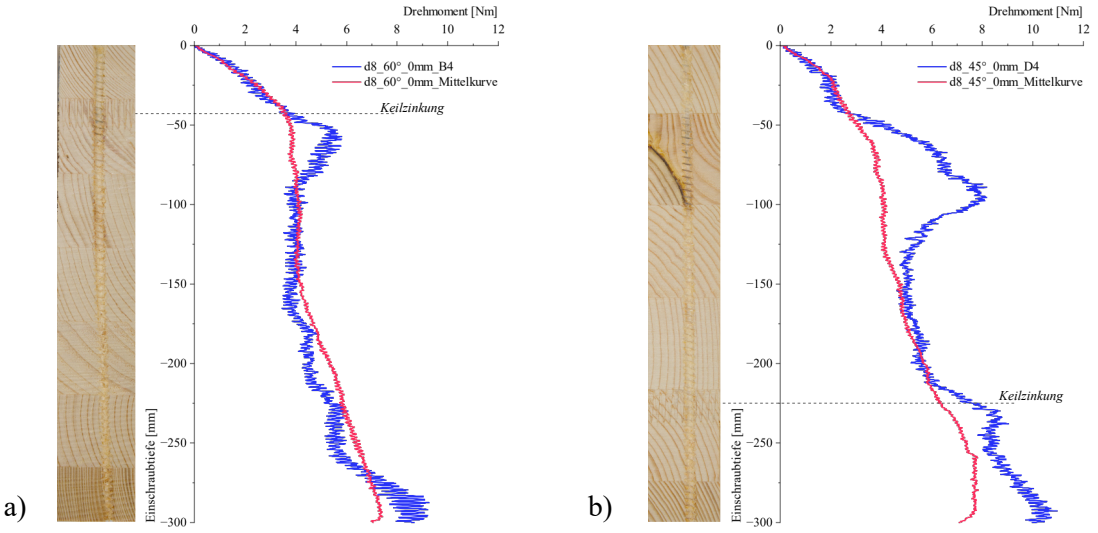


Abbildung 4.16: Ausgewählte Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen mit einer Durchdringung von Keilzinkungen

In den identifizierten Fällen der Durchdringung einer Keilzinkung betragen die Erhöhungen des Drehmoments 15 - 50%. Die Steigung verläuft weniger steil als im Falle der Durchdringung von eingeschlossenen Ästen.

Vorgebohrter Bereich

Abbildung 4.17 zeigt an einzelnen Beispielen den Einfluss der Vorbohrung auf den Verlauf des Drehmoments.

In den Diagrammen a) und b) ist zu erkennen, dass das Drehmoment in dem vorgebohrten Bereich nahezu null ist. In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass der Durchmesser der Vorbohrung zu groß ist, sodass beim Eindrehen der Schrauben in diesem Bereich kaum Widerstand entsteht. Der Übergang vom vorgebohrten zum nicht vorgebohrten Bereich ist an der Kurve durch einen sprunghaften steilen Anstieg deutlich erkennbar.
Im direkten Vergleich dazu zeigt sich in Diagramm c) ein annähernd linearer Anstieg des Drehmoments im vorgebohrten Bereich. Aufgrund des größeren Durchmessers der Schraube (d10) wird in diesem Fall auch im vorgebohrten Bereich ein Drehmoment aufgebaut. Der Punkt des Übergangs zum nicht vorgebohrten Bereich ist lediglich durch einen leichten Anstieg in der Kurve ablesbar.

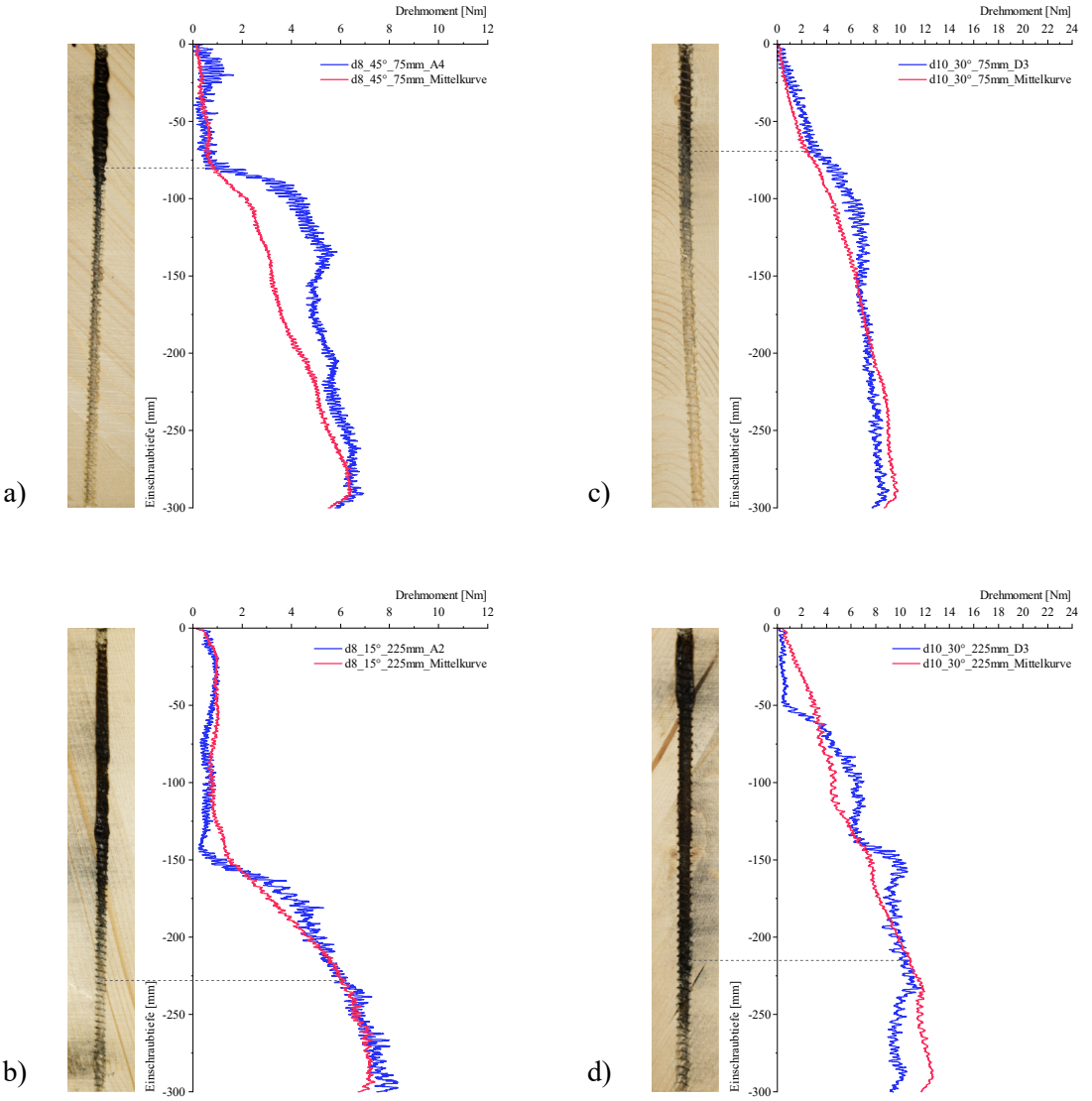


Abbildung 4.17: Ausgewählte Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen mit pyrolytischer Vorbohrung

Das Beispiel in Diagramm d) zeigt, dass auch die Kontinuität des Bohrdurchmessers an der Kurve ersichtlich wird. In dem Bereich bis 50 mm Tiefe, in dem die Vorbohrung sichtbar breiter ausfällt, ist das Drehmoment annähernd null. Anschließend steigt das Drehmoment und weist in dem Bereich, indem sich die Einengung des Bohrkanals durch eine Unstetigkeit zeigt, durch einen entsprechenden Anstieg in der Kurve aus. Anhand der Mittelkurve ist zu erkennen, dass es sich dabei um ein Phänomen dieser einen Einschraubung handelt, da sich der Sprung in der Mittelkurve nicht zeigt. Der Übergang zum nicht vorgebohrten Bereich zeichnet sich nicht ersichtlich ab. Der leichte Abfall der Kurve bei einer

Tiefe von etwa 215 mm lässt auf eine Lamelle geringerer Dichte zurückführen, da diese Tendenz auch in der Mittelkurve vorhanden ist.

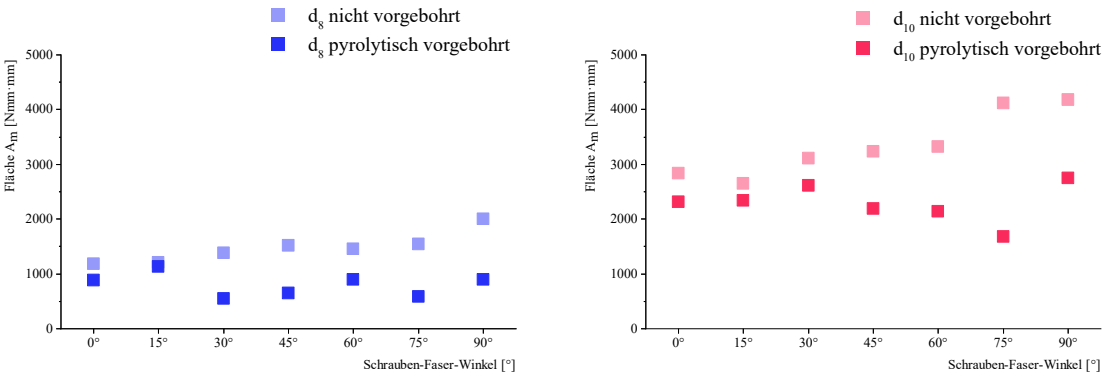


Abbildung 4.18: Vergleich der maximalen Drehmomente sowie der integrierten Flächen A_m für nicht vorgebohrte und vorgebohrte (l_{vb} = 150 mm) Einschraubungen

Der Einfluss der Vorbohrung lässt sich ebenfalls an den gemessenen Maximalwerten ablesen. Die Vorbohrung führt grundsätzlich zu einer Reduzierung des maximalen Drehmoments sowie der integrierten Fläche A_m. Der Vergleich zwischen den nicht vorgebohrten und den zur Hälfte vorgeborten l_{vb}=150 mm Einschraubungen ist in Abbildung 4.18 visualisiert. Es ist zu erkennen, dass die Reduktion für die flachen Schrauben-Faser Winkel 0°, 15° und 30° im Vergleich zu den restlichen Winkeln tendenziell geringer ausfallen. Daraus ist zu schließen, dass aufgrund der unterschiedlichen Abtragmechanismen, siehe Erläuterungen in 3.4.3, unterschiedliches Aufbrennverhalten innerhalb der Bohrlöcher und somit verschiedene Bohrdurchmesser resultieren.
In einer zusätzlich durchgeführten Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass sich die Anpassung der Prozessparameter, die in Änderungen der Bohrlochgeometrie resultieren, auch in dem Verlauf des Drehmoments abzeichnet. Die Kurven in Abbildung 4.19 zeigen die Mittelkurven von jeweils vier Bohrungen, welche mit unterschiedlichen Prozessparametern erstellt wurden. Die entsprechenden Prozessparameter sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass durch die Reduzierung der Pulsspitzenleistung kleinere Bohrlöcher resultieren, die einen höheren Widerstand beim Eindrehen der Schrauben aufweisen. Die Analyse des Drehmoments ist somit auch zur Optimierung der Prozessparameter anwendbar.

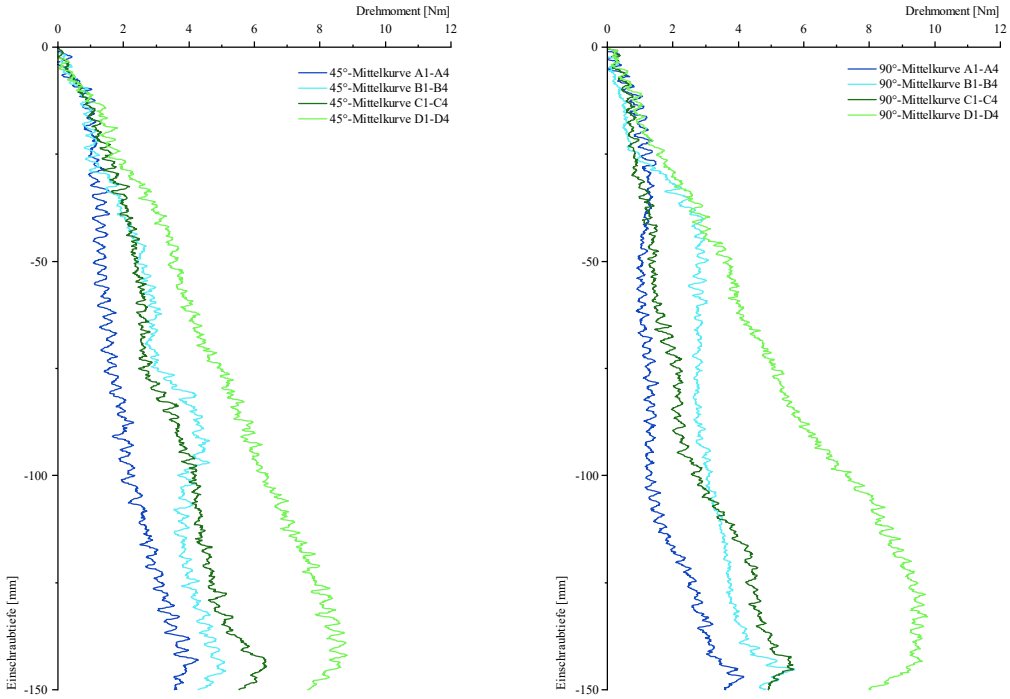


Abbildung 4.19: Diagramme der Mittelkurven von je vier Einschraubungen, pyrolytisch vorgebohrt mit unterschiedlichen Prozessparametern für $\alpha = 45\,^\circ$ (links) und $\alpha = 90\,^\circ$ (rechts)

Tabelle 4.1: Verwendete Parameter der pyrolytischen Vorbohrungen aus Abbildung 4.19

für Bohrungen	A1 - A4	B1 - B4	C1 - C4	D1 - D4
Pulsdauer τ	0,5 [ms]	0,5 [ms]	0,5 [ms]	0,5 [ms]
Repetitionsrate ν_{rep}	100 [Hz]	100 [Hz]	100 [Hz]	100 [Hz]
Pulsspitzenleistung P_{peak}	5 [kW]	4 [kW]	3 [kW]	2 [kW]
Mittlere Leistung P_{avg}	250 [W]	200 [W]	150 [W]	100 [W]

Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlauf des Drehmoments einen Rückschluss auf die Qualität der Vorbohrung bieten kann. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bohrlochgeometrie und dem gemessenen Drehmoment. Ist das Bohrloch zu groß, entsteht beim Einschrauben kein Drehmoment. Wenn bei einem Bohrloch keine sichtbare Veränderung zwischen dem vorgebohrten und nicht vorgebohrten Bereich vorliegt, ist davon auszugehen, dass durch die Vorbohrung

keine Reduzierung des Eindrehwiderstands resultiert. In einem solchen Fall kann von einem ausreichend dünnen Bohrloch ausgegangen werden. Der Einfluss dieser Zusammenhänge auf das resultierende Verbundverhalten wird in Kapitel 6 thematisiert.

4.2.2.3 Ausschraubdrehmoment

Analog zu dem Einschraubdrehmoment wurde das Drehmoment auch beim Ausschrauben aufgezeichnet. In Abbildung 4.20 sind die Kurven für die nicht vorgebohrten Schrauben (d8, $\alpha = 0$) sowie die Mittelkurven für alle Schrauben-Faser Winkel dargestellt. Im Vergleich der Kurven des Drehmoments beim Einschrauben der Schraube wird beim Ausschrauben ein anderer Verlauf deutlich. Der maximale Wert des Drehmoments liegt beim Ausschrauben in der Regel über dem maximalen Wert beim Einschrauben der Schrauben. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass durch die Haftreibung der Schraube zum umgebenden Holz zunächst eine höhere Kraft aufgewendet werden muss, um den Vorgang in Gang zu setzen. Sobald sich die Schraube dreht, nimmt das aufzubringende Moment exponentiell ab.

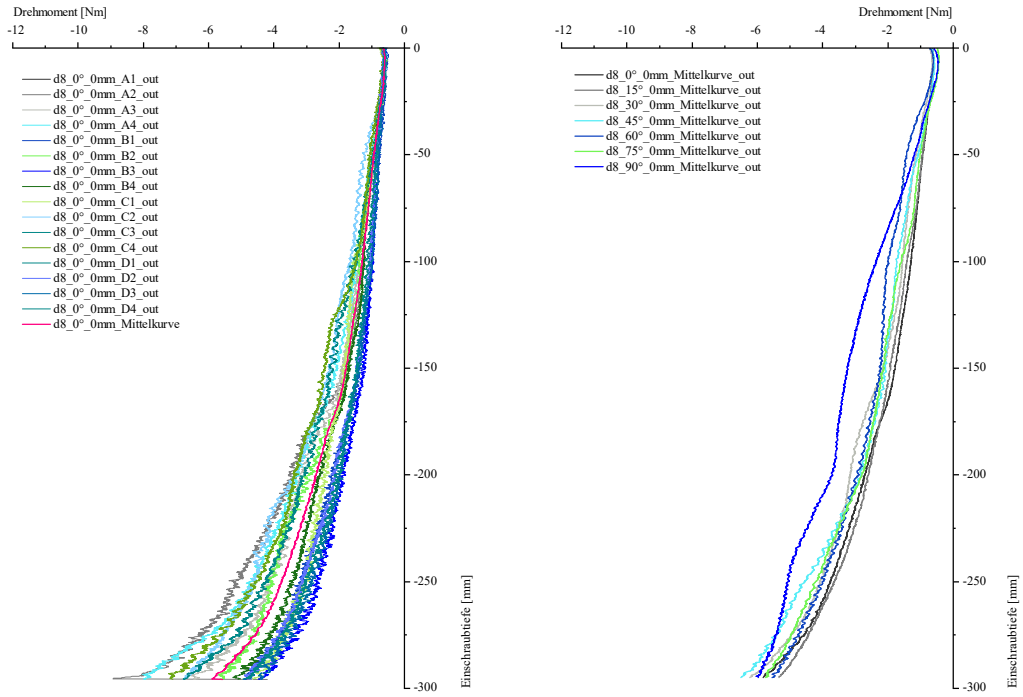


Abbildung 4.20: Typischer Verlauf des Drehmoments beim Ausdrehen der Schrauben; links: am Beispiel der nicht vorgebohrten Schrauben, d8, rechts: Mittelkurven der verschiedenen Schrauben-Faser Winkel

Der Einfluss des Schrauben-Faser Winkels ist beim Ausschrauben weniger ausgeprägt (Abbildung 4.20, rechts), mit Ausnahme der Kurve für 90° liegen die Mittelkurven der anderen Winkel nah beieinander. Die Kurven weisen weniger Streuung auf und verlaufen insgesamt homogener. Die integrierten Flächen A zeigen, dass beim Ausdrehen der Schrauben insgesamt ein geringerer Kraftaufwand erforderlich wird.

4.2.2.4 Verlaufen

Der Einfluss des Vorbohrens auf das Verlaufen von Schrauben wurde gesondert betrachtet und analog zu dem beschriebenem Vorgehen in Kapitel 4.1 ausgewertet. Abbildung 4.21 zeigt die Ergebnisse der gemessenen Abweichungen in Abhängigkeit vom Schrauben-Faser Winkel, dem Durchmesser der Schraube sowie der Vorbohrtiefe.
Die Diagramme a) und b) zeigen das charakteristische Verhalten der Schrauben ohne ein initiales Vorbohren ($l_{vb} = 0\,mm$). Für die dünneren Schrauben (d8) ist eine deutliche Tendenz des Verlaufens in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkels zu erkennen, wobei die maximalen Werte bei flachen Winkeln 15 ° und 30 ° erreicht werden. Diese Ausprägung ist bei den dickeren Schrauben d10 nicht vorhanden, die gemessenen Abweichungen liegen über alle Winkel näher beieinander. Mit einer mittleren Standardabweichung von 4.3 mm fällt diese ebenfalls geringer aus als bei den d8 Schrauben, bei denen diese im Durchschnitt 5.7 mm beträgt. Die Austrittspositionen der dickeren Schrauben liegen näher beieinander.
Der Einfluss des Vorbohrens wird in den Ergebnissen an mehreren Stellen ersichtlich. Aufgrund der Geradlinigkeit der Vorbohrung verläuft die Schraube in dem vorgebohrten Bereich gerade, eine Ablenkung beginnt erst im nicht vorgebohrten Bereich. Mit zunehmender Vorbohrttiefe führt dies zu geringeren gemessenen Abweichungen. Hierbei müssen die tatsächlichen Vorbohrtiefen aufgrund der Streuung (siehe Ergebnisse in Abschnitt 4.2.2.1) berücksichtigt werden.

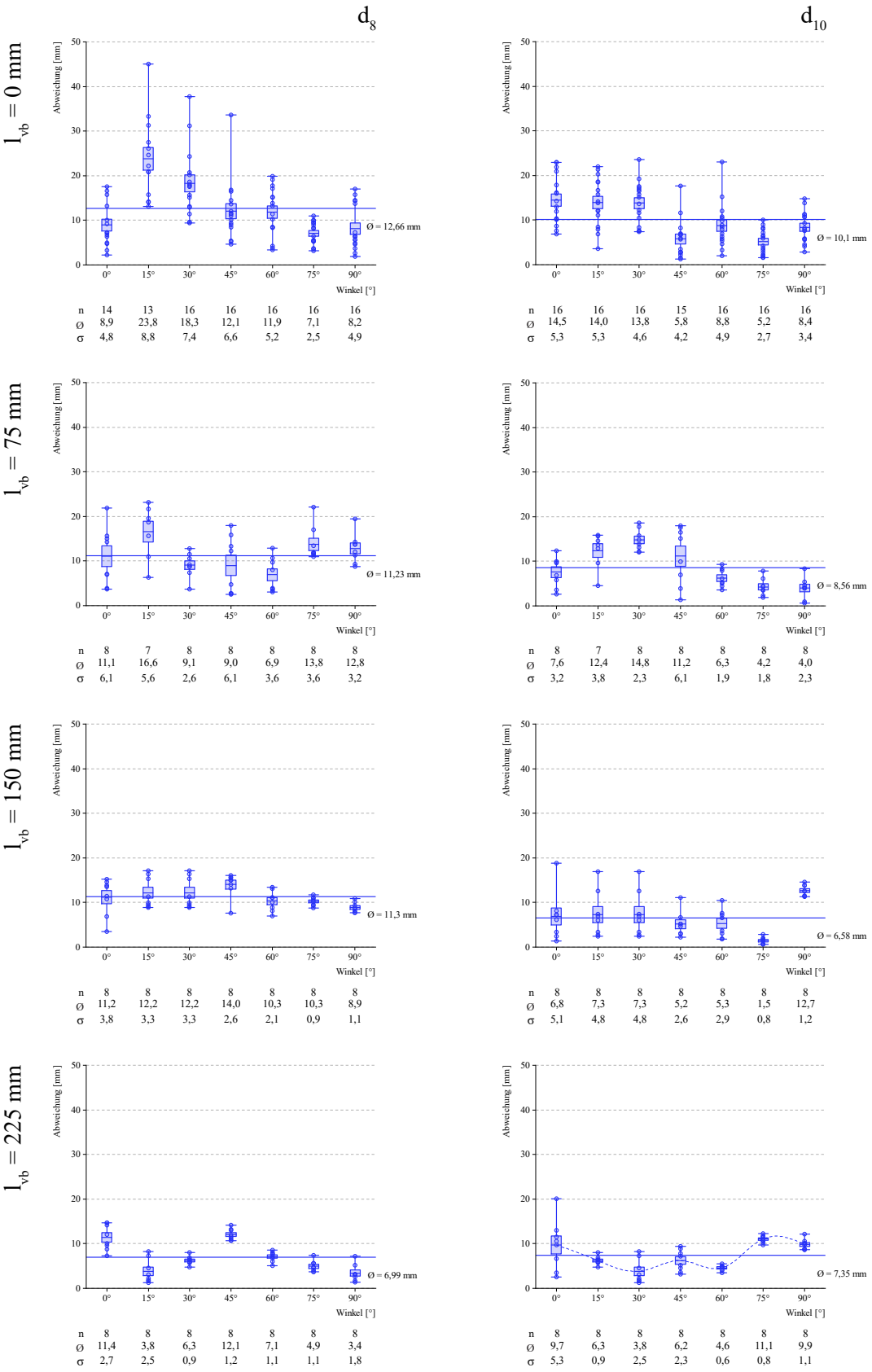


Abbildung 4.21: Gemessene Abweichungen für d8 und d10 Schrauben bei unterschiedlichen Vorbohrtiefen l_{vb}

Gleichzeitig wird der Einfluss des Schrauben-Faser Winkels geringer, die Streuungen der Abweichungen reduzieren sich. Der Effekt des Vorbohrens wird anhand der Tabelle 4.2 deutlich, in der die Reduzierung der Abweichungen in Abhängigkeit von Winkel und bezogen auf die jeweiligen Mittelwerte aufgeführt sind.

Tabelle 4.2: Reduzierung der gemessenen Abweichungen

		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
d = 8 mm	$l_{vb} = 0mm$	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	$l_{vb} = 75mm$	124%	70%	50%	75%	58%	194%	157%
	$l_{vb} = 150mm$	126%	51%	67%	116%	87%	144%	109%
	$l_{vb} = 225mm$	128%	16%	34%	100%	60%	69%	42%
d = 10 mm	$l_{vb} = 0mm$	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	$l_{vb} = 75mm$	52%	89%	107%	193%	71%	82%	48%
	$l_{vb} = 150mm$	47%	52%	53%	89%	60%	28%	151%
	$l_{vb} = 225mm$	67%	45%	27%	108%	52%	214%	118%

Die grundsätzliche Tendenz der Reduzierung der gemessenen Abweichungen mit zunehmender Vorbohrtiefe ist zu erkennen. In einzelnen Fällen weisen die gemessenen Werte jedoch eine Erhöhung auf, sodass trotz einer geraden Vorbohrung größere Abweichungen auftreten als ohne Vorbohrung. Dieses Phänomen ist auf die indivuelle Beschaffenheit der verwendeten Probekörper und jeder einzelnen Einschraubung zurückzuführen. Trotz eines geraden Verlaufs der Schraube in dem vorgebohrten Bereich können in dem nicht vorgebohrten Bereich große Ablenkungen durch beispielsweise Asteinschlüsse entstehen.

Eine Übersicht des Verlaufens der Schrauben in Bezug auf die Richtung ist in Abbildung 4.22 für die 8 mm Schrauben zu sehen. Entsprechende Abbildungen für die gesamte Versuchsreihe sind in Anhang B.2 dokumentiert.
Anders als bei den mechanischen Bohrern ist ein gegenläufiges Verhalten des Verlaufens zu beobachten. Bei schrägen Einschraubungen verlaufen die Schrauben in Richtung des Schrauben-Faser Winkels. Dabei sind die größten Abweichungen bei flachen Winkel von $\alpha = 15\,^\circ$ und $\alpha = 30\,^\circ$ zu beobachten. Dies ist ebenfalls ein Unterschied zu den Beobachtungen bei den Bohrern, bei denen die maximalen Abweichungen bei einem Winkel von $\alpha = 45\,^\circ$ auftraten.

Das Phänomen des gegenläufigen Verlaufens lässt sich durch die Beschaffenheit der unterschiedlichen Spitzen der Bohrer im Vergleich zu den Schrauben erklären.

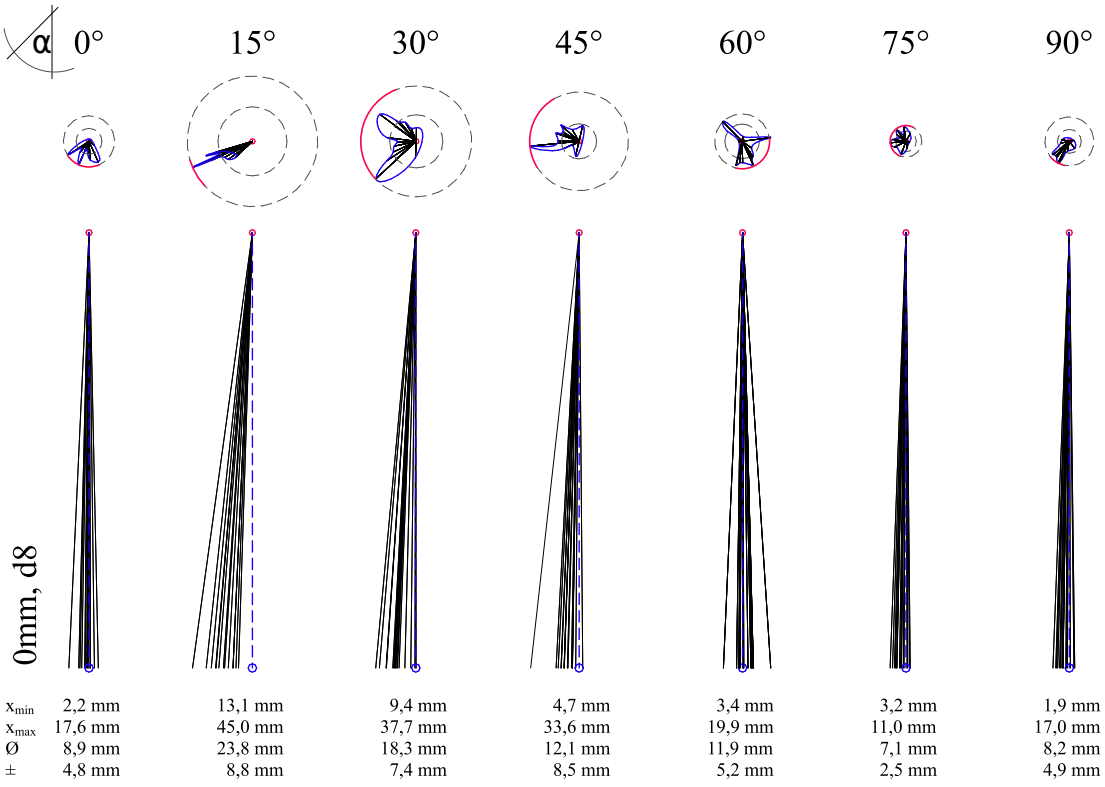


Abbildung 4.22: Seitenansicht der Schraubenverläufe d8 in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkels; nicht vorgebohrt

Wie bereits in 4.1.2 erläutert, drehen sich die Bohrer aufgrund der Beschaffenheit der Bohrspitze in die dichteren Schichten des Holzes ein und verlaufen entgegen der Faserneigung. Die Schrauben sind an der Spitze stumpf (kegelförmig). Während des Eindrehens findet keine Abspanung des Materials statt. Das Holz wird von der Schraube durchdrungen und dabei zur Seite verdrängt. Beim parallelen Einschrauben werden die Fasern durch die Schraubenspitze entlang ihrer Längsrichtung aufgerissen, die Verdrängung findet gleichmäßig zu allen Seiten statt. Die resultierenden Kräfte auf die Schraube sind ausgeglichen. Bei einer orthogonalen Einschraubung werden die Fasern durch die Schraubenspitze quer zur ihrer Richtung durchdrungen. Die unterschiedlich dichten Schichten der Jahresringe sind untereinander angeordnet und werden ebenfalls quer zu ihrer Ebene von der Schraube durchdrungen. In diesem Fall sind die resultierenden Kräfte ausgeglichen, es findet keine eindeutige Tendenz der Ablenkung in eine bestimmte Richtung statt. Die trotzdem entstehenden Abweichungen bei einer parallelen bzw. orthogonalen Einschraubung sind auf die Streuung der Faserrichtung und Abweichungen, die aus anderen Diskontinuitäten entstehen, wie beispielsweise Asteinschlüsse, zurückzuführen.

Bei flachen Schrauben-Faser Winkeln ab 15° entsteht eine schräge Kraftkomponente, die zu einer Ablenkung in Richtung der Faserneigung führt. Die Schraubenspitze trifft in einem spitzen Winkel auf die Faserneigung und wird entlang der gerichteten Schichten der Jahresringe abgelenkt. Im Gegensatz zu den Bohrern weisen die Schrauben eine Tendenz der Parallelausrichtung auf. In diesem Zustand erfährt die Schraube den geringsten Widerstand beim Eindrehen und keine Ablenkung zu einer Richtung. Bei einem Winkel ab 45 ° überwiegt wieder der Effekt der orthogonalen Einschraubung bei dem die Fasern quer durchdrungen werden und sich die resultierenden Kraftkomponenten ausgleichen.

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Der Verlauf des Drehmoments beim Einschrauben der Schrauben liefert Rückschlüsse auf die innere Beschaffenheit des Holzes, die die Schraube beim Eindrehen durchdringt. Anhand der Kurve des Drehmoments können innere Diskontinuitäten wie eingeschlossene Äste, Bereiche höherer Dichte oder Keilzinkungen identifiziert werden.

- Das Drehmoment korreliert mit der Geometrie des pyrolytisch hergestellten Bohrlochs. Im Falle eines zu großen Bohrdurchmessers entsteht eine signifikante Reduzierung des Drehmoments beim Eindrehen der Schraube.

- Das Verlaufen der Schrauben ist vom Schraubendurchmesser und damit von der Steifigkeit der Schraube abhängig. Aufgrund des unterschiedlichen Maßstabsverhältnis der Steifigkeit der Schraube zu den Abständen der sich abwechselnden Schichten des Früh- und Spätholzes führt höhere Steifigkeit der Schraube zu geringeren Abweichungen mit geringerer Streuung.

- Der Einfluss des Schrauben-Faser Winkels ist besonders bei den dünneren Schrauben ausgeprägt. Flache Schrauben-Faser Winkel von $\alpha = 15\,^\circ$ und $\alpha = 30\,^\circ$ weisen die maximalen Abweichungen auf.

- Für Schrauben-Faser Winkel zwischen 15 ° und 45 ° findet das Verlaufen tendenziell in Richtung der Faserorientierung statt. Anders als die Bohrer weisen die Schrauben eine Tendenz der Parallelausrichtung auf.

- Durch das pyrolytische Vorbohren lassen sich die gemessenen Abweichungen deutlich reduzieren und somit die Positionierungsgenauigkeit erhöhen. Dies gilt unabhängig von der Faserneigung und dem Durchmesser der Schraube.

Kapitel 5

Numerisches Modell zur Abbildung des Verlaufens von Vollgewindeschrauben

Das Kapitel widmet sich der Entwicklung eines numerischen Modells zur Abbildung des Verlaufens von Vollgewindeschrauben. Zunächst wird das Modell vorgestellt und die Schritte der Umsetzung sowie die Funktionsweise beschrieben. Anschließend wird das Modell anhand der in Kapitel 4 vorgestellten, ermittelten Abweichungen validiert. Zuletzt findet das Modell im Rahmen einer Parameterstudie Anwendung, wobei der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf das Verlaufen von Vollgewindeschrauben untersucht wird.

5.1 Anforderungen und Aufbau des Modells

Die nummerische Abbildung des richtungsabhängigen Materialverhaltens von Holz ist an sich eine große Herausforderung und nur mit Vereinfachungen möglich. Bei der Modellierung des Einschraubprozesses kommt erschwerend hinzu, dass es sich dabei um einen dynamischen Prozess mit großen Verformungen handelt, die für die nummerische Modellierung ebenfalls eine Schwierigkeit darstellen. Der Einschraubprozess ist ein komplexer Vorgang bei dem die Schraube das Holz durchdringt, wobei es im Holz zu plastischen Verformungen und Schädigungsprozessen im Verbundbereich kommt. Eine exakte Simulation dieser Prozesse in einer dynamischen FE-Berechnung würde eine genaue Abbildung der Geometrie der Schraube inklusive des Gewindes sowie die Abbildung des Materials auf makroskopischer Ebene erfordern, die nur mit enorm hohem Aufwand und entsprechenden Rechenzeiten realisierbar wäre. Hinzu erfordert eine solche Abbildung,

neben der Kenntnis von Materialkennwerten, die Formulierung der Kontaktbedingungen, die die Interaktion zwischen der Schraube und dem Holz definieren. Die hierfür erforderlichen Eingangsparameter sind unbekannt und können nur bedingt in experimentellen Untersuchungen ermittelt werden.
Im Rahmen der vorliegenden Arbeit besteht das Ziel darin mit dem entwickelten Modell das grundsätzliche Verhalten von Vollgewindeschrauben beim Eindrehen ins Holz in Bezug auf das Verlaufen, so wie in den experimentellen Untersuchungen beobachtet, abzubilden. Das Modell sollte abhängig von den wesentlichen Einflussparametern, wie dem Durchmesser der Schraube oder dem Schrauben-Faser Winkel einen Zusammenhang auf die resultierenden Abweichungen unter Vorgabe einer definierten Einbindetiefe ermöglichen. Ebenfalls sollte der Einfluss einer initialen Vorbohrung abgebildet werden können. Eine schnelle Variation der Eingangsparameter sollte zudem erlauben Abschätzungen über erforderliche Vorbohrtiefen zur Einhaltung einer definierten Positionierungsgenauigkeit für die praktische Anwendung vorzunehmen.

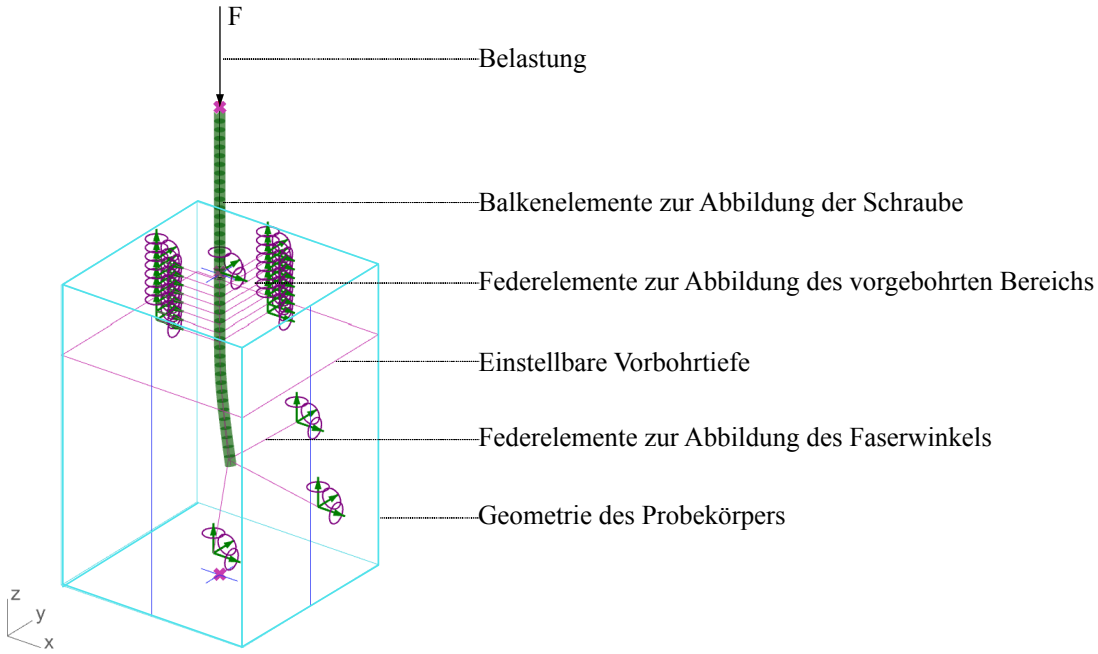


Abbildung 5.1: Darstellung des numerischen Stabmodells zur Abbildung des Einschraubprozesses in Rhino/Grasshopper

Die Umsetzung erfolgt an einem statischen Ersatzsystem, bei dem die Schraube vereinfacht als ein Stab abgebildet wird. Für den Aufbau des Modells wird die CAD Software *Rhino* in Kombination mit dem Plugin zur graphischen Programmierung *Grasshopper* verwendet. Die numerische Berechnung erfolgt mit dem

FE-Solver *Karamba3D*. Abbildung 5.1 zeigt den Aufbau des entwickelten Modells.
Der Vortrieb der Schraube wird durch eine schrittweise Verformungsberechnung abgebildet, wodurch eine deutliche Vereinfachung im Vergleich zu einer dynamischen Berechnung stattfindet. Der Prozess wird dadurch auf ein einfaches Kräftegleichgewicht reduziert, wobei die Wesentlichen das Verlaufen beeinflussenden Faktoren weiterhin eingehen. Der Widerstand den die Schraube beim Eindringen in das Holz erfährt, wird durch elastische Federn am Stabende repräsentiert. Das Prinzip wird anhand der Skizze in Abbildung 5.2 verdeutlicht.

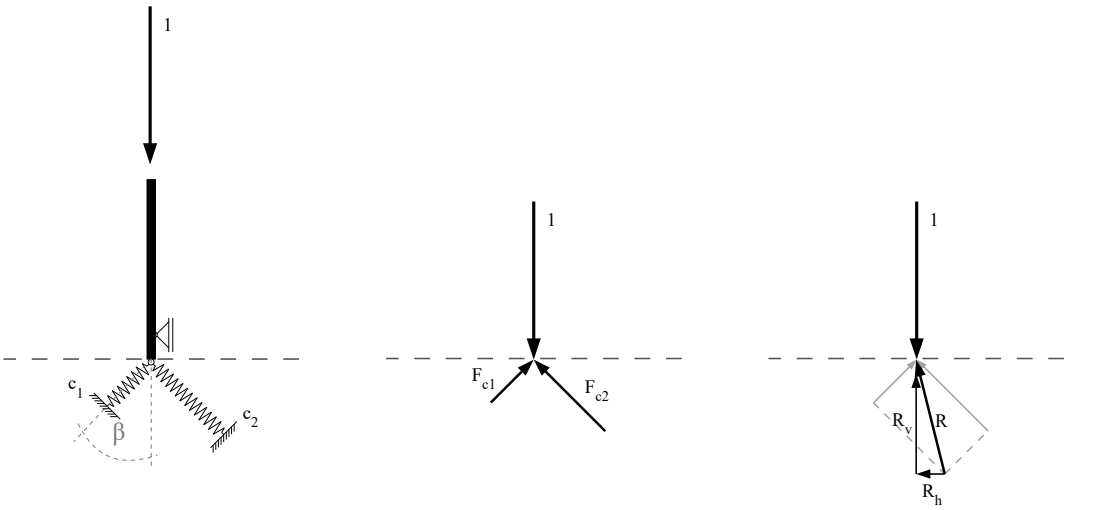


Abbildung 5.2: Prinzipskizze zur Erläuterung der resultierenden Ablenkung am Stabende des Modells

Durch die vertikale Beanspruchung des Systems werden beide Federn aktiviert. Durch die unterschiedlich angesetzten Steifigkeiten der Federn, welche vereinfacht das anisotrope Verhalten des Holzes repräsentieren, ergeben sich die unterschiedlich großen Reaktionskräfte F_{c1} und F_{c2}. Die resultierende Kraft dieser beiden Federkräfte beinhaltet eine Kraftkomponente in vertikaler Richtung, sowie eine horizontal gerichtete Komponente in Richtung der Faserneigung. Die Differenz der vertikalen Kräfte ergibt eine nach unten gerichtete Verformung des Stabs, die den Vortrieb der Schraube repräsentiert. Die horizontale Komponente führt zu einer Verformung der Stabs in Richtung der Faserneigung und erzeugt so die Ablenkung der Schraube.
Die im Holz eingebundene Länge der Schraube wird durch eine elastische Stabbet-

tung in horizontaler Richtung abgebildet, die sukzessiv mit dem Eindringen des Stabs aufgebaut wird (siehe Abschnitt 5.1.1). Dabei können für den vorgebohrten und den nicht vorgebohrten Bereich unterschiedliche Steifigkeiten definiert werden. Die resultierende Ablenkung der Schraubenspitze ergibt sich für jeden Berechnungsschritt durch die Interaktion der Steifigkeit des Stabs mit den angesetzten Steifigkeiten der Federn.
Die Berechnung erfolgt dreidimensional, sodass die Ablenkung, anders als in Abbildung 5.2 vereinfacht dargestellt, in zwei Richtungen stattfindet. Der Ablauf der Berechnung sowie die einzelnen Komponenten des Modells und die getroffenen Annahmen werden im Folgenden beschrieben.

5.1.1 Ablauf der Berechnung

Die Berechnung findet in mehreren ineinander verschachtelten Schleifen (Loops) statt. Die Umsetzung erfolgt durch die Verwendung des Plugins *Anemone*. Dies erlaubt die Erstellung von Schleifen, wobei eine oder mehrere Parameter zwischen den einzelnen Durchläufen der Schritte angepasst oder verändert werden können. Der Ablauf einer Berechnung ist in der Prozessskizze in Abbildung 5.3 dargestellt.

Die innere Schleife, *Loop i*, beinhaltet die schrittweise Verformungsberechnung eines Einschraubvorgangs. Die Schleife wird so oft durchlaufen, bis die Simulation einer Einschraubung komplett abgeschlossen ist. Mit der übergeordneten Schleife, *Loop n*, können mehrere Wiederholungen einer Einschraubung nachgebildet werden. Entsprechend der experimentellen Untersuchungen kann so eine Streuung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 5.3.1) erreicht wird. Die dritte Schleife, *Loop* α, variiert den Schrauben-Faser Winkel. Die Variable wird mit jedem Durchlauf um einen definierten Wert erhöht und löst die Neuberechnung der untergeordneten Schleifen aus. Je nach Anwendung kann die Schleife angepasst werden, sodass bei einem Durchlauf beispielsweise auch andere Parameter wie die Einbindetiefe l_{eff} oder die Tiefe des vorgebohrten Bereichs l_{vb} variiert werden können. Ebenfalls ist eine Erweiterung um eine oder mehrere weitere Schleifen möglich, sodass eine Variation mehrerer Parameter automatisiert erfolgen kann.

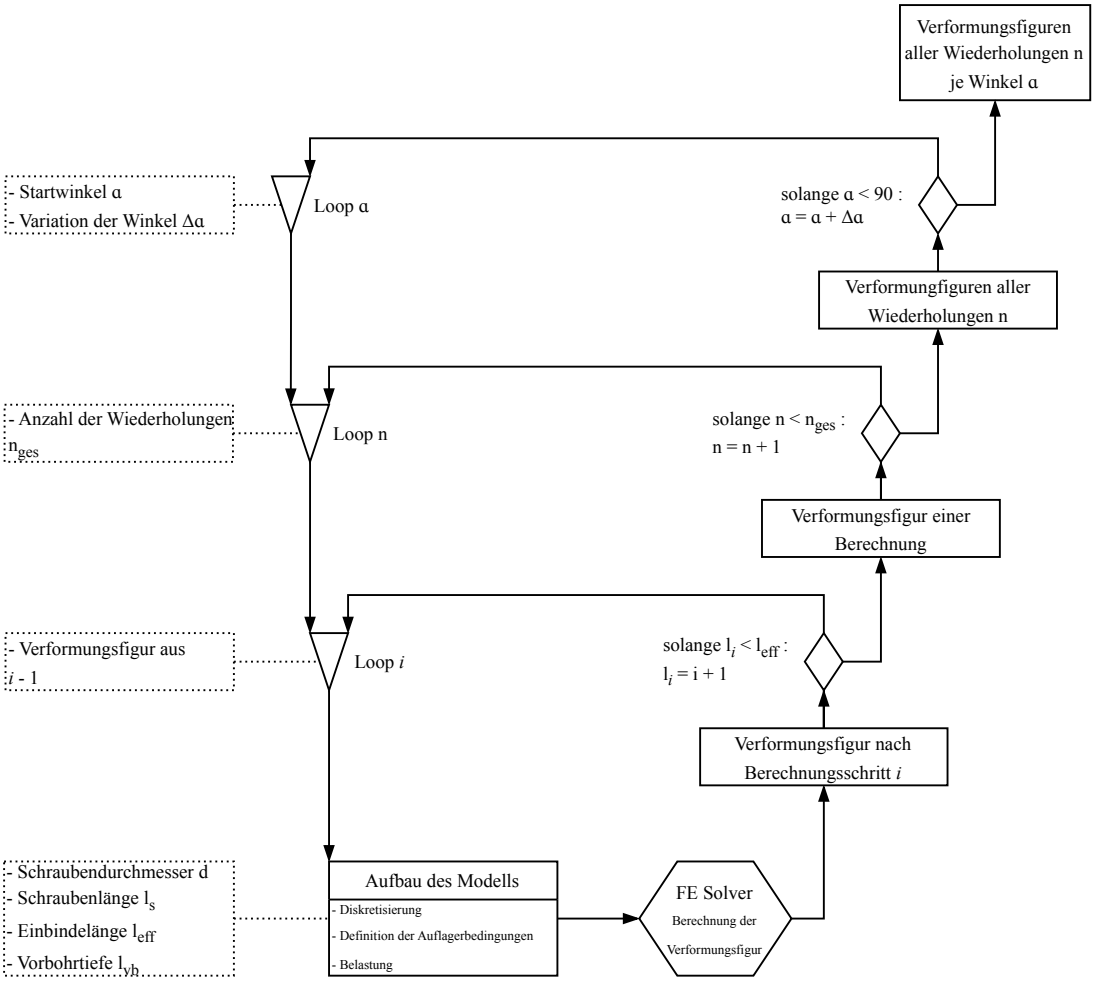


Abbildung 5.3: Ablaufdiagramm der implementierten Schleifen (Loops) im Modell zur Durchführung einer Berechnung

Schrittweise Verformungsberechnung

Das Eindringen der Schraube in das Holz wird durch eine schrittweise Verformungsberechnung simuliert, deren Funktionsweise anhand einer zweidimensionalen schematischen Darstellung in der Abbildung 5.4 erläutert wird.

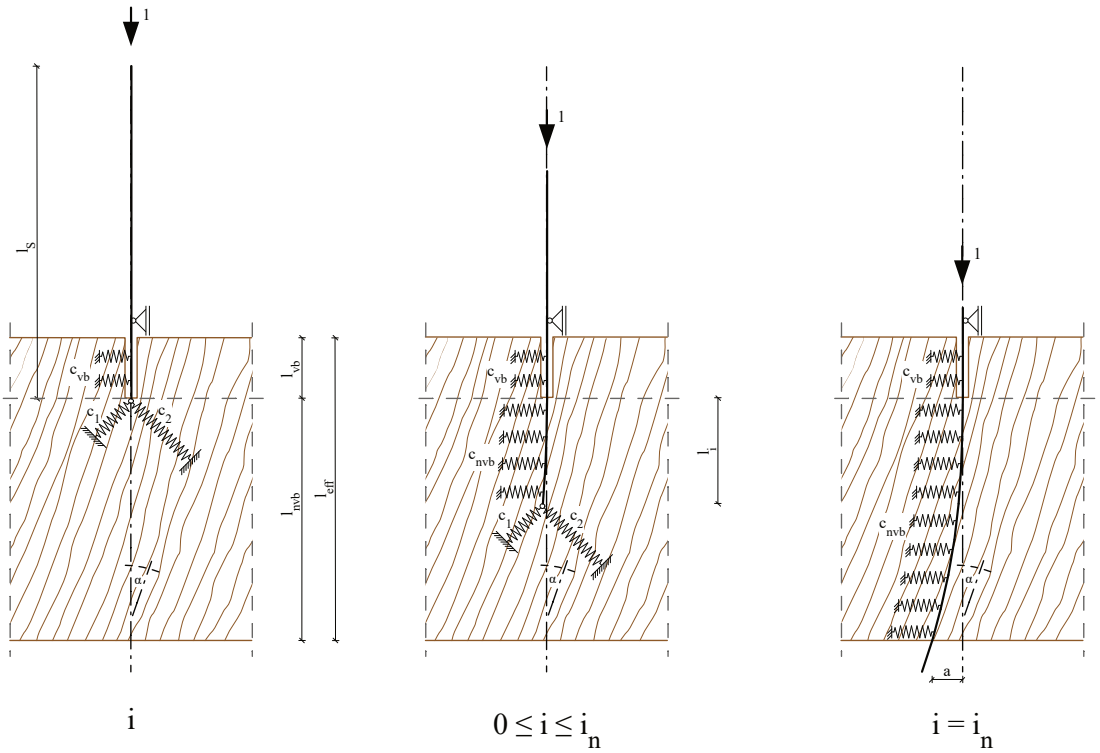


Abbildung 5.4: Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Funktionsweise der schrittweisen Verformungsberechnung

Nach Definition der Eingangsparameter wie der Einbindetiefe l_{eff}, der Tiefe des vorgebohrten Bereichs l_{vb}, der Länge des Stabes l_S, des Schraubendurchmessers d_S und des Schrauben-Faser Winkels α wird das Modell aufgebaut. Es werden die Auflagerbedingungen definiert, die entsprechenden Federn angesetzt und die Belastung in Form einer 1-Kraft am oberen Stabende aufgebracht. Anschließend erfolgt die Verformungsberechnung durch den FE-Solver. Entsprechend der eingestellten Steifigkeiten der Federn im vorgebohrten Bereich sowie den Federn an der Spitze der Stabs ergibt sich eine Verformung in vertikaler Richtung sowie eine Krümmung des Stab in Richtung der weniger steifen Feder (siehe Abbildung 5.2). Das schrittweise Eindringen wird durch die wiederholte Durchführung der Berechnung simuliert. Der erste Schritt findet am unverformten Stab statt. In jedem anschließenden Schritt wird die Verformungsfigur der Berechnung des vorherigen Schrittes als Initialzustand angesetzt, an dem das Modell neu aufgebaut und erneut belastet wird.
Mit der Erhöhung der Einbindetiefe verändert sich mit jedem Schritt der Relativwinkel zwischen der Schraubenspitze und den angesetzten Federn, wodurch sich mit steigender Einbindetiefe die resultierende Ablenkung ändert. Dadurch wird

die Tendenz der Parallelausrichtung (siehe Abschnitt 4.2.2.4), entsprechend der Beobachtung aus den experimentellen Untersuchungen, erreicht. Die Berechnung wird beendet, sobald die Verformung die eingestellte Einbindetiefe erreicht. Dazu wird nach jedem Berechnungsschritt die Z- Komponente des letzten Knotens des Stabs mit der vorgegebenen Einbindetiefe l_{eff} verglichen. Als Ergebnis ergibt sich die Verformungsfigur des Stabs über die gesamte Einbindetiefe, die den Verlauf der Schraube im Holz repräsentiert. Die Abweichung a wird, entsprechend des Vorgehens der experimentellen Untersuchungen, als direkter Abstand zwischen der Eintrittsposition und des auf die Oberfläche projezierten Punktes der Austrittsposition ausgegeben.

5.1.2 Modellierung der Schraube

Die Schraube wird in dem Modell durch einen Stab, mit Balkenelementen entsprechend ihrer tatsächlichen Länge abgebildet. Eine explizite Abbildung des Gewindes ist nicht erforderlich. Die Stabelemente haben einen konstanten Durchmesser, der aus der Geometrie der Schraube abgeleitet wird, sodass die tatsächliche Steifigkeit der Schraube ausreichend genau repräsentiert wird. Der angesetzte Durchmesser ergibt sich aus dem Kerndurchmesser d_S und dem Außendurchmesser d_A der Schraube, wobei der Gewindeteil zur Hälfte angerechnet wird:

$$d_{eq} = d_S + \frac{d_A - d_S}{2} \tag{5.1}$$

Die Steifigkeit des Stabs wird entsprechend der Steifigkeit der Schraube mit einem E-Modul von 210.000 N/mm angesetzt. Die angewendeten Parameter der Schraube gehen als fixe Werte in das Modell ein und werden bei der Validierung nicht variiert.
Die Diskretisierung des Stabs erfolgt mit einer Elementgröße von 4 mm, die in einer Konvergenzstudie ermittelt wurde.

5.1.3 Abbildung des Schrauben-Faser Winkels

Die Abbildung des Schrauben-Faser Winkels und somit der Faserneigung des Holzes erfolgt durch die angesetzten Federn am Stabende. In x-z Ebene werden zwei Federn angesetzt, die in einem Winkel von 90 ° zueinander angeordnet sind. In y-z Ebene wird eine Feder verwendet. Für die Abbildung der Neigung der Faserebene können zwei Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann die Variation durch die Drehung der beiden Federkomponenten in x-z Ebene erfolgen. Bei diesem Ansatz

bleibt das Verhältnis der angesetzten Federsteifigkeiten gleich, die unterschiedlichen Ablenkungen in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkels ergeben sich durch die geometrische Orientierung der Federn. Alternativ kann die Faserneigung über das Verhältnis der Stefigkeiten der Federn repräsentiert werden. Bei diesem Ansatz wird der Winkel der angesetzten Federelemente im Modell nicht variiert.
In beiden Ansätzen sind die Steifigkeiten der Federn und deren Verhältnis zueinander die maßgebenden Faktoren, die die Ablenkung der Schraube im Modell beeinflussen. Die Unterschiede der Ansätze zur Abbildung der Faserneigung und die Wahl der angesetzten Steifigkeiten werden bei der Validierung des Modells in Abschnitt 5.2.1 näher erläutert.

5.1.4 Abbildung des eingebundenen Bereichs

Der eingebundene Bereich wird durch die Festhaltung der Verdrehfreiheitsgrade in Kombination mit elastischen Festhaltungen in globaler x und y Richtung abgebildet. Dabei wird zwischen dem vorgebohrten Bereich und dem Bereich ohne Vorbohrung unterschieden. Für beide Bereiche können unterschiedliche Steifigkeiten angesetzt werden (c_{vb} und c_{nvb}). Je nach Steifigkeit der Federn im eingebundenen Bereich ergibt sich die Verbundsteifigkeit als die Interaktion der Federn mit der Biegesteifigkeit der Schraube. Der eingebundene Bereich entspricht somit einer teilweisen Einspannung, die sich auf die Ablenkung beim Vortrieb der Schraube auswirkt.

5.2 Validierung

Die Validierung des Modells erfolgt anhand der vorliegenden Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Verlaufen von Vollgewindeschrauben, die in Kapitel 4 vorgestellt wurden. Zur Überlagerung der experimentellen Daten mit den berechneten Abweichungen aus dem Modell werden die Mittelwerte sowie die dazugehörigen Standabweichungen herangezogen, sodass die Gewichtung von Ausreissern, deren höhere Abweichungen in der Regel auf ein Verlaufen infolge der Durchdringung eines Asteinschlusses zurückzuführen sind, reduziert wird. In einem ersten Schritt werden die angesetzten Steifigkeiten der Federn zur Abbildung der Faserneigung unter Berücksichtigung der zwei beschriebenen Ansätze validiert. Die Vergleichswerte bilden dabei die Untersuchungen beider Schraubendurchmesser der nicht vorgebohrten Einschraubungen. Im zweiten Schritt werden die Federsteifigkeiten zur Abbildung des eingebundenen Bereichs validiert.

Bei den gewählten Federsteifigkeiten handelt es sich um modellspezifische Größen, die aufgrund der stark vereinfachten Darstellung des Modells nicht direkt aus konkreten Materialparametern des Holzes abgeleitet werden können.

5.2.1 Federsteifigkeiten zur Abbildung der Faserneigung

Nach dem Aufbau, entsprechend der beschriebenen Randbedingungen, wurde das Modell zunächst auf die grundsätzliche Eignung überprüft. Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen vor Durchführung der Validierung, in der qualitativ die Verläufe der Schrauben von oben sowie von vorne und von der Seite zu sehen sind.

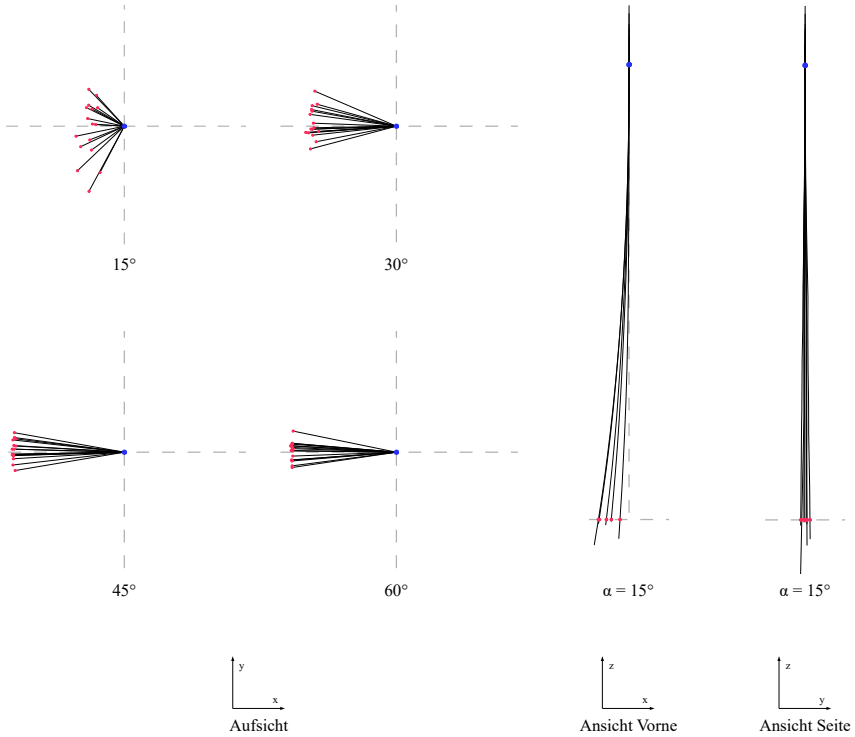


Abbildung 5.5: Qualitative Beurteilung der Funktionsweise des Modells anhand der Verläufe für unterschiedliche Schrauben-Faser Winkel

Es ist zu erkennen, dass das Verlaufen in Bezug auf die Richtung qualitativ richtig abgebildet werden kann. In den gezeigten Fällen findet eine Ablenkung in Richtung der Faserneigung, entsprechend den experimentellen Ergebnissen, statt. Die qualitativen Verläufe über die Tiefe weisen ebenfalls eine Tendenz

auf, die den Beobachtungen aus den experimentellen Untersuchungen entsprechen. Die Berechnung wurde mit einer Wiederholung von n = 16 durchgeführt. Die Streuung der Austrittspositionen resultiert dabei durch eine Variation des angesetzten Winkels der Federsteifigkeiten c_1 und c_2 in jedem Berechnungsschritt.

Die Kalibrierung des Modells an die Ergebnisse der Abweichungen der experimentellen Untersuchungen erfolgt unter Berücksichtigung der zwei beschriebenen Ansätze aus Abschnitt 5.1.3. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Abbildung 5.6 gezeigt. Das Diagramm beinhaltet die Mittelwerte und Standardabweichungen der experimentellen Ergebnisse für die einzelnen Schrauben-Faser Winkel sowie die mit dem Modell berechnete Kurve, die mit einer Wiederholung von n = 1 und einer schrittweisen Erhöhung des Schrauben-Faser Winkels von $\Delta\alpha = 5°$ berechnet wurde.

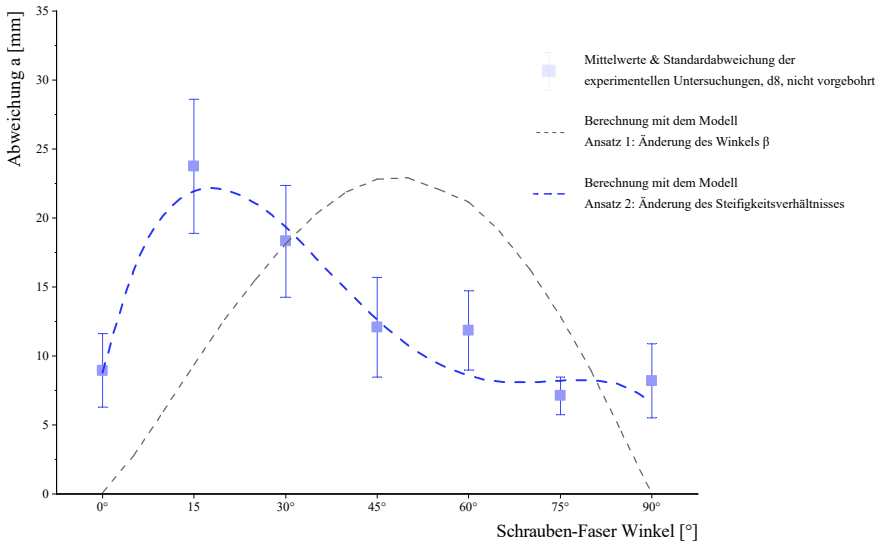


Abbildung 5.6: Vergleich der Abweichungen der experimentellen Ergebnisse (d8, nicht vorgebohrt) mit den Berechnungen des Modells nach zwei Ansätzen

In dem ersten Ansatz wird die Orientierung der Federn entsprechend des Schrauben-Faser Winkels verändert. Das angesetzte Verhältnis der beiden Steifigkeiten c_1 und c_2 von 40 entspricht dabei in etwa dem Verhältnis der E-Module in Faserrichtung und orthogonal dazu. Die gestrichelte graue Linie des Diagramms in Abbildung 5.6 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung. Es ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit der Abweichungen von der Faserorientierung zwar grundsätzlich

abgebildet wird, die Ergebnisse jedoch nicht den experimentellen Untersuchungen entsprechen, bei denen die maximalen Abweichungen bei den flachen Winkel von $\alpha = 15\,^\circ$ auftraten. Ebenfalls ist zu erkennen, dass für die Schrauben-Faser Winkel von $\alpha = 0\,^\circ$ und $\alpha = 90\,^\circ$ die berechneten Abweichungen null betragen, da in diesen Fällen der Stab senkrecht auf eine der angesetzten Federn trifft, während die andere Feder orthogonal dazu steht. In dieser Konstellation ergibt sich der Widerstand lediglich durch die senkrechte Feder, sodass in dem Kräftegleichgewicht keine horizontale Komponente entsteht, die zu einer Ablenkung führt. Die blau gestrichelte Kurve zeigt das Ergebnis der Berechnung unter Anwendung des zweiten Ansatzes bei dem die Repräsentation des Schrauben-Faser Winkels über die Änderung des Verhältnisses der angesetzten Federsteifigkeiten vorgenommen wird. Der Winkel der Federn im Modell wird dabei bei einem festen Wert ($45\,^\circ$) fixiert. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit die im Experiment ermittelten Werte genauer zu treffen. Dabei werden aus den gegebenen Werten der Versuchsreihe die entsprechenden anzusetzenden Verhältnisse ermittelt und über eine polynomische Regression in eine Funktion überführt, die in das Modell eingepflegt wird. Die Ermittlung dieser Verhältnisse erfolgt dabei bei einem fixen Wert für die Steifigkeit des eingebundenen, nicht vorgebohrten Bereich c_{nvb}, der bei der Validierung auf $1\,\mathrm{kN/m}$ festgesetzt wird.
Durch den zweiten Ansatz werden die experimentellen Daten deutlich näher getroffen. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass dabei das Verlaufen immer in Richtung der Faserneigung stattfindet und somit für die Fälle von $\alpha = 0\,^\circ$ und einem Winkel von $\alpha > 60\,^\circ$ in Bezug auf die Richtung nicht richtig abgebildet wird. Trotz dieser Einschränkung wird der zweite Ansatz für die Umsetzung des Modells favorisiert.

Überprüfung des Einflusses des Schraubendurchmessers

In einem zweiten Schritt wird die korrekte Abbildung des Einflusses des Schraubendurchmessers überprüft. Das Diagramm in Abbildung 5.7 zeigt die Überlagerung der berechneten Kurven mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen für beide Schraubendurchmesser.
Durch die Erhöhung des Durchmessers der Schraube erhöht sich die Steifigkeit, was zu geringeren Ablenkungen führt. In den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen war ersichtlich, dass durch die Wahl einer dickeren Schraube das Verlaufen deutlich reduziert wurde und der Einfluss der Faserneigung weniger ausgeprägt war. Über die Änderung des äquivalenten Durchmessers kann dieses Phänomen im Modell reproduziert werden. Erwartungsgemäß bleibt der grundsätzliche Verlauf der Kurve gleich, die Erhöhung des Durchmessers wird in einer Reduzierung der Abweichungen ersichtlich. Dabei sind auch hier die Reduzierungen abhängig vom Schrauben-Faser Winkel.

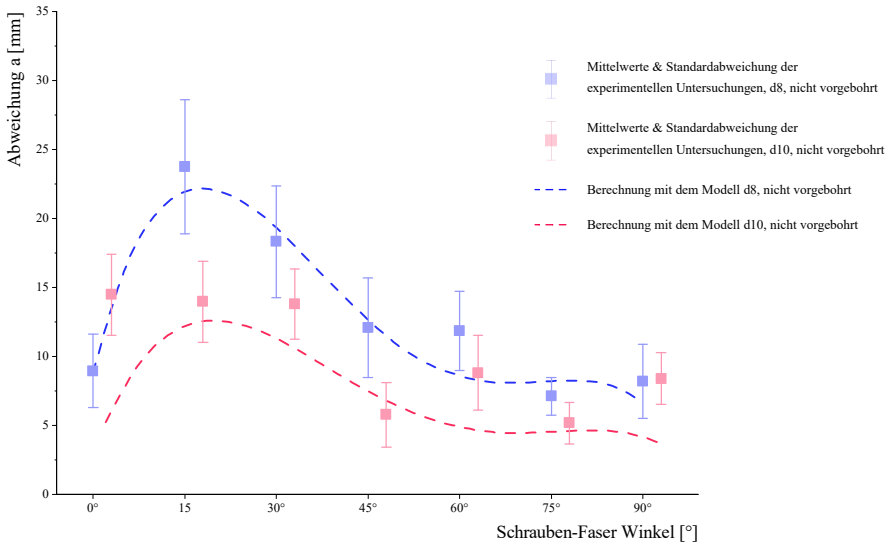


Abbildung 5.7: Vergleich der Abweichungen der experimentellen Ergebnisse mit den Berechnungen des Modells nach Festsetzung der Federsteifigkeiten c_1 und c_2 für Schraubendurchmesser d8 und d10

Die Reduzierung fällt für flache Winkel höher aus, sodass der geringere Einfluss des Schrauben-Faser Winkels durch die Erhöhung des Schraubendurchmessers grundsätzlich abgebildet wird. Insgesamt liegt die Reduzierung der Abweichungen in einem hinreichend genauem Bereich, sodass angenommen werden kann, dass der Einfluss des Schraubendurchmessers im Modell richtig abgebildet wird.

5.2.2 Validierung der Federsteifigkeiten für den eingebundenen, vorgebohrten Bereich

Die Steifigkeit der angesetzten Federn für den nicht vorgebohrten, eingebundenen Bereich (c_{nvb}) wird bei der Ermittlung der Regressionskurve für das Verhältnis der Federsteifigkeiten c_1 und c_2 festgesetzt, sodass eine Anpassung nicht notwendig wird. Die Wahl der Steifigkeiten für den vorgebohrten, eingebundenen Bereich erfolgt anhand der experimentellen Ergebnisse der zur Hälfte vorgebohrten (l_{vb} = 150 mm) Schrauben d8.

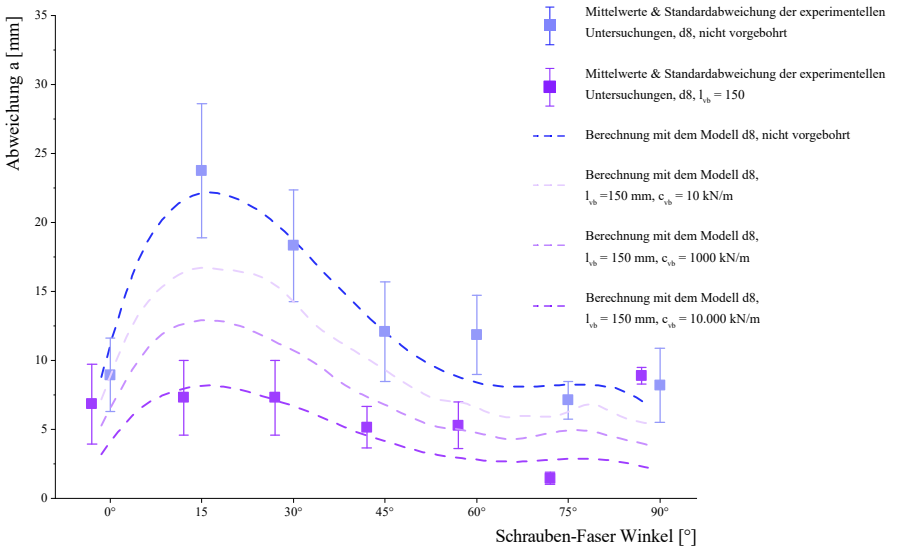


Abbildung 5.8: Vergleich der Abweichungen der experimentellen Ergebnisse mit den Berechnungen des Modells mit unterschiedlichen Federsteifigkeiten c_{vb}

Das Diagramm in Abbildung 5.8 zeigt die berechnete Kurve mit einer eingestellten Vorbohrtiefe von $l_{vb} = 150\,\text{mm}$ für unterschiedliche angenommene Steifigkeitswerte. Es ist zu erkennen, dass durch die Erhöhung der Steifigkeit eine Reduzierung der resultierenden Abweichungen einhergeht. Entsprechend der Ergebnisse wird die Federsteifigkeit in beide Richtungen zu $10.000\,\text{kN/m}$ festgesetzt.

5.3 Anwendung

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Parameter wird das entwickelte Modell im Rahmen von Parameterstudien angewendet. Die berechneten Ergebnisse lassen sich in Diagrammen abbilden, aus denen die Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und den resultierenden Abweichungen der Schrauben ersichtlich werden.
Zur Erstellung der Diagramme wird das Modell unter Variation des jeweils untersuchten Parameters automatisiert durch die Verschachtlung mehrere Loops (siehe 5.1.1) angewendet. Die Dauer eines Simulationsvorgang ist abhängig vom Schrauben-Faser Winkel, da sich die Verformung eines einzelnen Berechnungsschrittes je nach dem Verhältnis der Steifigkeiten und damit auch die erforderlichen Schritte zur Berechnung einer Einschraubung unterscheidet. Durchschnittlich beträgt die Simulationszeit einer Einschraubung in etwa 5 Sekunden. Die

Gesamtdauer einer Parameterstudie ergibt sich entsprechend der Anzahl der ausgeführten Einschraubungen und beträgt in der Regel wenige Minuten.

Die bereits gezeigten Diagramme, anhand derer die Validierung des Modells erfolgte belegen ausreichend, dass mit dem Modell der Einfluss des Schrauben-Faser Winkel abgebildet werden kann. Im Folgenden wird der Funktionsumfang des Modells anhand der Berechnungen für die Abbildung der Streuung, des Einflusses der Einbindetiefe sowie die des Vorbohrdurchmessers gezeigt.
Der Anwendungsbereich für die Durchführung der Parameterstudien wurde auf Schrauben-Faser Winkel von 15 ° bis $\alpha = 60\,°$ begrenzt, da aufgrund der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen in diesem Bereich die Tendenz des Verlaufens mit der Faserrichtung besteht. Für Winkel außerhalb dieses Bereiches wurde eine Streuung der Austrittspositionen in alle Richtungen beobachtet, die in dem Modell nicht korrekt abgebildet wird. Quantitativ lassen sich mit dem Modell die Abweichungen jedoch auch für diese Winkel bestimmen.

5.3.1 Abbildung einer Streuung der Austrittspositionen

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, die mit einer Wiederholung von n=16 durchgeführt wurden, zeigen eine große Streuung der Austrittspositionen und der gemessenen Abweichungen.

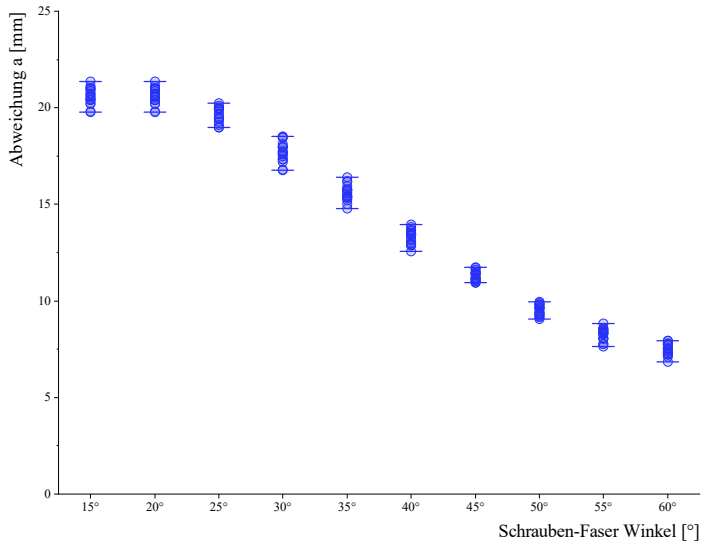


Abbildung 5.9: Anwendung des entwickelten Modells mit einer Wiederholung von n=16 zur Abbildung der Streuung der Austrittspositionen.

Neben den Fällen, bei denen die erhöhten Abweichungen durch eingeschlossenen Äste resultieren, ist die Streuung auch auf die Veränderungen des Winkels einzelner Spätholzschichten sowie die Variation der Steifigkeitsverhältnisse über die Tiefe der Einschraubung zurückzuführen. In dem Modell kann eine Streuung durch die Variation des Winkels, indem die Federsteifigkeiten c_1 und c_2 an das Ende des Stabs angesetzt werden, abgebildet werden. Dabei wird der Winkel für jeden Berechnungsschritt im Rahmen eines vorgegebenen Bereichs variiert. Das Diagramm in Abbildung 5.9 zeigt das Ergebnis einer Berechnung mit einer Wiederholung von n=16, bei dem der Bereich der Variation des angesetzten Winkels zu -10 bis +10° eingestellt wurde. Das Ergebnis zeigt, dass sich damit grundsätzlich eine Streuung der Ergebnisse abbilden lässt, diese jedoch deutlich unter der Streuung der experimentellen Untersuchungen liegt.

5.3.2 Einfluss der Einbindetiefe

Abbildung 5.10 und 5.11 zeigen die berechneten Abweichungen unter Variation der Einbindetiefe l_{eff} getrennt für die zwei Schraubendurchmesser d8 und d10 für unterschiedliche Schrauben-Faser Winkel.

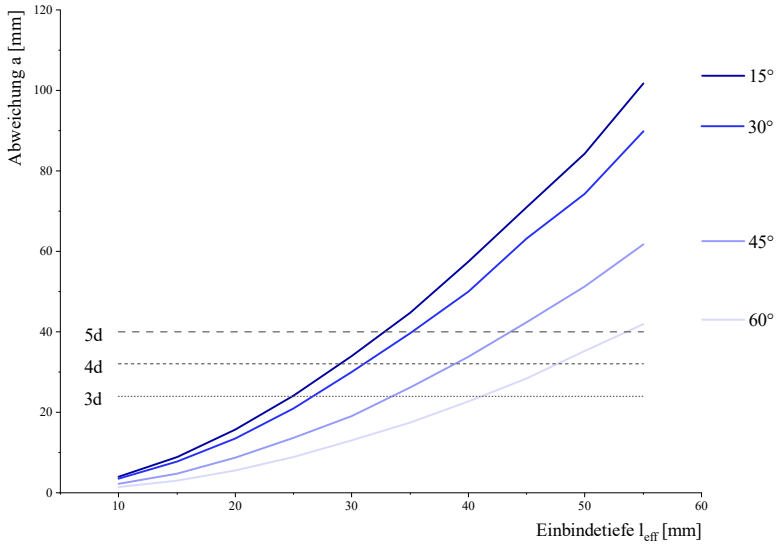


Abbildung 5.10: Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses der Einbindelänge l_{eff} auf die resultierenden Abweichungen; Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d8

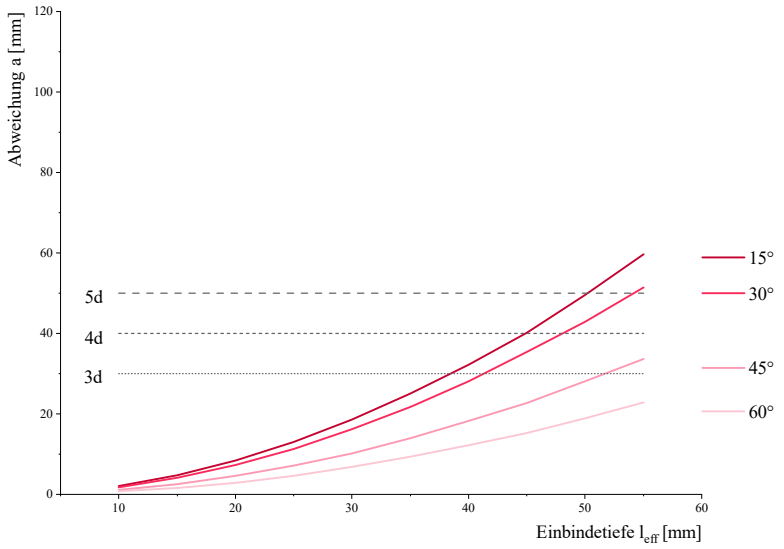


Abbildung 5.11: Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses der Einbindelänge l_{eff} auf die resultierenden Abweichungen; Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d10

Die Kurven zeigen einen erwarteten Verlauf bei dem die berechneten Abweichungen mit der Einbindetiefe exponentiell ansteigen. Zusätzlich sind in den Diagrammen die Grenzwerte für die Mindestabstände 3d, 4d, 5d eingezeichnet, sodass anhand der Kurven die Einbindetiefen abgeschätzt werden können bei denen die Grenzwerte überschritten werden und somit eine Kollision von nebeneinander angeordneten Schrauben zu erwarten ist.

5.3.3 Einfluss der Vorbohrtiefe

Die Ergebnisse der Berechnung der Abweichungen in Abhängigkeit der Vorbohrtiefe sind in den Diagrammen 5.12 und 5.13 für unterschiedliche Schrauben-Faser Winkel, getrennt für die Schraubendurchmesser d8 und d10 gezeigt.

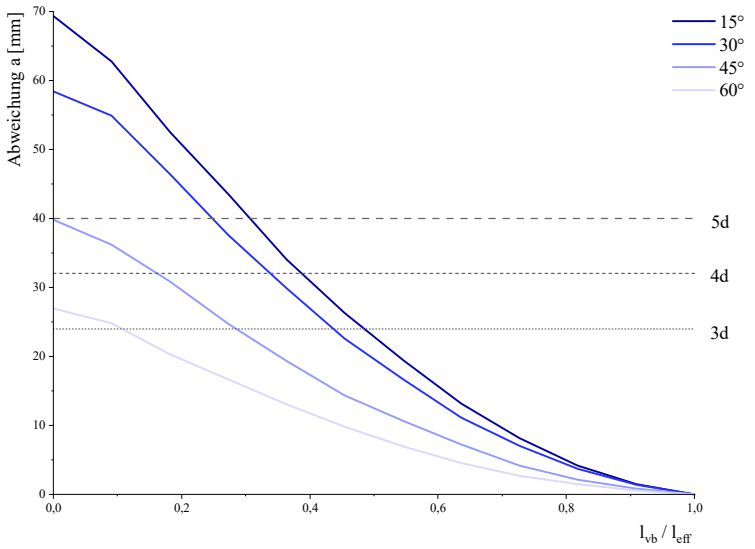


Abbildung 5.12: Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses initialer Vorbohrungen auf die resultierenden Abweichungen; Einbindelänge $l_{eff} = 55\,cm$, Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d8

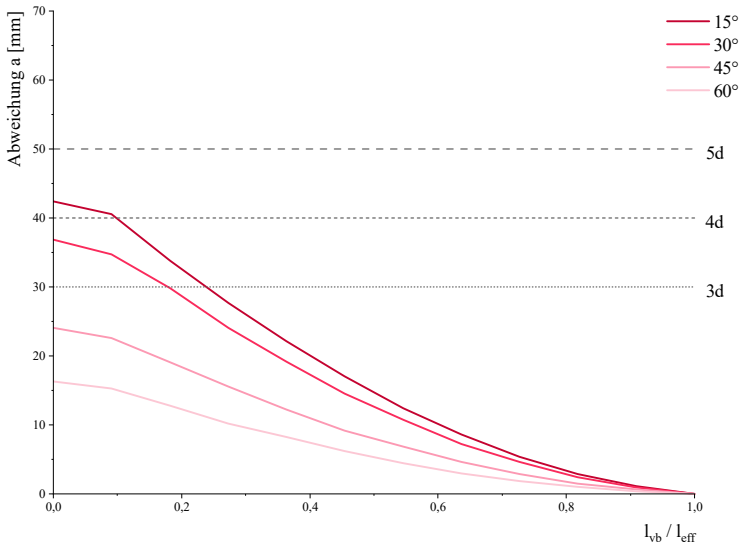


Abbildung 5.13: Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses initialer Vorbohrungen auf die resultierenden Abweichungen; Einbindelänge $l_{eff} = 55\,cm$, Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d10

Mit steigendem Verhältnis des vorgebohrten Bereich zur Einbindelänge (l_{vb}/l_{eff})

nehmen die Abweichungen exponentiell ab und zeigen repräsentativ für eine Kombination von Schraublänge l_S und Schraubendurchmesser d den Einfluss einer Vorbohrung auf die erwarteten Abweichungen. Diese Darstellung der Ergebnisse zeigt, dass mit dem Modell unter Vorgabe der Eingangsparameter erforderliche Vorbohrtiefen zur Erreichung einer definierten Positionierungsgenauigkeit ermittelt werden können.

5.4 Evaluierung der Umsetzung des Modells

Mit dem vorgestellten Modell konnte eine Methode entwickelt werden mit der sich der Einschraubprozess von Vollgewindeschrauben in Bezug auf die resultierenden Abweichungen grundsätzlich abbilden lässt. Die Verwendung eines Ersatzstabsystems in Kombination mit einer schrittweisen Verformungsberechnung, bietet den großen Vorteil die komplexen Vorgänge beim Eindringen der Schraube in das Holz nicht explizit abbilden zu müssen und dennoch die wesentlichen Zusammenhänge zu erfassen.
Die dem Modell zugrunde liegenden Annahmen basieren auf den experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen der vorgestellten Versuchsreihe in Kapitel 4.2.2.4 durchgeführt wurden. Die Ergebnisse weisen eine große Streuung in Bezug auf die Austrittspositionen auf. Für die Validierung des Modells wurde keine Unterscheidung in Bezug auf die Ursache des Verlaufens vorgenommen. Das Modell kann nur zur Abschätzung der erwarteten Abweichungen herangezogen werden. Größere Abweichungen, resultierend aus beispielsweise eingeschlossenen Ästen werden durch das Modell nicht ausreichend berücksichtigt. Der gewählte Ansatz bietet jedoch die Möglichkeit das Modell um diese Phänomene zu erweitern. Die variable Anpassung der Steifigkeitsverhältnisse der angesetzten Federn, die zur Ablenkung der Schraube führen, können auch dafür verwendet werden, lokal gröbere Unstetigkeiten abzubilden. Die Umsetzung und Erweiterung des Modells um ein solches Element, ist jedoch nur in Kombination mit einer Einschätzung der Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Ästen sinnvoll. Diese könnte aus den Regeln der Sortierklassen abgeleitet werden. Kombiniert mit einer solchen probabilistischen Komponente, könnte das vorgestellte Modell um die explizite Berücksichtigung von Asteinschlüssen erweitert und die Qualität der Vorhersage verbessert werden.
Die Anwendung zeigt, dass das Modell eine einfache Möglichkeit bietet die Anpassung der Randbedingungen vorzunehmen und entsprechend die Auswirkungen auf die Abweichungen zu ermitteln. Es lassen sich in unterschiedlichen Kombinationen der Eingangsparameter Abweichungen ermitteln, sodass das Modell herangezogen werden kann um Mindestabstände zur Vermeidung einer Kollision abzuleiten. Ebenfalls lassen sich erforderliche Vorbohrtiefen zur Einhaltung vor-

definierter maximaler Abweichungen ableiten.
Die Umsetzung des Modells in Kombination mit der CAD Software *Rhino* sowie die kurze Berechnungszeit der Simulation eines Einschraubvorhagangs machen es möglich das Modell in ein parametrisches Werkzeug zur Entwicklung und Auslegung von Verbindungen mit Vollgewindeschrauben zu integrieren. Mit einem solchen Tool können Kollisionsprüfungen unter Berücksichtigung von Schraubenkonfigurationen individueller Fügungen vorgenommen werden.

Kapitel 6

Tragverhalten pyrolytisch vorgebohrter Vollgewindeschrauben

Das letzte Kapitel dieser Arbeit widmet sich dem Tragverhalten pyrolytisch vorgebohrter Vollgewindeschrauben. Es wird das grundsätzliche Tragverhalten charakterisiert und die Methode zur Ermittlung in Rahmen von Ausziehversuchen vorgestellt. Nach einem Rückblick auf die Erkenntnisse zum Tragverhalten vorgebohrter Vollgewindeschrauben über die gesamte Entwicklung des pyrolytischen Bohrprozesses, werden die Ergebnisse von Ausziehversuchen der Versuchsreihe vorgestellt, die nach Durchführung der Prozessoptimierung erfolgte. Anhand dieser wird der Einfluss der Vorbohrung auf das Tragverhalten diskutiert und beurteilt. Ebenfalls wird der Zusammenhang zwischen dem gemessenen Drehmoment beim Eindrehen der Schrauben und der ermittelten Ausziehtragfähigkeit anhand der Korrelation dieser Werte thematisiert.

6.1 Charakterisiserung des Tragverhaltens

Das grundlegende Tragverhalten von Vollgewindeschrauben und der Verbund der Schraube mit der Holzmatrix wurde in Abschnitt 2.4 beschrieben. Das Tragverhalten einzelner Schrauben lässt sich anhand von Last-Verformungskurven charakterisieren, die sich in Ausziehversuchen, auch Pull-Out Versuche genannt, ermitteln lassen. Dabei werden in einen Probekörper eingedrehte Schrauben unter Aufzeichnung des Weges und der dazugehörigen Kraft herausgezogen. Über das Verhältnis des zurückgelegten Weges zur aufgebrachten Kraft liefert die Kurve Informationen zur Steifigkeit der Verbindung sowie der maximalen aufgebrachten

Kraft, die als Ausziehtragfähigkeit F_{ax} bezeichnet wird. Bei einer axialen Beanspruchung der Schrauben werden zwei Arten des Versagens unterschieden. Das *Verbundversagen* und das *Stahlversagen*.

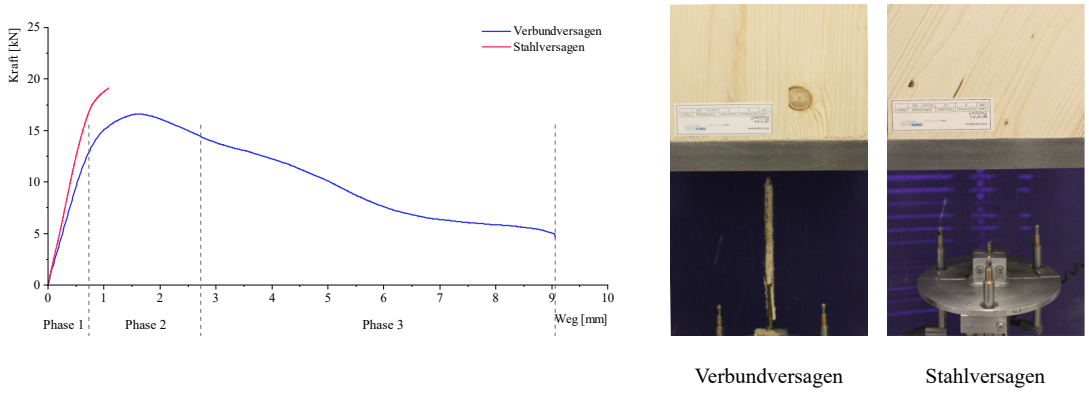


Abbildung 6.1: Vergleich der charakteristischen Last-Verformungskurven der beiden Versagensarten: Verbundversagen und Stahlversagen

Die Übertragung der Kräfte aus der Schraube in die umgebende Holzmatrix findet über den Verbund statt, der durch den Formschluss des Gewindes mit der umgebenden Holzmatrix entsteht. Die Wechselwirkung der Kräfte zwischen der Schraube und dem Holz kann allgemein als Verbundverhalten bezeichnet werden. Als *Verbundversagen* wird der Fall bezeichnet bei dem, wie der Name es sagt, der Verbund zwischen der Schraube und dem Holz versagt. In diesem Fall, bei dem die Schraube als Ganzes aus dem Probekörper herausgezogen wird, lässt sich die Last-Verformungskurve im Wesentlichen durch drei Phasen charakterisieren (siehe auch [104]):

Phase 1 *Formschluss*: Bei Krafteinleitung wird die Verbundwirkung durch den Formschluss der Schraube mit dem umgebenden Holz aktiviert. Die Kurve zeigt einen linear elastischen Anstieg, die Steigung ist die Verbundsteifigkeit der Schraube mit dem umgebenden Holz.

Phase 2 *Matrixversagen*: Bei lokalem Überschreiten der Verbundfestigkeit versagt der Verbund sukzessiv über die Einbindelänge der Schraube. Die Kurve weist ein ausgedehntes Plateau auf, innerhalb dessen die maximale Ausziehtragfähigkeit F_{ax} erreicht wird.

Phase 3 *Degressiver Bereich*: Nach dem Erreichen der maximalen Tragfähigkeit nehmen die Verformungen im Verbundbereich zu bis der Verbund über die komplette Einbindelänge versagt. Die Schraube wird aus dem Holz herausgezogen,

wobei der noch vorhandene Widerstand sich hauptsächlich aus der Reibung zwischen der Schraube und der umgebenden Holzmatrix ergibt.

Die zweite Versagensform, das *Stahlversagen*, tritt ein, wenn der Verbund ausreichend hoch ist und über dem Wert der reinen Stahlzugfestigkeit der Schraube liegt. In diesem Fall versagt die Schraube durch das Reißen im freien Bereich, in der Regel wenige Zentimeter vor dem Eintritt in das Holz. Die charakteristische Last-Verformungskurve weist einen linear elastischen Bereich auf, dessen Steigung der Verbundsteifigkeit entspricht. Nach einem abknickenden Verlauf der Kurve versagt die Schraube spröde. Die maximale Kraft entspricht dabei der Zugfestigkeit der Schraube. Die Höhe der Verbundkraft ist von der Einbindetiefe l_{eff} abhängig, sodass sich die Versagensart durch die Wahl dieser Länge steuern lässt. Die Einbindetiefe wird typischerweise als ein Vielfaches des Durchmessers der Schraube angegeben. Bei nicht vorgebohrten Verbindungen liegt der Grenzwert zwischen dem Verbund- und dem Stahlversagen je nach Schrauben-Faser Winkel zwischen dem 15-20 fachen des Durchmessers der Schraube [3].

6.1.1 Untersuchung des Tragverhaltens im Ausziehversuch

Die Durchführung von Ausziehversuchen erfolgt in Anlehnung an die Norm DIN EN1382:2016 [36]. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Ausziehversuche wurden Probekörper aus BSH, entsprechend der Beschreibungen der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 4, hergestellt. Die Probekörper weisen die gleiche Grundfläche von 20 x 20 cm auf; zur Gewährleistung eines Verbundversagens wurde eine Einbindelänge von 15 d gewählt, sodass die Höhe der Probekörper 120 mm für 8 mm Schrauben und 150 mm für 10 mm Schrauben beträgt. Für die vorgebohrten Einschraubungen wurden die Probekörper mit dem QCW-Faserlaser entsprechend dem in Kapitel 3 beschriebenen pyrolytischen Bohrverfahren über die gesamte Tiefe des Probekörpers vorgebohrt. Nach der Erstellung der pyrolytischen Vorbohrung wurden die Schrauben unter Aufzeichnung des Drehmoments mit dem Versuchsstand aus Abbildung 4.8 eingedreht und anschließend unter Aufzeichnung der aufgebrachten Kraft und des zurückgelegten Weges herausgezogen. Die Durchführung der Versuche erfolge an einer Universalprüfmaschine, deren Aufbau in Abbildung 6.2 zu sehen ist. Der Probekörper wird mit der Oberseite nach unten in den Versuchsstand eingebaut. Der Schraubenkopf wird unten mit einer entsprechenden Aufnahme festgehalten. Bei Durchführung des Versuchs wird die Achse der Versuchsmaschine weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1,5 mm/Minute nach oben bewegt, sodass sich der Probekörpe, der über den Stahl-

rahmen fix mit der Achse verbunden ist ebenfalls nach oben bewegt wird und dabei die Schraube herausgezogen wird.

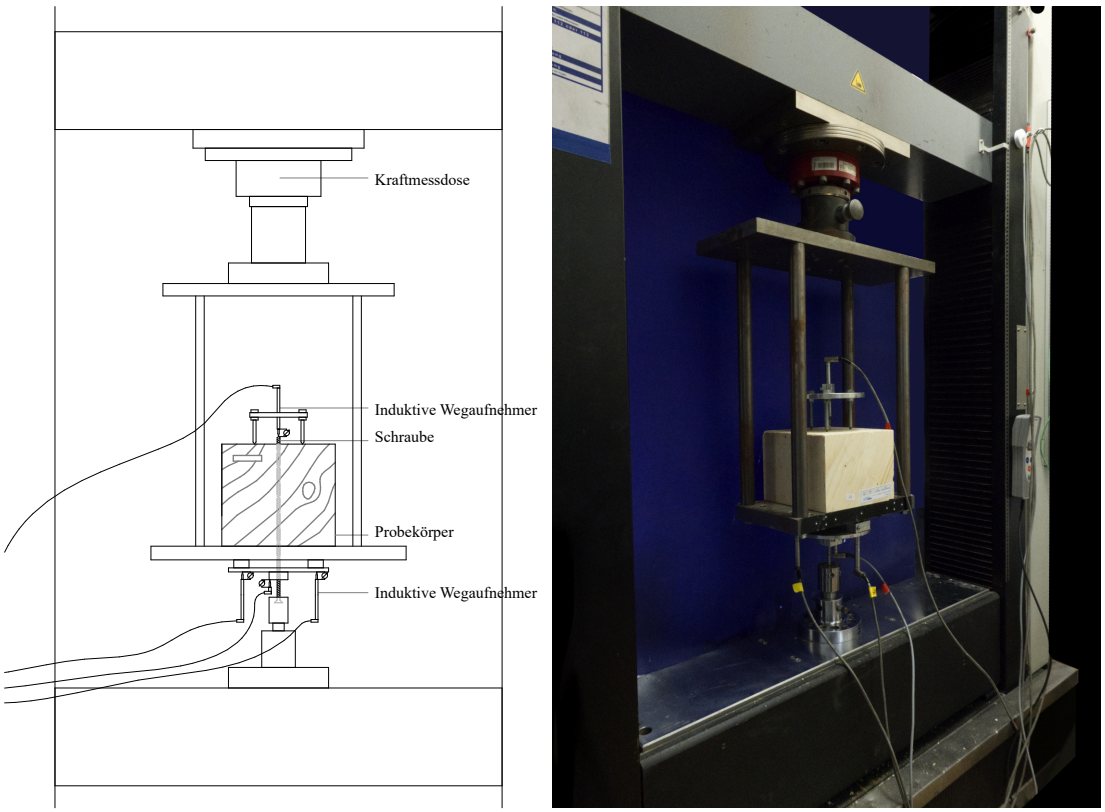


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau zur Durchführung der Ausziehversuche, links: Schematische Zeichnung; rechts: Foto

Zur Messung der Verformung der Schraube an der Oberseite des Probekörpers wird an die Schraube eine Aluminiumplatte angebracht, welche die außermittige Fixierung von drei induktiven Wegaufnehmern ermöglicht. Bei einer Bewegung des Probekörpers wird die relative Verschiebung der Schraube direkt gegen die Oberfläche des Probekörpers gemessen. Die Diagramme der Last-Verformungskurven zeigen den Weg der Schraube an der oberen Seite des Probekörpers als Mittelwert der drei gemessenen Signale entgegen der mit der Kraftdose aufgezeichneten Kraft.

6.2 Rückblick auf die Untersuchungen zum Tragverhalten pyrolytisch vorgebohrter Vollgewindeschrauben

Der Einfluss des pyrolytischen Vorbohrens auf das Tragverhalten bildet eine zentrale Frage in Zusammenhang mit dem neu entwickelten Verfahren und wurde seit Beginn der Entwicklung thematisiert. In den Voruntersuchungen, bei denen erste pyrolytische Vorbohrungen, bis zu einer Tiefe von 6 cm hergestellt werden konnten, wurden erste vergleichende Ausziehversuche durchgeführt [110]. Die Ergebnisse zeigten deutliche Unterschiede in Bezug auf den Schrauben-Faser Winkel mit Reduzierungen der Ausziehtragfähigkeit um bis zu 22 %. Neben der variierenden Bohrlochgeometrie wurde auch der Effekt einer ggf. vorhandenen wärmebeeinflussten Zone (*Heat Affected Zone*) in Betracht gezogen, in der sich die Materialeigenschaften um das Bohrloch herum aufgrund der thermischen Einwirkung in Richtung Sprödigkeit so verändern, dass eine negative Auswirkung auf das Verbundverhalten der Schrauben resultiert.
In der ersten Projektphase stand die Auswahl geeigneter Lasersysteme im Vordergrund der Untersuchungen. Die Eignung wurde in erster Linie durch die Beurteilung des Tragverhaltens vorgenommen. Dafür wurden in mehreren Versuchsreihen Ausziehversuche durchgeführt, die den Vergleich von nicht vorgebohrten, mechanisch vorgebohrten und pyrolytisch vorgebohrten Verbindungen mit zwei unterschiedlichen Lasern möglich machte. Mit Ausnahme des Falls einer parallel durchgeführten Vorbohrung ($\alpha = 0\,^\circ$) zeigten die Ergebnisse keine signifikanten Abweichungen der pyrolytisch vorgebohrten zu den nicht vorgebohrten oder mechanisch vorgeborten Schrauben. Es konnte geschlussfolgert werden, dass durch die Wahl des Lasers und der entsprechenden Anpassung der Prozessparameter ausreichend dünne Vorbohrungen hergestellt werden können, die, im Vergleich zu den ersten Ergebnissen der Voruntersuchungen keinen negativen Effekt auf das Tragverhalten der Schrauben aufweisen. In dem Fall von faserparallelen Vorbohrungen stellt die Einhaltung eines annähernd konstanten Bohrdurchmessers eine größere Herausforderung dar. In diesen Fällen kam es vermehrt zu einem unkontrollierten Aufbrennen des Bohrlochs, was insbesondere auf die höhere Reflexion aufgrund der parallel verlaufenden Jahresringe zurückgeführt wurde.
Bezüglich der wärmebeeinflussten Zone wurden unterschiedliche Methoden zur Identifizierung herangezogen. Die Auswertungen zeigten eine deutlich Kohleschicht, welche mithilfe von CT-Aufnahmen visualisiert werden konnte. Eine veränderte Struktur des umgebenden Holzes außerhalb der Kohleschicht konnte nicht direkt festgestellt werden. Da im Vergleich zu den Voruntersuchungen deutlich

bessere Ergebnisse in Bezug auf das Tragverhalten erzielt wurden und die Ergebnisse kaum Abweichungen zu den Ergebnissen der mechanisch vorgebohrten Verbindungen aufwiesen, wurde der Einfluss einer wärmebeeinflussten Zone, falls überhaupt vorhanden, sehr minimal eingeschätzt. Bei ausreichend dünnen Bohrlöchern konnte auch mit der pyrolytischen Vorbohrung ein positiver Effekt im Sinne einer Erhöhung der Ausziehtragfähigkeit der Schrauben erreicht werden.
Zusätzlich zu den Ausziehversuchen wurden Langzeitbelastungsversuche in einer Klimakammer bei kontrollierter Konditionierung mit periodisch wechselnder Temperatur und Feuchte durchgeführt und anschließend das Tragverhalten nach der Langzeitbelastung untersucht. Dabei wurden die Proben, in Anlehnung an bereits durchgeführte Langzeituntersuchungen [94], über einen Zeitraum von sechs Monaten mit einer vordefinierten Kraft (durch den k_{mod} Faktor abgeminderte Ausziehtragfähigkeit) belastet. Die in anschließenden Ausziehversuchen ermittelte Resttragfähigkeit nach der Langzeitbelastung wies keine signifikanten Unterschiede zwischen den pyrolytisch vorgebohrten und nicht vorgebohrten Verbindungen auf. Die Ergebnisse der Versuchsreihen aus der ersten Projektphase wurden in [106] präsentiert.
Obwohl mit dem UKP-Laser im Vergleich zu den anderen Lasern deutlich präzisere Bohrlöcher erstellt werden konnten, zeigten die Ergebnisse der Ausziehversuche keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das Tragverhalten der Schrauben. Aufgrund des deutlich einfacheren Aufbaus des QCW-Faserlasers sowie der viel höheren Bohrgeschwindigkeiten wurde lediglich dieser zur weiteren Entwicklung ausgewählt. Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse zeigen die Erkenntnisse zum Tragverhalten nach Durchführung der Optimierung der Prozessparameter des QCW-Bohrprozesses aus der zweiten Projektphase.

6.3 Untersuchung des Tragverhaltens nach Optimierung der Prozessparameter

Im Vergleich zu den zuvor durchgeführten Versuchen wurde die Untersuchungsmethodik um die Aufzeichnung des Drehmoments beim Eindrehen der Schrauben erweitert. Die Aufzeichnung erfolgte mit dem in Abschnitt 4.2.1 gezeigten Versuchsstand. Nachdem gezeigt werden konnte, dass die Variation der Prozessparameter einen Einfluss auf den Verlauf des Drehmoments haben, sollte auch untersucht werden, ob ein Zusammenhang des Drehmoments mit der Ausziehtragfähigkeit besteht und ob das Drehmoment somit als Indikator für die Tragfähigkeit einer pyrolytisch vorgebohrten Schraube herangezogen werden kann.

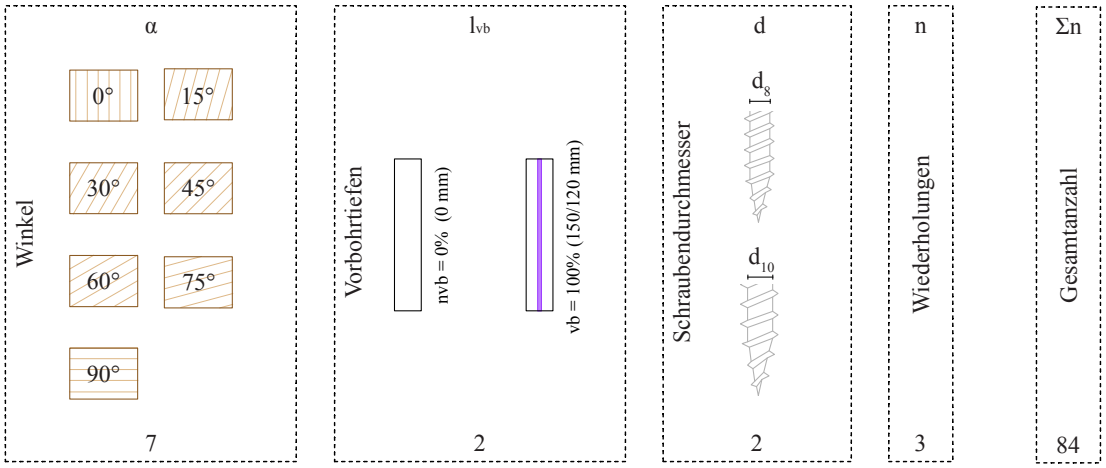


Abbildung 6.3: Umfang der Versuchsreihe zum Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben mit pyrolytischer Vorbohrung im Vergleich zu nicht vorgebohrten Schrauben

Die Versuchsparameter der durchgeführten Versuchsreihe sind in Abbildung 6.3 zusammengefasst. Die Protokolle der Versuchsreihe mit den Diagrammen des Drehmoments, den Last-Verformungskurven der Ausziehversuche sowie Aufnahmen der aufgeschnittenen Probekörper nach Durchführung der Ausziehversuche sind im Anhang B.5 dokumentiert. Im Folgenden wird der Einfluss des pyrolytischen Vorbohrens auf das Tragverhalten sowie die Ergebnisse der Korrelation des Drehmoments mit der Ausziehtragfähigkeit vorgestellt.

6.3.1 Einfluss des Vorbohrens auf das Tragverhalten

Die Versuchsreihe aus Abbildung 6.3 beinhaltet den Vergleich von nicht vorgebohrten und pyrolytisch vorgebohrten Schrauben, bei denen die pyrolytische Vorbohrung nach erfolgter Anpassung der Prozessparameter entsprechend dem aktuellen Stand der Entwicklung des Bohrprozesses (vergleiche Abschnitt 3.4.3) erfolgte. Für den Vergleich wurden aus den jeweils drei durchgeführten Versuchen einer Parameterkombination die Mittelkurven gebildet. Proben mit einem Stahlversagen wurden bei der Bildung der Mittelkurven nicht berücksichtigt. In den Diagrammen sind die Kurven einzelner Ausziehversuche jeweils mit gestrichelten grauen Linien dargestellt. Die Mittelkurven für nicht vorgebohrte Einschraubungen sind blau, für pyrolytisch vorgebohrte Einschraubungen in rot. Die Auswertung erfolgt getrennt für beide Schraubendurchmesser:

d8

In Bezug auf den Verlauf der Last-Verformungskurven und somit das grundsätzliche Tragverhalten zeigt das pyrolytische Vorbohren keinen signifikanten Einfluss.

Trotz der vorhandenen Streuung einzelner Kurven, weisen die Mittelkurven eine nahezu identische Anfangssteifigkeit auf. Im degressiven Bereich nach Überschreitung der Tragfähigkeit unterscheiden sich die Kurven geringfügig, wobei die pyrolytisch vorgebohrten Schrauben in einigen Fällen einen etwas steileren Abfall im Vergleich zu den nicht vorgebohrten Schrauben aufweisen. Dies lässt auf eine Verringerung des Reibwiderstands beim Herausziehen der Schrauben schließen. Der Vergleich in Bezug auf die Ausziehtragfähigkeit F_{ax} zwischen den vorgebohrten und nicht vorgebohrten Schrauben zeigt:

Die Mittelwerte der Ausziehtragfähigkeiten der vorgebohrten Verbindungen für fünf von sieben in Abbildung 6.4 gezeigten Schrauben-Faser Winkel, liegen über den Werten der nicht vorgebohrten Verbindungen. Die Erhöhungen betragen 2 bis 14 %. Im Fall von $\alpha = 45\,^\circ$ versagten zwei der nicht vorgebohrten Schrauben durch ein Stahlversagen, was auf eine Durchdringung eines eingeschlossenen Astes zurückgeführt werden konnte. Im Vergleich zur Ausziehtragfähigkeit der dritten Probe, die ein Verbundversagen aufwies, ist die mittlere Ausziehtragfähigkeit der pyrolytisch vorgebohrten Schrauben um 11 % reduziert, jedoch ist aufgrund der geringen Probenanzahl die Vergleichbarkeit nicht gegeben.
Bei dem Schrauben-Faser Winkel von $\alpha = 0\,^\circ$ liegt der Wert der Ausziehtragfähigkeit der pyrolytisch vorgebohrten Schrauben deutlich unter dem der nicht vorgebohrten Schrauben. Bei einem der Probekörper, dessen Schnittflächen in Abbildung 6.4, oben rechts gezeigt sind, ist zu erkennen, dass die Reduzierung der Tragfähigkeit durch eine deutliche Aufbrennung des Bohrlochs resultiert. In der oberen Hälfte des Probekörpers ist eine starke Aufweitung des Bohrdurchmessers sichtbar. In diesem Bereich entsteht kein tragfähiger Verbund, sodass die effektive Einbindetiefe der Schraube lediglich etwa 6 cm (50 % der Gesamthöhe des Probekörpers) beträgt. Für die anderen beiden Probekörper des Schrauben-Faser Winkels von $\alpha = 0\,^\circ$, bei denen die Ausziehtragfähigkeiten ebenfalls deutlich unter dem Mittelwert der nicht vorgebohrten Schrauben liegen, sind anhand der aufgeschnitten Probekörper zwar keine vergleichbar deutlichen Aufbrennungen festzustellen, die Abweichungen lassen dennoch auf eine insgesamt zu große Vorbohrung schließen lässt, was im Fall einer faserparallelen Vorbohrung auch in früheren Untersuchungen beobachtet wurde.

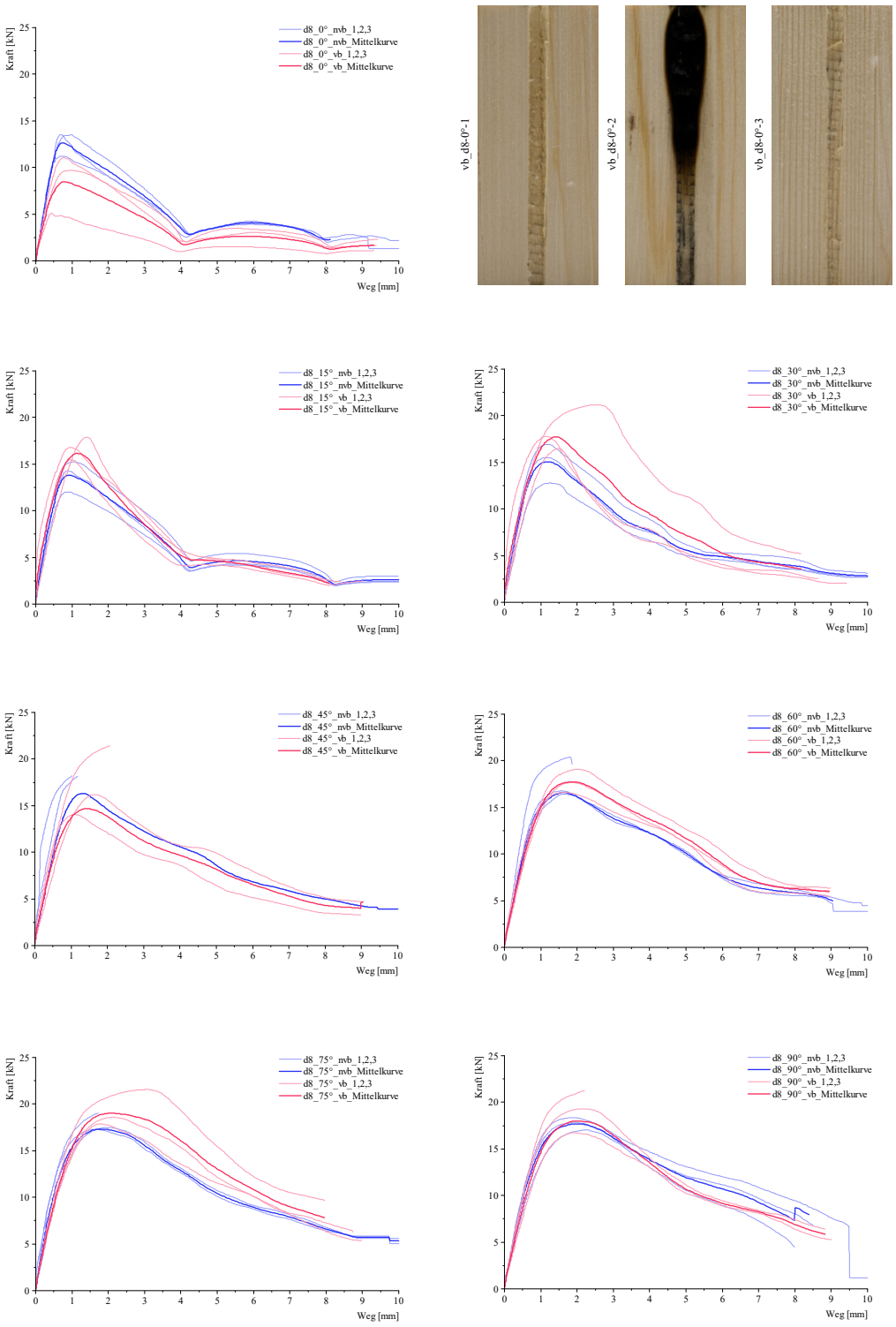


Abbildung 6.4: Vergleich der Last-Verformungskurven der nicht vorgebohrten und pyrolytisch vorgebohrten Schrauben (d8) getrennt nach Schrauben-Faser Winkel

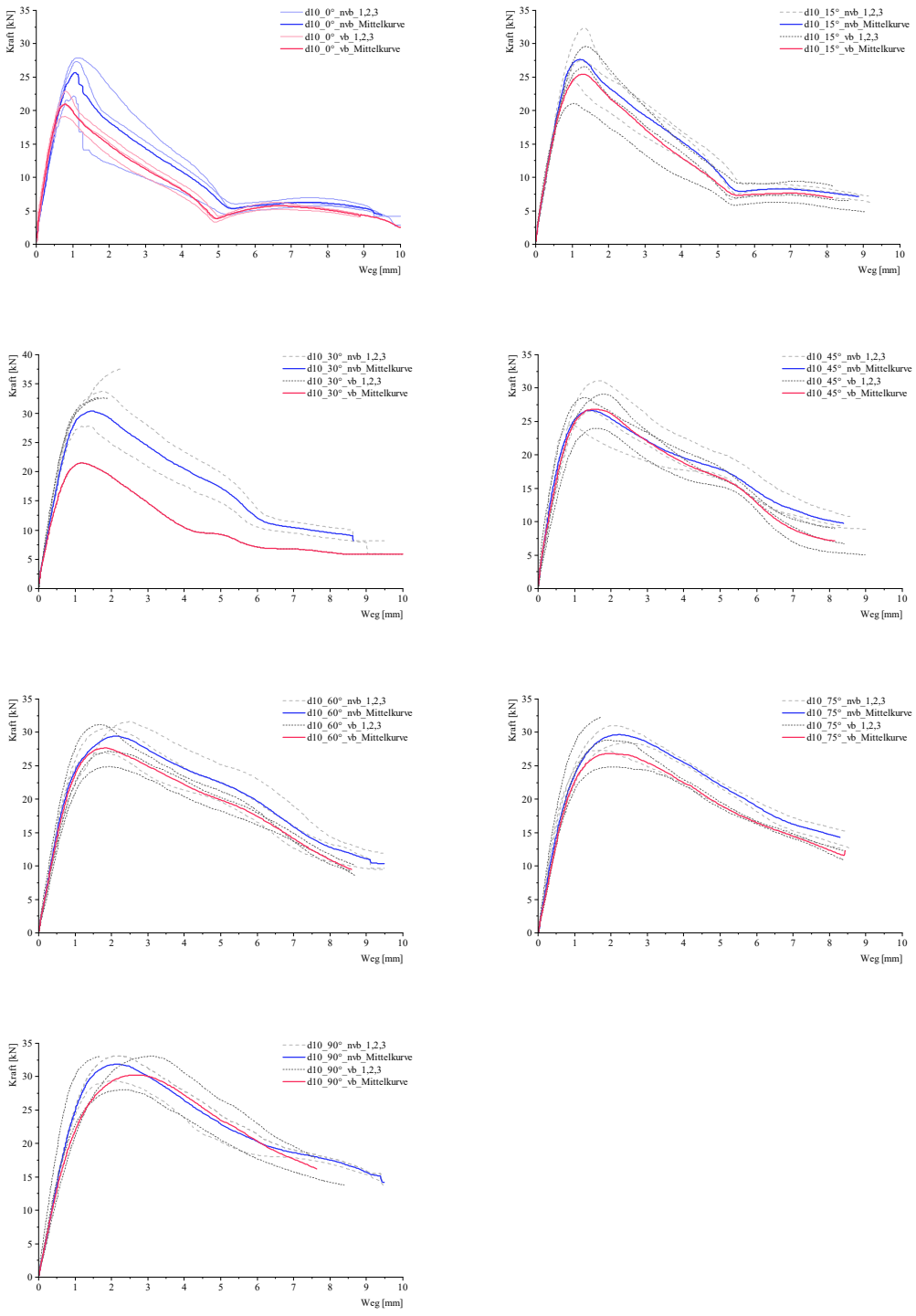


Abbildung 6.5: Vergleich der Last-Verformungskurven der nicht vorgebohrten und pyrolytisch vorgebohrten Schrauben (d10) getrennt nach Schrauben-Faser Winkel

d10

Abbildung 6.5 zeigt die Last-Verformungskurven der 10 mm Schrauben. Auch dabei zeigen sich keine grundsätzlichen Unterschiede in Bezug auf den Verlauf der Kurven. Der Vergleich der Ausziehtragfähigkeiten zeigt für alle Schrauben-Faser Winkel eine Reduzierung, die im Durchschnitt 11 % beträgt. Die maximale Reduzierung von 30 % ist im Fall des Schrauben-Faser Winkels von α =30 ° festzustellen, bei dem jedoch lediglich ein Probekörper als Vergleichswert bei den pyrolytisch vorgebohrten Schrauben zur Verfügung steht. Über die Gesamtheit der Versuchsreihe für die 10 mm Schrauben ist eindeutig, dass die pyrolytische Vorbohrung einen negativen Einfluss auf das Tragverhalten aufweist. Dies kann auf die abweichenden Prozessparameter für die Erstellung der Bohrungen zurückgeführt werden und zeigt die Empfindlichkeit der Bohrlochgeometrie für die Wahl der Prozessparameter. Im Vergleich zu den Bohrungen für die 8 mm Schrauben wurden die Bohrungen für die 10 mm Schrauben mit einer höheren mittlerer Leistung (vergleiche Abschnitt 3.4.3, Tabelle 3.3) erstellt.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Ausziehtragfähigkeiten F_{ax} der gesamten Versuchsreihe sind in Abbildung 6.6 zusammengefasst.

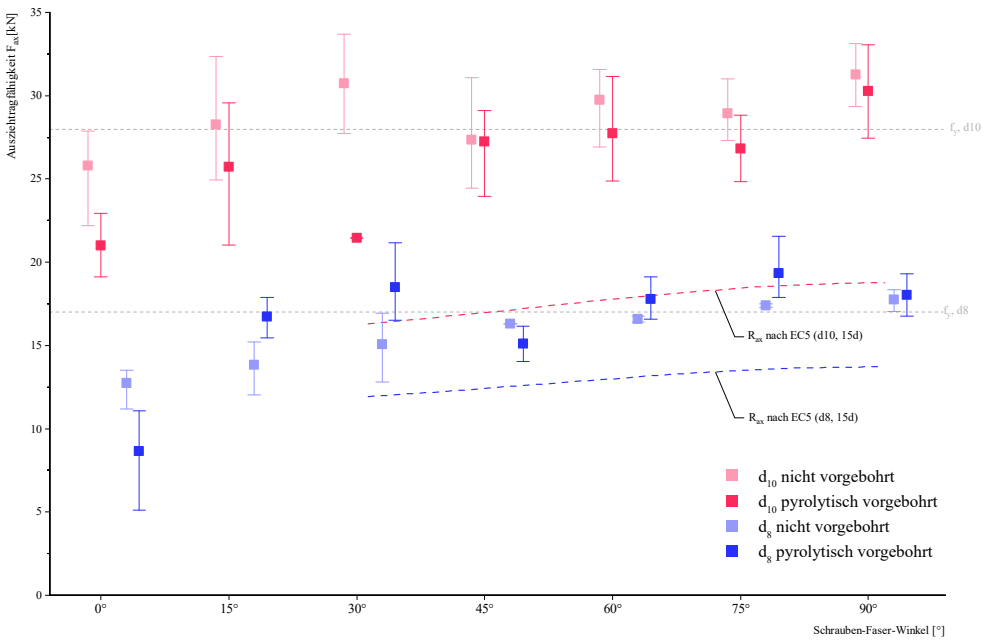


Abbildung 6.6: Zusammenfassung der Ausziehtragfähigkeiten F_{ax} für nicht vorgebohrte und pyrolytisch vorgebohrte Schrauben in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkels α für 8 mm- und 10 mm Schrauben

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass für die 8 mm Schrauben tendenziell höhere Ausziehtragfähigkeiten, im Mittel um 13% erreicht wurden, während bei den 10 mm Schrauben eine Reduzierung festzustellen ist, die im Mittel über alle Schrauben-Faser Winkel 11 % beträgt. Die Ergebnisse belegen erneut, dass das Vorbohren einen Einfluss auf das Tragverhalten der Schrauben aufweist, wobei je nach Bohrlochgeometrie tendenziell auch eine höhere Verbundwirkung erreicht werden kann. Dies lässt sich auf den Effekt zurückführen, der auch beim mechanischen Vorbohren beobachtet wird (siehe Kapitel 3.1). Durch die Vorbohrung findet beim Eindringen der Schraube eine geringere Verdrängung und somit Schädigung des umgebenden Holzes statt was in einer höheren Verbundwirkung resultiert. Ist der Vorbohrdurchmesser zu groß reduziert sich die Ausziehtragfähigkeit, da sich die Kontaktfläche des Holzes mit dem Gewinde verringert. Durch eine genauere Erforschung des Einflusses der Prozessparameter auf die resultierende Bohrlochgeometrie können die Einstellungen entsprechend angepasst werden, sodass eine zu große Vorbohrung weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Nach dem aktuellen Stand der Entwicklung liegen die erreichten Ausziehtragfähigkeiten der pyrolytisch vorgebohrten Schrauben auch in dem Fall einer Reduzierung für beide Schraubendurchmesser deutlich über dem errechneten Bemessungswert nach Eurocode 5 sowie der Zulassung des Herstellers, und somit innerhalb des Sicherheitskonzeptes.

6.3.2 Korrelation des Drehmoments mit der Ausziehtragfähigkeit

Nach der Durchführung einer pyrolytischen Vorbohrung und vor dem Eindrehen der Schraube ist es nicht möglich die Bohrlochgeometrie zu beurteilen, sodass eine eventuelle Reduzierung der Ausziehtragfähigkeit als Risiko bei der Auslegung einer Verbindung verbleibt. Wie in Abschnitt 4.2.2.2 gezeigt, besteht ein Zusammenhang zwischen der Bohrlochgeometrie und dem gemessenen Drehmoment. Eine zu große Vorbohrung, lässt sich am Verlauf des Drehmoments erkennen und kann als Indiz für die Reduzierung der Ausziehtragfähigkeit herangezogen werden. Anhand der im Folgenden gezeigten Korrelation des Drehmoments mit dem Ausziehtragfähigkeit wird diskutiert, inwiefern aus dem Drehmoment direkt auf die Ausziehtragfähigkeit einer Schraube geschlossen werden kann.
Getrennt in zwei Diagrammen zeigen die Abbildungen 6.7 und 6.8 die Korrelation der Ausziehtragfähigkeit mit dem jeweils maximalen Drehmoment einer Messung M_{max} sowie der integrierten Fläche der Drehmomentkurve A_m. Trotz der großen Streuung lässt sich in beiden Diagrammen eine Korrelation der Werte für beide Schraubendurchmesser erkennen. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Werte der maximalen Drehmomente M_{max} und der integrierten Fläche der Drehmomentkurve A_m auch untereinander korrelieren und somit der Vergleich der beiden Diagramme untereinander die gleiche Tendenz zeigt:
Für die 8 mm Schrauben ist zu erkennen, dass die Korrelation bei der Betrachtung der integrierten Fläche im Vergleich zum maximalen Drehmoment von einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,33$ auf $R^2 = 0,65$ zunimmt. Für die 10 mm Schrauben ist diese Tendenz nicht zu erkennen. Sowohl das maximale Drehmoment als auch die integrierte Fläche zeigen eine geringere Korrelation mit der Ausziehtragfähigkeit. Bei der Betrachtung einzelner Punkte können die Abweichungen zum Teil begründet werden. Die drei Punkte bei den 8 mm Schrauben die die größte Abweichung zur Trendlinie aufweisen, gehören alle zu den faserparallelen Schrauben ($\alpha = 0\,°$). Die Schraube mit der geringsten Tragfähigkeit und der größten Abweichung zur Trendlinie bezieht sich auf den bereits thematisierten Fall in Abbildung 6.4, bei dem ein starkes Aufbrennen des Bohrlochs festgestellt werden konnte. Die Aufweitung des Bohrlochs kann auch über den Verlauf des Drehmoments, der erst ab einer Tiefe von 65 mm ansteigt, eindeutig identifiziert werden.

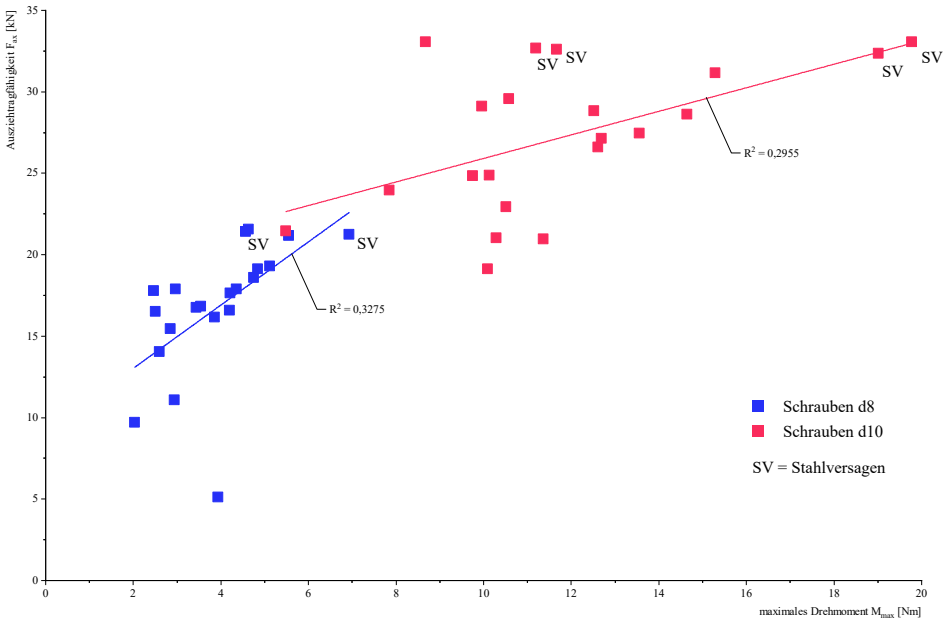


Abbildung 6.7: Korrelation des gemessenen maximalen Drehmoments M_{max} mit der Ausziehtragfähigkeit F_{ax} für pyrolytisch vorgebohrte Schrauben; d8 und d10

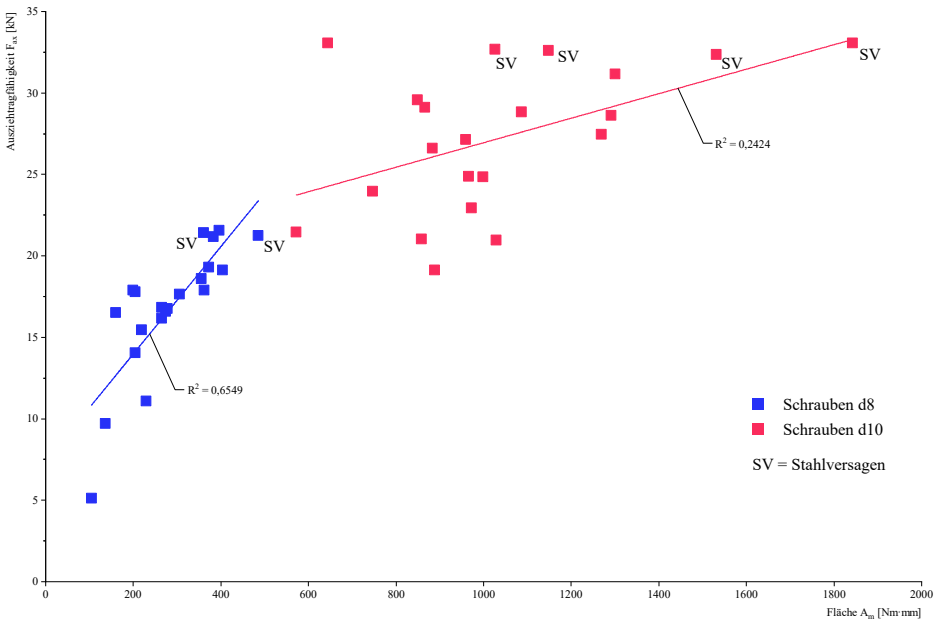


Abbildung 6.8: Korrelation des integrierten Fläche des Drehmoments A_m mit der Ausziehtragfähigkeit F_{ax} für pyrolytisch vorgebohrte Schrauben; d8 und d10

In den anderen beiden Fällen der faserparallelen Vorbohrungen für die 8mm Schrauben lassen die Drehmomentverläufe keinen Rückschluss auf eine Abweichung zu.
Die mit SV markierten Punkte zeigen die Fälle bei denen ein Stahlversagen aufgetreten ist. Für beide Schraubendurchmesser weisen die jeweils äußersten Punkte, mit den maximalen gemessenen Drehmomenten ein Stahlversagen auf. In beiden Versuchsreihen finden sich jedoch auch Fälle bei denen ein Stahlversagen auftritt, obwohl die Werte M_{max} und A_m nicht deutlich herausstechen. In diesen Fällen könnte die erhöhte Tragfähigkeit allerdings über den Verlauf des Drehmoments identifiziert werden. Die entsprechenden Verläufe der Drehmomente mit den aufgeschnitten Probekörpern sind in Abbildung 6.9 gezeigt. In allen gezeigten Fällen ist der Einschluss von Ästen durch eine entsprechende Erhöhung des Drehmoments ersichtlich.

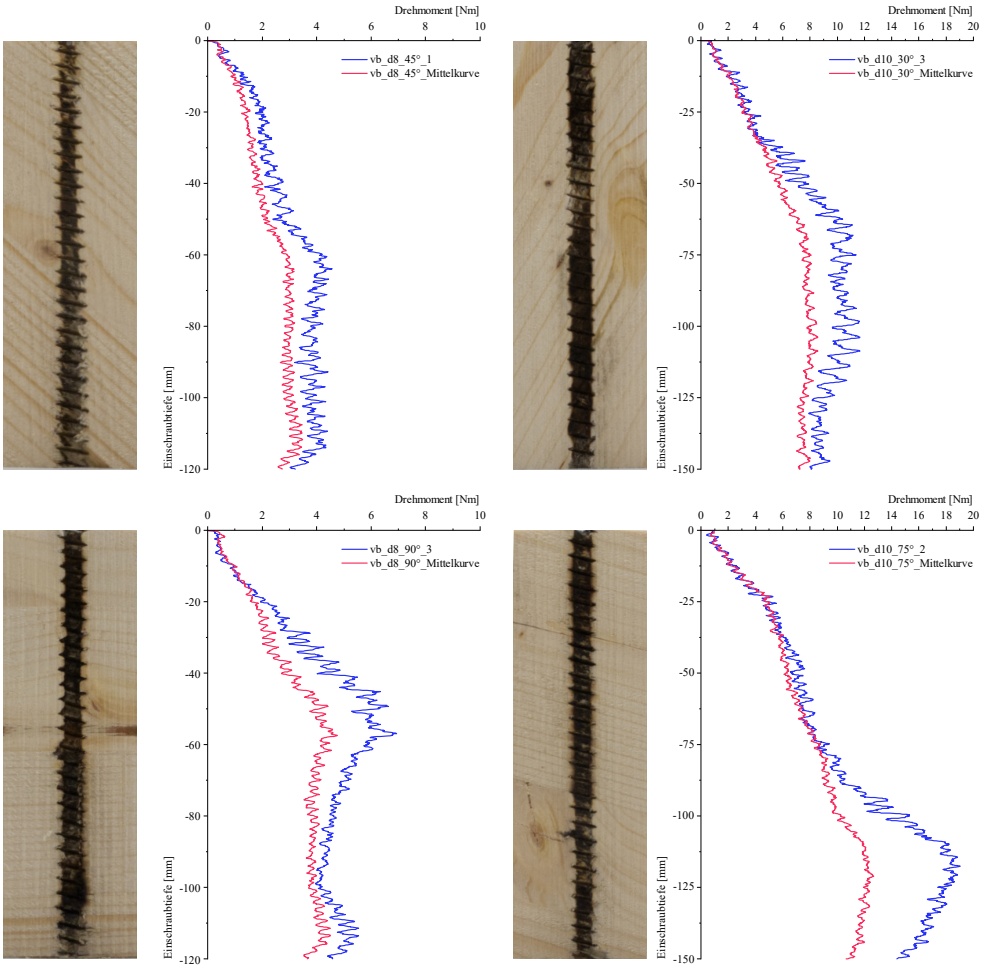


Abbildung 6.9: Diagramme der Drehmomente und Schnittflächen der jeweiligen Probekörper für die Ausziehversuche mit Stahlversagen

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Das pyrolytische Vorbohren hat einen Einfluss auf das Tragverhalten von Vollgewindeschrauben was sich in der Ausziehtragfähigkeit abzeichnet.
- Bei Vorliegen einer passenden Vorbohrung lässt sich durch das Vorbohren die Ausziehtragfähigkeit steigern. Zu große Vorbohrungen führen zu einer Reduzierung der Ausziehtragfähigkeit
- Das Drehmoment zeigt eine mittlere Korrelation mit den Ausziehtragfähigkeit. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Drehmoment und der Ausziehtragfähigkeit kann anhand der vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden.
- Anhand der Kurvenverläufe des Drehmoments lässt sich die Durchdringung eines eingeschlossenen Astes identifizieren, die zu einer Erhöhung der Ausziehtragfähigkeit führt.
- Die erzielten Ausziehtragfähigkeiten der pyrolytisch vorgebohrten Bohrungen liegen für beide Schraubenduchmesser, deutlich über dem Bemessungswert nach Eurocode 5, sodass der Bemessungsansatz auch für pyrolytisch vorgebohrte Schrauben herangezogen werden kann.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten von Vollgewindeschrauben beim Eindrehprozess in Bezug auf die Positionsgenauigkeit untersucht. Im Fokus stand dabei das neu entwickelte Verfahren des pyrolytischen Vorbohrens, bei dem mithilfe von Laserstrahlung Führungslöcher hergestellt werden. Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mit dem Verfahren des pyrolytischen Vorbohrens mittels Laserstrahlung lassen sich gradlinige Führungslöcher mit einem über die Tiefe annähernd konstantem Durchmesser erzeugen. Durch Variation der Prozessparameter lässt sich der Prozess in Bezug auf die Faserneigung und den Zieldurchmesser anpassen. Die axialen Abweichungen von Vollgewindeschrauben lassen sich durch eine pyrolytische Vorbohrung deutlich reduzieren.
- Mechanische Bohrer verlaufen in Abhängigkeit des Durchmessers des Bohrers sowie des Bohrer-Faser Winkels. Das Verlaufen findet für Winkel zwischen $\alpha = 15\,^\circ$ und $\alpha = 60\,^\circ$ entgegen der Faserneigung statt. Die Möglichkeiten einer langen geraden Vorbohrung mithilfe von mechanischen Bohrern sind begrenzt, sodass sich das mechanische Vorbohren nur bedingt für die Erstellung gerade Führungsbohrungen eignet.
- Vollgewindeschrauben werden beim Eindrehen ins Holz von der strukturellen Beschaffenheit des Holzes abgelenkt, wodurch Abweichungen resultieren. Dünne Schrauben (d8) verlaufen bei Neigungswinkel zwischen $\alpha = 15\,^\circ$ und $\alpha = 45\,^\circ$ in Richtung der Faserneigung. Bei Schrauben mit höherem Durchmesser reduzieren sich die gemessenen Abweichungen und der Einfluss der Ablenkung durch die Faserneigung verringert sich.
- Durch die Messung des Drehmoments beim Einschrauben von Vollgewindeschrauben können anhand des Verlaufs der Kurve Rückschlüsse auf die

innere Struktur des Holzes abgeleitet werden. Das Durchdringen lokaler Diskontinuitäten, vor allem Asteinschlüssen, Lamellen höherer Dichten oder Keilzinkungen können im Kurvenverlauf erkannt werden. Das aufgezeichnete Drehmoment korreliert mit der Bohrlochgeometrie im vorgebohrten Bereich und kann somit auch als Indikator für die Qualität der pyrolytisch hergestellten Vorbohrung herangezogen werden.

- Das Eindringen einer Vollgewindeschraube kann hinsichtlich des Verlaufs über die Tiefe an einem Ersatzstabsystem mit einer statischen schrittweisen Verformungsberechnung abgebildet werden. Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Modell konnte ausreichend genau an die experimentellen Ergebnisse angepasst werden und erlaubt die Darstellung des Verlaufens von Vollgewindeschrauben in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkel sowie dem Schraubendurchmesser. Das Modell kann angewendet werden um resultierende Abweichungen in Abhängigkeit der Eingangsparameter oder den Einfluss einer initialen Vorbohrung abzuschätzen.
- Die pyrolytische Vorbohrung hat einen Einfluss auf das Tragverhalten von Vollgewindeschrauben. Je nach Bohrlochgeometrie kann dieser einen negativen aber auch einen positiven Effekt, im Sinne der Reduzierung bzw. Erhöhung der Ausziehtragfähigkeit aufweisen.

Ausblick

Mit den vorgestellten Ergebnissen konnte die grundsätzliche Eignung des pyrolytischen Bohrverfahren zur Herstellung von Führungslöchern für Vollgewindeschrauben gezeigt werden. Nach erfolgter Auswahl eines geeigneten Lasers wurde das Potenzial der Steuerung des Bohrvorgangs durch die Anpassung der Prozessparameter erkannt und erfolgreich genutzt. Während zu Beginn der Entwicklung noch in allen Fällen von einer Reduzierung des Verbundes von bis zu 40 % ausgegangen wurde, konnte durch eben diese Steuerung der Prozessparameter eine deutliche Verbesserung erzielt werden, sodass aktuell eine Vorbohrung ohne einen signifikanten Einfluss auf das Verbundverhalten möglich ist. Durch weitere Optimierungen können die Prozessparameter noch individueller eingestellt und angepasst werden, insbesondere im Hinblick auf das Erreichen eines möglichst konstanten Zieldurchmessers und die Variation des Schrauben-Faser-Winkels. Ebenfalls lässt sich durch weitere Entwicklung die maximale Bohrtiefe, die aktuell bei etwa 300 mm liegt, weiter steigern. Letztlich ist das pyrolytische Vorbohren nur ein mögliches Anwendungsszenario für laserbasierte Verfahren im Holzbau. Es ist denkbar, dass sich die Erkenntnisse auf andere Anwendungen übertragen lassen.

Die Methode der Drehmomentaufzeichnung beim Eindrehen von Vollgewindeschrauben kann weiter entwickelt werden. Die Untersuchungen haben aufgezeigt, dass über den Verlauf des Drehmoments Rückschlüsse auf die innere Struktur des Holzes sowie die Bohrlochqualität möglich sind. Die Ergebnisse der Korrelation des Drehmoments mit der Ausziehtragfähigkeit zeigt, dass zwar ein grundsätzlicher Zusammenhang der beiden Größen besteht, eine direkt Ableitung der Ausziehtragfähigkeit aus dem Drehmoment auf der Grundlage der vorliegenden Daten jedoch nicht möglich ist. Mit weiteren Untersuchungen könnte der Zusammenhang genauer beschrieben werden um eine zuverlässige Abschätzung des Tragverhaltens aus dem Drehmoment zu erzielen. Insbesondere in Zusammenhang mit dem pyrolytischen Vorbohren könnte das Vorgehen für die Abschätzung der Bohrlochqualität und der damit einhergehenden Tragfähigkeit ausgebaut werden.

Mit dem entwickelten numerischen Modell ist es möglich das grundsätzliche Verlaufen von Vollgewindeschrauben in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussparameter abzubilden. Das Modell basiert auf experimentellen Untersuchungen, deren Ergebnisse unter einer Auswahl von Parametern erzielt wurde. Durch die Erweiterung der Datengrundlage von experimentellen Ergebnissen könnte das Modell genauer validiert werden und so die Qualität der Vorhersage des Verlaufens von Schrauben verbessern. Durch die Integration einer stochastischen Abschätzung des Vorkommens von Asteinschlüssen könnte auch das Verlaufen infolge dieser im Modell implementiert werden und ebenfalls zur Verbesserung der Qualität beitragen. Der einfache Aufbau und die Umsetzung des Modells in der CAD Software *Rhino* bietet außerdem die Möglichkeit das Modell zu einem Werkzeug für die parametrischen Konstruktion und Auslegung von Fügungen mit Vollgewindeschrauben auszubauen. Damit ließen sich Kollisionsprüfungen vornehmen und Mindestabstände für individuelle Schraubenkonfigurationen ermitteln.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz; a) Makrostruktur (nach Kollmann), b) Mikrostuktur (nach Olivia) c) Submikrostruktur (nach Kucera) [89] 6

2.2 Schnittfläche von Holz mit Unterscheidung der Festigkeiten und Steifigkeiten in Axial-, Radial-, und Tangenzialrichtung 7

2.3 Unterschiedliche Arten von Rissen, von links nach rechts: Blitzriss, Ringschäle, Trocknungs-/Schwindriss 9

2.4 Charakterisierung unterschiedlicher Produkte aus Holz für den konstruktiven Einsatz 10

2.5 Bestimmung der Ästigkeit nach DIN EN 4047 für links: Kantholz; rechts: Brett und Bohle [35] 11

2.6 Einsatz von VGS zur lokalen Verstärkung von Bauteilen 14

2.7 Einsatz von Vollgewindeschrauben zur Fügung von Bauteilen . . . 16

2.8 Fügung von biegesteifen Rahmenecken mit Vollgewindeschrauben; a) Stabwerkmodelle für unterschiedliche Anordnungen; b) Schraubenkonfigurationen und Versuchsdurchführung [109] 18

2.9 Bewehrung von Bauteilen mit Vollgewindeschrauben; a) Prinzipskizze, b) Anordnung von Vollgewindeschrauben im Querschnitt; c) Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlicher Schraubenanordnungen, d) Erhöhung der Tragfähigkeit durch die Anbringung einer Stahllamelle [109] 19

2.10 Beispiele zur Instandsetzung und Ertüchtigung von Bauteilen mit Vollgewindeschrauben [19] 20

2.11 links: experimentell ermittelte Last-Verformungskurven von Vollgewindeschrauben für unterschiedliche Schrauben-Faser Winkel, Schraubendurchmesser d8, Einbindelänge l_{eff} = 15d; rechts: Ausziehtragfähigkeiten von Vollgewindeschrauben für zwei Schraubendurchmesser (d8 und d10) abhängig vom Schrauben-Faser Winkel 22

3.1 Vorrichtungen unterschiedlicher Hersteller zur Positionierung langer Vollgewindeschrauben 32

3.2 Kategorien von Holzbohrern 33

3.3 Wesentliche laserbasierte Bohrverfahren 35

3.4 Schematischer Aufbau eines Resonators zur Erzeugung eines Lasers [55] 37

3.5 Aufbau zur Durchführung der pyrolytischen Bohrungen, links: Gesamtaufbau; rechts: Nahaufnahme 41

3.6 Entwickelte Bohrverfahren für unterschiedliche Laser; links: CO_2- und Faserlaser (kollimiert); rechts: UKP-Laser (fokussiert) [16] . . 42

3.7 Charakteristische Bohrlochgeometrien der untersuchten Laser im Rahmen der Sondierungsphase [106] 43

3.8 Bohrlochgeometrien pyrolytisch herstellter Bohrlöcher in MDF unter Anwendung unterschiedlicher Prozessparameter 45

3.9 Leistung gepulster Strahlung über die Zeit 47

3.10 Einstellung des Strahldurchmessers durch das Optische System, Der Laserstrahl verläuft von links (Facette des Faserlasers) nach rechts. 47

3.11 Kaustik eines Gausstrahls 48

3.12 links: typischer Bohrverlauf einer pyrolytisch hergestellten Bohrung über die Tiefe bei $\alpha = 90\,^\circ$, rechts: Effekt der Ovalisierung des Bohrdurchmessers anhand der Austrittslöcher für $\alpha = 90\,^\circ$ (oben) und $\alpha = 0\,^\circ$ (unten) 49

3.13 Mikroskopische Aufnahmen der Oberflächen eines Probekörpers in unterschiedlichen Tiefen. [116] 49

3.14 Einfluss der Repetitionsrate auf die Bohrgeschwindigkeit (links) und den Bohrlochdurchmesser (rechts) [116] 50

4.1 Umfang der Versuchsreihe zum Verlaufen von Bohrern 54

4.2 Versuchsstand zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Verlaufen von Bohrern 55

4.3 Schematische Darstellung der Geometrie der Probekörper 56

4.4 Oberfläche ABCD der Probekörper mit Eintritts- (blau) und Austrittspositionen (rot) der Bohrer in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels 57

4.5 Gemessene Abweichungen in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels für 5 mm Bohrer (links) und 8 mm Bohrer (rechts) 58

4.6 Bohrverläufe in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels; d_B = 5 mm als Ansicht der Seitenfläche ABEF 60

4.7 Umfang der Versuchsreihe zum Verlaufen von Vollgewindeschrauben ohne und mit initialer pyrolytischer Vorbohrung 62

4.8 Versuchsstand zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Verlaufen von Vollgewindeschrauben 63

4.9 Gemessene Vorbohrtiefen $l_{vb,ist}$ für die unterschiedlichen Sollvorbohrtiefen $l_{vb,soll}$ = 75 mm, 150 mm und 225 mm 67

4.10 Bildung der Mittelkurven der Einschraubungen A1 - D4 einer Parameterkombination, repräsentativ anhand zweier Beispiele für Einschraubungen ohne Vorbohrung mit Schrauben-Faser Winkel von $\alpha = 0\,^\circ$ (links) und $\alpha = 45\,^\circ$ (rechts) 68

4.11 Vergleich der Mittelkurven der unterschiedlichen Schrauben-Faser Winkel für Schrauben d = 8 mm (links) und d = 10 mm (rechts) . 69

4.12 links: Vergleich der Maximalwerte; rechts: Vergleich der integrierten Flächen A_m 69

4.13 links: Kurven des Drehmoments der Einschraubversuche in MDF, d8, nicht vorgebohrt; rechts: aufgerissener Probekörper 70

4.14 Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen; Dichteunterschiede 71

4.15 Ausgewählte Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen mit einer Durchdringung von eingeschlossenen Äste 73

4.16 Ausgewählte Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen mit einer Durchdringung von Keilzinkungen 74

4.17 Ausgewählte Diagramme der Drehmomente einzelner Einschraubungen mit pyrolytischer Vorbohrung 75

4.18 Vergleich der maximalen Drehmomente sowie der integrierten Flächen A_m für nicht vorgebohrte und vorgebohrte (l_{vb} = 150 mm) Einschraubungen 76

4.19 Diagramme der Mittelkurven von je vier Einschraubungen, pyrolytisch vorgebohrt mit unterschiedlichen Prozessparametern für α = 45 ° (links) und α = 90 ° (rechts) 77

4.20 Typischer Verlauf des Drehmoments beim Ausdrehen der Schrauben; links: am Beispiel der nicht vorgebohrten Schrauben, d8, rechts: Mittelkurven der verschiedenen Schrauben-Faser Winkel . 78

4.21 Gemessene Abweichungen für d8 und d10 Schrauben bei unterschiedlichen Vorbohrtiefen l_{vb} 80

4.22 Seitenansicht der Schraubenverläufe d8 in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkels; nicht vorgebohrt 82

5.1 Darstellung des numerischen Stabmodells zur Abbildung des Einschraubprozesses in Rhino/Grasshopper 86

5.2 Prinzipskizze zur Erläuterung der resultierenden Ablenkung am Stabende des Modells 87

5.3 Ablaufdiagramm der implementierten Schleifen (Loops) im Modell zur Durchführung einer Berechnung 89

5.4 Vereinfachte zweidimensionale Darstellung der Funktionsweise der schrittweisen Verformungsberechnung 90

5.5 Qualitative Beurteilung der Funktionsweise des Modells anhand der Verläufe für unterschiedliche Schrauben-Faser Winkel 93

5.6 Vergleich der Abweichungen der experimentellen Ergebnisse (d8, nicht vorgebohrt) mit den Berechnungen des Modells nach zwei Ansätzen 94

5.7 Vergleich der Abweichungen der experimentellen Ergebnisse mit den Berechnungen des Modells nach Festsetzung der Federsteifigkeiten c_1 und c_2 für Schraubendurchmesser d8 und d10 96

5.8 Vergleich der Abweichungen der experimentellen Ergebnisse mit den Berechnungen des Modells mit unterschiedlichen Federsteifigkeiten c_{vb} 97

5.9 Anwendung des entwickelten Modells mit einer Wiederholung von n=16 zur Abbildung der Streuung der Austrittspositionen. 98

5.10 Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses der Einbindelänge l_{eff} auf die resultierenden Abweichungen; Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d8 99

5.11 Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses der Einbindelänge l_{eff} auf die resultierenden Abweichungen; Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d10 100

5.12 Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses initialer Vorbohrungen auf die resultierenden Abweichungen; Einbindelänge $l_{eff} = 55\,cm$, Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d8 101

5.13 Anwendung des Modells zur Bestimmung des Einflusses initialer Vorbohrungen auf die resultierenden Abweichungen; Einbindelänge $l_{eff} = 55\,cm$, Länge der Schraube $l_S = 60\,cm$, Schraubendurchmesser d10 101

6.1 Vergleich der charakteristischen Last-Verformungskurven der beiden Versagensarten: Verbundversagen und Stahlversagen 106

6.2 Versuchsaufbau zur Durchführung der Ausziehversuche, links: Schematische Zeichnung; rechts: Foto 108

6.3 Umfang der Versuchsreihe zum Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben mit pyrolytischer Vorbohrung im Vergleich zu nicht vorgebohrten Schrauben 111

6.4 Vergleich der Last-Verformungskurven der nicht vorgebohrten und pyrolytisch vorgebohrten Schrauben (d8) getrennt nach Schrauben-Faser Winkel 113

6.5 Vergleich der Last-Verformungskurven der nicht vorgebohrten und pyrolytisch vorgebohrten Schrauben (d10) getrennt nach Schrauben-Faser Winkel 114

6.6 Zusammenfassung der Ausziehtragfähigkeiten F_{ax} für nicht vorgebohrte und pyrolytisch vorgebohrte Schrauben in Abhängigkeit des Schrauben-Faser Winkels α für 8 mm- und 10 mm Schrauben . . . 115

6.7 Korrelation des gemessenen maximalen Drehmoments M_{max} mit der Ausziehtragfähigkeit F_{ax} für pyrolytisch vorgebohrte Schrauben; d8 und d10 118

6.8 Korrelation des integrierten Fläche des Drehmoments A_m mit der Ausziehtragfähigkeit F_{ax} für pyrolytisch vorgebohrte Schrauben; d8 und d10 118

6.9 Diagramme der Drehmomente und Schnittflächen der jeweiligen Probekörper für die Ausziehversuche mit Stahlversagen 119

A.1 Sortierkriterien für Bretter und Bohlen nach DIN 4074-1 140

A.2 Sortierkriterien für Latten nach DIN 4074-1 141

A.3 Sortierkriterien für Latten nach DIN 4074-1 142

A.4 Produktdatenblatt der verwendeten Schrauben, d8 144

A.5 Produktdatenblatt der verwendeten Schrauben, d8 145

B.1 Seitenansicht der Bohrverläufe in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels; $d_B = 8\,mm$ 149

B.2 Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 0mm$ (nicht vorgebohrt) 151

B.3 Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 75mm$ 152

B.4 Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 150mm$ (nicht vorgebohrt) 153

B.5 Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 225mm$ 154

B.6 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$ 157

B.7 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 158

B.8 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 75mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$ 159

B.9 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 75mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 160

B.10 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 150mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$ 161

B.11 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 150mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 162

B.12 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 163

B.13 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 164

B.14 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$ 165

B.15 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 166

B.16 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt l_{vb} = $75mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$ 167

B.17 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt l_{vb} = $75mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 168

B.18 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt l_{vb} = $150mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$ 169

B.19 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt l_{vb} = $150mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 170

B.20 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt l_{vb} = $225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 171

B.21 Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt l_{vb} = $225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven 172

B.22 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 0°$ 175

B.23 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 15°$ 176

B.24 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 30°$ 177

B.25 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 30°$ 178

B.26 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 45°$ 179

B.27 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 60°$ 180

B.28 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 60°$ 181

B.29 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 75°$ 182

B.30 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 90°$ 183

B.31 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 0°$ 184

B.32 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 15°$ 185

B.33 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 30\,^\circ$ 186
B.34 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 45\,^\circ$ 187
B.35 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 60\,^\circ$ 188
B.36 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 75\,^\circ$ 189
B.37 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 90\,^\circ$ 190
B.38 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 0\,^\circ$ 191
B.39 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 15\,^\circ$ 192
B.40 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 30\,^\circ$ 193
B.41 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 45\,^\circ$ 194
B.42 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 60\,^\circ$ 195
B.43 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 75\,^\circ$ 196
B.44 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 90\,^\circ$ 197
B.45 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 0\,^\circ$ 198
B.46 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 15\,^\circ$ 199
B.47 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 30\,^\circ$ 200
B.48 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 45\,^\circ$ 201
B.49 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 60\,^\circ$ 202

B.50 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 75\,^\circ$ 203

B.51 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 90\,^\circ$ 204

B.52 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 0\,^\circ$ 205

B.53 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 15\,^\circ$ 206

B.54 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 15\,^\circ$ 207

B.55 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 30\,^\circ$ 208

B.56 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 45\,^\circ$ 209

B.57 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 60\,^\circ$ 210

B.58 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 75\,^\circ$ 211

B.59 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 75\,^\circ$ 212

B.60 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 90\,^\circ$ 213

B.61 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 0\,^\circ$ 214

B.62 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 15\,^\circ$ 215

B.63 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 30\,^\circ$ 216

B.64 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 45\,^\circ$ 217

B.65 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 60\,^\circ$ 218

B.66 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 75\,^\circ$ 219

B.67 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 90\,°$ 220
B.68 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 0\,°$ 221
B.69 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 15\,°$ 222
B.70 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 30\,°$ 223
B.71 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 45\,°$ 224
B.72 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 60\,°$ 225
B.73 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 75\,°$ 226
B.74 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 90\,°$ 227
B.75 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 0\,°$ 228
B.76 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 15\,°$ 229
B.77 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 30\,°$ 230
B.78 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 45\,°$ 231
B.79 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 60\,°$ 232
B.80 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 75\,°$ 233
B.81 Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 90\,°$ 234
B.82 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 0\,°$, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 236
B.83 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 15\,°$, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 237

B.84 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, α = 30 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 238

B.85 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, α = 45 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 239

B.86 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, α = 60 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 240

B.87 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, α = 75 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 241

B.88 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, α = 90 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 242

B.89 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 0 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 243

B.90 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 15 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 244

B.91 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 30 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 245

B.92 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 45 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 246

B.93 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 60 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 247

B.94 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 75 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 248

B.95 Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, α = 90 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt 249

Tabellenverzeichnis

3.1 Wellenlängen der untersuchten Laser 42

3.2 Parameter des pyrolytischen Prozesses 46

3.3 Festgelegte Parametersets des QCW-Faserlasers für unterschiedliche Schraubendurchmesser und zur Anpassung an die unterschiedlichen Abtragsmechanismen je nach Laser-Faser Winkel 51

4.1 Verwendete Parameter der pyrolytischen Vorbohrungen aus Abbildung 4.19 77

4.2 Reduzierung der gemessenen Abweichungen 81

Anhang A

Grundlagen

A.1 Sortierkriterien nach DIN 4074

Tabelle 3 — Sortierkriterien für Bretter und Bohlen bei der visuellen Sortierung (vorwiegend hochkant biegebeanspruchte Bretter und Bohlen sind wie Kantholz zu sortieren)

Sortiermerkmale	Sortierklassen		
	S 7	S 10	S 13
1. Äste			
— Einzelast	bis 1/2	bis 1/3	bis 1/5
— Astansammlung	bis 2/3	bis 1/2	bis 1/3
— Schmalseitenast [a]	—	bis 2/3	bis 1/3
2. Faserneigung	bis 16 %	bis 12 %	bis 7 %
3. Markröhre	zulässig	zulässig	nicht zulässig
4. Jahrringbreite			
— im Allgemeinen	bis 6 mm	bis 6 mm	bis 4 mm
— bei Douglasie	bis 8 mm	bis 8 mm	bis 6 mm
5. Risse			
— Schwindrisse [b]	zulässig	zulässig	zulässig
— Blitzrisse Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Baumkante	bis 1/3	bis 1/3	bis 1/4
7. Krümmung [b]			
— Längskrümmung	bis 12 mm	bis 8 mm	bis 8 mm
— Verdrehung	2 mm / 25 mm Breite	1 mm / 25 mm Breite	1 mm / 25 mm Breite
— Querkrümmung	bis 1/20	bis 1/30	bis 1/50
8. Verfärbungen, Fäule			
— Bläue	zulässig	zulässig	zulässig
— nagelfeste braune und rote Streifen	bis 3/5	bis 2/5	bis 1/5
— Braunfäule Weißfäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Druckholz	bis 3/5	bis 2/5	bis 1/5
10. Insektenfraß durch Frischholz-insekten	Fraßgänge bis 2 mm Durchmesser: zulässig		
11. sonstige Merkmale	sind in Anlehnung an die übrigen Sortiermerkmale sinngemäß zu berücksichtigen		

[a] Dieses Sortiermerkmal gilt nicht für Bretter für Brettschichtholz.

[b] Diese Sortiermerkmale bleiben bei nicht trockensortierten Hölzern unberücksichtigt.

Abbildung A.1: Sortierkriterien für Bretter und Bohlen nach DIN 4074-1

Tabelle 4 — Sortierkriterien für Latten bei der visuellen Sortierung

Sortiermerkmale	Sortierklassen	
	S 10	S 13
1. Äste [a]		
— im Allgemeinen	bis 1/2	bis 1/3
— bei Kiefer	bis 2/5 [b]	bis 1/5
2. Faserneigung	bis 12 %	bis 7 %
3. Markröhre	nicht zulässig [c]	nicht zulässig
4. Jahrringbreite		
— im Allgemeinen	bis 6 mm	bis 6 mm
— bei Douglasie	bis 8 mm	bis 8 mm
5. Risse		
— Schwindrisse d	zulässig	zulässig
— Blitzrisse Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Baumkante	bis 1/3	bis 1/4
7. Krümmung d		
— Längskrümmung	bis 12 mm	bis 8 mm
— Verdrehung	1 mm / 25 mm Breite	1 mm / 25 mm Breite
8. Verfärbungen, Fäule		
— Bläue	zulässig	zulässig
— nagelfeste braune und rote Streifen	bis 3/5	bis 2/5
— Braunfäule Weißfäule	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Druckholz	bis 3/5	bis 2/5
10. Insektenfraß durch Frischholz-Insekten	Fraßgänge bis 2 mm Durchmesser: zulässig	
11. sonstige Merkmale	sind in Anlehnung an die übrigen Sortiermerkmale sinngemäß zu berücksichtigen	

[a] Kanten- und Schmalseitenäste, die von einer Schmalseite zur anderen durchlaufen, sind nicht zulässig. Bei Latten mit einem Querschnitt von 40 mm × 60 mm zulässig bis zu einer Ästigkeit auf der Schmalseite von 1/3. Generell nicht zulässig sind Äste, die von einer Schmalseite zur anderen durchlaufen und auf beiden Breitseiten in Erscheinung treten.

[b] Bei Latten mit einem Querschnitt von 40 mm × 60 mm bis 1/2 zulässig.

[c] Bei Fichte zulässig.

[d] Diese Sortiermerkmale bleiben bei nicht trockensortierten Hölzern unberücksichtigt.

Abbildung A.2: Sortierkriterien für Latten nach DIN 4074-1

Tabelle 2 — Sortierkriterien für Kanthölzer und vorwiegend hochkant (K) biegebeanspruchte Bretter und Bohlen bei der visuellen Sortierung

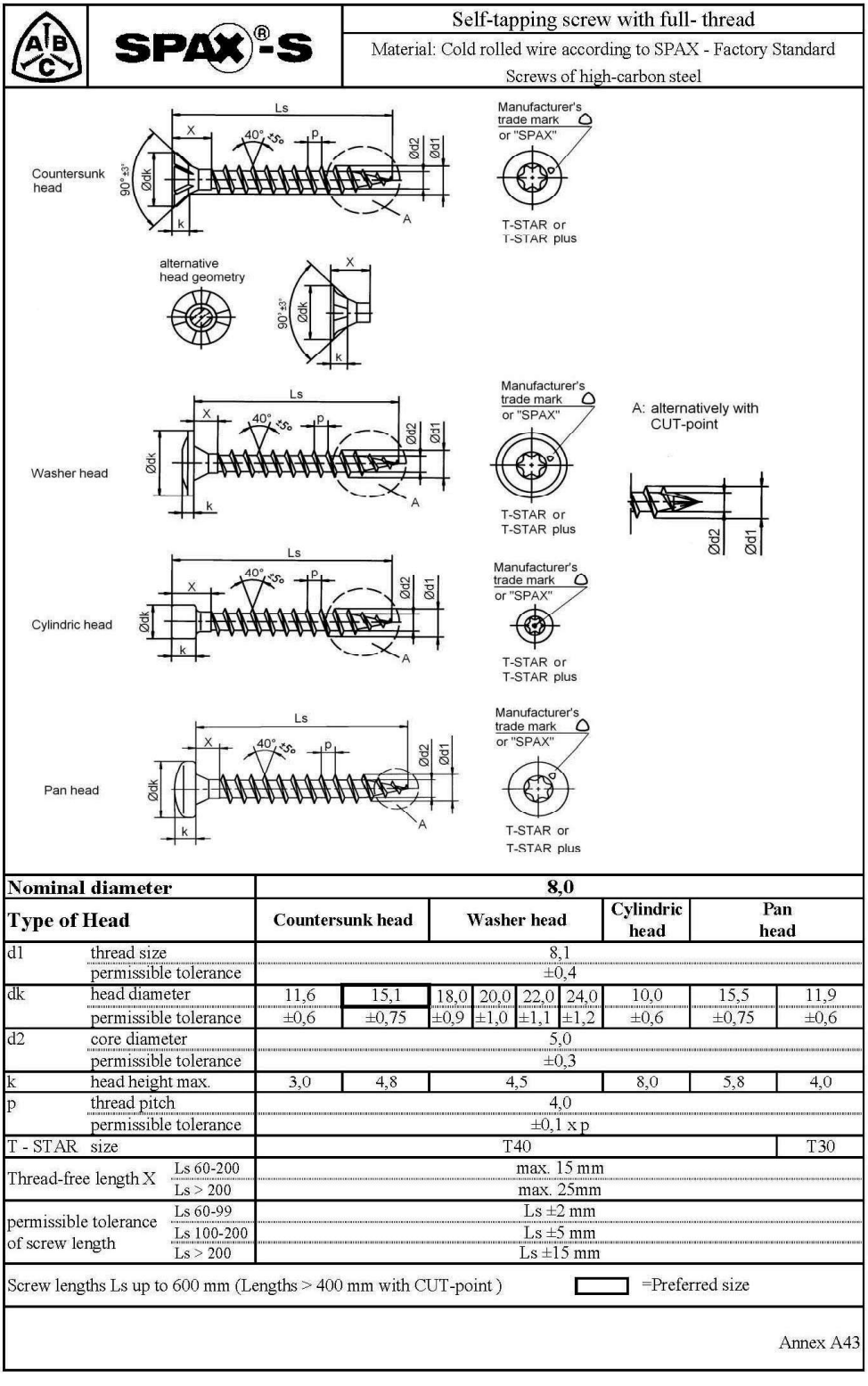
Sortiermerkmale	Sortierklasse		
	S 7, S 7K	S 10, S 10K	S 13, S 13K
1. Äste	bis 3/5	bis 2/5	bis 1/5
2. Faserneigung	bis 12 %	bis 12 %	bis 7 %
3. Markröhre	zulässig	zulässig	nicht zulässig [a]
4. Jahrringbreite			
— im Allgemeinen	bis 6 mm	bis 6 mm	bis 4 mm
— bei Douglasie	bis 8 mm	bis 8 mm	bis 6 mm
5. Risse			
— Schwindrisse [b]	bis 1/2	bis 1/2	bis 2/5
— Blitzrisse Ringschäle	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
6. Baumkante	bis 1/4	bis 1/4	bis 1/5
7. Krümmung [b]			
— Längskrümmung	bis 8 mm	bis 8 mm	bis 8 mm
— Verdrehung	1 mm / 25 mm Höhe	1 mm / 25 mm Höhe	1 mm / 25 mm Höhe
8. Verfärbungen, Fäule			
— Bläue	zulässig	zulässig	zulässig
— nagelfeste braune und rote Streifen	bis 2/5	bis 2/5	bis 1/5
— Braunfäule, Weißfäule	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
9. Druckholz	bis 2/5	bis 2/5	bis 1/5
10. Insektenfraß durch Frischholz-Insekten	Fraßgänge bis 2 mm Durchmesser: zulässig		
11. sonstige Merkmale	sind in Anlehnung an die übrigen Sortiermerkmale sinngemäß zu berücksichtigen		

[a] Bei Kantholz mit einer Breite > 120 mm zulässig.

[b] Diese Sortiermerkmale bleiben bei nicht trocken sortierten Hölzern unberücksichtigt.

Abbildung A.3: Sortierkriterien für Latten nach DIN 4074-1

A.2 Produktdatenblätter der verwendeten Vollgewindeschrauben



SPAX®-S

Self-tapping screw with full- thread

Material: Cold rolled wire according to SPAX - Factory Standard

Screws of high-carbon steel

Countersunk head

alternative head geometry

Washer head

Cylindric head

Pan head

Manufacturer's trade mark or "SPAX"

T-STAR or T-STAR plus

A: alternatively with CUT-point

Nominal diameter		8,0							
Type of Head		Countersunk head		Washer head				Cylindric head	Pan head	
d1	thread size	8,1								
	permissible tolerance	±0,4								
dk	head diameter	11,6	15,1	18,0	20,0	22,0	24,0	10,0	15,5	11,9
	permissible tolerance	±0,6	±0,75	±0,9	±1,0	±1,1	±1,2	±0,6	±0,75	±0,6
d2	core diameter	5,0								
	permissible tolerance	±0,3								
k	head height max.	3,0	4,8	4,5				8,0	5,8	4,0
p	thread pitch	4,0								
	permissible tolerance	±0,1 x p								
T - STAR	size	T40								T30
Thread-free length X	Ls 60-200	max. 15 mm								
	Ls > 200	max. 25mm								
permissible tolerance of screw length	Ls 60-99	Ls ±2 mm								
	Ls 100-200	Ls ±5 mm								
	Ls > 200	Ls ±15 mm								

Screw lengths Ls up to 600 mm (Lengths > 400 mm with CUT-point) =Preferred size

Annex A43

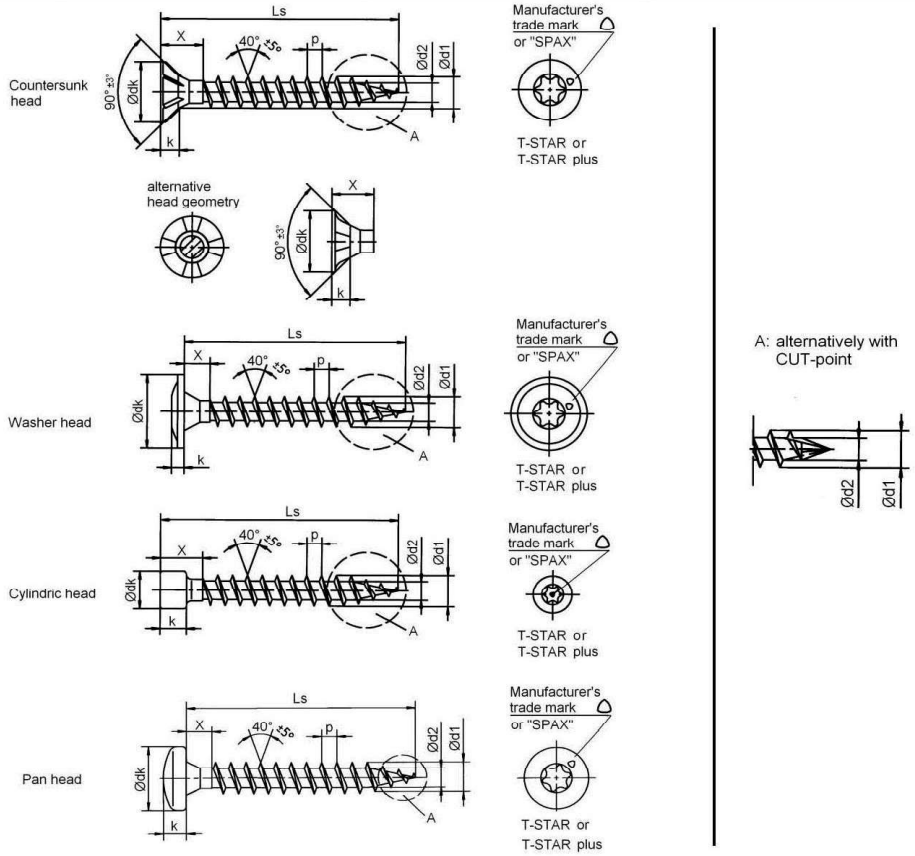
Abbildung A.4: Produktdatenblatt der verwendeten Schrauben, d8

SPAX®-S

Self-tapping screw with full- thread

Material: Cold rolled wire according to SPAX - Factory Standard

Screws of high-carbon steel



Nominal diameter		10,0						
Type of Head		Countersunk head		Washer head		Cylindric head	Pan head	
d1	thread size	10,0						
	permissible tolerance	±0,5						
dk	head diameter	15,1	18,6	20,0	25,0	12,0	19,0	15,5
	permissible tolerance	±0,75	±0,93	±1,0	±1,25	±0,6	±0,95	±0,75
d2	core diameter	6,1						
	permissible tolerance	±0,3						
k	head height max.	4,2	6,0	5,0	5,0	10,0	7,1	5,8
p	thread pitch	5,0						
	permissible tolerance	±0,1 x p						
T - STAR size		T50		T40		T50		T40
Thread-free length X	Ls 60-200	max. 15 mm						
	Ls > 200	max. 25 mm						
permissible tolerance of screw length	Ls 60-99	Ls ±2 mm						
	Ls 100-200	Ls ±5 mm						
	Ls > 200	Ls ±15 mm						

Screw lengths Ls to 800 mm possible — = Preferred size

Annex A44

Abbildung A.5: Produktdatenblatt der verwendeten Schrauben, d8

Anhang B

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

B.1 Verlaufen von Bohrern

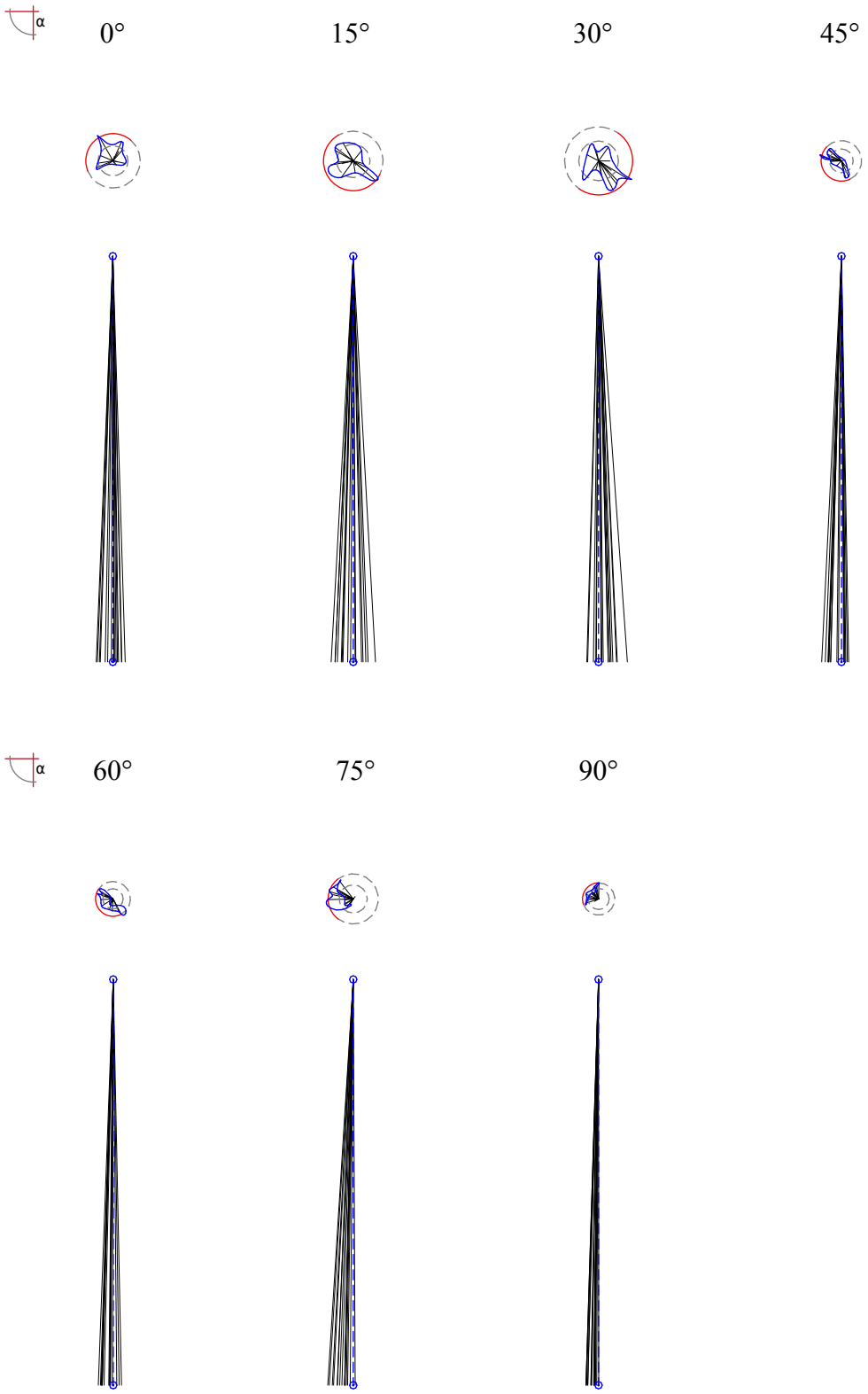
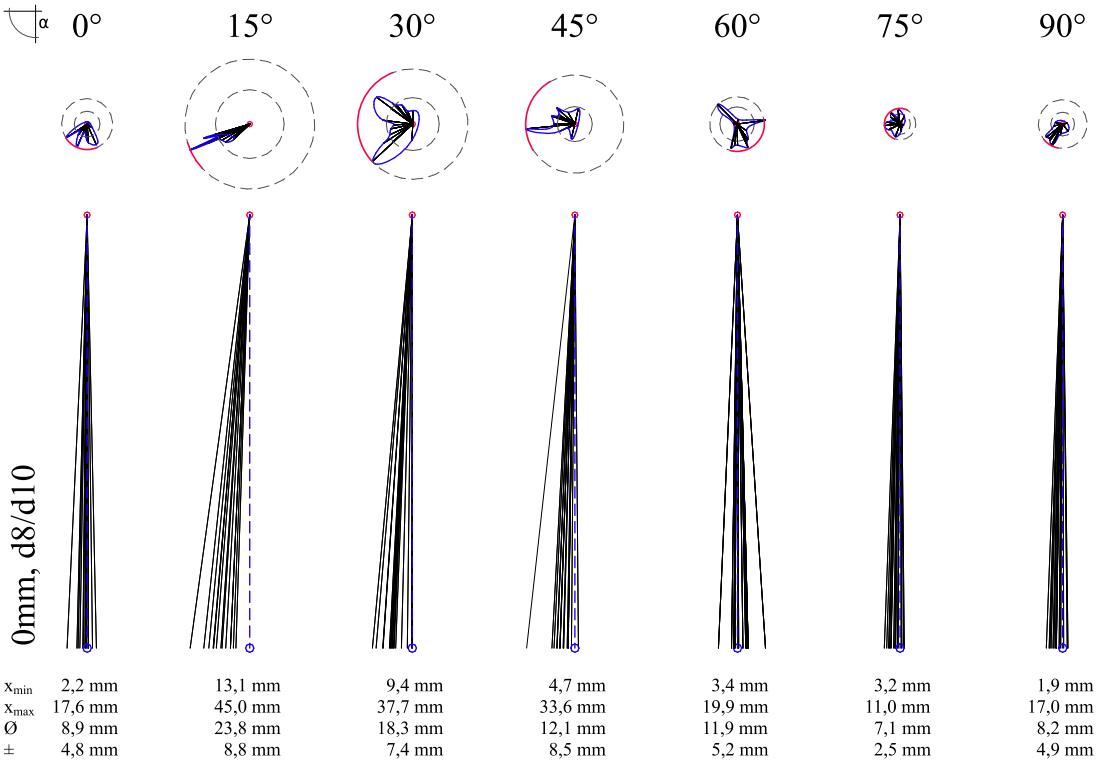


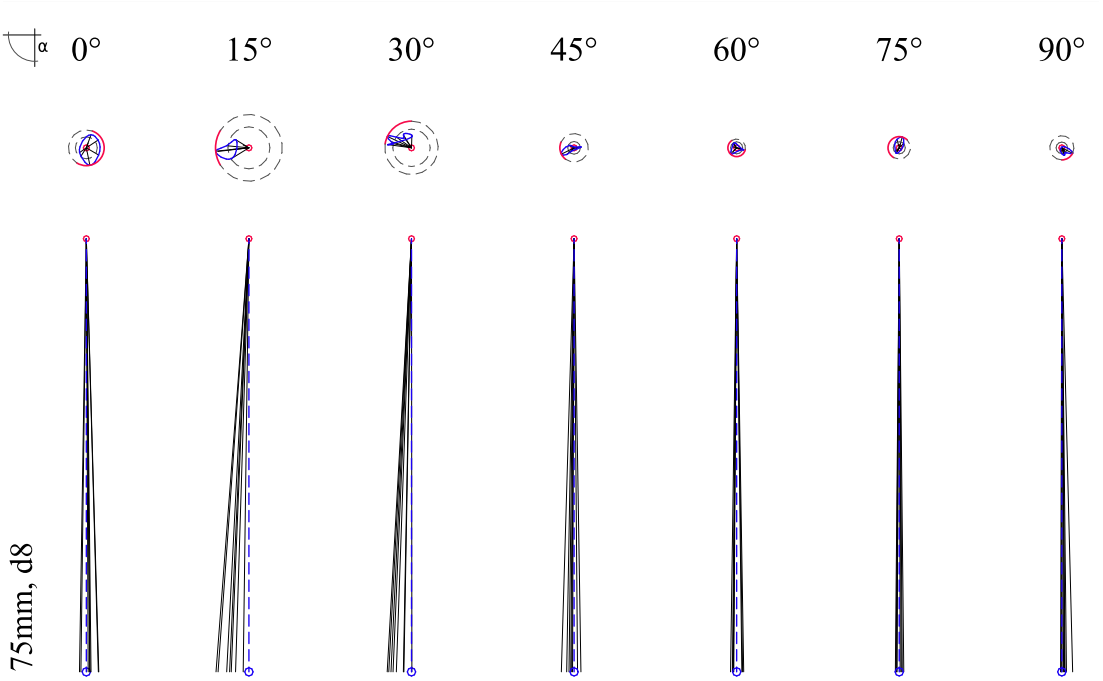
Abbildung B.1: Seitenansicht der Bohrverläufe in Abhängigkeit des Bohrer-Faser Winkels; $d_B = 8\,mm$

B.2 Verlaufen von Vollgewindeschrauben

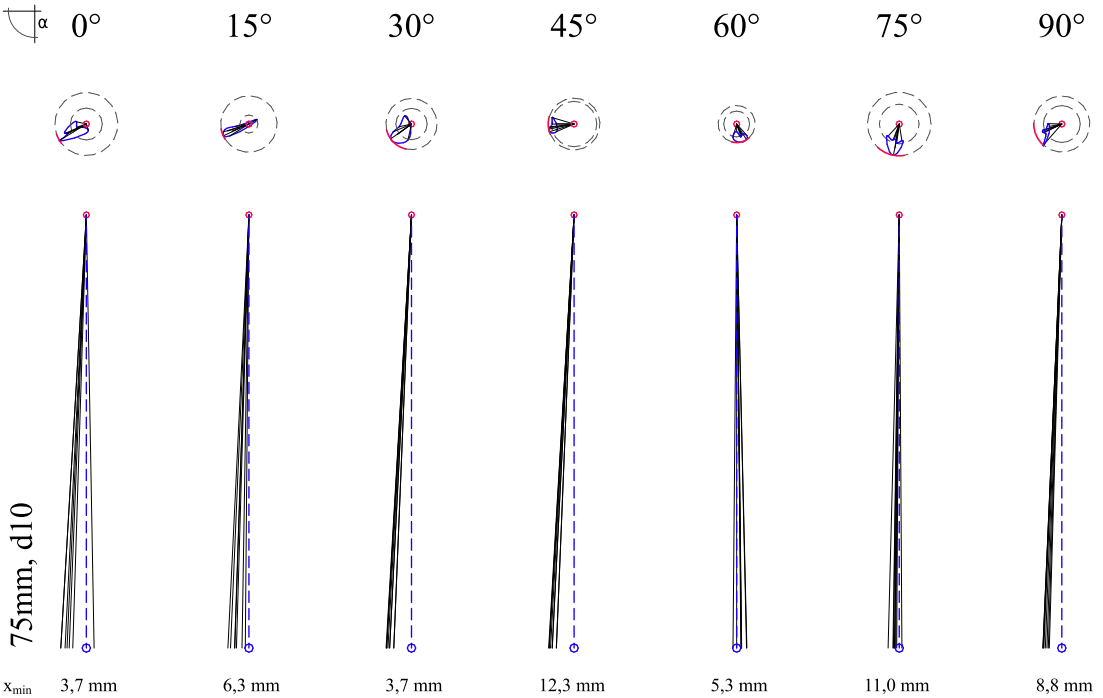


	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
x_{min}	2,2 mm	13,1 mm	9,4 mm	4,7 mm	3,4 mm	3,2 mm	1,9 mm
x_{max}	17,6 mm	45,0 mm	37,7 mm	33,6 mm	19,9 mm	11,0 mm	17,0 mm
Ø	8,9 mm	23,8 mm	18,3 mm	12,1 mm	11,9 mm	7,1 mm	8,2 mm
±	4,8 mm	8,8 mm	7,4 mm	8,5 mm	5,2 mm	2,5 mm	4,9 mm

Abbildung B.2: Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 0mm$ (nicht vorgebohrt)



	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
x_{min}	2,6 mm	4,5 mm	8,8 mm	1,4 mm	3,1 mm	1,9 mm	0,6 mm
x_{max}	12,4 mm	23,2 mm	18,6 mm	9,9 mm	6,1 mm	7,8 mm	8,4 mm
Ø	7,6 mm	14,6 mm	13,0 mm	4,4 mm	4,2 mm	4,2 mm	4,0 mm
±	3,2 mm	5,5 mm	3,2 mm	2,6 mm	0,9 mm	1,8 mm	2,3 mm



	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
x_{min}	3,7 mm	6,3 mm	3,7 mm	12,3 mm	5,3 mm	11,0 mm	8,8 mm
x_{max}	21,9 mm	19,6 mm	17,8 mm	18,0 mm	12,9 mm	22,1 mm	19,5 mm
Ø	11,1 mm	14,1 mm	10,9 mm	15,8 mm	9,0 mm	13,8 mm	12,8 mm
±	6,1 mm	4,5 mm	4,0 mm	2,0 mm	2,1 mm	3,6 mm	3,2 mm

Abbildung B.3: Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 75mm$

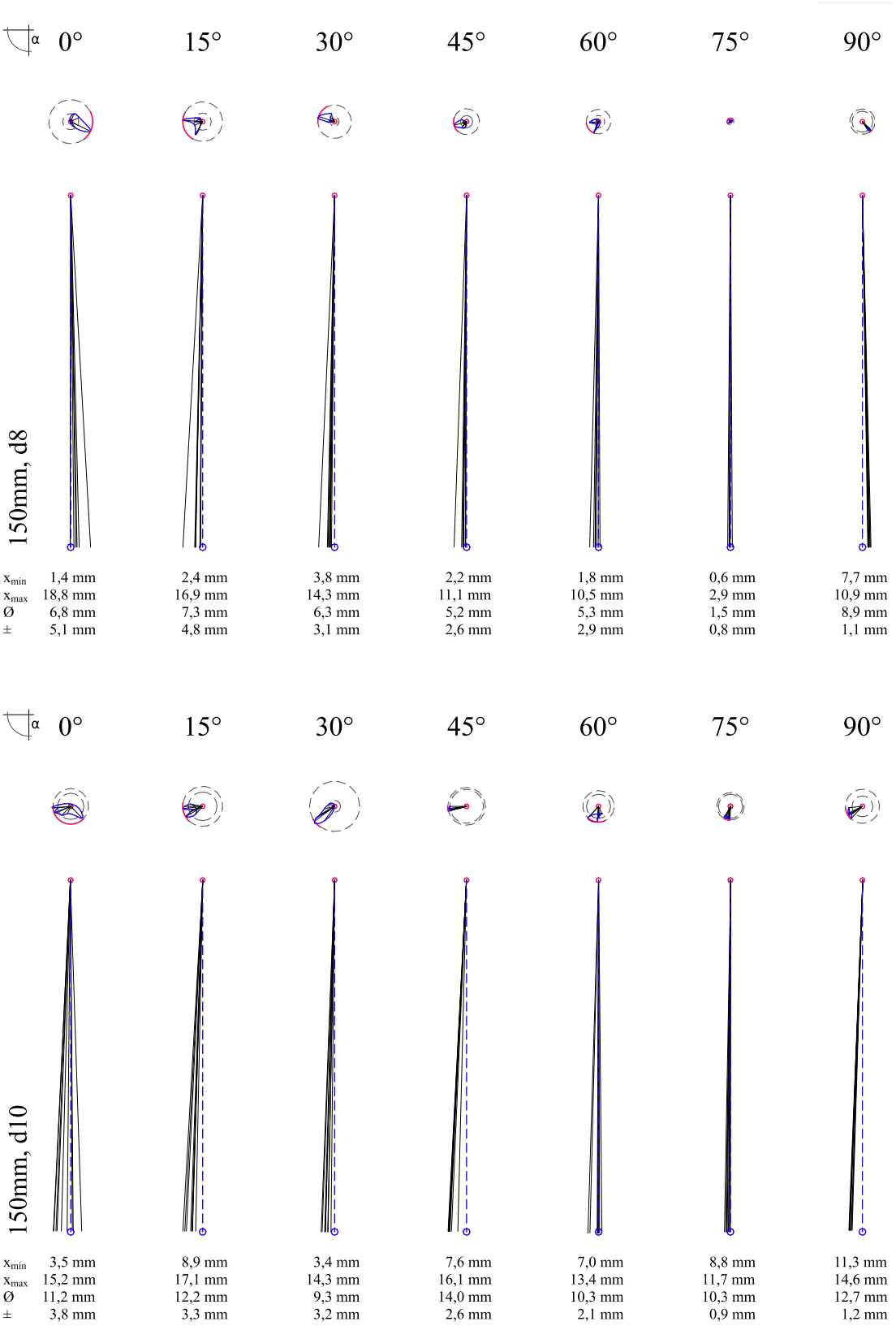
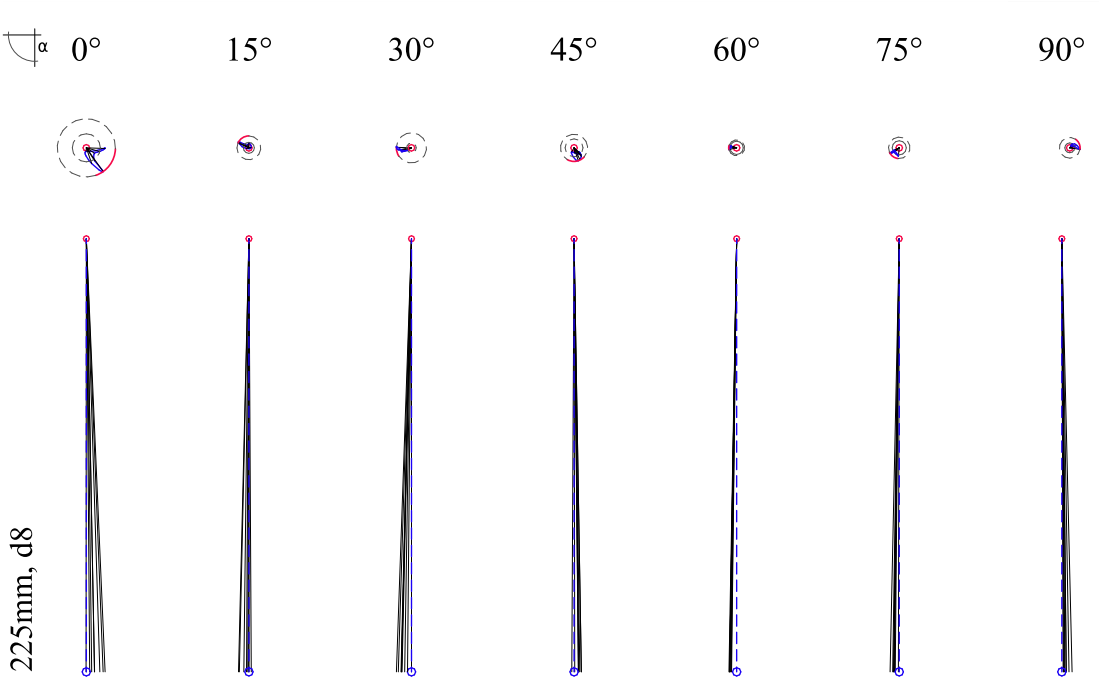
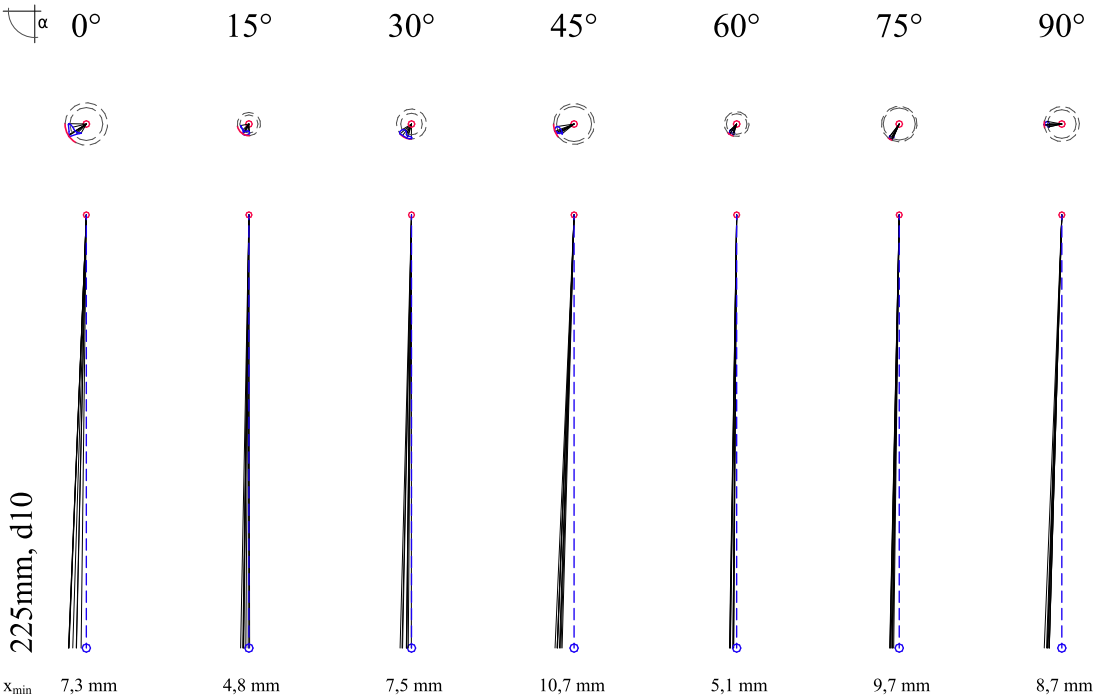


Abbildung B.4: Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 150mm$ (nicht vorgebohrt)



	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
x_{min}	2,5 mm	1,3 mm	3,3 mm	3,2 mm	3,5 mm	3,7 mm	1,4 mm
x_{max}	20,1 mm	8,2 mm	10,5 mm	9,4 mm	5,5 mm	7,4 mm	7,2 mm
Ø	9,7 mm	3,8 mm	7,2 mm	6,2 mm	4,6 mm	4,9 mm	3,4 mm
±	5,3 mm	2,5 mm	2,1 mm	2,3 mm	0,6 mm	1,2 mm	1,8 mm



	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
x_{min}	7,3 mm	4,8 mm	7,5 mm	10,7 mm	5,1 mm	9,7 mm	8,7 mm
x_{max}	14,7 mm	8,0 mm	10,5 mm	14,2 mm	8,6 mm	12,3 mm	12,2 mm
Ø	11,4 mm	6,3 mm	8,9 mm	12,1 mm	7,1 mm	11,1 mm	9,9 mm
±	2,7 mm	0,9 mm	1,1 mm	1,2 mm	1,1 mm	0,8 mm	1,1 mm

Abbildung B.5: Verlaufen der Vollgewindeschrauben $l_{vb} = 225mm$

B.3 Drehmomentverläufe aller Einschraubungen

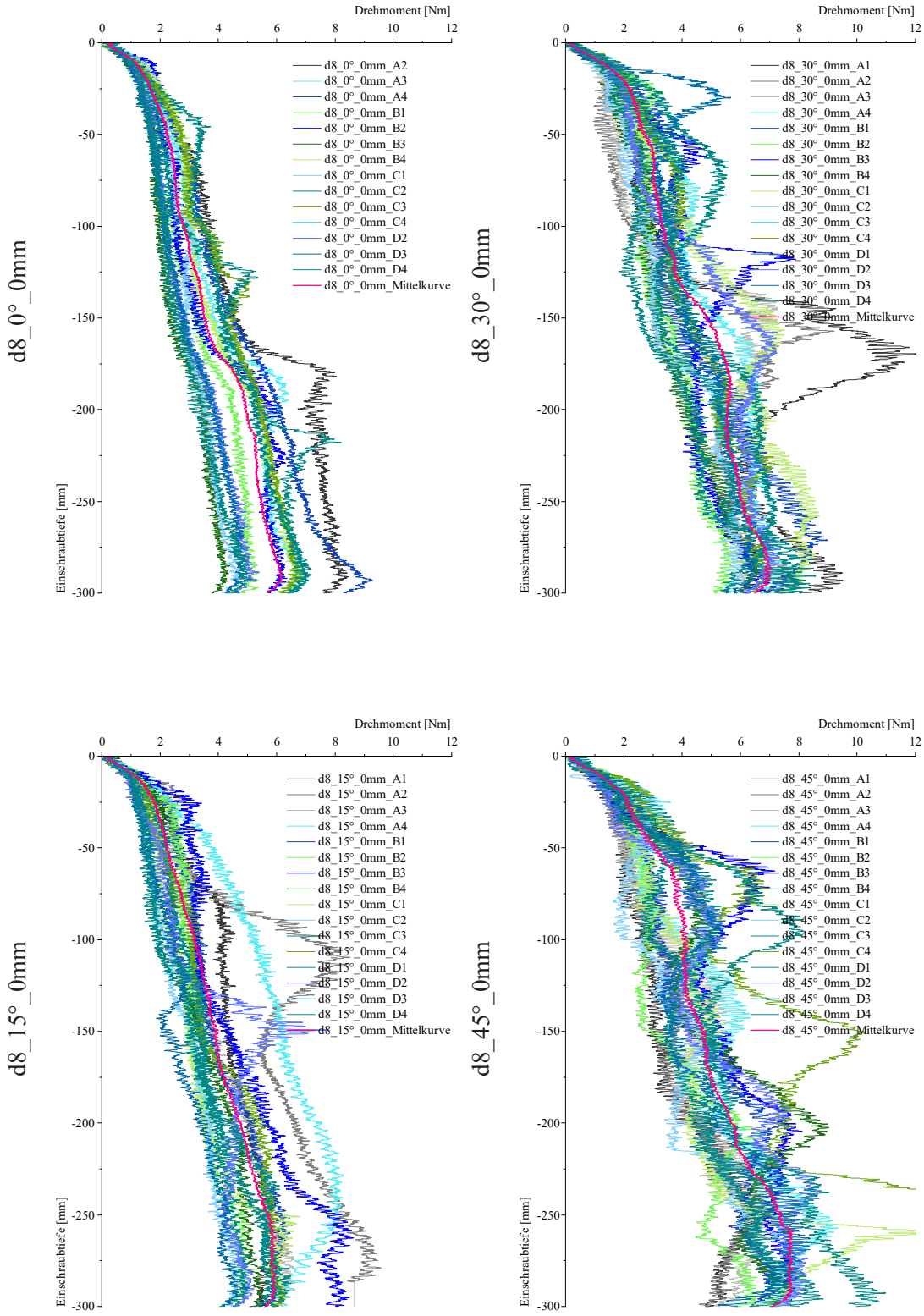


Abbildung B.6: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$

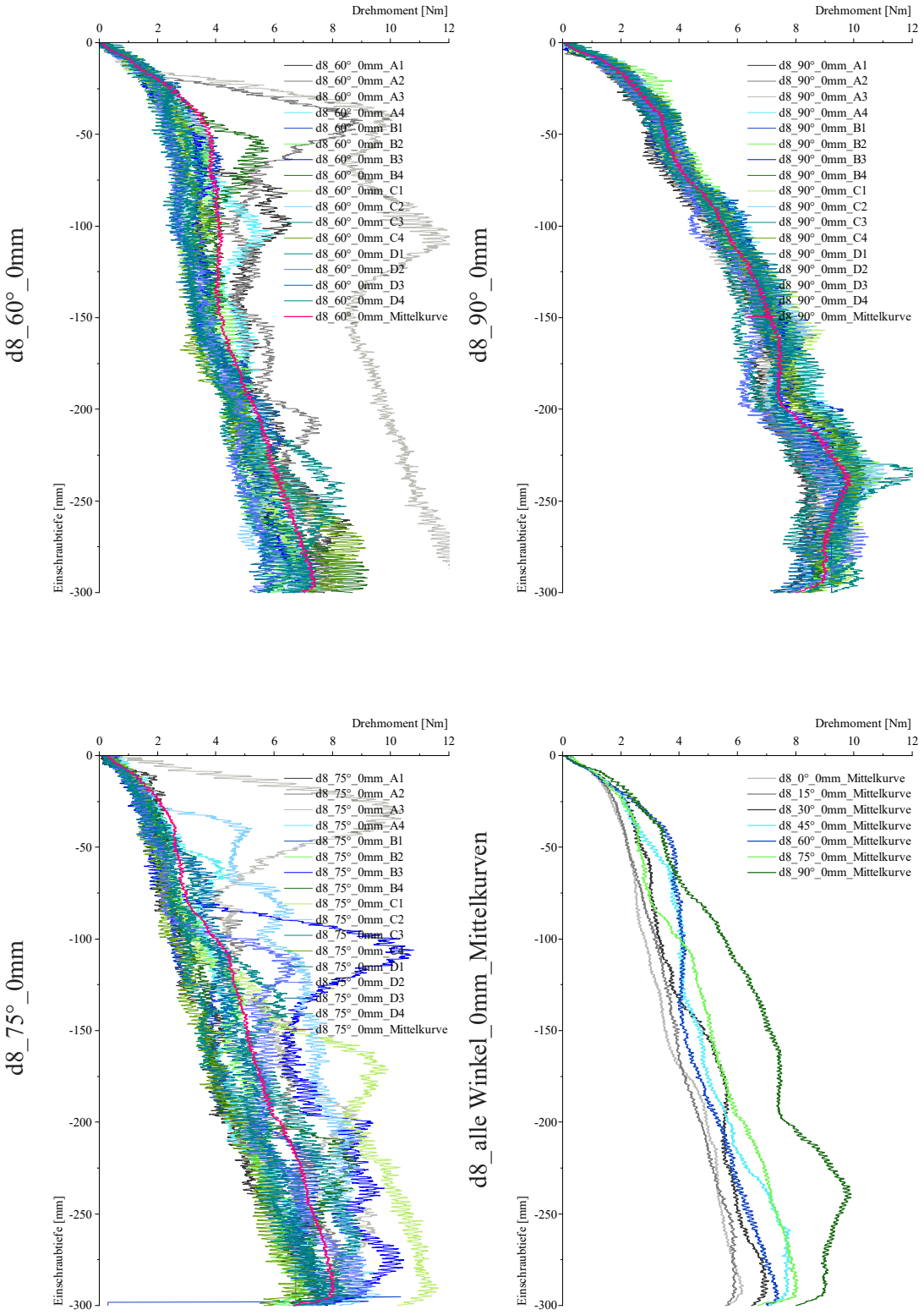


Abbildung B.7: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

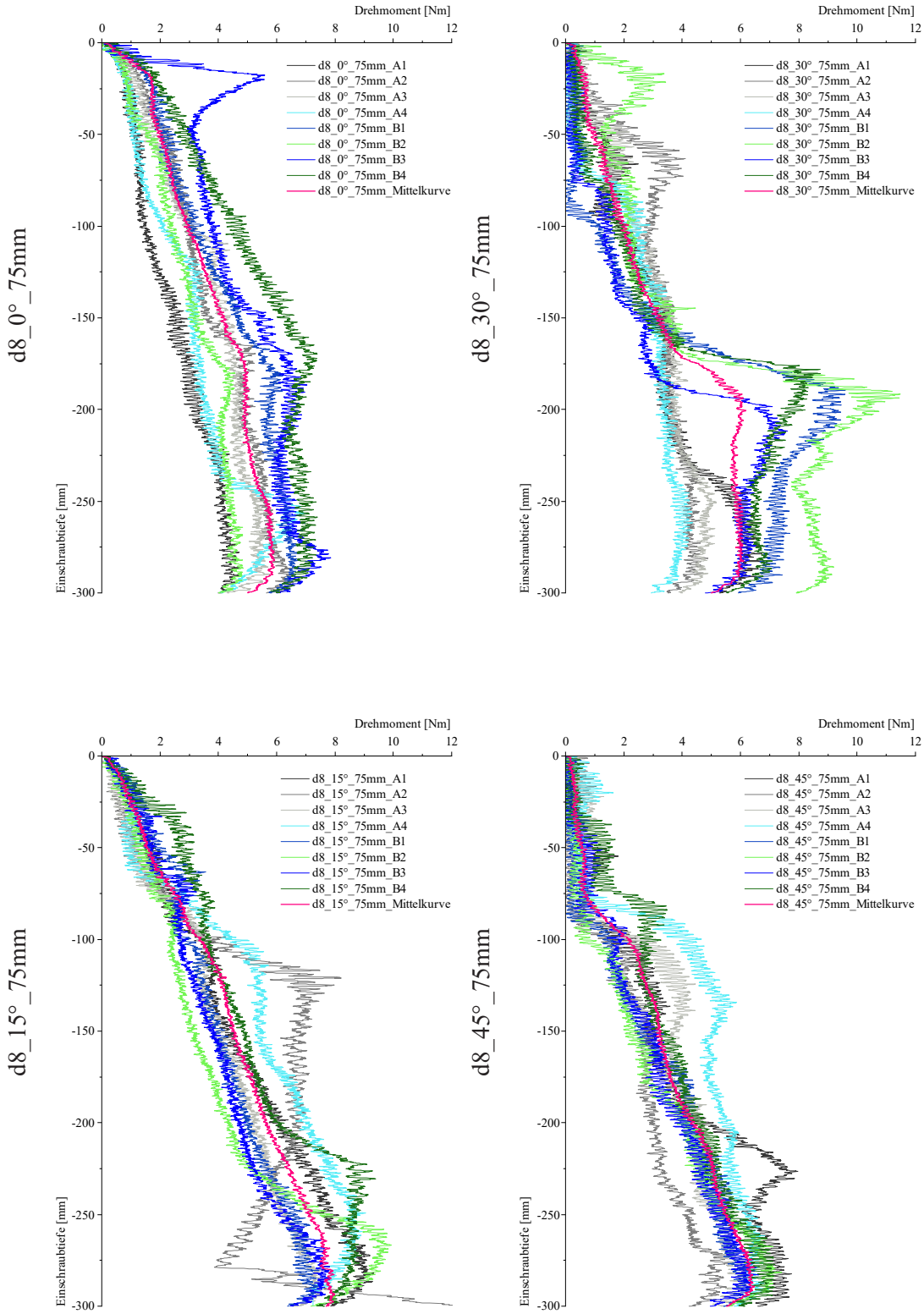


Abbildung B.8: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 75mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$

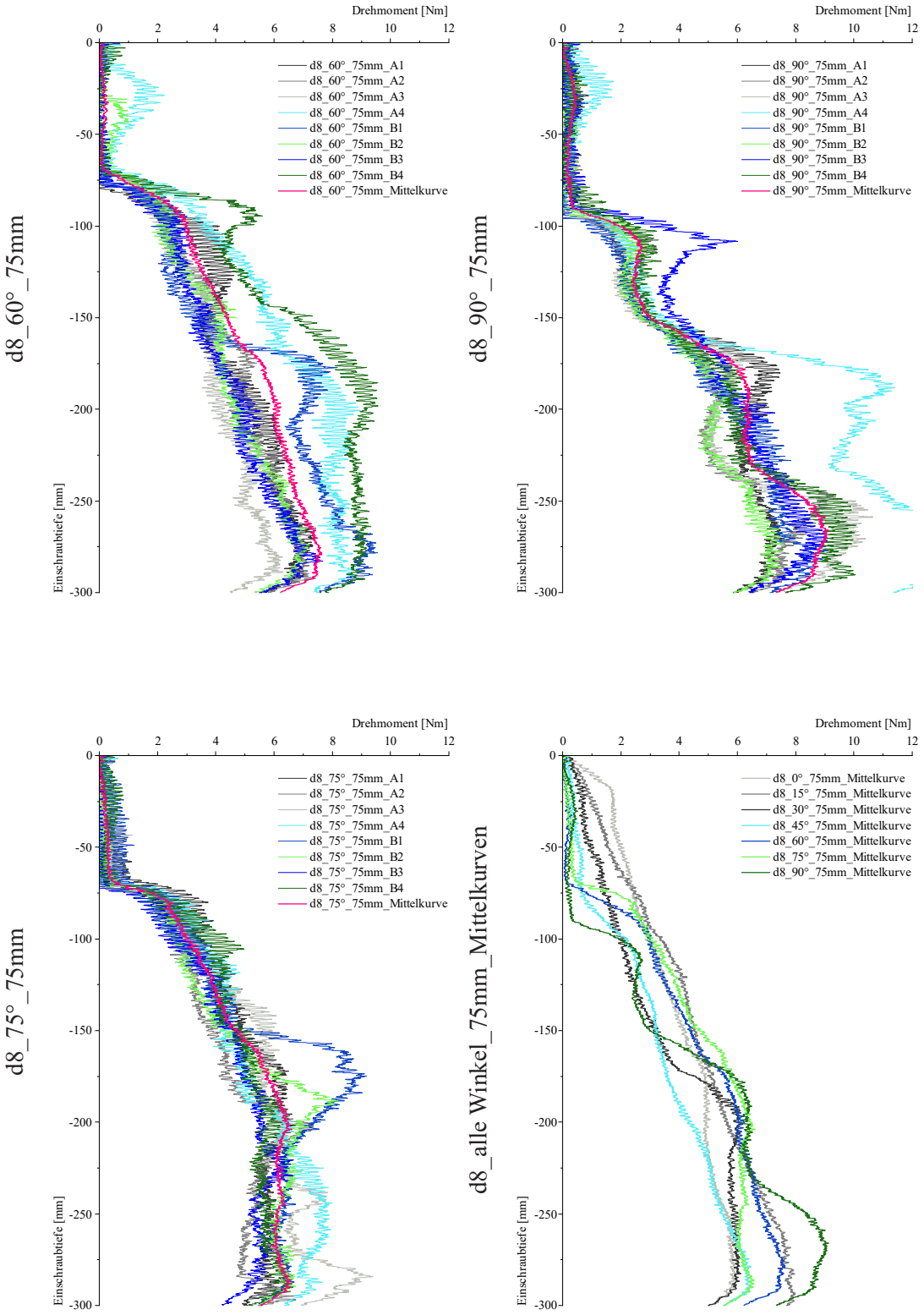


Abbildung B.9: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 75mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

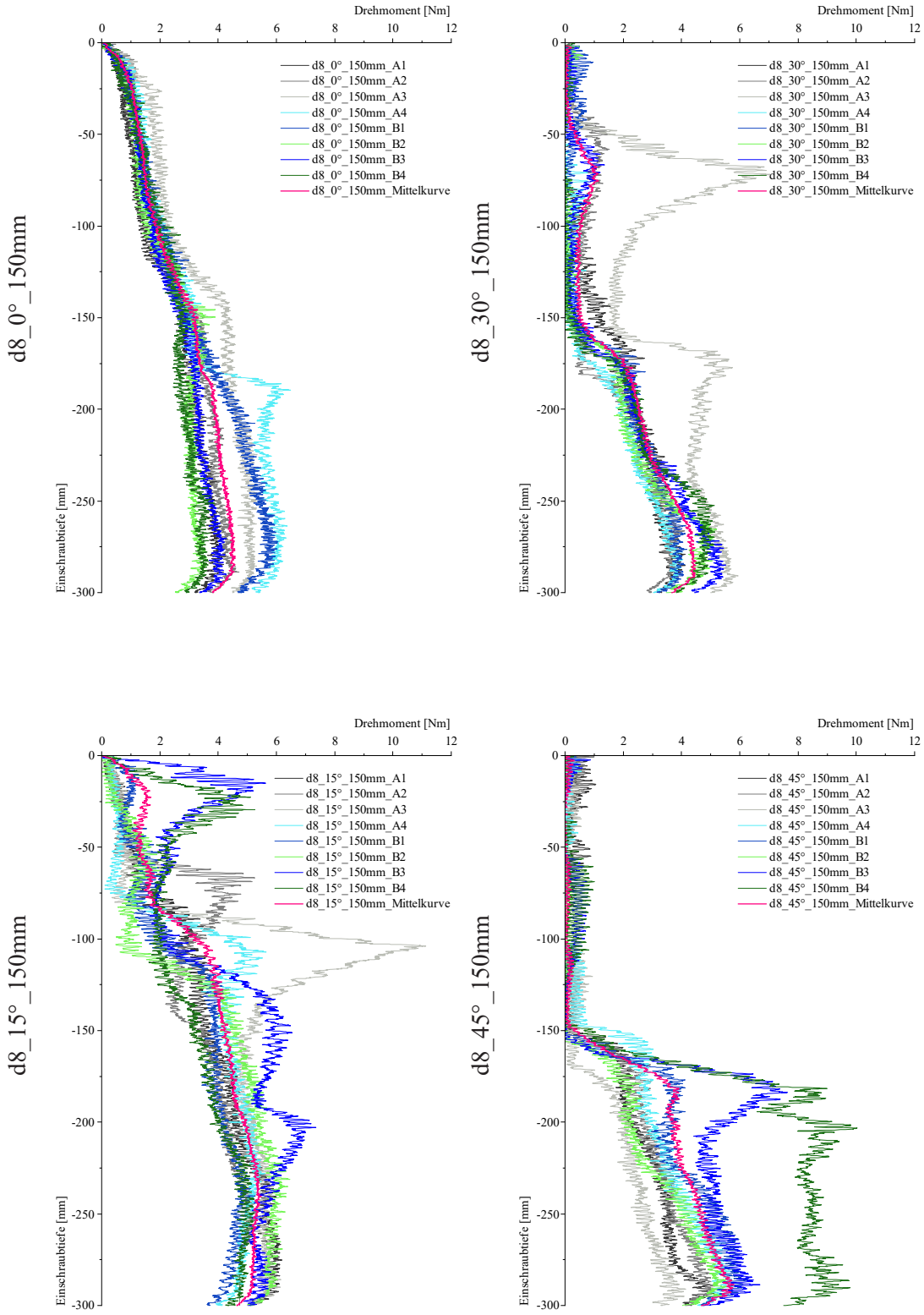


Abbildung B.10: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 150mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$

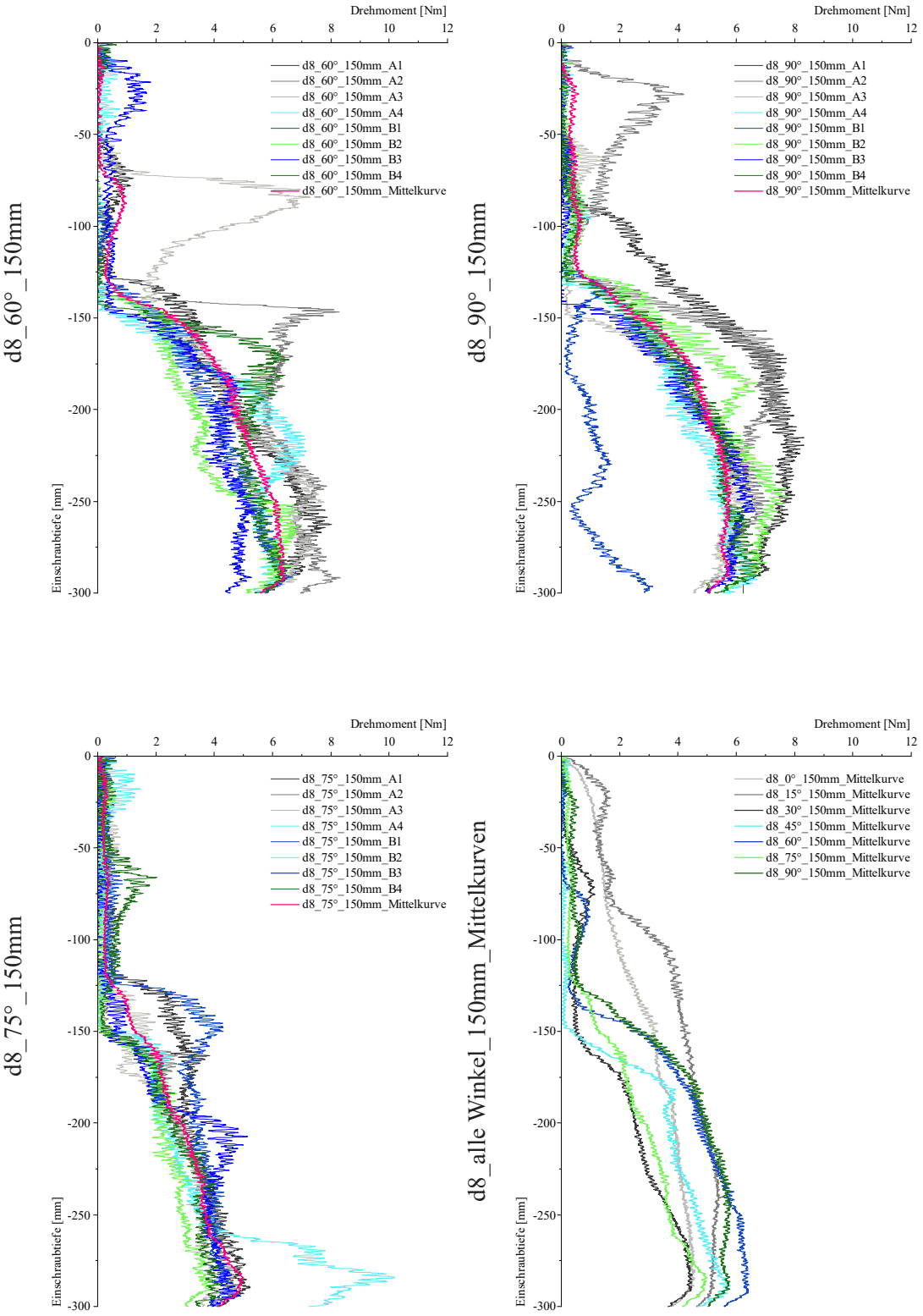


Abbildung B.11: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 150mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

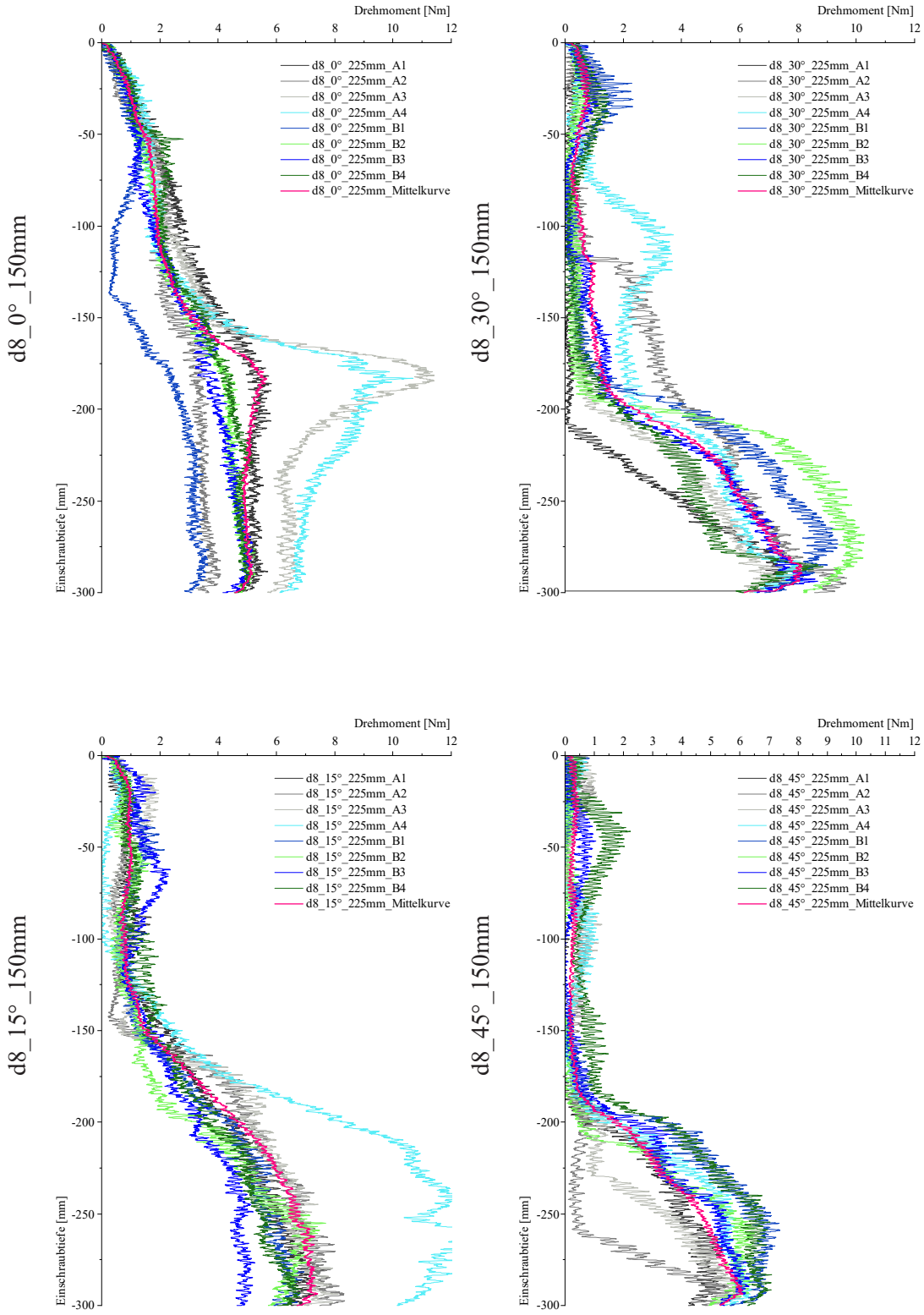


Abbildung B.12: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

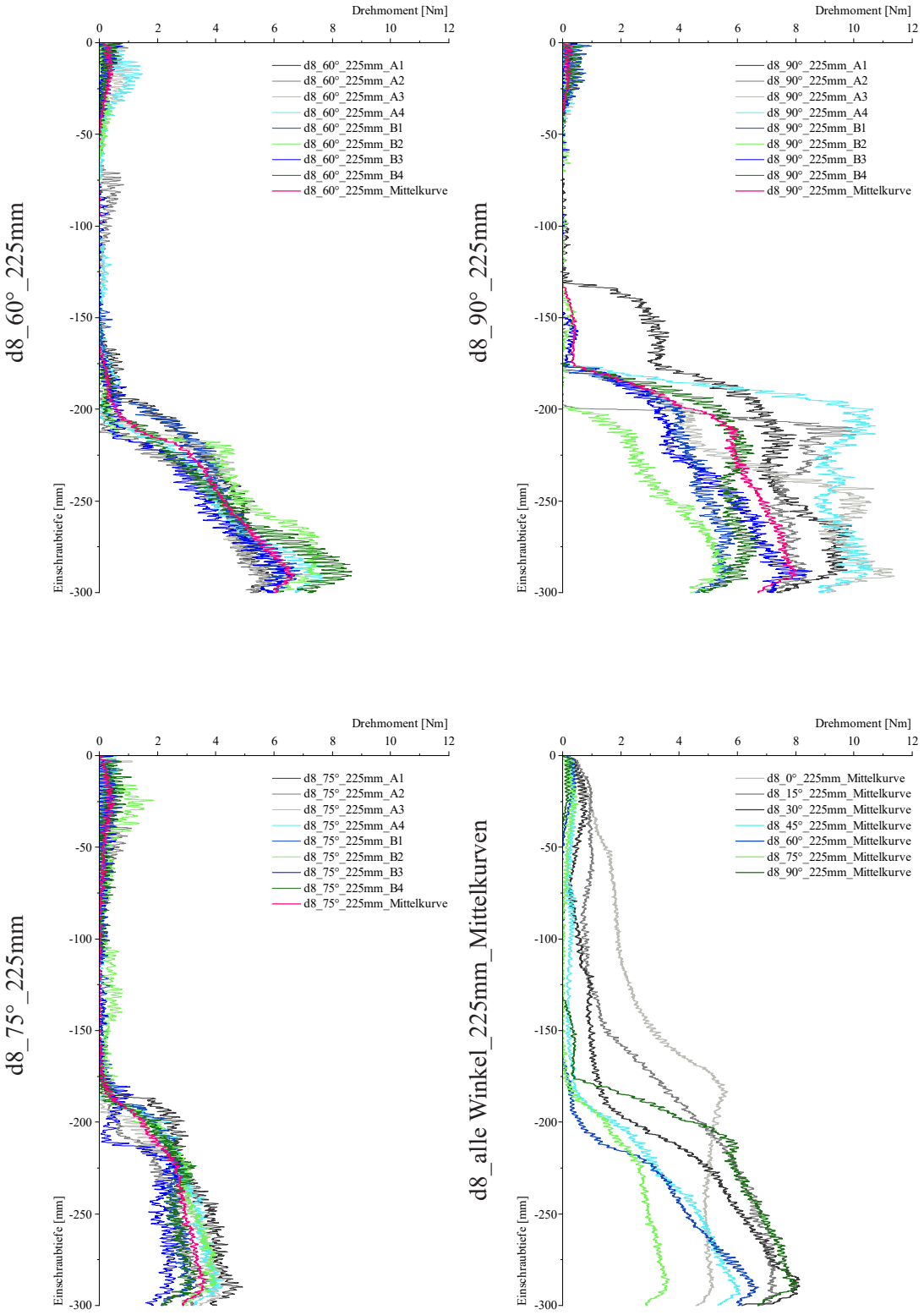


Abbildung B.13: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

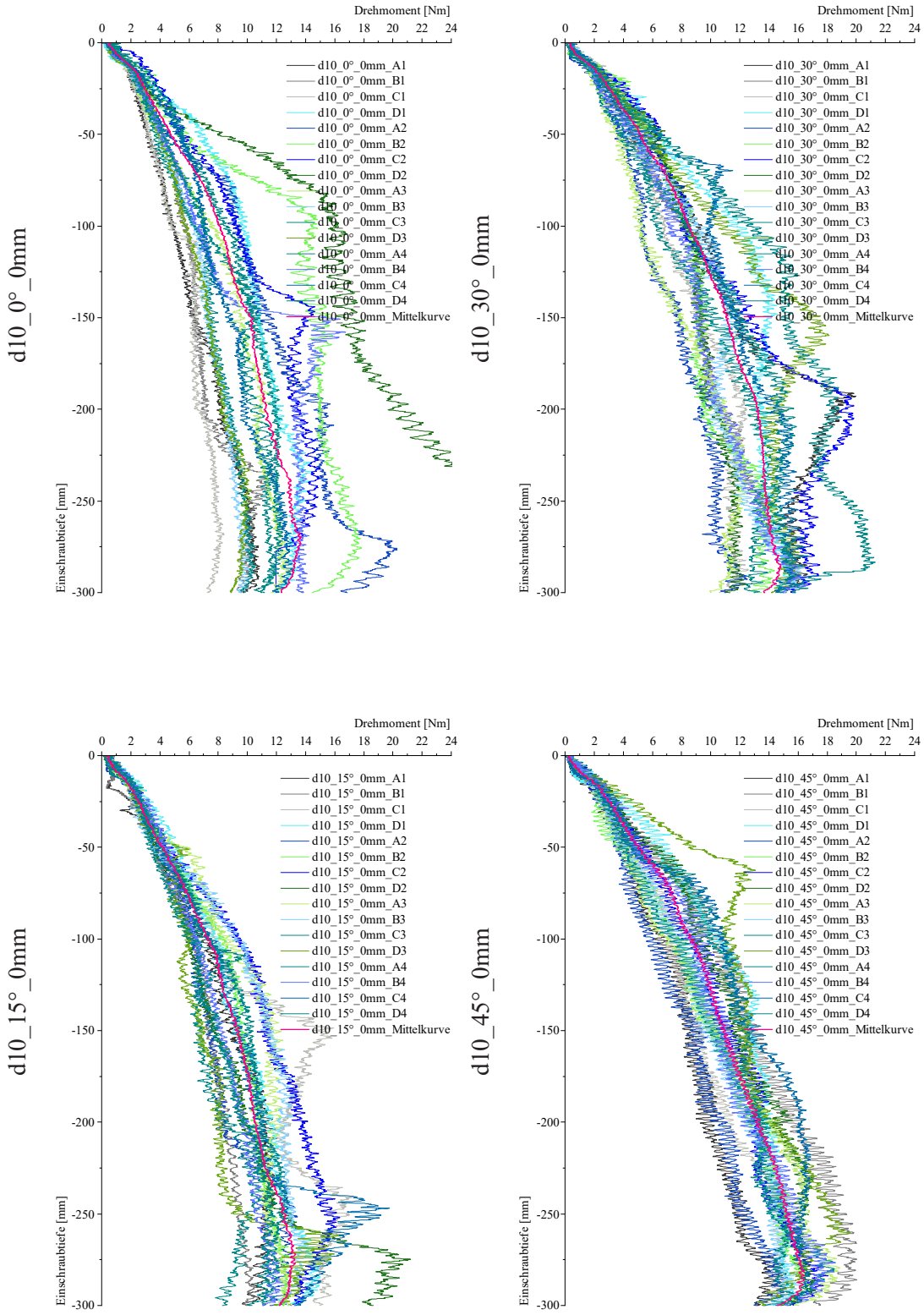


Abbildung B.14: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$

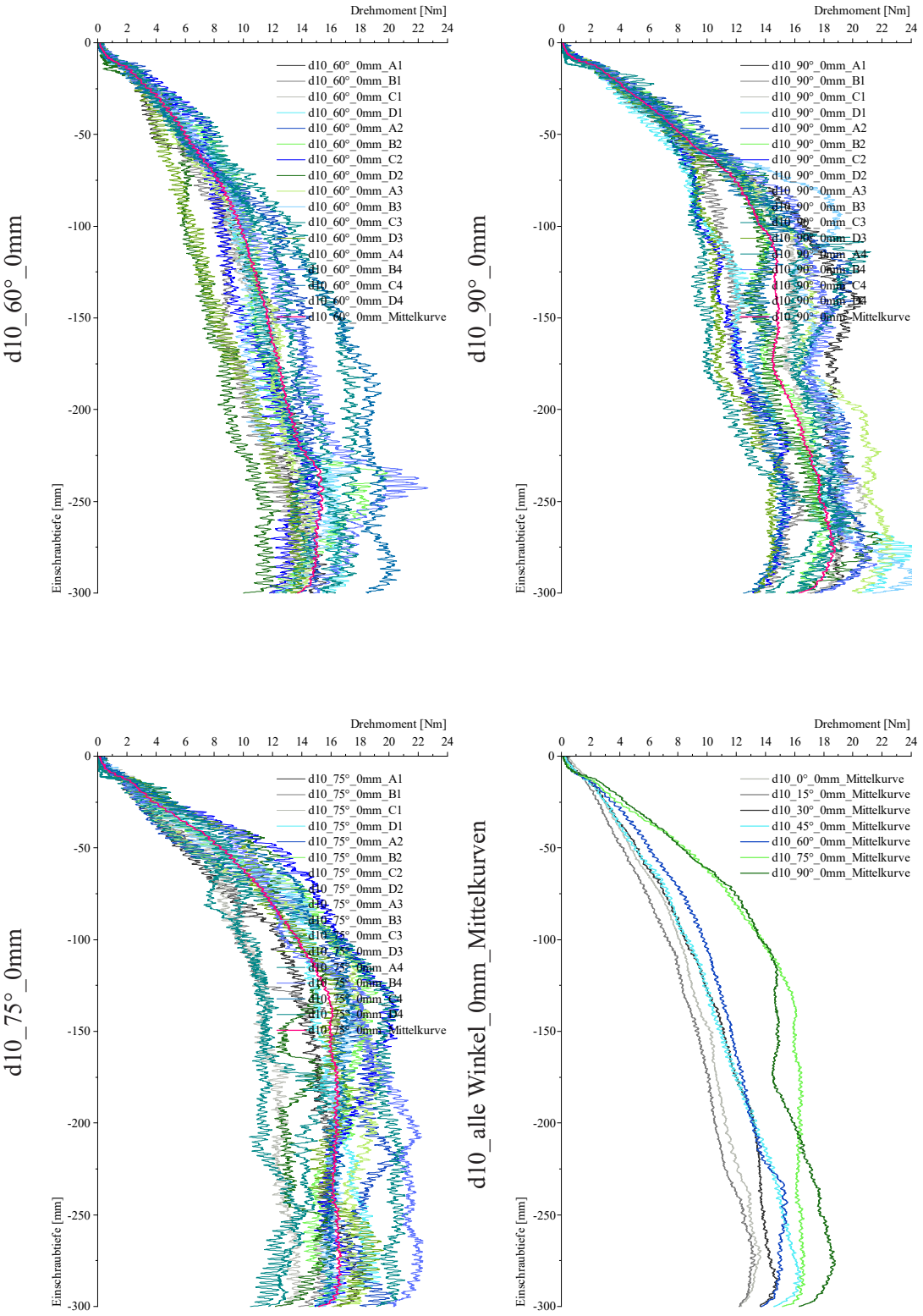


Abbildung B.15: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, nicht vorgebohrt $l_{vb} = 0mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

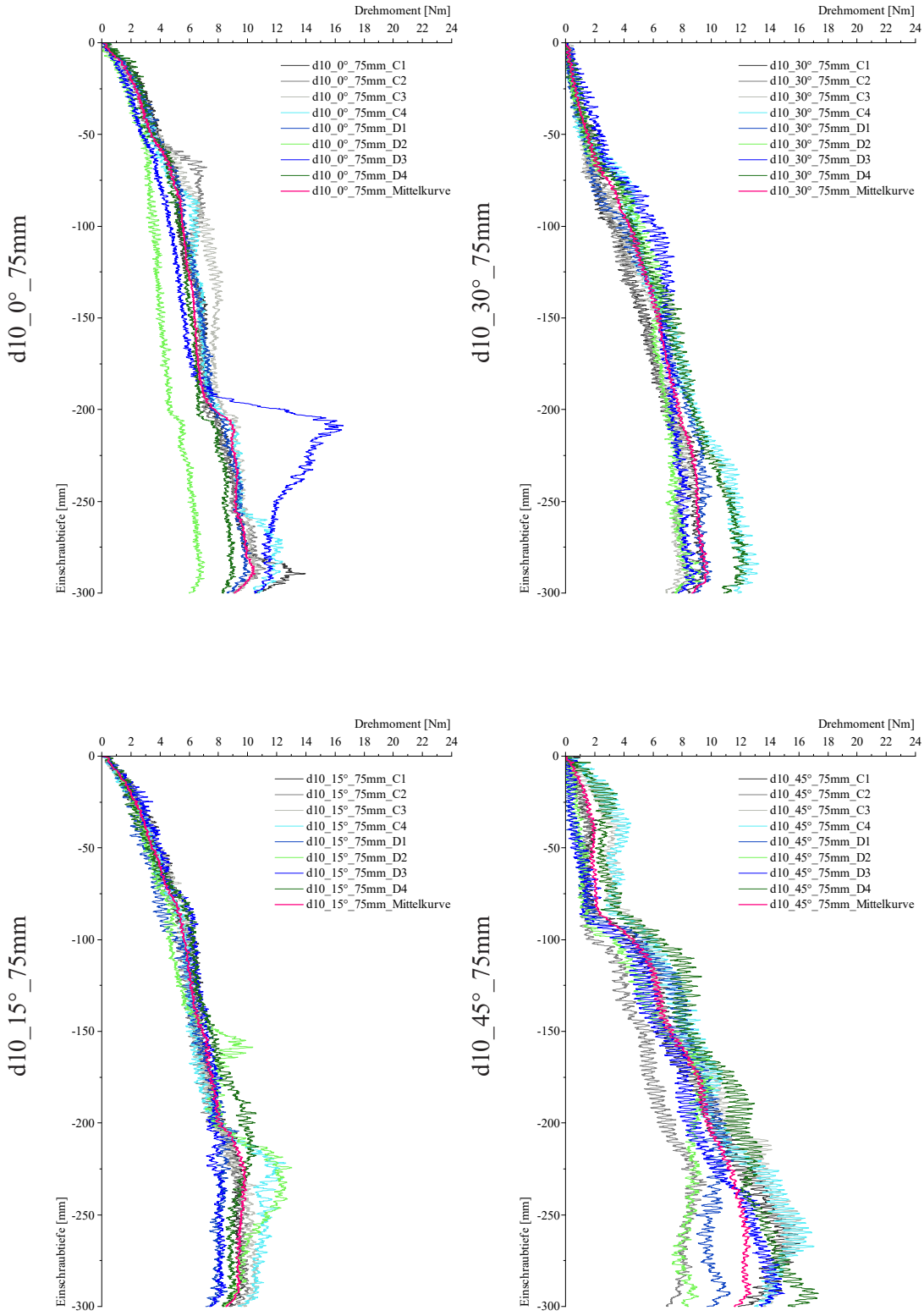


Abbildung B.16: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 75mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$

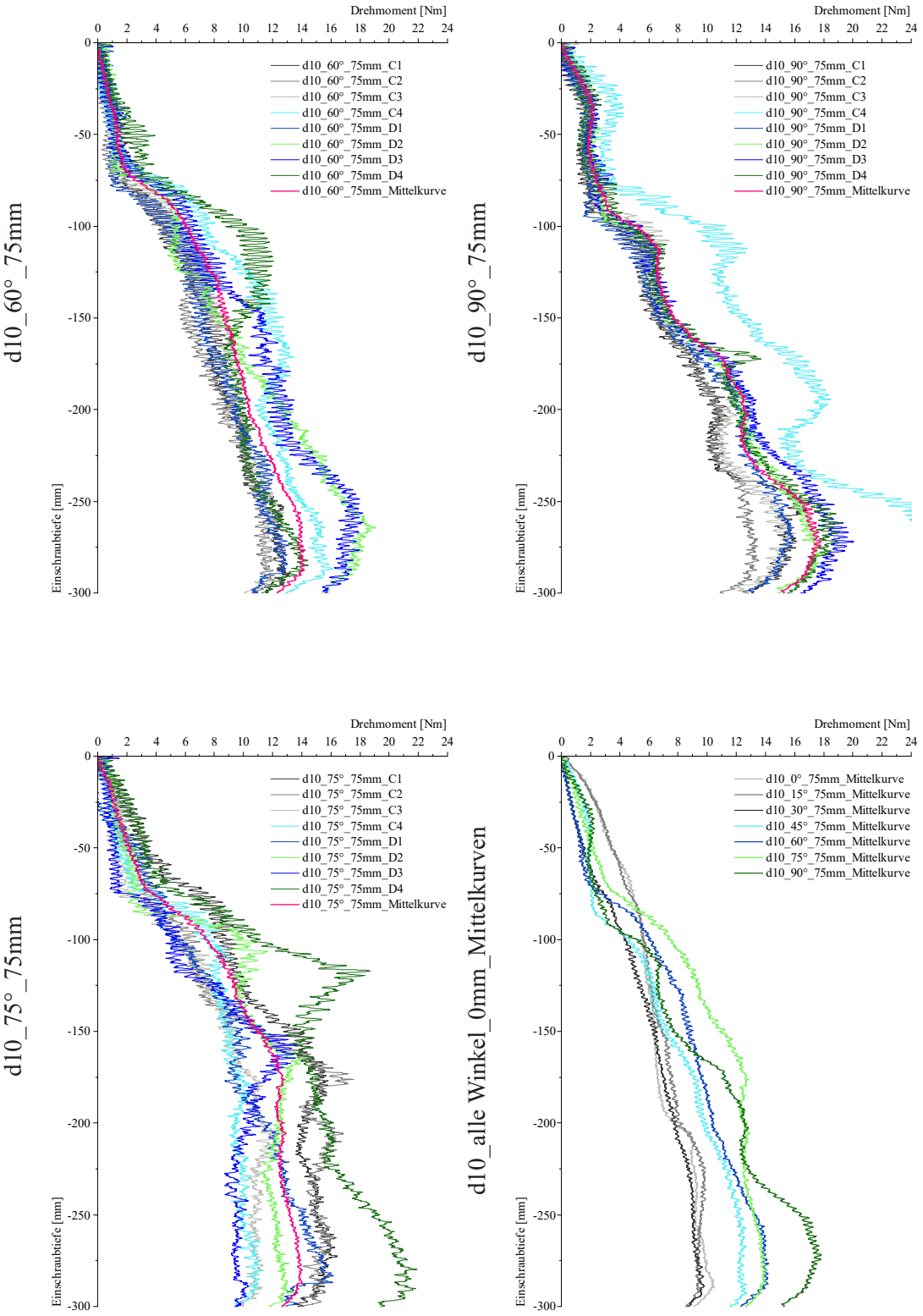


Abbildung B.17: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 75mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

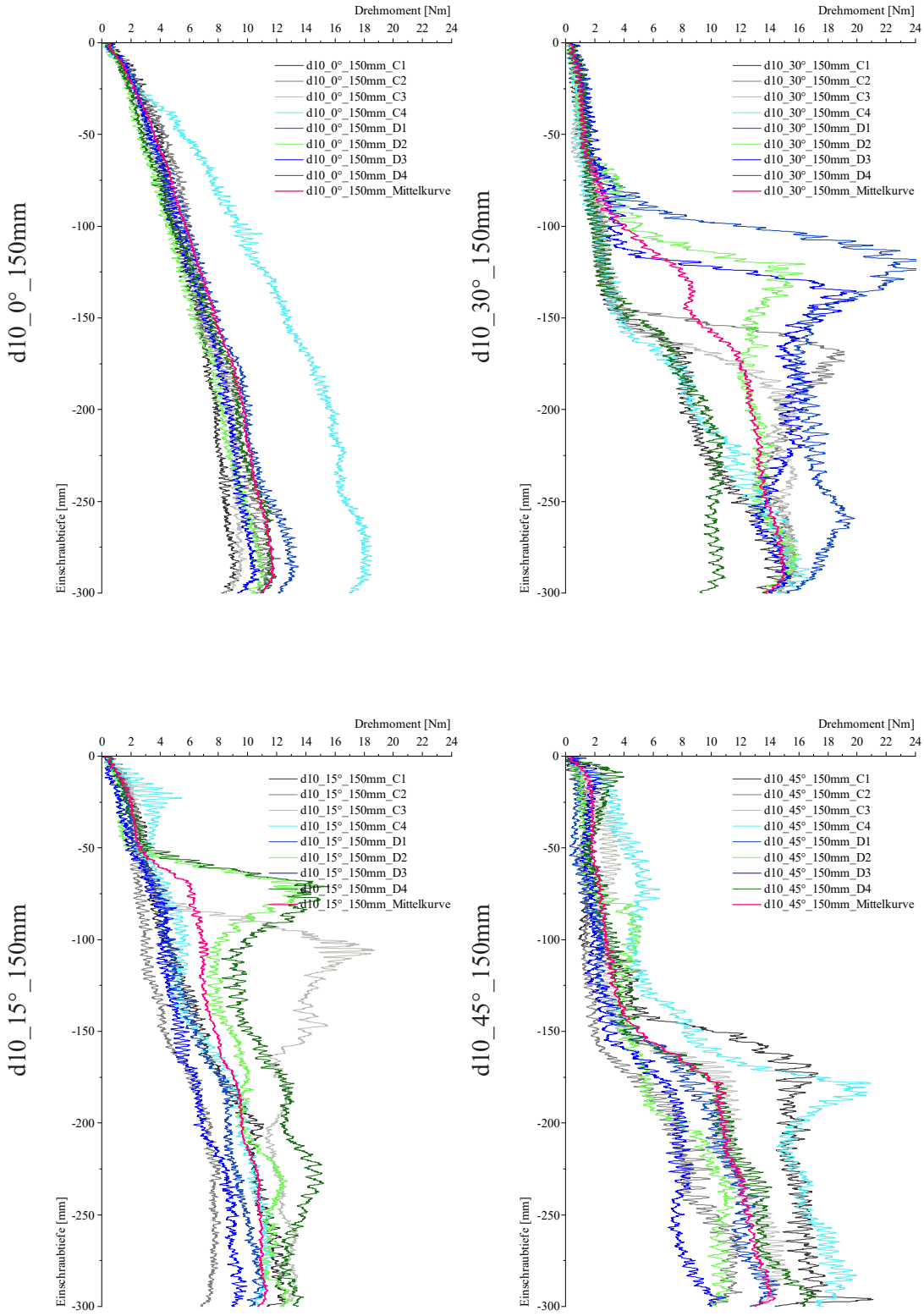


Abbildung B.18: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 150mm$; $\alpha = 0°, 15°, 30°, 45°$

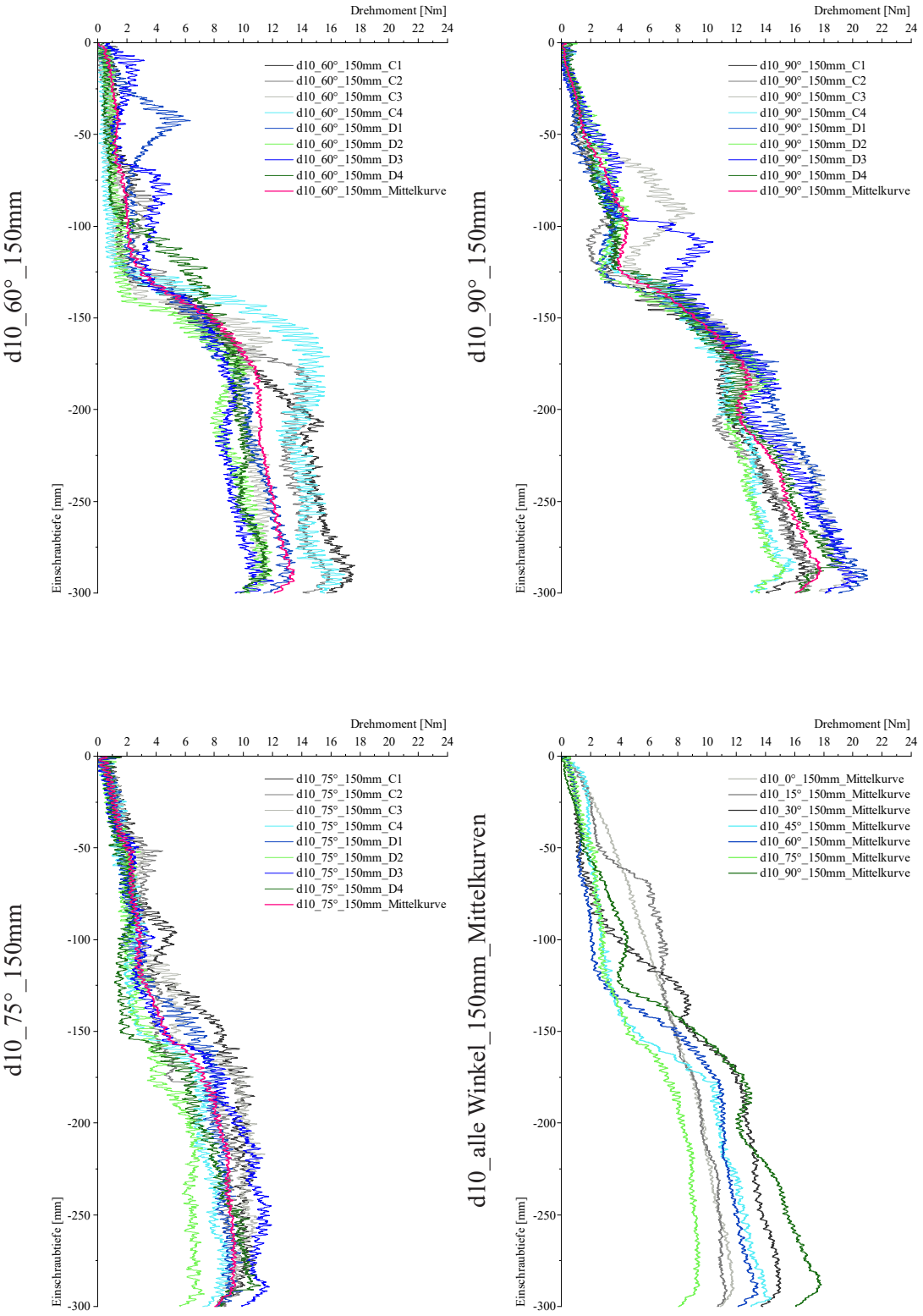


Abbildung B.19: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 150mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

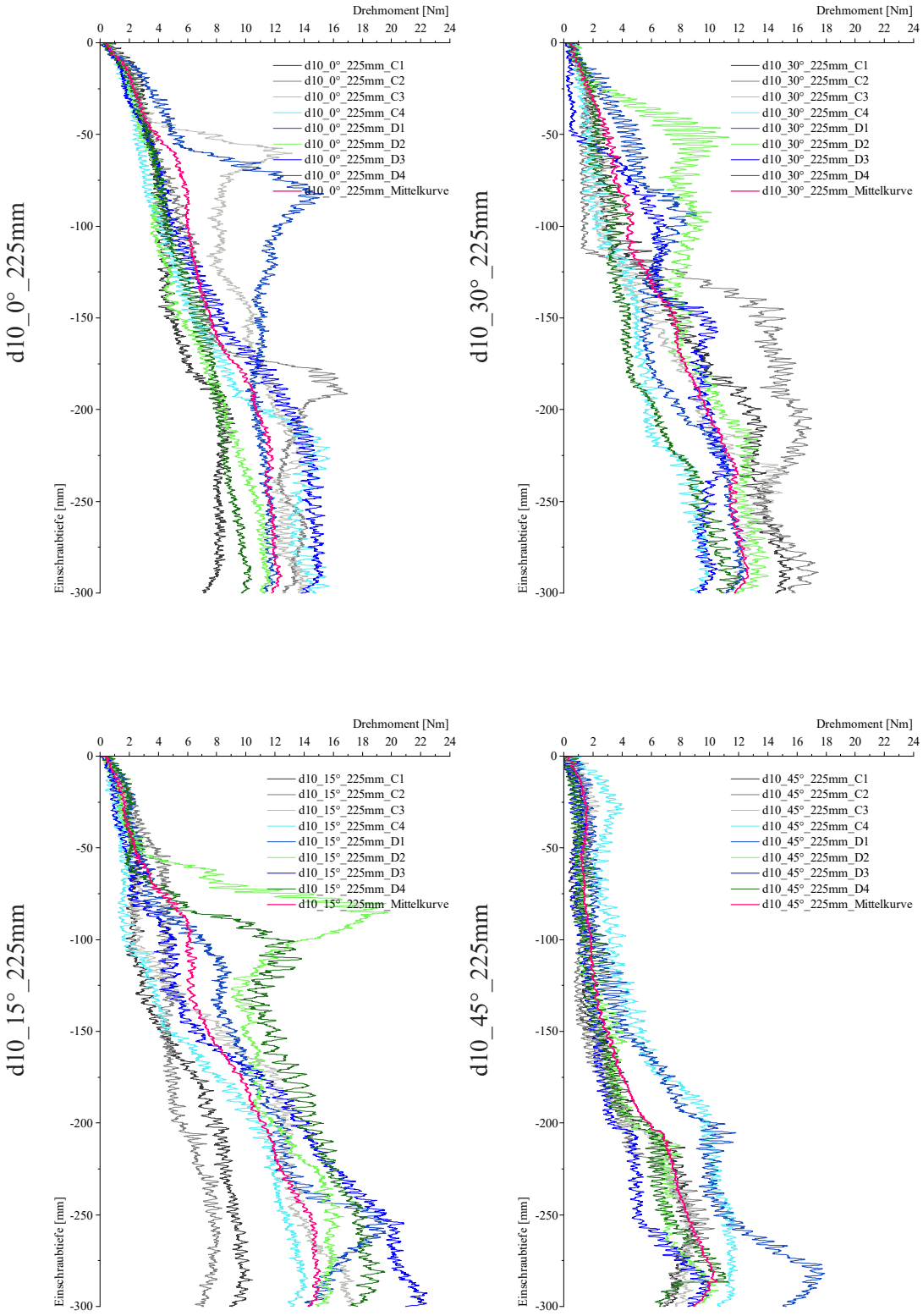


Abbildung B.20: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

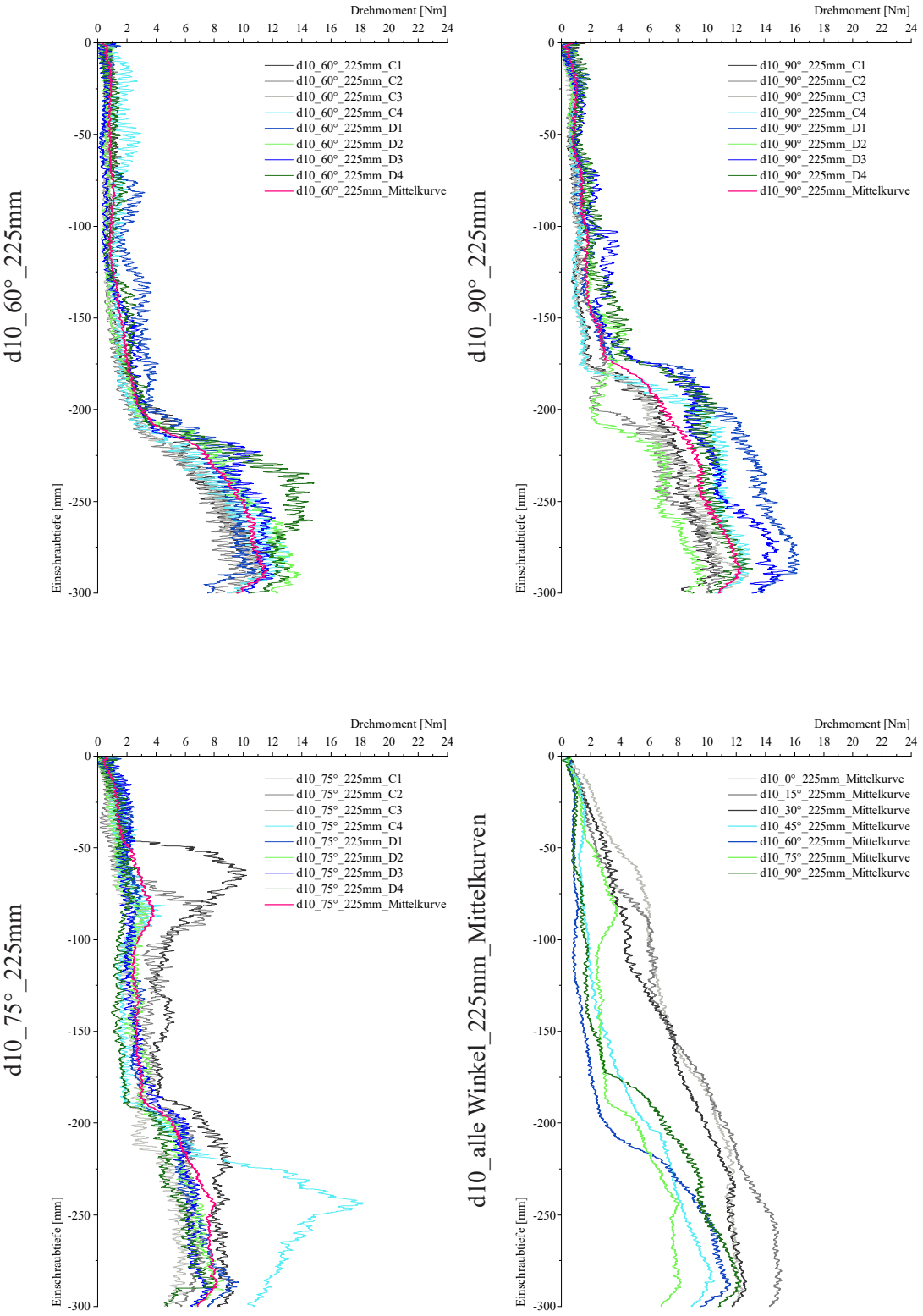


Abbildung B.21: Zusammenfassung der Drehmomentkurven, vorgebohrt $l_{vb} = 225mm$; $\alpha = 60°, 75°, 90°$ und Mittelkurven

B.4 Drehmomentverläufe ausgewählter Einschraubungen

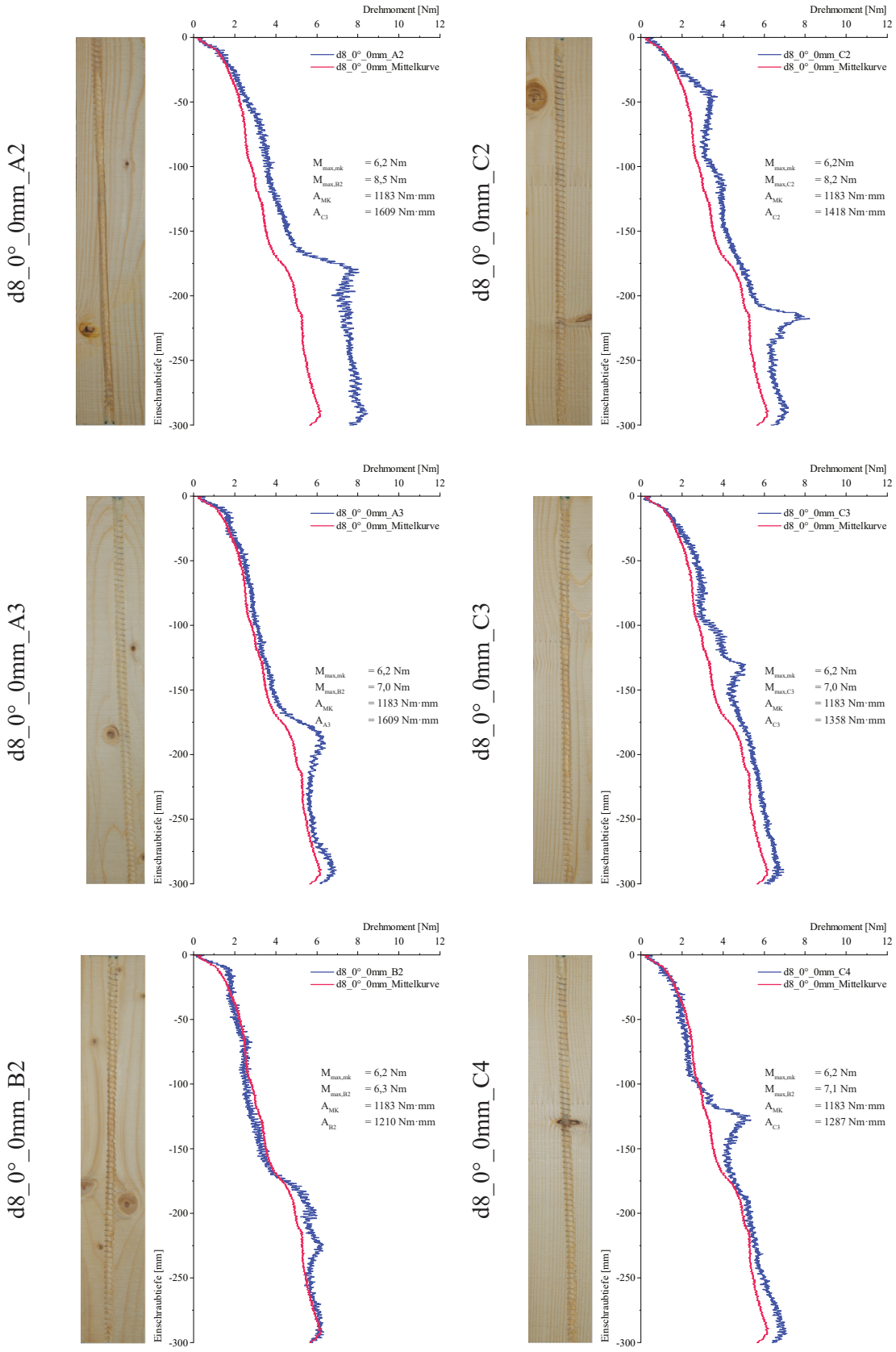


Abbildung B.22: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 0\,°$

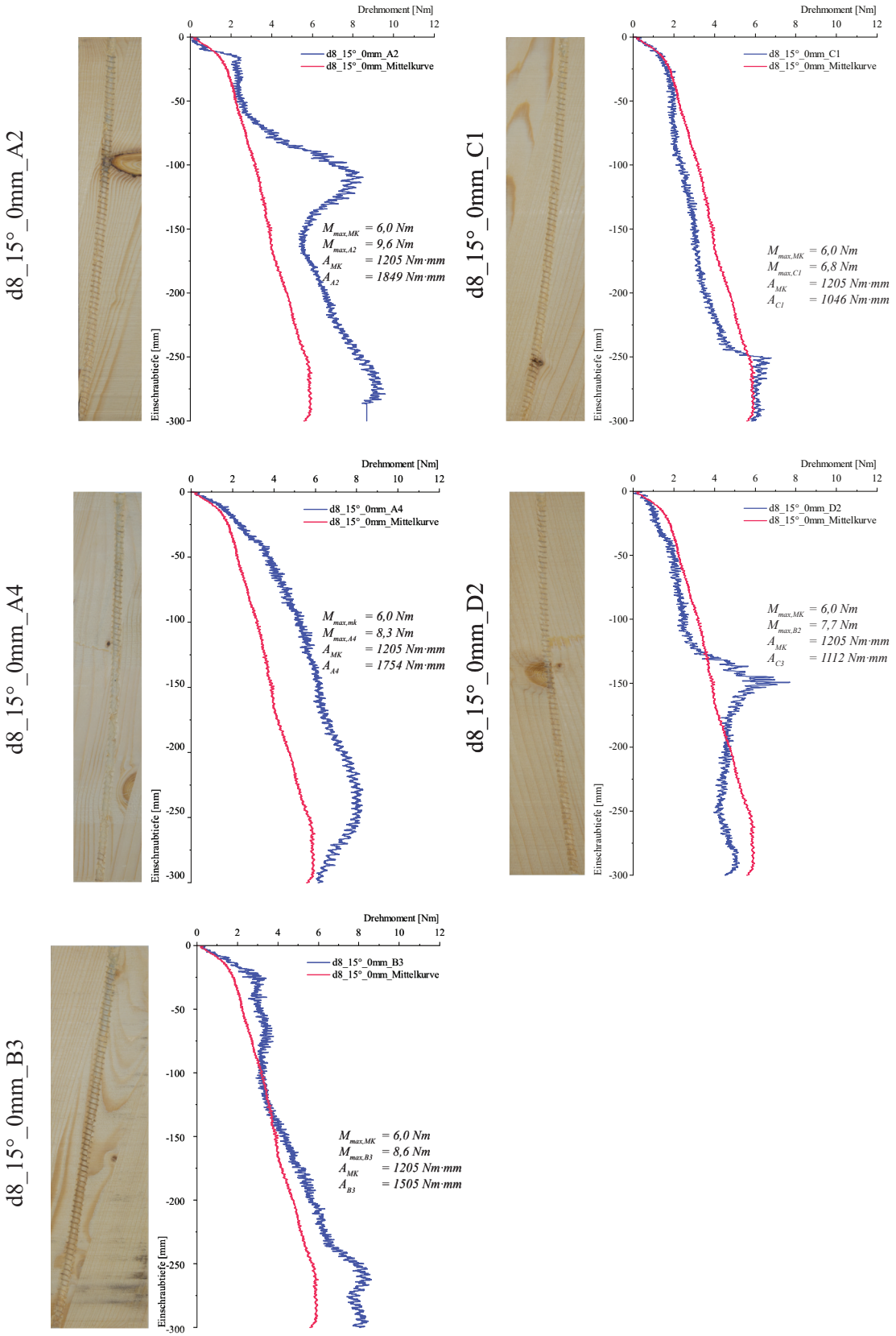


Abbildung B.23: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 15\,°$

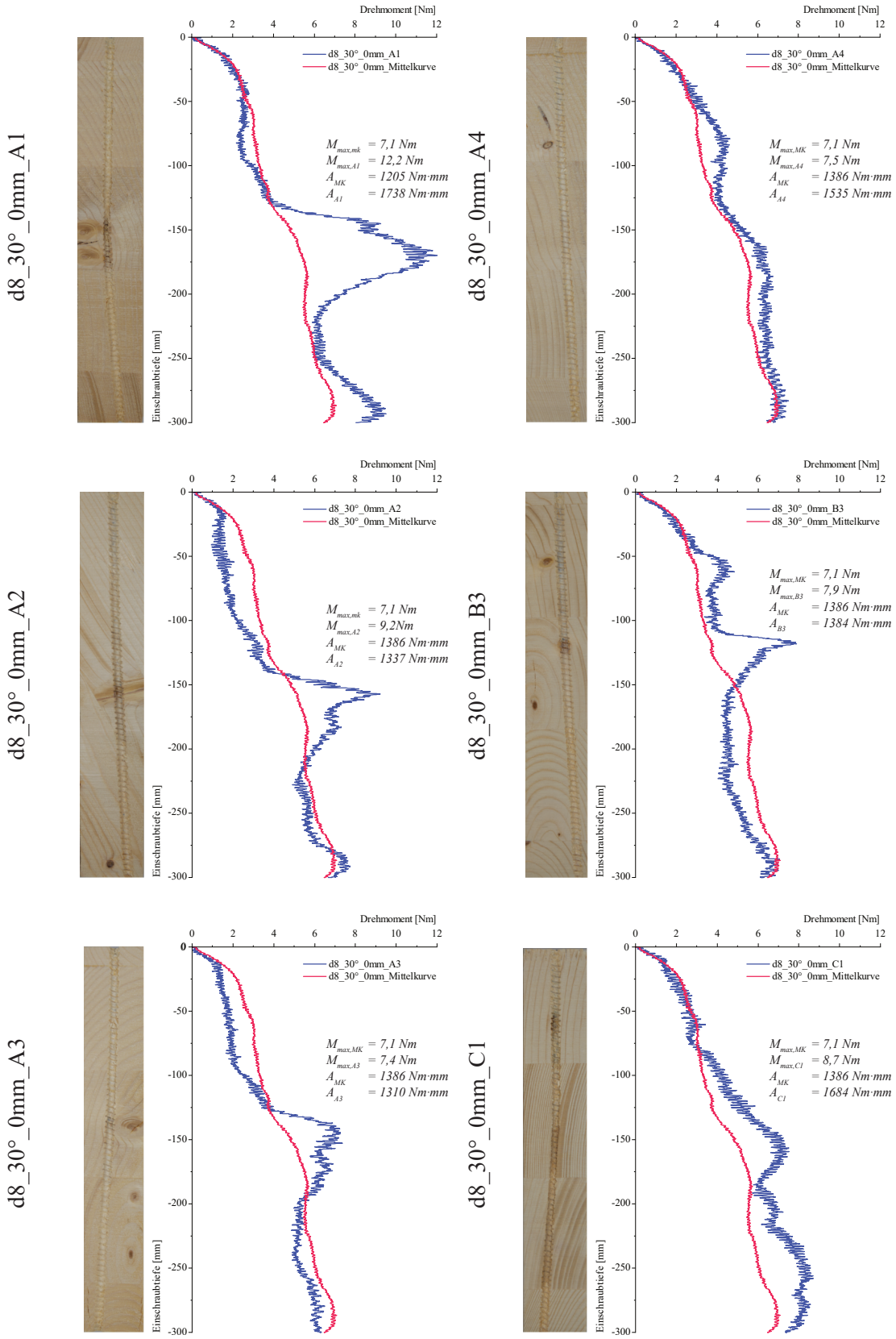


Abbildung B.24: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 30\,°$

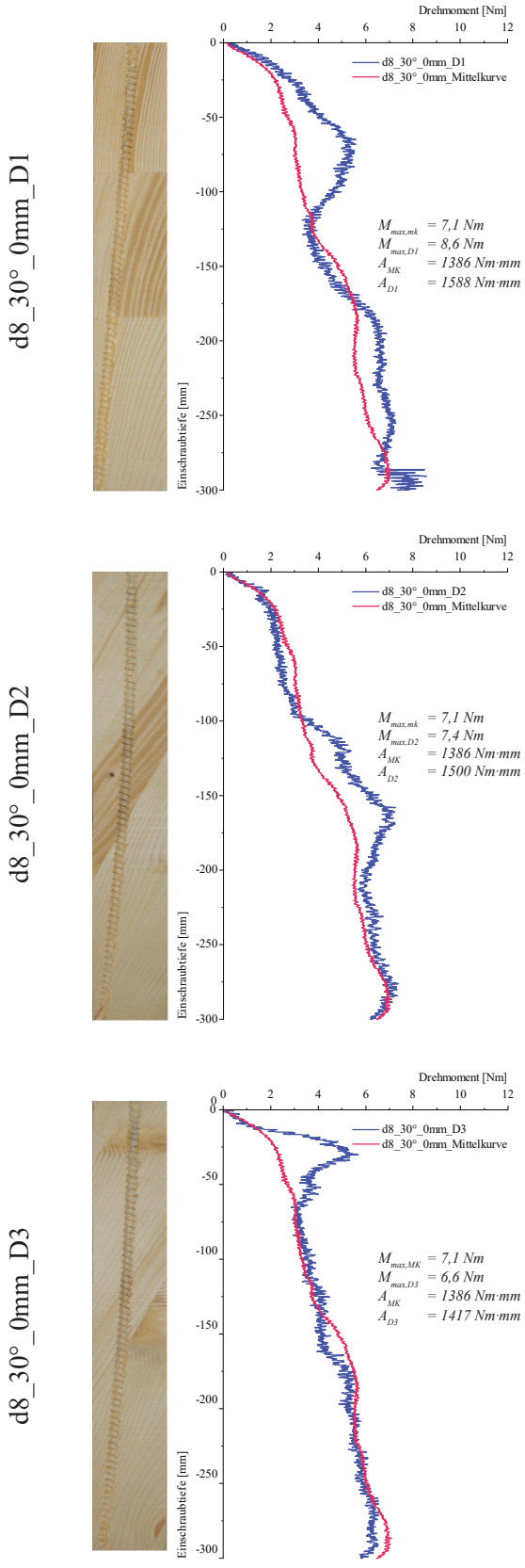


Abbildung B.25: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; α = 30 °

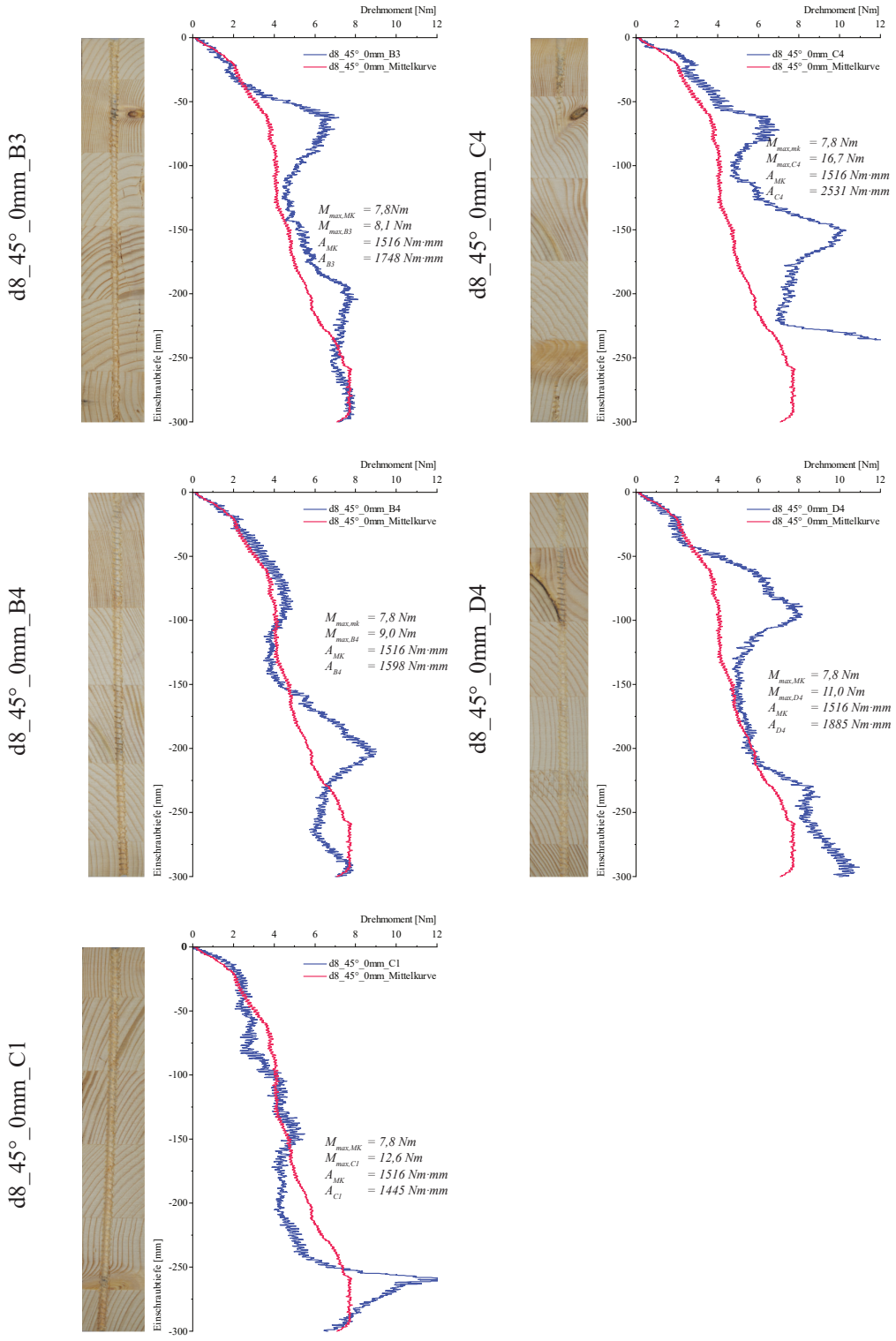


Abbildung B.26: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; α = 45 °

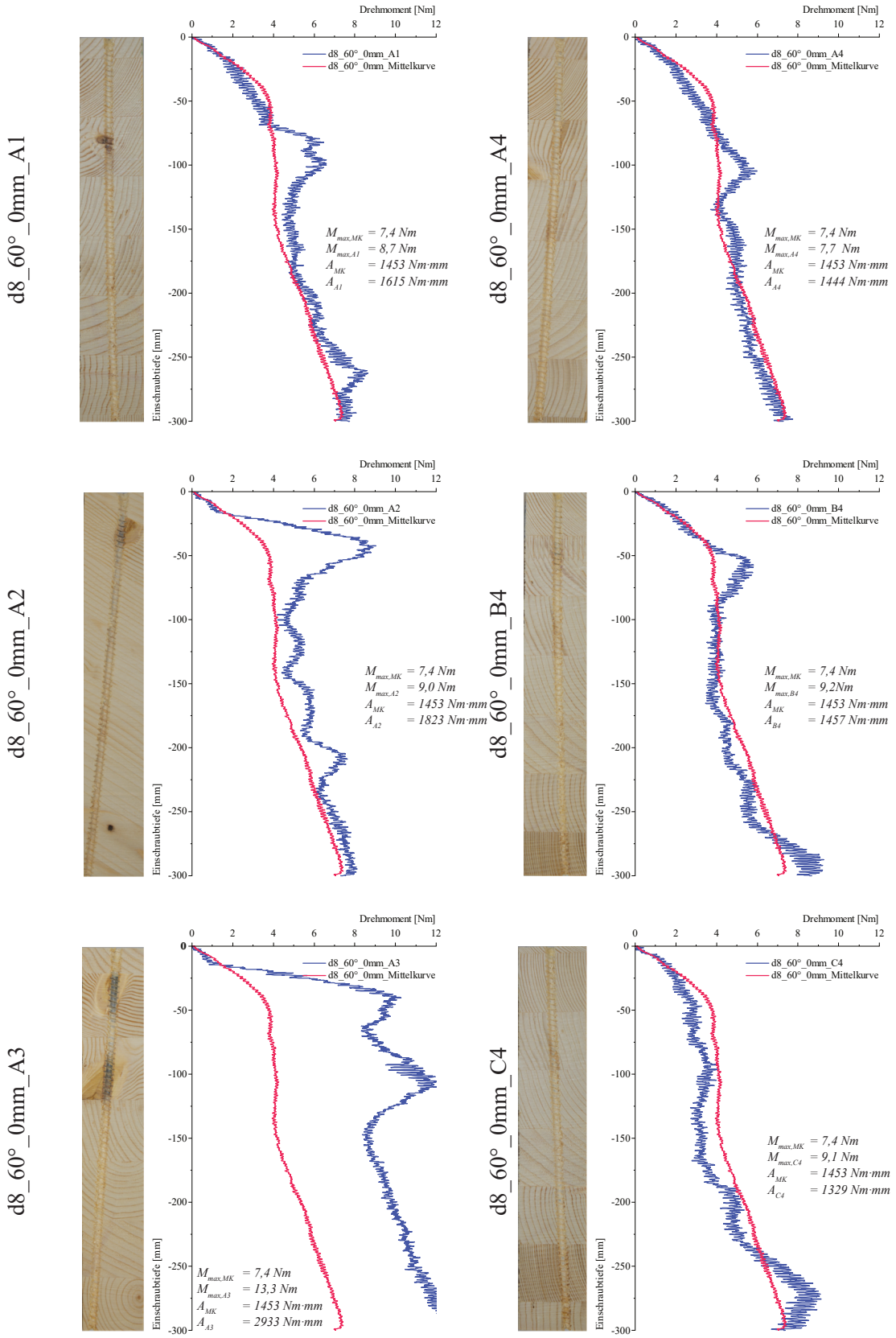


Abbildung B.27: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 60\,°$

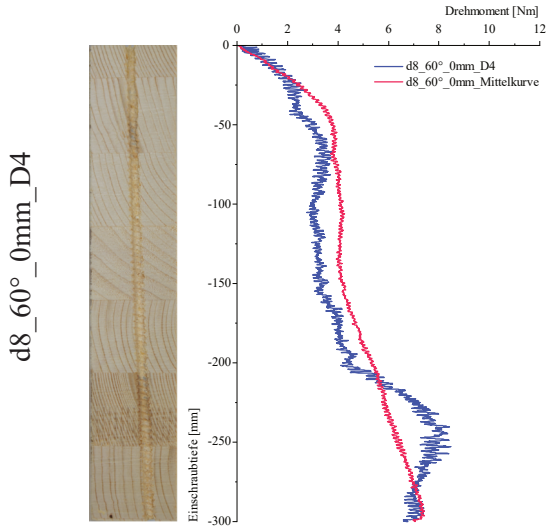


Abbildung B.28: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 60\,°$

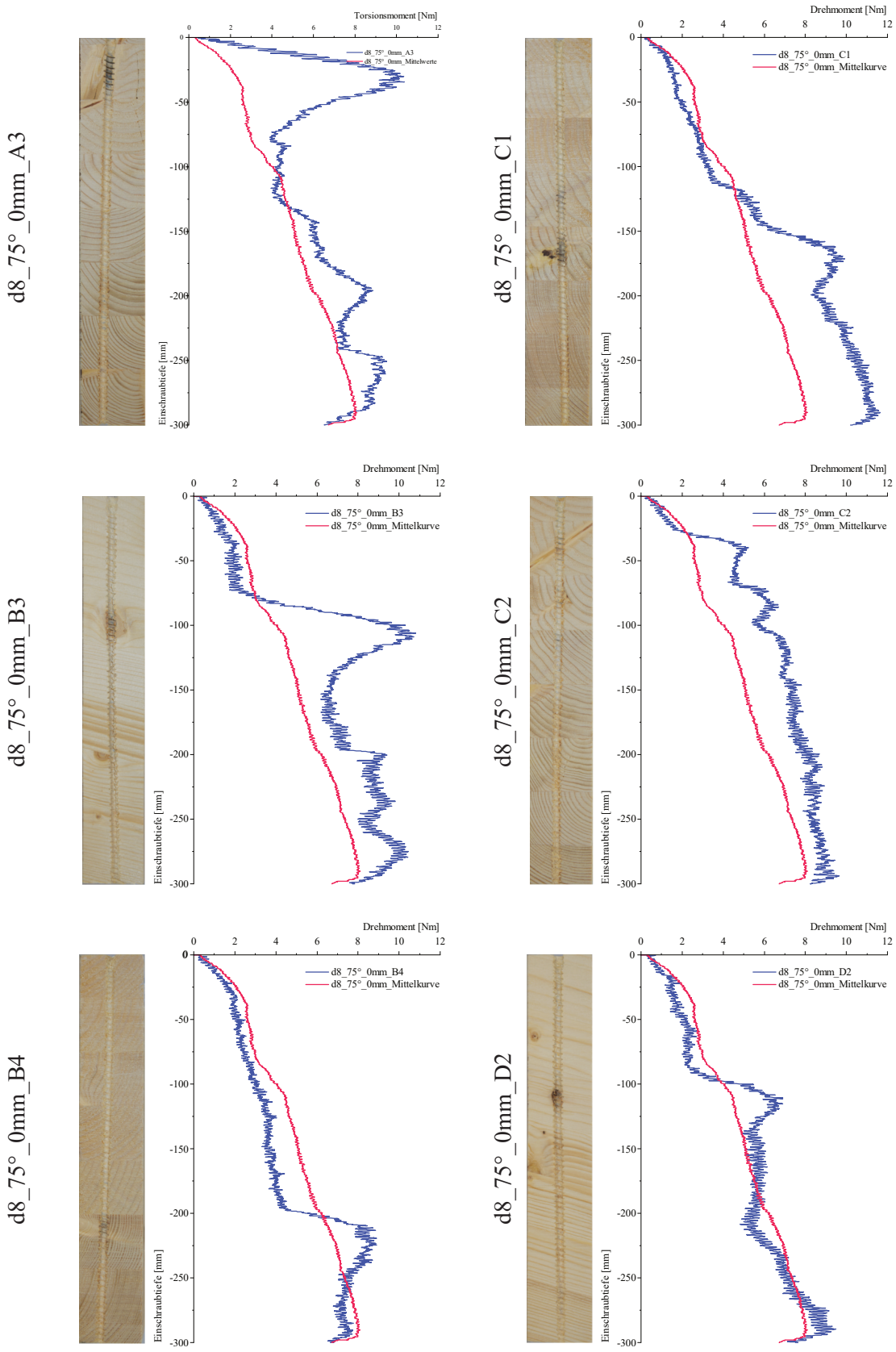


Abbildung B.29: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 75\,°$

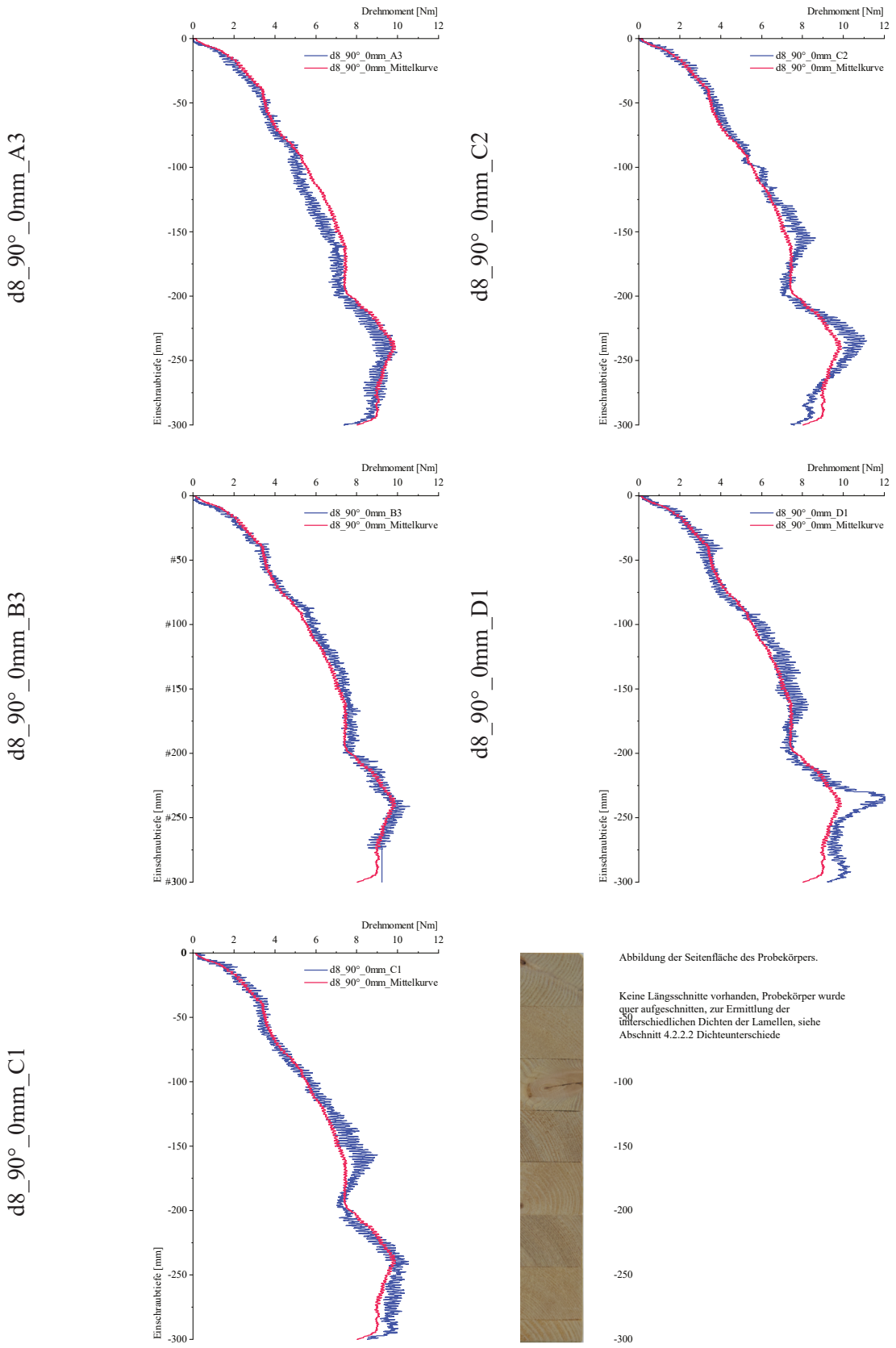


Abbildung B.30: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 90\,°$

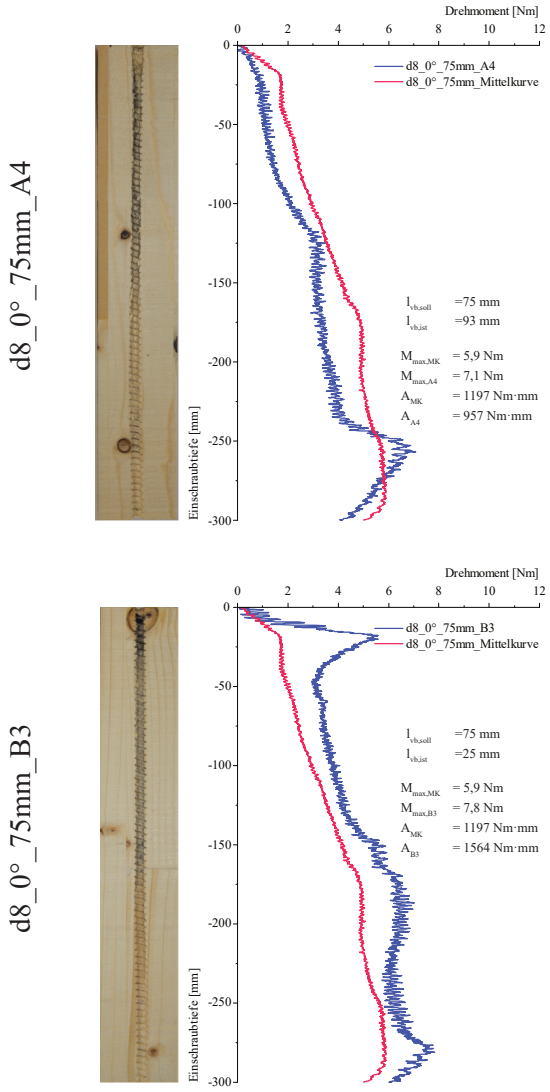


Abbildung B.31: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 0\,°$

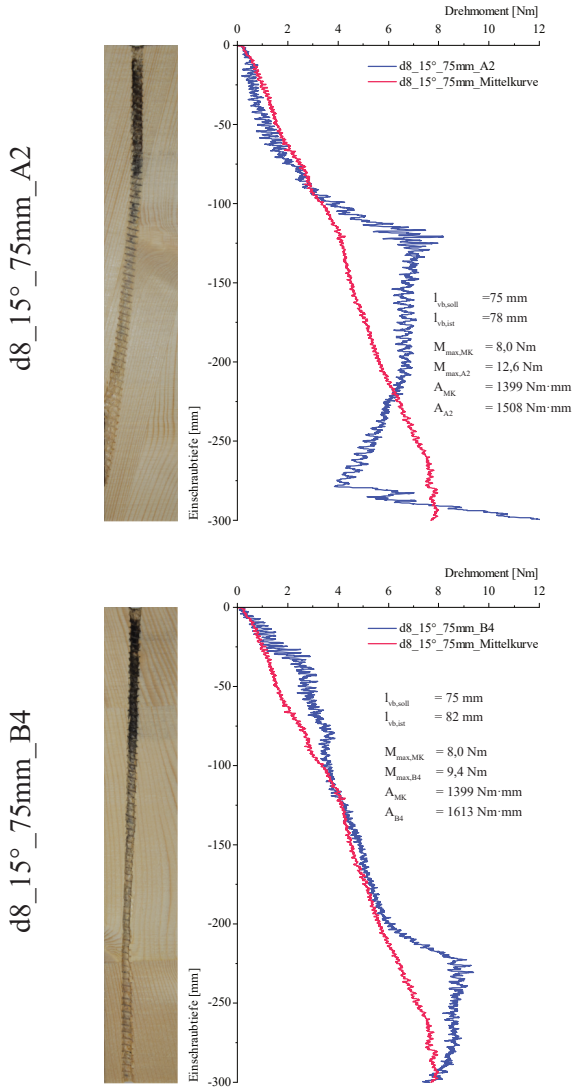


Abbildung B.32: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 15\,°$

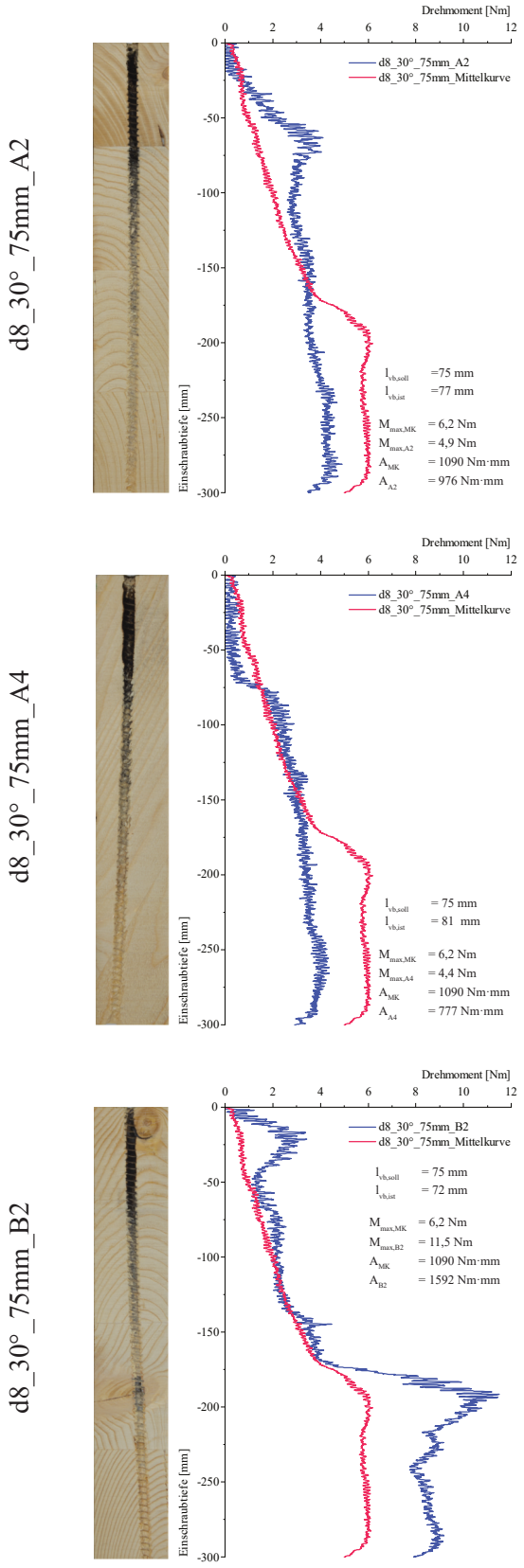


Abbildung B.33: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 30\,°$

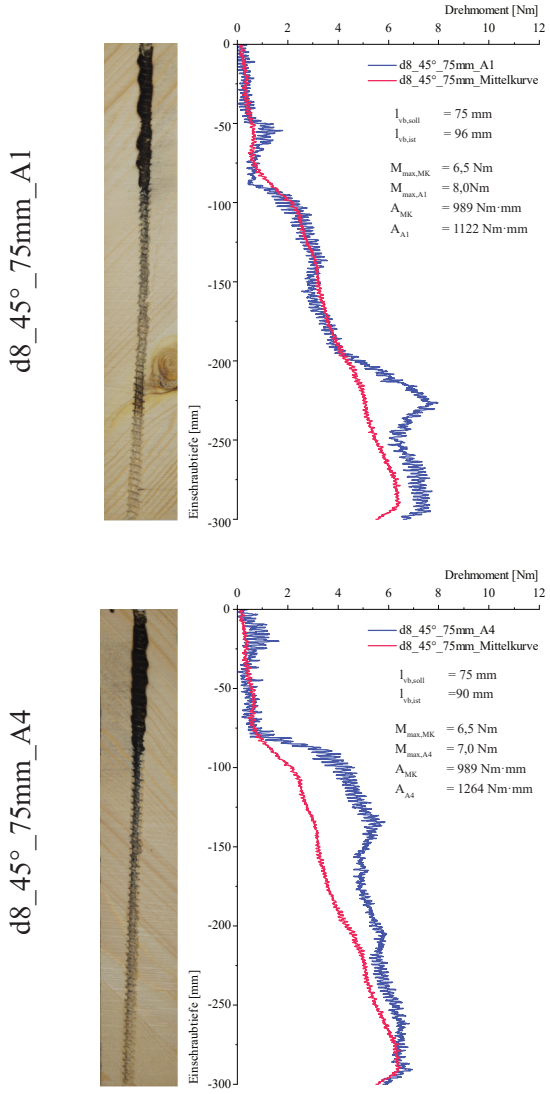


Abbildung B.34: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 45\,°$

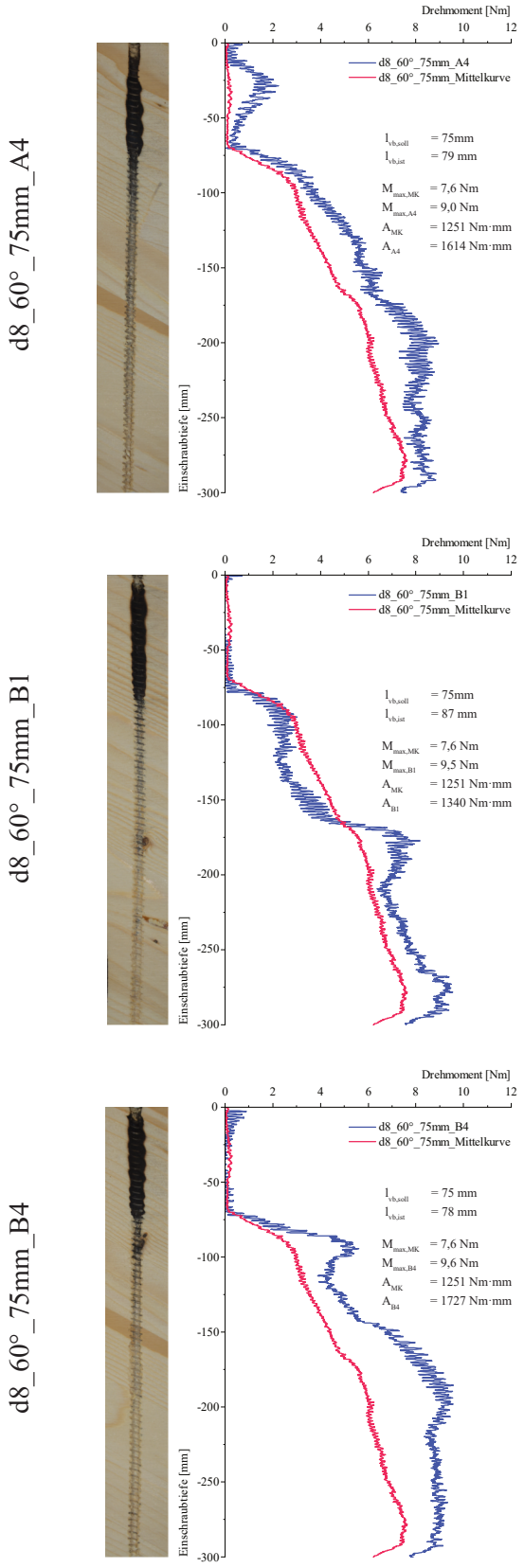


Abbildung B.35: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 60\,°$

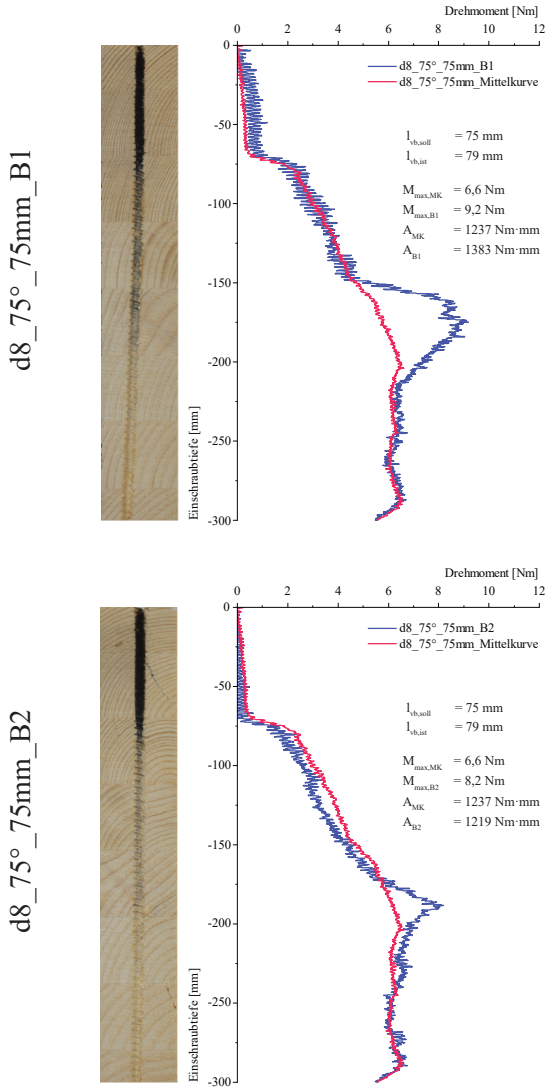


Abbildung B.36: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 75\,°$

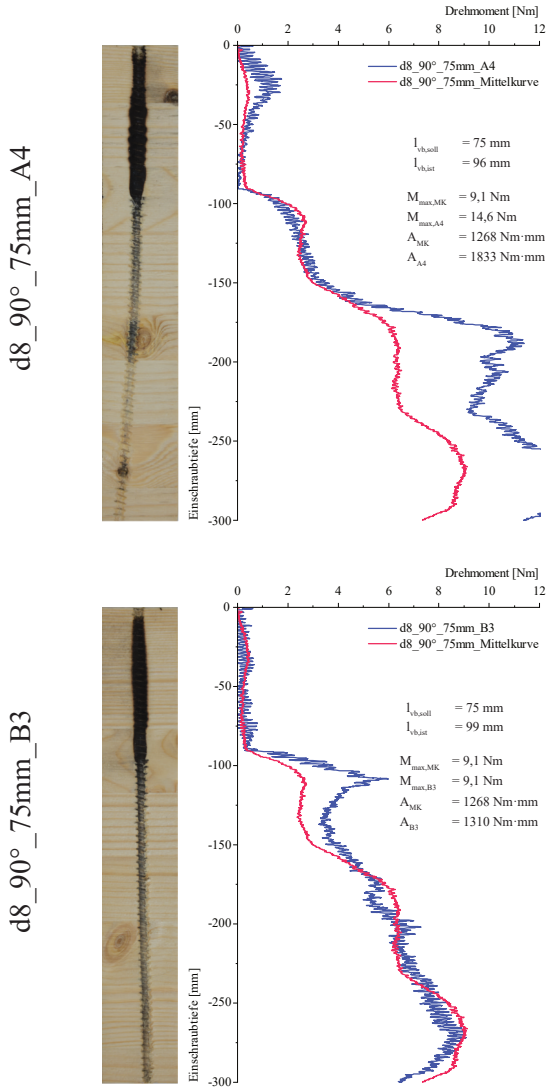


Abbildung B.37: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 90\,°$

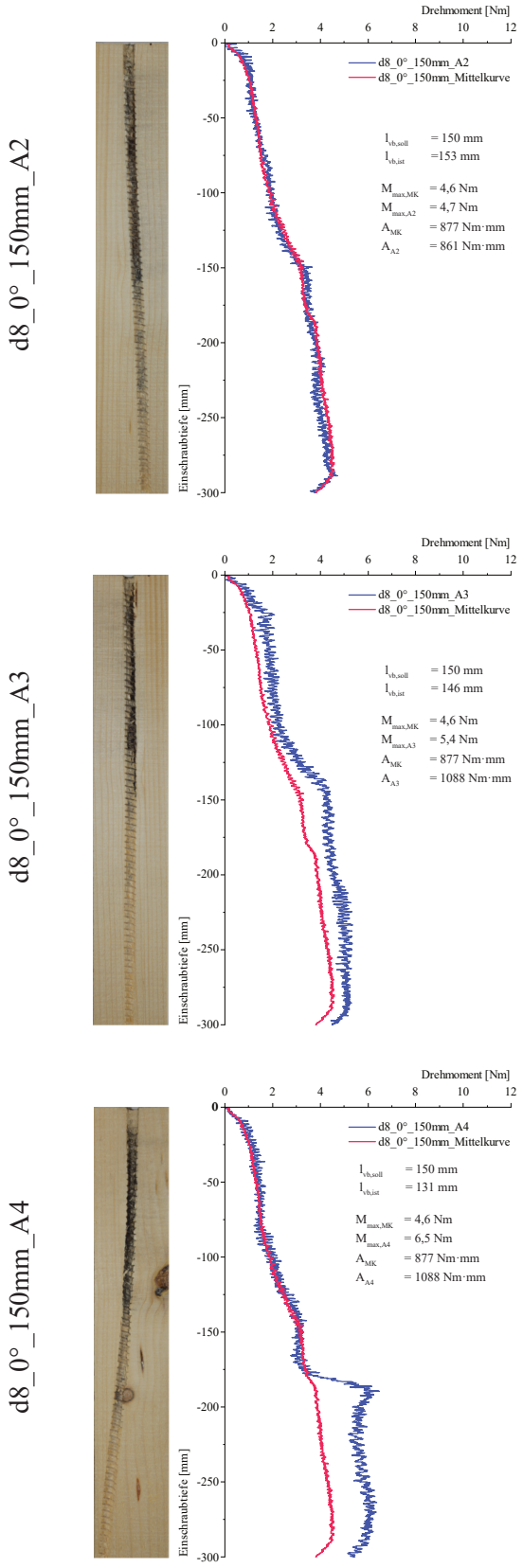


Abbildung B.38: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 0\,°$

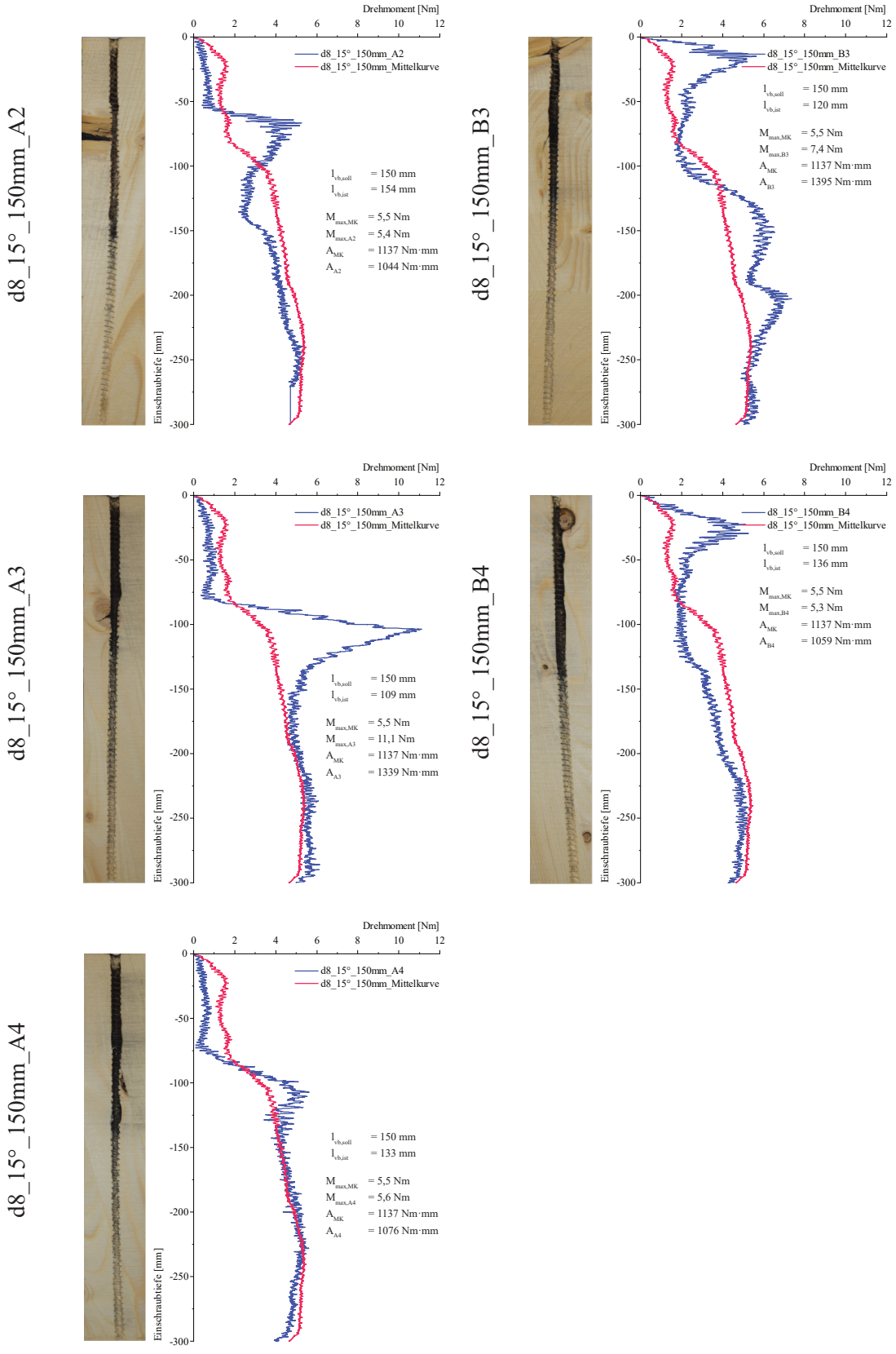


Abbildung B.39: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 15\,°$

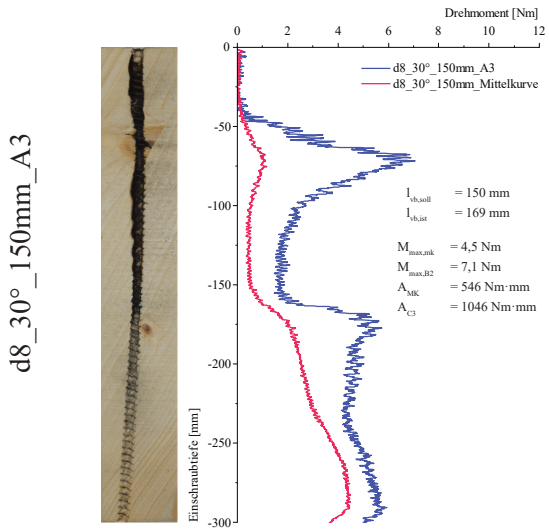
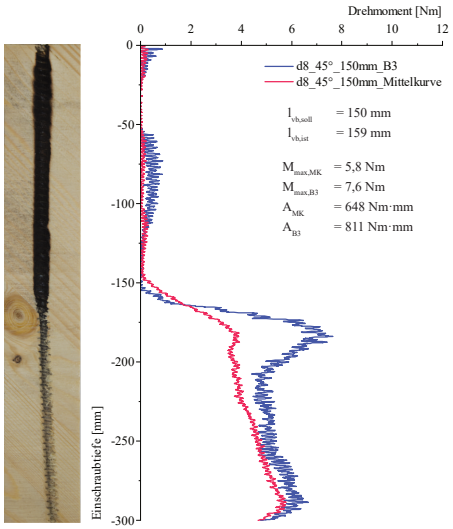


Abbildung B.40: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 30\,°$

d8_45°_150mm_B3



d8_45°_150mm_B4

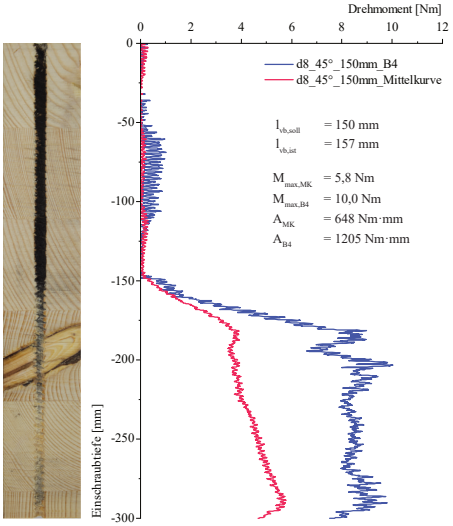


Abbildung B.41: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 45\,°$

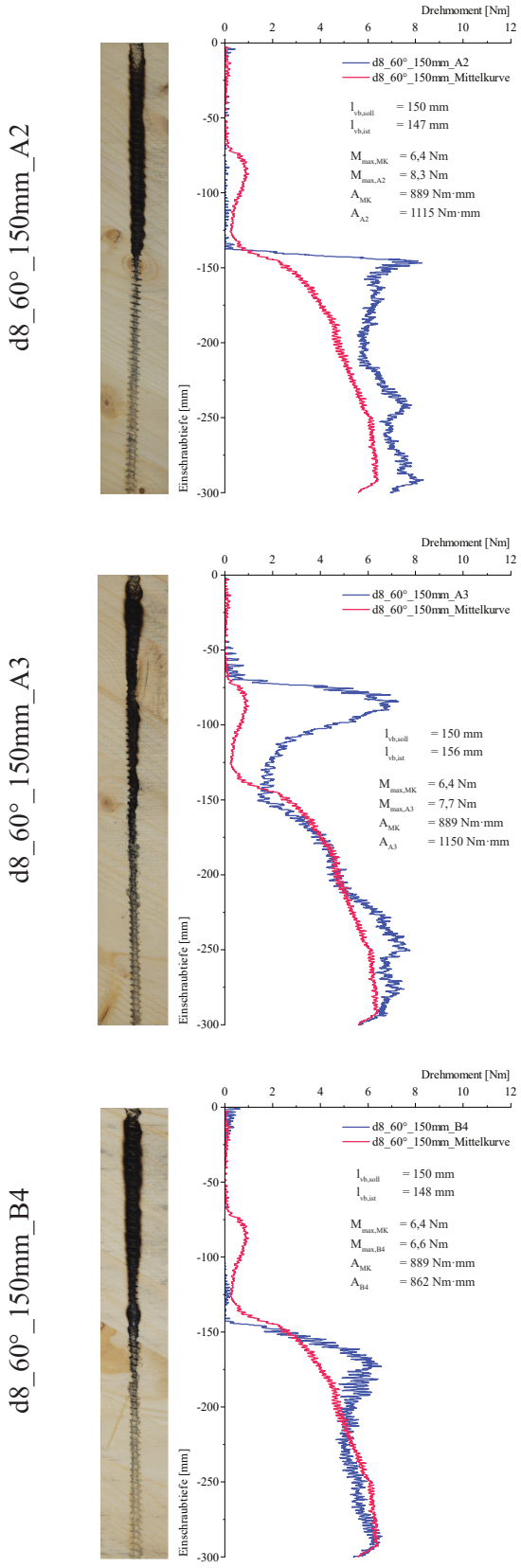


Abbildung B.42: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 60\,°$

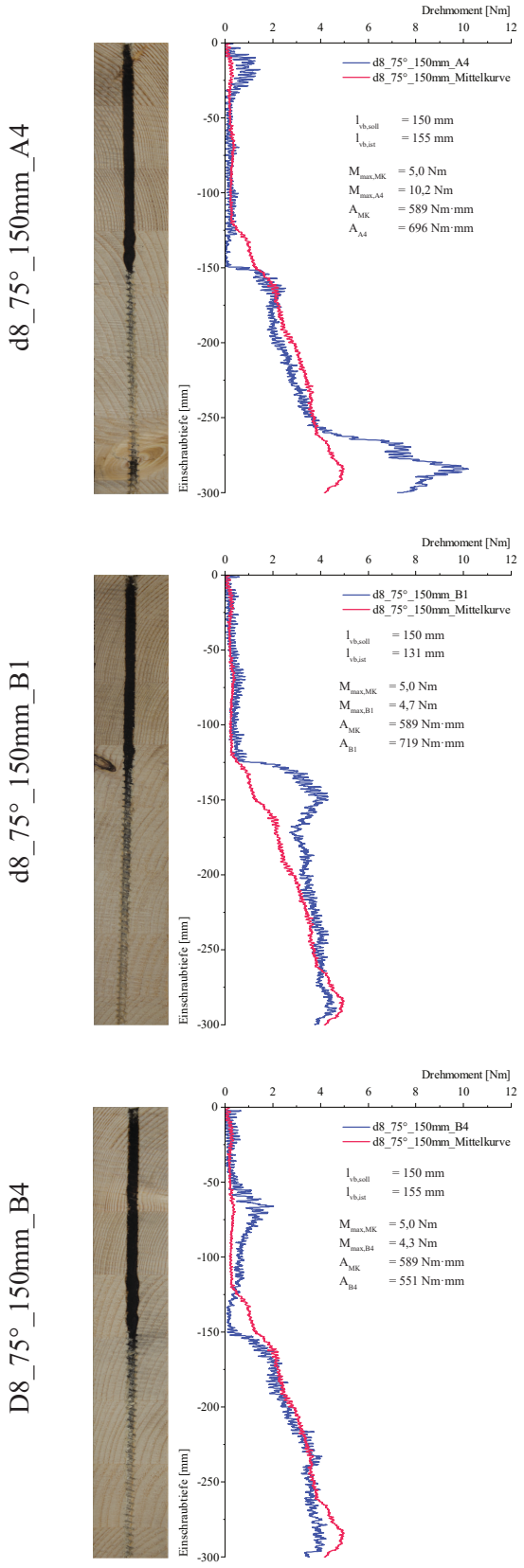


Abbildung B.43: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 75\,°$

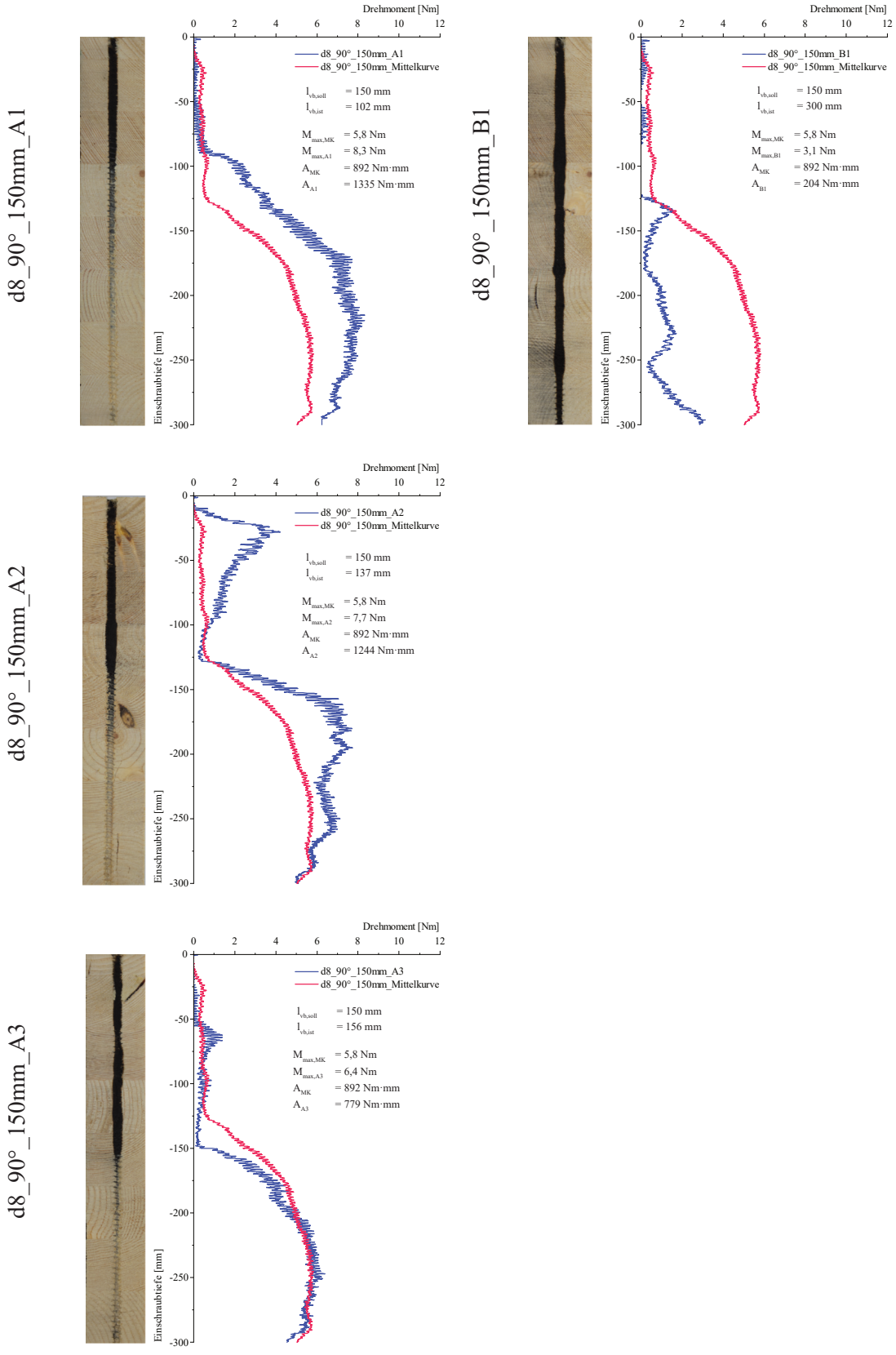


Abbildung B.44: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 90\,°$

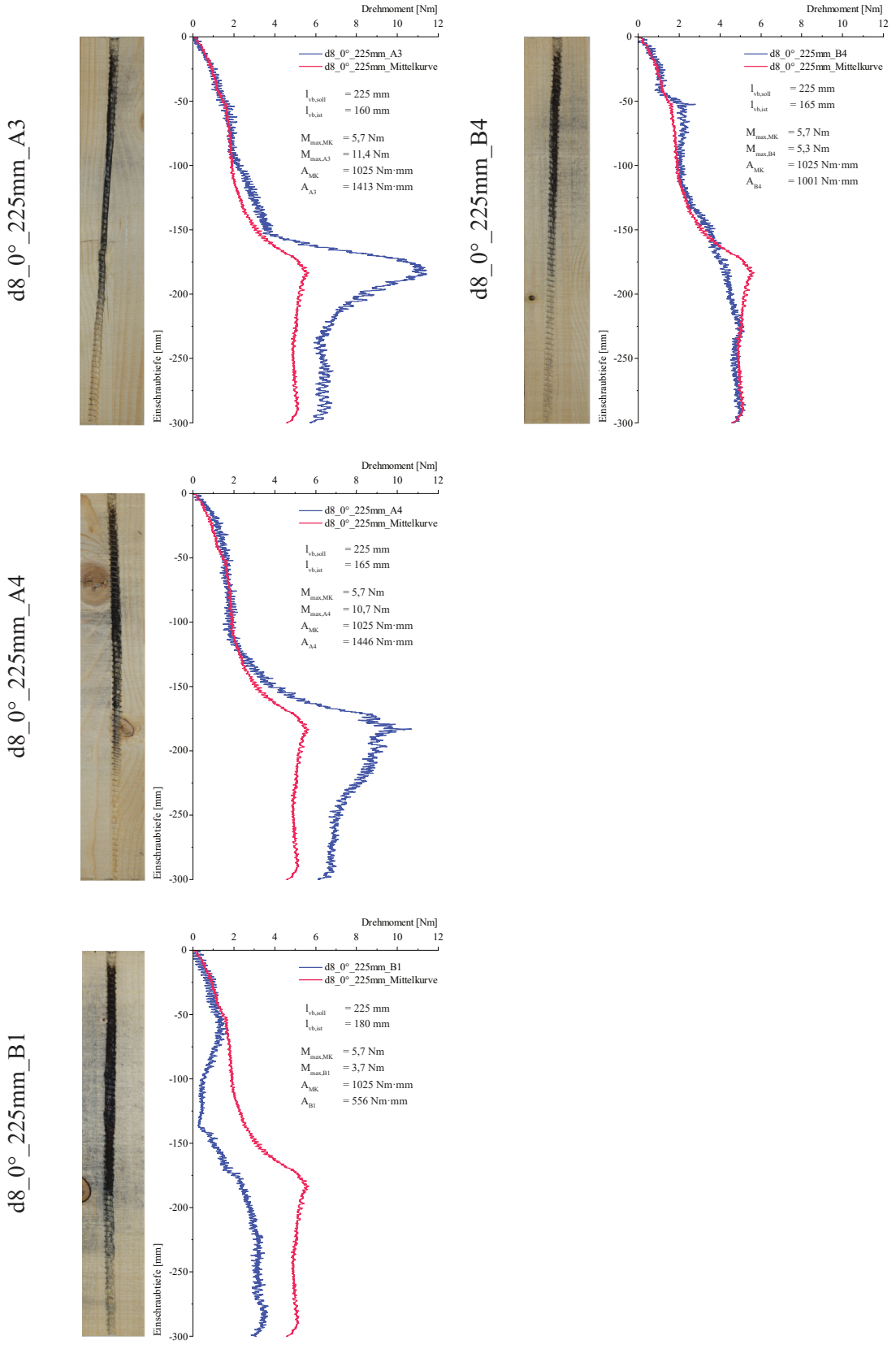


Abbildung B.45: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 0\,°$

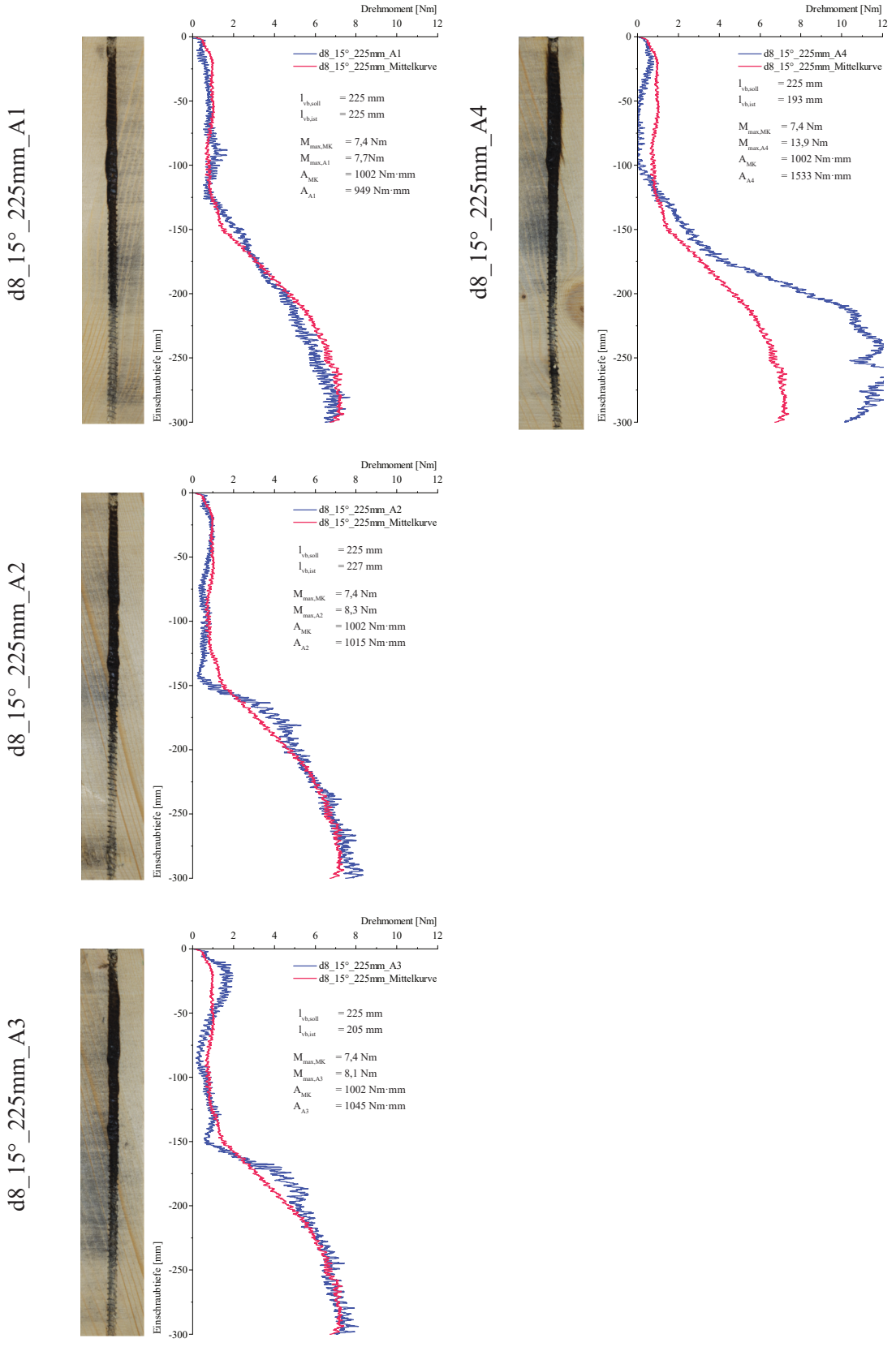


Abbildung B.46: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 15\,°$

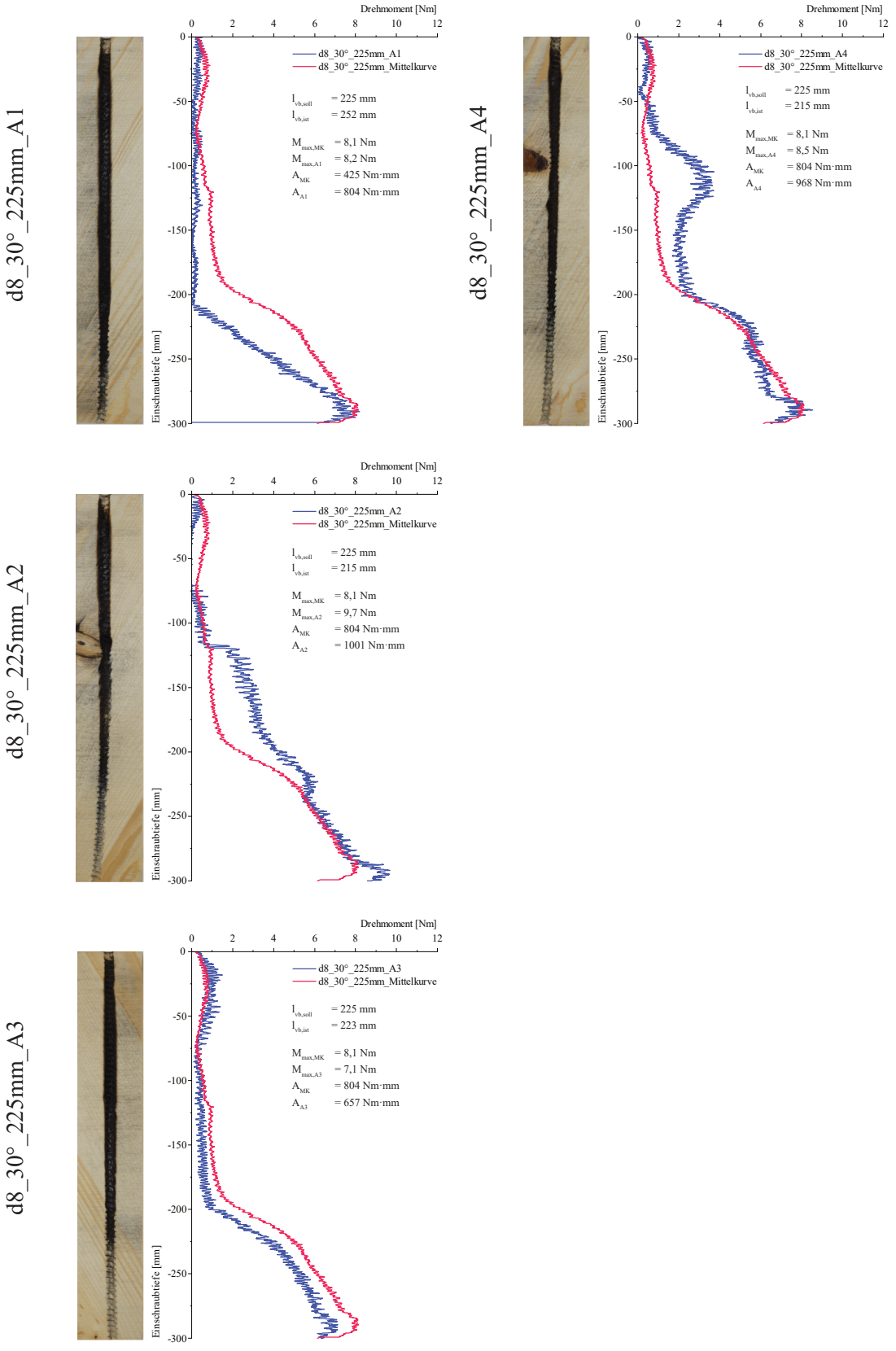


Abbildung B.47: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 30\,°$

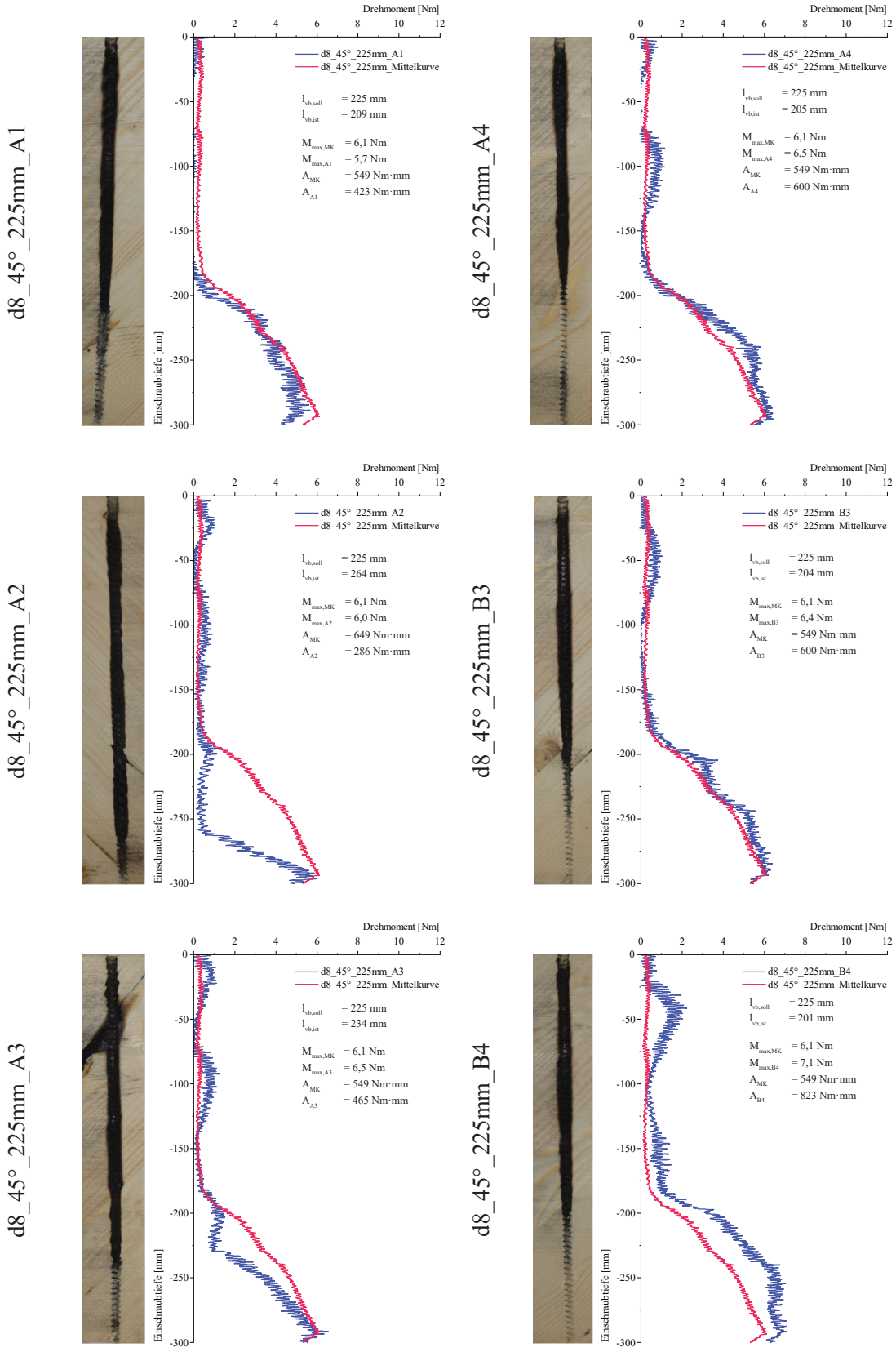


Abbildung B.48: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 45\,°$

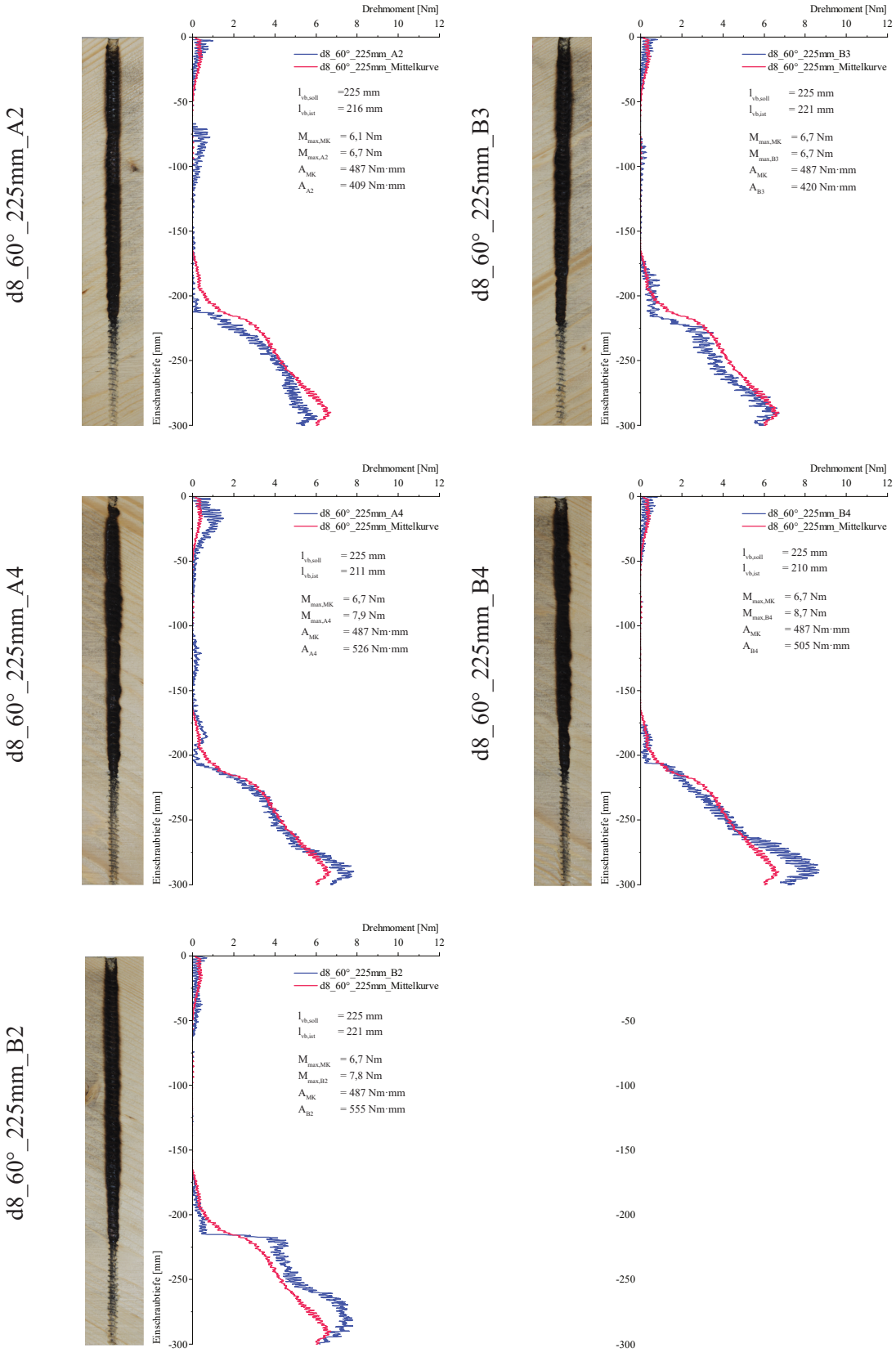


Abbildung B.49: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 60\,°$

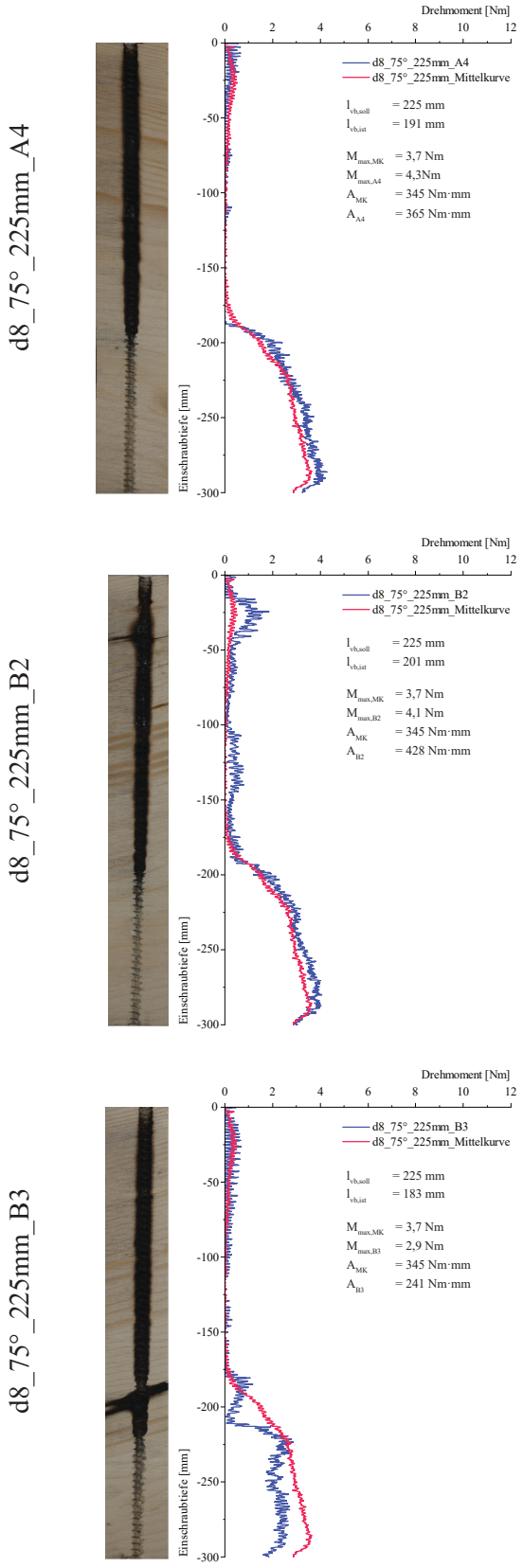


Abbildung B.50: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 75\,°$

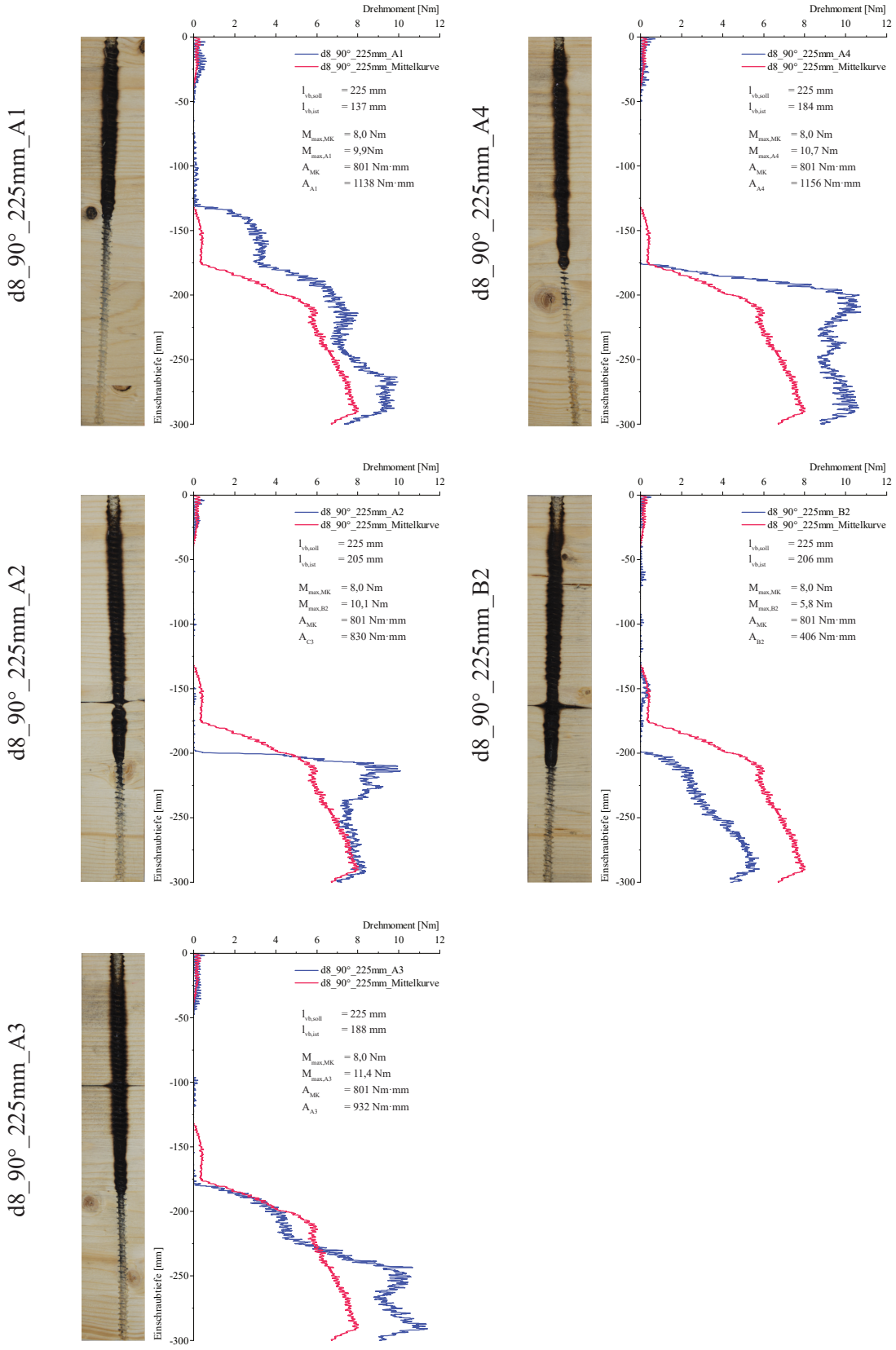


Abbildung B.51: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d8; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 90\,°$

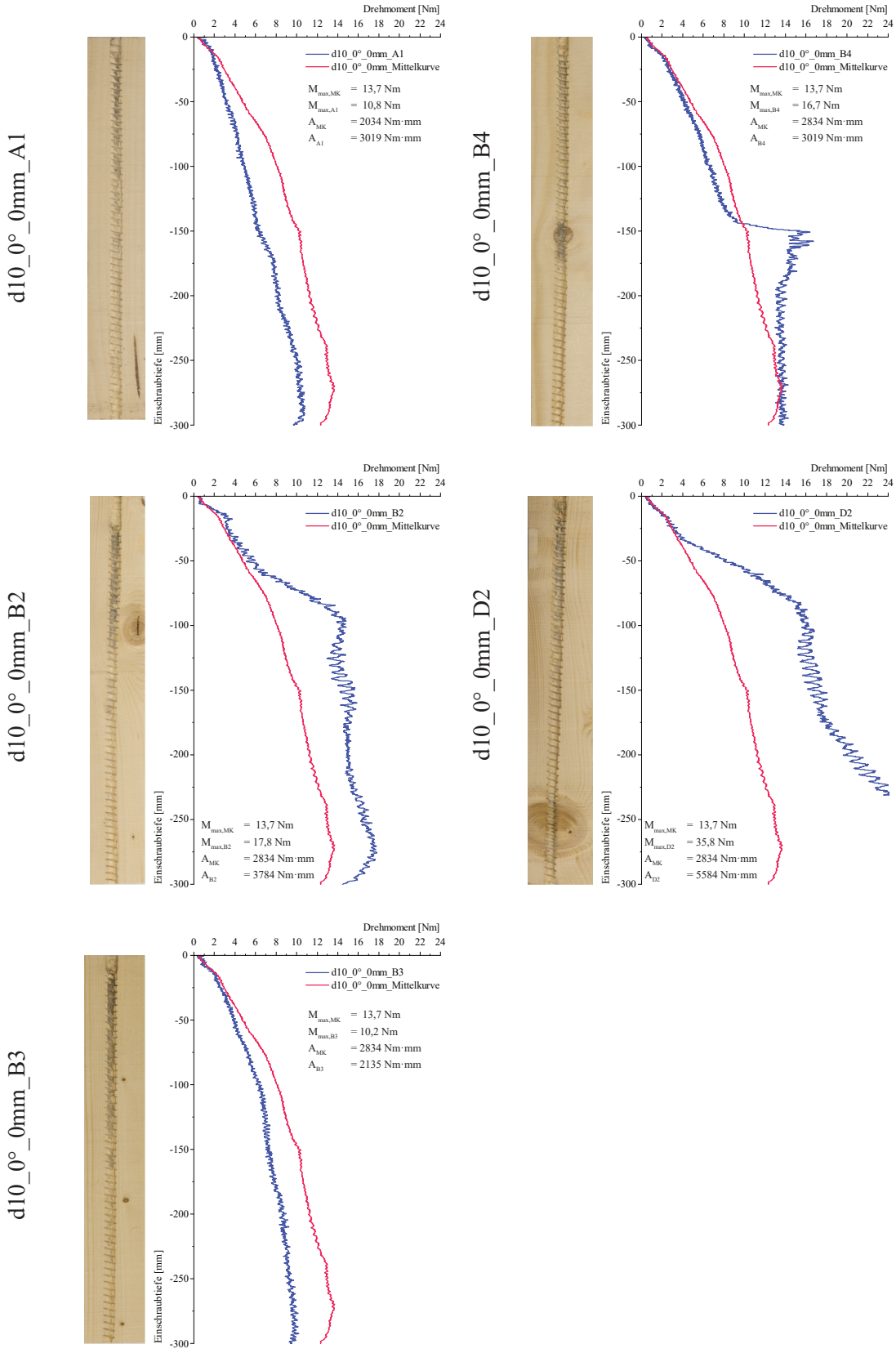


Abbildung B.52: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 0\,°$

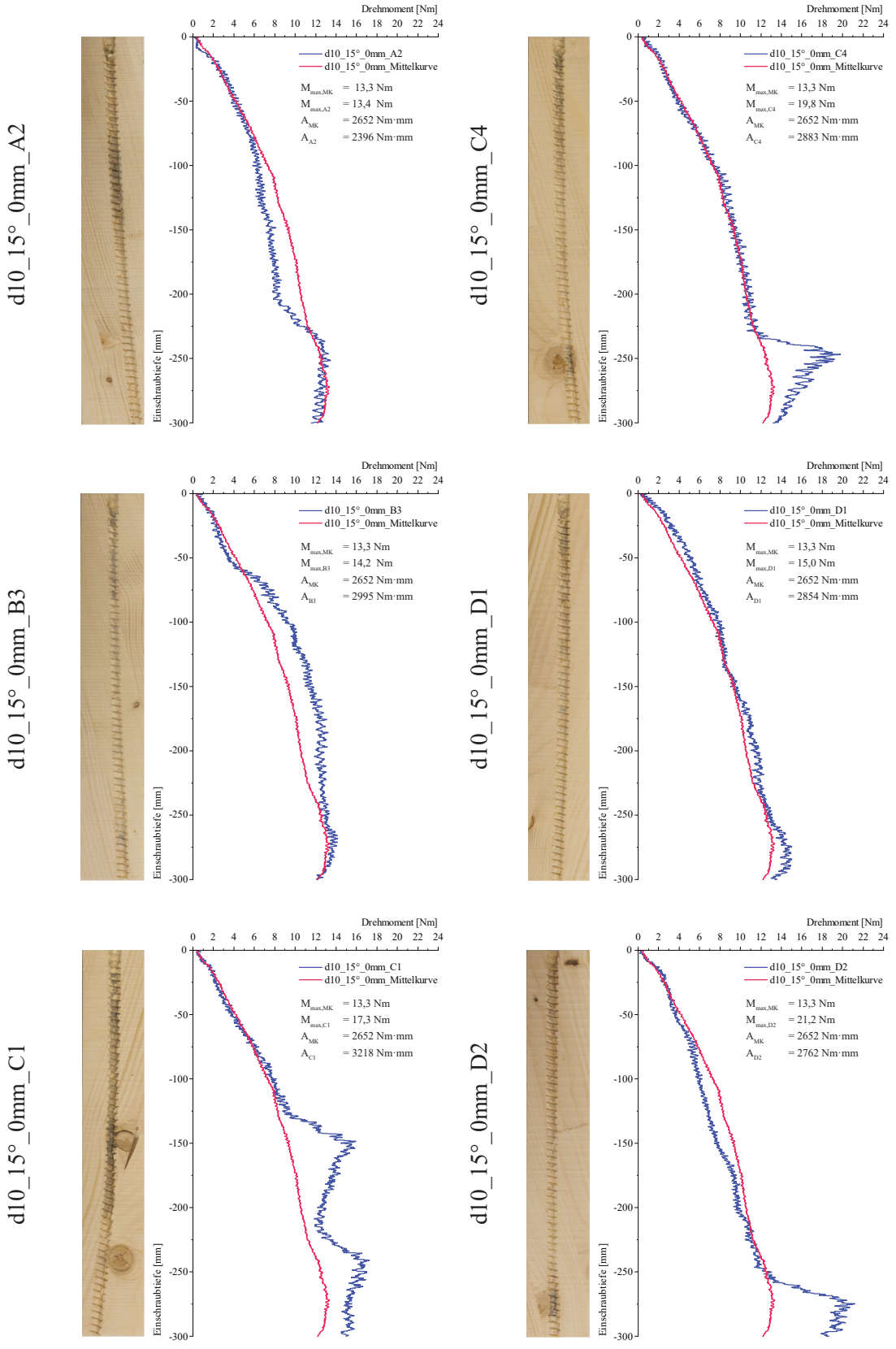


Abbildung B.53: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 15\,°$

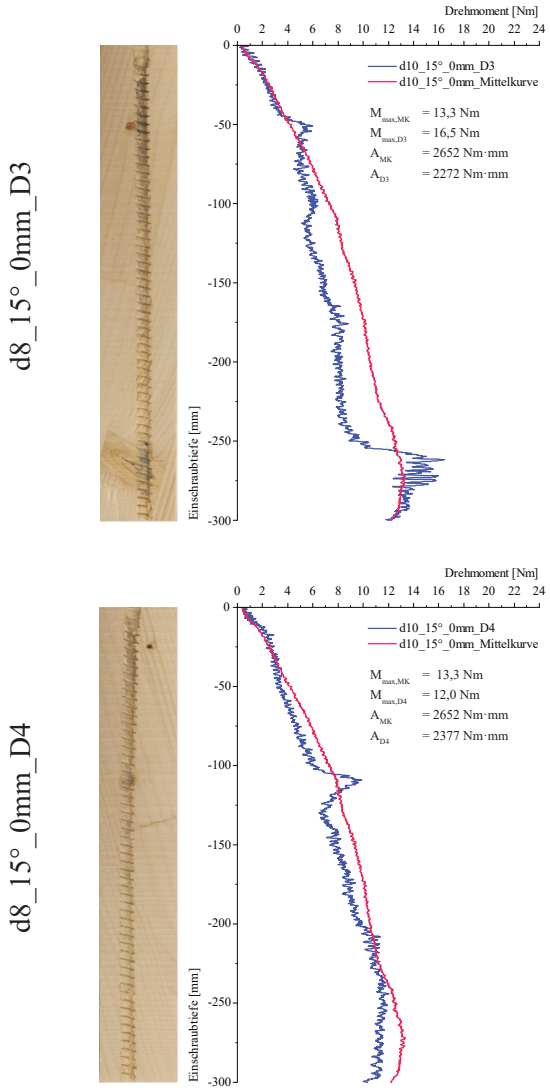


Abbildung B.54: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; α = 15 °

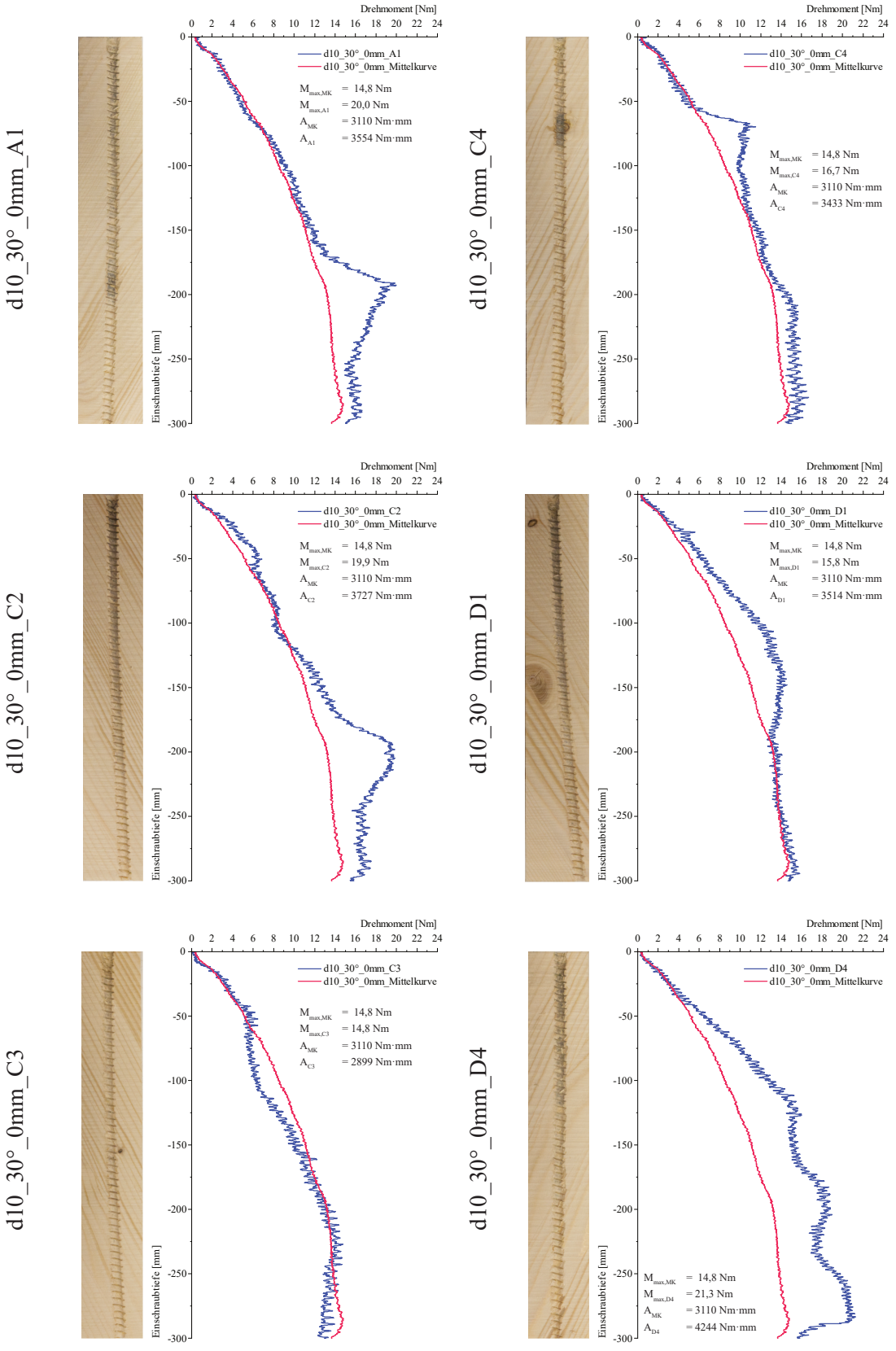


Abbildung B.55: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 30\,°$

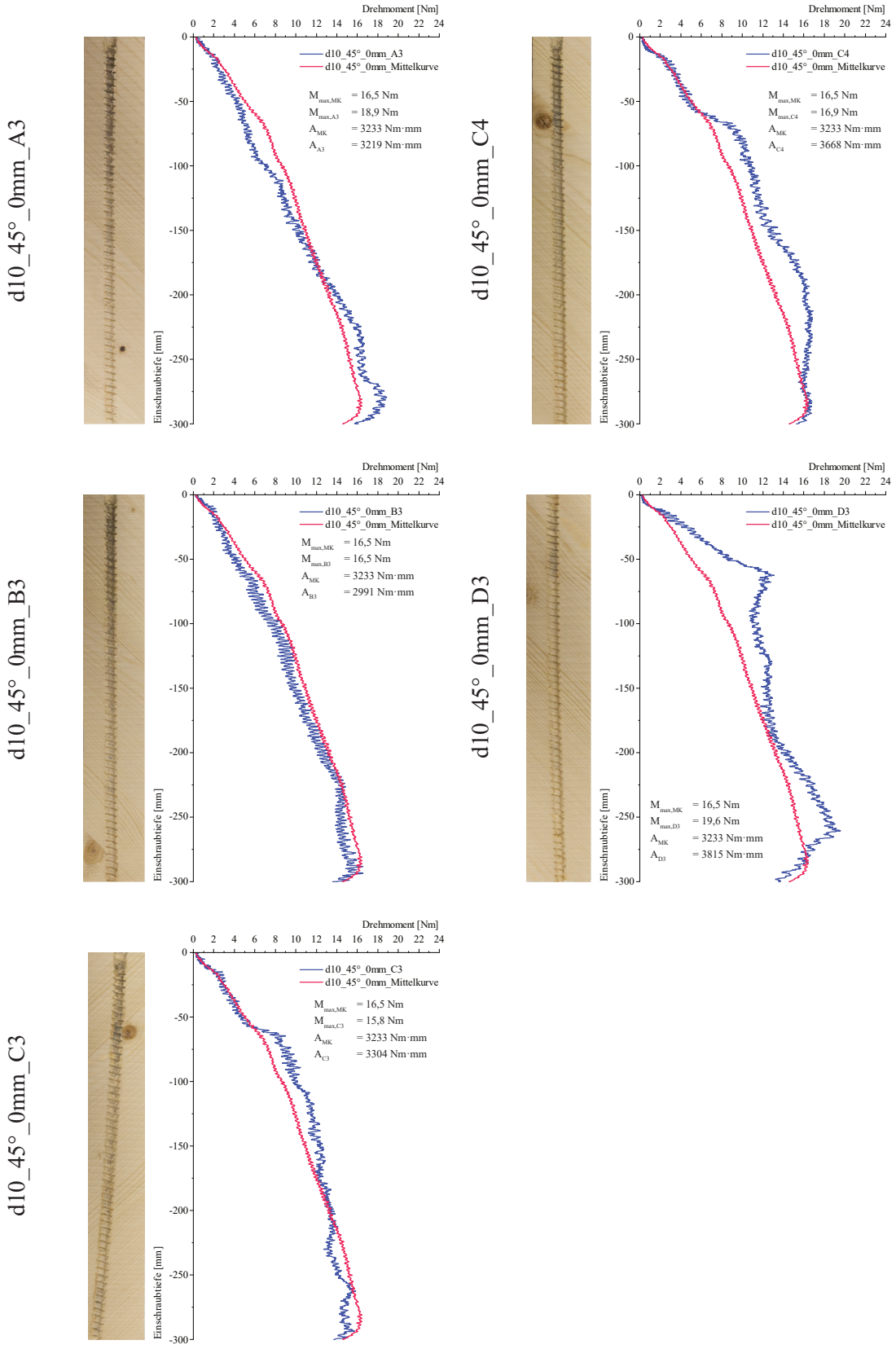


Abbildung B.56: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 45\,°$

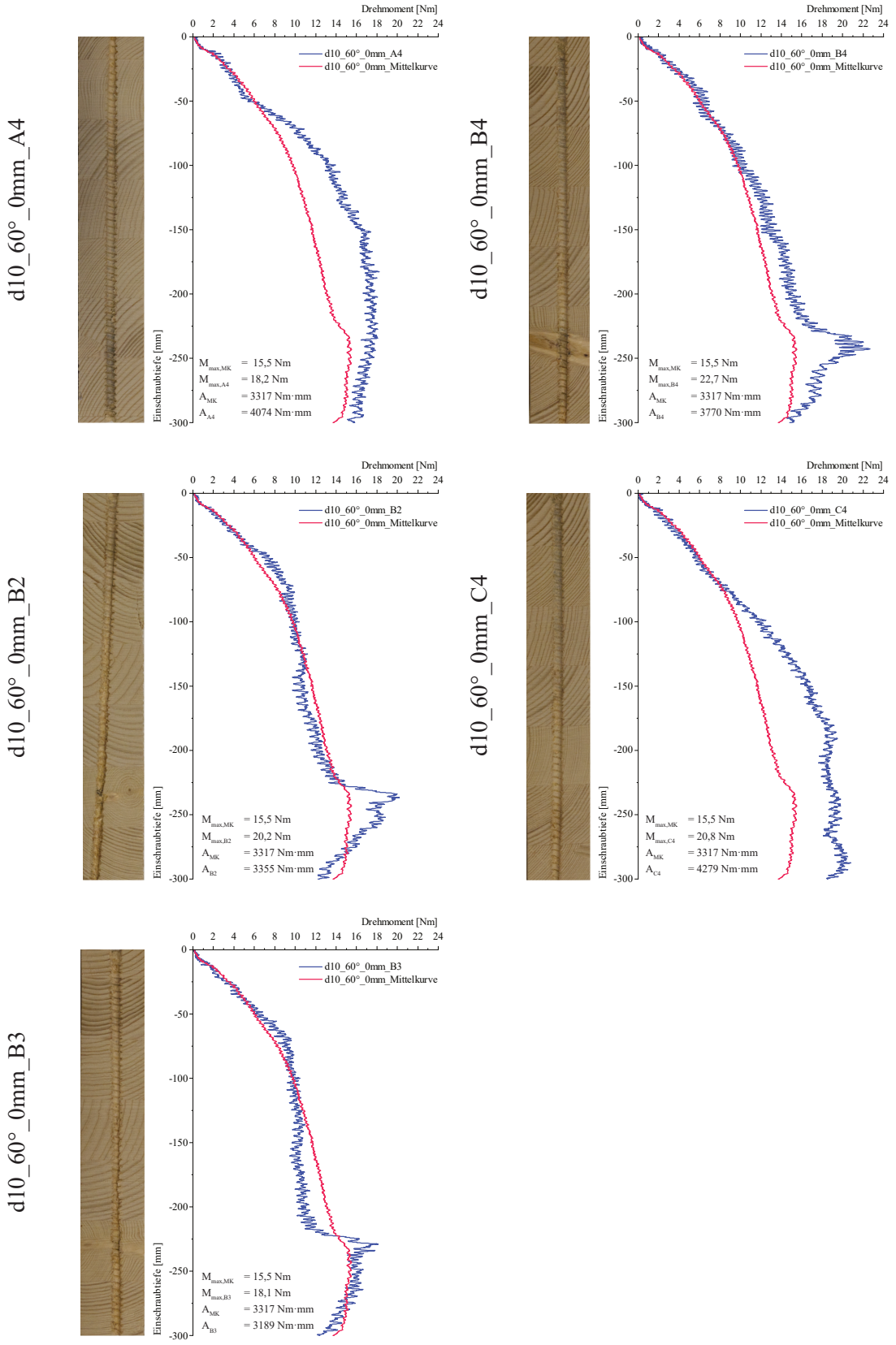


Abbildung B.57: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 60\,°$

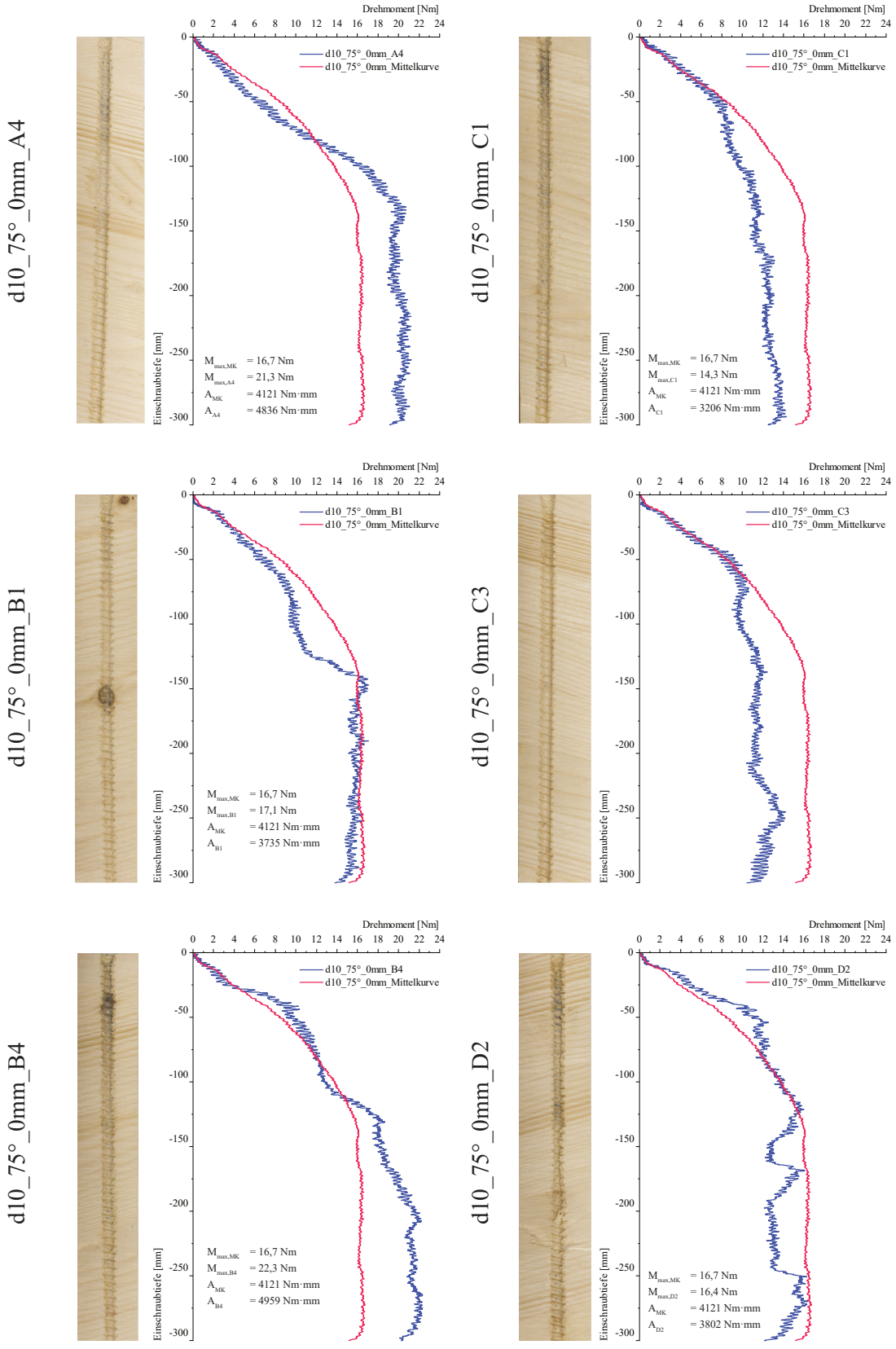


Abbildung B.58: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 75\,°$

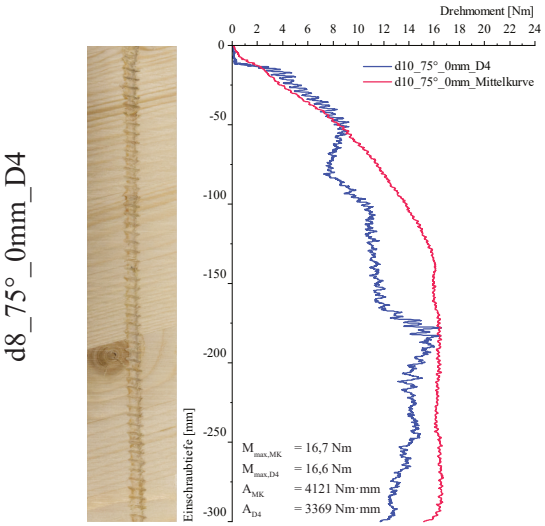


Abbildung B.59: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; α = 75 °

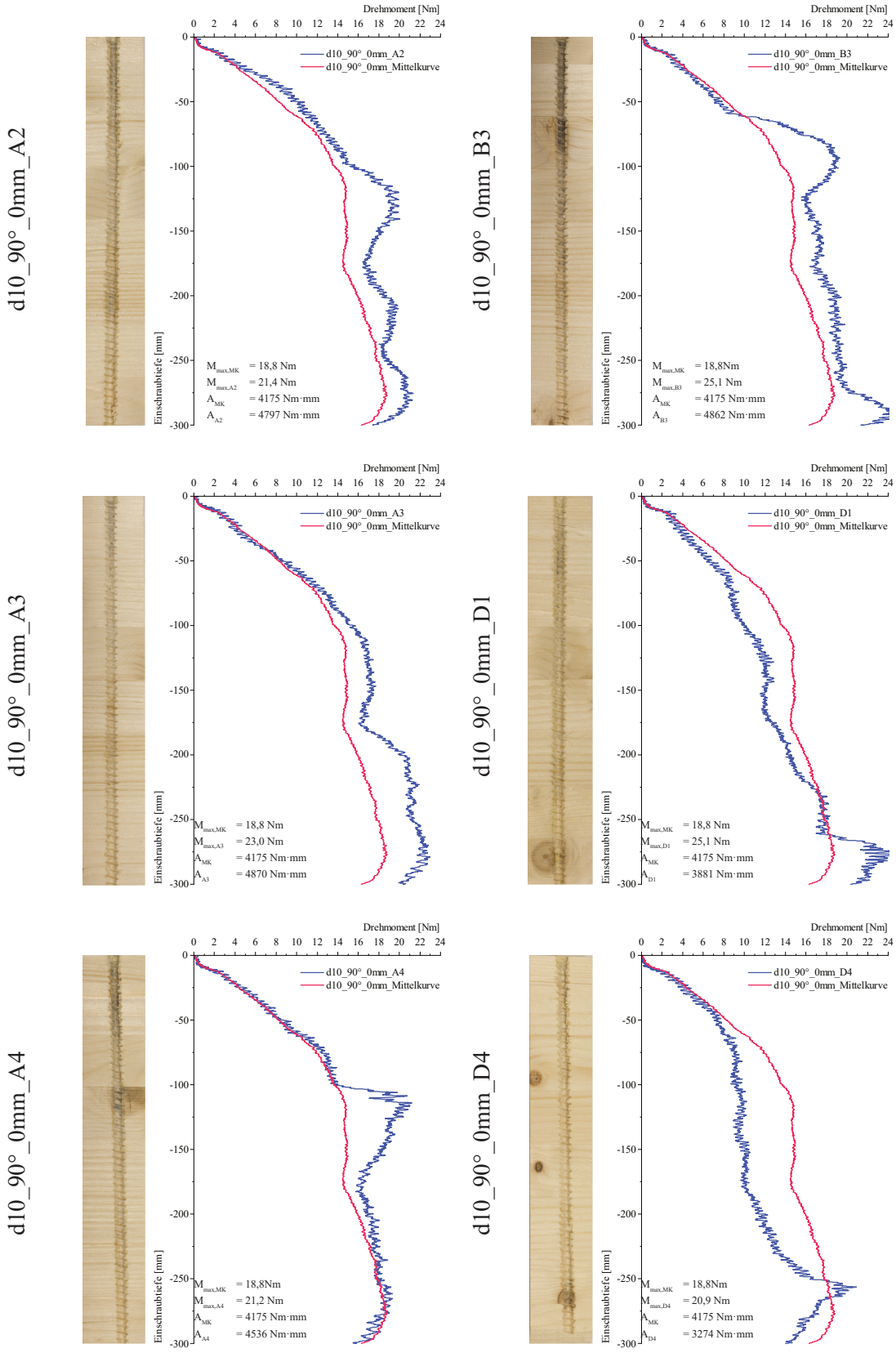


Abbildung B.60: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 0 mm; $\alpha = 90\,°$

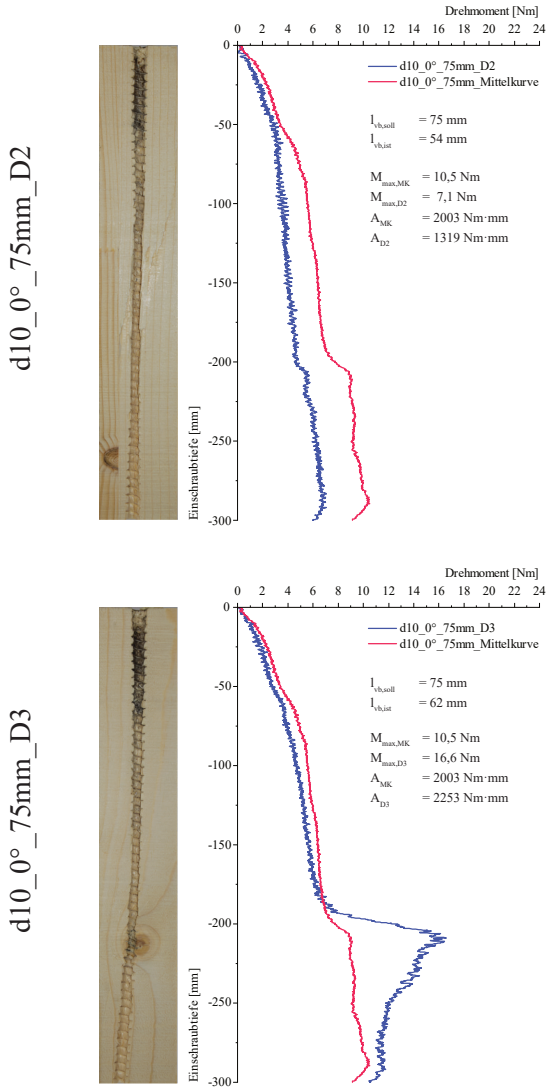


Abbildung B.61: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 0\,°$

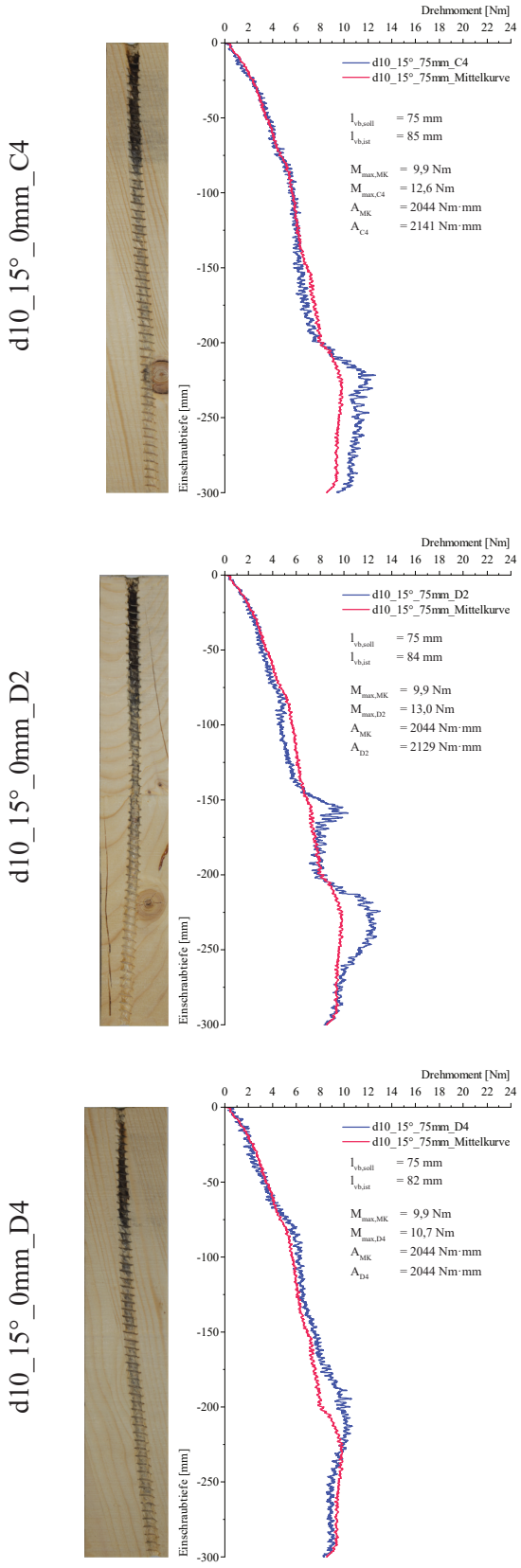


Abbildung B.62: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 15\,°$

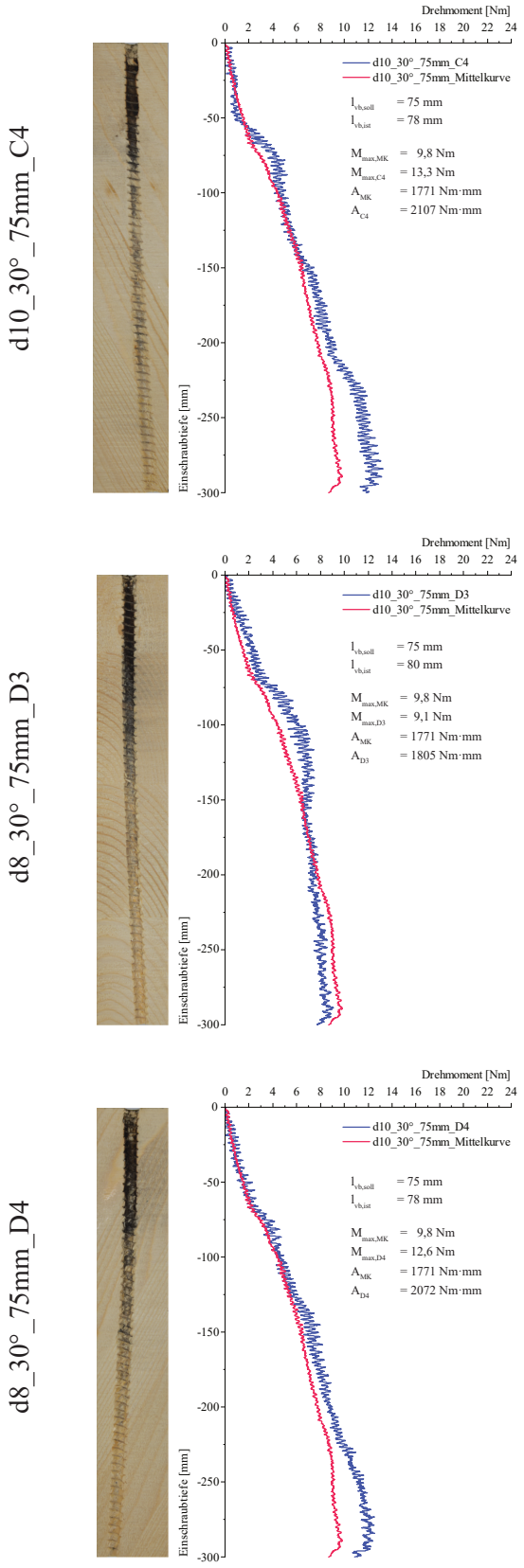


Abbildung B.63: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 30\,°$

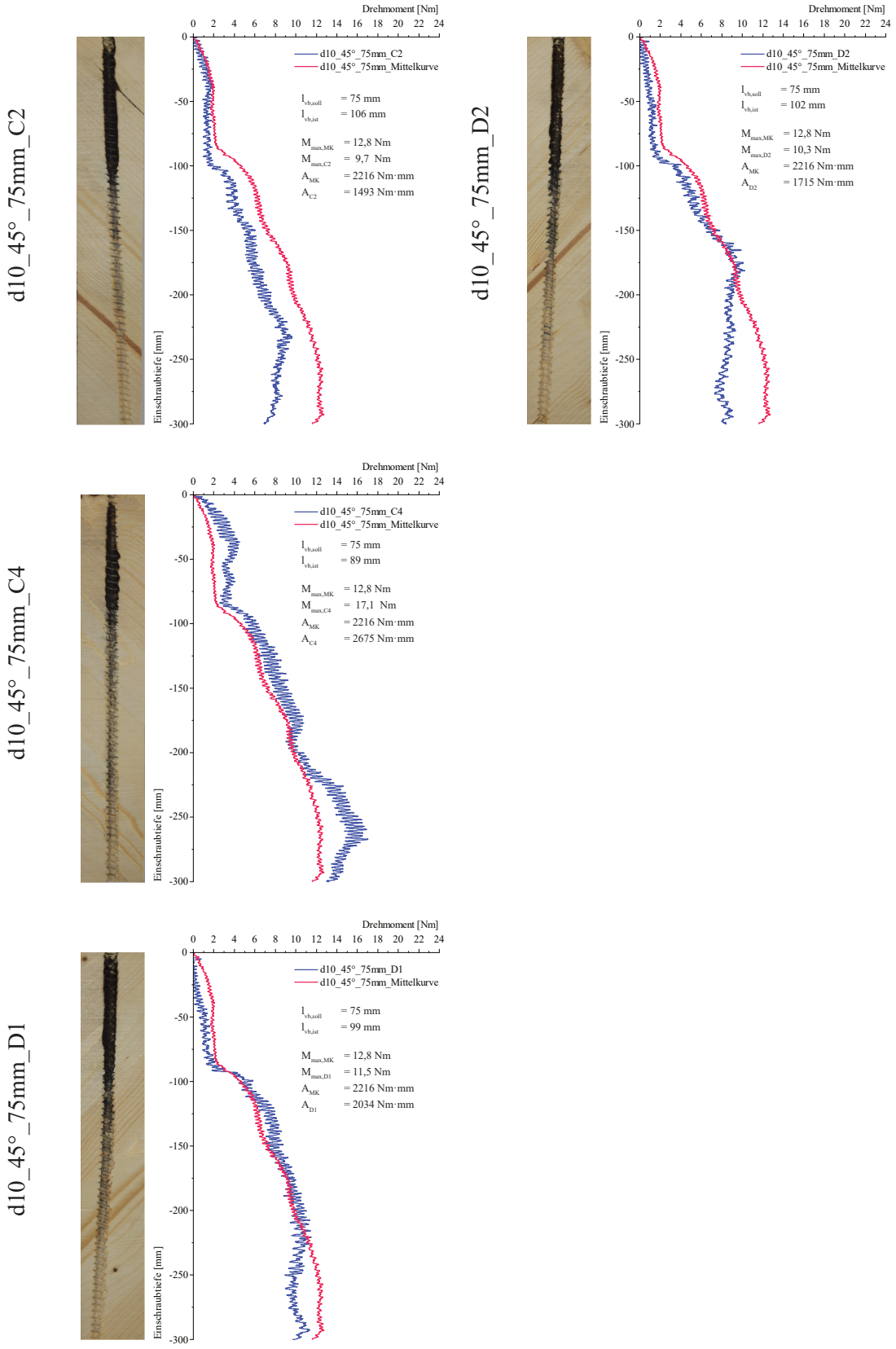


Abbildung B.64: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 45\,°$

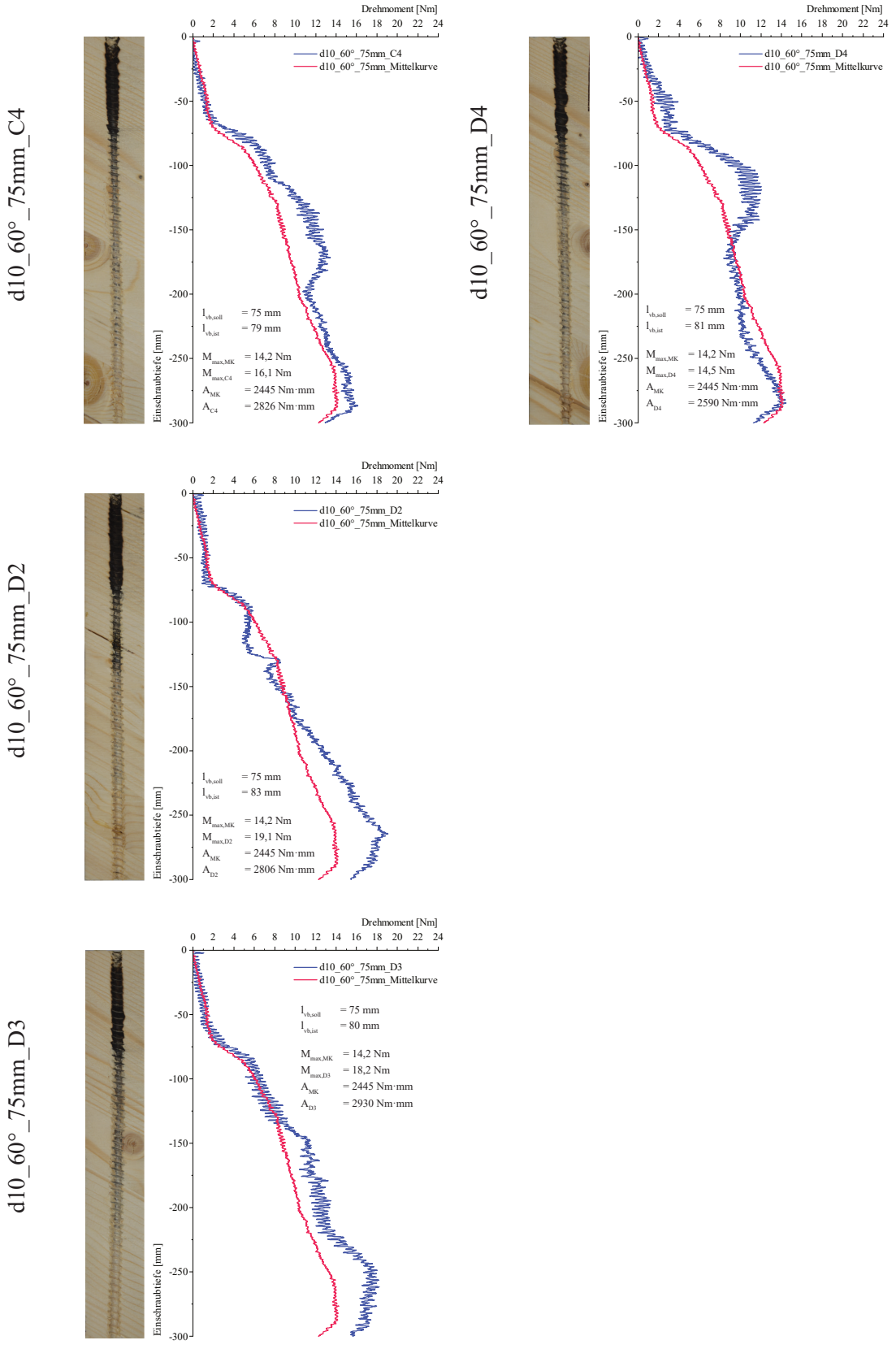


Abbildung B.65: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 60\,°$

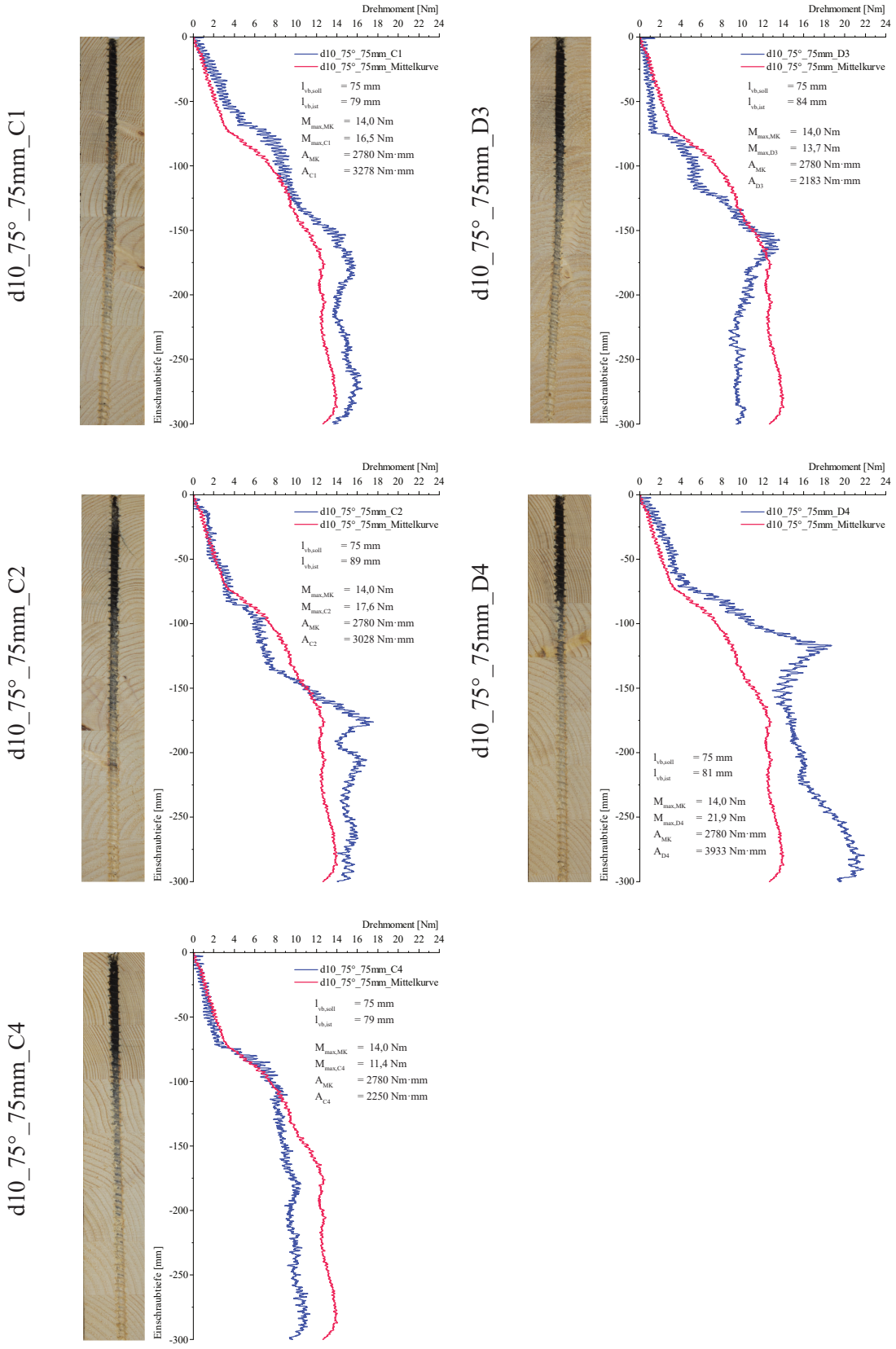


Abbildung B.66: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 75\,°$

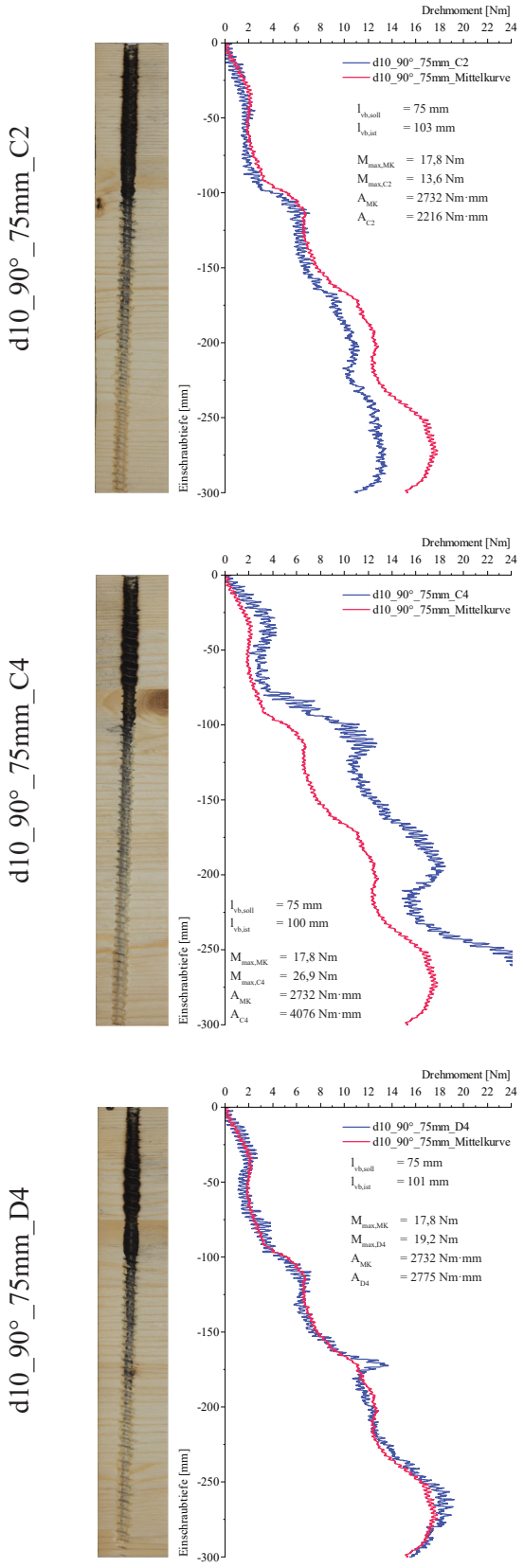


Abbildung B.67: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 75 mm; $\alpha = 90\,°$

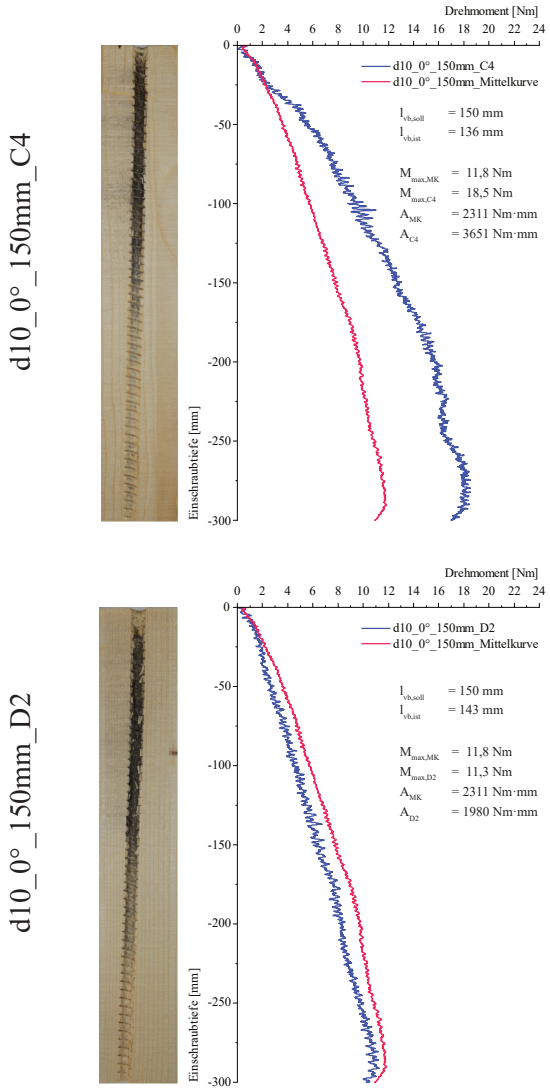


Abbildung B.68: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 0\,°$

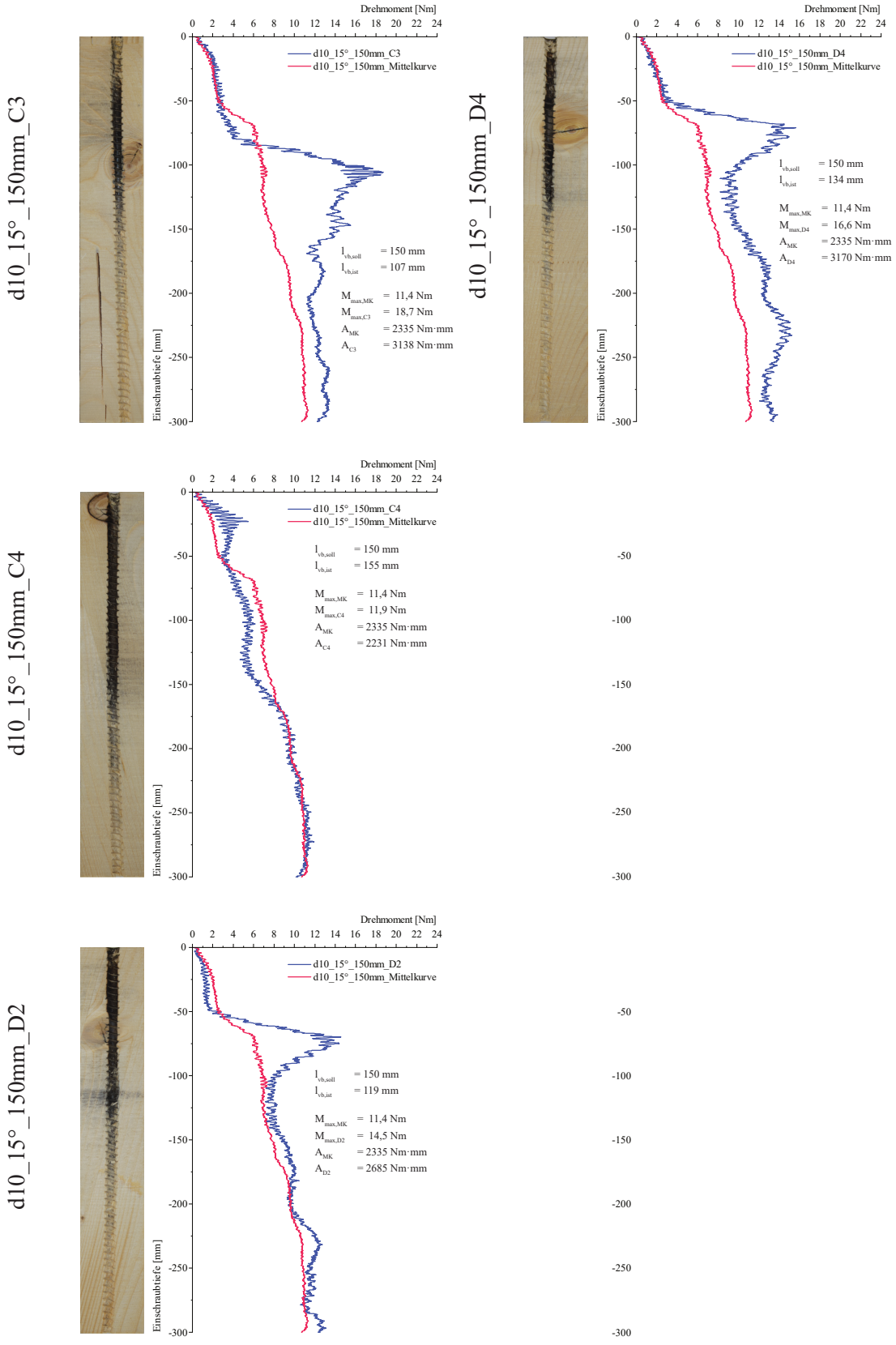


Abbildung B.69: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 15\,°$

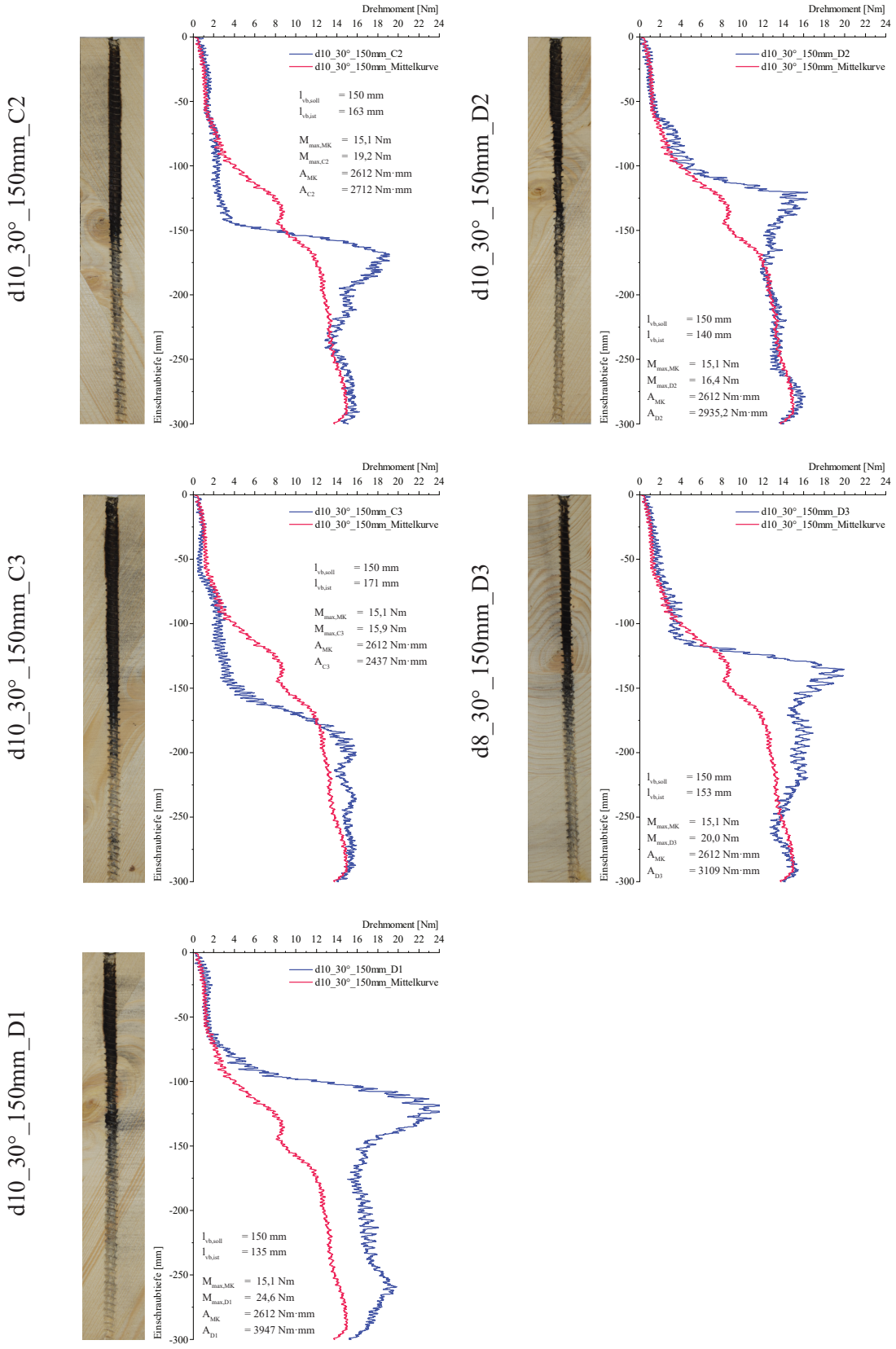


Abbildung B.70: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 30\,°$

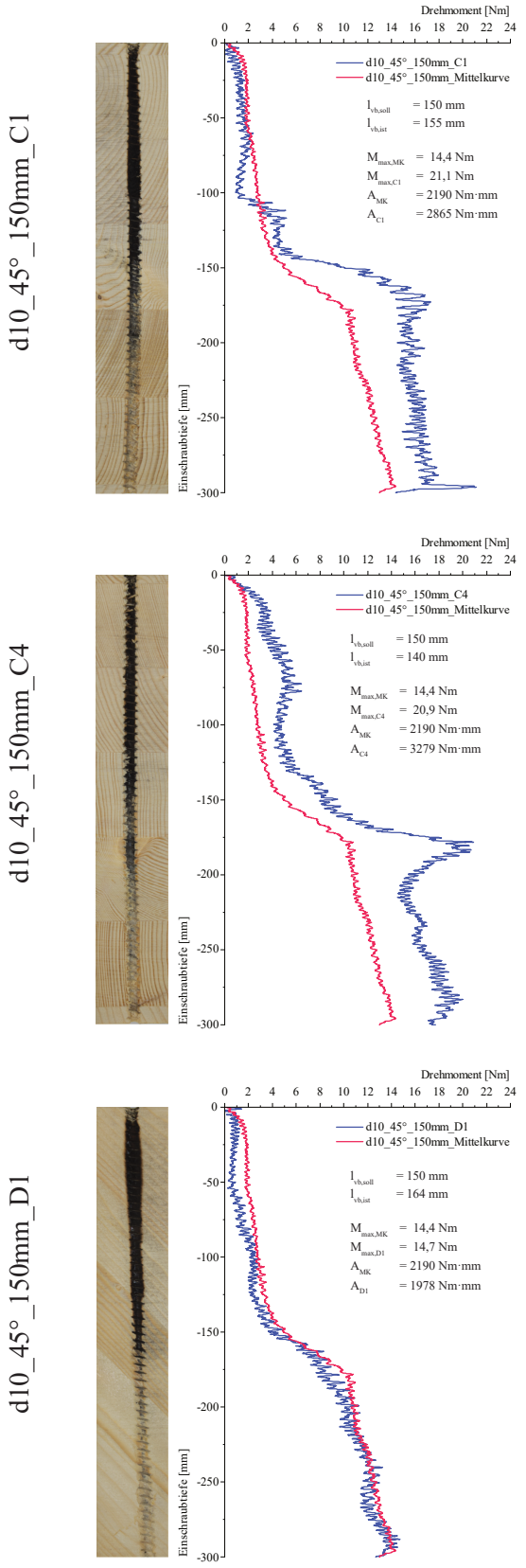


Abbildung B.71: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 45\,°$

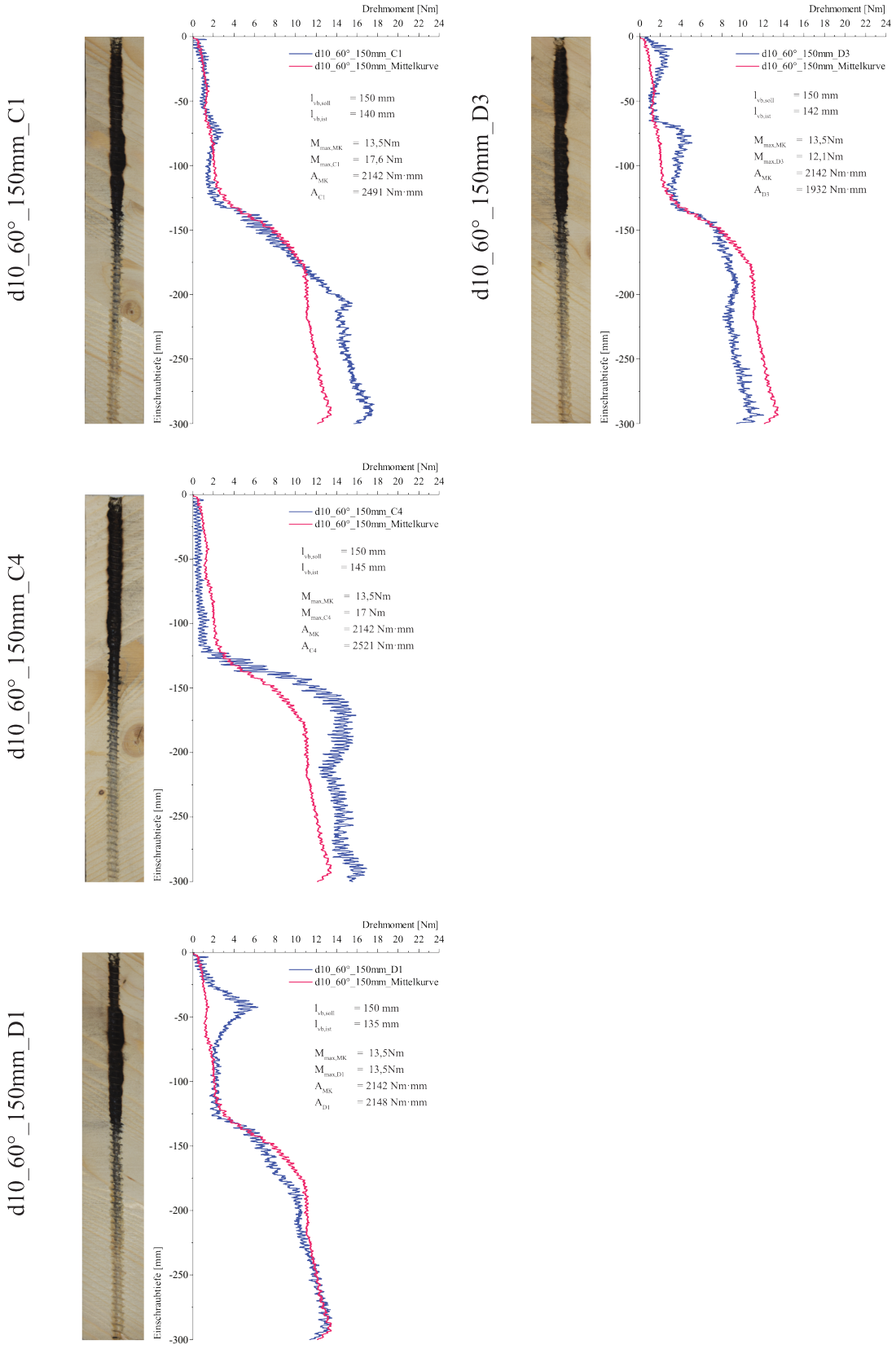


Abbildung B.72: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 60\,°$

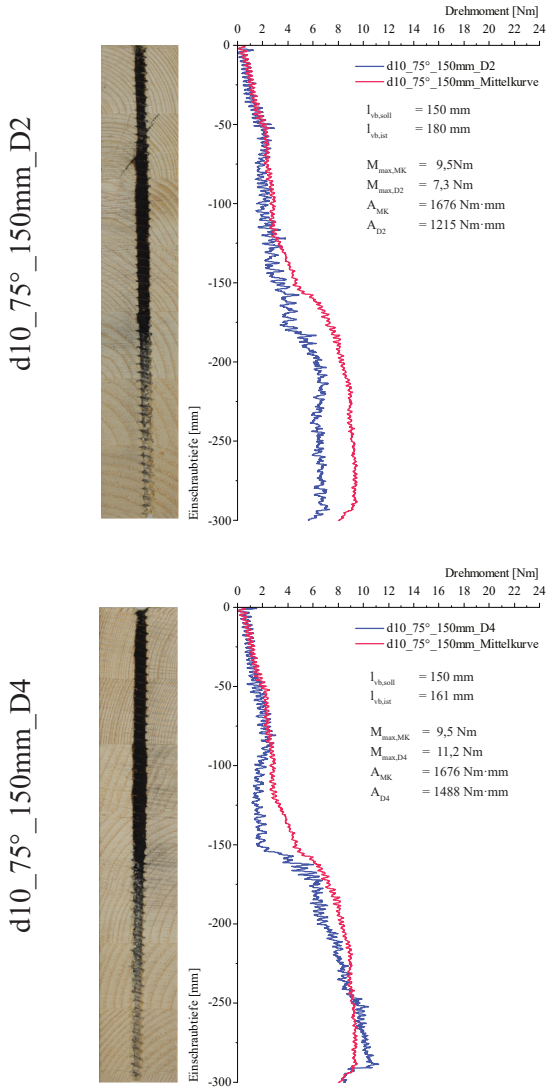


Abbildung B.73: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 75\,°$

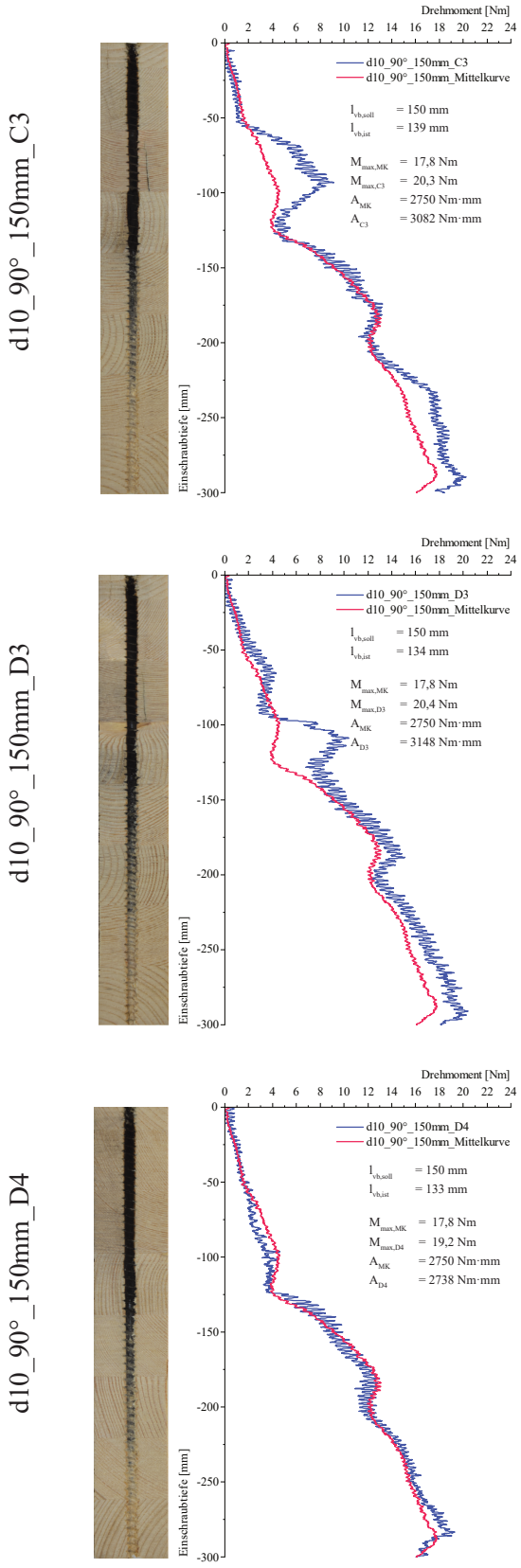


Abbildung B.74: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 150 mm; $\alpha = 90\,°$

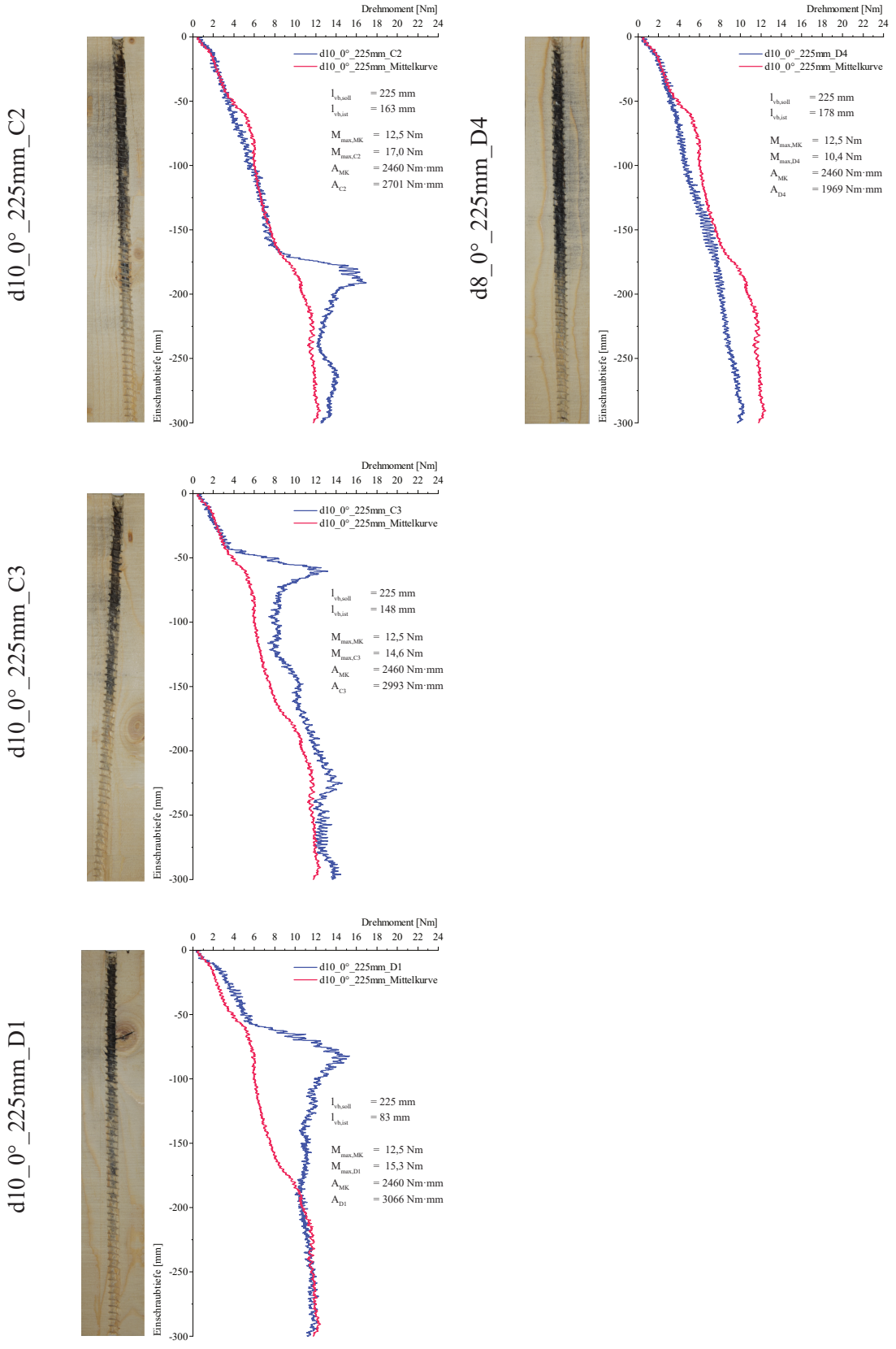


Abbildung B.75: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 0\,°$

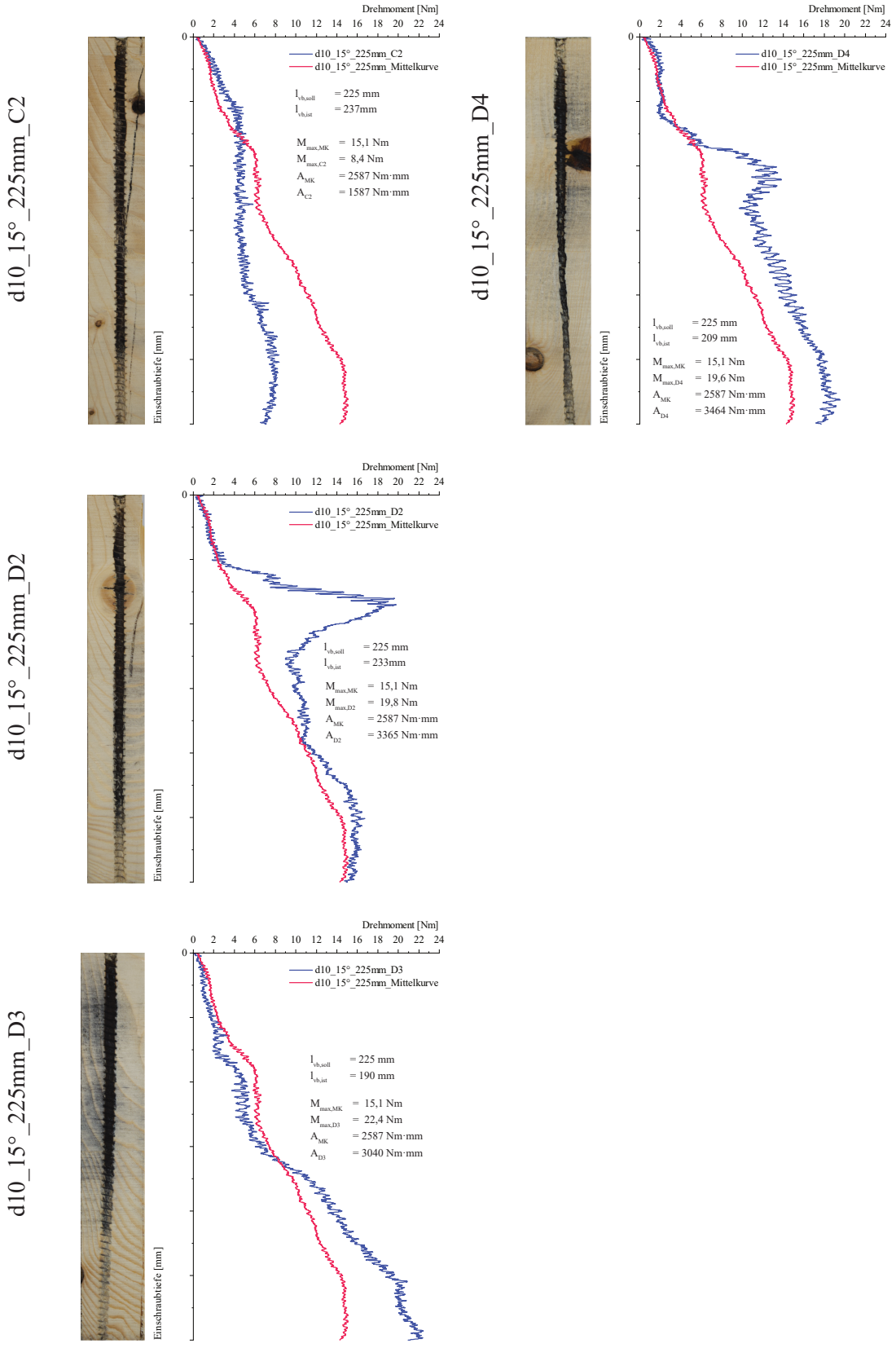


Abbildung B.76: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 15\,°$

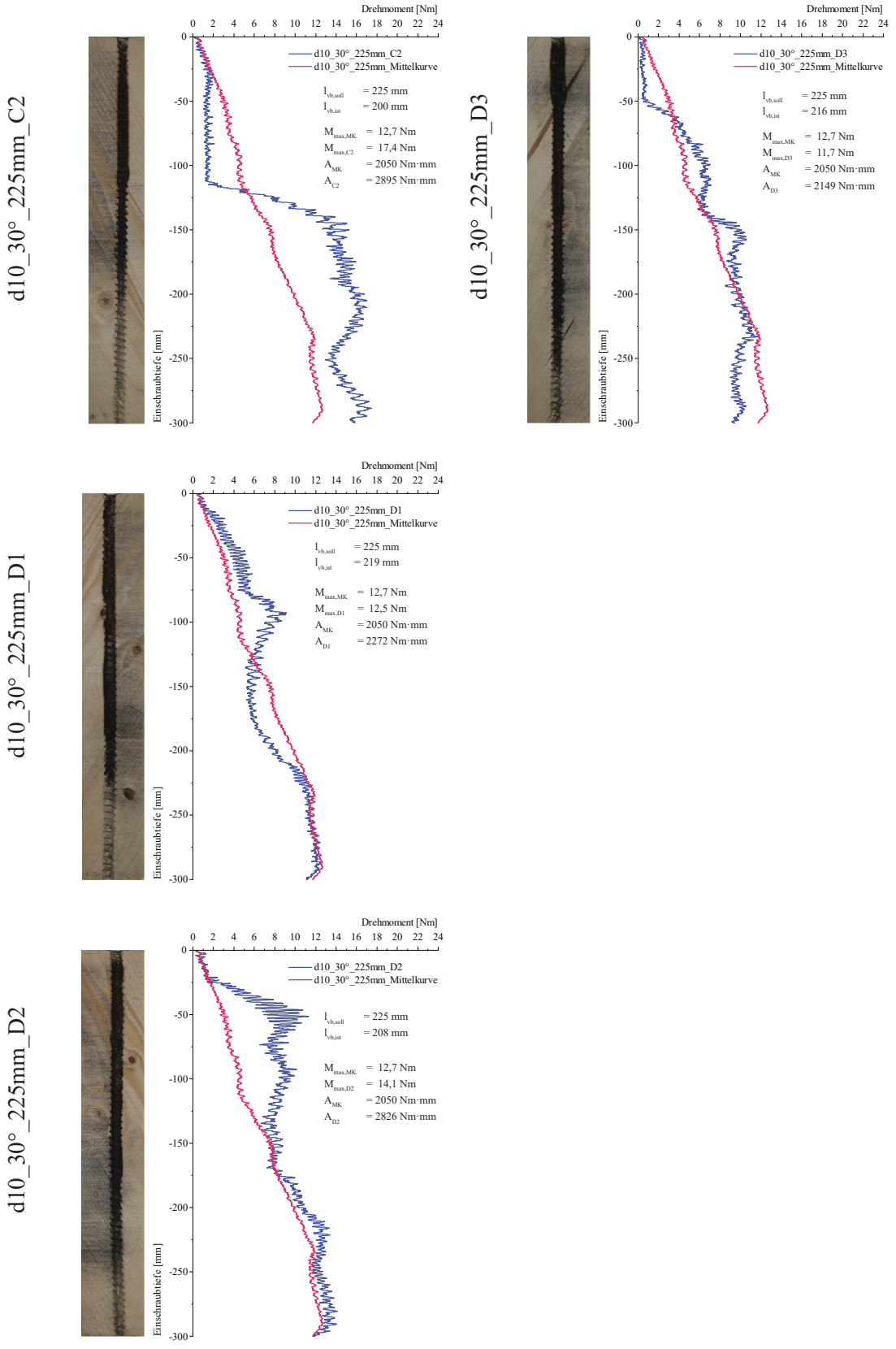


Abbildung B.77: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 30\,°$

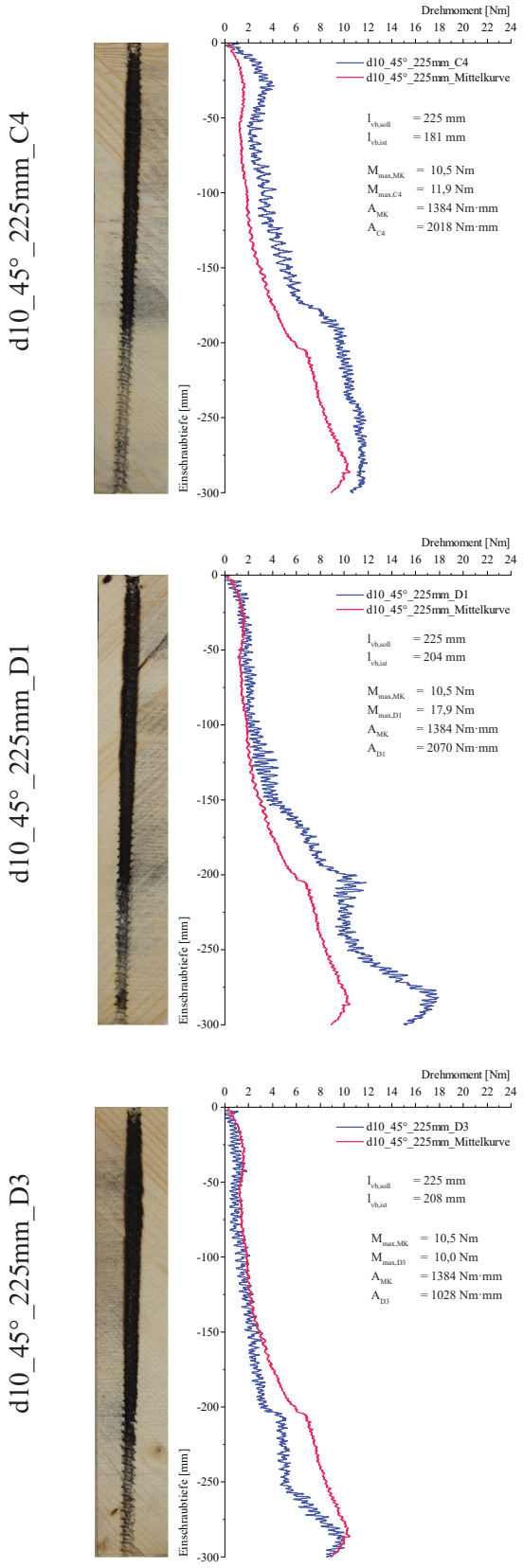


Abbildung B.78: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 45\,°$

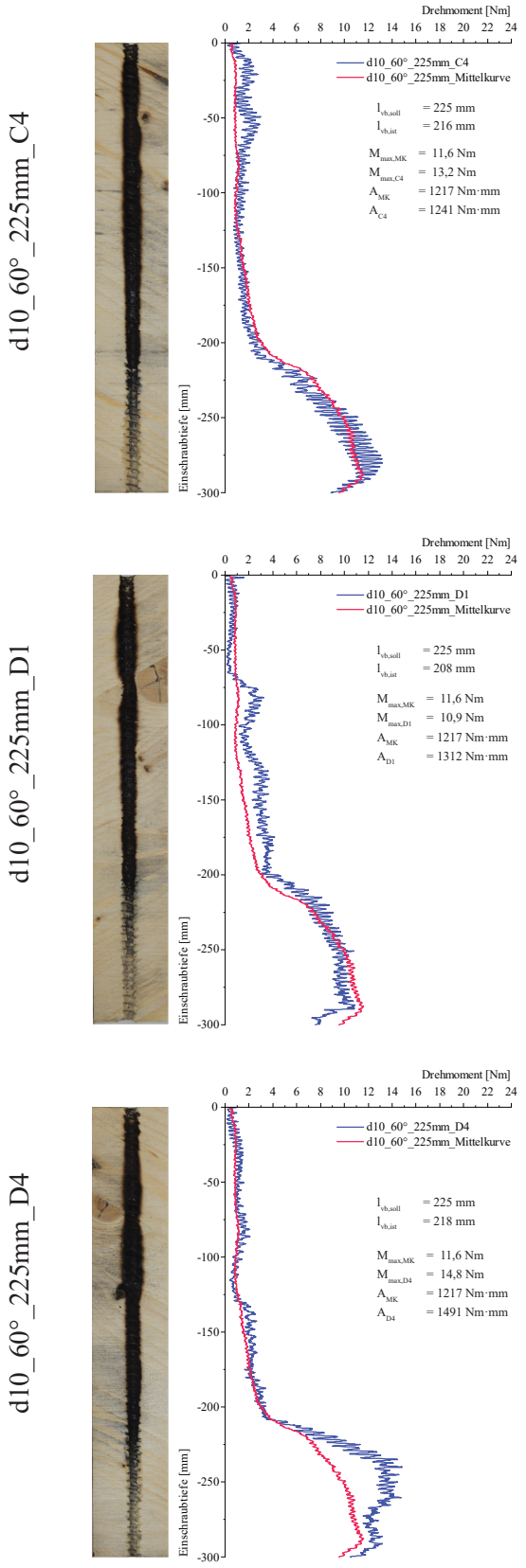


Abbildung B.79: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 60\,°$

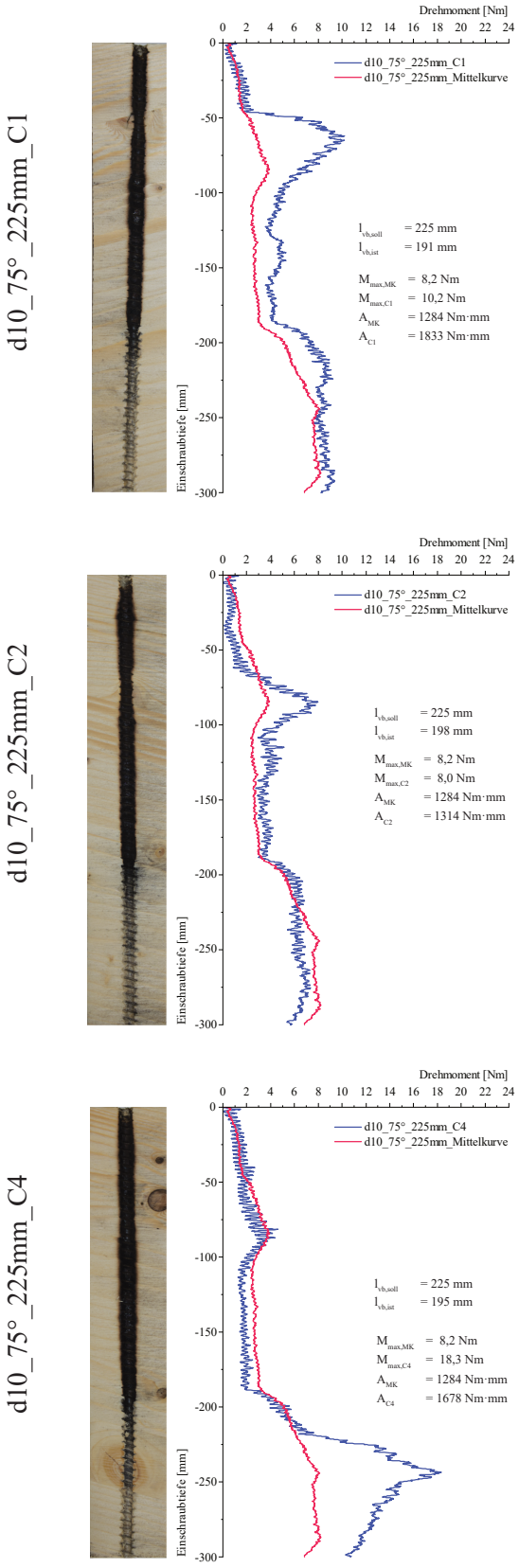


Abbildung B.80: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 75\,°$

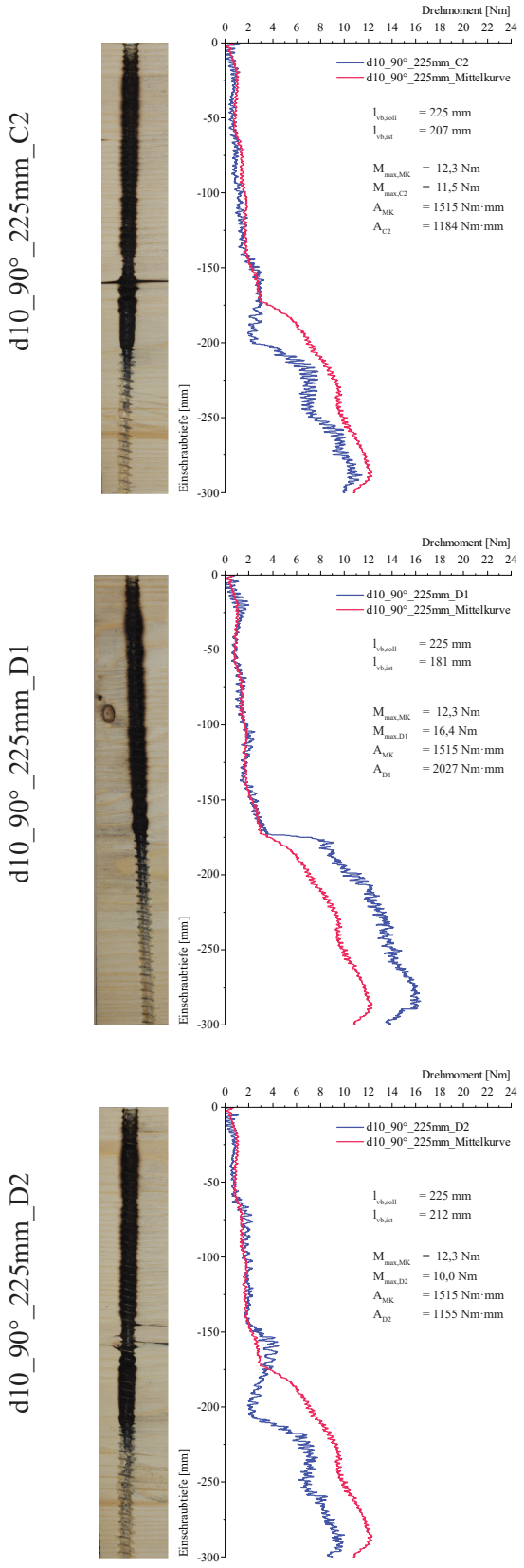


Abbildung B.81: Drehmomentkurven ausgewählter Einschraubungen d10; nicht vorgebohrt l_{vb}= 225 mm; $\alpha = 90\,°$

B.5 Protokolle der Ausziehversuche

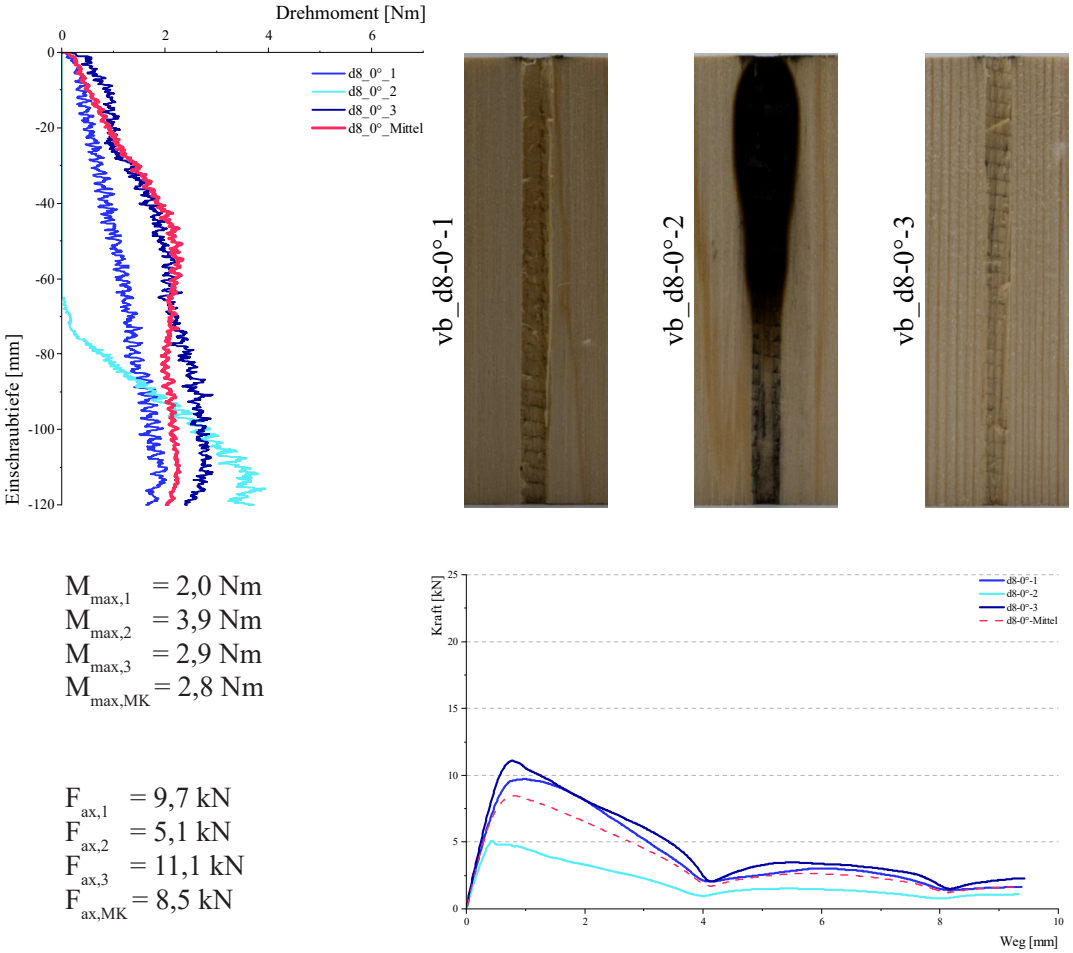
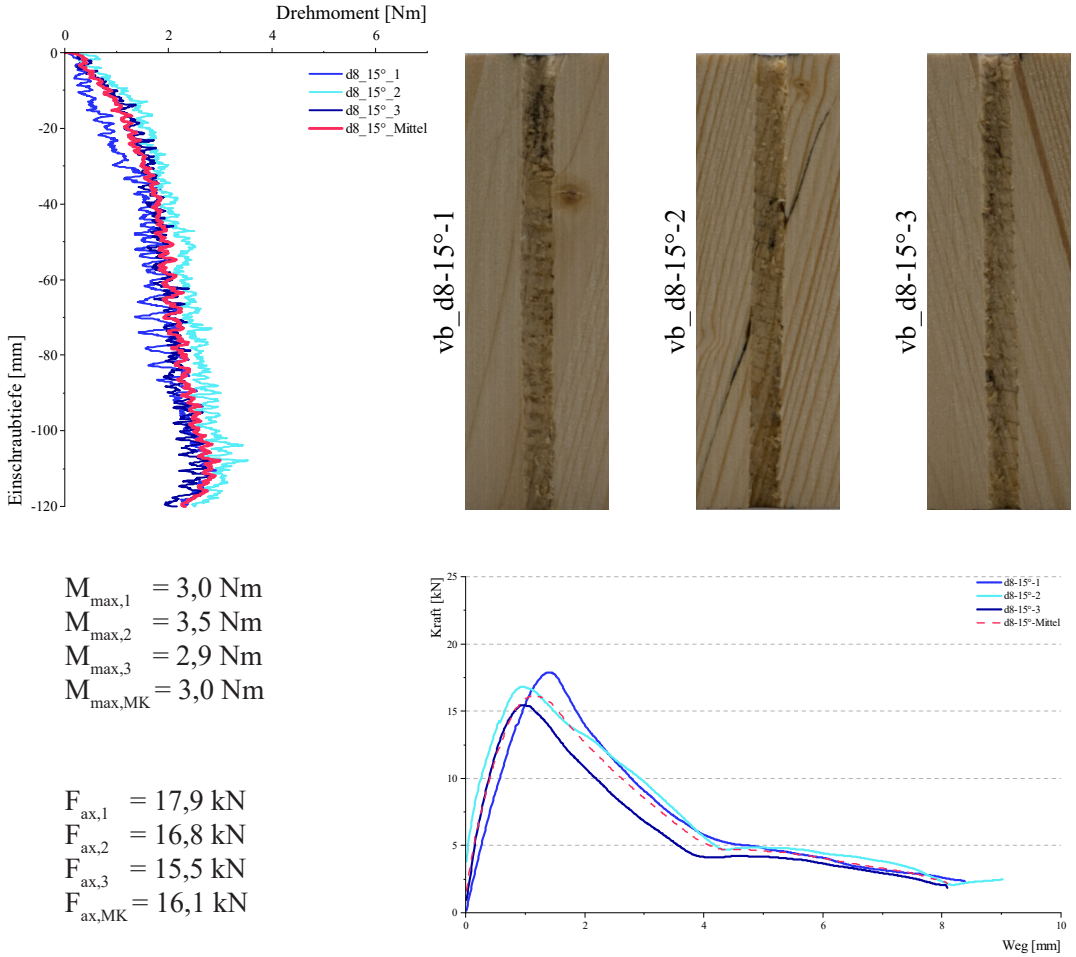


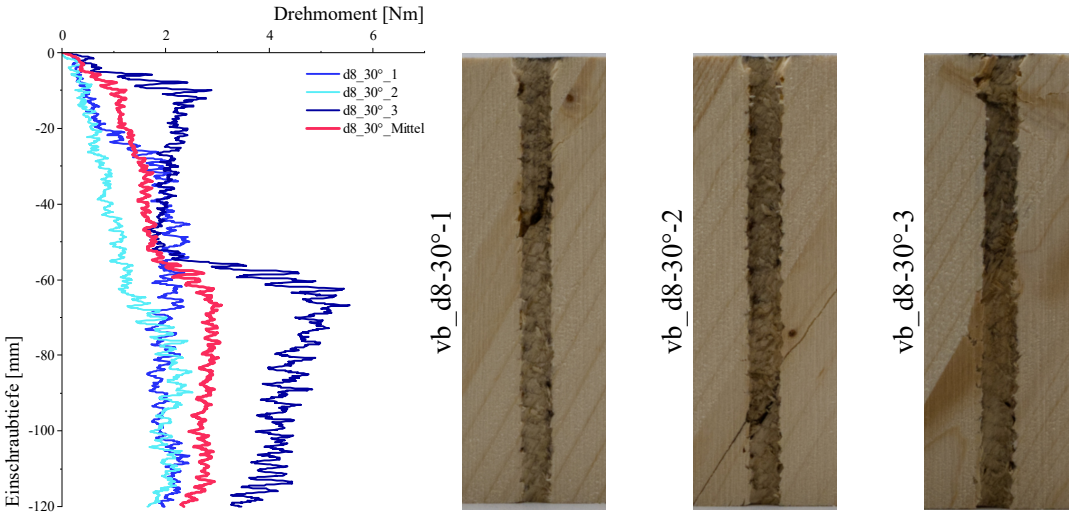
Abbildung B.82: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 0\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 3,0 Nm
$M_{max,2}$ = 3,5 Nm
$M_{max,3}$ = 2,9 Nm
$M_{max,MK}$ = 3,0 Nm

$F_{ax,1}$ = 17,9 kN
$F_{ax,2}$ = 16,8 kN
$F_{ax,3}$ = 15,5 kN
$F_{ax,MK}$ = 16,1 kN

Abbildung B.83: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 15\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 2,5 Nm
$M_{max,2}$ = 2,5 Nm
$M_{max,3}$ = 5,6 Nm
$M_{max,MK}$ = 3,1 Nm

$F_{ax,1}$ = 17,8 kN
$F_{ax,2}$ = 16,5 kN
$F_{ax,3}$ = 21,2 kN
$F_{ax,MK}$ = 17,7 kN

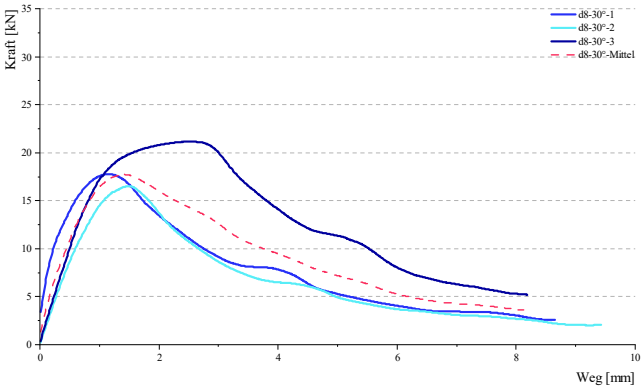
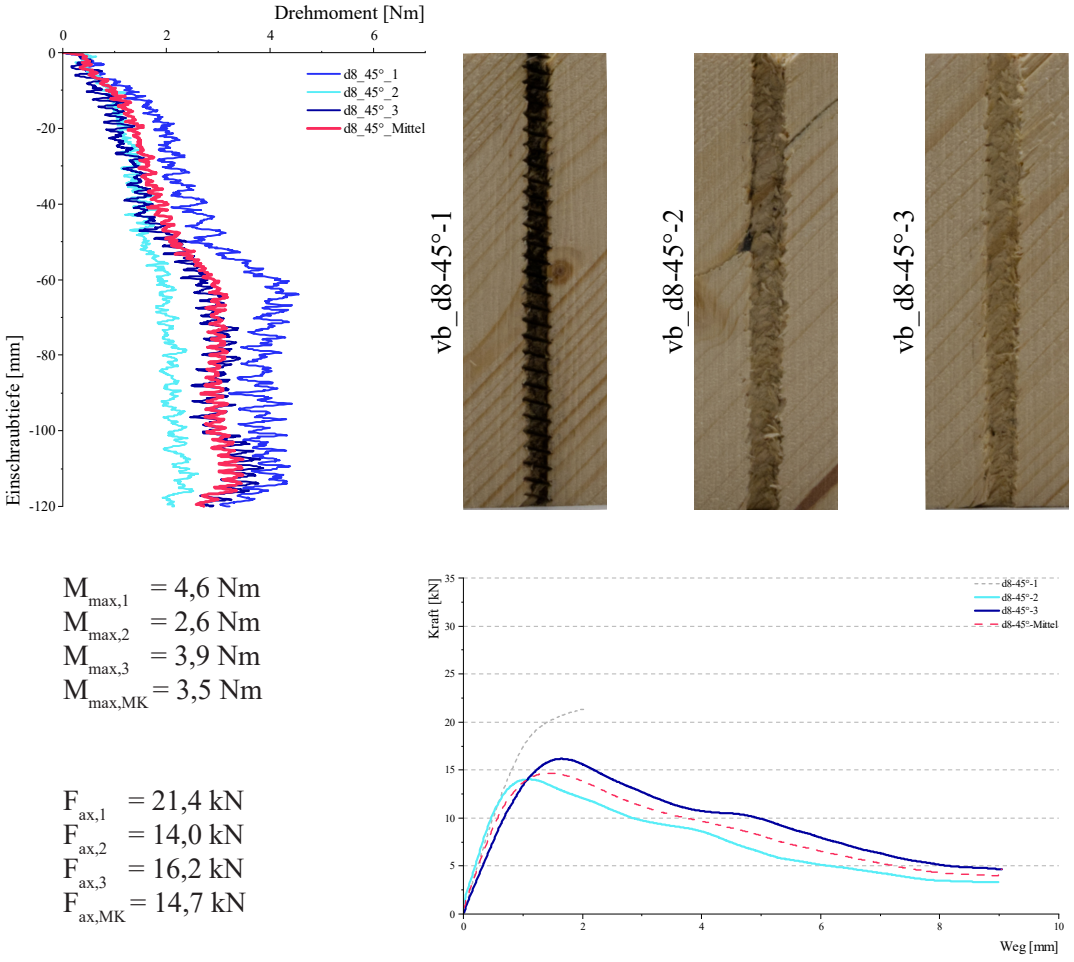


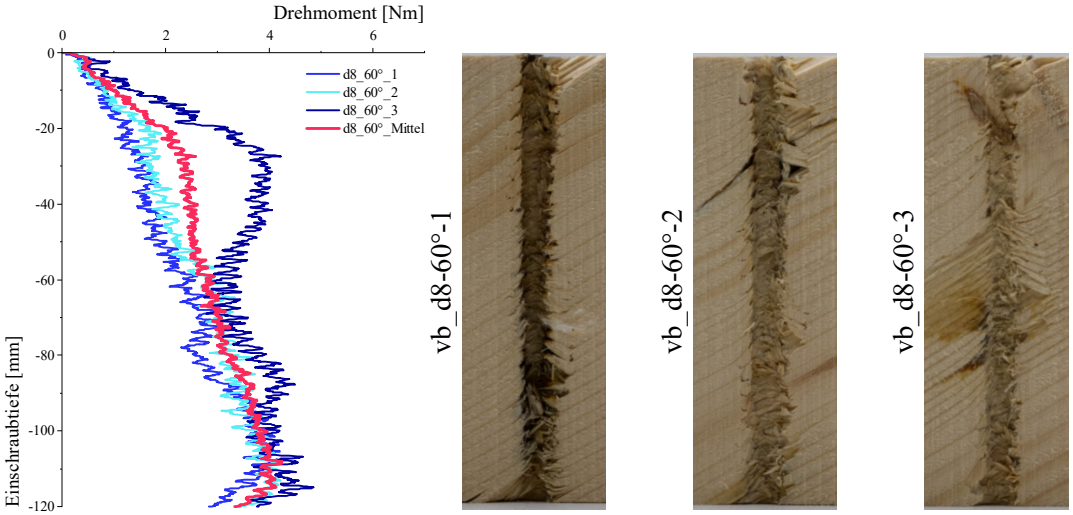
Abbildung B.84: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 30\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 4,6 Nm
$M_{max,2}$ = 2,6 Nm
$M_{max,3}$ = 3,9 Nm
$M_{max,MK}$ = 3,5 Nm

$F_{ax,1}$ = 21,4 kN
$F_{ax,2}$ = 14,0 kN
$F_{ax,3}$ = 16,2 kN
$F_{ax,MK}$ = 14,7 kN

Abbildung B.85: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 45\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 4,2 Nm
$M_{max,2}$ = 4,2 Nm
$M_{max,3}$ = 4,8 Nm
$M_{max,MK}$ = 4,2 Nm

$F_{ax,1}$ = 16,6 kN
$F_{ax,2}$ = 17,6 kN
$F_{ax,3}$ = 19,1 kN
$F_{ax,MK}$ = 17,7 kN

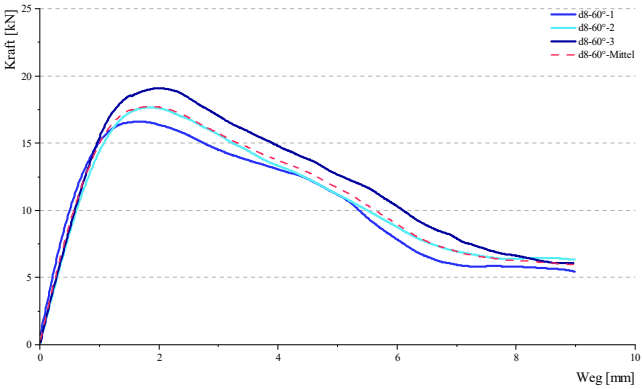
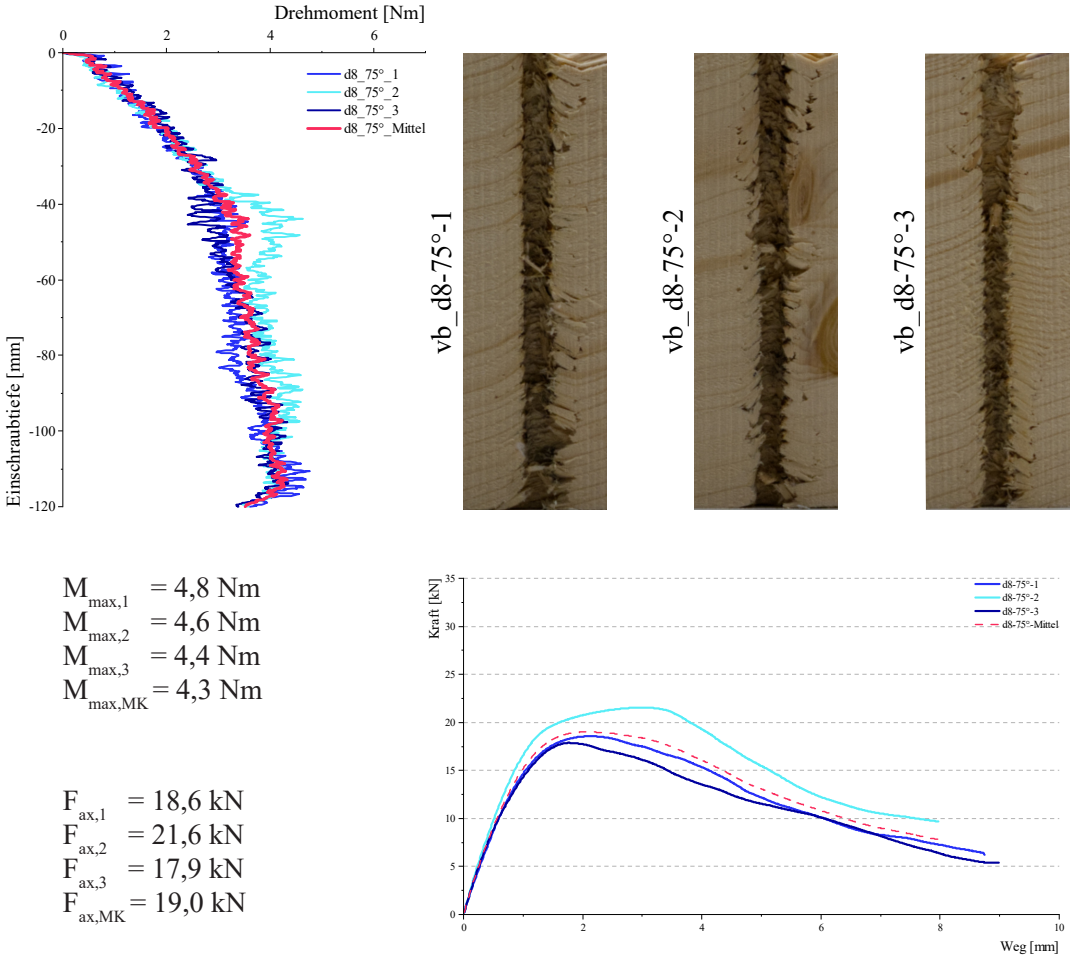


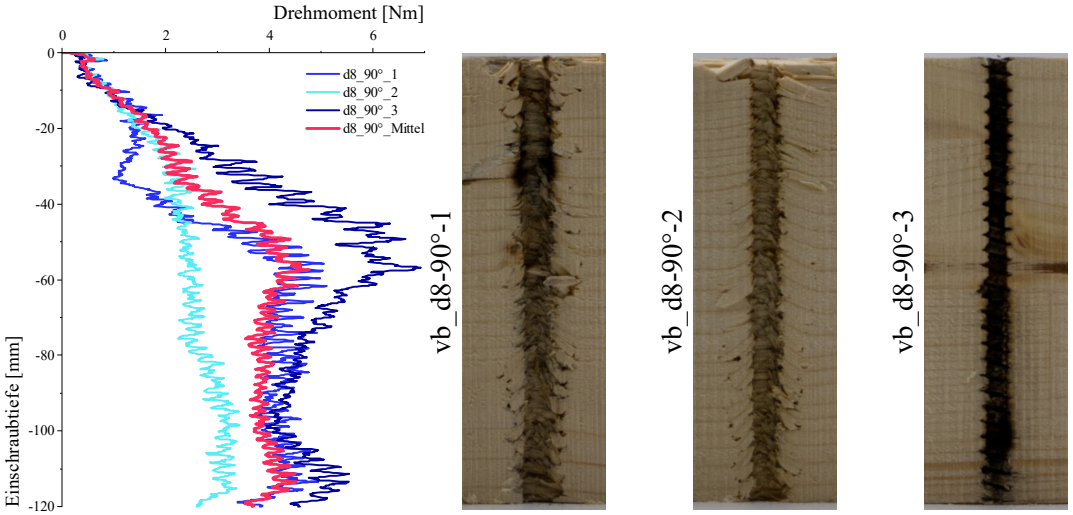
Abbildung B.86: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 60\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 4,8 Nm
$M_{max,2}$ = 4,6 Nm
$M_{max,3}$ = 4,4 Nm
$M_{max,MK}$ = 4,3 Nm

$F_{ax,1}$ = 18,6 kN
$F_{ax,2}$ = 21,6 kN
$F_{ax,3}$ = 17,9 kN
$F_{ax,MK}$ = 19,0 kN

Abbildung B.87: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, α = 75 °, l_{eff} = 15d, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 5,1 Nm
$M_{max,2}$ = 3,4 Nm
$M_{max,3}$ = 6,9 Nm
$M_{max,MK}$ = 4,8 Nm

$F_{ax,1}$ = 19,3 kN
$F_{ax,2}$ = 16,8 kN
$F_{ax,3}$ = 21,2 kN
$F_{ax,MK}$ = 18,0 kN

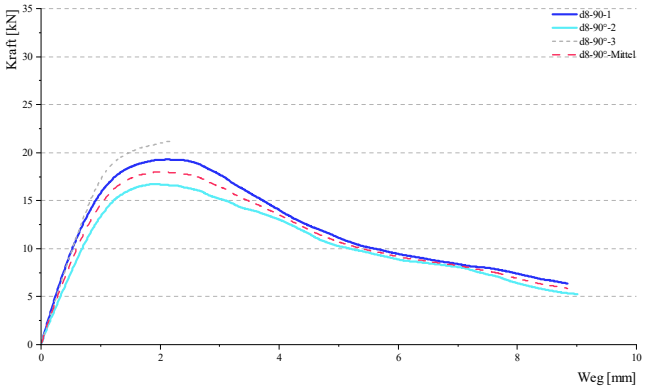
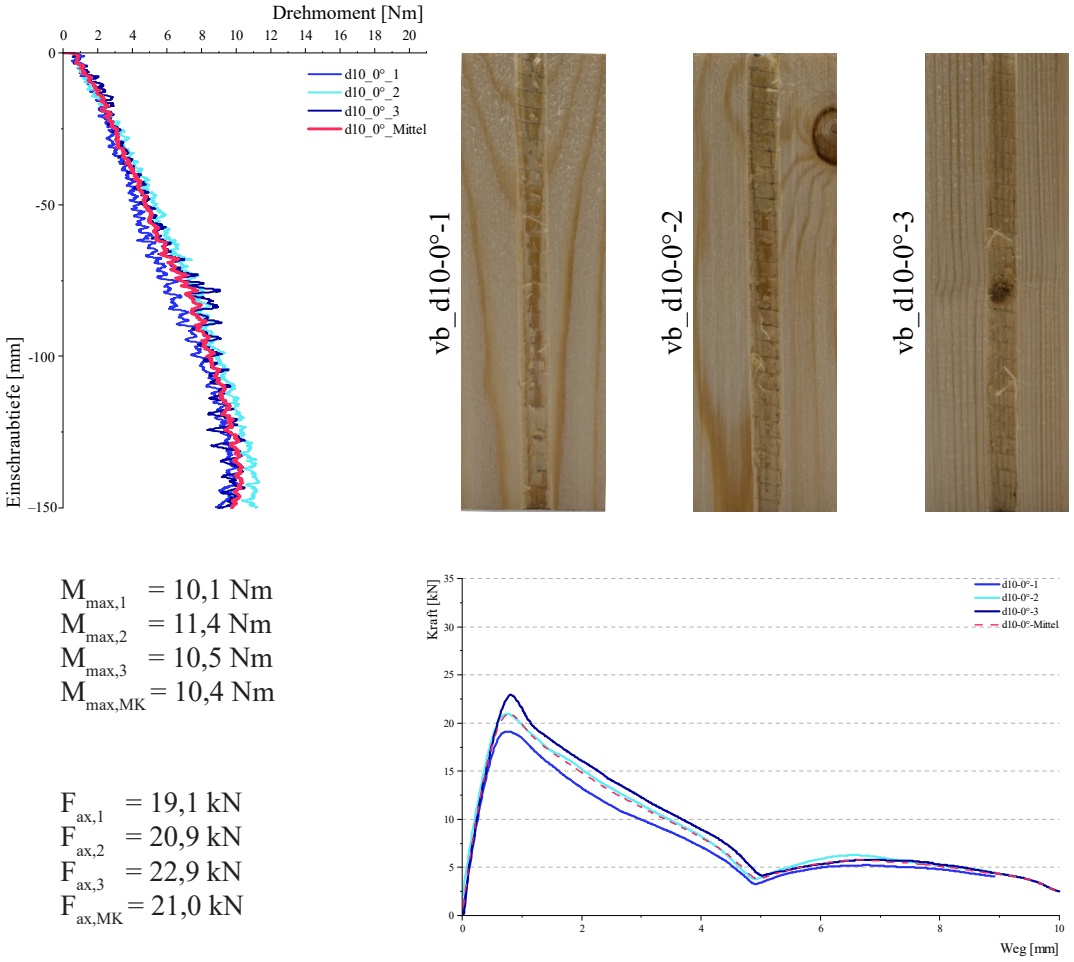


Abbildung B.88: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d8, $\alpha = 90\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 10,1 Nm
$M_{max,2}$ = 11,4 Nm
$M_{max,3}$ = 10,5 Nm
$M_{max,MK}$ = 10,4 Nm

$F_{ax,1}$ = 19,1 kN
$F_{ax,2}$ = 20,9 kN
$F_{ax,3}$ = 22,9 kN
$F_{ax,MK}$ = 21,0 kN

Abbildung B.89: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 0\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt

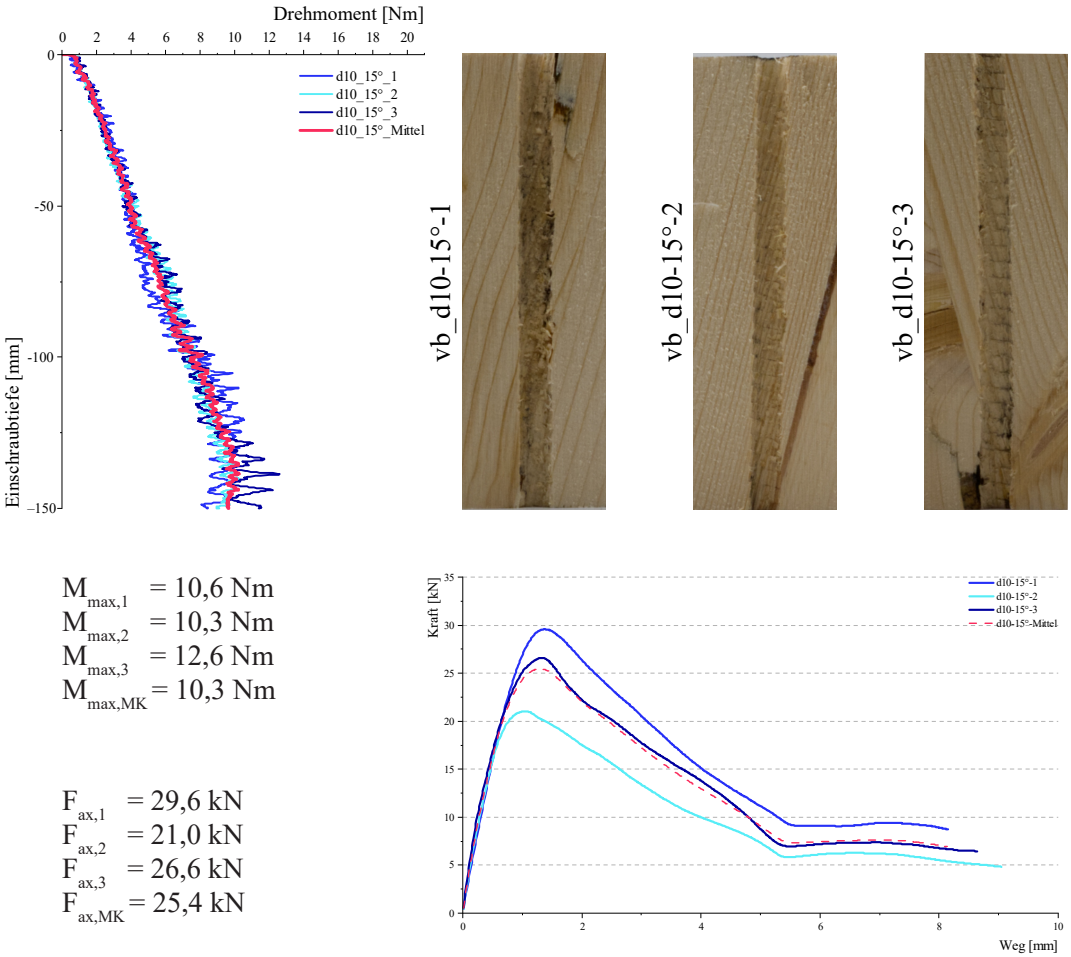


Abbildung B.90: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 15\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt

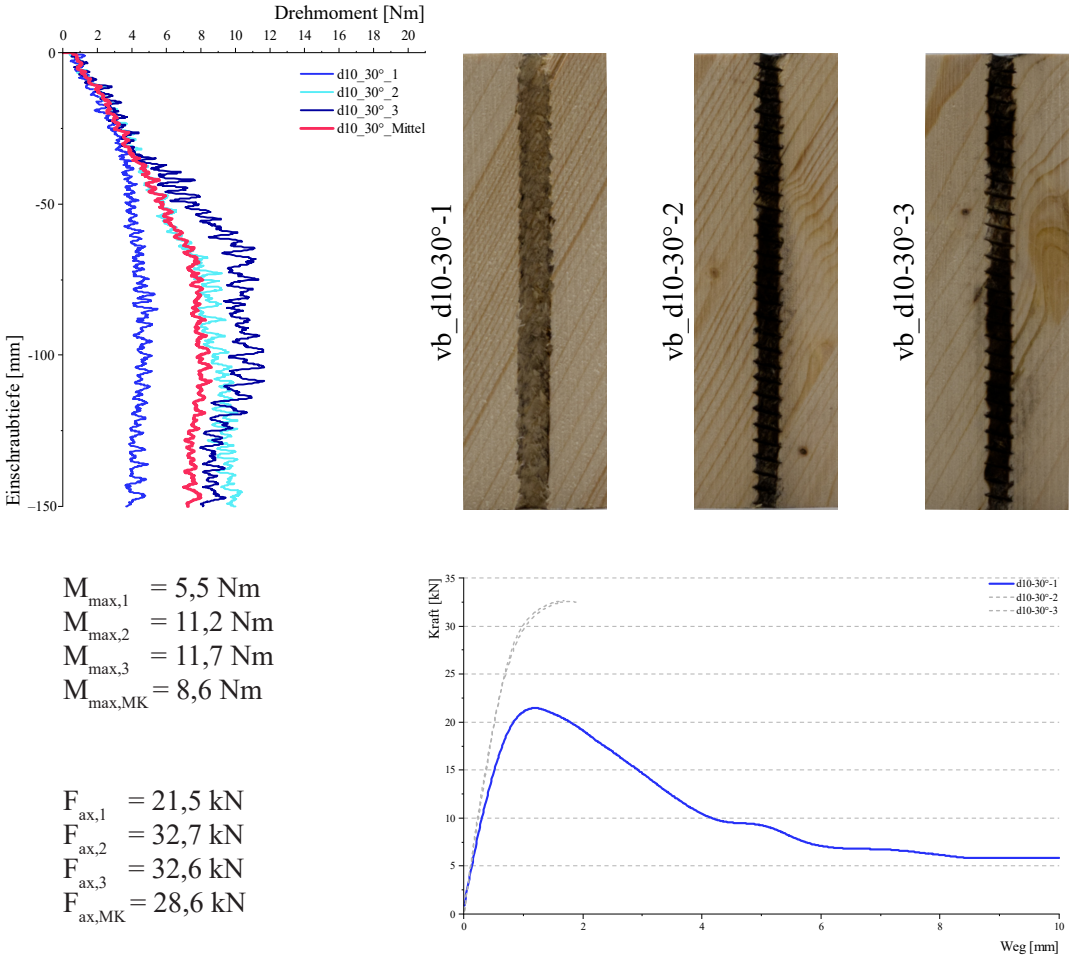
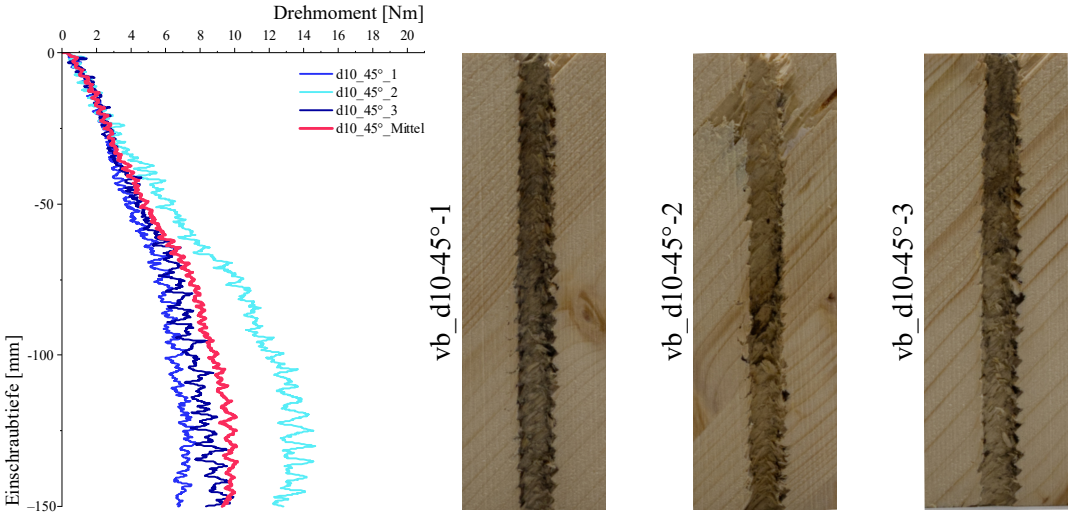


Abbildung B.91: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 30\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 7,9 Nm
$M_{max,2}$ = 14,6 Nm
$M_{max,3}$ = 10,0 Nm
$M_{max,MK}$ = 10,2 Nm

$F_{ax,1}$ = 24,0 kN
$F_{ax,2}$ = 28,6 kN
$F_{ax,3}$ = 29,1 kN
$F_{ax,MK}$ = 26,8 kN

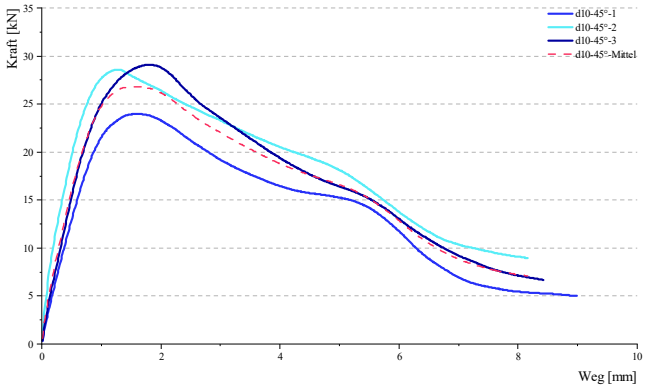
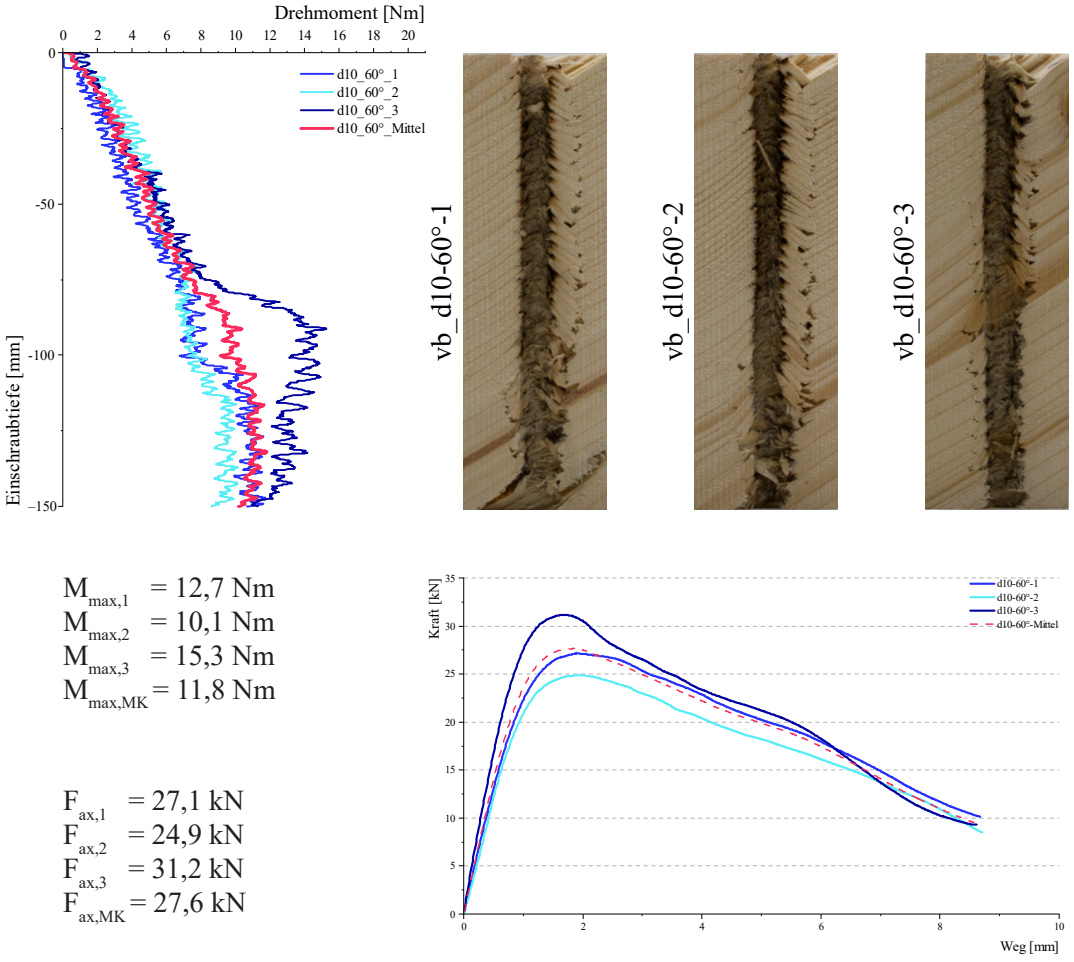


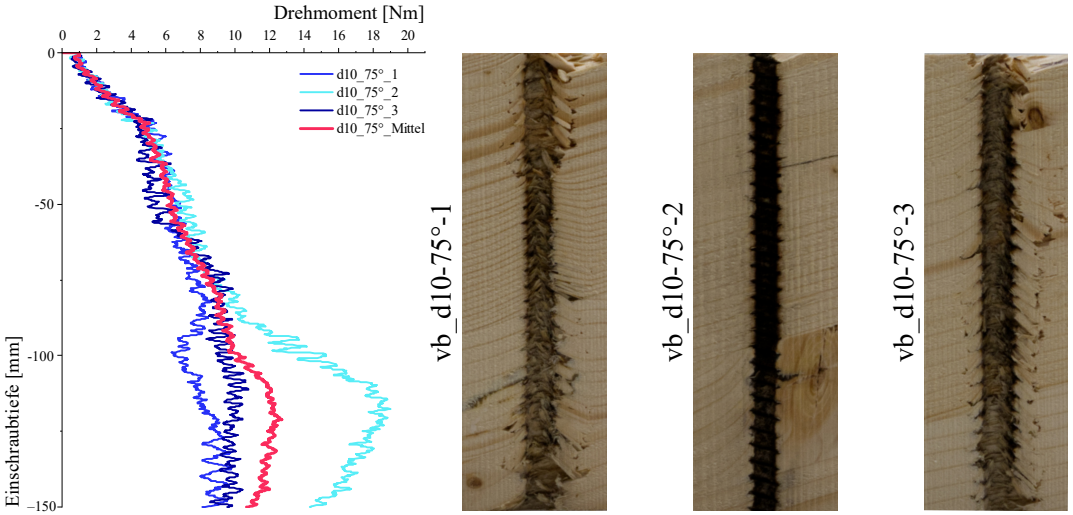
Abbildung B.92: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 45\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 12,7 Nm
$M_{max,2}$ = 10,1 Nm
$M_{max,3}$ = 15,3 Nm
$M_{max,MK}$ = 11,8 Nm

$F_{ax,1}$ = 27,1 kN
$F_{ax,2}$ = 24,9 kN
$F_{ax,3}$ = 31,2 kN
$F_{ax,MK}$ = 27,6 kN

Abbildung B.93: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 60\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt



$M_{max,1}$ = 9,8 Nm
$M_{max,2}$ = 19,0 Nm
$M_{max,3}$ = 12,5 Nm
$M_{max,MK}$ = 12,7 Nm

$F_{ax,1}$ = 27,8 kN
$F_{ax,2}$ = 32,4 kN
$F_{ax,3}$ = 28,8 kN
$F_{ax,MK}$ = 26,8 kN

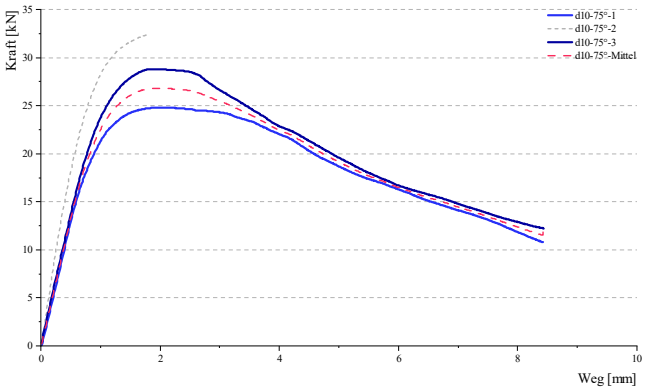


Abbildung B.94: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 75\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt

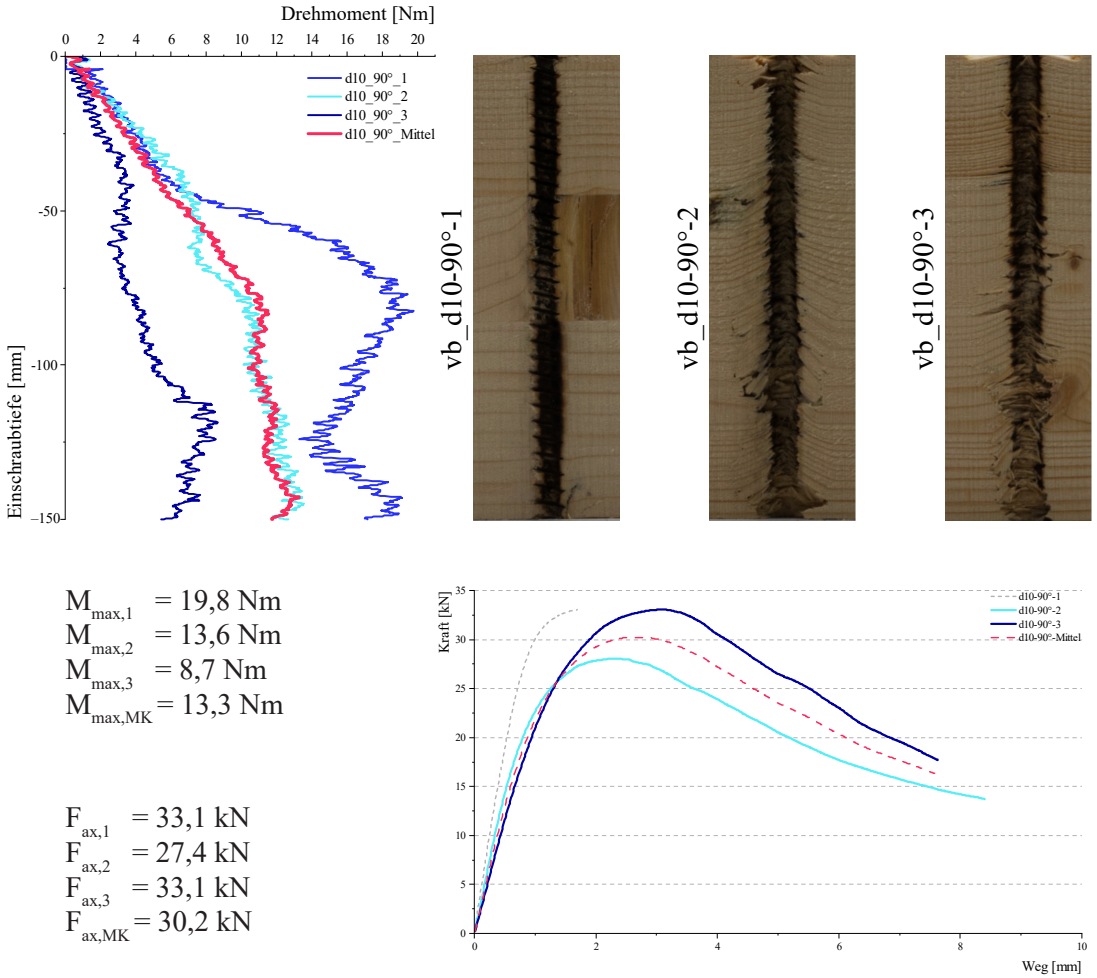


Abbildung B.95: Ergebnisprotokoll der durchgeführten Ausziehversuche; d10, $\alpha = 90\,°$, $l_{eff} = 15d$, pyrolytisch vorgebohrt

Literatur

[1] H. Albrecht: *Laserforschung in Deutschland 1960-1970: eine vergleichende Studie zur Frühgeschichte von Laserforschung und Lasertechnik in der Bundesrepublik Deutschland und der Deutschen Demokratischen Republik*. Berlin: GNT-Verlag, 2019. ISBN: 978-3-86225-109-4.

[2] M. Ayoubi: »Zum Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben Mit Großen Einbindelängen Beim Einsatz Als Bewehrung in Brettschichtholzbauteilen.Pdf«. RWTH Aachen, Dissertation, 2014.

[3] M. Ayoubi und M. Trautz: Determination of the Stress Distribution in Timber Elements Reinforced with Self-Tapping Screws Using an Optical Metrology System. In: *Advanced Materials Research* 778 (2013), S. 432–439. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.432.

[4] M. Ayoubi und M. Trautz: Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben in Brettschichtholzbauteilen - Teil 1. In: *Bautechnik* 92.11 (11 2015), S. 790–799. DOI: 10.1002/bate.201400098.

[5] M. Ayoubi und M. Trautz: Verbundverhalten von Vollgewindeschrauben in Brettschichtholzbauteilen - Teil 2. In: *Bautechnik* 93.11 (11 2016), S. 817–827. DOI: 10.1002/bate.201500086.

[6] E. Baldauf: »Lageimperfektionen von selbstbohrenden Schrauben in Holz und Holzwerkstoffen«. In: *Tagungsband des Doktorandenkolloquims Stuttgart*. (2024). DOI: 10.5445/IR/1000175238.

[7] E. Baldauf: »Untersuchung Der Ursachen von Lageimperfektionen Selbstbohrender Schrauben Und Identifikation von Methoden Zu Deren Minimierung«. In: *Tagungsband Der Karlsruher Tage 2024 - Holzbau*. (2024), S. 17–30. DOI: 10.58895/ksp/1000173065-2.

[8] O. Bartlomé: *Bauakustische Eigenschaften Einer Holz-Beton-Verbunddecke*. Forschungsbericht. 2011.

[9] I. Bejtka und H. J. Blaß: Self-Tapping Screws as Reinforcements in Beam Support. In: *Construction and Building Materials* (2006), S. 13. DOI: CIB-W18/39-7-2.

[10] I. Bejtka: »Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben«. Diss. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Dissertation, 2005.

[11] A. Bernasconi: Holz Gut Verschraubt. In: Espazium (27. Mai 2013). URL: https://www.espazium.ch/de/aktuelles/holz-gut-verschraubt.

[12] M. Bertolotti: *The History of the Laser*. Bristol: Institute of Physics Pub, 2005. ISBN: 978-0-7503-0911-0.

[13] H. J. Blaß und I. Bejtka: »Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten«. In: *Bemessung im Holzbau*. Holzbau Kalender 2004. Bruderverlag, (2003). ISBN: 3-87104-136-X.

[14] H. J. Blaß und M. Flaig: *Blockscheren von Holzbauteilen im Verbindungsbereich axial beanspruchter Vollgewindeschrauben*. Bd. 35. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2019. ISBN: 978-3-7315-0976-9.

[15] H. J. Blaß und Y. Steige: *Steifigkeit axial beanspruchter Vollgewindeschrauben*. Bd. 34. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2019. ISBN: 978-3-7315-0826-7.

[16] B. Bornschlegel, D. Haasler, J. Finger, D. Grizmann, M. Trautz und A. Gillner: Deep Drilling of Structural Timber with High Power Ultrashort Pulsed Laser Radiation. In: *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* (2020). DOI: 10.2961/jlmn.2020.03.2007.

[17] R. Brandner: Properties of Axially Loaded Self-Tapping Screws with Focus on Application in Hardwood. In: *Wood Material Science & Engineering* 14.5 (2019), S. 254–268. DOI: 10.1080/17480272.2019.1635204.

[18] R. Brandner, A. Ringhofer und T. Reichinger: Performance of Axially-Loaded Self-Tapping Screws in Hardwood: Properties and Design. In: *Engineering Structures* 188 (2019), S. 677–699. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.018.

[19] D. H. Brüninghoff: Ertüchtigung von BS-Holz Tragwerken. In: *Bauingenieur* (2007).

[20] C. Calil Neto, A. L. Christoforo, M. da Silva Bertolini, F. A. Rocco Lahr und C. Calil Junior: Self-tapping screws without pre-drilling for brazilian reflorestation species. In: *Advanced Materials Research* 1025–1026 (2014), S. 345–348. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.345.

[21] J. M. Carroll: *Todesstrahlen? Die Geschichte Des Lasers*. Berlin: Verlag Ullstein, 1965.

[22] Z. Chen, W. Lu, Y. Bao, J. Zhang, L. Wang und K. Yue: Numerical investigation of connection performance of timber-concrete composite slabs with inclined self-tapping screws under high temperature. In: *Journal of Renewable Materials* 10.1 (2022), S. 89–104. DOI: 10.32604/jrm.2021.015925.

[23] C. Chifliganec, R. Pečenko, M. Cvetkovska, L. Lazarov und T. Hozjan: Axially loaded screws fo use in timber-concrete composite slabs. In: *Construction and Building Materials* (2021), S. 6. DOI: DOI10.3217/44d2hvzj83.

[24] T. Claus, W. Seim und J. Küllmer: Force Distribution in Self-Tapping Screws: Experimental Investigations with Fibre Bragg Grating Measurement Screws. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 80.1 (2022), S. 183–197. DOI: 10.1007/s00107-021-01740-z.

[25] R. Corleto, M. Gaff, A. K. Sethy, B. U. Kelkar, R. Nemeth, G. Ditommaso, G. Kamboj, L. Todaro und F. Rezaei: Effects of CO2 Laser Parameters on Quality of Laser Cut Beech Wood (Fagus Sylvatica L) Surface and Extent of Heat Affect Zone. In: *Journal of the Indian Academy of Wood Science* (2024). DOI: 10.1007/s13196-024-00361-2.

[26] M. Danzer, P. Dietsch und S. Winter: *Einfluss exzentrisch positionierter runder Einzeldurchbrüche und Gruppen von Durchbrüchen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern*. München: TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, 2017, S. 120.

[27] M. Danzer, P. Dietsch und S. Winter: *Verhalten verstärkter Brettschichtholzbauteile unter Schwindbeanspruchung*. Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3212. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2020. ISBN: 978-3-7388-0506-2.

[28] J. Dietrich: *Praxis der Zerspantechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-14052-6.

[29] P. Dietsch: Eurocode 5:2022 – Einführung in den neuen Abschnitt Verstärkungen mit Fokus auf Querdruckverstärkungen zur Lastdurchleitung. In: (2019).

[30] P. Dietsch: »Reinforcement of Timber Structures - a New Section for Eurocode 5«. In: *Proceding of the WCTE World Conference on Timber Engineering 2016*. Wien, (2016), S. 10.

[31] P. Dietsch: »Reinforcement of Timber Structures: Standardization Towards a New Section for EC 5«. In: *Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures*. Hrsg. von J. Branco, P. Dietsch und T. Tannert. Bd. 33. Cham: Springer International Publishing, (2021). ISBN: 978-3-030-67793-0 978-3-030-67794-7.

[32] P. Dietsch und R. Brandner: Self-Tapping Screws and Threaded Rods as Reinforcement for Structural Timber Elements – A State-of-the-Art Report. In: *Construction and Building Materials* 97 (2015), S. 78–89. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028.

[33] P. Dietsch und R. Brandner: »Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report«. In: *Construction and Building Materials*. München, (2015). ISBN: 978-3-8440-6429-2.

[34] P. Dietsch, H. Kreuzinger und S. Winter: »Design of shear reinforcement for timber beams«. In: *Proceding of the CIB W18 Timber Structures 46th Meeting*. Vancover, Kanada, (2013), S. 15.

[35] DIN 4074-1: *Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil1: Nadelschnittholz*. Berlin, 2023.

[36] DIN EN 1382:2016: *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmitteln*. Berlin, 2016.

[37] DIN EN 14080: *2013 Holzbauwerke - Brettschichtholz Und Balkenschichtholz - Anforderungen*. Berlin, 2013.

[38] DIN EN 15737:2009-12: *Holzbauwerke - Prüfverfahren - Einschraubdrehmoment von Schrauben*. Berlin, 2024.

[39] DIN EN 1912: *Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten*. Berlin, 2024.

[40] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung Und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines*. Berlin, 2010.

[41] DIN EN 338: *Bauholz Für Tragende Zwecke - Festigkeitsklassen*. Berlin, 2016.

[42] DIN prEN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung Und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln Und Regeln Für Den Hochbau*. Berlin, 2023.

[43] S. Dires, A. Hossain und T. Tannert: Group effect for self-tapping screws in CLT subjected to shear and axial loads. In: *European Journal of Wood and Wood Products* (2018), S. 5.

[44] R. Dohlus: *Lasertechnik*. De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter, 2015. ISBN: 978-3-11-035088-3.

[45] C. Eckelmann: The withdrawal strength of screws from a commercially available medium density fiberboard.. In: *Materials and Structures* Forest Products Journal 38 (1988). DOI: 10.5552/drvind.2023.0146.

[46] A. Eckert, R. Brandner und D. Glasner: »Experimental Study on Control Parameters for Automated Apllication and In-Situ Performance Assessment of Joints with Self-Tapping Timber Screws«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering*. Oslo, Norway, (2023), S. 1289–1298. DOI: 10.52202/069179-0176.

[47] H. J. Eichler und J. Eichler: *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-642-41437-4 978-3-642-41438-1. DOI: 10.1007/978-3-642-41438-1.

[48] I. Fairchild: *Holding Power of Wood Screws*. Technologic Papers of the Bureau of Standards T 319. National Bureau of Standards, 1926.

[49] N. Fecht und A. Thoss: Die Geschichte Des Lasers Und Seine Zukunft: Vom Laserstrahl Bis Zur Laserbasierten Kernfusion. In: *Technik und Wissen* (2020).

[50] M. Frese, P. Fellmoser und H. J. Blaß: Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 68.4 (2010), S. 373–384. DOI: 10.1007/s00107-009-0378-1.

[51] M. Frese und M. Jordan: »Deviations between planned and actual position of wood screws - consequences for minimum spacing«. In: *Proceding of the International Network on Timber Engineering Research*. (2018).

[52] D. Glasner, A. Ringhofer, G. Hubmann und W. Braun: »Energy Demand for the Driving Inof Self-Tapping Timber Screws and Its Applicaility«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering*. Oslo, Norway, (2023), S. 3649–3659. DOI: 10.52202/069179-0475.

[53] T. Graf: *Laser - Grundlagen Der Laserstrahlerzeugung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[54] M. Gräfe, V. Hofmann, N. Werther und S. Winter: Brandsicherheit von Verbindungen Mit Balkenschuhen Und Vollgewindeschrauben. In: *Bauingenieur* Holzbau Die neue Quadriga.6 (2016), S. 23–27.

[55] D. Grizmann: »Die Welt Der Laser: Funktionsweise, Entstehungsgeschichte, Anwendung«. In: *Strukturen, Formen Und Prinzipien - Festschrift Zum 60. Geburtstag von Univ. Prof. Dr.-Ing. Martin Trautz*. (2022). ISBN: 978-3-95886-500-6.

[56] D. Grizmann: »Vorbohren Für Vollgewindeschrauben Mittels Laserstahlung«. In: *Tagungsband Des Doktorandenkolloquim Stuttgart*. (2020). URL: https://elibrary.narr.digital/article/99.125005/fki202210275.

[57] D. Grizmann, A. Pranijc und M. Trautz: Development of Joining Details for Timber Components Using Long Fully Threaded Screws. In: *Engineering Structures* (2024). URL: https://app.iass2024.org/files/IASS_2024_Paper_514.pdf.

[58] D. Grizmann, A. Pranjic, D. Haasler, B. Bornschlegel, C. Glawe und M. Trautz: »Laser-drilled guideholes for self-tapping screws - Recent developments«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering*. Santiago, Chile, (2021), S. 7. URL: https://wcte2021.com/#.

[59] D. Haasler: *Tiefbohren in Metallen mittels ultrakurzen Laserpulsen*. 1. Auflage. Ergebnisse aus der Lasertechnik. Aachen: Apprimus Verlag, 2022. ISBN: 978-3-9855511-9-4.

[60] A. Harte, R. Jockwer, M. Stepinac, T. Descamps, P. Dietsch und R. Vlatka: »Reinforcement of timber structures - The route to standardisation«. In: *Proceding of the 3rd International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures*. Bd. 1. Wroclaw, Polen, (2015), S. 12. URL: https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubi:3-18682.

[61] V. Hofmann, M. Gräfe, N. Werther und S. Winter: Fire Resistence of Primary Beam - Secondary Beam Connections with Full Thread Screws. In: *Fire Safety Journal* (2016). DOI: 10.1108/JSFE-06-2016-010.

[62] A. Imsirovic: »Untersuchungen Zur Zeitfestigkeit Vorwiegend Axial Beanspruchter Selbstbohrender Holzschrauben«. TU Graz, Dissertation, 2014.

[63] M. N. Islam, A. K. Das, M. M. Billah, K.-S. Rahman, S. Hiziroglu, N. Hattori, D. A. Agar und M. Rudolfsson: Multifaceted Laser Applications for Wood – a Review from Properties Analysis to Advanced Products Manufacturing. In: *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* 10.2 (2023), S. 225–250. DOI: 10.1007/s40516-023-00204-x.

[64] J. Jönsson: Load carrying capacity of curved glulam beams reinforced with self-tapping screws. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 63.5 (2005), S. 342–346. DOI: 10.1007/s00107-005-0016-5.

[65] L. F. C. Jorge, S. M. R. Lopes und H. M. P. Cruz: Interlayer influence on timber-LWAC composite structures with screw connections. In: *Journal of Structural Engineering* 137.5 (2011), S. 618–624. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000299.

[66] S. Kavaliauskas, A. K. Kvedaras und B. Valiūnas: Mechanical behaviour of timber-to-concrete connections with inclined screws. In: *Journal of civil engineering and management* 13.3 (2007), S. 201–207. DOI: 10.3846/13923730.2007.9636437.

[67] C. Koj und M. Trautz: Mit Schrauben fügen und bewehren - Langzeitversuche an biegesteifen Rahmenecken im Außenklima. In: *Bautechnik* 91.1 (2014), S. 38–45. DOI: 10.1002/bate.201300077.

[68] C. Koj und M. Trautz: »Long-Term Behaviour of Timber Connections with Self-Tapping Screws in Outdoor Climate«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering.* (2016).

[69] C. Koj, M. Trautz, D. Grizmann und A. Pranjic: Residual Load-Bearing Capacity of Self-Tapping Screws after Long- Term Load. In: *Materials and Structures* (2018). URL: https://publications.rwth-aachen.de/record/730465/files/730465.pdf.

[70] C. Kollbach, H. Wilhelm und C. Hartl: *Von der Laserbeschriftung bis zum Lasermaterialabtrag: Wie Sie sich mit den Grundlagen vertraut machen und Fehlinvestitionen vermeiden.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. ISBN: 978-3-658-38129-5 978-3-658-38130-1.

[71] N. Kortsalioudakis, P. Petrakis, S. Moustaizis, E. Voulgaridis, S. Adamopoulos, S. Karastergiou und C. Passialis: An Application of Laser Drilling Technique to Fir and Spruce Wood Specimens to Improve Their Permeability. In: *Wood Science and Technology* (2014), S. 10.

[72] O. Krüger und H. J. Blaß: *Schubverstärkung von Holz mit Holzschrauben und Gewindestangen.* 2010. URL: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/. Vorveröffentlichung.

[73] U. Kuhlmann und M. Sieder: *Ermüdungsverhalten von Kerven Und Selbstbohrenden Vollgewindeschrauben Für Die Anwendung Als Verbindungsmittel Bei Holz-Beton-Verbundträgern.* DFG Projektnummer: 397985109. 2022.

[74] B. Lauber: Ertüchtigung von Holztragwerken Beispiele aus der Praxis. In: *Bauingenieur* (2008).

[75] J. Lemmerich: *Zur Geschichte der Entwicklung das Lasers*. Bd. Berliner Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik. Berlin: D.A.V.I.D. Verlagsgesellschaft mbH, 1987.

[76] H. Li, F. Lam, H. Qiu und K. Chen: »Experimental study on spliced beam with round dovetail and self-tapping screws«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering 2018*. (2018), S. 6.

[77] L. Marchi, R. Scotta und L. Pozza: Experimental and theoretical evaluation of TCC connections with inclined self-tapping screws. In: *Materials and Structures* 50.3 (2017), S. 180. DOI: 10.1617/s11527-017-1047-1.

[78] P. Mestek: »Punktgestützte Brettsperrholzkonstruktionen - Schubverstärkungen mit Vollgewindeschrauben«. In: Tagungsband der Karlsruher Tage 2012 - Holzbau - Forschung für die Praxis. (2012).

[79] P. Mestek und P. Dietsch: »Design concept for CLT - reinforced with self-tapping screws«. In: *Proceding of the Focus Solid Timber Solutions - European Conference on Cross Laminated Timber*. Graz, Österreich, (2013), S. 16.

[80] P. Mestek und S. Winter: Cross Laminated Timber (CLT) – Reinforcements with Self-Tapping Screws. In: *Construction and Building Materials* (). URL: https://mediatum.ub.tum.de/doc/1069930/194754.pdf.

[81] M. A. H. Mirdad, J. Niederwestberg, A. Jucutan und Y. H. Chui: »Prediction of Withdrawal Stiffness of Self-Tapping Screws«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering 2023*. Oslo, Norway, (2023), S. 1117–1122. DOI: 10.52202/069179-0153.

[82] D. Morkötter: »Holz-Beton-Verbunddecken Vergleich unterschiedlicher Systeme – Ansätze an drei ausgeführten Projekten. Eine integrale Planungsaufgabe.« Forum Holzbau Urban Koeln. 2021.

[83] H. Neuhaus: *Ingenieurholzbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-658-14177-6 978-3-658-14178-3.

[84] J. A. Newlin und J. M. Gahagan: Lag-Screw Joints: Their Behavior and Design. In: *Wood and Fiber Science* (1938). DOI: 10.22004/AG.ECON.165802.

[85] P. Niebuhr und M. Sieder: High-Cycle Fatigue Behavior of a Self-Tapping Timber Screw under Axial Tensile Loading. In: *Journal of Failure Analysis and Prevention* 20.2 (2020), S. 580–589. DOI: 10.1007/s11668-020-00863-4.

[86] P. Niebuhr und M. Sieder: High-Cycle Fatigue Behaviour of a Timber-to-Timber Connection with Self-Tapping Screws under Lateral Loading. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 79.4 (2021), S. 785–796. DOI: 10.1007/s00107-021-01699-x.

[87] P. L. Niebuhr und M. Sieder: *Estimation of the High-Cycle Fatigue Behaviour of Timber Connections with Inclined Screws under Tension*. 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4519622/v1. Vorveröffentlichung.

[88] P. Niemz: *Holzphysik: Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte*. München: Carl Hanser Verlag München, 2012. ISBN: 978-3-446-46749-1.

[89] P. Niemz: *Holzphysik - Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*.

[90] W. Nutsch, Hrsg.: *Holztechnik. Fachkunde*. 24. Auflage. Europa Lehrmittel Europa-Fachbuchreihe für Holztechnik. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2017. 655 S. ISBN: 978-3-8085-4057-2.

[91] S.-J. Pang, K.-S. Ahn, G.-R. Lee, M.-J. Kim, J.-W. Oh und J.-K. Oh: »Bending Behavior of GLT-Steel Beam Connected by Inclined Screws«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering 2023*. Oslo, Norway, (2023), S. 188–195. DOI: 10.52202/069179-0026.

[92] E. Poirier, S. Staub-French, A. Pilon, A. Fallahi, Z. Teshnizi, T. Tannert und T. Froese: Design Process Innovation on Brock Commons Tallwood House. In: *Construction Innovation* 22.1 (2022), S. 23–40. DOI: 10.1108/CI-11-2019-0116.

[93] R. Poprawe: *Lasertechnik für die Fertigung*. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2005. ISBN: 978-3-540-21406-9.

[94] A. Pranjic, C. H. Arboleda, D. Grizmann und M. Trautz: »Long-term behaviour and residual load-bearing capacity of the self-tapping screws«. In: Proceding of the World Conference on Timber Engineering WCTE 2020. Santiago, Chile, (2020), S. 8.

[95] W. Radloff: *Laser in Wissenschaft und Technik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2010. ISBN: 978-3-8274-2427-3 978-3-8274-2428-0.

[96] B. Reichelt: »Einfluss der Sperrwirkung auf den Ausziehwiderstand selbstbohrender Holzschrauben«. Masterarbeit. TU Graz, Dissertation, 2012.

[97] Ringhofer, Andreas: »Axially Loaded Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products«. Technischen Universität München: Verlag der Technischen Universität Graz, Dissertation, 2017.

[98] D. Sandberg, A. Kutnar, O. Karlsson und D. Jones: *Wood Modifekation Technologies: Principles, Sustainability, and the Need for Innovation*. Florida: Crc Press, 2021. ISBN: 978-1-138-49177-9 978-1-351-02820-2 978-1-351-02821-9.

[99] M. Sieder: *Erforschung Des Ermüdungsverhaltens Selbstbohrender Schrauben Zum Anschluss von Stahlblechen an Brettsperrholzbauteile*. ZukunftBau Projektnummer: 10.08.18.7-21.33. 2023.

[100] M. Stehr, J. Seltman und I. Johansson: Laser Ablation of Machined Wood Surfaces. In: *Holzforschung* 53.1 (1999), S. 93–103. DOI: 10.1515/HF.1999.015.

[101] Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V: *BS-Holz-Merkblatt*. 2022.

[102] Q. Teng, Z. Que, Z. Li und X. Zhang: Effect on installed angle on the withdrawal capacity of self-tapping screws and nails. In: *Construction and Building Materials* (2018), S. 8.

[103] R. Tomasi, A. Aloisio, E. Ussher, K. R. Thunber, E. A. Hånde und H. Liven: »Bearing Supports Reinforced with Screws: Experimental Investigation and Discussion of the Design Models in Eurocode 5«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering 2023*. Oslo, Norway, (2023), S. 3015–3022. DOI: 10.52202/069179-0393.

[104] M. Trautz: Das Dehnungs- und Tragverhalten von Brettschichtholz beim Lasteintrag durch Vollgewindeschrauben. In: *Bautechnik* 94.11 (2017), S. 776–789. DOI: 10.1002/bate.201700068.

[105] M. Trautz: »Wenn Man Mit Schruaben Bewehren Will... Erfahrungen Und Forschungen Zum Einsatz von Vollgewindeschrauben Als Verstärkungs- Und Fügemittel Im Ingenieurholzbau«. In: Aachener Holzbautagung 2019. 2019.

[106] M. Trautz, D. Grizmann, A. Pranjic, M. Raupach, C. Glawe, A. Gillner, B. Bornschlegel und D. Haasler: Laser Predrilling for High-Precision Positioning and Installation of Fully Threaded Screws in Glued-Laminated Timber (Glulam). In: *Wood Material Science & Engineering* 18.2 (2023), S. 491–506. DOI: 10.1080/17480272.2022.2051735.

[107] M. Trautz und C. Koj: Mit Schrauben Bewehren. In: *Bautechnik* 85.3 (2008), S. 190–196. DOI: 10.1002/bate.200810016.

[108] M. Trautz und C. Koj: »Mit Schrauben Bewehrtes Holz«. In: *Ingenieurholzbau Karlsruher Tage*. 2008.

[109] M. Trautz und C. Koj: Mit Schrauben Bewehren - Neue Ergebnisse. In: *Bautechnik* 86.4 (2009), S. 228–238. DOI: 10.1002/bate.200910021.

[110] M. Trautz, C. Koj und H. Uchtmann: Laserstrahlbohrungen für richtungsgenau positionierte Vollgewindeschrauben - Einbau und Tragverhalten. In: *Bautechnik* 92.6 (2015), S. 403–411. DOI: 10.1002/bate.201400075.

[111] M. Trautz, C. Koj und H. Uchtmann: Load Bearing Behaviour Ot Self-Tapping Screws in Laser - Drilled Guideholes. In: *Materials and Structures* (2016), S. 8. URL: https://www.proceedings.com/61811.html.

[112] M. Tronnier: »Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten selbstbohrender Holzschrauben unter axialer Beanspruchung«. In: *Tagungsband des Doktorandenkolloquims Stuttgart*. (2024).

[113] T. Uibel: »Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben«. Universität Karlsruhe, Dissertation, 2012.

[114] T. Uibel und H. J. Blaß: Determining Suitable Spacings and Distances for Self-Tapping Screws by Experimental and Numerical Studies. In: *Engineering Structures* (2020). URL: https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000018664/1372233.

[115] R. Wagenführ: *Anatomie des Holzes: Strukturanalytik, Identifizierung, Nomenklatur, Mikrotechnologie*. 5., völlig überarb. Aufl. Holz. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl, 1999. ISBN: 978-3-87181-351-1.

[116] L. Wenning, D. Grizmann und C. Glawe: Deep Drilling of Structural Timber Using Quasi-Continious-Wave Lasers for Straight Guiding Holes. In: *Wood Science and Technology* (2020). URL: https://spie.org/photonics-west/presentation/Deep-drilling-of-structural-timber-using-QCW-lasers-for-straight/13357-14.

[117] H. Wust: »Die Wirkung von Laserstrahlung Auf Strukturelle, Chemische Und Physikalische Eigenschaften von Holz«. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2005.

[118] T. Yin, C. Guo, Z. Wang, W. Zheng, J. Zhou und M. Gong: »Cyclic Behavior of Mortise-Tenon Joints Reinfored by Self-Tapping Screw«. In: *Proceding of the World Conference on Timber Engineering 2023*. Oslo, Norway, (2023), S. 1129–1135. DOI: 10.52202/069179-0155.

[119] C. Zhang: »Reinforcement of Timber Dowel-Type Connections Using Self-Tapping Screws«. University of Bath, Dissertation, 2018.

[120] C. Zhang, K. Jung, R. Harris und W.-S. Chang: Drive-in Torque for Self-Tapping Screws into Timber. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 175.1 (2022), S. 31–43. ISSN: 1747-650X, 1747-6518.