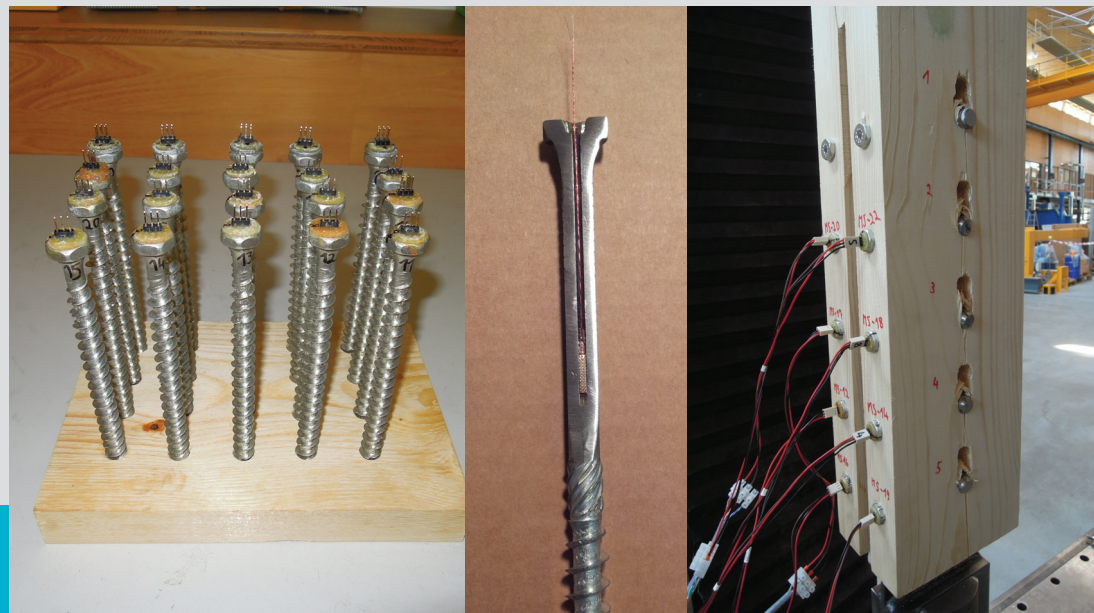


# Entwicklung einer Messschraube und Anwendung auf das Bauwerksmonitoring und die Prüftechnik

M-4-08/2015



**Florian Wolfthaler**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz





Florian Wolfthaler, BSc

# **Entwicklung einer Messschraube und Anwendung auf das Bauwerksmonitoring und die Prüftechnik**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

DI Manfred Augustin  
holz.bau forschungs gmbh

DI Andreas Ringhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, September 2015





# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Menschen bedanken, die mich während meiner Studienzeit begleitet und mich bei der vorliegenden Masterarbeit unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer für die hervorragende Lehre während meines Studiums an der TU Graz. Diese hat mein Interesse und meinen Bezug zum Holzbau gestärkt sowie meinen geistigen Horizont erweitert.

Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Andreas Ringhofer für die großartige begleitende Betreuung meiner Masterarbeit bedanken. Ich wurde stets mit einem offenen Ohr empfangen und konnte zu jeder Zeit meine Fragen und Anregungen anbringen.

Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Manfred Augustin, der mir sowohl die Durchführung dieser Masterarbeit, als auch die Mitarbeit bei der holz.bau forschungs gmbh ermöglichte und mein Interesse an der Wissenschaft und Forschung erweckte.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen der holz.bau forschungs gmbh sowie den Mitarbeitern des Institutes für Holzbau und Holztechnologie für die gemeinsame Zeit und die anregenden Diskussionen.

Weiters bedanke ich mich bei TM Ing. Bernd Heissenberger und Patrick Theussel für die Unterstützung bei den praktischen Arbeiten in der Werkstatt und für die unterhaltsame Zeit.

Der größte Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Heidi und Markus, die mir stets Freiheit bei meinen Entscheidungen und Rückhalt im Leben gegeben haben. Ihr habt mir die Voraussetzung für ein selbstbewusstes, gesundes und schönes Leben von klein auf gegeben. Dafür bin ich euch unendlich dankbar.

Ebenfalls möchte ich mich bei Bernadette bedanken. Du hast viel Verständnis für das zeitintensive Studium aufgebracht und mir immer wieder Rückhalt gegeben. Danke.



# Kurzfassung

Das Monitoring im Ingenieurholzbau erlangte in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung. Speziell die Echtzeitüberwachung von Kräften in Schraubenverbindungen ist in der Praxis jedoch kaum bzw. nur schwer durchführbar. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Holzbaumessschraube zu entwickeln, welche die Messung der auftretenden Axialkraft in der Schraube mittels Dehnmessstreifen ermöglicht, und potentielle Einsatzbereiche aufzuzeigen. Zu diesem Zweck sind am Beginn dieser Arbeit die Grundlagen der Dehnmessstreifentechnik und deren Einsatz im Holzbau angeführt. Aufbauend auf diese Kenntnisse wurden Prototypen von Holzbaumessschrauben entwickelt und hergestellt. Dazu zählen auch die Kalibrierung der einzelnen Messschrauben und erste Versuche von Anwendungsmöglichkeiten im Labor. Diese und weitere Untersuchungen zur Langzeitbeanspruchbarkeit zeigten, dass die praxistaugliche Herstellung von Messschrauben möglich ist und diese für den Einsatz als Messinstrument geeignet sind. Neben dem Einsatz von Messschrauben im Monitoring von Verbindungen bestehender Bauwerke wird ein besonderes Augenmerk auf den Einsatz im Bereich der Sensortechnik für Untersuchungen im Labor gerichtet. Im speziellen gilt es, die resultierende Axialkraft in den Verstärkungsschrauben von Stabdübelverbindungen zu untersuchen. Zu diesem Zweck sind vorab die Probleme der Spaltgefährdung bei Stabdübelverbindungen näher erläutert und Rechenmodelle für die Verstärkung dieser Anschlüsse beschrieben. Den Hauptteil dieses Abschnitts der Arbeit bilden eine umfangreiche Prüfserie verschiedener Konfigurationen verstärkter Stabdübelverbindungen und die Messung der Kräfte in den Verstärkungsschrauben mittels der entwickelten Holzbaumessschrauben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden mit den Normen- und Literaturwerten verglichen und interpretiert. Die Auswertungen zeigen, dass die Bemessung der Kraft in den Verstärkungselementen von Stabdübelverbindungen nach ÖNORM B 1995-1-1 speziell bei mehrreihigen Verbindungen zu progressiv ist. Aufgrund der Prüfungsergebnisse und deren Verifizierung mittels zuvor erläuterter Rechenmodelle wird empfohlen, die Bemessungswerte in der Norm anzupassen.

# Abstract

Over the last decades, monitoring of engineered timber structures became more and more important. However, real-time monitoring of load situations in timber screw connections is very difficult to realise in practise. The objective of this thesis is thus to develop a self-tapping measurement screw for timber engineering that is able to detect the resulting axial load by means of strain gauges. Another goal is to find possible application fields for this new measurement device. For these purposes, basic principles of strain gauges and their applications in timber engineering are discussed at the beginning of this thesis. Based on basic knowledge thereby gained, prototypes of measurement screws were designed and produced. That includes the calibration of every single measurement screw and tests of possible applications in the laboratory. These investigations and further long-term experiments have shown that the production of measurement screws is possible and proved their suitability applied as measuring device. In addition to their use in monitoring systems of screwed connections in existing buildings further attention is turned to the application as sensor system for laboratory investigations. In particular, resulting axial loads inside the reinforcing screws of laterally loaded dowel-type timber connections can be quantified by this measure. For this purpose, the issues of splitting failure of doweled timber connections and corresponding design approaches are discussed. The main part of this section is a comprehensive test series including different configurations of reinforced doweled timber connections including the monitoring of the load in the reinforcing screws by use of the developed measurement screws. Related findings are consequently analysed and compared with design approaches given in standards and literature. The analysis shows that the design of the reinforcement measure, especially of multi-row doweled timber connections according to ÖNORM B 1995-1-1, is too progressive. Due to this results and the verification by means of the aforementioned design approaches it is recommended to adapt the corresponding section in the standard.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG, MOTIVATION UND GLIEDERUNG DER ARBEIT .....</b>	<b>1</b>
<b>KAPITEL 2: STAND DES WISSENS .....</b>	<b>3</b>
2-1 GRUNDLAGEN ZUR DEHNMESSSTREIFENTECHNIK.....	3
2-1.1 Aufbau, Formen und Arten von DMS .....	3
2-1.2 Wirkungsweise .....	4
2-1.3 Störgrößen und sonstige Einflüsse .....	6
2-1.4 Schaltungen von DMS.....	7
2-1.5 Anwendung von DMS im Bauwesen .....	9
2-1.5.1 Einsatz von DMS in Stahlbau-Messbolzen .....	10
2-2 EINSATZ VON DEHNMESSSTREIFEN IM HOLZBAU.....	12
2-2.1 Einführung.....	12
2-2.1.1 Prüfungen mit DMS auf Holzoberflächen.....	13
2-2.1.2 Prüfungen mit DMS auf Holzpartikelwerkstoffen .....	14
2-2.2 Einsatz von DMS bei eingeklebten und eingeschraubten Gewindestangen – Ehlbeck und Siebert 1987.....	15
2-2.3 Einsatz von DMS bei eingeklebten Gewindestangen – Blass und Laskewitz 2002 .....	16
2-2.4 Einsatz von DMS bei eingeklebten Gewindestangen – Bernasconi 2009 .....	18
2-2.5 Einsatz von DMS bei eingedrehten Schraubstangen – Wallner 2012 .....	19
2-2.6 Einsatz von DMS zur Messung der Spaltwirkung von Schrauben – Uibel 2012 .....	21
2-2.7 Axiale Kraftverteilung in selbstbohrenden Holzschrauben – Ringhofer und Schickhofer 2014.....	24
2-2.8 Zusammenfassung der Literaturrecherche.....	25
<b>KAPITEL 3: MÖGLICHE VERWENDUNG EINER HOLZBAU-MESSSCHRAUBE .....</b>	<b>26</b>
3-1 ERMITTLUNG DER SPALTWIRKUNG BEI STABDÜBEL- VERBINDUNGEN .....	26
3-1.1 Problem der Spaltgefährdung bei Stabdübel-Verbindungen .....	26
3-1.2 Einführung in die Bruchmechanik.....	28
3-1.2.1 K-Konzept .....	28
3-1.2.2 Energetisches Bruchkriterium .....	32
3-1.3 Bruchmechanisches Modell nach Schmid [6] .....	34
3-1.4 Bruchmechanisches Modell nach Bejtka [7] .....	37
3-1.5 Einsatz einer Messschraube zur Bestimmung der Spaltkraft bei Stabdübelverbindungen .....	42
3-2 MONITORING VON SCHRAUBENVERBINDUNGEN IM HOLZBAU .....	43
3-2.1 Monitoring im Holzbau allgemein .....	43

3-2.2	Einsatz einer Messschraube im Bauwerksmonitoring .....	44
<b>KAPITEL 4: HERSTELLUNG EINER HOLZBAU – MESSSCHRAUBE .....</b>		<b>46</b>
4-1	AUFBAU .....	46
4-2	HERSTELLUNG .....	47
4-2.1	Ermittlung der optimalen DMS – Position .....	47
4-2.2	Bohren und Reinigen des Bohrlochs .....	47
4-2.3	Anrühren und Einfüllen des Klebstoffs .....	47
4-2.4	Einsetzen des DMS und Aushärten des Klebstoffs .....	47
4-2.5	Stecksystem und Verkabelung .....	48
4-3	FUNKTIONSWEISE UND KALIBRIERUNGSPRÜFUNGEN .....	50
4-3.1	Prüfungsvorbereitung .....	50
4-3.1.1	Bezeichnung der Messschrauben und Kalibrierungsprüfungen .....	50
4-3.1.2	Prüfkonfiguration der Kalibrierungsprüfungen .....	50
4-3.1.3	Durchführung der Kalibrierungsprüfungen .....	51
4-3.1.4	Auswertung und Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen .....	53
4-3.2	Langzeitversuche .....	57
4-3.2.1	Bezeichnung der Langzeitversuche .....	57
4-3.2.2	Prüfkonfiguration und Durchführung der Langzeitprüfungen .....	58
4-3.2.3	Auswertung und Ergebnisse der Langzeitversuche .....	59
4-3.3	Klebstoffversuche .....	62
4-3.3.1	Herstellung und Durchführung der Klebstoffversuche .....	62
4-3.3.2	Auswertung der Ergebnisse der Klebstoffversuche .....	63
4-3.3.3	Interpretation der Ergebnisse der Klebstoffversuche .....	65
<b>KAPITEL 5: PRÜFKONFIGURATION ZUR ERFASSUNG VON SPALTKRÄFTEN BEI      STABDÜBELVERBINDUNGEN .....</b>		<b>66</b>
5-1	EINFÜHRUNG .....	66
5-2	TASTVERSUCHE .....	66
5-2.1	Versuchsfiguration der Tastversuche .....	66
5-2.2	Herstellung der Probekörper .....	68
5-2.3	Durchführung der Tastversuche .....	69
5-2.3.1	Versuchsablauf .....	70
5-2.4	Ergebnisse der Tastversuche .....	70
5-2.4.1	Bruchbilder .....	72
5-2.4.2	Interpretation der Ergebnisse .....	73
5-3	PRÜFPLANUNG .....	74
5-3.1	Ermittlung der optimalen Prüfkonfiguration – Vergleich von bruchmechanischen Modellen .....	74



5-3.1.1	Modellierung der Tastversuche .....	75
5-3.1.2	Modellierung einer einreihigen Stabdübelverbindung mit $n = 5$ .....	76
5-3.1.3	Wahl von geeigneten Prüfkfigurationen .....	78
5-3.2	Bezeichnung und Anzahl der Prüfkörper .....	79
5-3.3	Prüfvorbereitung .....	79
5-3.4	Prüfkfiguration und Prüfkonzept .....	80
5-3.4.1	Prüfserie ST16-ST-n1-m1 .....	81
5-3.4.2	Prüfserie ST16-ES-n1-m1 .....	82
5-3.4.3	Prüfserie ST20-ES-n1-m1 .....	83
5-3.4.4	Prüfserie ST16-ES-n5-m1 .....	84
5-3.4.5	Prüfserie ST16-ES-n2-m2 .....	85
5-3.5	Herstellung der Prüfkörper .....	86
5-3.6	Herstellung der Schlitzbleche und Vorbereitung der Stabdübel .....	89
5-3.7	Herstellung und Aufbau weiterer Messschrauben für die Hauptprüfungen .....	92
5-3.8	Benennung der neuen Messschrauben für die Hauptprüfungen .....	95
5-3.9	Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen der neuen Messschraubenreihe .....	96
5-3.9.1	Interpretation der Ergebnisse .....	102
5-3.10	Kalibrierung der Messschrauben nach dem Einsatz in verstärkten Stabdübelprüfserien .....	102
5-3.11	Einbringen der Messschrauben und Messung der Spaltkräfte .....	106
5-4	DURCHFÜHRUNG DER HAUPTPRÜFUNGEN .....	108
5-4.1	Prüfkfiguration und Prüfablauf .....	109
<b>KAPITEL 6: AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER PRÜFERGEBNISSE .....</b>		<b>112</b>
6-1	BEEINFLUSSENDE HOLZTECHNOLOGISCHE PARAMETER .....	112
6-1.1	Ermittlung der Holzfeuchte .....	112
6-1.2	Ermittlung der Rohdichte und Bezug auf 12 % Holzfeuchte .....	112
6-1.3	Jahrringlage .....	113
6-2	AUSWERTUNG DER PRÜFSERIEN UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE .....	114
6-2.1	Prüfserie ST16-ES-n1-m1 .....	117
6-2.1.1	Exemplarische Auswertung von Prüfung ST16-ES-n1-m1-04 .....	119
6-2.2	Prüfserie ST20-ES-n1-m1 .....	120
6-2.2.1	Exemplarische Auswertung von Prüfung ST20-ES-n1-m1-02 .....	122
6-2.3	Prüfserie ST16-ES-n5-m1 .....	123
6-2.3.1	Exemplarische Auswertung von Prüfung ST16-ES-n5-m1-04 .....	127
6-2.4	Prüfserie ST16-ES-n2-m2 .....	129
6-2.4.1	Exemplarische Auswertung von Prüfung ST16-ES-n2-m2-02 .....	131

6-2.5	Vergleich von $n_{ef}/n$ .....	132
6-2.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Prüfergebnisse .....	134
<b>KAPITEL 7: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>		<b>135</b>
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE.....</b>		<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis.....	IX
A-3	Tabellenverzeichnis .....	XV
<b>ANHANG B DIAGRAMME DER AUSWERTUNG ALLER PRÜFSERIEN .....</b>		<b>XVI</b>
B-1	ST16-ST-n1-m1 .....	XVI
B-2	ST16-ES-n1-m1 .....	XXIII
B-3	ST20-ES-n1-m1 .....	XXX
B-4	ST16-ES-n5-m1 .....	XXXVII
B-5	ST16-ES-n2-m2 .....	XLIV
B-6	Holzfeuchtigkeit und Rohdichte aller Prüfkörper .....	LII

# KAPITEL 1: EINLEITUNG, MOTIVATION UND GLIEDERUNG DER ARBEIT

Der Holzbau ist nach wie vor eine aufstrebende Branche und im Bauwesen nicht wegzudenken [1]. Trotzdem ist es notwendig, Produkte bzw. Konstruktionen aus Holz dem Stand der Technik anzupassen, deren Bemessung effizient zu gestalten sowie diesbezügliche Verarbeitungstechniken weiterzuentwickeln und neue Verwertungsmöglichkeiten zu erschließen. Speziell im Ingenieurholzbau ist es wichtig, einerseits rationelle und effiziente Verbindungen und Anschlüsse zu konstruieren und zu bemessen, um die Wirtschaftlichkeit von Tragwerken zu gewährleisten und andererseits den Sicherheitsaspekt nicht aus den Augen zu verlieren. Nicht zuletzt aufgrund folgenschwerer Ereignisse, wie Einstürze von Hallen, vgl. [2] und [3], sowie der technologischen Weiterentwicklung von Messsystemen gewinnt das Monitoring im Bauwesen bzw. speziell im Ingenieurholzbau zunehmend an Bedeutung.

Sowohl im Bauwerksmonitoring als auch in der Forschung, beispielsweise bei der Entwicklung und Optimierung von Verbindungen oder Bemessungsgrundlagen, ist es zielführend, den Verlauf der Kräfte in den einzelnen Verbindungsmitteln eines Anschlusses messtechnisch erfassen zu können. Im Stahlbau gibt es hierfür bereits Bolzen, die dies mittels axial applizierten Dehnmessstreifen ermöglichen (vgl. [4], [5]). Daraus abgeleitet entstand die Idee, diesen Ansatz auf eine Holzschraube anzuwenden. Ziel dieser Arbeit war es, im Rahmen des Projektes focus\_sts 3.1.3\_1 der holz.bau forschung gmbh Prototypen dieser Messschraube praxistauglich anzufertigen und anhand geeigneter Einsatzmöglichkeiten versuchstechnisch zu verifizieren.

Eine solche Anwendungsmöglichkeit ist der Einsatz von Holzbau-Messschrauben als Teil eines modifizierten Sensorsystems zur Beobachtung von bestimmten Bruchmechanismen von Holzwerkstoffen und Verbindungen im Labor. Im Speziellen ist die Messschraube geeignet Spaltkräfte von auf Abscheren beanspruchten Stabdübelverbindungen zu bestimmen, indem diese als Verstärkungselement eingesetzt wird. Hintergrund hierfür ist der Umstand, dass die Dimensionierung von Schrauben für diesen Einsatzzweck derzeit auf theoretischen Modellen basiert (vgl. [6] und [7]), deren Wirtschaftlichkeit in der Praxis immer wieder zu Diskussionen führt. Mit Hilfe der Anordnung dieser Messschrauben soll es gelingen, die auftretenden Kräfte in den Verstärkungselementen messtechnisch zu ermitteln und die damit verbundenen Literatur- und Normenwerte zu verifizieren bzw. gegebenenfalls zu optimieren.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist der Einsatz der Messschraube im Bauwerksmonitoring, welches aufgrund der Weiterentwicklung von drahtlosen Sensorsystemen (vgl. [8]) immer mehr an Bedeutung gewinnt. Somit ist es anzustreben, eine Holzbau-Messschraube im Bereich der Überwachung von Verbindungen und Anschlüssen im Tragwerksbau einzusetzen. Im Holzbau werden zurzeit vorwiegend Langzeitüberwachungen von klimabedingten Holzfeuchteänderungen sowie Bauwerksverformungen und Setzungen in unterschiedlichen Tragsystemen, wie etwa Hallentragwerken oder mehrgeschossigen Hochbauten in Holz-Massivbauweise, durchgeführt (vgl. [9], [10], [11], [12]). Um direkte Rückschlüsse auf die Auslastung von Verbindungen im realen Einbauzustand zu erlangen, ist es zielführend, speziell modifizierte Überwachungssysteme im Tragwerk zu installieren, welche direkt mit dem Verbindungsmittel verbunden sind. Die Messschraube bietet dabei die Möglichkeit, die resultierende Kraft in einer Verbindung eines Tragwerks zu messen und gegebenenfalls als Frühwarnsystem eingesetzt zu werden. Zudem könnte auch die Möglichkeit einer Reduzierung der Teilsicherheitsbeiwerte im Rahmen der Bemessung nach dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept gemäß Eurocode 0 [13] angedacht werden, wie es beispielsweise durch das „proof-loading“ bei der Qualitätssicherung von Konstruktionsvollhölzern bereits gelungen ist (vgl. [14]).

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert, wobei das Hauptaugenmerk auf die Entwicklung und Herstellung einer Messschraube und deren Einsatzmöglichkeiten im Ingenieurholzbau gelegt wird.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen zu Dehnmessstreifen (DMS), sowie deren Anwendungsmöglichkeiten im Holzbau auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche angeführt.

Vor der Entwicklung der mit Dehnmessstreifen (DMS) applizierten Messschrauben wird in Kapitel 3 ein Überblick über deren Verwendungsmöglichkeiten im Holzbau gegeben. Dabei wird einerseits auf den Einsatz für labortechnische Untersuchungen, im Speziellen die Ermittlung der Kraft in Verstärkungsschrauben von Stabdübelverbindungen, und andererseits auf das Langzeit-Monitoring von Schraubenverbindungen in bestehenden Bauwerken eingegangen.

In Kapitel 4 werden der Aufbau und die Herstellung eines Holzbau-Messschrauben-Prototyps beschrieben. Zusätzlich sind die Funktionsweise und die Durchführung von Kalibrierungsprüfungen der Messschrauben erläutert.

Die Anwendung der entwickelten Holzbau-Messschraube zur Ermittlung der resultierenden Kraft in den Verstärkungselementen von Stabdübelverbindungen wird in Kapitel 5 angeführt. Dabei wird auf die Prüfplanung und –durchführung näher eingegangen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Kapitel 6 ausgewertet und auf Grundlage von beeinflussenden holztechnologischen Parametern interpretiert sowie mit Literatur- und Normenwerten verglichen.

Kapitel 7 beinhaltet eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit sowie einen Ausblick über künftige Forschungsarbeiten und Einsatzmöglichkeiten von Holzbau-Messschrauben.

## KAPITEL 2: STAND DES WISSENS

### 2-1 GRUNDLAGEN ZUR DEHNMESSSTREIFENTECHNIK

Dehnmessstreifen (DMS; auch Dehnungsmessstreifen) werden eingesetzt, um deh nende oder stauchende Verformungen von Objekten zu erfassen. Sie werden mithilfe von Spezialklebstoffen auf Bauteilen befestigt und messen aufgrund der Änderung des elektrischen Widerstandes die Dehnungen bzw. Verformungen des Bauteils. Die Grundlagen von Dehnmessstreifen sowie die Eigenschaften von DMS-Messstellen und Hinweise zu deren Anwendung werden nachfolgend beschrieben und sind großteils dem Kompendium von HOFFMANN [15] entnommen.

#### 2-1.1 AUFBAU, FORMEN UND ARTEN VON DMS

Dehnmessstreifen gibt es in verschiedenen Arten und Materialien, wie beispielsweise dünn schichtige und dickschichtige Leiterbahnen oder halbleitende Gebilde in Form von Drähten. Der weit verbreitetste DMS ist jener in Form von Leiterbahnen bestehend aus ausgeätzten Metallfolien, siehe Abbildung 2-1. Diese sogenannten Foliendehnmessstreifen werden am häufigsten eingesetzt und auch in dieser Arbeit näher beschrieben.

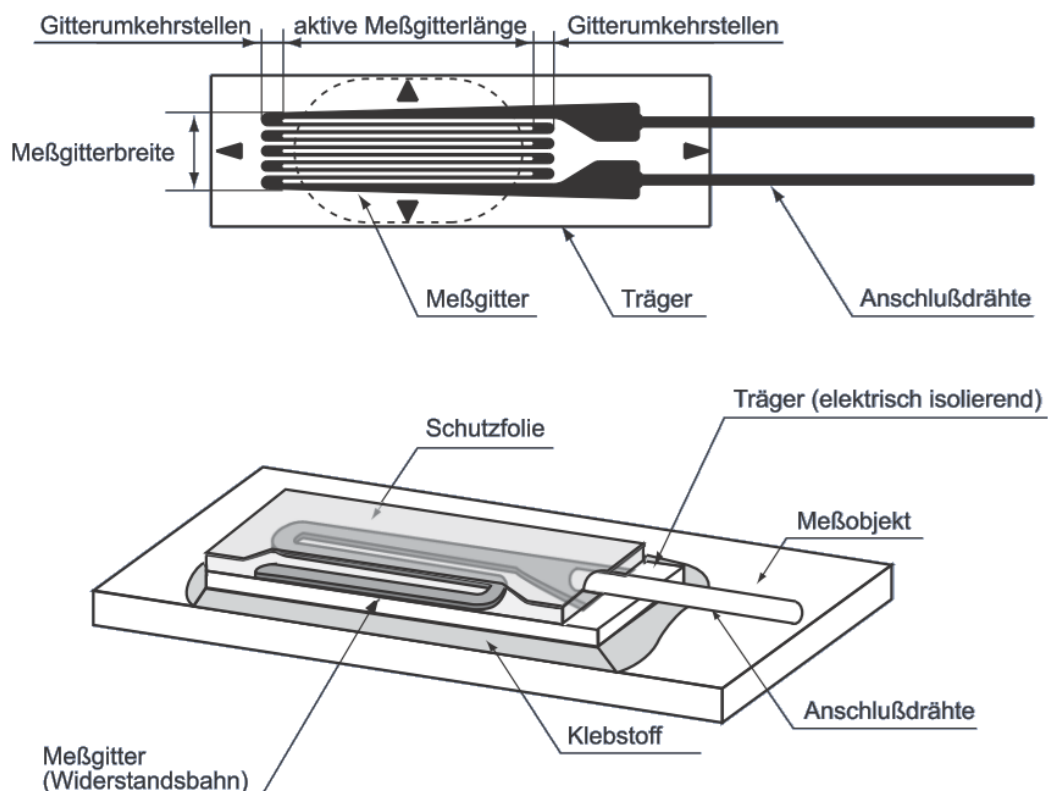


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer DMS-Messstelle [16]

Das Messgitter, welches aus einer Metallfolie besteht und den aktiven Teil des Dehnmessstreifens darstellt, befindet sich in der Regel zwischen zwei Kunststofffolien und ist zwischen drei und acht  $\mu\text{m}$  dick. Die beiden Trägerfolien aus Kunststoff (Acrylharz, Epoxidharz oder Phenolharz) schützen den Dehnmessstreifen bei der Handhabung und dienen zur elektrischen Isolation. Die einzelnen Schichten des DMS sind untrennbar miteinander verschweißt oder verklebt.

Grundsätzlich besteht das Messgitter aus Metallen oder Halbleitern. Die Verwendung der DMS-Materialien richtet sich nach der thermischen linearen Dehnung der Messobjekte, um scheinbare Dehnungen der Dehnmessstreifen aufgrund von Temperaturschwankungen zu vermeiden.

Der Aufbau von Dehnmessstreifen wird in folgende Arten unterschieden:

- Metallische DMS

Als Material für das Messgitter wird meist eine Kupfer-Nickel-Legierung (Konstantan) oder eine Nickel-Chrom Verbindung verwendet. Für die verwendeten Legierungen ist der k-Faktor, welcher die Empfindlichkeit der DMS beschreibt, für einen breiten Temperatur- und Dehnungsbereich konstant. Die Messgitter können mit einer Länge von 0,2 – 150 mm hergestellt werden.

- Halbleiter DMS

Als Halbleiter wird Silizium, in Form eines dünnen monokristallinen Streifens oder als aufgedampfte Schicht eingesetzt. Der Messeffekt bei Halbleiter DMS beruht auf den Piezo-Widerstandseffekt (piezoresistiver Effekt). Das heißt, der spezifische Widerstand hängt von der Volumenänderung und Verzerrungen im Kristallgitter des Halbleiters ab. Somit besitzen Halbleiter-DMS relativ große k-Faktoren und dementsprechend höhere Empfindlichkeiten als metallische DMS. Halbleiter DMS weisen allerdings eine große und nichtlineare Temperaturabhängigkeit auf.

Für Sonderanwendungen sind neben den Foliendehnmessstreifen auch noch Kraftmessgeräte erhältlich, die piezoelektrische, optische, induktive oder kapazitive Sensoren verwenden und solche, welche direkt auf das Messobjekt unter Vakuum aufgedampft werden (Dünnschicht-DMS).

## 2-1.2 WIRKUNGSWEISE

Dehnmessstreifen beruhen auf dem Grundsatz, dass die elastischen Längen- und Querschnittsänderungen eines Widerstanddrahtes eine Änderung des ohmschen Widerstandes zu Folge haben. Die Widerstandsänderung wird mit der am Leiter abfallenden Spannung erfasst und signalisiert die damit verbundene, verzögerungsfreie Dehnung.

Der Dehnungswiderstandseffekt beruht auf einem Modell, welches bereits 1843 von WHEATSTONE [17] [18] entdeckt und 1856 von THOMSON [19] [20] weiterentwickelt wurde.

Der ohmsche Widerstand einer festgelegten Querschnittsfläche ist gegeben durch:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \tag{2.1}$$

mit:	R	...	ohmscher Widerstand [ $\Omega$ ]
	$\rho$	...	spezifischer Widerstand [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]
	l	...	Drahtlänge [m]
	A	...	Querschnittsfläche des Drahtes [ $\text{m}^2$ ]

Die Dehnungsänderung ist gegeben durch:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

mit:  $\varepsilon$  ... relative Längenänderung [-]  
 $\Delta l$  ... verformungsbedingte Längenänderung [m]  
 $l_0$  ... unverformte Bezugslänge [m]

Die Längenänderung des Drahtes bewirkt durch Querkontraktion eine Querschnittsänderung und durch eine Änderung der Atomabstände im Gitterverband des Leiters eine Änderung des spezifischen Widerstandes. Somit ist der ohmsche Widerstand von drei Größen abhängig:  $\rho$ ,  $l$  und  $A$ .

Die relative Widerstandsänderung wird bei kleinen Änderungen der Größen wie folgt berechnet:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.3)$$

mit:  $\Delta R$  ... Änderung des ohmschen Widerstandes [ $\Omega$ ]  
 $R$  ... ohmscher Widerstand im Ausgangszustand [ $\Omega$ ]  
 $\nu$  ... Querdehnungszahl des Gittermaterials [-]  
 $\rho$  ... spezifischer Widerstand [ $\Omega \cdot m$ ]  
 $\Delta \rho$  ... Änderung des spezifischen Widerstandes [ $\Omega \cdot m$ ]

Wird diese Gleichung (2.3) durch die Dehnungsänderung  $\varepsilon$  dividiert, so ergibt sich der k-Faktor (auch Geberfaktor genannt).

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

Dieser k-Faktor gibt die Proportionalität der Widerstandsänderung zur Dehnungsänderung wieder und kennzeichnet somit die Empfindlichkeit von Dehnmessstreifen. Ist der k-Wert groß, so entsteht bei gleicher Dehnung eine große Widerstandsänderung und damit ein hohes Messsignal.

Somit folgt:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

Metallische Dehnmessstreifen reagieren hauptsächlich auf geometrische Änderungen. Der k-Faktor liegt zwischen eins und vier und ist somit relativ niedrig und über einen breiten Temperatur- und Dehnungsbereich konstant. Die geringe Streuung des k-Faktors bei metallischen DMS ist auf die geringe Änderung des spezifischen Widerstandes durch die Verzerrung des metallischen Kristallgitters von Legierungen zurückzuführen.

Bei Halbleiter DMS ist der Einfluss der geometrischen Veränderungen, welcher bei metallischen DMS maßgebend ist, vernachlässigbar klein. Die Widerstandsänderungen durch mechanische Beanspruchungen ergeben sich aufgrund von Verzerrungen des Kristallgitters im Halbleiter und der damit verbundenen Änderung des spezifischen Widerstandes. Der k-Faktor liegt bei +110 bis +130 (p-Silizium) und bei -80 bis -100 (n-Silizium) und ist abhängig von der Orientierung der Beanspruchungsrichtung zum Gitter des Einkristalls sowie der Dotierung als p- oder n-Leiter. Wie zuvor erwähnt, liegt der Vorteil von Halbleiter DMS in ihrer hohen Empfindlichkeit (schlägt bei geringen Dehnungen schon aus), jedoch sind auch eine hohe Temperaturabhängigkeit und Nichtlinearität zwischen  $\Delta \varepsilon$  und  $\Delta R$  gegeben.

Die Messgenauigkeit von Dehnmessstreifen liegt für konventionelle Anwendungen zwischen 0,1 und 1 % und kann mit erhöhtem Aufwand auf bis zu 0,005 % reduziert werden. Die Messunsicherheiten hängen stark von der Qualität der Applizierung sowie von äußerlichen Einflüssen und Störgrößen ab.

### 2-1.3 STÖRGRÖSSEN UND SONSTIGE EINFLÜSSE

Dehnmessstreifen dienen der Messung von Formänderungen an der Oberfläche von Bauteilen. Mit den aufgezeichneten Dehnungen und Stauchungen können die Spannungen und damit die Beanspruchung des Werkstoffs ermittelt werden. Neben den mechanischen Einflüssen gibt es auch weitere Faktoren und Störgrößen, welche die Messergebnisse beeinflussen:

- Temperatur

Bei steigender Temperatur dehnt sich das Messobjekt aus, somit werden unerwünschte Dehnungsänderungen gemessen, welche keinen mechanischen Belastungen zugrunde liegen, solange die Dehnungsänderungen ungehindert erfolgen. Diesen Einflüssen kann entgegengewirkt werden, indem selbst-temperaturgangkompensierende DMS eingesetzt, eine DMS-Vollbrücke verwendet oder zusätzlich Temperaturdehnungsmessungen an einem unbelasteten Bauteil des gleichen Werkstoffs durchgeführt werden.

Ein weiteres Problem ist die thermische Drift, welche infolge längerer Wärmeeinwirkung auftreten kann. Dabei können Entspannungsvorgänge im DMS oder im Klebstoff und Gefügeänderungen, Oxydation oder Korrosion des Messgitterwerkstoffs entstehen und somit eine Nullpunktänderung des applizierten DMS zur Folge haben. Auch dieses Problem lässt sich durch eine Vollbrückenschaltung kompensieren.

- Feuchtigkeit

Neben der Temperatur stellt die Feuchtigkeit einen wesentlichen Störfaktor dar. Die Trägerwerkstoffe sind meist hygroskopisch, daher sollte die Messstelle gegen Feuchtigkeit geschützt werden. Es wird unter anderem der Isolationswiderstand zwischen den Leiterbahnen des Messgitters sowie zwischen dem DMS und dem Messobjekt verändert und somit die Messung beeinflusst.

- Kriechen

Beim Kriechen wird trotz konstanter Bauteildehnung eine Dehnungsänderung in Richtung „Entlastung“ des DMS gemessen. Die Ursache liegt in der Federwirkung des Messgitters und der Haltekraft von Trägerfolie und Klebstoff. Der Einfluss ist im üblichen Temperaturbereich sehr gering, kann jedoch bei Erreichen der Maximaltemperatur des Klebstoffs problematisch werden.

- Querempfindlichkeit

Zusätzlich zu den Längsdehnungen werden sehr geringe Dehnungen auch in Querrichtung von DMS signalisiert. Eigentlich sollte der DMS jedoch nur Dehnungen in der „aktiven“ (längs) Richtung aufnehmen. Bei Foliendehnmessstreifen besteht die Möglichkeit, beispielsweise durch eine entsprechende Anordnung der DMS, die unerwünschten Einflüsse von Querdehnungen sehr gering zu halten bzw. zu kompensieren, daher ist dieser Einfluss in der experimentellen Spannungsanalyse unerheblich.

- Hysterese

Die mechanische Hysterese beschreibt den Unterschied der Anzeige zwischen abfallender und ansteigender Dehnungsbeanspruchung bei gleichen Dehnungswerten des Prüfobjekts. Diese hängt nicht vom DMS allein ab, sondern hauptsächlich vom Trägerbauteil und den anderen Bestandteilen der Messstelle.



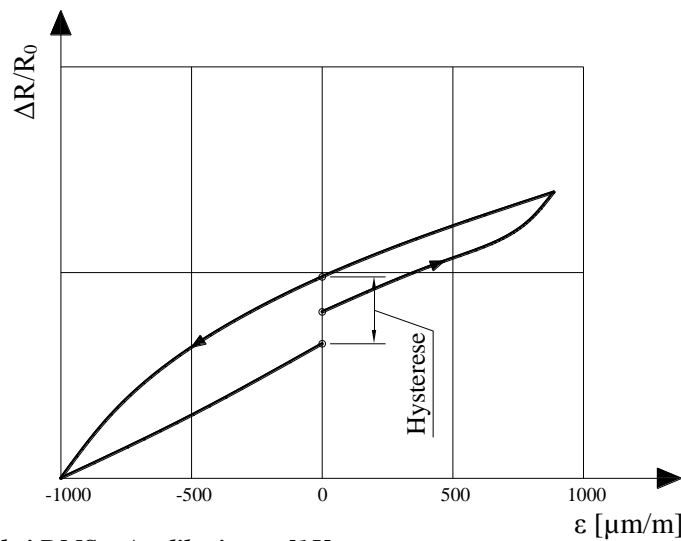


Abbildung 2-2: Hysterese bei DMS – Applikationen [15]

- hydrostatischer Druck  
Einen Einfluss auf die Messung hat auch ein allenfalls vorhandener hydrostatischer Druck oder Unterdruck (Vakuum), dieser ist jedoch sehr gering.
- ionisierende Strahlung  
Zu energiereichen Strahlungen zählen  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -, Röntgen-, Protonen und Neutronenstrahlung. Diese beeinflussen den Messgitterwerkstoff, den Messgitterträger, die Anschlussmittel und den Klebstoff und somit auch den Widerstand des Dehnmessstreifens.
- elektromagnetische Felder  
Starke magnetische Felder können unter anderem, elektrische Spannung in elektrische Leiter induzieren. Dies wirkt sich als Fehler im Messsignal der Dehnungsmessung aus. Um diesen Effekt zu reduzieren, werden in der Praxis teilweise induktionsfreie DMS mit abgeschirmten Kabeln eingesetzt.

## 2-1.4 SCHALTUNGEN VON DMS

Um das gewünschte Messsignal zu erhalten, werden Dehnmessstreifen meist in elektrische Schaltungen (Wheatstonesche Brückenschaltung) eingebunden und das Spannungssignal in einen Verstärker eingespeist. Erst durch eine Wheatstonesche Brückenschaltung ist es möglich, die sehr kleinen Widerstands- in Spannungsänderungen umzuwandeln und eine vernünftige Messung durchzuführen. Herkömmliche DMS werden üblicherweise für Dehnungen bis zu 1000  $\mu\text{m/m}$  eingesetzt, dies entspricht einer Spannungsänderung von 0,5 mV/V bei einer Viertelbrücke mit einem k-Faktor von  $k=2$  (vgl. Gleichung (2.7)). Es werden grundsätzlich vier gleiche Widerstände in symmetrischer Anordnung verwendet, wobei entweder ein (Viertelbrückenschaltung), zwei (Halbbrückenschaltung) oder vier (Vollbrückenschaltung) Widerstände in Verbindung mit den DMS eingesetzt werden. Die Brückenschaltungen beruhen auf dem Grundsatz der Bestimmung der relativen Widerstände. Es ergeben sich somit folgende Vorteile

- die Ausgangsspannung beträgt 0 Volt,
- thermische Dehnungen können durch die symmetrische Anordnung kompensiert werden und
- unerwünschte mechanische Dehnungen quer zur Messrichtung können durch die symmetrische Anordnung kompensiert werden

Für die Brückenveränderung  $U_A/U_B$  gilt folgender Zusammenhang:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.6)$$

mit:	$U_B$	...	Brückenspeisespannung [V]
	$U_A$	...	Brückenausgangsspannung [V]
	$R_1 - R_4$	...	Brückenwiderstände [ $\Omega$ ]
	$\Delta R_1 - \Delta R_4$	...	Widerstandsänderung [ $\Omega$ ]

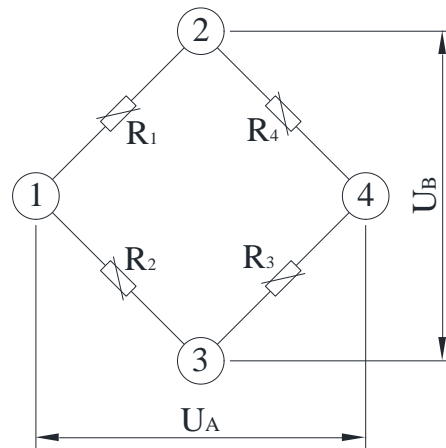


Abbildung 2-3: Darstellung einer Wheatstoneschen Brückenschaltung [15]

Werden die einzelnen Widerstände  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$  gesetzt und die Gleichung (2.5) in die Gleichung (2.6) eingesetzt, so ergibt sich für Viertelbrücken folgendes Verhältnis der Brückenausgangsspannung zur Brückenspeisespannung

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon \quad (2.7)$$

In Abbildung 2-4 sind verschiedene Brückenschaltungen abgebildet. Dabei werden jeweils bestimmte Widerstände in der Außenschaltung mit DMS ersetzt. Somit können Einflüsse, wie beispielsweise Temperatur- oder Querdehnung, gut kompensiert werden.

In der experimentellen Spannungsanalyse werden Viertelbrückenschaltungen am häufigsten verwendet, während im Aufnehmerbau (Kraftaufnehmer, Druckaufnehmer, Drehmomentaufnehmer, usw.) hauptsächlich Vollbrücken Anwendung finden.

Bei Viertelbrückenschaltungen mit drei Leitern kann der Spannungsabfall der Zuleitungen herausgerechnet werden. Im Gegensatz zu Schaltungen mit zwei Leitungen kann somit der Einfluss der Zuleitungen kompensiert werden.

In der Praxis werden folgende Formen der Wheatstoneschen Brückenschaltung angewendet:

- a. Viertelbrücke
- b. Halbbrücke
- c. Zweiviertel- oder Diagonalbrücke
- d. Vollbrücke

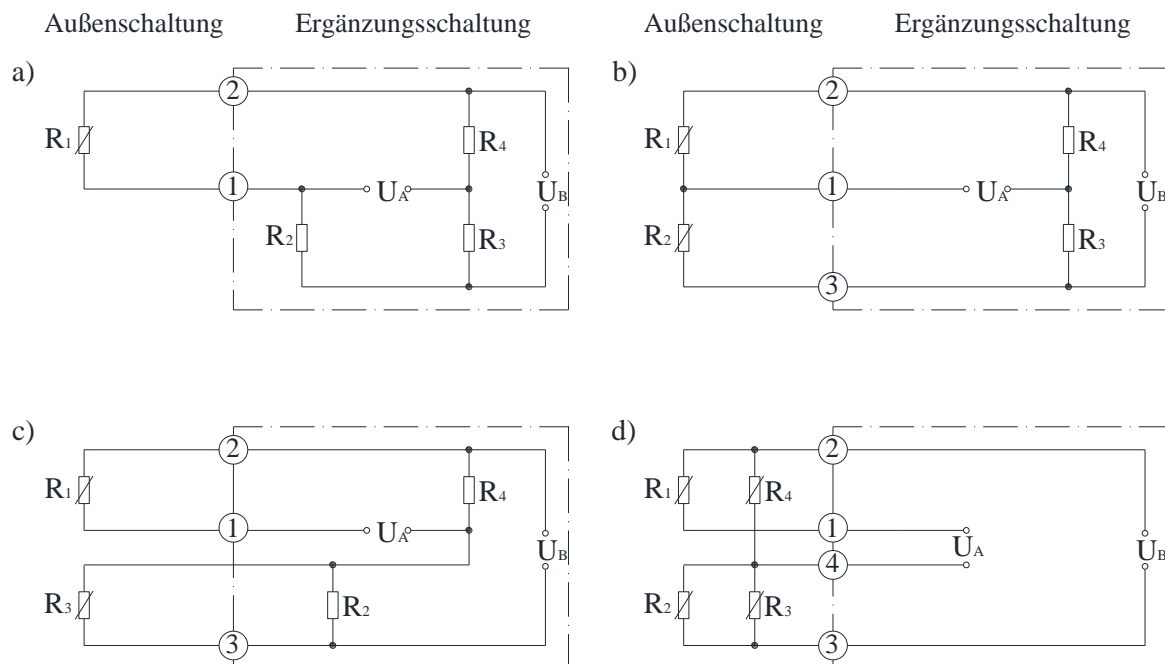


Abbildung 2-4: Anwendungsformen der Wheatstoneschen Brückenschaltung in der DMS-Technik [15]

## 2-1.5 ANWENDUNG VON DMS IM BAUWESEN

Grundsätzlich werden Dehnmessstreifen für folgende Anwendungen verwendet:

### 1. experimentelle Spannungsanalyse

Dehnmessstreifen werden sehr oft im Bereich der Forschung und Entwicklung zur Festigkeitsberechnung, Werkstoffoptimierung, Verifizierung von FEM-Berechnungen usw. eingesetzt. Für diese Anwendungen sind DMS in vielen verschiedenen Varianten und Formen erhältlich.

### 2. Messgrößenaufnehmerbau

An DMS im Aufnehmerbau, wie zum Beispiel bei eichfähigen Wägezellen, werden sehr hohe Ansprüche an die Messgenauigkeit gestellt. Es werden Messgrößen wie Kraft, Dehnung, Masse/Gewicht, Länge, Druck und Drehmoment mit speziellen DMS ermittelt.

### 3. Monitoring

DMS werden auch zur Überwachung von Maschinenbauteilen im Betrieb, Setzungsmessung im Bauwesen und Kontrollmessungen, wie beispielsweise bei Ankern im Tunnelbau, verwendet.

Die Anwendungen von Dehnmessstreifen im Bauwesen reichen von der Forschung und Entwicklung (experimentelle Spannungsanalysen) bis hin zum Monitoring von Tragwerken im Einbauzustand. Viele Messgeräte, wie beispielsweise Wägezellen oder andere Kraftaufnehmer, welche in bautechnischen Prüfeinrichtungen zum Einsatz kommen, sind mit Dehnmessstreifen ausgestattet.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Einsatz von Dehnmessstreifen zur Messung von Axialkräften in Holzschrauben, dafür soll ein DMS in einer Bohrung der Schraubenlängsachse appliziert werden. Da ähnliche Formen von DMS-Messschrauben im Stahlbau bereits existieren, wird diese Verwendungsmöglichkeit in weiterer Folge näher beschrieben.

### 2-1.5.1 Einsatz von DMS in Stahlbau-Messbolzen

Es gibt bereits spezielle DMS, die für die Applizierung im Kern einer Schraube mit metrischem Gewinde entwickelt wurden. Solche „Messbolzen“ werden vorwiegend im Stahlbau, aber auch im Maschinenbau eingesetzt. Dehnmessstreifen des Typs BTM der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. wurden eigens dafür entwickelt, die Dehnungen in der Bolzenlängsachse zu messen und sind geeignet für die Applizierung in Schrauben ab einem Durchmesser von acht Millimetern.

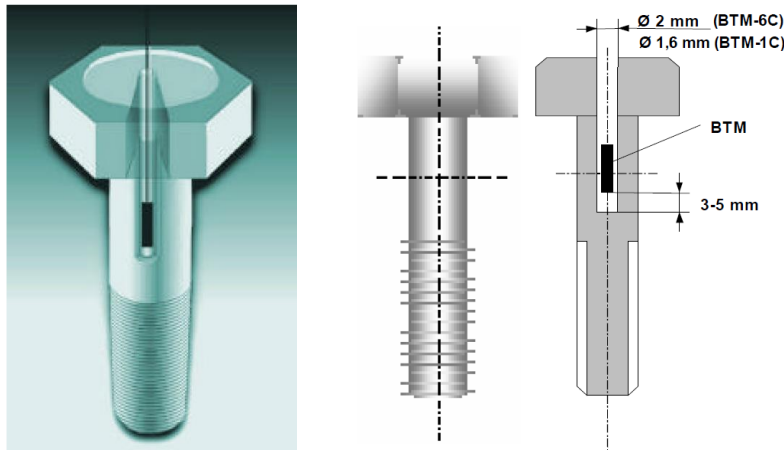


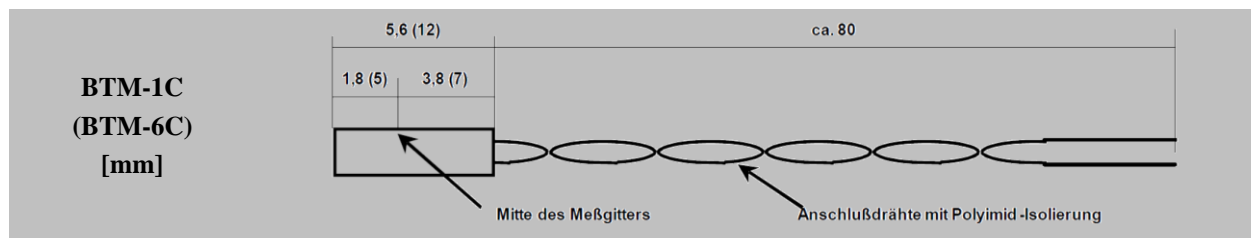
Abbildung 2-5: Bolzen mit DMS appliziert [4]

In Tabelle 2-1 sind die Abmessungen und Eigenschaften von Bolzen-DMS angeführt.

Tabelle 2-1: Dehnmessstreifen BTM – Abmessungen und Eigenschaften [4]

Gittermaterial	Trägermaterial	Einsatztemperatur [°C]	Max. Dehnbarkeit
spezielle Legierung (Folie DMS)	glaserverstärktes Polyamid-Harz	-10 bis +80	0,5 % (5000µm/m) Zug- und Druck

Typ	anwendbar für Bolzen	Bohrungsdurchmesser [mm]	Gitterlänge [mm]	Gitterbreite [mm]	Trägerlänge [mm]	Trägerbreite [mm]	Widerstand [Ω]	Anschlussdrähte	DMS pro Packung
BTM-6C	≥ M10	2,0	6,0	1,0	12	1,7	120	80mm	10
BTM-1C	≥ M8	1,6	1,0	0,7	5,6	1,4	120	80mm	10



Klebstoff	Art	Inhalt/Pakung	1 Packung reicht für	Bemerkungen
A-2	Zweikomponenten-Klebstoff, Epoxy	50 g / 5 g	30 – 50 DMS in M16 Bolzen	12 Stunden bei Raumtemperatur und drei Stunden bei 140 °C aushärten

Zwei solche Bolzen mit unterschiedlicher Länge, welche jeweils mit einem Dehnmessstreifen in einem zentrischen, zwei Millimeter dicken Bohrloch appliziert wurden, sind in Abbildung 2-6 zu sehen.



Abbildung 2-6: Messschraube im Stahlbau [5]

Neben den beschriebenen flachen Dehnmessstreifen für die Einbringung im Schraubenkern sind auch zylindrische DMS erhältlich, welche an das Bohrloch angepasst sind. Diese Sonderbauform kommt jedoch selten zur Anwendung.

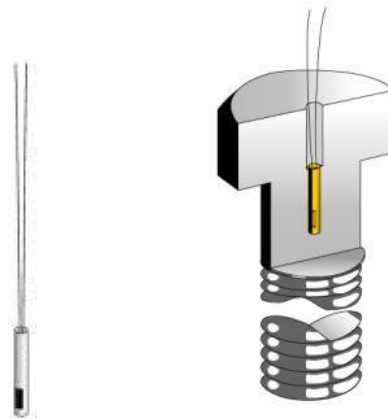


Abbildung 2-7: zylindrische DMS in Bolzen [21]

Außerdem sind auch fertig applizierte Bolzen bzw. Schrauben mit metrischem Gewinde erhältlich. Diese Messschrauben sind sofort einsatzbereit und müssen nur noch an das Messsystem angeschlossen werden. Solche fertig applizierten Messschrauben gibt es mit verschiedenen Schraubenköpfen und Aufsätzen. In Abbildung 2-8 sind verschiedene Varianten dargestellt.



Abbildung 2-8: Messbolzen im Stahlbau – verschiedene Formen [22]

## 2-2 EINSATZ VON DEHNMESSSTREIFEN IM HOLZBAU

---

### 2-2.1 EINFÜHRUNG

Bereits in den 1950er und 1960er Jahren untersuchten RADCLIFFE [23] und SILKER [24], [25] die Anwendungsmöglichkeiten von Dehnmessstreifen auf Holzoberflächen. Wichtige Beiträge zu diesem Thema lieferten später auch BRÖKER [26] BEER et al. [27], KUFNER [28], [29] und VANEK [30], welche die Probleme der Applizierung von Dehnmessstreifen auf Holz zusammenfassten und die Zuverlässigkeit von DMS-Messstellen direkt auf der Holzoberfläche untersuchten.

Dehnmessstreifen eignen sich sehr gut für die Anwendung auf metallischen Oberflächen. Da dies schon jahrzehntelang erfolgreich praktiziert wird (patentiert durch RUGE 1944 [31] und SIMMONS 1946 [32]), sind umfangreiche Erfahrungswerte vorhanden. Werden die DMS jedoch direkt auf der Oberfläche von Holz oder Holzwerkstoffen appliziert, sind laut DUDESCU [33] zusätzlich folgende Besonderheiten zu beachten:

- Die Struktur von Naturholz und Holzwerkstoffen ist nicht homogen, sondern zellular und unregelmäßig aufgebaut, somit kann es zu lokalen Dehnungsunterschieden kommen. Es ist wichtig, dass der Dehnmessstreifen deutlich breiter und länger ist, als die Zellstruktur bzw. die Abmessungen der Einzelbestandteile von Holzwerkstoffen, um die Dehnungsunterschiede zu kompensieren.
- Holz und Holzwerkstoffe sind poröse Bauteile, somit kann Klebstoff in die Oberfläche eindringen und die Festigkeitseigenschaften von Holz lokal ändern. Dies verfälscht die Messergebnisse und lässt sich nur schwer kompensieren.
- Idealerweise hat ein Dehnmessstreifen dieselben Dehnungseigenschaften wie sein Trägerbauteil. Dies ist bei Holz nicht der Fall, da der Elastizitätsmodul vom DMS rund zwanzigmal höher ist als der von Holz.
- Dehnmessstreifen haben die Aufgabe, die Dehnung mittels Widerstandsänderung im Messgitter zu messen. Dazu ist es notwendig, elektrische Spannung in den DMS einzuleiten. Da Holz ein schlechter Wärmeleiter ist, kann die entstehende Wärme nur bedingt an den Untergrund abgegeben und verteilt werden. Die Wärme bleibt somit im Bereich der Messstelle und kann folglich zu thermischen Messfehlern führen.
- Die Temperaturkompensation bei Dehnungsmessungen mit DMS auf Holzoberflächen ist generell schwierig, da Holz bei Feuchteänderung quillt und schwindet. Somit kann es sein, dass bei einer Erwärmung eine negative Dehnung aufgrund der Holz Trocknung und dem damit verbundenen Schwinden auftritt. Zusätzlich ist diese Dehnung von der Faserrichtung abhängig.

SILKER [25] stellte fest, dass die Dehnungswerte parallel zur Faserrichtung des Holzes um max. 4 % und quer zur Faserrichtung um max. 44% von den tatsächlichen Dehnungsänderungen abweichen. Diese Werte sind jedoch auch von der Wahl des Klebstoffs abhängig. Die Abweichungen sind auf den Effekt der lokalen Versteifung zurückzuführen, welcher sich aufgrund des niedrigen E-Moduls des Holzes quer zur Faserrichtung verstärkt auswirkt.

Auch die Autoren von [26], [27], [28], [29], [33], [34], [35] und [36] kamen in ihren Untersuchungen auf ähnliche Ergebnisse. Die Werte der mit den DMS gemessenen Dehnungsänderungen lagen durchgehend unter den tatsächlichen Dehnungsänderungen. Dies ist auf die oben beschriebene lokale Versteifung aufgrund des Klebstoffs zurückzuführen.

Um die Fehlmessungen von Dehnmessstreifen auf Holzoberflächen im Vergleich zu Referenzwerten zu kompensieren, wird vorgeschlagen, den k-Faktor für solche Messungen neu zu kalibrieren [28], [27], [34].



BEER et al. [27] stellte ein thermisches Driftverhalten durch Erwärmung der Messstelle fest, welches mit zunehmender Länge der Dehnmessstreifen abnimmt. Ein Driften ist auch noch nach dem thermischen Gleichgewicht zu erkennen, dies ist auf die Austrocknung im Bereich der Messstelle zurückzuführen.

### 2-2.1.1 Prüfungen mit DMS auf Holzoberflächen

Der Vergleich von DMS-Werten mit tatsächlich auftretenden Dehnungswerten von Holzoberflächen wird meist mittels einer Vier-Punkt-Biegeprüfung durchgeführt. Die Referenzdehnung wird mit Hilfe von gemessenen Durchbiegungen und geometrischen Verhältnissen ermittelt.

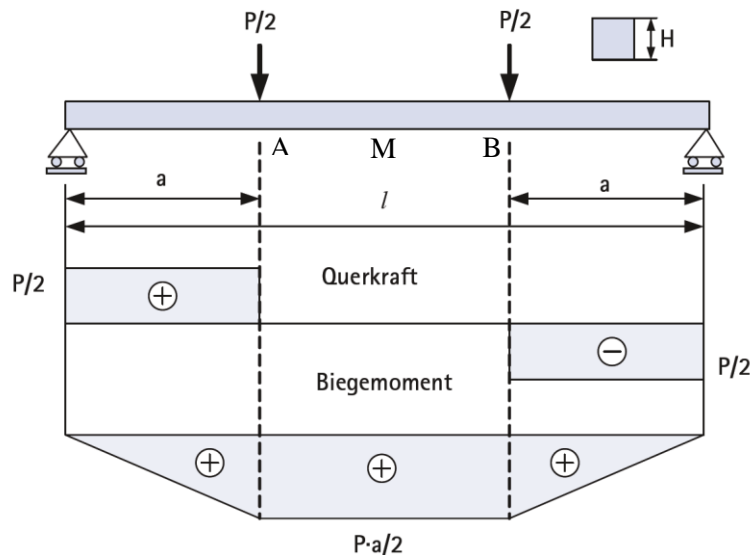


Abbildung 2-9: 4-Punkt-Biegeprüfung zur Ermittlung der Dehnung der Randfaser [33]

Dabei wird an den Stellen A, M und B die vertikale Verschiebung gemessen. Der Verformungsverlauf zwischen A und B kann als kreisförmig angesehen werden, da der Biegemomentverlauf in diesem Bereich konstant und keine Querkraft vorhanden ist. Somit gilt die in Abbildung 2-10 dargestellte, geometrische Beziehung.

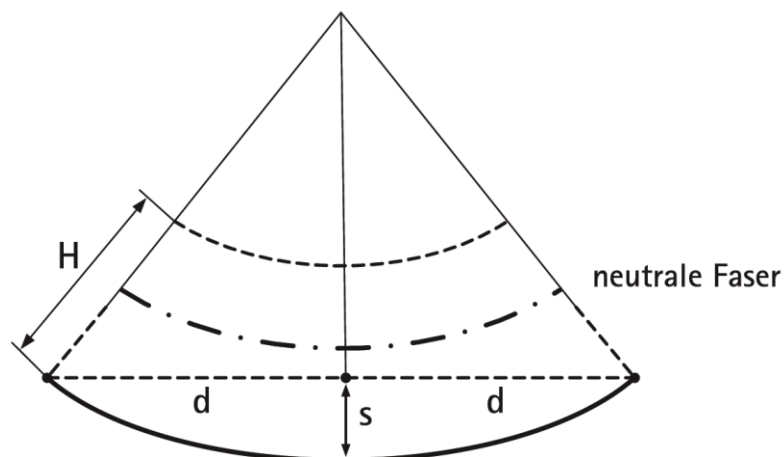


Abbildung 2-10: geometrische Beziehungen bei einer Balkenbiegung [33]

Daraus ergibt sich für die Dehnung der unteren Randfaser folgende Gleichung:

$$\varepsilon = \frac{H \cdot s}{s^2 + d^2} \quad (2.8)$$

mit:	$\varepsilon$	...	Dehnungsänderung der unteren Randfaser [-]
	H	...	Höhe des Balkens [mm]
	s	...	Differenz der vertikalen Verschiebungen am Rand (A, B) und in der Mitte (M) [mm]
	d	...	Abstand zwischen den Messpunkten der vertikalen Wegaufnehmer [mm]

Die Referenzdehnung wurde unter anderem von NEUHÄUSER [35] und DUDESCU [33] mittels Gleichung (2.8) ermittelt und mit den Ergebnissen der DMS-Messungen, welche am selben Prüfkörper zeitgleich durchgeführt wurden, verglichen. Mit diesem Vergleich konnten die oben beschriebenen Abweichungen von DMS-Messungen auf Holzoberflächen nachgewiesen werden.

DUDESCU [33] stellte zusätzlich noch eine weitere Gleichung auf, bei der nur eine Messung der Durchbiegung in der Mitte des Biegebalkens notwendig ist. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Methode deutlich größere Abweichungen aufweist und weniger geeignet ist.

### 2-2.1.2 Prüfungen mit DMS auf Holzpartikelwerkstoffen

NIEMZ et al. [37] führte 4-Punkt-Biegeprüfungen mit Holzpartikelwerkstoffen, wie OSB, Spanplatten und MDF durch und ermittelte mittels Moiré-Verfahren die Dehnungsverteilung über die Dicke des Prüfkörpers. Diese Werte wurden mit den Ergebnissen einer DMS-Messung verglichen. In Abbildung 2-11 ist die betreffende Prüfkfiguration dargestellt, wobei auch die Position der DMS sowie der Objektraster für das Moiré-Verfahren dargestellt sind.

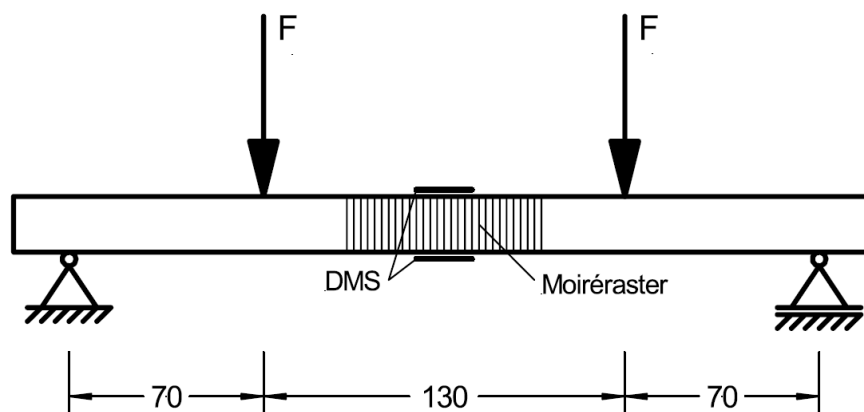


Abbildung 2-11: Prüfkfiguration – Vergleich Moiré-Verfahren und DMS-Messung (Abmessungen in mm) [37]

Das Moiré-Verfahren beruht auf dem Prinzip der geometrisch-optischen Überlagerung zweier Strukturen, wie beispielsweise Linien-, Punkt- oder Kreuzraster, welche auf den Prüfkörpern aufgebracht werden. Dieser Objektraster erfährt die gleichen Verzerrungen wie die Bauteiloberfläche und wird mit einem Referenzraster verglichen, um die Dehnungen zu ermitteln (vgl. [38]).

Zusätzlich wurden Foliendehnmessstreifen mit einer Länge von 50 mm und einer Breite von 4 mm direkt auf die Oberfläche der Holzpartikelwerkstoffe appliziert und damit die Randfaserdehnungen erfasst. Die Ergebnisse der DMS-Messung wurden mit jenen des Moiré-Verfahrens verglichen. Die beiden Messverfahren zeigten eine sehr gute Übereinstimmung der Randfaserdehnungen. Bei niedrigen Biegespannungen stellten sich auf der Unter- und Oberseite des Bauteils nahezu die gleichen Dehnungen ein.

Ein weiteres Einsatzgebiet von Dehnmessstreifen im Holzbau ist die Applizierung der DMS auf oder in Verbindungsmitteln. Die in der Vergangenheit gewonnenen wichtigsten Erkenntnisse als Grundlage für die vorliegende Arbeit sind in den Abschnitten 2-2.2 bis 2-2.7 zusammengefasst.



## 2-2.2 EINSATZ VON DMS BEI EINGEKLEBTEN UND EINGESCHRAUBTEN GEWINDESTANGEN – EHLBECK UND SIEBERT 1987

In den Jahren 1983 bis 1986 untersuchten EHLBECK und SIEBERT [39] unterschiedliche Einklebmethoden und Wirkungsweisen von eingeklebten und eingeschraubten Gewindestangen in Holz unter Axialbelastung. Um die in Längsrichtung auftretenden Haftspannungsverteilungen verschiedener Gewindestangenformen zu bestimmen, wurden Dehnmessstreifen auf diese appliziert. Es wurden Stangen mit metrischem Gewinde (Gewindestangen nach DIN 975 [40]), Schlüsselschrauben (Sechskant-Holzschrauben nach DIN 571 [41]) und GEWI-Stähle aus Spannstahl 1080/1230 (Betonrippenstäben) mit je ein bis zwei Nuten versehen, auf welchen die DMS befestigt werden konnten. Diese Nuten wurden nach dem Verlegen und Anlöten der Anschlusskabel mit Polyesterharz ausgegossen, um die Messstellen und deren Anschlüsse vor Beschädigungen zu schützen.

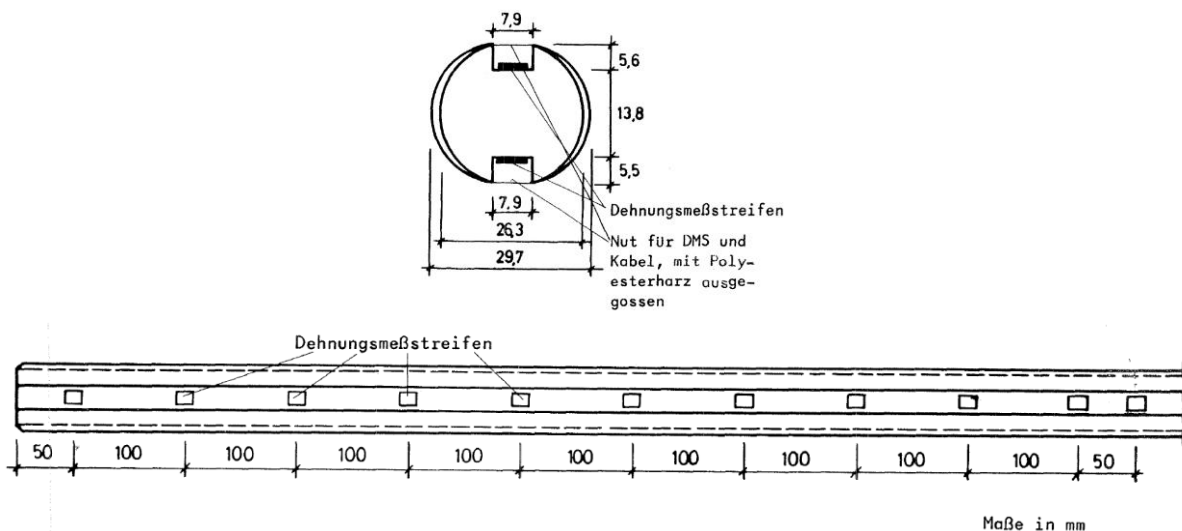


Abbildung 2-12: exemplarische Anordnung der Dehnmessstreifen auf einer eingeklebten Gewindestange [39]

Zur Einklebung der Stangen in den Holzprüfkörpern kamen Resorzinharz und Polyurethanklebstoff zur Anwendung. Insgesamt wurden 231 Einzelprüfungen an Vollholz und Brettschichtholz mit eingeklebten und eingeschraubten Stangen durchgeführt. Diese erfolgten in Form von Auszieh- und Druckprüfungen in verschiedensten Konfigurationen.

Mittels Dehnmessstreifen wurde der Dehnungsverlauf der eingeklebten bzw. eingeschraubten Stahlstangen aufgezeichnet und daraus die Gradienten der ermittelten Dehnungskurve der jeweilige Haftspannungsverlauf ermittelt.

Die Ergebnisse zeigten unter anderem, dass ohne Klebstoff eingeschraubte Gewindestangen in Holz eine gleichmäßigere Kraftabtragung über die Einschraubtiefe aufweisen als eingeklebte Stangen. Außerdem zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen der Anordnung parallel und im rechten Winkel zur Holzfaserrichtung. Bei Auszieh- und Eindrückprüfungen von Stahlstangen im Holz entstehen parallel zur Holzfaserrichtung am Beginn der Kräfteinleitung deutlich höhere Spannungsspitzen als rechtwinklig dazu. Dieser Umstand ist auf die höhere Dehnsteifigkeit des Holzes parallel zur Faserrichtung zurückzuführen.

### 2-2.3 EINSATZ VON DMS BEI EINGEKLEBTEN GEWINDESTANGEN – BLASS UND LASKEWITZ 2002

Im Jahr 2002 untersuchten BLASS und LASKEWITZ [42] die axiale Kraftverteilung in der Bewehrung von Satteldachträgern mit gekrümmtem Untergurt aus Brettschichtholz mithilfe von Dehnmessstreifen. Zusätzlich wurden die Ergebnisse aus den Prüfungen einer numerischen Berechnung gegenübergestellt und mit dem Bemessungskonzept aus dem damaligen Entwurf der DIN 1052:2000-05 [43] verglichen.

Es wurden fünf Satteldachträger mit gekrümmtem Untergurt aus Brettschichtholz mit eingeklebten Gewindestangen im gekrümmten Bereich verstärkt und anschließend einer 4-Punkt-Biegeprüfung unterzogen. Jeweils ein Gewindebolzen im Firstbereich wurde mit 10 Dehnmessstreifen appliziert. Dafür wurde ein Gewindebolzen seitlich mit Nuten versehen, um die DMS dort zu platzieren. Der applizierte Gewindebolzen hatte einen Außendurchmesser von 20 mm, um durch die Querschnittsschwächung aufgrund der Nuten annähernd dieselbe Querschnittsfläche, wie die restlichen M16 Gewindebolzen zu erreichen.

Die Abmessungen der Satteldachträger und die Prüfkonfiguration der 4-Punkt-Biegeprüfung sind in Abbildung 2-13 dargestellt.

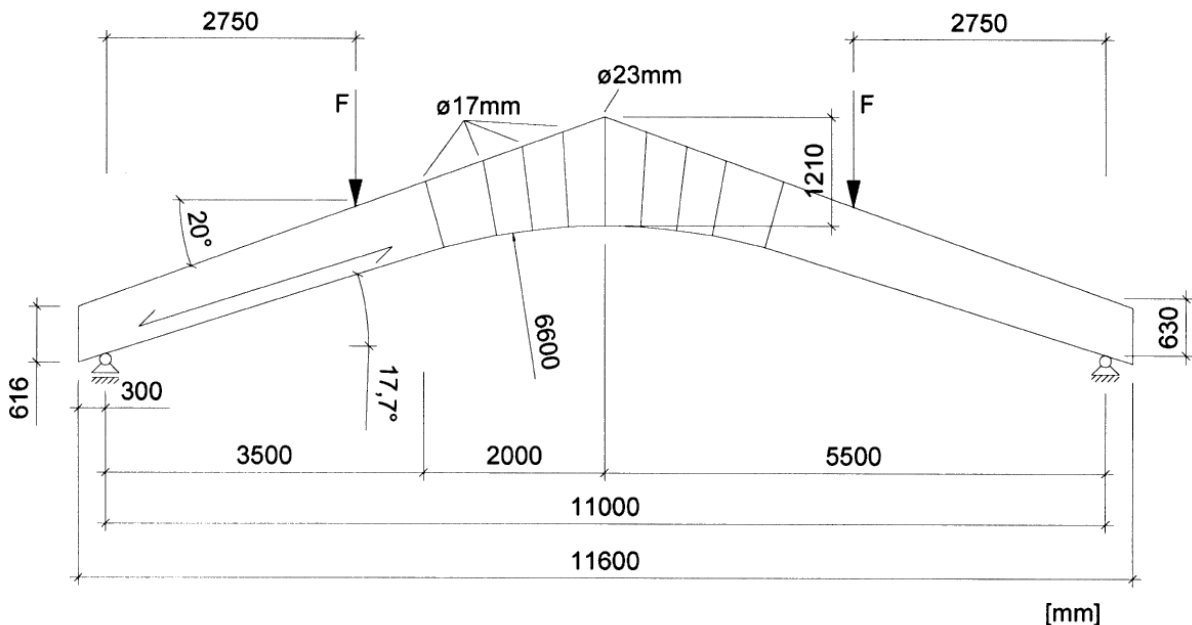


Abbildung 2-13: Satteldachträgerabmessungen für den 4-Punkt-Biegeprüfung [42]

Die Dehnmessstreifen wurden in den Nuten des Gewindebolzens über die Länge verteilt angeordnet, um die Kraftverteilung in der Querzugverstärkung zu ermitteln. Die Aufteilung der DMS über die Länge der Gewindebolzen ist in Abbildung 2-14 ersichtlich. Die mit Dehnmessstreifen applizierten Gewindestangen wurden mittels Zugprüfungen kalibriert, bevor diese in den Träger eingeklebt wurden. Somit lag für jeden Gewindebolzen eine Kraft-Dehnungsbeziehung vor, welche für die Prüfauswertung herangezogen wurde.

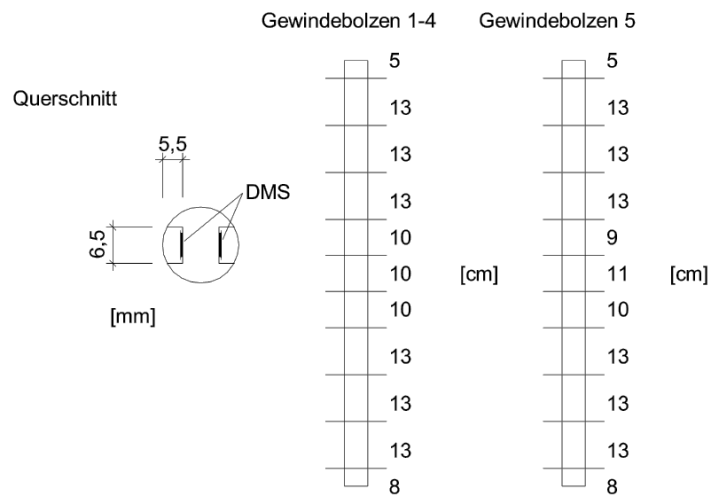


Abbildung 2-14: Verteilung der Dehnmessstreifen auf den Gewindebolzen [42]

Die Prüfung erfolgte verformungsgesteuert und alle Träger wurden bis zum Bruch belastet. Mithilfe der aus den Kalibrierungsprüfungen gewonnenen Kraft-Dehnungsbeziehungen konnten die Kräfte in den Stangen festgestellt werden. Der ermittelte Kraftverlauf in den Gewindestangen spiegelt den qualitativen Verlauf der Querszugspannungen im Firstbereich wieder. Dieser Verlauf ist in Abbildung 2-15 dargestellt, wobei die Kurven bestimmten Laststufen (Biegemoment im Firstquerschnitt) zugeordnet sind.

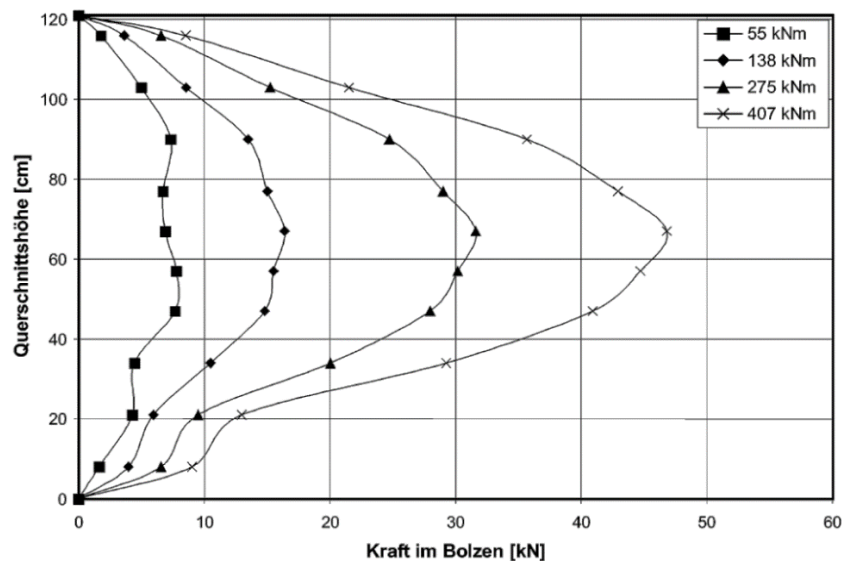


Abbildung 2-15: exemplarische Kraftverteilung eines Verstärkungselements in Satteldachträgern [42]

Zusätzlich wurde mittels der Dehnsteifigkeiten des Holzes und der Gewindebolzen die Aufteilung der berechneten Querszugkraft auf den Bolzen und das Holz untersucht und mit jener aus der Berechnung nach E DIN 1052:2000-05 [43] sowie einer numerischen Berechnung verglichen. Die Ergebnisse aus den Prüfungen und jene aus der numerischen Berechnung wiesen eine gute Übereinstimmung auf. Es zeigte sich allerdings eine Diskrepanz zwischen der mechanischen Überlegung des numerischen Modells und der Berechnung nach dem Entwurf der DIN 1052:2000-05 [43], da sich die Querszugspannung aufgrund der größeren Steifigkeit des verstärkten Trägers in radialer Richtung im Vergleich zum unverstärkten Träger erhöhte. Dies hatte jedoch keine große Bedeutung für das Bemessungskonzept des Entwurfs der DIN 1052:2000-05 [43], da die gesamten Querszugkräfte dem Bolzen zugewiesen wurden und diese kleiner waren als die berechneten bzw. gemessenen Werte. Somit lag die Normbestimmung auf der sicheren Seite.

## 2-2.4 EINSATZ VON DMS BEI EINGEKLEBTEN GEWINDESTANGEN – BERNASCONI 2009

Im Rahmen des 15. internationalen Holzbauforums 2009 in Garmisch-Partenkirchen präsentierte BERNASCONI [44] die Ergebnisse einer Untersuchung des Tragverhaltens von eingeklebten Gewindestangen, wobei unter anderem eine messtechnische Erfassung der axialen Kraftverläufe mittels Dehnmessstreifen erfolgte.

Hierfür wurden die Stahlstangen zuvor mit Dehnmessstreifen appliziert und danach auf Herausziehen geprüft. Die Stahlstangen der Festigkeitsklasse S550 wurden an den Messstellen angeschliffen und mit bis zu 14 DMS bestückt, wobei jeweils zwei DMS gegenüberliegend angeordnet wurden. Die Einklebelänge betrug zwischen 200 und 600 mm. Die Stahlstangen mit einem Durchmesser von 20 mm wurden einerseits längs und andererseits quer zur Holzfaserrichtung eingeklebt. Jede mit DMS bestückte Stahlstange wurde an einer Zugprüfmaschine kalibriert und die Messstellen mit einer Schutzschicht geschützt, bevor die Stangen mit Epoxidharz in den Holzprobekörpern eingeklebt wurden.

Die mit Dehnmessstreifen applizierten und in BSH eingeklebten Stahlstangen wurden anschließend auf Herausziehen geprüft, wobei die Streckgrenze nicht überschritten werden sollte. In Abbildung 2-16 und Abbildung 2-17 sind die Kraftverläufe in den Stahlstangen abgebildet. Die Stangenachse wurde als x-Achse bezeichnet und der 0-Punkt befindet sich an der Holzoberkante, wo die Kraft in der Stahlstange ihr Maximum erreicht.

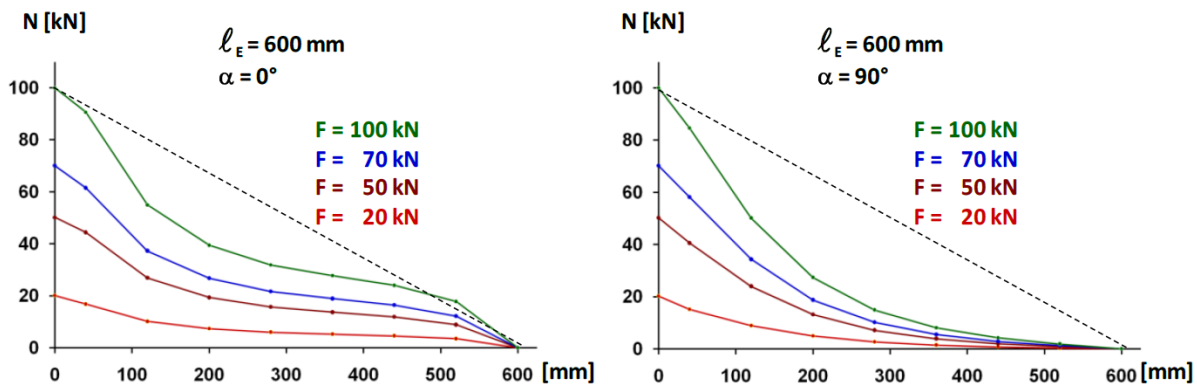


Abbildung 2-16: exemplarischer Verlauf der Normalkraft in der Stahlstange bei  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 90^\circ$  [44]

Wird für jeden Stangenabschnitt die Kraftabnahme aus den gemessenen Kräften berechnet und über die Einschraublänge in einem Diagramm dargestellt, so ergibt sich der Verlauf der von der Stahlstange auf das Holz übertragenen Kraft. Diese Kraft dividiert durch die Kontaktoberfläche, ergibt die Schubspannungen in der Klebefuge. Der Schubspannungsverlauf ist in den folgenden Diagrammen für parallel und normal zur Holzfaser eingeklebte Gewindestangen abgebildet:

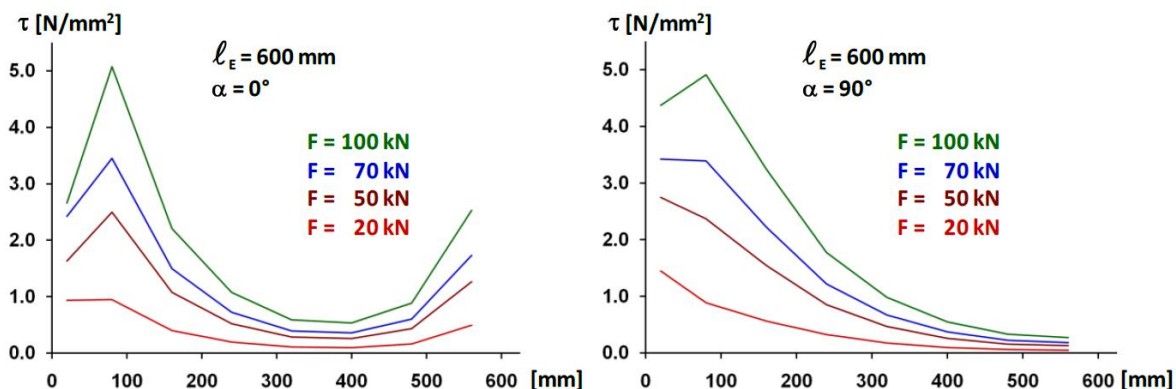


Abbildung 2-17: exemplarischer Schubspannungsverlauf in der Kontaktfuge bei  $\alpha = 0^\circ$  und  $\alpha = 90^\circ$  [44]

Die Ergebnisse dieser Prüfungen zeigten, dass eine (gemäß [44]) erwartete Linearität des Normkraftverlaufes in den eingeklebten Stahlstangen nicht bestätigt werden konnte. Bei parallel ( $\alpha = 0^\circ$ ) zur Holzfaser eingeklebten Stahlstangen ist im Gegensatz zu senkrecht ( $\alpha = 90^\circ$ ) zur Holzfaser eingeklebten Stangen eine größere Abnahme der Normalkräfte und eine deutliche Spannungsspitze der Schubspannung am Ende der Stahlstangen zu erkennen.

## 2-2.5 EINSATZ VON DMS BEI EINGEDREHTEN SCHRAUBSTANGEN – WALLNER 2012

Im Jahr 2012 untersuchte WALLNER [45] im Rahmen seiner Masterarbeit die Auswirkung des Quellens und Schwindens von Brettschichtholz auf eingedrehte Schraubstangen, welche häufig als Verstärkungsmaßnahmen eingesetzt werden. Unter anderem wurden die eingedrehten Schraubstangen mit Dehnmessstreifen appliziert, um die resultierenden Kräfte zufolge der feuchteinduzierten Verformungen des Holzes zu ermitteln. Die größte Herausforderung stellte die Applizierung der DMS dar, da die Stangen eingeschraubt wurden und eine nachträgliche Anbringung aufgrund der eingeschränkten Zugangsmöglichkeiten der Klebestellen kaum möglich war. Außerdem mussten die Schraubstangen mit den befestigten DMS zuvor kalibriert werden. Um dies zu ermöglichen und das problemlose Eindrehen der mit DMS bestückten Schraubstangen zu gewährleisten, wurde zuvor beidseitig ein Plateau in der Mitte der Schraubstange geschaffen (Abbildung 2-18).

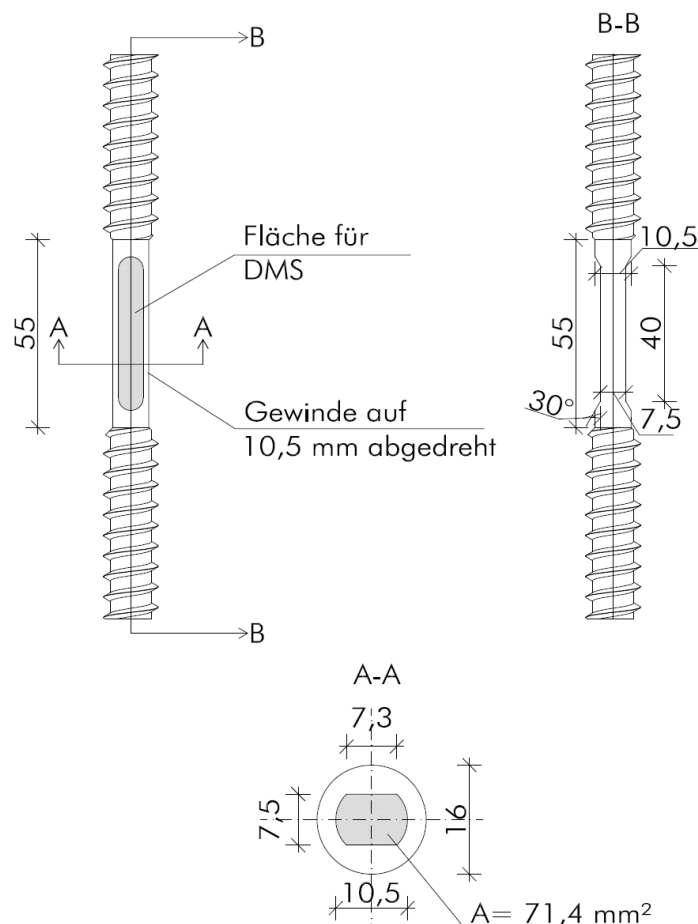


Abbildung 2-18: Bearbeitung der Schraubstangen zur Anbringung der Dehnmessstreifen [45]

Auf diesen beiden Flächen wurde jeweils ein Dehnmessstreifen appliziert, wodurch eine Vollbrücke realisiert werden konnte, welche den Einfluss der Biegung der Stange kompensieren sollte. Es wurden Dehnmessstreifen vom Typ 6/120LY41 des Herstellers HBM mittels 1-K-Klebstoff aufgeklebt. Die bereits

mit den DMS applizierten Schraubstangen wurden danach an einer Universalprüfmaschine kalibriert. Um die aufgeklebten Dehnmessstreifen und deren Drähte beim Einschrauben zu schützen, wurde die Messstelle mit einer aufgeklebten Edelstahlhülse ummantelt, wie man in Abbildung 2-19 erkennen kann.



**Abbildung 2-19: Messstelle auf Schraubstange [45]: links: applizierter DMS mit Anschlusskabel; rechts: Schutzhülse**

Die Haftbarkeit der aufgetragenen Schutzhülse durfte nicht zu groß sein, da diese nach dem Einschrauben der Schraubstange wieder entfernt werden musste. Außerdem durfte der Durchmesser der schützenden Edelstahlhülse nicht größer sein, als der Kerndurchmesser ( $d_{GK} = 12 \text{ mm}$ ) der Schraubstange. Die Freilegung der Messstelle erfolgte über ein zuvor durch das Brettschichtholz gebohrtes Loch mit einem Durchmesser von 63 mm (Abbildung 2-20).



**Abbildung 2-20: Zugangslloch zur Messstelle mittels eingebohrtem Loch [45]**

Nachdem die Messstelle und die Drähte freigelegt waren, wurde, wie in Abbildung 2-21 gezeigt, das Loch mit einem „Pfropfen“ verschlossen, um störende Einflüsse durch das Bohrloch auf das Feuchteverhalten des Holzes zu minimieren.



**Abbildung 2-21: verschlossene Messstelle [45]**



Die Dehnmessstreifen wurden in weiterer Folge an einen Datenlogger angeschlossen und die Kraftänderung in den Schraubstangen einmal pro Stunde aufgezeichnet. Dies erfolgte für einen Zeitraum von 91 Tagen. Zusätzlich erfolgte eine Applizierung von DMS an zwei separaten Schraubstangen, welche nicht eingedreht wurden. Diese sollte ein mögliches Driften aufgrund von Temperaturschwankungen erfassen (siehe Abschnitt 2-1.3), um gegebenenfalls die Ergebnisse korrigieren zu können.

Insgesamt wurde die Untersuchung bei 20 Prüfkörpern aus BSH mit einer Breite von 160 mm und unterschiedlichen Längen und Höhen durchgeführt. Es wurde ein Schwinden des Holzes eingeleitet, indem bei einer Temperatur von 20 °C die relative Luftfeuchtigkeit von 90 % auf 40 % reduziert wurde. Die Holzgleichsfeuchtigkeit  $u_{GI}$  liegt bei diesen Bedingungen bei rund 10 % (Ausgangsfeuchte: 18 %).

Erstaunlicherweise erfolgte in den Schraubstangen eine sehr rasche Zunahme der Druckspannung. Innerhalb einer Stunde stieg die Kraft in den langen Schraubstangen der Prüfgruppe 1 ( $l = 1280$  mm) um 0,4 bis 1,0 kN, somit wurde nach einer Woche eine Druckkraft von ca. 20 kN erreicht. Es war ersichtlich, dass der Zuwachs der Kraft in der Schraubstange stark mit der Höhe des Prüfkörpers zusammenhängt. Nach einiger Zeit entstanden Risse, meist in der Mitte der Prüfkörper, welche jedoch erst ab einer Tiefe von rund 20d einen Spannungsabfall in der Schraubstange zur Folge hatte.

Bei einer Holzfeuchteänderung der Probekörper von 4 % stellte sich in den eingedrehten Schraubstangen eine Kraft von rund 63 kN ein. Diese Kraftänderung ist sehr hoch, wenn man den Bemessungswert der axialen Tragfähigkeit der Schrauben ( $R_{ax,d} = 72,40$  kN; aus [45]) in Betracht zieht.

Schlussendlich wurden die Schraubstangen nach Abschluss der Messungen erneut überprüft, um sicherzustellen, dass die Dehnmessstreifen dasselbe Verhalten wie vor der Messung aufweisen und die Messergebnisse somit von den zuvor erläuterten Störgrößen unbeeinflusst waren.

## 2-2.6 EINSATZ VON DMS ZUR MESSUNG DER SPALTWIRKUNG VON SCHRAUBEN – UIBEL 2012

Im Rahmen seiner Dissertation untersuchte UIBEL [46] das Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. Unter anderem wurden Prüfstücke in der Mitte aufgetrennt und die beiden Hälften mit Messbolzen, welche mit Dehnmessstreifen appliziert wurden, wieder zusammengespannt (Abbildung 2-22).

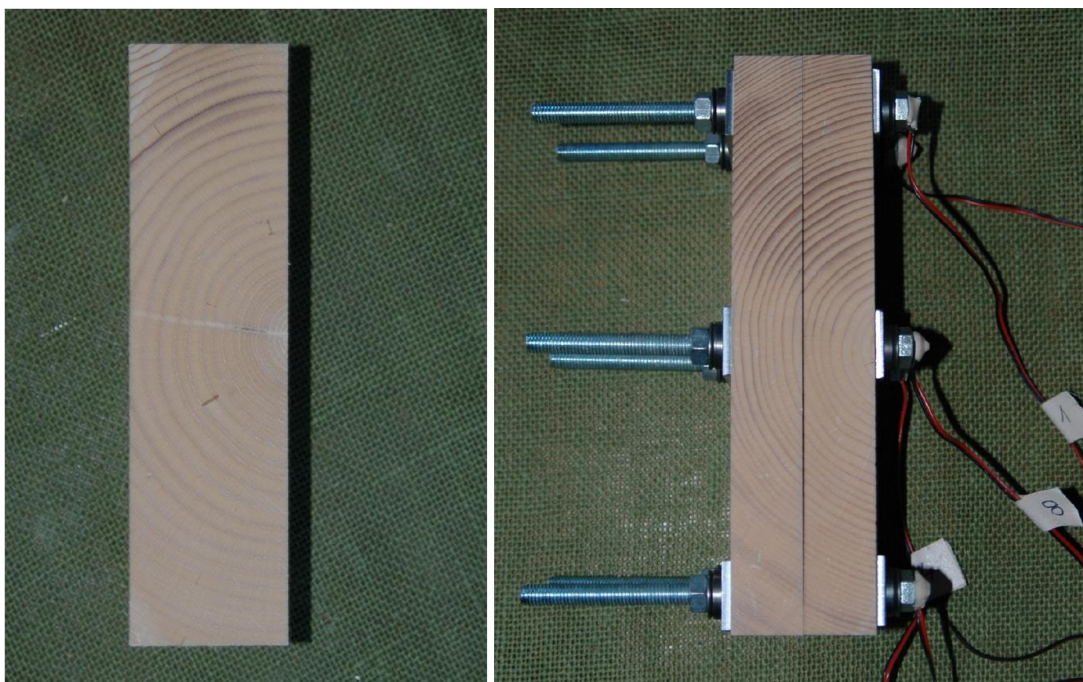


Abbildung 2-22: Prüfkörper zur Ermittlung der Spaltkräfte von Schrauben nach [46]

Die Messschrauben verfügen über ein metrisches Gewinde mit einem Außendurchmesser von acht Millimetern. Mit deren Hilfe wurden die beiden Prüfkörperhälften über eine Bohrung mit einem Durchmesser von neun Millimetern zusammengefügt. Die Schrauben wurden zuvor entlang ihrer Längsachse aufgebohrt und mit Dehnmessstreifen appliziert, um die Längsdehnung zu messen. Außerdem wurde der Querschnitt der Messschraube im Bereich des DMS reduziert, damit die erforderliche Messung der Dehnung sichergestellt werden konnte. Es wurden verschiedene Konfigurationen mit jeweils sechs, acht, und zehn Messschrauben geprüft. Jede Messschraube wurde zuvor mittels einer Zugprüfung (10 kN) kalibriert, um eine Kraft-Dehnungsbeziehung herzustellen.

Im Rahmen der Messungen erfolgte eine Vorspannung der Messschrauben mit einer Kraft von 100 N, um zu gewährleisten, dass die beiden Prüfkörperhälften vollflächig aneinandergespresst werden. Die Holzschraube wurde zwischen den Messschraubenreihen in den Fügespalt der beiden Prüfkörperhälften eingedreht. Die Aufgabe der Messschrauben war es, die resultierende Dehnung rechtwinkelig zur Holzschraubenachse, die sog. „Einschraub-Spaltkraft“, zu messen. Diese konnte folglich mit Hilfe der Kraft-Dehnungsbeziehung in eine Kraft umgerechnet werden.

In Abbildung 2-23 ist eine exemplarische Prüfkongfiguration mit sechs Messschrauben dargestellt.

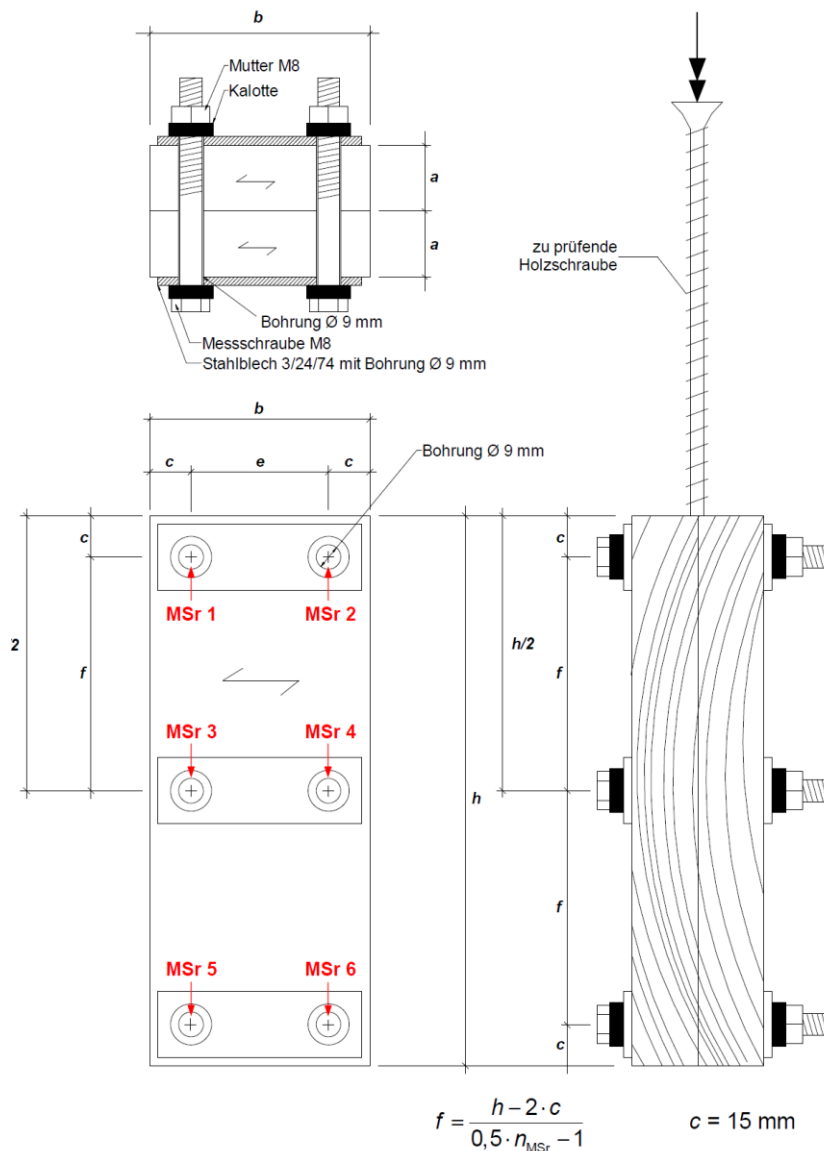


Abbildung 2-23: exemplarische Prüfkongfiguration zur Ermittlung der Spaltkräfte beim Eindrehen von Holzschrauben [46]



Während der Prüfdurchführung wurden die Kräfte der Messschrauben, das Einschraubdrehmoment sowie der Einschraubweg kontinuierlich aufgezeichnet. Die Summe der über die Einschraubtiefe erfassten Kräfte aller Messschrauben je Prüfkörper wurde über eine Referenzlänge gemittelt, um eine mittlere Gesamtkraft zu erhalten. Abbildung 2-24 zeigt die Eindrückungen einer eingedrehten Holzschraube nach der Durchführung der Prüfungen.



Abbildung 2-24: Prüfkörper nach der Prüfdurchführung [46]

Die resultierenden Kräfte in der Messschraube während des Einschraubvorganges sind beispielhaft in Form eines Diagramms in Abbildung 2-25 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich die Schraubenmerkmale, wie Schraubenspitze und Schraubenkopf, auf die Spaltkräfte im Holz auswirken. Die Position der Messstellen ist in Abbildung 2-23 gekennzeichnet. Beim Vordringen der Schraubenspitze im Holz ist an der jeweiligen Messstelle ein Anstieg der Kraft ersichtlich. Der signifikante Anstieg der Kurven der Messstellen 1 und 2 in den letzten 5 bis 10 mm ist auf das Eindringen des Schraubenkopfes zurückzuführen.

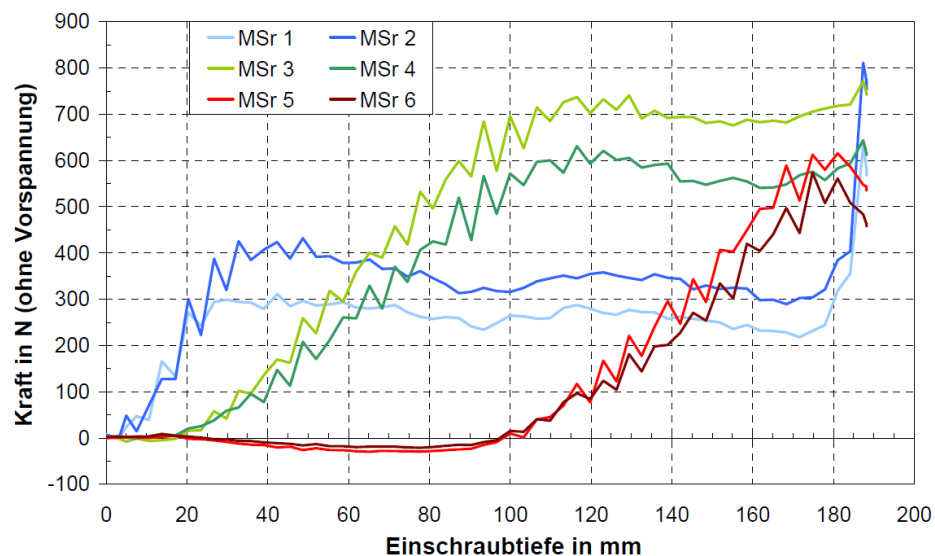


Abbildung 2-25: resultierende Kräfte in den Messschrauben im Bezug zur Einschraubtiefe [46]

Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine geprüfte Methode, die zur Bestimmung von erforderlichen Mindestabständen von Holzschrauben und Mindestholzdicken führt. Es wurde ermittelt, welche Kräfte das Holz durch das Einschrauben einer selbstbohrenden Holzschraube erfährt und welche Einflussfaktoren eine maßgebende Rolle spielen. Dieses Prüfmodell kommt beispielsweise bei Untersuchungen von neuen Schraubentypen zum Einsatz, um die Auswirkung der unterschiedlichen Schraubenmerkmale auf die Mindestabstände und –holzdicken axial beanspruchter Schraubengruppen zu vergleichen und zu beurteilen.

## 2-2.7 AXIALE KRAFTVERTEILUNG IN SELBSTBOHRENDEN HOLZSCHRAUBEN – RINGHOFER UND SCHICKHOFER 2014

RINGHOFER und SCHICKHOFER [47] untersuchen im Jahr 2014 die axiale Kraftverteilung in selbstbohrenden Holzschrauben, indem die Schrauben mit den zuvor in den Gewindegängen applizierten Dehnmessstreifen auf Herausziehen geprüft wurden. Bei diesen Ausziehprüfungen wurden jeweils die effektive Einschraublänge ( $l_{ef}$ ), der Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung ( $\alpha$ ) und die Holzdicke ( $\rho$ ) variiert und die Ergebnisse ausgewertet. Die Prüfdurchführung erfolgte in folgenden Schritten:

1. Vorbereitung der Prüfkörper aus Fichtenholz
2. Auftrennen der Prüfkörper und nachfolgendes Aneinanderpressen
3. Vorbohren und Einschrauben der Holzschrauben ( $\varnothing$  12 mm) zentrisch in der Schnittfuge
4. Entfernung der Holzschrauben und Applizierung der Dehnmessstreifen (24 – 46 Stk. pro Schraube)
5. Kalibrierung der DMS anhand von Zugprüfungen
6. Einbettung der Schraube im Schraubenloch und Verklebung der beiden Prüfkörperhälften
7. Durchführung der Ausziehprüfungen mit der in Abbildung 2-26 gezeigten Konfiguration

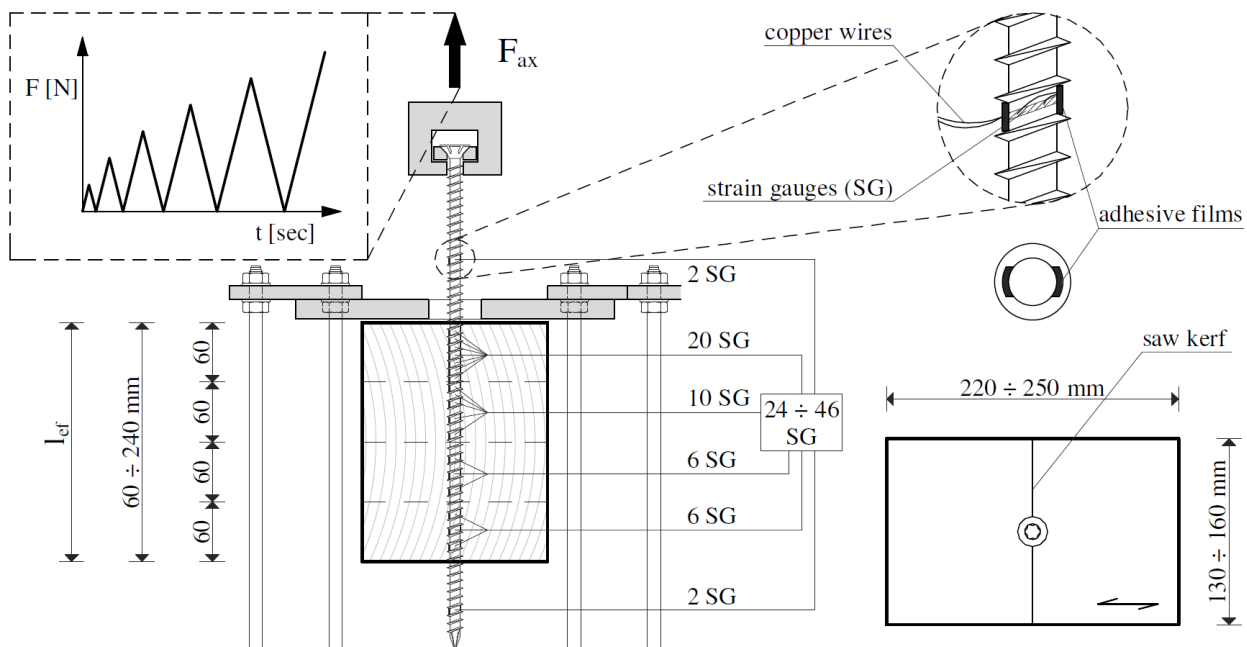


Abbildung 2-26: Prüfkonfiguration der Ausziehprüfungen [47]

In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Kraftverteilungen in den Schrauben für 30 % von  $F_{max}$  (linear elastischer Bereich) und von 90 %  $F_{max}$  (nicht linearer Bereich kurz vor Versagen auf Herausziehen) in Abhängigkeit des Winkels zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung  $\alpha$  abgebildet, wobei jeweils der prozentuelle Anteil der Kraft dem prozentuellen Anteil der Einschraublänge gegenübergestellt wird:

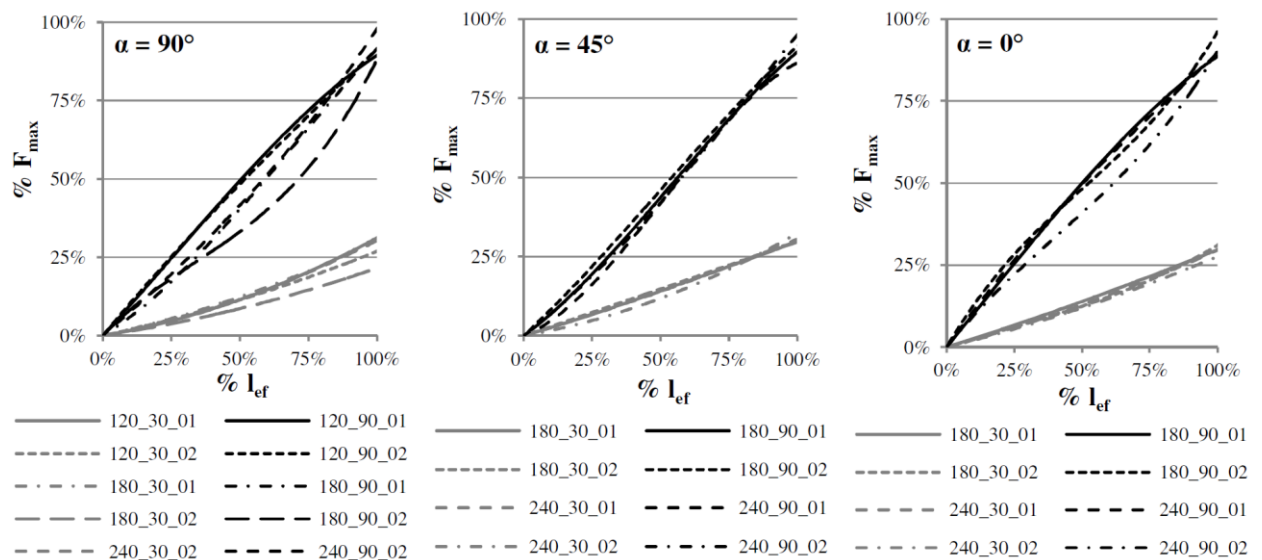


Abbildung 2-27: Verteilung der Axialkraft in den Schrauben in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  [47]

Es stellte sich heraus, dass sich die Applizierung von Dehnmessstreifen gut eignet, die Kraftverteilung in Schraubenlängsachse zu ermitteln. Außerdem wurde die Volkersen-Theorie [48] in Abhängigkeit von Parametern wie der Einschraublänge ( $l_{ef}$ ) und dem Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung ( $\alpha$ ) bestätigt. Die Kraft in der Holzschraube ist nicht linear verteilt und konzentriert sich auf das erste Drittel der Einschraubtiefe.

## 2-2.8 ZUSAMMENFASSUNG DER LITERATURRECHERCHE

Die in den Abschnitten 2-1.5.1 bis 2-2.7 recherchierten Anwendungsmöglichkeiten von Dehnmessstreifen im Bauwesen bzw. im Ingenieurholzbau zeigen, dass diese speziell für den Einsatz in labortechnischen Untersuchungen sehr gut geeignet sind. Die direkte Applizierung auf Holzoberflächen bringt jedoch einige Besonderheiten und Probleme mit sich, da Holz inhomogen, porös und schlecht wärmeleitend ist und ein Quellen und Schwinden bei Feuchtigkeitsänderung aufweist. Daher kommt es, dass Messunsicherheiten von bis zu 4 % bei Messungen in Faserrichtung und bis zu 44 % quer zur Faserrichtung auftreten können. Dehnmessstreifen finden hingegen ihre geeignete Verwendung im Holzbau bei zahlreichen Messungen von Dehnungen bzw. Kräften in Verbindungsmitteln. Bei vielen Prüfungen wurden für die Dehnungs- und Kraftmessung Gewinde- sowie Schraubstangen mit größerem Durchmesser eingesetzt, da diese ohne viel Aufwand für die äußerliche Applizierung der DMS zu modifizieren sind. Wie in Abschnitt 2-2.7 gezeigt wird, ist es auch möglich, Dehnmessstreifen für die Messung von Dehnungen und Kräften von selbstbohrenden Holzschrauben zu verwenden. Der Aufwand ist jedoch erheblich und kaum wirtschaftlich, da Holzschrauben grundsätzlich einen kleinen Durchmesser aufweisen und die Applizierung der DMS in den Gewindegängen aufgrund des Platzmangels sehr aufwändig ist.

Die Idee ist es folglich, eine selbstbohrende Holzbau-Messschraube zur Ermittlung der axialen Schraubenkräfte zu entwickeln, indem ein Dehnmessstreifen in ein axial gebohrtes Loch in der Schraube appliziert wird. Eine ähnliche Form von Messschrauben ist bereits für den Stahlbau verfügbar, durch die Applizierung von DMS in Bolzen mit metrischem Gewinde, wie in Abschnitt 2-1.5.1 gezeigt wird. Mit solch einer Holzbau-Messschraube könnten offene Fragen in der Verbindungsmitteltechnik im Ingenieurholzbau geklärt werden. Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten werden im nachfolgenden Kapitel 3 angeführt und ausführlich erläutert.

# KAPITEL 3: MÖGLICHE VERWENDUNG EINER HOLZBAU- MESSSCHRAUBE

Verwendungsmöglichkeiten von Messschrauben im Holzbau finden sich vor allem im Bereich der labortechnischen Untersuchungen zur Ermittlung von axialen Kräften in Schrauben sowie im Bereich des Tragwerk-Monitorings. Im Rahmen dieser Arbeit wird unter anderem die Ermittlung der Kräfte in den Verstärkungsschrauben von Stabdübelverbindungen näher untersucht, dafür werden im folgenden Abschnitt 3-1 die Grundlagen der Spaltgefährdung aufgezeigt.

## 3-1 ERMITTLUNG DER SPALTWIRKUNG BEI STABDÜBEL-VERBINDUNGEN

### 3-1.1 PROBLEM DER SPALTGEFÄHRDUNG BEI STABDÜBEL- VERBINDUNGEN

Bei einer Anordnung von mehreren Verbindungsmitteln in Faserrichtung hintereinander steigt die Gefahr des Aufspaltens des Holzes bzw. des Ausscherens eines Blockes unter den Verbindungsmitteln (vgl. [6]). Dabei gilt, je geringer der Abstand  $a_1$  der Verbindungsmittel in Faserrichtung untereinander, desto größer ist die Gefahr des Aufspaltens. Sind solche Verbindungen nicht verstärkt, ist ein sprödes Versagen zu erwarten und die für solche Verbindungen üblicherweise nach der Theorie von Johansen [49] berechneten Traglasten können nicht erreicht werden.

Das Spaltverhalten von Holz ist abhängig von vielen Einflussfaktoren wie Holzart und –aufbau, Rohdichte, Holzfeuchtigkeit, Jahrringlage und Temperatur. Eine systematische Untersuchung aller Holzarten mit Berücksichtigung aller Einflussfaktoren ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht realisierbar, darum beschränkt sich der überwiegende Teil der Forschungsarbeiten zu diesem Thema auf wenige Holzarten. Arbeiten zum Spaltverhalten von Holz lieferten unter anderem BLASS und SCHMID [50], MARTEN [51], KEYLWERTH [52] sowie UGRENOVIC [53], [54], [55].

Das Spaltversagen von Holz bei Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln wurde im Zuge der Dissertation von SCHMID [6] aus dem Jahr 2002 genauer untersucht. Aufbauend auf bruchmechanischen Ansätzen wurden die Traglasten einer Verbindung berechnet. Es stellte sich heraus, dass bei spaltgefährdeten Verbindungen die errechneten Traglasten nach Johansen nicht erreicht werden und diese abzumindern sind. In den Normen wird dies, aufbauend auf Untersuchungen von JORISSEN [56], unter anderem berücksichtigt, indem die Gesamtanzahl der rechnerisch ansetzbaren Verbindungsmittel in einer auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmittelgruppe von  $n$  auf  $n_{ef}$  abgemindert wird, wobei gilt  $n_{ef} \leq n$ . SCHMID [6] empfiehlt jedoch die Anordnung von Verstärkungen bei spaltgefährdeten Verbindungen, um die nach der Theorie von Johansen errechnete Last nicht abmindern zu müssen und ein sprödes Versagen zu vermeiden.

PRION et al. [57] und MASTSCHUCH [58] beschreiben die Problematik des spröden Spaltversagens von Stabdübelverbindungen und geben einen Überblick über geeignete Verstärkungen. Neben eingeklebten Gewindestangen, seitlich aufgeklebten Holzwerkstoffplatten oder glasfaserverstärkten Kunststoffen und eingepressten Nagelplatten, ist die meist wirtschaftlich und versagenstechnisch sinnvollste Variante, spaltgefährdete Stabdübelverbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben zu verstärken.

Das folgende Diagramm in Abbildung 3-1 zeigt einen Vergleich der Last-Verschiebungskurven einer verstärkten und unverstärkten Stabdübelverbindung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die verstärkte Verbindung ein weitaus duktileres Verhalten und zusätzlich eine leicht höhere Tragfähigkeit aufweist.

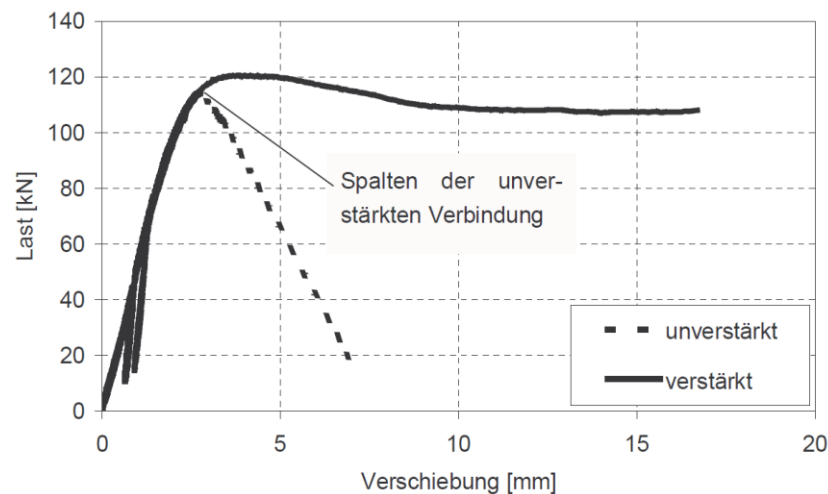


Abbildung 3-1: Last-Verschiebungskurven von verstärkten und unverstärkten Stabdübelverbindungen

Laut ÖNORM B 1995-1-1:2014 [59] darf bei Berechnungen von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln und einem Schaftdurchmesser  $d \geq 12$  mm  $n_{ef} = n$  gesetzt werden, wenn eine Querkzugverstärkung mit einem Tragvermögen von mindestens 30 % der Übertragungskraft je Hauptverbindungsmittel und Scherfuge ausgeführt wird. Wichtig dabei ist, dass sich mindestens ein Verstärkungselement hinter bzw. unter jedem Stabdübel befindet. Dieser Ansatz basiert grundsätzlich auf dem Berechnungsmodell von SCHMID [6].

Die angesprochene Regelung wurde durch verschiedene bruchmechanische und numerische Modelle sowie Prüfungen von SCHMID [6] und BEJTKA [7] untersucht und bestätigt. Bis dato wurde die tatsächlich auftretende Axialkraft in den Verstärkungselementen jedoch noch nicht messtechnisch erfasst. BEJTKA [7] ergänzte in seiner Dissertation aus dem Jahr 2005 die bruchmechanischen Modelle von SCHMID [6] und kam zu dem Schluss, dass dessen Überlegungen nur für Verstärkungselemente mit einem sehr steifen Last-Verformungs-Verhalten, wie zum Beispiel eingeklebte Gewindestangen, gelten. Selbstbohrende Holzschrauben zeigen auf Herausziehen jedoch ein vergleichsweise nachgiebiges Last-Verformungs-Verhalten. Mit diesen Erkenntnissen stellte BEJTKA [7] neue Berechnungsmodelle auf und führte zusätzliche Prüfungen durch. Gemäß BEJTKA [7] können Stabdübel-Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben zwar deutlich verstärkt, der Versagensmechanismus Blockscheren kann damit jedoch nicht gänzlich verhindert werden und ist somit separat nachzuweisen.

Um die tatsächlich auftretenden Kräfte in den Verstärkungselementen von Stabdübelverbindungen zu ermitteln und die Ergebnisse von SCHMID [6] und BEJTKA [7] zu verifizieren, sollen im Rahmen dieser Arbeit Holzbau-Messschrauben entwickelt werden, welche mittels axial applizierten Dehnmessstreifens die resultierenden Kräfte messen. Im nachfolgenden Abschnitt 3-1.2 wird eine Einführung in die Bruchmechanik gegeben. Diese dient dem Verständnis der Ergebnisse von SCHMID [6] und BEJTKA [7] sowie zur Überprüfung der messtechnisch ermittelten Kräfte.



### 3-1.2 EINFÜHRUNG IN DIE BRUCHMECHANIK

Eine Einführung in die Bruchmechanik und deren Anwendung auf den Werkstoff Holz ist in den Arbeiten von BOGENSBERGER [60] und SCHMID [6] übersichtlich zusammengefasst. Für eine Vertiefung im Bereich der Bruchmechanik wird auf das Buch „Bruchmechanik“ von GROSS und SEELIG [61] verwiesen.

In der Bruchmechanik wird das Verhalten eines Risses hinsichtlich seines Wachstums mittels bestimmter Widerstandsgrößen untersucht. Es sind zwei Konzepte gebräuchlich. Die Bruchzähigkeit des Werkstoffes ist die Widerstandsgröße beim *Konzept der Spannungsintensitätsfaktoren* und die Risswiderstandskraft (kritische Energiefreisetzungsrates) beim *Konzept der Energiebilanzen*. Es sind drei Rissöffnungsarten zu unterscheiden, welche sich nach der Bewegungsrichtung des Rissfortschrittes differenzieren (Abbildung 3-2).

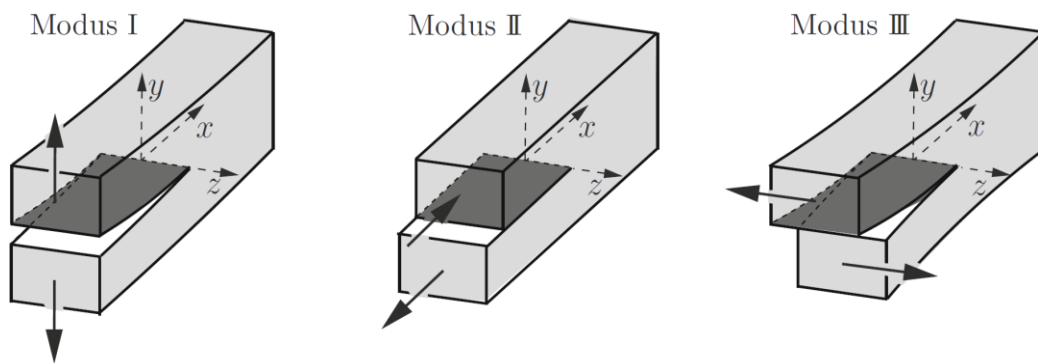


Abbildung 3-2: Rissöffnungsarten nach IRWIN [62] (aus [61])

Der Modus I beschreibt das Aufreißen infolge Zugspannungen, der Modus II das Aufreißen infolge Schubspannungen parallel zum Rissfortschritt und der Modus III das Aufreißen infolge Schubspannungen normal zum Rissfortschritt. Weiters ist es auch möglich, dass die drei Modi in Kombinationen auftreten.

#### 3-1.2.1 K-Konzept

Am bekanntesten, und in der linearen Bruchmechanik am häufigsten eingesetzt, ist das sogenannte K-Konzept. Bei diesem Nachweiskonzept erfolgt die Berechnung auf Basis der Spannungen im lokalen Rissspitzenfeld, indem eine Linearisierung der exakten Lösung stattfindet. In einschlägiger Literatur (vgl. [61], [63], [64]) sind sogenannte K-Faktoren für die verschiedensten Belastungsfälle bereits ausführlich aufbereitet, somit ist das Nachweiskonzept gut für praktische Anwendungen geeignet. Wie in Abbildung 3-3 gezeigt, wird für das Berechnungsmodell nur die lokale Risspitze betrachtet.

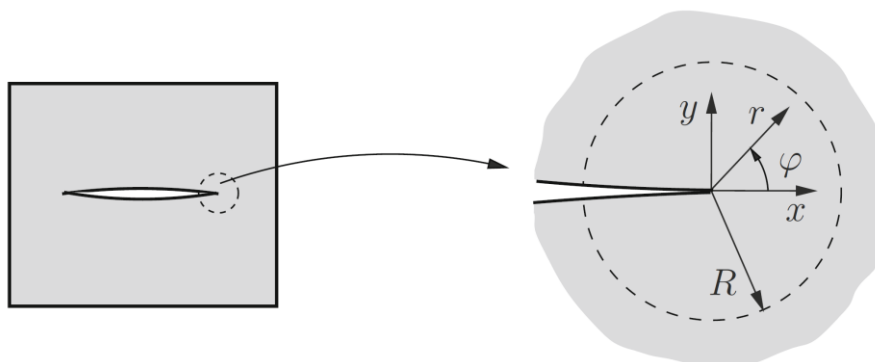


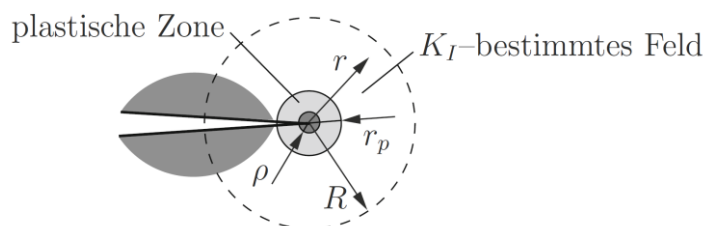
Abbildung 3-3: Umfeld der Risspitze beim K-Konzept [61]

Wenn die Spannungen für den Modus I in ein polares Koordinatensystem in die Risspitze gelegt werden, lassen sich diese wie folgt darstellen:

$$\begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\varphi \\ \tau_{r\varphi} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 5 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \\ 3 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\varphi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

mit:  $\sigma_r, \sigma_\varphi, \tau_{r\varphi}$  ... Spannungen im polaren Koordinatensystem [N/mm<sup>2</sup>]  
 $K_I$  ... Spannungsidentifikationsfaktor [N/mm<sup>3/2</sup>]  
 $r$  ... Radius im Rissspitzenfeld [mm]  
 $\varphi$  ... Winkel im polaren Koordinatensystem des Rissspitzenfeldes [°]

Diese Gleichung gilt für die Spannungsspitzen im unmittelbaren Bereich um die Risspitze. Diese Spannungsspitzen klingen mit der Funktion  $1/\sqrt{r}$  wieder ab. In Abbildung 3-4 wird die Gültigkeit von Gleichung (3.1) grafisch dargestellt. Der Radius  $R$  bestimmt jenes Feld, welches durch den Spannungsidentifikationsfaktor  $K_I$  charakterisiert wird. Innerhalb von  $r_p$  kommt es bei den meisten Werkstoffen aufgrund der stark ansteigenden Spannungsspitze zum Fließen des Materials.



**Abbildung 3-4:**  $K_I$  charakterisiertes Spannungsfeld [61]

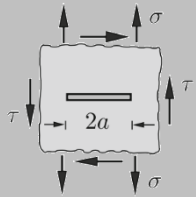
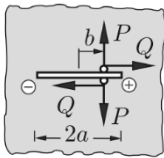
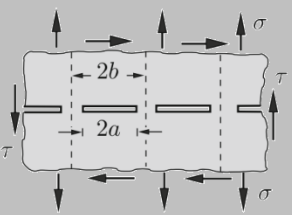
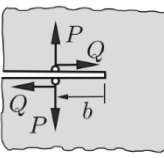
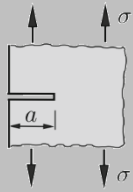
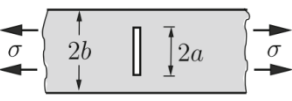
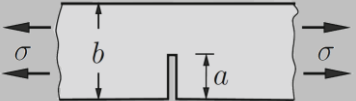
Für jeden Modus sind unterschiedliche Spannungsidentifikationsfaktoren  $K_I, K_{II}$  bzw.  $K_{III}$  anzuwenden. Der K-Faktor ergibt gemeinsam mit dem Abklingverhalten eine Spannung.

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot K \quad (3.2)$$

mit:  $\sigma$  ... Spannungen [N/mm<sup>2</sup>]  
 $K$  ... Spannungsidentifikationsfaktor [N/mm<sup>3/2</sup>]  
 $r$  ... Radius im polaren Koordinatensystem des Rissspitzenfeldes [mm]

Um die Spannungen berechnen zu können, ist es notwendig, den Spannungsidentifikationsfaktor  $K$  zu kennen. Dazu können beispielsweise aus [61], [63] und [64] gelöste Ansätze entnommen werden. In Tabelle 3-1 werden einige exemplarisch aufgelistet.

Tabelle 3-1: K-Faktoren für ausgewählte Fälle [61]

schematische Skizze	zugehöriger K-Faktor
	$\begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} \sqrt{\pi a}$
	$\begin{Bmatrix} K_I^\pm \\ K_{II}^\pm \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{\frac{a \pm b}{a \mp b}}$
	$\begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} \sqrt{2b \cdot \tan \frac{\pi a}{2b}}$
	$\begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} \frac{2}{\sqrt{2\pi b}}$
	$K_I = 1,1215 \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$
	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F_1(a/b)$ $F_1 = \frac{1 - 0,025(a/b)^2 + 0,06(a/b)^4}{\sqrt{\cos(\pi a / 2b)}}$
	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b}} \cdot G_1(a/b)$ $G_1 = \frac{0,752 + 0,02 \frac{a}{b} + 0,37(1 - \sin \frac{\pi a}{2b})^3}{\cos \frac{\pi a}{2b}}$

Beim Nachweis mittels K-Konzept darf das vorhandene Spannungsfeld ein kritisches Spannungsfeld nicht überschreiten. Die Höhe der Spannungen in einem Spannungsfeld hängen von der Abnahmefunktion der Spannungsspitze  $1/\sqrt{r}$ , von einer geometrischen Funktion f und vom Spannungsidentifikationsfaktor K ab, somit kann der Nachweis des Bruchkriteriums für die drei Modi wie folgt angeschrieben werden:



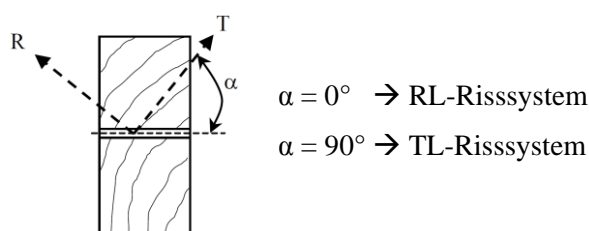
- $K_I \leq K_{I,C}$  Modus I
- $K_{II} \leq K_{II,C}$  Modus II
- $K_{III} \leq K_{III,C}$  Modus III

Der Wert auf der rechten Seite der Funktionen  $K_{I,C}$ ,  $K_{II,C}$  bzw.  $K_{III,C}$  wird als Bruchzähigkeit bezeichnet. Dieser Materialkennwert wird mittels geeigneter Prüfungen bestimmt. In Tabelle 3-2 sind die Bruchzähigkeiten ausgewählter Werkstoffe aufgelistet.

**Tabelle 3-2: Bruchzähigkeiten einiger Werkstoffe [61]**

Material	$K_{I,C}$ [MPa $\sqrt{\text{mm}}$ ]	$R_{p0,2}$ [MPa]
<b>hochfeste Stähle</b>	800...3000	1600...2000
<b>Baustähle</b>	1000...4000	< 500
<b>Glas</b>	20...40	
<b>Beton</b>	5...30	

BORTH [65] beschäftigte sich im Rahmen seiner Dissertation unter anderem mit der linear-elastischen Bruchmechanik von Voll- und Brettschichtholz. Er erstellte eine Liste mit bereits ermittelten Bruchzähigkeiten für Modus I und Modus II für europäisches Fichtenholz und stellte fest, dass die Bruchzähigkeitswerte sehr stark streuen. Als Einflussgrößen für die ingenieurmäßige Abschätzung der Bruchzähigkeit zählen die Rohdichte, die Holzfeuchte, der Winkel der Rissnormalen zum Faserverlauf (Rissssystem), die Ausbildung der Risspitze und die Methode der Ermittlung.



**Abbildung 3-5: Winkel zwischen Rissebene und Jahrringtangente (Rissystem) [65]**

Als Mittelwert für die Bruchzähigkeiten im Modus I wird für ein radial-längs-Rissystem  $K_{I,C} = 11,5 \text{ N/mm}^{3/2}$  (Streuung:  $7,9 \text{ N/mm}^{3/2} - 14,4 \text{ N/mm}^{3/2}$ ) und für ein tangential-längs-Rissystem  $K_{I,C} = 9,5 \text{ N/mm}^{3/2}$  (Streuung:  $7,2 \text{ N/mm}^{3/2} - 12,2 \text{ N/mm}^{3/2}$ ) vorgeschlagen. Für den Modus II wird aufgrund der großen Unsicherheiten eine Bruchzähigkeit von  $K_{II,C} = 55,0 \text{ N/mm}^{3/2}$  unabhängig vom Rissystem angegeben; wobei dieser Wert zwischen  $48,0 \text{ N/mm}^{3/2}$  und  $69,0 \text{ N/mm}^{3/2}$  streut. Die Bruchzähigkeit von Holz ist zudem von der Holzfeuchtigkeit abhängig. In diesem Zusammenhang untersuchten SCHEFFLER et al. [66] im Jahr 2004 die Bruchzähigkeiten einiger Laubholzarten in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit. Es stellte sich heraus, dass diese den höchsten Wert bei einer Holzfeuchtigkeit von  $u = 12 \%$  erreicht. Die ermittelten Bruchzähigkeiten gelten für Querkzug in tangentialer Richtung (TR), in radialer Richtung (RT) und  $45^\circ$  zur Holzfaserrichtung, wie aus der folgenden Tabelle zu entnehmen ist.

**Tabelle 3-3: Bruchzähigkeiten für Laubholz [66]**

$\varphi$ [°]	Eiche $K_{I,C}$ [N/mm $^{3/2}$ ]	Rotbuche $K_{I,C}$ [N/mm $^{3/2}$ ]
<b>0° (TR)</b>	$16,13 \pm 1,9$	$26,25 \pm 3,8$
<b>45°</b>	$12,02 \pm 2,2$	$37,00 \pm 6,3$
<b>90° (RT)</b>	$20,87 \pm 3,8$	$39,95 \pm 4,7$

### 3-1.2.2 Energetisches Bruchkriterium

Das zweite Nachweiskonzept in der Bruchmechanik beruht auf einer Energiebilanz. Sobald sich ein Riss bildet und dieser in seiner Länge zunimmt, wird innere Energie abgebaut. Diese Energieabnahme steht im Gleichgewicht mit der äußeren Arbeitsbilanz, somit kann diese mittels der äußeren wirksamen Kräfte berechnet werden.

Die innere Energie  $\Pi$  verschwindet durch die Abnahme jedoch nicht, sie bezieht sich bei einem Rissfortschritt auf die Bildung der Trennfläche  $\Delta A$  bei 3D-Berechnungen bzw. auf die Trennlinie  $\Delta a$  und die Scheibenbreite  $b_0$  bei 2D-Berechnungen.

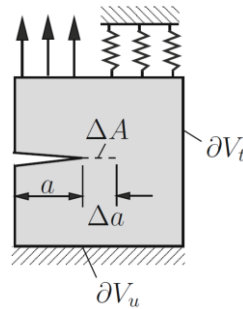


Abbildung 3-6: Rissfortschritt und Energiefreisetzung [61]

Die Energiefreisetzungsrates  $G_c$  ist wie folgt definiert:

$$G_c = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} \quad \text{bzw.} \quad G_c = -\frac{\partial \Pi}{b_0 \cdot \partial a} \quad (3.3)$$

mit:	$G_c$	...	Energiefreisetzungsrates [Nm/m <sup>2</sup> = J/m <sup>2</sup> = N/m]
	$\partial A$	...	Trennfläche [m <sup>2</sup> ]
	$\partial \Pi$	...	innere Energie [J]
	$b_0$	...	Trennflächenbreite [m]
	$\partial a$	...	Trennflächenlänge [m]

Eine neue Trennfläche kann sich nur dann bilden, wenn die Bruchenergie  $G_f$  überschritten wird. Damit ein Riss als stabil betrachtet werden kann, muss der Nachweis des energetischen Bruchkriteriums  $G_c \leq G_f$  erfüllt sein.

In GROSS und SEELIG [61] sowie in BOGENSBERGER [60] wird gezeigt, dass das K-Konzept und das energetische Konzept bei elastischem Materialverhalten gleichwertig sind und ein Zusammenhang zwischen den Spannungsintensitätsfaktoren  $K_I$  bzw.  $K_{II}$  und der Energiefreisetzungsrates  $G_c$  besteht.

Für isotropisches Materialverhalten und einem ebenen Spannungszustand gelten folgende Zusammenhänge:

- im Modus I:

$$G_I = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{\kappa + 1}{8G} \cdot K_I^2 = \frac{K_I^2}{E} \quad (3.4)$$

- im Modus II:

$$G_{II} = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{\kappa + 1}{8G} \cdot K_{II}^2 = \frac{K_{II}^2}{E} \quad (3.5)$$

- im Modus III:

$$G_{III} = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{K_{III}^2}{2G} \quad (3.6)$$

mit:	$G_I, G_{II}, G_{III}$	...	Energiefreisetzungsrate der verschiedenen Modi [J/m <sup>2</sup> ]
	$K_I, K_{II}, K_{III}$	...	Spannungsidentifikationsfaktoren der versch. Modi [N/mm <sup>3/2</sup> ]
	$\partial A$	...	Trennfläche [m <sup>2</sup> ]
	$\partial \Pi$	...	innere Energie [J]
	E	...	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
	G	...	Schubmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
	$\kappa$	...	$\kappa = (3-\mu)/(1+\mu)$

Die Bruchenergie  $G_f$  wird für das energetische Bruchkriterium ebenso experimentell ermittelt, wie die Bruchzähigkeit für das K-Konzept. Im Forschungsbericht von BOGENSBERGER [60] sind die Bruchenergiewerte aus verschiedenen Untersuchungen und Arbeiten zusammengefasst. Für Fichtenholz im Modus I wird eine Bruchenergie von  $G_{f,I} = 1650 \text{ J/m}^2$  längs zur Faserrichtung und  $G_{f,I} = 300 \text{ J/m}^2$  quer zur Faserrichtung angegeben.  $G_{f,II}$  im Modus II wird für Schub in Faserrichtung radial mit  $300 \text{ J/m}^2$  und tangential mit  $500 \text{ J/m}^2$  angeführt.

Im Holzbau wird grundsätzlich der Nachweis mittels der Bruchenergie dem K-Konzept bevorzugt (vgl. [60]). Der maßgebliche Unterschied zwischen dem K-Konzept und dem energetischen Bruchkriterium liegt in der Größe und dem Bereich des Betrachtungsfeldes. Der Nachweis mittels Spannungsintensitätsfaktoren (K-Konzept) konzentriert sich auf die Betrachtung des Nahbereichs der Risspitze und ist daher für komplexe Konstruktionen geeignet, bei denen die Ermittlung der Änderung des Gesamtpotentials aufgrund einer Rissbildung schwierig ist. Folglich wird das K-Konzept häufig im Maschinenbau eingesetzt. Im Bauwesen sind die Beanspruchungen auf das Objekt meist weniger kompliziert. Es ist daher leichter möglich, die Änderung des Potentials der gesamten Konstruktion zu erfassen und den Nachweis mit Hilfe des energetischen Bruchkriteriums zu führen (vgl. [6]). Weitere wichtige Arbeiten im Bereich der Bruchmechanik von Vollholz und Holzwerkstoffen lieferten neben BORTH [65], SCHEFFLER et al. [66] und BOGENSBERGER [60] auch NIEMZ und DIENER [67], REITERER und TSCHEGG [68], DAUDEVILLE [69], AICHER [70], LOGEMANN und SCHELLING [71] sowie STANZL-TSCHEGG et al. [72].

SCHMID [6] und BEJTKA [7] nutzten die beschriebenen bruchmechanischen Ansätze, um Kragarmmodelle für die Spaltwirkung von Stabdübelverbindungen aufzustellen. Diese Überlegungen werden in den nachfolgenden Abschnitten 3-1.3 und 3-1.4 näher erläutert.

### 3-1.3 BRUCHMECHANISCHES MODELL NACH SCHMID [6]

SCHMID [6] hat im Rahmen seiner Dissertation ein bruchmechanisches Modell für auf Abscheren beanspruchte Stabdübelverbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben als Verstärkungselemente aufgestellt (Abbildung 3-7), welches in weiterer Folge diskutiert werden soll.

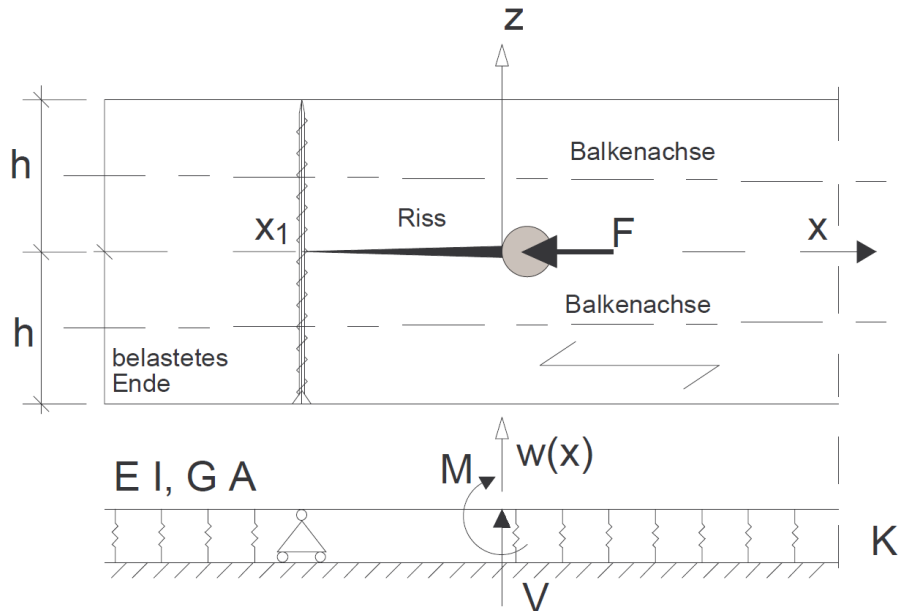


Abbildung 3-7: Modellbildung einer verstärkten Verbindung nach SCHMID [6]

Wie aus Abbildung 3-7 ersichtlich, wird die Schraube als Verstärkungselement in diesem Balken-Modell als festes Lager angenommen. Somit kann ein Riss nur jeweils zwischen dem Verstärkungselement (Schraube) und dem Hauptverbindungselement (Stabdübel) auftreten, dies gilt auch, wenn mehrere Verbindungsmittel und Verstärkungselemente hintereinander angeordnet sind. Zur Berechnung der Zugkraft in der Schraube wird das Modell eines elastisch gebetteten Balkens verwendet.

In Abbildung 3-8 ist die Last-Verformungslinie des Modells nach Abbildung 3-7 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verformung an der Stelle des Hauptverbindungselementes ( $x=0$ ) am größten und an der Stelle des Verstärkungselementes ( $x_1$ ) gleich Null ist.

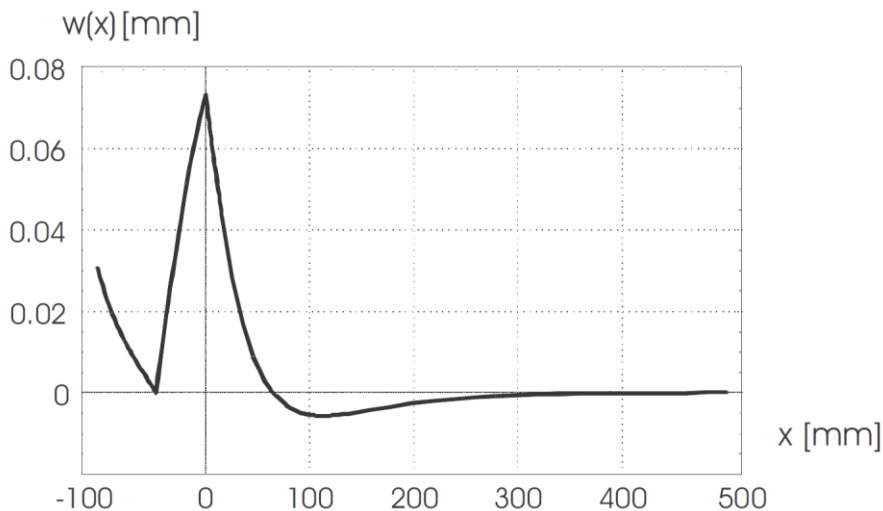


Abbildung 3-8: Verformungslinie eines elastisch gebetteten Balkens [6]

Die Vertikalkraft  $V$  bei vorliegender Lochleibungsbeanspruchung wird in Abhängigkeit von der maximal übertragenen Kraft des Hauptverbindungsmittels nach JORISSEN [56] wie folgt berechnet:

$$V = F \cdot \frac{\frac{1 - \sin^2(\varphi)}{2} \cdot \cos(\varphi) - \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin(2\varphi)}{4} \right) \cdot \sin(\varphi)}{2 \cos(\varphi)} \quad (3.7)$$

mit:  $V$  ... Kraft quer zur Beanspruchungsrichtung des Hauptverbindungsmittels (Spaltkraft) [N]  
 $F$  ... Kraft in Beanspruchungsrichtung des Hauptverbindungsmittels [N]  
 $\varphi$  ... Reibungswinkel [°]

Daraus geht hervor, dass die Ermittlung der auftretenden Querkraft bzw. Spaltkraft unter Verwendung des Reibungswinkels  $\varphi$  erfolgt. In RODD [73] werden die Gleitreibungsbeiwerte für verschiedene Oberflächenrauigkeiten von Verbindungsmittel aus Stahl angeführt (Tabelle 3-4).

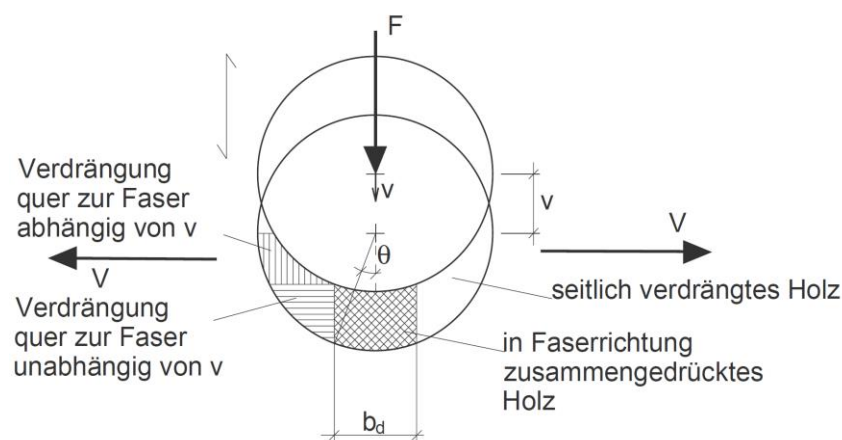
**Tabelle 3-4:** Reibungsbeiwerte für stiftförmige Verbindungsmittel aus Stahl [73]

	Gleitreibungskoeffizient $\mu$ [-]	Reibungswinkel $\varphi$ [°]
<b>Verbindungsmittel aus Stahl mit aufgerauter Oberfläche</b>	0,585	30°
<b>Verbindungsmittel aus Stahl mit blanker Oberfläche</b>	0,339	19°
<b>Verbindungsmittel aus Stahl mit einer Kunststoffummhüllung</b>	0,123	7°

Folglich resultiert für Verbindungsmittel aus Stahl mit blanker Oberfläche und  $\varphi \approx 19^\circ$  nach Gleichung (3.7) eine Spaltkraft

$$V \approx \frac{F}{7} \quad (3.8)$$

Die Berechnungen von JORISSEN [56] erfolgten in Anlehnung an das Modell der Holzverdrängung bei Lochleibungsbeanspruchungen nach WERNER [74].



**Abbildung 3-9:** Annahmen von WERNER [74] zur Berechnung der Spaltkraft  $V$

Auch WERNER [74] stellte bereits im Jahr 1993 das Verhältnis zwischen der Höchstlast  $F_{\max}$  der Lochleibungsprüfungen in Faserrichtung und der Spaltkraft  $V$  auf und ermittelte ähnliche Werte wie JORISSEN [56]. Zur Berechnung der axialen Kraftkomponente in der Verstärkungsschraube leitete SCHMID [6] folgende Differentialgleichung mit Hilfe des Modells eines elastisch gebetteten Balkens (Abbildung 3-7) her:

$$F_Z = V_1(x_1) - V_2(x_1) = \left[ \frac{d^3 w_1}{dx^3} - \frac{\kappa \cdot K}{G \cdot A} \cdot \frac{dw_1}{dx} - \frac{d^3 w_2}{dx^3} \right] \cdot EI \quad (3.9)$$

mit:	$F_Z$	...	Axialkraft im Verstärkungselement [N]
	$w$	...	Verschiebung in z-Richtung [mm]
	$EI$	...	Biegesteifigkeit [Nmm <sup>2</sup> ]
	$GA$	...	Schubsteifigkeit [N]
	$K$	...	Bettungszahl [-]
	$\kappa$	...	Schubkorrekturfaktor [-]

Die Untersuchungen einer einreihigen verstärkten Stabdübelverbindung (mehrere Verbindungsmittel in Faserrichtung hintereinander) zeigten, dass die größte Zugkraft jeweils in der zweiten Verstärkungsschraube, d. h. jener zwischen dem ersten und zweiten Verbindungselement, auftritt.

Das Verhältnis der Zugkraft im zweiten Verstärkungselement  $F_{z,2}$ , bezogen auf die Kraft je Scherfuge des Hauptverbindungsmittels  $F$ , ergibt nach Berechnung mittels Gleichung (3.9) für das Modell mit einem Stabdübel und einer Verstärkungsschraube nach Abbildung 3-7 folgenden Wert

$$\frac{F_{z,2}}{F} = 0,249. \quad (3.10)$$

SCHMID [6] empfiehlt, in Anlehnung an seine Untersuchungen bei spaltgefährdeten Verbindungen die Verstärkungselemente für eine Zugkraft von 30% der Tragfähigkeit je Hauptverbindungselement und Scherfuge zu bemessen. Dieser Wert wurde demgemäß auch in der ÖNORM B 1995-1-1 [59] übernommen. Die Ergebnisse von SCHMID [6] gelten nur für eine Verbindungsmittelreihe und das Verstärkungselement muss rechtwinkelig zur Faserrichtung und in der Mitte zwischen den Verbindungselementen angeordnet werden. Die Ergebnisse dieser Verstärkungsmethode gelten nur für spaltgefährdete Verbindungen, wobei ein Blockscheren der Hauptverbindungsmittel zusätzlich nachgewiesen werden muss.

### 3-1.4 BRUCHMECHANISCHES MODELL NACH BEJTKA [7]

Die Annahmen für das Modell nach SCHMID [6] gelten für Verstärkungselemente mit sehr steifem Last-Verformungsverhalten, wie eingeklebte Gewindestangen oder seitlich aufgeklebte Holzwerkstoffplatten. Nachdem selbstbohrende Holzschrauben als Verstärkungselemente ein vergleichsweise nachgiebiges Last-Verformungsverhalten aufweisen, wurde von BEJTKA [7] das Modell von SCHMID [6] modifiziert und die Verstärkungsschraube als Feder mit einer Steifigkeit  $K_{\text{Schraube}}$  angenommen (siehe Abbildung 3-10).

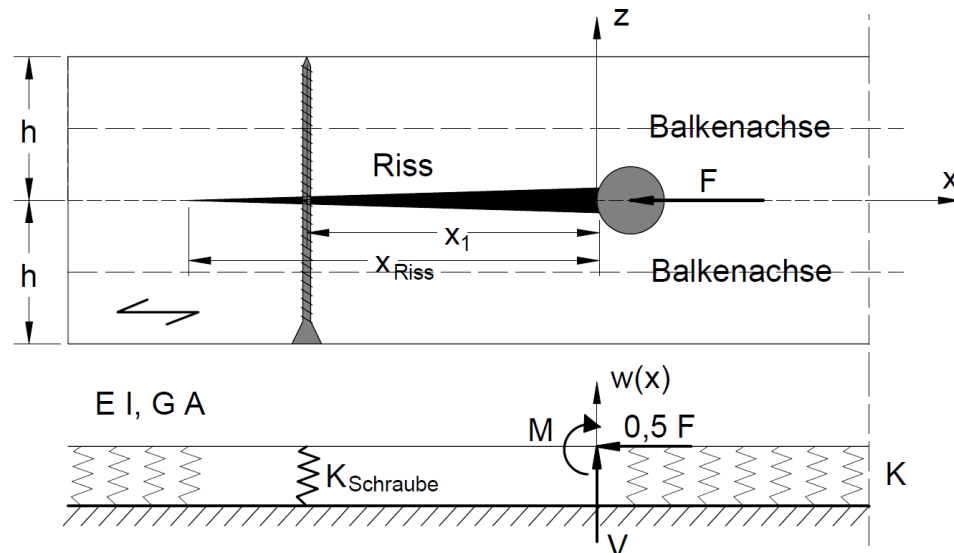


Abbildung 3-10: Modellbildung einer verstärkten Verbindung nach BEJTKA [7]

Wie in Abbildung 3-10 gezeigt, kann sich aufgrund der Nachgiebigkeit der Holzschraube der Riss über das Verstärkungselement hinaus weiter ausbreiten. BEJTKA [7] stellte auf Grundlage des Last-Verformungsverhalten von Holz quer zur Faser und jenes der axial beanspruchten Holzschrauben zwei zusätzliche Modelle (Abbildung 3-11) zur Ermittlung der Axialkraft in der Verstärkungsschraube auf.

Das Modell 1 entspricht jenem in Abbildung 3-10. Das Holz reißt nicht bis zum Hirnholzende auf, jedoch wird die axiale Tragfähigkeit der Verstärkungsschraube nicht erreicht, da die Grenzdehnung des Holzes ( $\delta_{\text{Grenz}} = 0,34$  mm bei Fichte) sehr gering ist. Damit die maximal mögliche Dehnung der Holzschraube  $\delta_{\text{ax}}$  erreicht wird und das Holz nicht vollständig bis zum Rand durchreißt, müsste der Abstand zwischen den Hauptverbindungselementen bzw. bis zum Hirnholzende sehr groß sein.

Im Modell 2 wird die axiale Tragfähigkeit der Holzschraube hingegen vollständig ausgenutzt. Dabei ist die halbe Rissöffnung gleich der axialen Verschiebung  $\delta_{\text{ax}}$  der Schraube. Da die Grenzverschiebung des Holzes  $\delta_{\text{Grenz}}$  sehr klein ist, entsteht bei geringen Abständen zwischen den Hauptverbindungsmitteln ein durchgehender Riss. Die Berechnung der Kräfte erfolgt nach einem Kragarmmodell.

In Abbildung 3-11 sind drei Modellvarianten inklusive Last-Verformungs-Diagramm dargestellt. Die obere Variante entspricht dem Modell nach SCHMID [6], die mittlere Variante zeigt das Modell 1 mit der schlecht ausgenutzten Tragfähigkeit der Holzschraube und die untere Variante entspricht dem Modell 2 mit durchgehendem Riss.

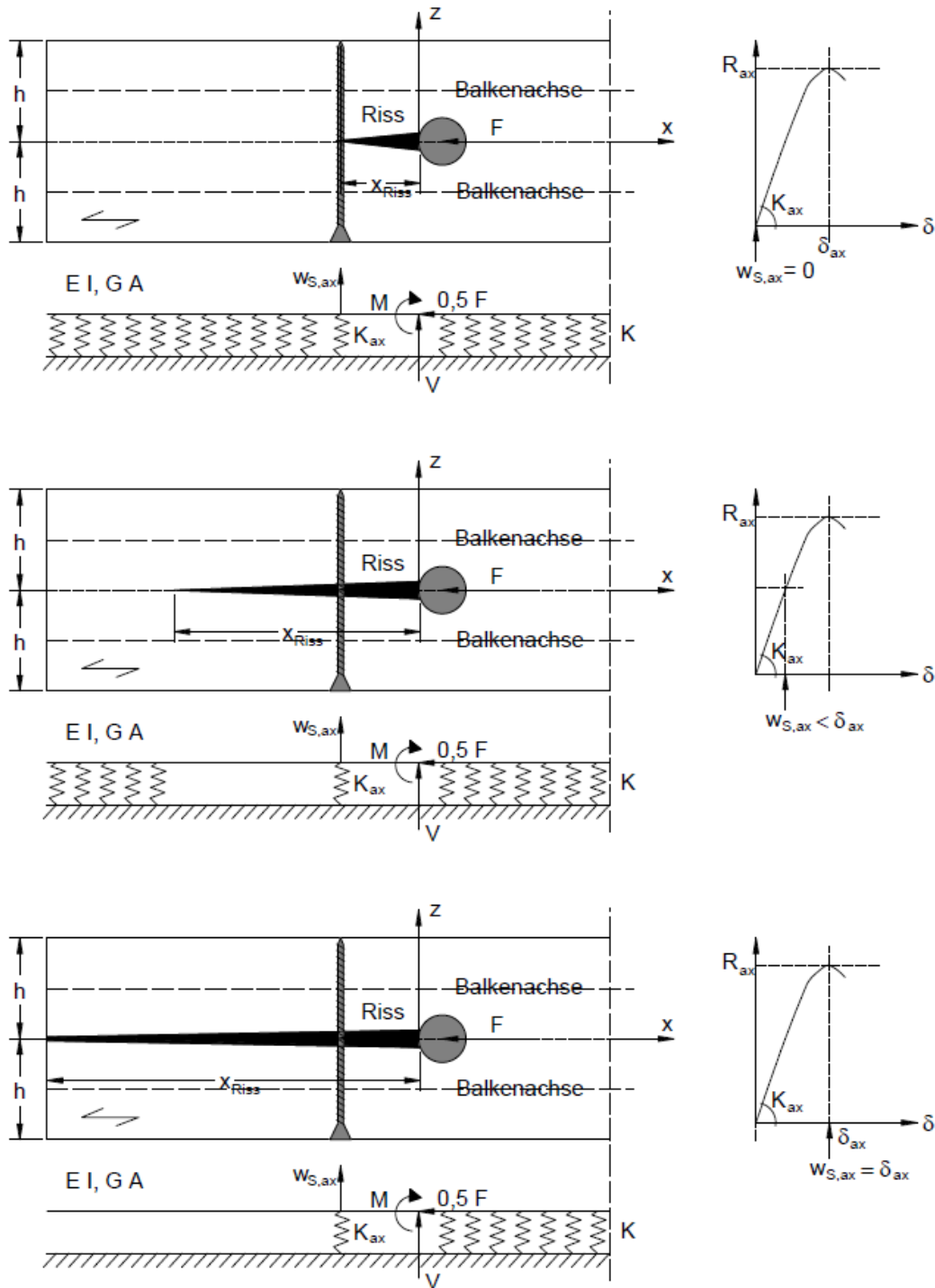


Abbildung 3-11: Verstärkte Stabdübelverbindungen – bruchmechanische Modellvarianten [7]

Auf Grundlage der in Abbildung 3-11 gezeigten Modelle, lässt sich mit Hilfe eines einfachen Kragarmmodells die erforderliche Tragfähigkeit eines „weichen“ Verstärkungsmittels ermitteln. Es wird angenommen, dass ein Riss vom ersten Hauptverbindungsmittel bis zum belasteten Trägerende entsteht. Somit entstehen zwei Kragarme, die mittels „weichen“ Verstärkungselementen verbunden sind. In jedem Kragarm wird die Last  $F/2$  im Angriffspunkt des Hauptverbindungsmittels eingeleitet und erzeugt in der Balkenachse des Kragarmes ein Moment der Größe  $M = F/2 \cdot h/4$ . Durch die faserparallele Kraft aus dem Hauptverbindungsmittel wird über den Reibungswinkel  $\varphi$  eine Querkraft erzeugt, die nach Gleichung (3.7) ermittelt wird. Für einen Reibungswinkel  $\varphi = 19^\circ$ , welcher, wie zuvor erläutert, für Verbindungsmittel aus



Stahl mit blanker Oberfläche von RODD [73] empfohlen wird, ergibt sich eine Querkraft von  $V \approx F/7$ . In Abbildung 3-12 ist das vereinfachte Kragarmmodell nach BEJTKA [7] dargestellt.

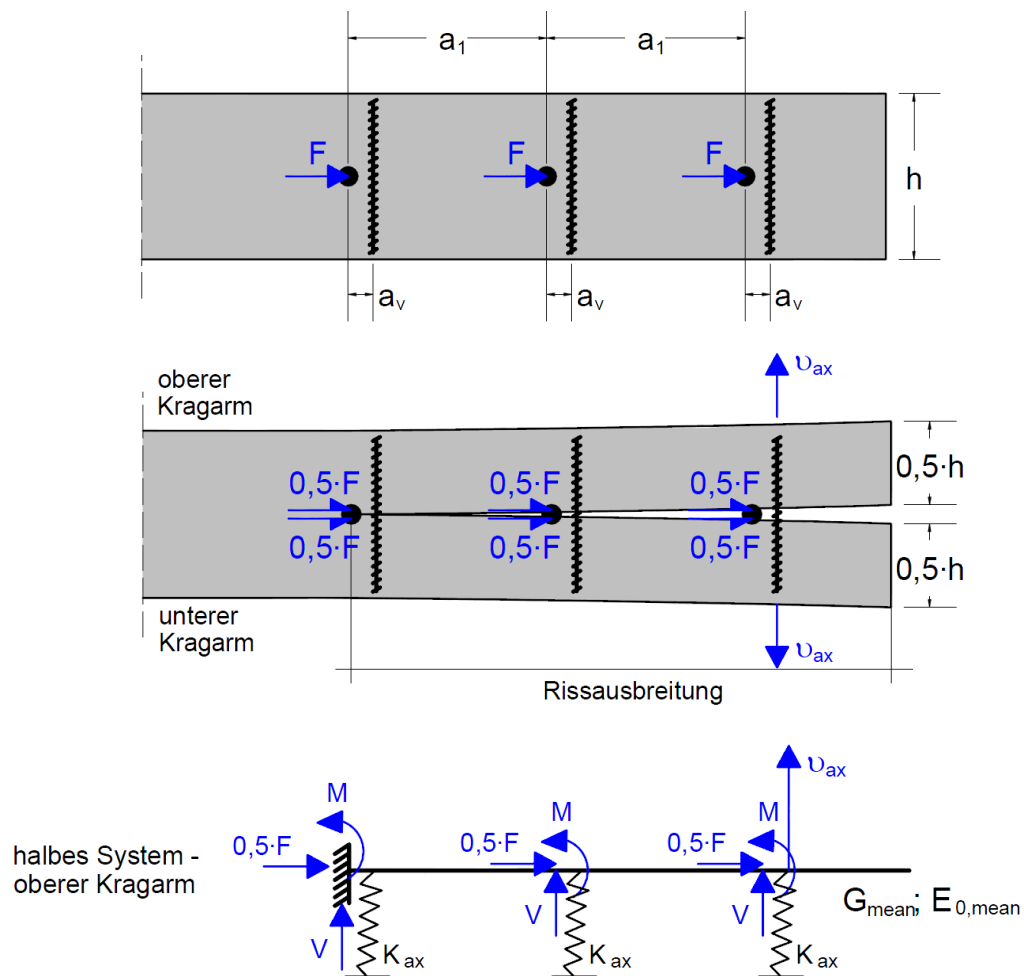


Abbildung 3-12: Kragarmmodell nach BEJTKA [7]

Die Verschiebung des Kragarms  $v_{ax}$  kann mit Hilfe der Biegesteifigkeit  $EI_{Kragarm}$  an jeder beliebigen Stelle berechnet werden. Mittels Gleichung (3.11) kann für Verbindungen mit  $n$  Hauptverbindungsmittel und  $n$  Verstärkungselementen mit gleichen Eigenschaften die Verschiebung des Kragarms  $v_{ax}$  an der Stelle des letzten Verstärkungselementes berechnet werden.

$$v_{ax} = \int_0^{(n-1) \cdot a_1 + a_v} \frac{M_v \cdot M_{ges}}{E \cdot I_{Kragarm}} \cdot dx \quad (3.11)$$

- mit:
- $n$  ... Anzahl der Hauptverbindungsmittel und Verstärkungselemente
  - $a_1$  ... Abstand der Hauptverbindungselemente in Faserrichtung [mm]
  - $a_v$  ... Abstand zw. Verstärkungselement und Hauptverbindungsmittel [mm]
  - $M_v$  ... Momentenverlauf infolge der Einheitsverschiebung „1“ an der Stelle des letzten Verstärkungselementes
  - $M_{ges}$  ... Momentenverlauf des  $n$ -fach statisch unbestimmten Systems
  - $EI_{Kragarm}$  ... Biegesteifigkeit eines Kragarms [Nmm<sup>2</sup>]

An der Stelle des Verstärkungselementes darf die Verschiebung des Kragarms  $v_{ax}$  die maximale Verschiebung  $\delta_{ax}$  eines auf Herausziehen beanspruchten Verbindungsmittels bzw. die Hälfte der maximal

zulässigen Rissöffnung nicht überschreiten. Lochleibungsprüfungen zeigten, dass sich bei einer Rissöffnung  $v_{\text{Riss}}$  bis maximal 10 % des Verbindungsmitteldurchmessers  $d$  die Lochleibungsfestigkeit kaum verringert, wobei  $v_{\text{Riss}} = 2 \cdot v_{\text{ax}}$  gilt (vgl. [7]).

$$v_{\text{ax,zul}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \delta_{\text{ax}} \\ 0,05 \cdot d \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,0016 \cdot d_s \cdot \sqrt{\rho \cdot l_s} \\ 0,05 \cdot d \end{array} \right\} \quad (3.12)$$

mit:	$v_{\text{ax,zul}}$	...	zulässige Verschiebung des Kragarms [mm]
	$\delta_{\text{ax}}$	...	zulässige Verschiebung des Verstärkungselementes [mm]
	$d$	...	Durchmesser des Hauptverbindungsmittels [mm]
	$d_s$	...	Durchmesser des Verstärkungselementes [mm]
	$l_s$	...	Einschraubtiefe des Verstärkungselementes in einem der Kragarme [mm]
	$\rho$	...	Rohdichte des Holzes [kg/m <sup>3</sup> ]

Mit Hilfe der Gleichungen (3.11) und (3.12) kann der erforderliche Verstärkungsgrad  $K_{\text{ax,erf}}$  von spaltgefährdeten Verbindungen berechnet werden. Die allgemeine Angabe eines Verstärkungsgrades ist jedoch schwierig, da dieser von mehreren Parametern abhängig ist. BEJTKA [7] stellte auf Grundlage einer Vielzahl an Berechnungen verschiedene Diagramme dar, welche, unter Berücksichtigung verschiedener Parameter, zur Ermittlung des erforderlichen Verstärkungsgrades  $K_{\text{ax,erf}}$  dienen. Folgende Annahmen wurden für die Berechnungen getroffen:

- Hinter jedem Hauptverbindungsmittel befinden sich Verstärkungselemente in einem Abstand  $a_v = 20$  mm
- Elastizitätsmodul des Holzes  $E_0 = E_{\text{mean}} = 10.000$  N/mm<sup>2</sup>
- Biegesteifigkeit  $E \cdot I_{\text{Kragarm}} = E_0 \cdot b \cdot (0,5 \cdot h)^3 / 12$
- Querkraft  $V = F/7$
- Moment  $M = F/2 \cdot h/4$
- Abstand des Verstärkungselementes zur Seitenholzfläche rechtwinkelig zur Faser:  $a_{2,c} = 3 \cdot d$
- Jedes Hauptverbindungselement wird mit der gleichen Last  $R_{\text{erf}}$  beansprucht
- In den Diagrammen wird der Tragfähigkeitswert  $R_{1,0}$  zur Ermittlung von  $K_{\text{ax}}$  verwendet, dieser Wert gilt für eine Einheitsverschiebung  $v = 1,0$  mm an der Stelle des letzten Verstärkungselementes  
→  $R_{\text{erf}} = R_{1,0} \cdot v_{\text{ax}}$

Um den erforderlichen Verstärkungsgrad  $K_{\text{ax,erf}}$  ermitteln zu können, wird zuerst die Tragfähigkeit je Hauptverbindungsmittel und Scherfuge  $R_{\text{erf}}$  mittels der Theorie nach Johansen berechnet. Zusätzlich wird die zulässige Verschiebung des Kragarms nach Gleichung (3.12) ermittelt. Die Beanspruchung  $R_{1,0}$  ergibt sich aus:

$$R_{1,0} = \frac{R_{\text{erf}}}{v_{\text{ax}}} \quad (3.13)$$

mit:	$R_{1,0}$	...	Tragfähigkeit der Hauptverbindungsmittel bezogen auf die Einheitsverschiebung $v = 1,0$ mm [N/mm]
	$R_{\text{erf}}$	...	Tragfähigkeit je Hauptverbindungsmittel und Scherfuge in Anlehnung an die Theorie nach Johansen [N]
	$v_{\text{ax}}$	...	Verschiebung des Kragarms an der Stelle des Verstärkungselements [mm]

Unter Berücksichtigung von  $R_{1,0}$  und dem Abstand  $a_1$  der Hauptverbindungselemente kann der erforderliche Verstärkungsgrad  $K_{\text{ax,erf}}$  aus einem Diagramm ermittelt werden. In Abbildung 3-13 ist ein exemplarisches

Diagramm für die Ermittlung des erforderlichen Verstärkungsgrades  $K_{ax,erf}$  für eine Stabdübelverbindung mit  $n = 5$  Hauptverbindungselementen mit einem Durchmesser  $d = 10$  mm und einer Breite  $b = 200$  mm dargestellt. Beträgt der Abstand der Verbindungsmittel untereinander  $a_1 = 120$  mm und  $R_{1,0} = 35$  kN/mm, so ergibt sich eine erforderliche axiale Steifigkeit der Verstärkungsschraube von  $K_{ax,erf} = 6500$  N/mm.

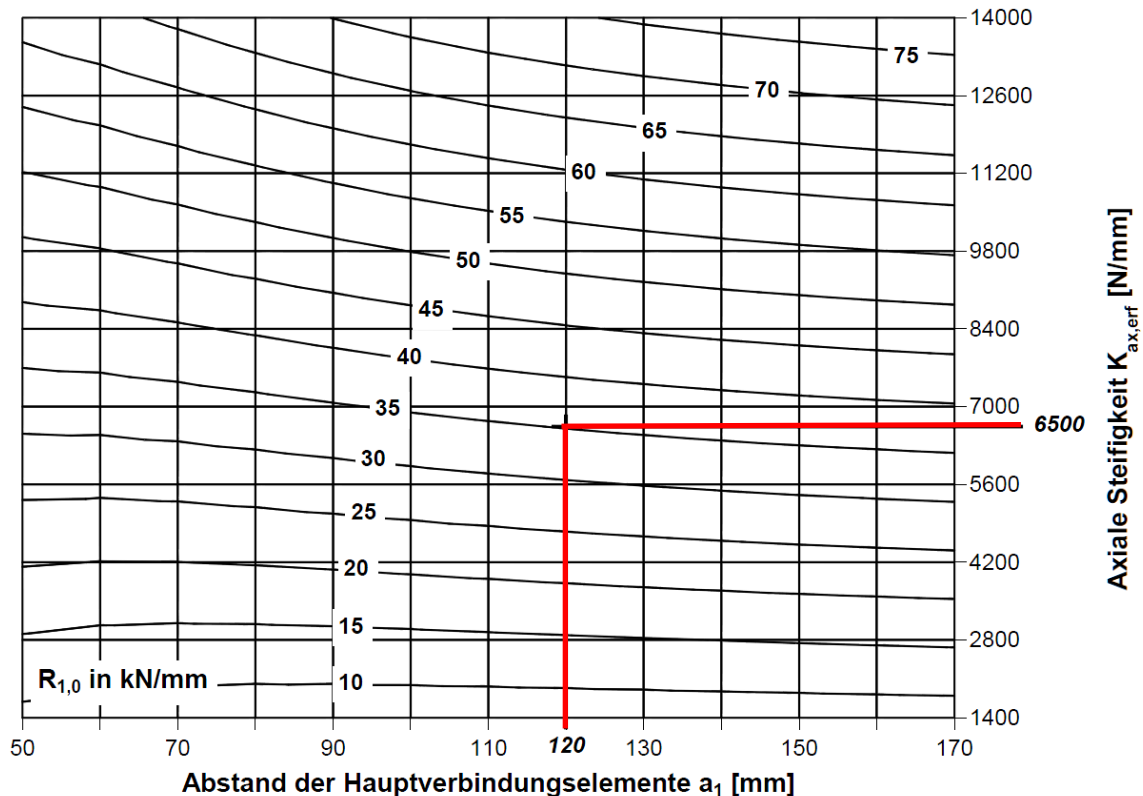


Abbildung 3-13: exemplarische Ermittlung des Verstärkungsgrades  $K_{ax,erf}$  [7]

Ein Verstärkungselement für spaltgefährdete Verbindungen soll im möglichst kleinsten Abstand hinter dem Hauptverbindungsmittel angebracht werden und einen Verschiebungsmodul aufweisen, der größer ist als der ermittelte erforderliche Verstärkungsgrad  $K_{ax,erf}$ . Reicht ein Verstärkungselement nicht aus, um den erforderlichen Verstärkungsgrad zu erreichen, so können auch mehrere Verstärkungselemente nebeneinander angeordnet werden.

Der Verschiebungsmodul von Holzschrauben wird für gewöhnlich in technischen Zulassungen selbstbohrender Holzschrauben angegeben. BEJTKA [7] schlägt folgende Gleichung zur Berechnung des Verschiebungsmoduls von Schrauben, die auf Herausziehen beansprucht werden, vor:

$$K_{ax} = 234 \cdot (\rho \cdot d)^{0,2} \cdot l_s^{0,4} \quad (3.14)$$

mit:

$K_{ax}$	...	Verschiebungsmodul von Schrauben auf Herausziehen [N/mm]
$d$	...	Schraubendurchmesser [mm]
$l_s$	...	Länge des im Holz eingedrehten Gewindes [mm]
$\rho$	...	Rohdichte des Holzes [kg/m <sup>3</sup> ]

Mittels Gleichung (3.15) kann auf die Zugkraft im Verstärkungselement geschlossen werden:

$$F_{VE} = K_{ax} \cdot u_{ax,zul} \quad (3.15)$$

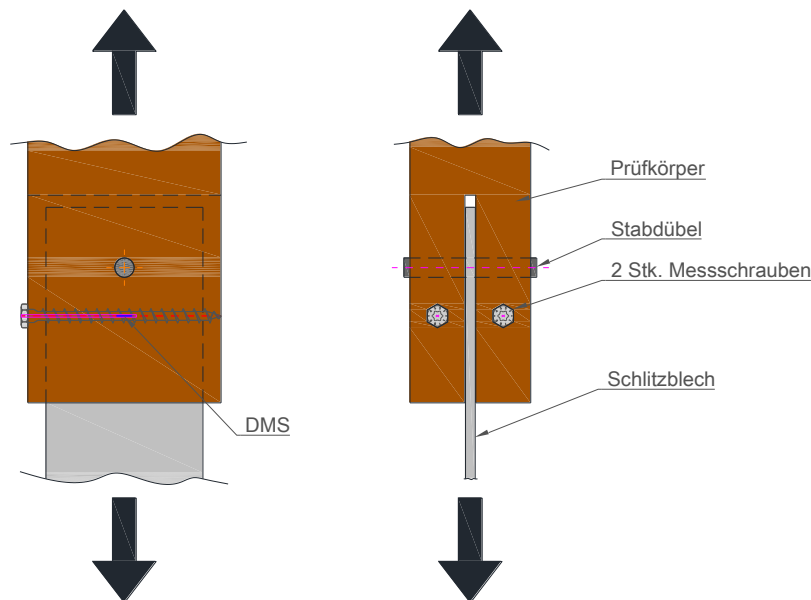
mit:

$F_{VE}$	...	Kraft im Verstärkungselement [N]
$K_{ax,erf}$	...	Verschiebungsmodul des Verstärkungselementes [N/mm]
$u_{ax,zul}$	...	zulässige Verschiebung des Kragarms [mm]

### 3-1.5 EINSATZ EINER MESSSCHRAUBE ZUR BESTIMMUNG DER SPALTKRAFT BEI STABDÜBELVERBINDUNGEN

Wie bereits in Abschnitt 3-1.3 erwähnt, erfolgt die Dimensionierung der Verstärkungselemente einer auf Abscheren beanspruchten Verbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln nach derzeitigem Stand der Technik gemäß dem Modell von SCHMID [6], welcher vereinfacht vorschlägt, hierfür eine Zugkraft von 30 % der Tragfähigkeit je Hauptverbindungselement und Scherfuge anzusetzen.

Zur Verifizierung der Modelle von SCHMID [6] und BEJTKA [7] ist es folglich zweckmäßig, mithilfe kalibrierter Messschrauben die tatsächlich resultierende Spaltkraft bei Stabdübelverbindungen prüftechnisch zu ermitteln. Dabei werden die mit einem Dehnmessstreifen applizierten selbstbohrenden Holzbauschrauben als Verstärkungselemente bei Stabdübelverbindungen eingedreht, um die Kraft in der Verstärkungsschraube zu ermitteln (Abbildung 3-14). Dies erfolgt mittels der aus den Kalibrierungsprüfungen gewonnenen Spannungsänderungs-Kraft-Kurve. Der DMS wird in einem zentrisch in der Schraubenachse gebohrten Loch appliziert und gibt die Spannungsänderung im Messgitter, welche aufgrund der Dehnungsänderung auftritt, wieder. Es ist darauf zu achten, dass die Position des Dehnmessstreifens exakt in der Risslinie unterhalb des Stabdübels liegt.



**Abbildung 3-14: Einsatz von Messschrauben als Verstärkung bzw. „Messinstrument“ bei Stabdübelverbindungen**

Die Herstellung der Messschrauben und deren Einsatz für Untersuchungen im Labor werden in Kapitel 4 und Abschnitt 5-3.4 umfassend erläutert.

Neben dem Einsatz von Messschrauben für labortechnische Untersuchungen, wie die Ermittlung der Spaltwirkung von Verbindungsmitteln, sind diese auch prädestiniert für die Verwendung als Überwachungsinstrument im Bauwerksmonitoring. Im nachfolgenden Abschnitt 3-2 wird das Thema Monitoring im Holzbau behandelt und die Verwendungsmöglichkeit von Holzbau-Messschrauben zur kräftebasierenden Langzeitüberwachung von Schraubenverbindungen in bestehenden Bauwerken erläutert.

## **3-2 MONITORING VON SCHRAUBENVERBINDUNGEN IM HOLZBAU**

---

### **3-2.1 MONITORING IM HOLZBAU ALLGEMEIN**

Unter Monitoring wird die systematische Erfassung, Beobachtung und Überwachung eines Prozesses mittels technischen Hilfsmitteln verstanden, wobei die Messungen über einen bestimmten Zeitraum regelmäßig wiederholt werden (vgl. [9]). In letzter Zeit gewinnt das Bauwerksmonitoring immer mehr an Bedeutung, da die Überwachung mittels drahtlosen und automatisierten Übertragungsmöglichkeiten immer komfortabler wird. Dies insofern, da es früher notwendig war, die Messungen intervallweise bzw. stichprobenweise auszulesen, wohingegen sich heutzutage eine Echtzeitüberwachung mit Hilfe von drahtlosen Sensornetzwerken problemlos durchführen lässt (siehe [8]). Ziel ist es, durch das Monitoring einen Beitrag zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit, der Dauerhaftigkeit und der Standsicherheit von Bauwerken zu leisten (vgl. [9]).

Im konstruktiven Holzbau werden Überwachungen hauptsächlich bei Holzbrücken und bei Holzkonstruktionen, welche maßgeblichen Holzfeuchteschwankungen ausgesetzt sind, angewendet. Hierbei werden im Wesentlichen Aufzeichnungen über die Holzfeuchtigkeit, Holztemperatur, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Schwingungen, Spannungsverluste in vorgespannten Fahrbahnplatten aus Holz und Verformungen von Konstruktionen durchgeführt (siehe [9], [10], [11], [12]). Kommt es anlässlich der aus dem Monitoring gewonnenen Erkenntnisse zum Erreichen kritischer Zustände, so ist es notwendig, in den beobachteten Prozess einzugreifen und Korrekturen vorzunehmen (vgl. [9]).

Neben der Überwachung der Tragfähigkeit und der Tragwerkssicherheit kann ein Bauwerksmonitoring auch dem Baumanagement dienen. Diese Ergebnisse werden in weiterer Folge für Lebensdauerprognosen und Instandhaltungsplanungen herangezogen und können eventuell von einzelnen Bauwerken auf ganze Bauwerkstypen übertragen werden. In Abbildung 3-15 ist ein Model eines Bauwerksbewertungskreislaufs dargestellt, wie es für lebensdauerbegleitende Bauwerksüberwachungen herangezogen wird. Grundlage dafür bildet ein probabilistisches Modell, welches wiederum auf System- und Schwachstellenanalysen basiert. Bevor mit der kontinuierlichen Überwachung und Bewertung des Tragwerks begonnen werden kann, ist eine Kalibrierung einzelner Parameter des Modells notwendig. In der Baubewertungsphase werden die ermittelten Messwerte verwendet, um das aktuelle Sicherheitsniveau des Tragwerks zu erfassen und auf dessen Grundlage zukünftige Entwicklungen abzuleiten. Infolgedessen werden Entscheidungen über weitere Inspektionen, Bewertungen und Monitoringmaßnahmen getroffen. Der Kreislauf endet mit dem Ende der Nutzbarkeit des überwachten Tragwerks (vgl. [75]).

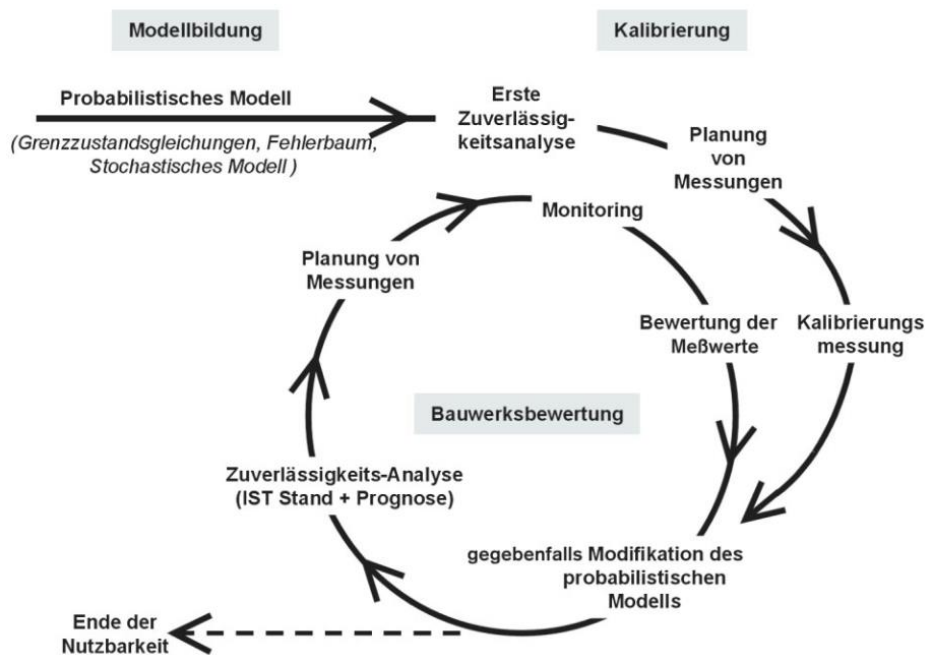


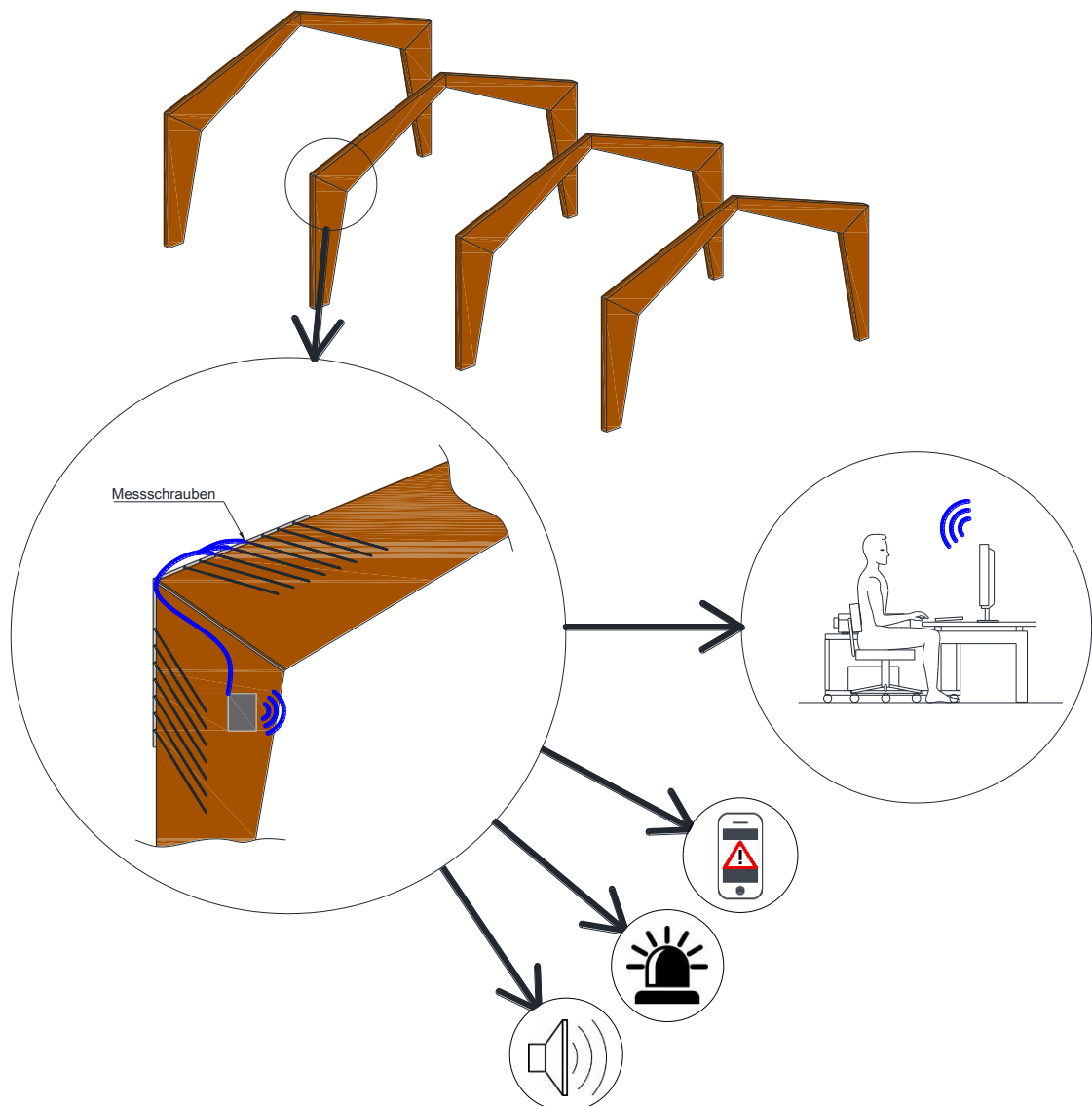
Abbildung 3-15: Bauwerksbewertungskreislauf [75]

### 3-2.2 EINSATZ EINER MESSSCHRAUBE IM BAUWERKSMONITORING

Sicherheit spielt im Bauwesen eine wichtige Rolle und wird beispielsweise durch die Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite bei statischen Bemessungen oder durch statistische Abminderungsfaktoren, welche die Materialkennwerte beschreiben, implizit berücksichtigt. Auch während der Nutzung von Bauwerken erlangen Sicherheitsaspekte zunehmend an Bedeutung. Nicht zuletzt aufgrund von folgenschweren Ereignissen, wie Tragwerksschäden und Halleneinstürze (siehe [2], [3] und [76]) sind auch Eigentümer bzw. Betreiber von Bauwerken, beispielsweise in Bayern, verpflichtet, eine kontinuierliche Bauwerksüberwachung durchzuführen (siehe [77]). Speziell für Verfügungsberechtigte bzw. Eigentümer von Bauwerken, aber auch für Fachleute, bietet der Leitfaden der Studiengemeinschaft Holzleimbau [78] eine optimale Hilfestellung zur Durchführung erster Begutachtungen. Eine Möglichkeit für ein Frühwarnsystem speziell für Tragwerke mit großen Spannweiten, ist der Einsatz von drahtlosen oder verdrahteten Monitoringsystemen, welche in der Lage sind, ein Bauwerk permanent und automatisiert zu überwachen.

In Zukunft ist es denkbar, Messschrauben für die direkte Überwachung von Schraubverbindungen im konstruktiven Holzbau einzusetzen. Mithilfe einer Messschraube in einer Schraubenverbindung kann die Kraft ermittelt werden, welche in einer einzelnen Schraube wirkt. Somit kann über einen längeren Zeitraum die Verbindung hinsichtlich ihrer statischen Auslastung überwacht und gegebenenfalls eingegriffen werden.

Ein Beispiel eines Monitoringsystems mit Holzbau-Messschrauben ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Es handelt sich dabei um ein Tragsystem einer Halle aus einem Dreigelenksrahmen, wobei das biegesteife Rahmeneck mittels Stahlteile und Schrauben verbunden wird. Einige Schrauben, die rechnerisch am stärksten ausgelastet sind, werden als Messschrauben ausgeführt. Diese sind an einen Messverstärker und Datenlogger angeschlossen. Die aufgezeichneten Daten können in Echtzeit an einen PC drahtlos übertragen und ausgewertet werden. Dies dient einerseits als Warnsystem, beispielsweise bei extremen Schneefällen, und ist andererseits interessant für die Forschung im Hinblick auf die Bemessung sowie auf die Langzeitentwicklungen der Kräfte in Anschlussknoten.



**Abbildung 3-16: Messschraube als Bauwerksmonitoringinstrument**

Beim Einsatz von Messschrauben in Monitoringsystemen ist es wichtig, auch die Holzfeuchtigkeit mitzumessen, da aufgrund von Holzfeuchteschwankungen hohe Kräfte in den Verbindungsmitteln entstehen können (siehe WALLNER [45]). Somit ist es möglich, die gemessenen Kräfte zuzuordnen und notwendige Maßnahmen einzuleiten.

Werden Tragwerke ausreichend mit Überwachungsinstrumenten wie Messschrauben ausgestattet, so kann eine Senkung der Teilsicherheitsbewerte angedacht werden, ohne das Sicherheitsniveau zu senken. Als erfolgreich umgesetztes Anwendungsbeispiel sei an dieser Stelle der Einsatz des „proof-loading“ im Zuge der Qualitätssicherung von Konstruktionsvollhölzern [14] angeführt.



# KAPITEL 4: HERSTELLUNG EINER HOLZBAU – MESSSCHRAUBE

In diesem Abschnitt werden der Aufbau, die Funktion und die mögliche Herstellung einer Kraft-Messschraube erläutert. Zur Herstellung eines Prototyps wurde eine handelsübliche Schraube aufgebohrt und im Lignum Test Center des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz (TU Graz) mit einem Dehnmessstreifen appliziert.

## 4-1 AUFBAU

Für die ersten Untersuchungen wurden Holzschrauben des Typs Assy 3.0 Kombi 12 x 200 mm und 12 x 160 mm VG [79] der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG mit einem Dehnmessstreifen appliziert (Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2). Die DMS des Typs BTM-6C [80] der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. wurden dafür ungefähr in der Mitte des Schaftes zentrisch in die Schraube eingeklebt. Solche DMS wurden speziell für Dehnungsmessungen in kleinen Löchern in der Längsachse von Bolzen im Stahlbau entwickelt.

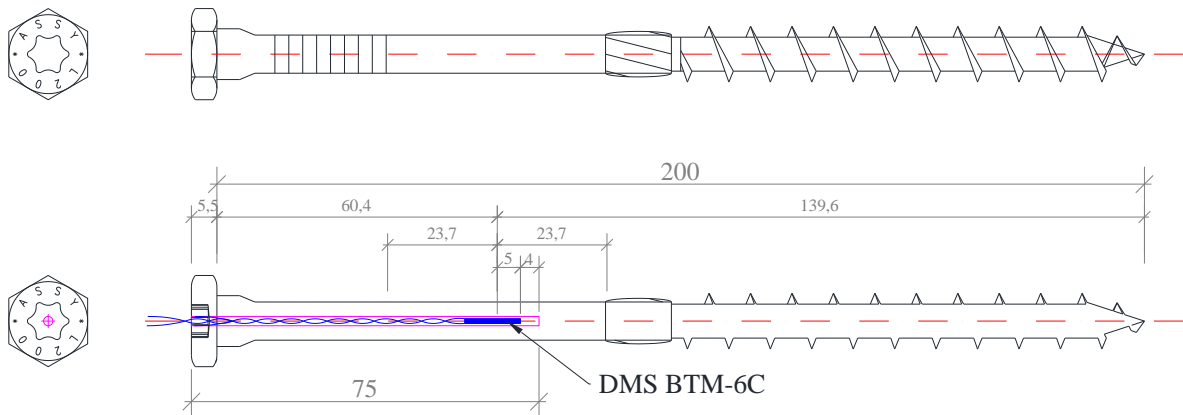


Abbildung 4-1: Aufbau einer Messschraube – Assy 3.0 Kombi 12 x 200 Prototyp

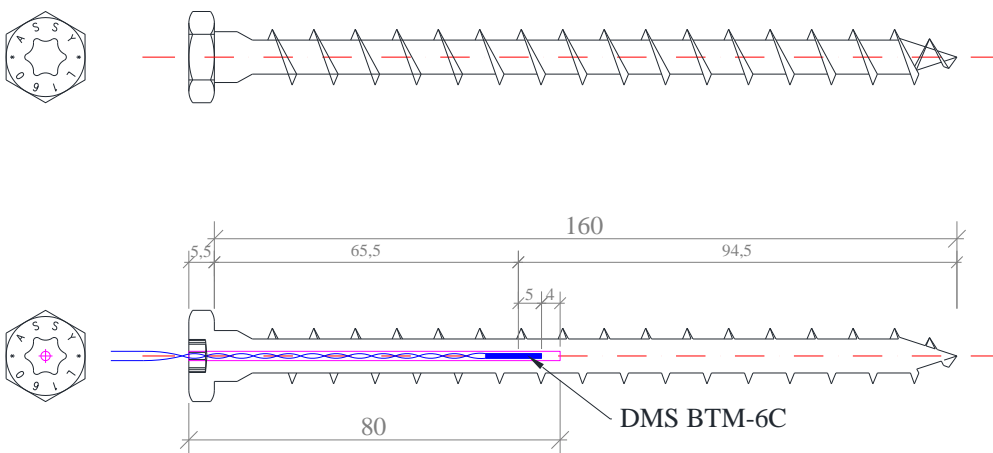


Abbildung 4-2: Aufbau einer Messschraube – Assy 3.0 Kombi 12 x 160 VG Prototyp



## 4-2 HERSTELLUNG

---

Die Herstellung eines Prototyps einer Holzbau-Messschraube erfolgte in Anlehnung an ein Datenblatt [4] der Firma Preusser-Messtechnik GmbH.

### 4-2.1 ERMITTLUNG DER OPTIMALEN DMS – POSITION

Der Dehnmessstreifen sollte dort platziert werden, wo die größten Dehnungen in der Schraube entstehen. Für die ersten Versuche wurde der Aufbau so konfiguriert, dass die größten Dehnungen entlang des Schaftes auftreten, indem die Schrauben nur bis zum Schaftanfang eingedreht wurden. Der Schaft ist dadurch frei und nicht mit dem Holz verbunden, somit entsteht im Schaft eine konstante und maximale Normalkraft und somit die maximale Dehnung. Außerdem muss sich der DMS exakt zentrisch in der Schraube befinden, damit das Ergebnis nicht aufgrund von Biegeanteilen verfälscht wird. Bei der Versuchsschraube Assy 3.0 Kombi 12x200 mm befindet sich die Mitte des ungestörten Bereiches im Schaft 60,4 mm unterhalb der Schraubenkopfoberkante. Das Bohrloch mit einem Durchmesser von zwei Millimetern wurde somit 75 mm tief gebohrt, da noch die halbe DMS-Trägerlänge von fünf Millimetern und ein Spiel von vier Millimetern dazuzurechnen waren. Der Aufbau des ersten Prototyps einer Holz-Messschraube ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

### 4-2.2 BOHREN UND REINIGEN DES BOHRLOCHS

Um den Dehnmessstreifen zentrisch in der Schraube zu applizieren, war es notwendig, ein Loch mit einem Durchmesser von zwei Millimetern zu bohren. Das Bohrloch wurde mit Hilfe einer Drehbank schrittweise hergestellt, damit ein Verlaufen des Bohrers bestmöglich vermieden werden konnte. Im ersten Schritt erfolgte eine 30 mm tiefe Bohrung zentrisch am Schraubenkopf. Dieses Loch diente zur Führung eines längeren Bohrers, mit welchem anschließend weitergebohrt wurde. Nach dem Erreichen der notwendigen Bohrlochtiefe von 75 mm, erfolgte eine gründliche Reinigung des Bohrlochs, um die Haftung des Klebstoffs zu gewährleisten. Dafür wurde mithilfe einer Spritze Aceton in das Bohrloch eingefüllt, und mittels kleiner Bürsten und Druckluft gereinigt.

### 4-2.3 ANRÜHREN UND EINFÜLLEN DES KLEBSTOFFS

Für die Befestigung der DMS des Typs BTM-6C im Bohrloch wird üblicherweise der zugehörige Zweikomponentenklebstoff A-2 verwendet. Dieser Klebstoff ist in einem Mixbecher im Verhältnis 10 Teile der Komponente B auf 100 Teile der Komponente A zu vermischen. Anschließend wird der angerührte Klebstoff erwärmt, um die Konsistenz dünnflüssiger zu machen und Luftblasen zu entfernen.

Für die ersten Prototypen der Messschraube wurde ein handelsübliches Zweikomponenten-Epoxidharz für die Verklebung verwendet, um zu testen, ob mit Holzbau-Messschrauben brauchbare Ergebnisse erzielt werden können und die vergleichsweise aufwändige Anschaffung des Spezialklebstoffes A-2 sinnvoll ist. Für alle weiteren Prototypen wurde folglich der Klebstoff A-2 [81] der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. verwendet.

Der vorbereitete Klebstoff wurde mithilfe einer Spritze und langer Kanüle vorsichtig in das Bohrloch eingeführt. Die Befüllung erfolgte langsam vom Boden des Bohrlochs aus beginnend, um Lufteinschlüsse zu vermeiden.

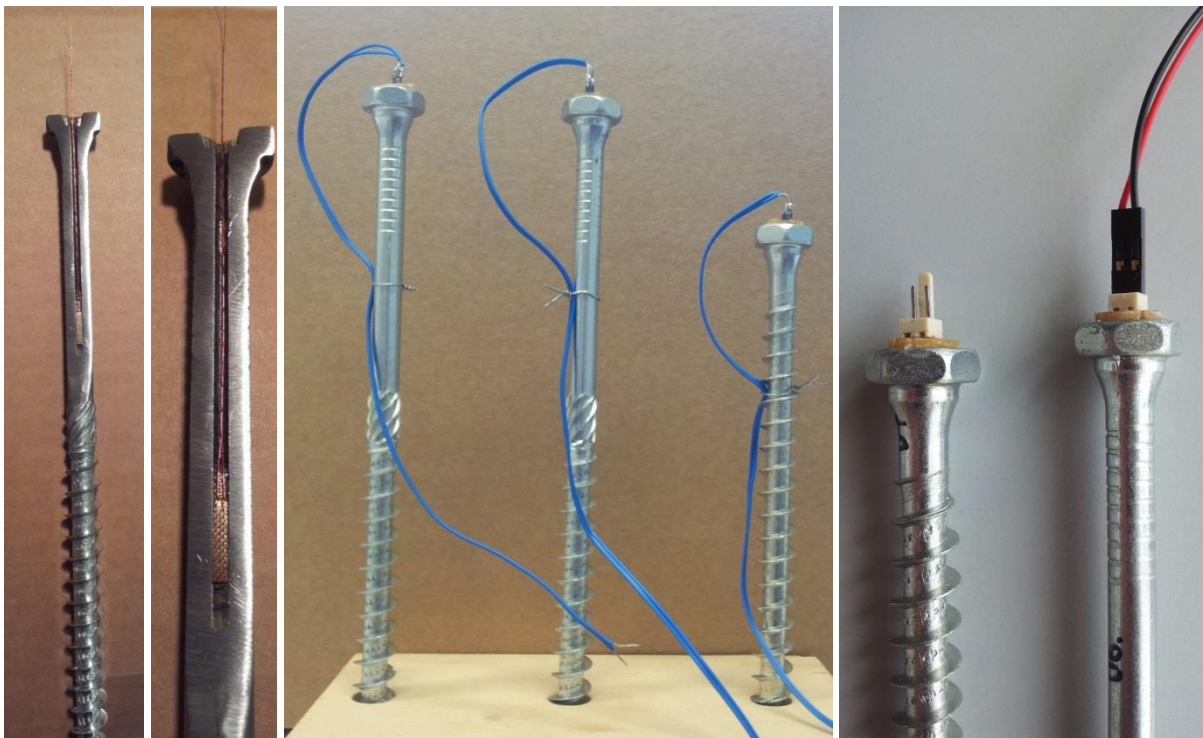
### 4-2.4 EINSETZEN DES DMS UND AUSHÄRTEN DES KLEBSTOFFS

Durch ein Abwinkeln der Anschlussdrähte wurde die genaue Einbaulänge der Dehnmessstreifen markiert. Anschließend wurde der DMS vorsichtig in das mit Klebstoff gefüllte Bohrloch eingetaucht. Der Klebstoff A-2 wurde gemäß Produktdatenblatt [81] zwölf Stunden bei Raumtemperatur und anschließend drei Stunden im Elektroofen bei 140°C ausgehärtet, um seine Endfestigkeit zu erreichen.

## 4-2.5 STECKSYSTEM UND VERKABELUNG

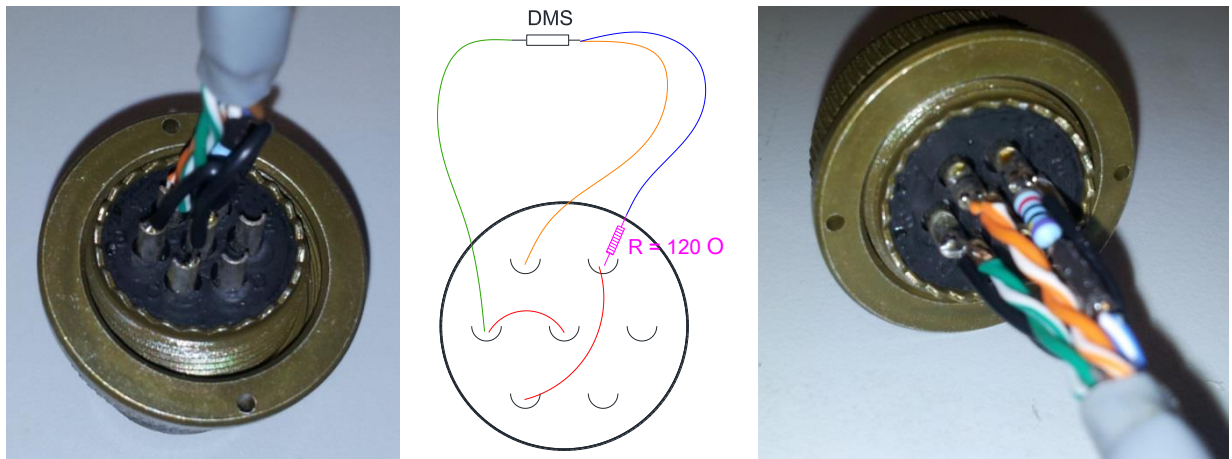
Nach dem Aushärten des Klebstoffes, kann der applizierte DMS an einen Messverstärker angeschlossen und die Messschraube verwendet werden. Im Laufe der Herstellung der ersten Prototypen, wurde ein spezielles Stecksystem entwickelt, um ein einfaches sowie reibungsloses Anschließen an den Messverstärker zu ermöglichen. Dafür wurde bewusst eine Holzschraube des Typs Assy 3.0 Kombi 12 mm [79] der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG ausgewählt, da diese neben einem Innensechsrund- auch über einen Außensechskantantrieb verfügt. Somit war es möglich, die Anschlussdrähte bzw. das Stecksystem im Innensechsrund (Torx) anzubringen und die Messschraube mittels Gabelschlüssel über den Außensechskantantrieb einzudrehen.

In Abbildung 4-3 sind folglich eine aufgeschliffene Messschraube bzw. die Position des freigelegten Dehnmessstreifens dargestellt und fertige Messschrauben-Prototypen mit dem angebrachten Stecksystem abgebildet.



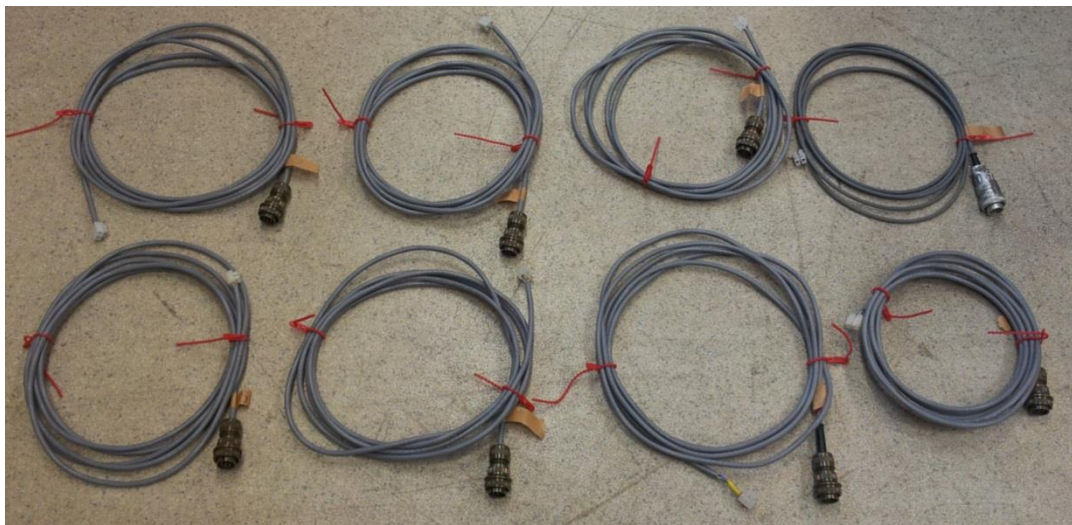
**Abbildung 4-3:** Messschrauben-Prototypen: links: aufgeschliffene Messschraube; Mitte: unterschiedliche Typen von Messschrauben mit Verkabelung; rechts: Detail Stecksystem

Ziel war es, acht Messschrauben an einen Messverstärker anzuschließen und die resultierenden Kräfte mitzumessen. Dafür war es notwendig, acht Anschlusskabel mit geeignetem Stecker anzufertigen. Die Ausführung und Messung erfolgte mittels Halbbrücke und Drei-Leiter-Technik. Diese bietet eine höhere Messempfindlichkeit und kompensiert zusätzlich die Temperatureinflüsse, welche auf die Brückenverdrahtung einwirken (vgl. Abschnitt 2-1.3). Alle Kabel wurden auf dieselbe Länge zugeschnitten und die Brückenschaltung im Stecksystem mittels Widerstand und Elektrodrähten verlötet. Der Lötanschluss des Kabels an den Stecker für den Messverstärker ist in Abbildung 4-4 dargestellt.



**Abbildung 4-4:** *Bildung der Brückenschaltung in den Anschlusskabeln: links: gelöteter Anschluss von unten; Mitte: schematische Skizze; rechts: gelöteter Anschluss von oben*

Alle Kabel wurden anschließend auf ihre Funktion geprüft. Da streng darauf geachtet wurde, dass alle Kabel gleich lang sind, dasselbe Material verwendet wurde und die Verarbeitung bei allen Brückenschaltungen gleich erfolgte, ist ein Einfluss auf das Messergebnis bei Verwendung der unterschiedlichen Anschlusskabel auszuschließen. In Abbildung 4-5 werden alle acht fertig vorbereiteten Anschlusskabel gezeigt.



**Abbildung 4-5:** *Anschlusskabel für die Messschrauben*

## 4-3 FUNKTIONSWEISE UND KALIBRIERUNGSPRÜFUNGEN

Nach der Herstellung der ersten Prototypen wurden die Messschrauben mittels stufenweiser Auszugsprüfungen kalibriert und deren Anschlussystem laufend verbessert. Der Anschluss der Dehnmessstreifen erfolgte mittels Stecksystem über ein 3-Leiter-Kabel zum Messverstärker. Der DMS mit einem Widerstand von 120  $\Omega$  wurde in eine Wheatstonesche Halbbrückenschaltung eingebunden, um die gewünschten Messsignale zu erhalten. Die Speisespannung betrug ein Volt und die Messwerte wurden mit einer Frequenz von fünf Hertz aufgezeichnet. Die ermittelten Spannungsänderungen des DMS in der Messschraube galt es, mit den aufgebrachtten Kräften, zu korrelieren. Somit wurde für jede Messschraube eine spezifische Spannungsänderungs-Kraft-Beziehung in Form einer Regressionsgerade erstellt. Um diese Kurven zu verifizieren und die Praxistauglichkeit einer Holz-Messschraube zu gewährleisten, wurden diese mehrmals hinein- bzw. herausgedreht und erneut kalibriert.

### 4-3.1 PRÜFUNGSVORBEREITUNG

Für die Kalibrierungsprüfungen wurden Probestücke mit den ungefähren Abmessungen von 18 x 12 x 50 cm aus Fichtenholz (Holzfeuchte u ~ 12 %) bzw. Buchenfurnierschichtholz hergestellt. Diese waren jeweils in der Mitte mit dem Kerndurchmesser der Messschraube vorgebohrt, um das Eindrehen zu erleichtern.

#### 4-3.1.1 Bezeichnung der Messschrauben und Kalibrierungsprüfungen

Die fertig hergestellten Messschrauben wurden mit einer laufenden Nummer versehen und jeweils am Schraubenkopf gekennzeichnet. Die Bezeichnung der Kalibrierungsprüfungen für die jeweiligen Messschrauben erfolgte nach dem folgenden Prinzip:

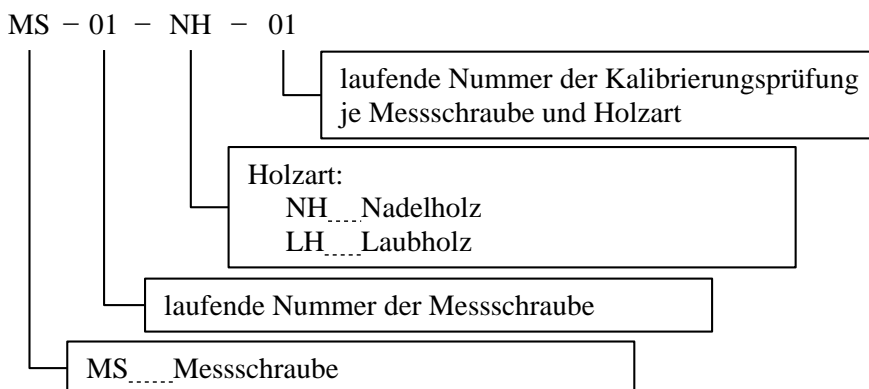


Abbildung 4-6: Bezeichnung der Messschrauben bzw. Kalibrierungsprüfungen

#### 4-3.1.2 Prüfkongfiguration der Kalibrierungsprüfungen

Die Kalibrierungsprüfungen wurden an der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 am Lignum Test Center des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt. Die Messschrauben wurden ca. 90 mm in Fichten- bzw. Buchenholz eingedreht, sodass sich die Dehnmessstreifen noch deutlich über Holzoberfläche befanden. Mittels zwei Stahlplatten mit einem lichten Abstand von rund 16 cm wurde der Probekörper gehalten. Die Prüfkraft wurde über eine Spannhülse appliziert. Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 stellen die verwendete Prüfkongfiguration dar.



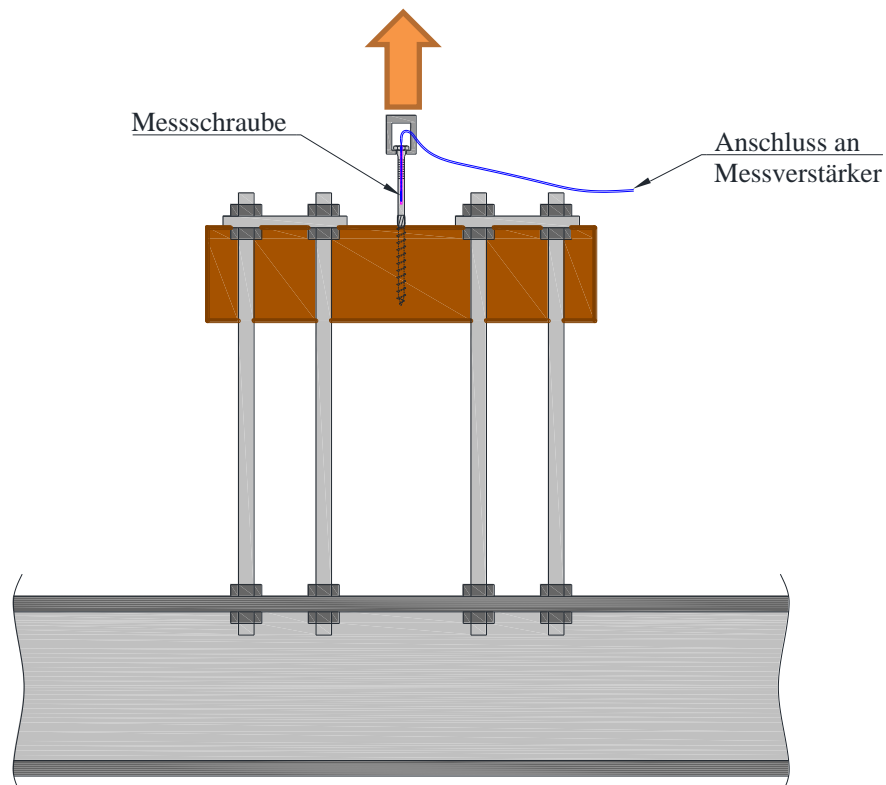


Abbildung 4-7: Kalibrierungsprüfungen – Prüfkonfiguration

### 4-3.1.3 Durchführung der Kalibrierungsprüfungen

Die Kalibrierungsprüfungen erfolgten an der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275, welche ein stufenloses, weg- und/oder kraftgesteuertes Aufbringen von Kräften bis maximal 275 kN ermöglicht. Die verwendete Kraftmessdose erlaubte es, die auf den Prüfkörper aufgebrachte Last mit einer Fehlergrenze von weniger als 1 % zu messen.

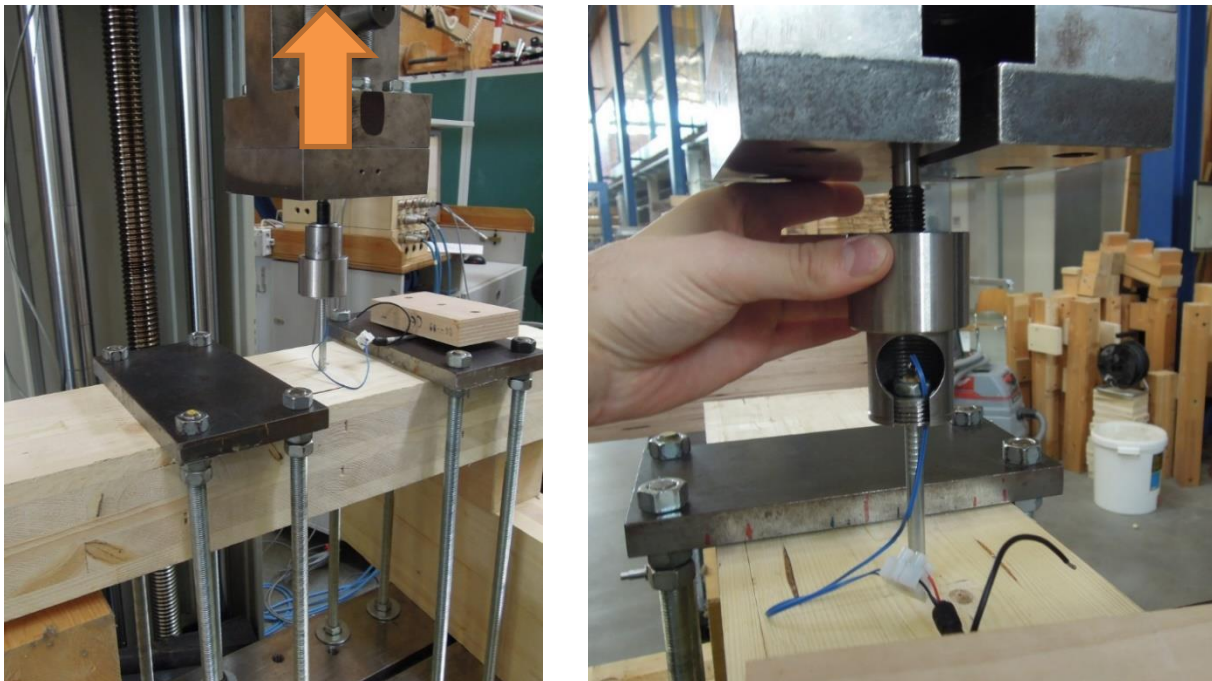


Abbildung 4-8: Kalibrierungsprüfungen: links: Prüfkonfiguration; rechts: Einspannhülse

Die Kalibrierungsprüfung erfolgte weggesteuert in Form einer stufenweisen Schraubenauszugsprüfung, wobei die Vorschubgeschwindigkeit 1 mm/min betrug. Die Messschraube wurde in verschiedenen Laststufen mehrmals be- und entlastet, bevor sie aus dem Probekörper (Fichtenholz oder Buchenholz) herausgezogen wurde (siehe Abbildung 4-9). Die Zugkraft wurde während der Prüfung immer über 250 N (Vorkraft) gehalten, um einen reibungsfreien Ablauf zu gewährleisten und qualitative Ergebnisse zu erhalten.

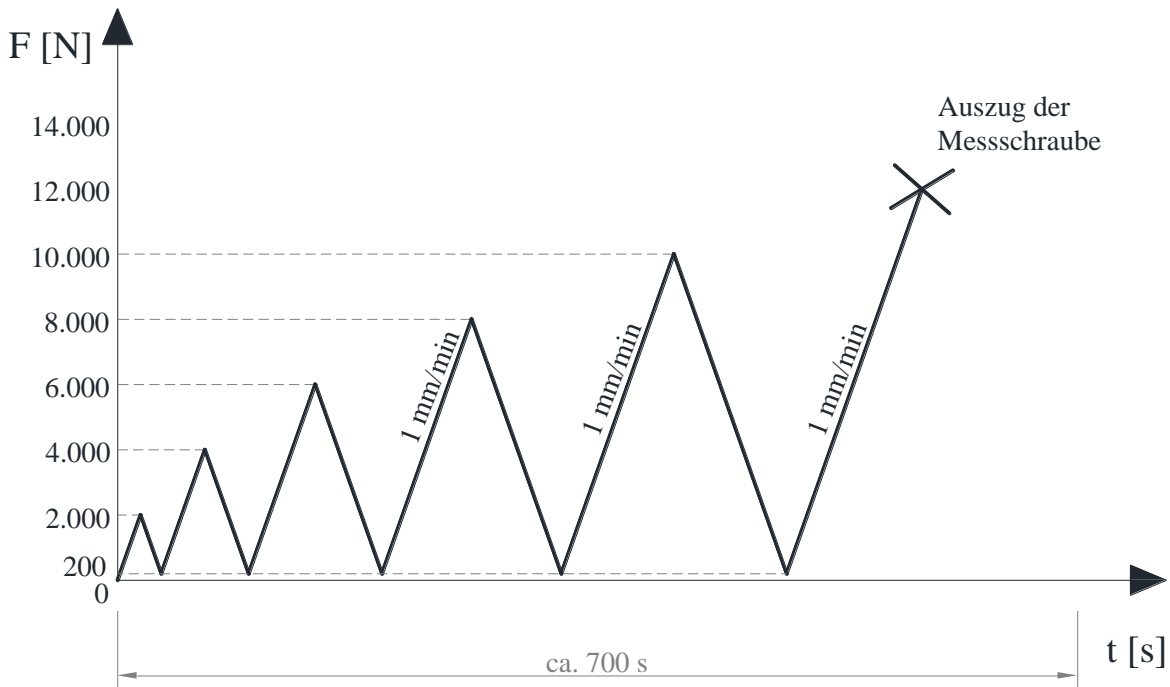


Abbildung 4-9: Kalibrierungsprüfungen – Prüfablauf

Zusätzlich zur Kraftänderung über die Zeit (siehe Abbildung 4-10) wurde auch die Änderung der gemessenen Spannungsdifferenz der Messschraube in Relation zur Kraft (siehe Abbildung 4-11) aufgezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine sehr gute Korrelation der gemessenen Werte vorliegt.

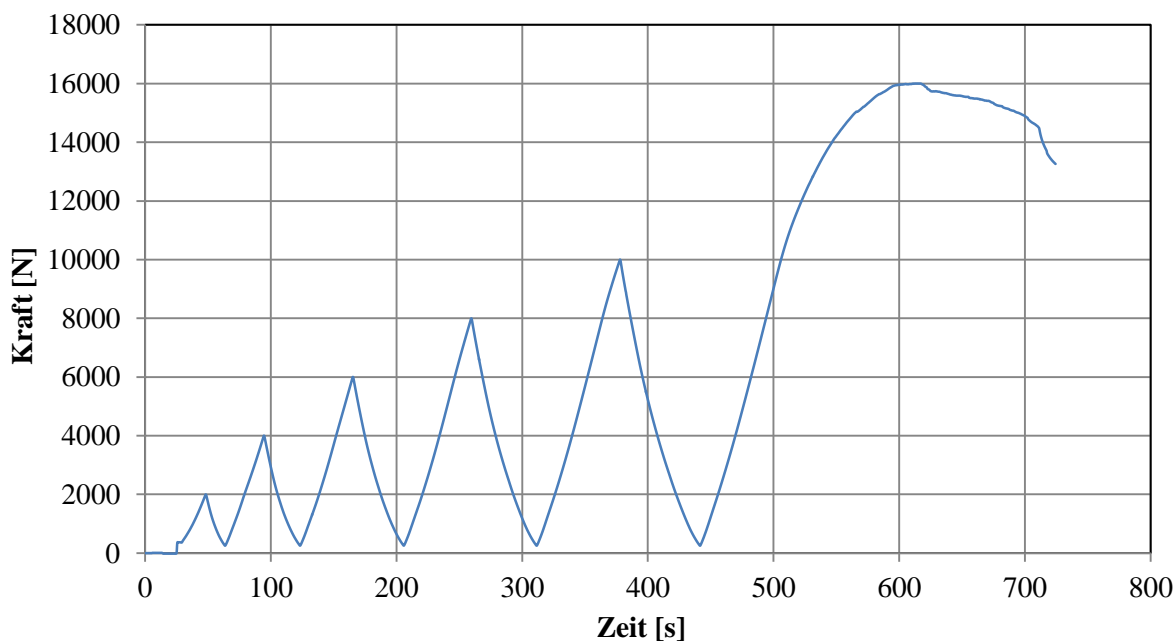


Abbildung 4-10: exemplarisches Kraft-Zeit-Diagramm für die Kalibrierprüfung MS-04-NH-03

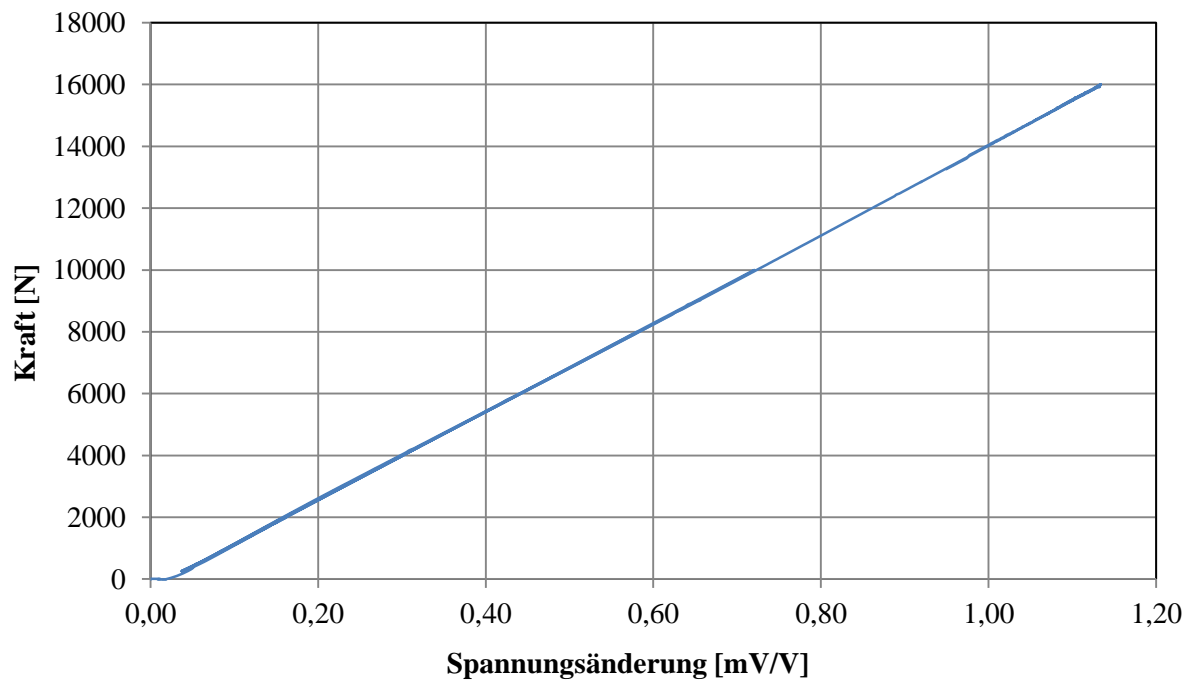


Abbildung 4-11: exemplarisches Kraft-Spannungsänderungs-Diagramm für die für die Kalibrierprüfung MS-04-NH-03

#### 4-3.1.4 Auswertung und Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen

Ziel war es, für jede Messschraube eine individuelle Kraft-Spannungsänderungs-Beziehung aufzustellen und diese zu vergleichen. Dies erfolgte mittels einer Regressionsanalyse in Anlehnung an [82] und [83]. Neben den Koeffizienten der Regressionsgerade wurde auch der Standardfehler  $\sigma_n$  und das lineare Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ermittelt, um die Präzision der Messung zu bestimmen. Die Regressionsgerade wird aus den beiden Regressionskoeffizienten a und b gebildet.

$$\hat{y} = a + b \cdot x \quad (4.1)$$

mit:

$\hat{y}$	...	errechnete Kraft in der Messschraube [N]
a	...	Achsenabschnitt der Regressionsgerade [N]
b	...	Steigung der Regressionsgeraden [N·V/mV]
x	...	Spannungsänderung des DMS in der Messschraube [mV/V]

Die Steigung der Regressionsgeraden gilt grundsätzlich als Umrechnungsfaktor zwischen der Spannungsänderung des DMS und der Kraft in der Messschraube. Als Grundlage für die Regressionsanalyse bzw. für die Ermittlung der Regressionskoeffizienten gilt die Methode der kleinsten Quadrate. Das heißt, es wird eine Geradengleichung mit jenen Koeffizienten a und b ermittelt, womit die Summe der quadratischen Abweichungen der einzelnen Punkte ein Minimum erreicht. Die Regressionskoeffizienten lassen sich wie folgt berechnen:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = r_{xy} \cdot \frac{s_y}{s_x} \quad (4.2)$$

mit:

b	...	Steigung der Regressionsgeraden
$x_i$	...	Messwert auf der x-Achse (Spannungsänderung des DMS [mV/V])



$y_i$	...	Messwert auf der y-Achse (Kraft in der Messschraube [kN])
$\bar{x}, \bar{y}$	...	arithmetische Mittel der jeweiligen Messwerte
$s_{xy}$	...	Kovarianz
$s_x^2$	...	empirische Varianz
$r_{xy}$	...	empirischer Korrelationskoeffizient
$s_x, s_y$	...	Standardabweichung

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (4.3)$$

mit:	$a$	...	Achsenabschnitt der Regressionsgeraden
	$b$	...	Steigung der Regressionsgeraden
	$\bar{x}, \bar{y}$	...	arithmetische Mittel der jeweiligen Messwerte

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gibt die Qualität der Modellanpassung an und wird im Fall einer linearen Regression nach Gleichung (4.4) berechnet. Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Liegt der Wert in der Nähe von 1, so ist das Modell gut geeignet die abhängigen Variablen durch die unabhängigen Variablen vorherzusagen.

$$R^2 = r_{xy}^2 = \frac{s_{xy}^2}{s_x^2 \cdot s_y^2} \quad (4.4)$$

mit:	$R^2$	...	Bestimmtheitsmaß
	$r_{xy}$	...	empirischer Korrelationskoeffizient
	$s_x^2, s_y^2$	...	Einzelvarianzen
	$s_{xy}$	...	Kovarianz

Ein weiteres Gütemaß in der Regressionsanalyse ist der Standardfehler der Regression. Dieser Wert gibt an, wie groß im Durchschnitt die Abweichungen der Messwerte von der geschätzten Regressionsgerade sind und wird wie folgt berechnet:

$$\text{Standardfehler der Regression} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - k - 1)}} \quad (4.5)$$

mit:	$\hat{y}$	...	errechneter Wert aus der ermittelten Regressionsgeraden
	$y_i$	...	Messwert auf der y-Achse
	$n$	...	Stichprobenumfang
	$k$	...	Anzahl der unabhängigen Variablen

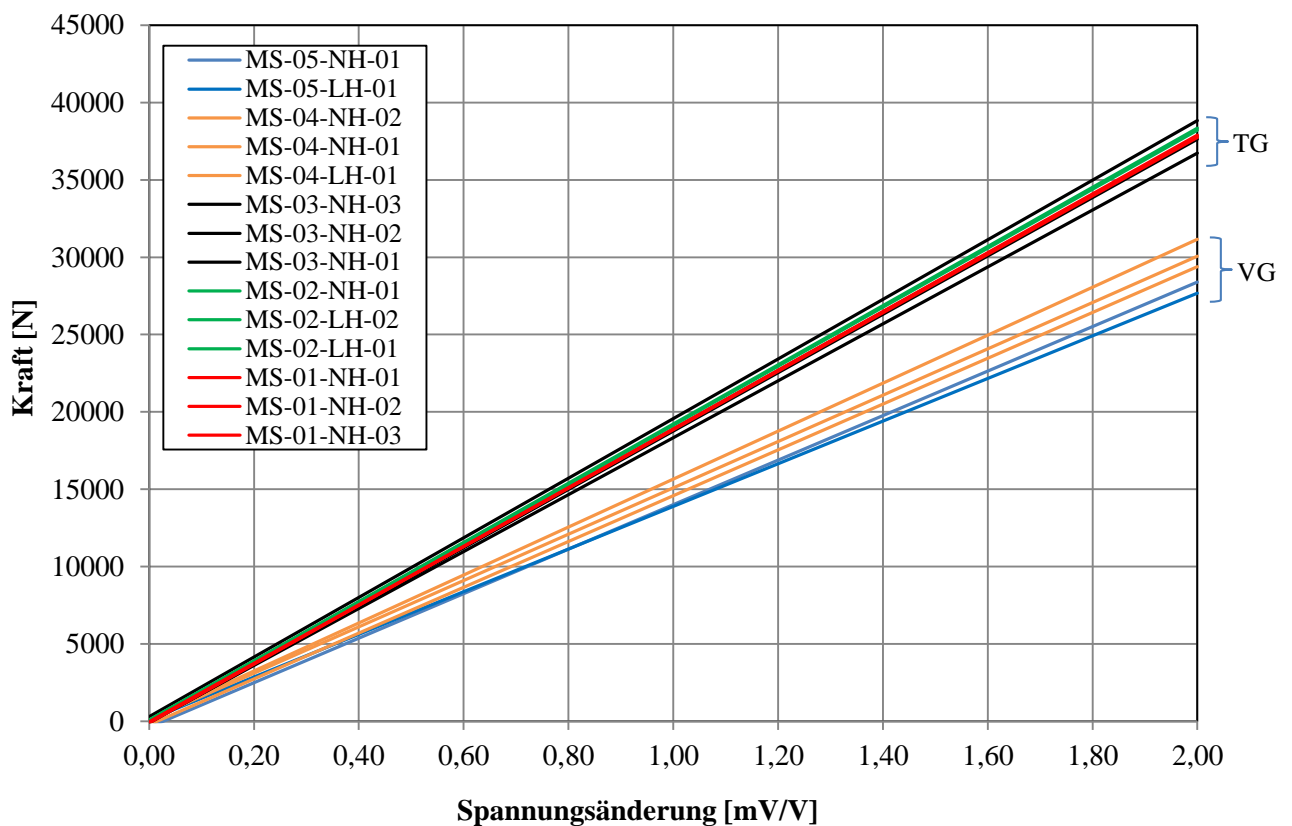
### **Ergebnisse der ersten Messschraubenreihe MS-01 bis MS-05**

Die ersten fünf Messschrauben wurden als Prototypen zu Tastversuchszwecken erstellt. Für die Verklebung der DMS in den aufgebohrten Schrauben wurde ein herkömmliches Zwei-Komponenten-Epoxidharz verwendet. Diese Versuche sollten zeigen, ob selbstbohrende Holzschrauben grundsätzlich für die Applizierung von Dehnmessstreifen im aufgebohrten Kern geeignet sind. Tabelle 4-1 zeigt die hierfür verwendeten Holzschrauben.

**Tabelle 4-1:** *Verwendete Schrauben für MS-01 bis MS-05*

Messschraubenummer	Schraubentyp
<b>MS-01</b>	Assy 3.0 Kombi 12x200 mm, Teilgewinde
<b>MS-02</b>	Assy 3.0 Kombi 12x200 mm, Teilgewinde
<b>MS-03</b>	Assy 3.0 Kombi 12x200 mm, Teilgewinde
<b>MS-04</b>	Assy 3.0 Kombi 12x160 mm, Vollgewinde
<b>MS-05</b>	Assy 3.0 Kombi 12x160 mm, Vollgewinde

In Abbildung 4-12 sind folglich die Regressionsgeraden aus den verschiedenen Kalibrierungsprüfungen der fünf Messschrauben zusammenfassend dargestellt.



**Abbildung 4-12:** *Regressionsgeraden der Messschrauben MS-01 bis MS-05*

In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der Regressionsanalysen der Messschrauben MS-01 bis MS-05 dargestellt.

**Tabelle 4-2: Ergebnisse der Regressionsanalysen der Teilgewinde-Messschrauben MS-01 bis MS-03**

Messschraube / Kalibrierungsprüfung	Standardfehler $\sigma_n$ [N]	Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]	Regressionskoeffizienten	
			a [N]	b [N/mV/V]
MS-01-NH-01	12,1	0,999988	-53,1	18.934
MS-01-NH-02	9,87	0,999986	-105	18.999
MS-01-NH-03	6,69	0,999994	-38,5	18.889
MS-02-LH-01	15,1	0,999964	92,5	19.126
MS-02-LH-02	22,3	0,999938	74,6	19.067
MS-02-NH-01	19,6	0,999946	40,6	18.872
MS-03-NH-01	10,1	0,999966	-65,9	18.397
MS-03-NH-02	47,7	0,999680	-103	18.866
MS-03-NH-03	88,7	0,998893	302	19.265
<b>Mittelwert</b>	25,8	1,000	15,9	18.935
<b>Standardabweichung</b>	26,6	0,000	130	242
<b>COV</b>	103%	0,036%	814%	1,28%

**Tabelle 4-3: Ergebnisse der Regressionsanalysen der Vollgewinde-Messschrauben MS-04 und MS-05**

Messschraube / Kalibrierungsprüfung	Standardfehler $\sigma_n$ [N]	Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]	Regressionskoeffizienten	
			a [N]	b [N/mV/V]
MS-04-LH-01	237	0,992951	155	15.502
MS-04-NH-01	170	0,996725	115	14.975
MS-04-NH-02	61,9	0,999480	-220	14.804
MS-04-NH-03	19,3	0,999949	-294	14.261
MS-05-NH-01	14,2	0,999974	-381	14.387
MS-05-LH-01	29,3	0,999889	109	13.783
MS-05-NH-02	33,7	0,999850	-238	13.883
<b>Mittelwert</b>	80,7	0,998	-108	14.514
<b>Standardabweichung</b>	87,3	0,003	225	617
<b>COV</b>	108%	0,268%	-209%	4,25%

Die Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen von weiteren Messschraubenreihen sind in Abschnitt 5-3.9 angeführt.

## Interpretation der Ergebnisse

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Steigungen der Regressionsgeraden der längeren Teilgewindeschrauben MS-01 bis MS-03 einheitlich größer sind, als jene der kürzeren Vollgewindeschrauben MS-04 und MS-05. Wie aus den Gleichungen (2.5) bis (2.7) ersichtlich ist, ist die Spannungsänderung  $U_A/U_B$  proportional zur Widerstandsänderung  $\Delta R/R$  und zur Dehnung  $\varepsilon$  des Dehnmessstreifens. Folglich kann die größere Steigung damit begründet werden, dass der Kerndurchmesser der Vollgewindeschrauben 12x160 mm kleiner ist als der Durchmesser des Schaftes der Teilgewindeschrauben 12x200 mm und somit die Dehnungen in den Vollgewindeschrauben größer sind.

Außerdem ist bei einer Applizierung der DMS im Kern des Gewindebereichs eine größere Streuung verschiedener Messschrauben zu erwarten, da das Material aufgrund des Kaltwalzens inhomogener ist und die Querschnittsfläche von der Positionierung des DMS, zwischen dem oder auf Höhe des Gewindegangs, abhängt.

Es ist zudem festzustellen, dass sich die Regressionsgeraden verschiedener Kalibrierungsprüfungen einer Messschraube (beispielsweise MS-04) teilweise deutlich unterscheiden. Dies lässt sich auf das mehrmalige Hinein- und Herausschrauben zwischen den Prüfungen zurückführen. Die beste Korrelation der Regressionsgeraden zeigen die Kalibrierungsprüfungen MS-02-LH-01 und MS-02-LH-02, diese wurden unmittelbar hintereinander ausgeführt und die Messschraube dazwischen nicht herausgeschraubt.

Die Streuungen von Regressionsgeraden verschiedener Kalibrierungsprüfungen einer Messschraube lassen vermuten, dass die Zuverlässigkeit einer Messschraube stark von der Qualität der Applizierung bzw. Verklebung des Dehnmessstreifens im Kern der Messschraube abhängt. Somit lassen sich die Streuungen der Ergebnisse einer Messschraube damit begründen, dass für die ersten Tastversuche der DMS-Applizierungen noch kein herstellerepezifischer Klebstoff verwendet wurde und somit keine einwandfreie und fehlerlose Verklebung der DMS garantiert werden kann.

## 4-3.2 LANGZEITVERSUCHE

Zur Ermittlung der Qualität der Messschrauben bzw. der Stabilität der gemessenen Werte unter Dauerbelastung wurden in weiterer Folge Langzeitversuche durchgeführt. Dies erfolgte mittels Beaufschlagung einer konstanten Last und Aufzeichnung des Messsignals über mehrere Stunden bzw. Tage. Insbesondere galt es zu überprüfen, ob ein eventuelles Kriechen des DMS bzw. der Klebeverbindung plastisch und/oder elastisch erfolgt.

### 4-3.2.1 Bezeichnung der Langzeitversuche

Die Langzeitprüfungen für die jeweiligen Messschrauben wurden laut Abbildung 4-13 bezeichnet.

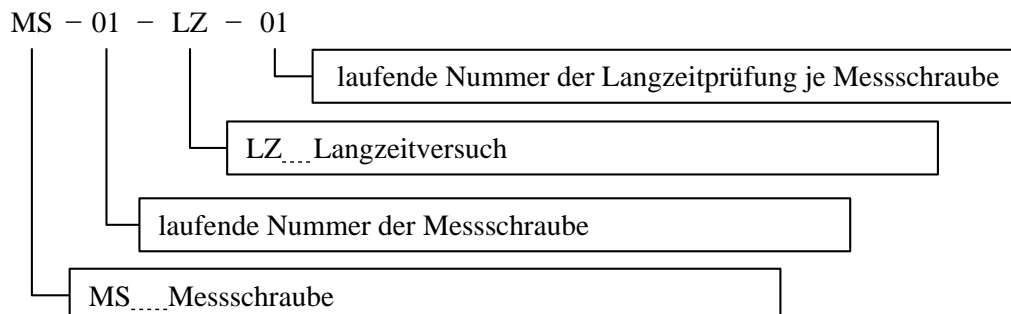
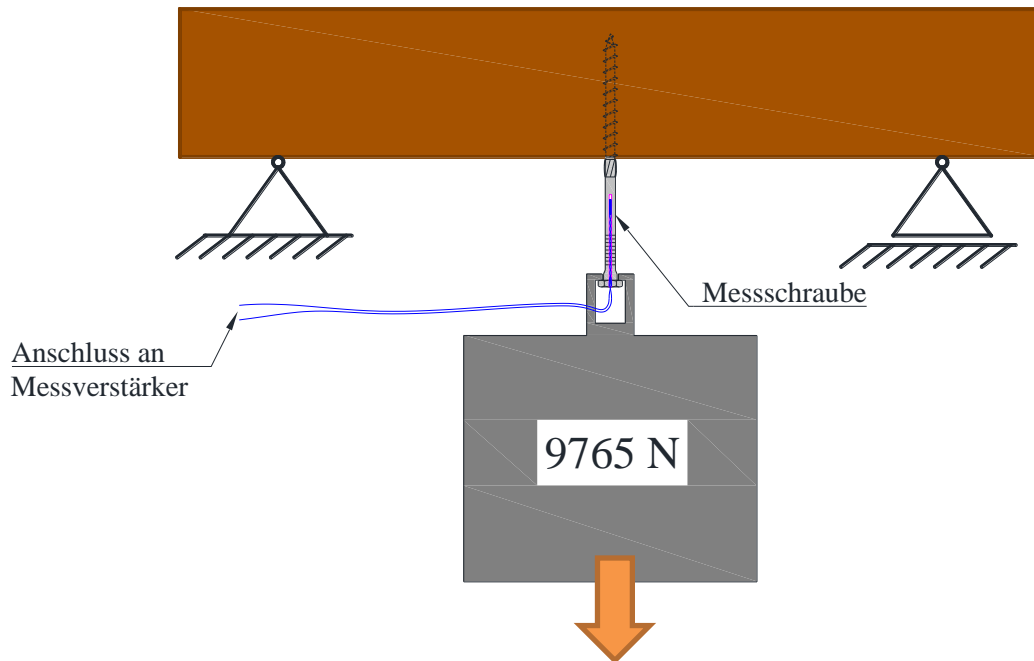


Abbildung 4-13: Bezeichnung der Langzeitversuche

### 4-3.2.2 Prüfkonfiguration und Durchführung der Langzeitprüfungen

Die zu prüfende Messschraube wurde in einen Probekörper aus Fichten- bzw. Buchenholz eingedreht. Der Probekörper wurde umgedreht, aufgelagert und auf die Messschraube eine konstante Last von 9765 N gehängt (Abbildung 4-14).



**Abbildung 4-14: Skizze der Prüfkonfiguration für die Langzeitversuche**

Vor dem Aufbringen der Last wurde das Anschlusskabel an einen Messverstärker angeschlossen. Dieser zeichnete die Spannungsänderungen im DMS mit einer Frequenz von einem Hertz über den gesamten Prüfzeitraum auf. In Abbildung 4-15 ist eine laufende Langzeitbelastung einer Messschraube dargestellt.



**Abbildung 4-15: Foto der Prüfkonfiguration für die Langzeitversuche**

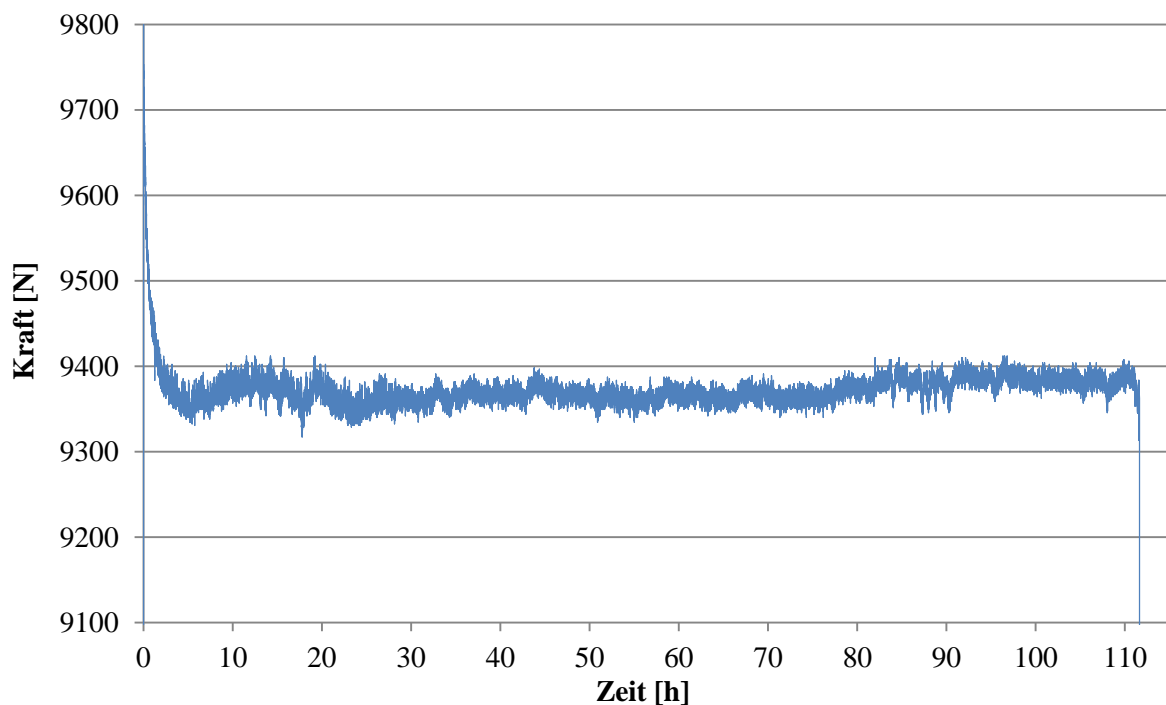
### 4-3.2.3 Auswertung und Ergebnisse der Langzeitversuche

Es galt herauszufinden, ob die Messwerte bei gleichbleibender Belastung konstant bleiben oder, ob ein Driften aufgrund von Temperatureinflüssen, Kriechen oder sonstigen Einflüssen stattfindet. Zusätzlich wurde die mittels zugehöriger Regressionskurve ermittelte Last in der Messschraube mit der tatsächlich aufgetragenen Last verglichen.

#### **Erste Messschraubenreihe MS-01 bis MS-05**

In den ersten Tastversuchen wurden wahlweise verschiedene Messschrauben ausgewählt, welche für Langzeituntersuchungen herangezogen wurden. Die Prüfzeit betrug zwischen wenigen Stunden und mehreren Tagen.

In Abbildung 4-16 bis Abbildung 4-19 sind die Langzeitauswertungen der Messwerte der Messschrauben MS-01 bis MS-05 in Form von Diagrammen dargestellt, wobei für die Messschraube MS-03 keine Werte vorliegen. Es wird jeweils die Änderung der mittels Regressionsgeraden ermittelten Kräfte in den Messschrauben über die Zeit beobachtet. Die Messwerte wirken auf den ersten Blick sehr konstant, darum wurden die Ordinaten skaliert, um die Messsignalveränderung anschaulicher darzustellen. Der Beobachtungszeitraum reicht über mehrere Stunden, lediglich die Signaländerung von MS-04 wurde nur 34 Minuten untersucht.



**Abbildung 4-16: Langzeitprüfung der Messschraube MS-01 – Messzeit: 112 Stunden**

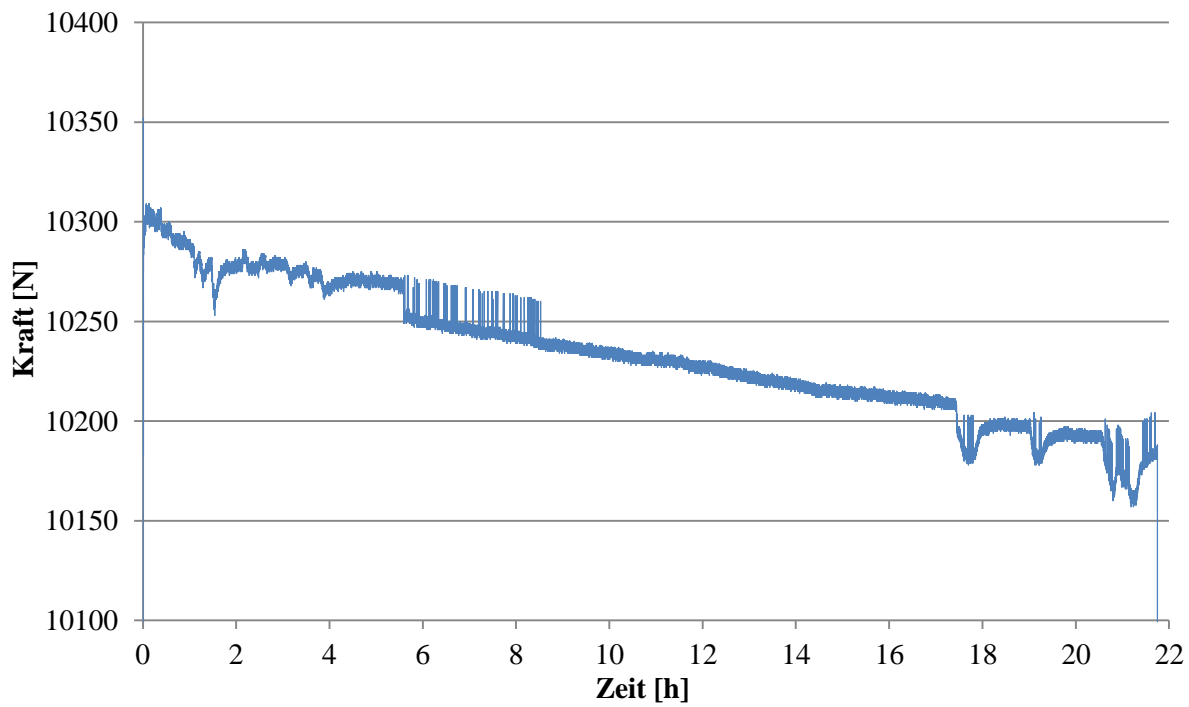


Abbildung 4-17: Langzeitprüfung der Messschraube MS-02 – Messzeit: 22 Stunden

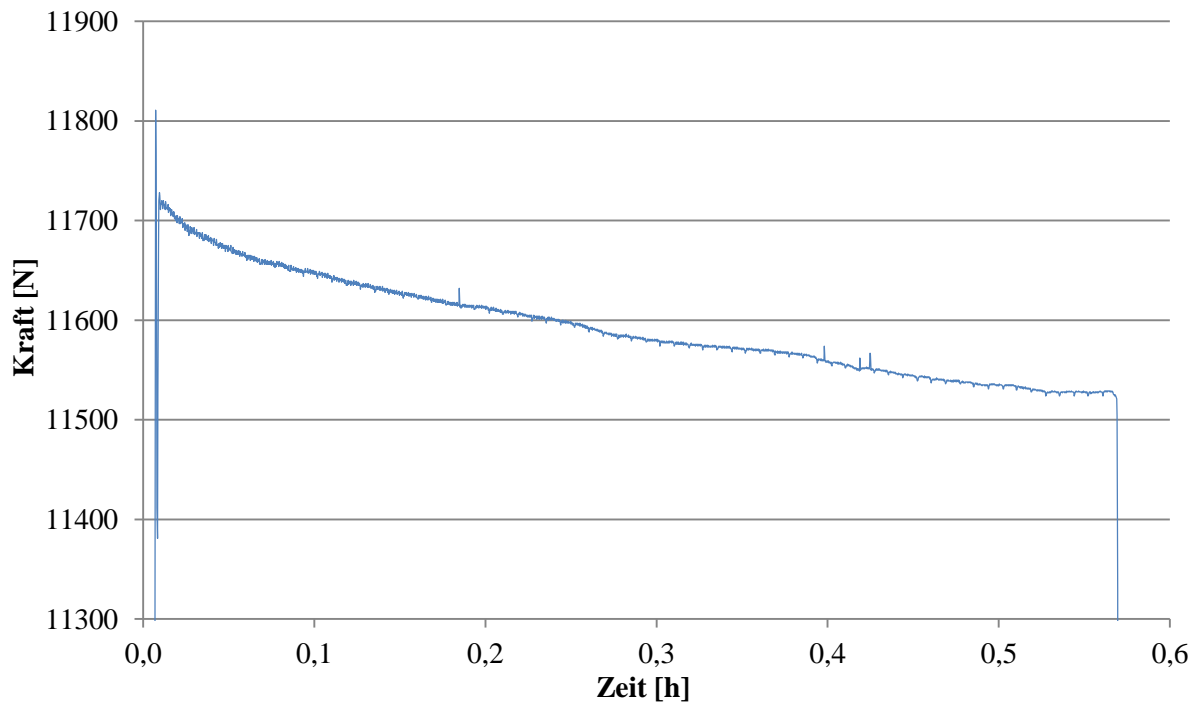


Abbildung 4-18: Langzeitprüfung der Messschraube MS-04 – Messzeit: 34 Minuten



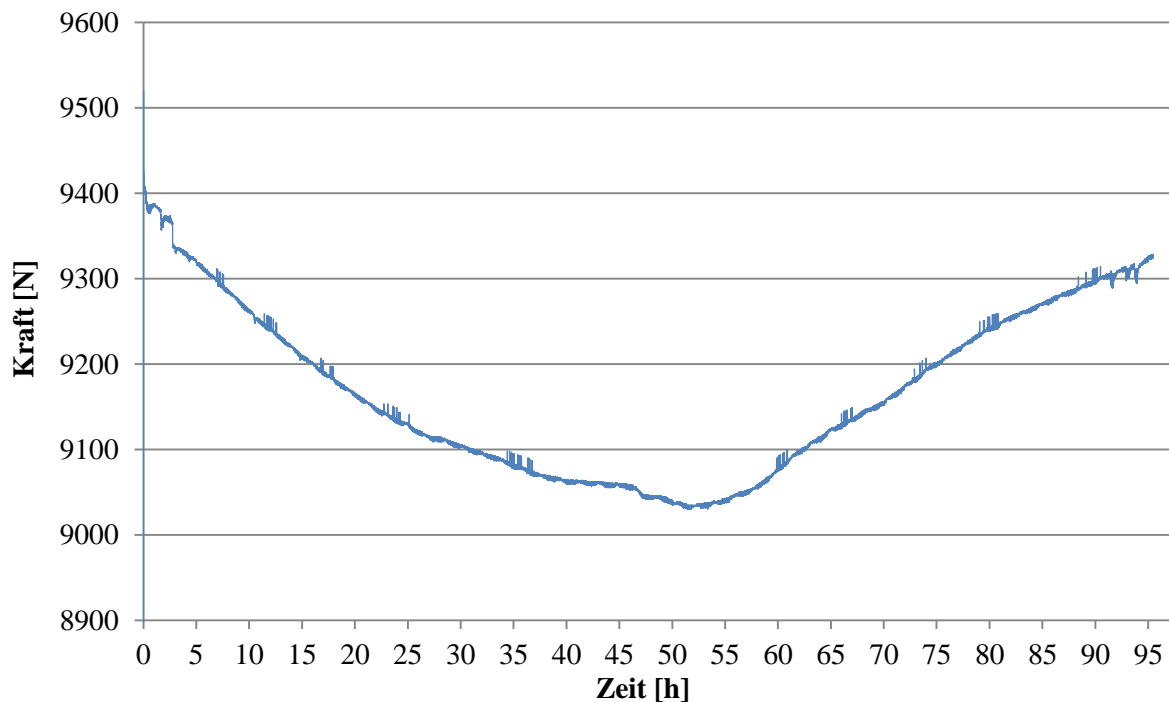


Abbildung 4-19: Langzeitprüfung der Messschraube MS-05– Messzeit: 95 Stunden

### **Interpretation der Ergebnisse**

Die Messschraube MS-01, welche bei den Kalibrierungsprüfungen die beste Korrelation erzielte, liegt bei der Langzeitprüfung über 112 Stunden mit der gemessenen Kraft zu Beginn nur rund 60 N unter der tatsächlichen Last von 9765 N, das sind 0,6 % Abweichung. Das Messsignal driftete in den ersten drei Stunden ca. 300 N (3 %) ab und blieb die restliche Zeit mehr oder weniger konstant. Dies lässt vermuten, dass die Messsignaländerung auf einen Temperatur- oder Kriecheinfluss zurückzuführen ist, welcher nach ca. drei Stunden konstant blieb. Die ersten Messschrauben-Prototypen wurden mit DMS appliziert, welche nicht selbsttemperaturkompensierend waren und jeweils mit zwei Anschlussdrähten an den Messverstärker angeschlossen wurden. Die Ergebnisse der Langzeituntersuchungen zeigen, dass es sinnvoll ist, selbsttemperaturkompensierende DMS zu verwenden und mittels Dreileitertechnik anzuschließen.

Die ermittelten Kräfte aus den Messschrauben MS-02, MS-04 und MS-05 weichen zwischen 400 N und 1800 N von der tatsächlichen Last ab. Wobei die hohe Abweichung, welche bei Messschraube MS-04 auftritt, wahrscheinlich auf eine mangelhafte Verklebung zurückzuführen ist, da auch die Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen dieser Messschraube stärker streuen.

Die Messschrauben MS-02 und MS-04 (Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18) zeigen einen konstanten Abfall der Messergebnisse um ca. 200 N (rund 2 %) über den Prüfzeitraum. Die Messwerte der Messschraube MS-05 weisen einen unregelmäßigen Verlauf über 95 Stunden auf, da die Abweichung von ca. 350 N (rund 4 %) in beide Richtungen verläuft (Abbildung 4-19). Auch dieser Verlauf lässt eine schlechte Verklebung bzw. die Verwendung eines ungeeigneten Klebstoffs vermuten.

In zahlreichen weiteren Langzeituntersuchungen der ersten Messschrauben-Prototypen zeigte sich, dass ein relativ gleichmäßiges Kriechen über die ersten 24 Stunden stattfindet. Durch die Wiederholung der Langzeitversuche an denselben Messschrauben konnte festgestellt werden, dass die Kriechverformung teilweise elastisch erfolgt und somit kaum kompensiert bzw. eliminiert werden kann. Das Abweichen der Messergebnisse aufgrund von Kriecheffekten liegt im Verhältnis zur gemessenen Gesamtlast bei maximal 4 % und befindet sich somit im brauchbaren Bereich.

### 4-3.3 KLEBSTOFFVERSUCHE

Wie in Abschnitt 4-3.2.3 dargelegt, wiesen die Langzeitversuche ein Kriechen in Form einer zeitabhängigen Abnahme des Messwertes auf. Durch den Einsatz verschiedener Klebstoffe zur Applizierung der Dehnmessstreifen sollte der am besten geeignete Klebstoff ermittelt und das Kriechverhalten genauer untersucht werden.

#### 4-3.3.1 Herstellung und Durchführung der Klebstoffversuche

Gewindestangen mit einem Durchmesser von zwölf Millimetern wurden axial aufgebohrt und Dehnmessstreifen in einer Tiefe von rund sechs Zentimetern appliziert. Für die Verklebung der DMS wurden folgende Klebstoffe verwendet:

- TOOLCRAFT Epoxydharz L (Zweikomponenten-Epoxydharzklebstoff) [84]
- TOOLCRAFT Epoxydharz L vermischt mit sehr feinen Quarzsand [84]
- A-2 Klebstoff der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. [81]
- Hilti HIT-RE 500-SD (Zweikomponenten-Injektionsmörtel) [85]
- Purbond CR 421 (Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff) [86]
- UHU Plus Endfest 2K-Epoxydharzkleber [87]

Die Klebstoffe wurden vorbereitet, vermischt und anschließend mittels Spritze und langer Kanüle eingebracht.



**Abbildung 4-20: Kriechversuche verschiedener Klebstoffe; Herstellung: links: Einfüllen des Hilti-Klebstoffs [85]; Mitte: Einfüllend des Toolcraft-Klebstoffs [84], vermischt mit feinem Quarzsand; rechts: fertige Versuchskörper**

Die applizierten Gewindestangen wurden anschließend für ca. 24 Stunden mit einer Last von 9765 N beaufschlagt und die Messänderungen aufgezeichnet (vgl. Abbildung 4-21).



Abbildung 4-21: Kriechversuche verschiedener Klebstoffe – Versuchskonfiguration

### 4-3.3.2 Auswertung der Ergebnisse der Klebstoffversuche

Die Verläufe der gemessenen Kraftänderungen infolge Kriechen sind in Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-27 in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffs dargestellt. Die Kraft-Achse der Diagramme wurde jeweils entsprechend skaliert, um einen anschaulichen Verlauf darzustellen.

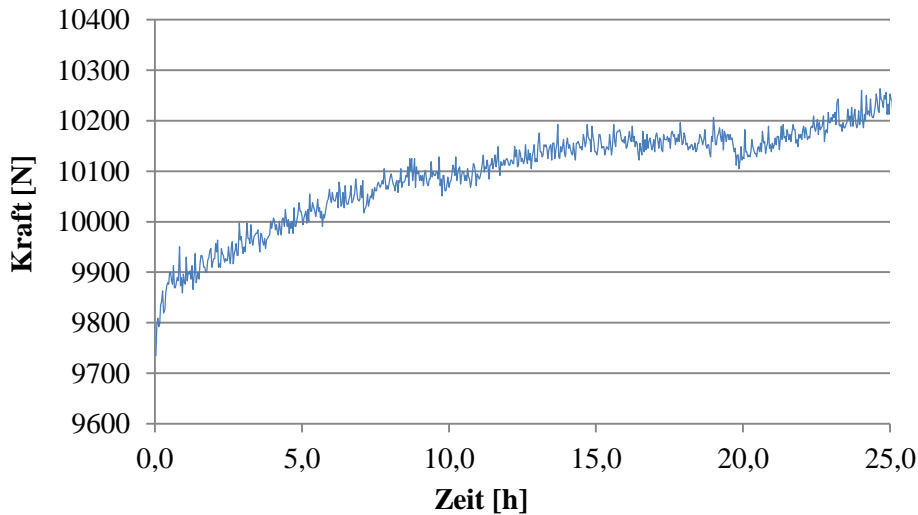


Abbildung 4-22: Kriechverlauf des TOOLCRAFT Epoxyharz L Klebstoffs [84]

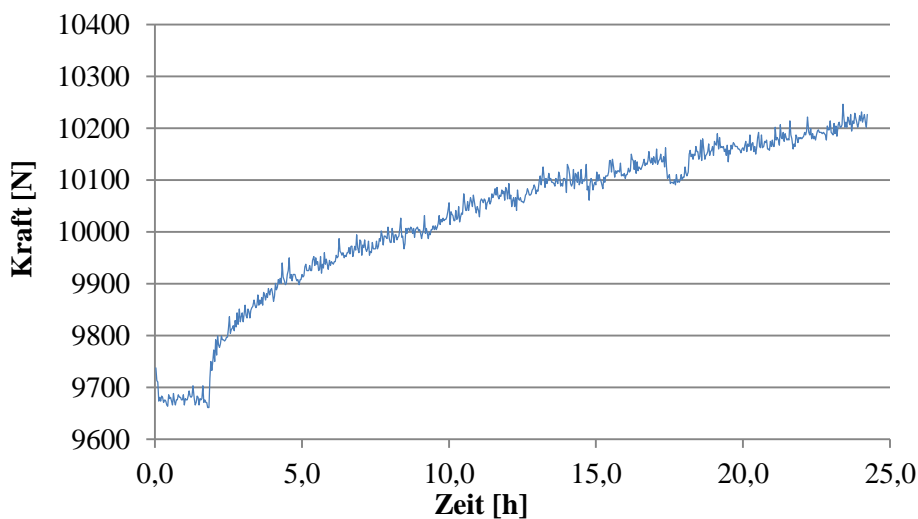


Abbildung 4-23: Kriechverlauf des TOOLCRAFT Epoxyharz L Klebstoffs mit feinem Sand vermischt

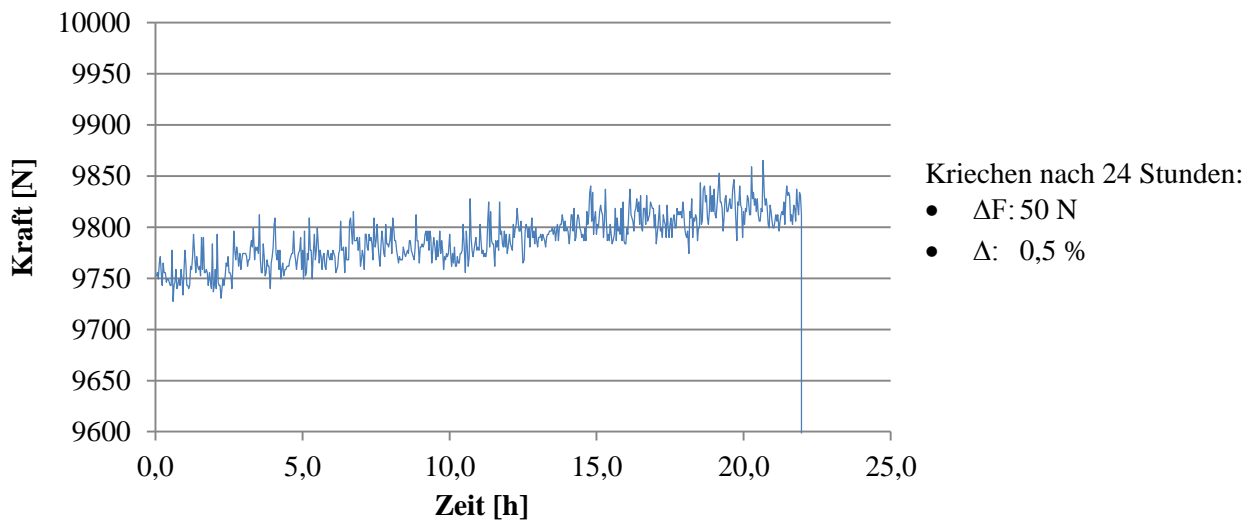


Abbildung 4-24: Kriechverlauf des Hilti HIT-RE 500-SD Klebstoffs [85]

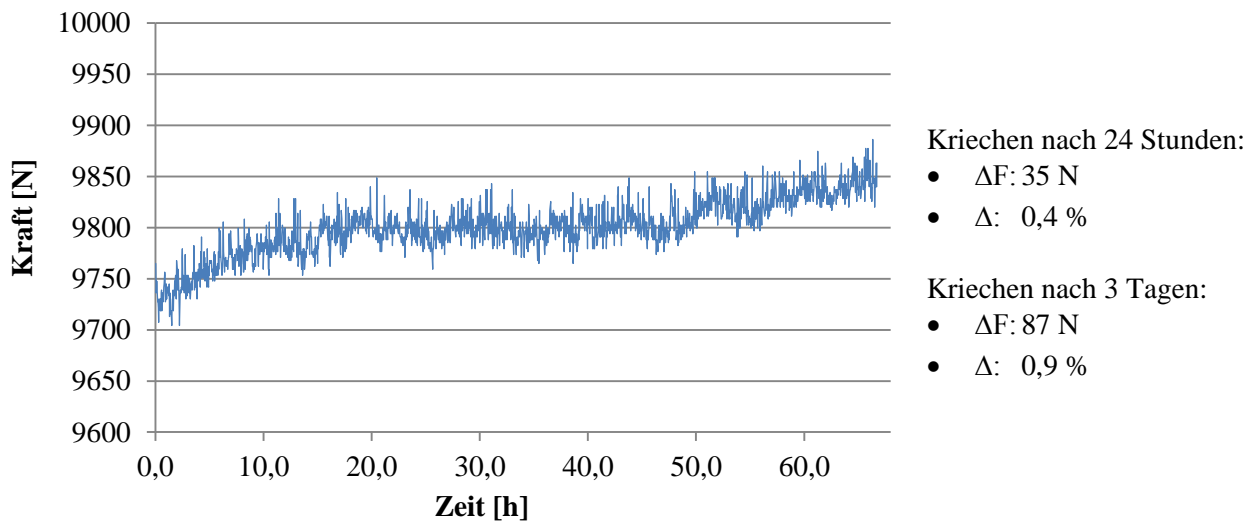


Abbildung 4-25: Kriechverlauf des A2-Klebstoffs [81]

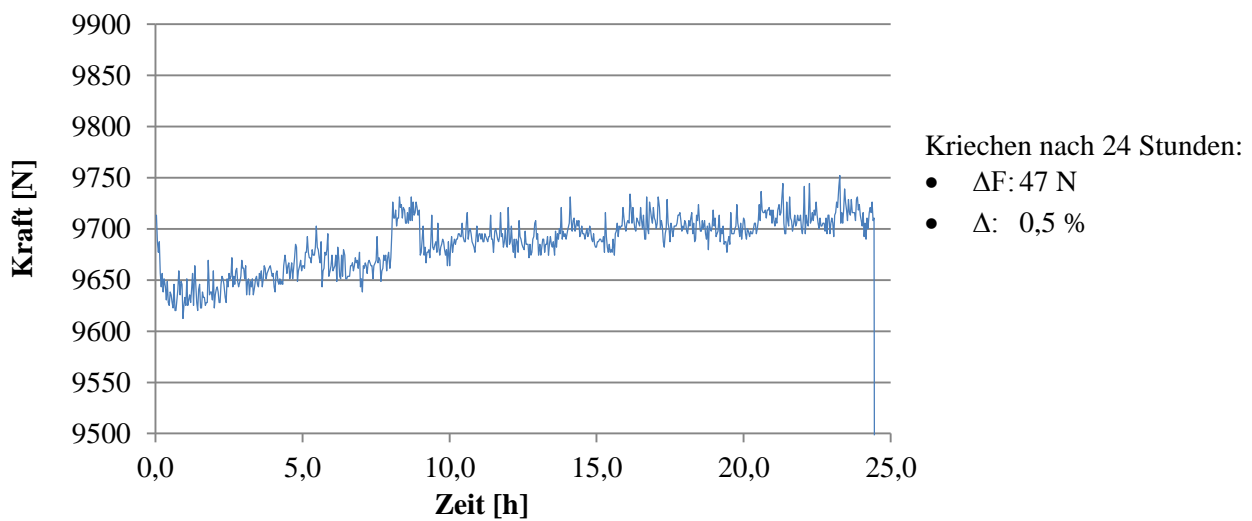


Abbildung 4-26: Kriechverlauf des Purbond CR 421 Klebstoffs [86]

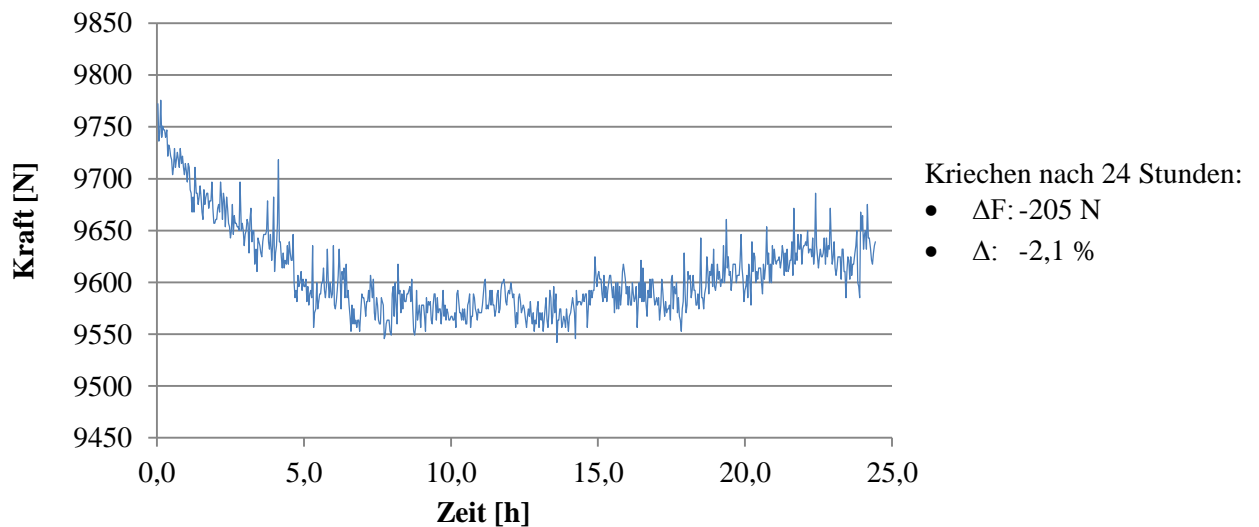


Abbildung 4-27: Kriechverlauf des UHU Plus Endfest 2K-Epoxidharzklebers [87]

### 4-3.3.3 Interpretation der Ergebnisse der Klebstoffversuche

Der unregelmäßige Verlauf der Kraft-Zeit-Linie ist auf ein Rauschen des Messsignals zurückzuführen, welches mit rund 50 N bzw. 0,4 % der Gesamtbelastung vernachlässigbar klein ist. Der Epoxidharzklebstoff der Firma Toolkraft zeigte das größte Kriechverhalten mit ca. 4,5 % nach 24 Stunden. Auch das Beimengen von feinem Quarzsand wirkte sich nicht signifikant auf das Kriechverhalten aus. Ein sehr geringes Kriechverhalten mit nur 0,5 % nach 24 Stunden wiesen die Klebstoffe Hilti HDM 500 und Purbond CR 421 auf (siehe Abbildung 4-24 und Abbildung 4-26). Der Klebstoff der Firma Hilti ist jedoch zähflüssig, somit sind Lufteinschlüsse bei der Einbringung nur schwer auszuschließen. Auch der Klebstoff UHU Plus Endfest ist sehr zähflüssig und nur sehr schwer mit einer Nadel in das Bohrloch einzubringen. Die möglichen Lufteinschlüsse lassen auf das außergewöhnliche Kriechverhalten in der Abbildung 4-27 schließen.

Das beste Ergebnis mit einem Kriechen von 0,4 % nach 24 Stunden lieferte der Klebstoff A2 der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., welcher speziell für die Applizierung von DMS in langen und dünnen Löchern in Bolzen bzw. Schrauben entwickelt wurde. Das Kriechverhalten in den ersten 24 Stunden ist in der Abbildung 4-25 dargestellt. Auch nach drei Tagen wurde ein Kriechen von 0,9 % des Ausgangswertes nicht überschritten. Es lag somit nahe, für die weiteren Prüfserien die DMS mit dem A2-Klebstoff in die Messschrauben einzukleben.

# KAPITEL 5: PRÜFKONFIGURATION ZUR ERFASSUNG VON SPALTKRÄFTEN BEI STABDÜBELVERBINDUNGEN

## 5-1 EINFÜHRUNG

---

Wie in Abschnitt 3-1 dargelegt, wurde die Spaltwirkung von Stabdübelverbindungen in der Vergangenheit mittels diversen bruchmechanischen Modellen (vgl. [6], [7]) untersucht. Mit Hilfe von Verstärkungselementen orthogonal zur Stabdübelachse ist es möglich, das unerwünschte spröde Versagen durch Aufspalten zu vermindern und die Tragfähigkeit der Verbindung zu erhöhen. SCHMID empfiehlt auf Grundlage seiner Untersuchungen in [6] die Verstärkungselemente von Stabdübelverbindungen auf 30 % der berechneten Übertragungskraft je Hauptverbindungsmittel und Scherfuge auszulegen. Diese Regelung wurde auch in diversen Normen wie beispielsweise der ÖNORM B 1995-1-1 [59] übernommen. In der Praxis sorgt die Höhe bzw. der Prozentsatz der anzusetzenden Kraft für Verstärkungsschrauben bei Stabdübelverbindungen für Diskussionen. Um die bruchmechanischen Theorien bzw. den betreffenden Vorschlag zu verifizieren bzw. gegebenenfalls zu modifizieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit diese Thematik in Form von mehreren Versuchs- und Prüfreiheiten experimentell untersucht. Dabei wurden speziell entwickelte Messschrauben für den Holzbau eingesetzt, um die tatsächlich auftretenden Kräfte in Verstärkungsschrauben von Stabdübelverbindungen zu erfassen.

## 5-2 TASTVERSUCHE

---

Um zu untersuchen, ob die Messung von Kräften in Verstärkungsschrauben bei Stabdübelverbindungen mittels Messschrauben plausible Ergebnisse liefert, wurden erneut vorab Tastversuche durchgeführt. Dafür wurden die zuvor kalibrierten Messschrauben MS-04 und MS-05 des Typs ASSY 3.0 Kombi 12x160 mm herangezogen und als Verstärkungselemente eingedreht, um die resultierenden Kräfte in den Schrauben zufolge einer Abscherbeanspruchung der Stabdübelverbindung zu messen.

### 5-2.1 VERSUCHSFIGURATION DER TASTVERSUCHE

Für die Geringhaltung von Aufwand und Kosten für die Tastversuche, wurde versucht bereits vorhandene Prüfeinrichtungen und Schlitzbleche zu verwenden (Abbildung 5-1). Dies hatte zur Folge, dass für den unteren Anschluss der Verbindung ein vergleichsweise dickes Schlitzblech verwendet wurde. Dies erfüllte jedoch Sinn und Zweck der Tastversuche und hatte keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis. Der obere Anschluss mit sechs Stabdübeln ( $d = 12 \text{ mm}$ ) wurde so ausgelegt, dass mit Sicherheit die untere Stabdübelverbindung mit nur einem Dübel ( $d = 20 \text{ mm}$ ) versagt. Die Messschrauben wurden im unteren Anschluss mittig zwischen Stabdübel und belasteten Hirnholzende positioniert und so weit eingedreht, dass sich der Dehnmessstreifen in der Messschraube exakt auf Höhe der Stabdübel befindet, wo eine Bildung des Spaltrisses zu erwarten war.

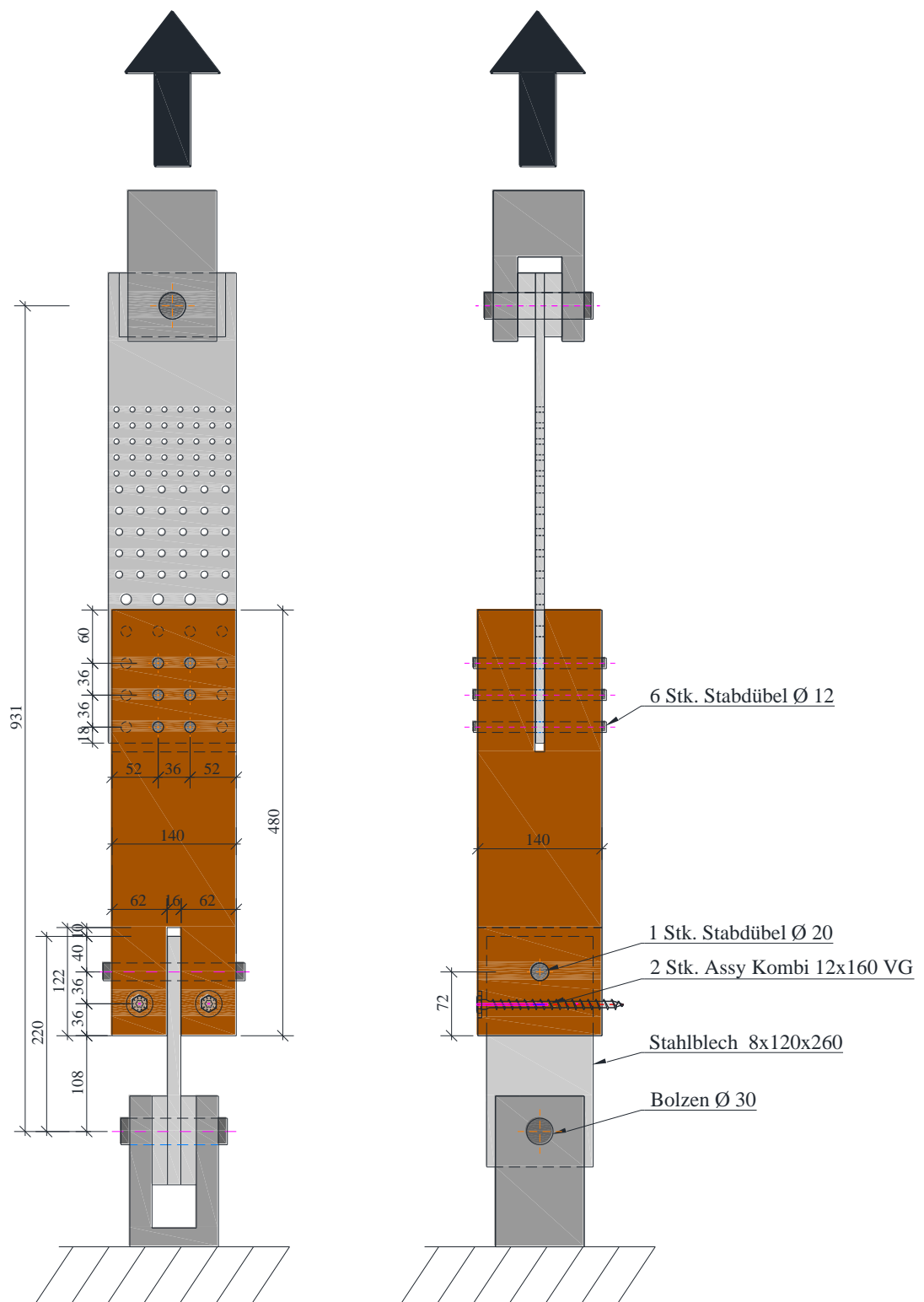


Abbildung 5-1: Versuchskonfiguration für Tastversuche einer mit Messschrauben verstärkten Stabdübelverbindung (Abmessungen in mm)



## 5-2.2 HERSTELLUNG DER PROBEKÖRPER

Für die Tastversuche wurden Probekörper der Festigkeitsklasse C 24, welche bei anderwärtigen Prüfungen übrig blieben, herangezogen und zugeschnitten bzw. vorbereitet. Dadurch waren der erforderliche Schlitz und die Bohrungen für den oberen Anschluss bereits vorhanden. In weiterer Folge wurde der untere Schlitz bzw. die Bohrung für den zu prüfenden Stabdübel  $d = 20$  mm formatiert. Die Probekörper wiesen eine Holzfeuchtigkeit von  $u \sim 12\%$ , eine Rohdichte von  $\delta \sim 430 \text{ kg/m}^3$  und Abmessungen von  $140 \times 140 \times 480$  mm auf. Um das Eindrehen der Messschraube zu erleichtern, wurde mit einem Durchmesser von sieben Millimetern ( $\sim 0,7 \cdot d$ ) vorgebohrt. Das Schlitzblech für den maßgebenden, unteren Stabdübelanschluss hatte eine Dicke von 15 mm. Die genauen Abmessungen der Probekörper inklusive Bohrungen und Schlitz sind in Abbildung 5-2 dargestellt.

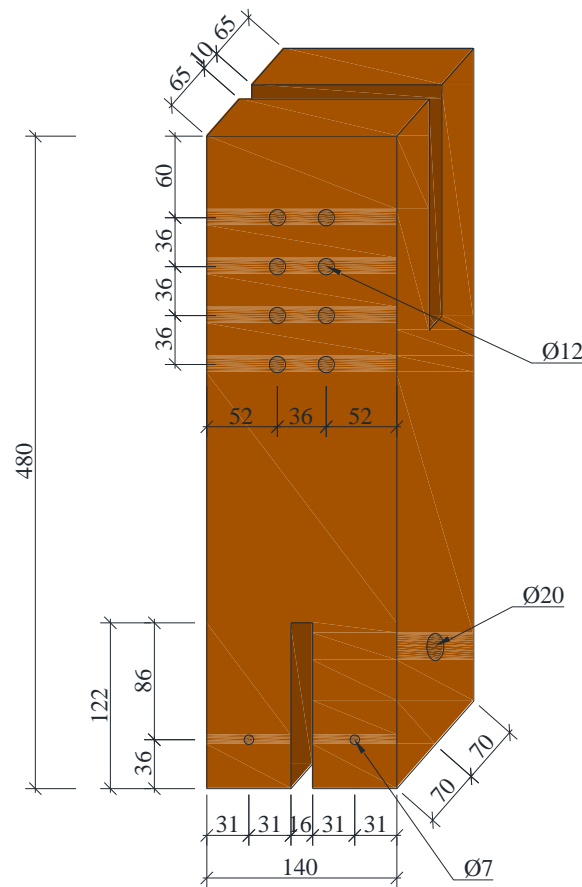


Abbildung 5-2: Probekörper für die Tastversuche einer verstärkten Stabdübelverbindung (Abmessungen in mm)

Insgesamt wurden zwei Tastversuche mit Messschrauben als Verstärkung durchgeführt und als MS-ST-01 und MS-ST-02 bezeichnet. Zuvor wurde ein Versuchskörper mit derselben Stabdübelverbindung, jedoch ohne Verstärkungsschraube geprüft, um die zu erwartende Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung zu ermitteln und zu kontrollieren, ob das angestrebte Spaltversagen auftritt.

### 5-2.3 DURCHFÜHRUNG DER TASTVERSUCHE

Die Tastversuche wurden an der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 am Lignum Test Center des Institutes für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz durchgeführt. Nach dem Einspannen des Probekörpers wurden die Messschrauben MS-04 und MS-05 in die vorgebohrten Löcher eingedreht und an den Messverstärker angeschlossen. Die Messinstrumente zeichneten die Kraft im Messkolben der Universalprüfmaschine und die gemessenen Spannungsänderungen der Messschrauben auf. Zusätzlich wurden die Messwerte aus den Messschrauben mit der jeweiligen Regressionsgeraden hinterlegt, um zeitgleich die Kraft, welche in den Verstärkungsschrauben wirkt, zu ermitteln und grafisch darzustellen. In Abbildung 5-3 ist die Konfiguration der Tastversuche der verstärkten Stabdübelverbindung dargestellt.



Abbildung 5-3: Durchführung der verstärkten Stabdübel-Tastversuche – Versuchskonfiguration

### 5-2.3.1 Versuchsablauf

Die berechnete, und mittels Vorversuch bestätigte, zu erwartende Maximalkraft  $F_{\max,est}$  lag bei etwa 60 kN. Nach dieser zu erwartenden Maximalkraft für die untere Stabdübelverbindung richteten sich der Versuchsablauf bzw. die Einstellungen der Prüfmaschine. Die Belastung erfolgte zuerst mit 12 kN/min auf 40 % von  $F_{\max,est}$  und wurde nach einer Haltezeit von 90 s wieder auf 10 % von  $F_{\max,est}$  verringert. Anschließend erfolgte eine Steigerung der Last bis 70 % der zu erwartenden Maximalkraft mit einer Geschwindigkeit von 12 kN/min. Danach lief die Belastung weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Versagen der Verbindung weiter. Die Haltezeiten von 90 s dienen zur Kontrolle der Messwertstabilität der Messschrauben. In Abbildung 5-4 ist der Belastungsablauf in Form eines Kraft-Zeit-Diagramms dargestellt.

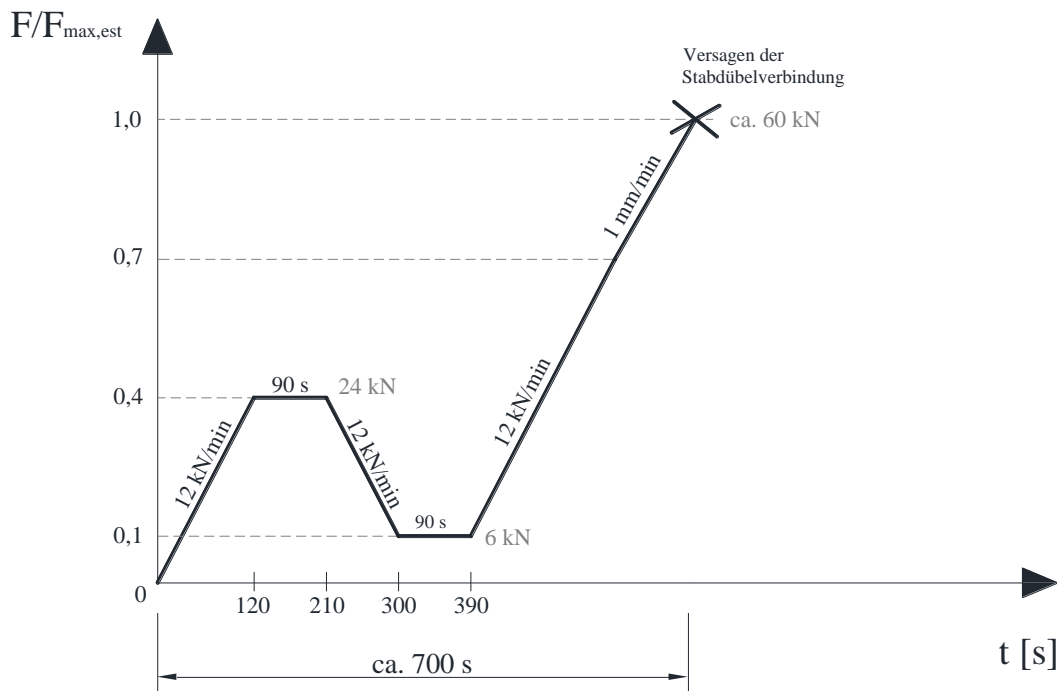


Abbildung 5-4: Tastversuche - Versuchsablauf

## 5-2.4 ERGEBNISSE DER TASTVERSUCHE

Bei einem Vorversuch der Stabdübelverbindung ohne Verstärkungsschrauben wurde ein sprödes Spaltversagen sowie ein später einsetzendes Ausscheren eines Blockes unter dem Stabdübel festgestellt, somit galt die in Abschnitt 5-2.1 erläuterte Versuchskonfiguration als zweckmäßig. Die gemessene Kraft der Universalprüfmaschine entspricht der Kraft im Hauptverbindungsmittel (Stabdübel  $\varnothing$  20 mm), welche in weiterer Folge den aufgezeichneten Kräften der Messschrauben gegenübergestellt und in einem Diagramm abgebildet wurde. Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-7 zeigen die Ergebnisse der beiden Tastversuche der verstärkten Stabdübelverbindung. Für die Kräfte in den Messschrauben wurde rechts im Diagramm eine separate Ordinate skaliert, um die Ergebnisse anschaulicher darzustellen. Zusätzlich sind in den Diagrammen die maximalen Kräfte in den Stabdübelverbindungen sowie die maximalen Kräfte in den Messschrauben mit Bezug zur maximalen Kraft je Stabdübel und Scherfuge angeführt.

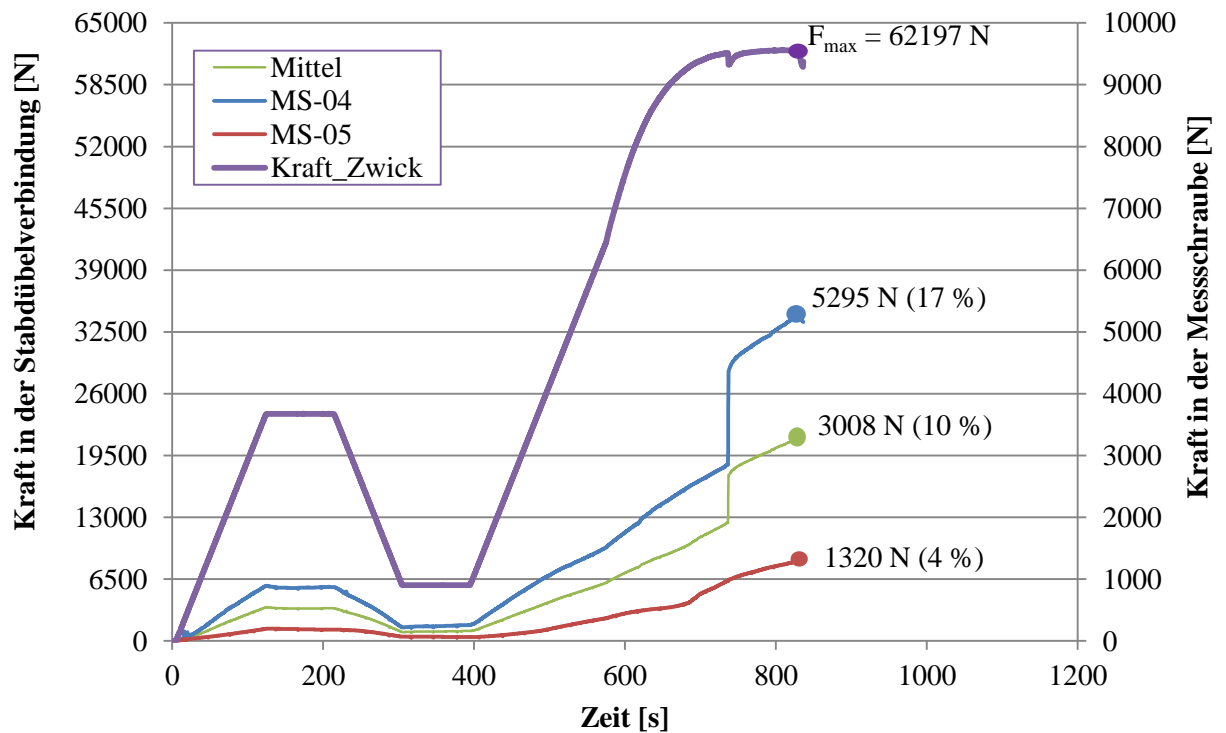


Abbildung 5-5: Tastversuch der verstärkten Stabdübelverbindung MS-ST-01

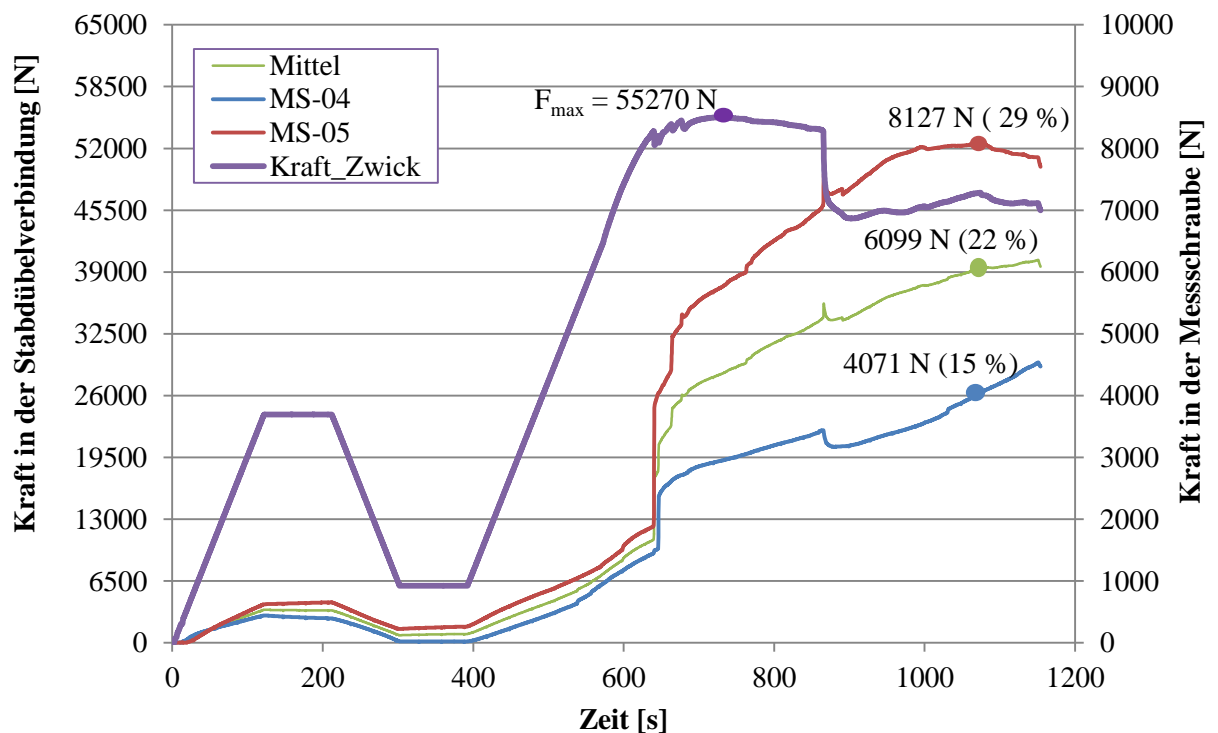


Abbildung 5-6: Tastversuch der verstärkten Stabdübelverbindung MS-ST-02

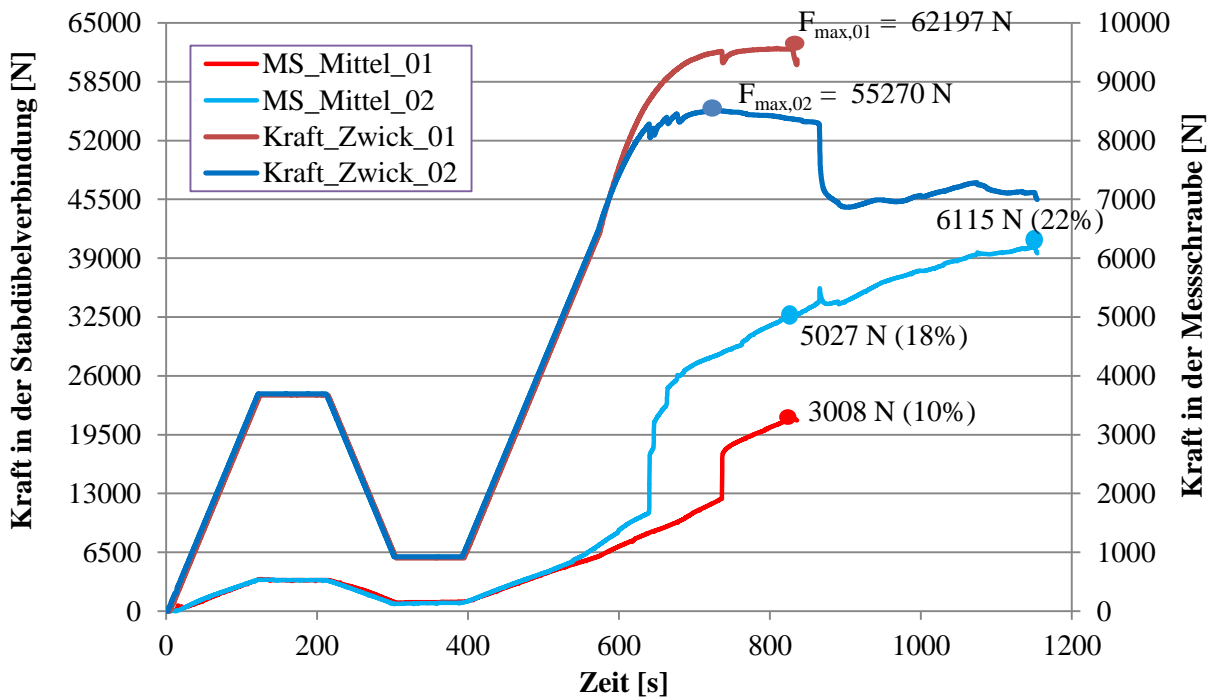


Abbildung 5-7: Tastversuche MS-ST-01 und MS-ST-02 – Mittelwerte

### 5-2.4.1 Bruchbilder

Wie in den Bruchbildern in Abbildung 5-8 deutlich zu erkennen ist, trat bei beiden Versuchen ein faserparalleles Aufspalten und teilweises Abscheren eines Blockes des Holzprobekörpers in Richtung des beanspruchten Hirnholzendes auf. Beide Versagensmechanismen konnten jeweils nur auf einer Seite des Probekörpers beobachtet werden, was sich auch in der unterschiedlichen Größenordnung der gemessenen Kräfte der beiden Messschrauben (Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6) widerspiegelt.



Abbildung 5-8: Bruchbilder der Tastversuche



### 5-2.4.2 Interpretation der Ergebnisse

Wie aus den Diagrammen der Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 ersichtlich wird, ändern sich die Kräfte in den Messschrauben mit den Kräften im Hauptverbindungsmittel proportional. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich beim ersten Anzeichen eines Versagens der Stabdübelverbindung (Spalten) die Kräfte in den Messschrauben schlagartig erhöhen und das Versagen sehr duktil verläuft. Je nachdem auf welcher Seite der Stabdübelverbindung ein Spalten auftritt, erfährt die jeweilige Messschraube einen plötzlichen Kraftanstieg. Die Unterschiede der mittels der Messschrauben MS-04 und MS-05 gemessenen Kräfte lassen sich auf das ungleiche Versagen der beiden Seitenhölzer der Stabdübelverbindung aufgrund von Imperfektionen bzw. unterschiedlichen Rohdichten und Holzmerkmalen zurückführen.

Die charakteristische Tragfähigkeit des Stabdüfels mit einem Durchmesser von 20 mm liegt bei dieser Verbindungskonfiguration bei rund 30 kN. In den Versuchen MS-ST-01 und MS-ST-02 wurden maximale Kräfte von 62 kN bzw. 55 kN erreicht. Der Versuch MS-ST-01 wurde frühzeitig abgebrochen, somit erreichte die Kraft in der Messschraube einen Maximalwert von ca. 8,5 % der Maximalkraft in der Stabdübelverbindung. Beim Versuch MS-ST-02 konnte aufgrund der längeren Versuchszeit eine höhere Kraft im Verstärkungselement erreicht werden. Die höchste Kraft wurde nach eindeutigem Versagen des Stabdüfels in der Messschraube MS-05 gemessen und betrug ca. 15 % im Vergleich zur Kraft im Hauptverbindungsmittel. Werden die ermittelten Kräfte auf die Kraft je Stabdübel und Scherfuge bezogen, wie in SCHMID [6] vorgeschlagen und in der ÖNORM B 1995-1-1 [59] übernommen, beträgt das Verhältnis zur Kraft im Hauptverbindungsmittel maximal 29 %. Dies entspricht in etwa dem in Abschnitt 3-1.3 empfohlenen Wert nach [6] für die Auslegung der Verstärkungselemente.

Im Diagramm der Abbildung 5-7 wurden die Mittelwerte der beiden Messschrauben-Kräfte des jeweiligen Versuchs MS-ST-01 und MS-ST-02 überlagert und im Vergleich zu den jeweiligen Belastungskurven der Stabdübel dargestellt. Bis zum ersten Anzeichen vom Versagen der Stabdübelverbindung verlaufen die beiden Kurven annähernd gleich und weisen ein beachtlich konstantes Verhältnis von 2 % zur Belastungskurve auf. Erst beim Eintreten eines Versagens der Stabdübelverbindung weichen die Mittelwert-Kurven der Messschrauben signifikant voneinander ab.

Im linken Bild der Abbildung 5-8 ist deutlich zu erkennen, dass die unverstärkte Stabdübelverbindung des Vorversuchs durch Spalten und anschließendes Ausscheren eines Blockes versagte. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass das Spalt- bzw. Blockscherversagen von der Jahrringlage beeinflusst wird. Der Bruch trat jeweils auf der Seite ein, auf welcher die Jahrringe eher tangential zum Stabdübel ausgerichtet waren. Auf diese Tatsache wird in Abschnitt 6-1.3 näher eingegangen.

Die Ergebnisse dieser Tastversuche zeigen, dass die Messschrauben sehr gut geeignet sind, um die Kräfte in den Verstärkungselementen einer Stabdübelverbindung zu ermitteln. Folglich wurde die Herstellung von neuen Messschrauben unter Laborbedingungen und eine weitere, aussagekräftige Prüfserie (Hauptprüfungen) für verstärkte Stabdübelverbindungen unter Variation verschiedener Einflussparameter geplant (Abschnitt 5-3).

## 5-3 PRÜFPLANUNG

### 5-3.1 ERMITTLUNG DER OPTIMALEN PRÜFKONFIGURATION – VERGLEICH VON BRUCHMECHANISCHEN MODELLEN

Um die maximale Kraft in den Verstärkungselementen von Stabdübelverbindungen zu ermitteln, ist es notwendig, die ungünstigste Konfiguration einer Stabdübelverbindung in Hinblick auf das Spaltverhalten zu finden. SCHMID [6] gibt an, dass sich die ungünstigsten Verhältnisse für die Grenزشlankheit der Versagensfälle 1a und 2 nach Johansens Modell [49] bei einer einschnittigen Verbindung mit einem dünnen Stahlblech ergeben. In Abbildung 5-9 sind die unterschiedlichen Versagensmechanismen nach Johansens Theorie dargestellt.

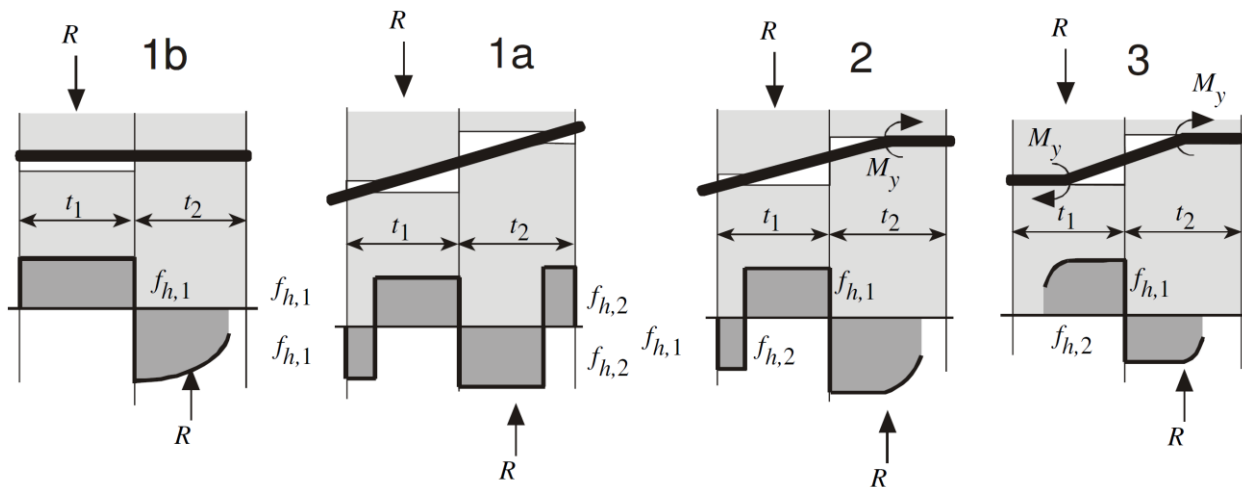


Abbildung 5-9: Versagensmechanismen nach Johansens Theorie, aus [6]

Das Verhältnis der Kraft in der Verstärkungsschraube zur Kraft im Stabdübel je Scherfuge ist laut SCHMID [6] unabhängig vom Durchmesser des Stabdübels. Da die Prüfung einer einschnittigen Verbindung aufgrund der exzentrischen Beanspruchung nur unter Aufwand zu realisieren ist, wurde der betreffende Grenzfall eines reinen Lochleibungsversagens und einer Fließmomentenbildung im Stabdübel für eine zweischnittige Holz-Stahlblech-Holz Verbindung ermittelt, welche in weiterer Folge geprüft werden sollte. Zusätzlich wurden die Kragarmmodelle von SCHMID [6] und BEJTKA [7] mittels einer computerunterstützten Berechnung mit der Softwareapplikation RSTAB untersucht, sodass auf die ungünstigste Prüfkongfiguration geschlossen werden konnte.

Für Stellen an denen das Holz nicht gerissen ist, wurde für die statische Berechnung eine gefederte Bettung des Kragarms modelliert, welche den Zusammenhalt des Holzes simuliert. Hierfür wurde die Bettungszahl  $K_{\text{Bettung}}$  in Anlehnung an SCHMID [6] wie folgt ermittelt:

$$K_{\text{Bettung}} = \frac{32}{13} \cdot \frac{E_{90} \cdot t}{h} \quad (5.1)$$

mit:	$K_{\text{Bettung}}$ ...	Bettungszahl [kN/mm <sup>2</sup> ]
	$E_{90}$ ...	Elastizitätsmodul quer zur Holzfaserrichtung [N/mm <sup>2</sup> ]
	$t$ ...	Holzdicke bzw. Breite des Kragarms [mm]
	$h$ ...	Höhe des Kragarms [mm]

Um die Eignung der betreffenden Modelle zur Bestimmung der für die Hauptserie maßgebenden Prüfkongfiguration zu überprüfen, wurden damit in einem ersten Schritt die Kräfte in den Verstärkungselementen des für die Tastversuche gewählten Stabdübelanschlusses bestimmt und den gemessenen Werten gegenübergestellt.



### 5-3.1.1 Modellierung der Tastversuche

Für die Tastversuche MS-ST-01 und MS-ST-02 wurde in der Softwareapplikation RSTAB ein Kragarmmodell mit den Querschnittsabmessungen  $b = 62 \text{ mm}$  und  $h = 70 \text{ mm}$  sowie den Kenngrößen der Festigkeitsklasse C24 ( $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{t,k} = 14 \text{ N/mm}^2$ ) erstellt. Es wurde anhand der Abmessungen der Probekörper nach Abbildung 5-2 mittels der Gleichung (5.1) (mit  $E_{90} = 400 \text{ N/mm}^2$ ,  $t = 62 \text{ mm}$  und  $h = 70 \text{ mm}$ ) eine Bettungszahl von  $K_{\text{Bettung}} = 872 \text{ N/mm}^2$  errechnet. Die Steifigkeit bzw. der Verschiebungsmodul  $K_{\text{ser}}$  der eingesetzten Messschrauben wurde mittels Gleichung (5.2) nach RINGHOFER et al. [88] ermittelt.

$$K_{\text{ser}} = 24,7 \cdot \rho^{0,75} \cdot d^{-1,7} \cdot l_{\text{ef}}^{-0,6} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{\text{ef}} \quad (5.2)$$

mit:	$K_{\text{ser}}$	...	Federsteifigkeit [kN/mm]
	$\rho$	...	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
	$d$	...	Außendurchmesser der Schraube [mm]
	$l_{\text{ef}}$	...	effektive Einschraublänge der Schraube in das Holz [mm]

Für die Modellierung des Tastversuchs errechnet sich laut Gleichung (5.2) (mit  $\rho = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $d = 12 \text{ mm}$  und  $l_{\text{ef}} = 70 \text{ mm}$ ) eine Steifigkeit von  $K_{\text{ser}} = 7040 \text{ N/mm}$ . Die ermittelte mittlere Tragfähigkeit je Stabdübel ( $d = 24 \text{ mm}$ ) und Scherfuge beträgt in Anlehnung an die Johansen Theorie [49] rund 30 kN. Folglich ergibt sich für das Kragarmmodell ein zusätzliches Moment von  $M = 1,05 \text{ kNm}$  ( $M = F/2 \cdot h/4$ ) und eine Querkraft von  $V = 8,6 \text{ kN}$  ( $V = F/7$ ), wobei  $F = 60 \text{ kN}$  und  $h = 0,14 \text{ m}$  in der Berechnung berücksichtigt wurden. Mit diesen Parametern wurde die Kraft in der Verstärkungsschraube für ein vollständig gebettetes Modell, für ein gerissenes Modell nach BEJTKA [7] und für ein Modell mit starrem Verstärkungselement nach SCHMID [6] berechnet. In Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 sind die Ergebnisse der untersuchten Modelle der Tastversuche dargestellt, wobei die maximale Kraft im Verstärkungselement und das Verhältnis zur Kraft je Stabdübel und Scherfuge angeführt wird. Der Abstand des Stabdübel zum Hirnholzende betrug 72 mm und der Abstand der Verstärkungsschraube zum Stabdübel 36 mm. In den nachfolgenden Kragarmmodellen (Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-16) sind die Stabdübel jeweils mit einem blauen Punkt und die Verstärkungsschrauben durch rote Federn bzw. verschiebliche Auflager gekennzeichnet.

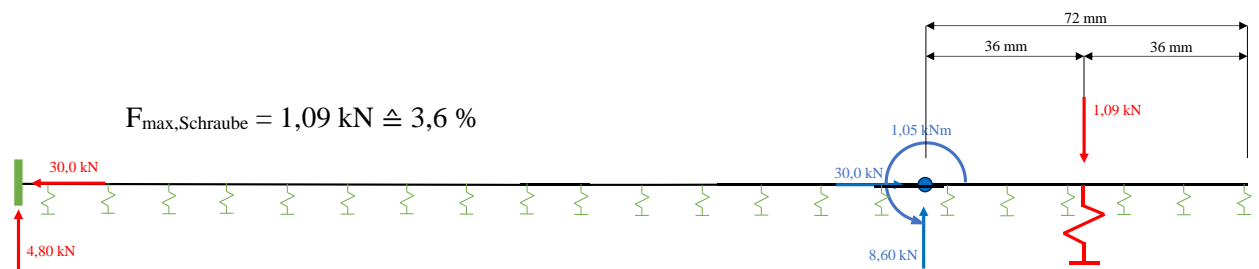


Abbildung 5-10: Bruchmechanisches Modell für den Tastversuch – nicht gerissen, vollständig gebettet

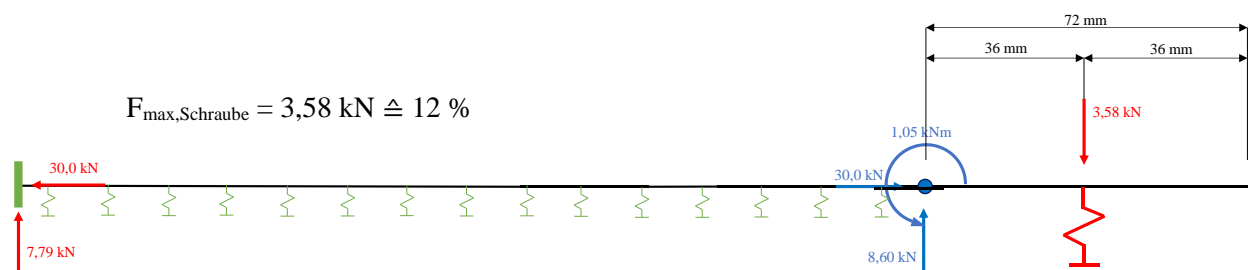


Abbildung 5-11: Bruchmechanisches Modell für den Tastversuch – aufgerissen nach BEJTKA [7]

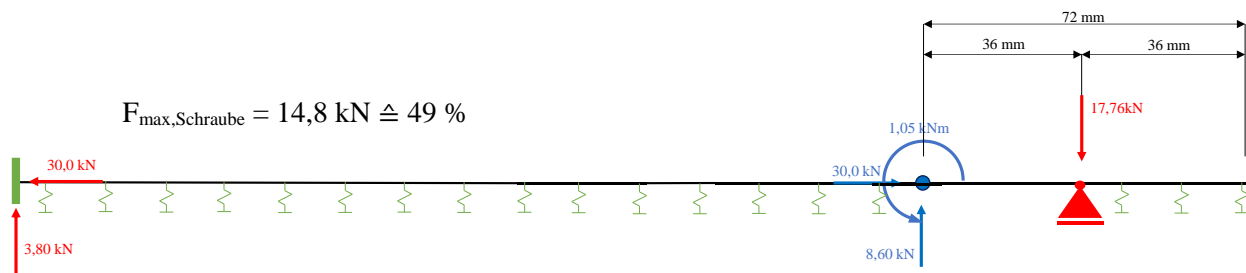


Abbildung 5-12: Bruchmechanisches Modell für den Tastversuch – nach SCHMID [6]

In Abbildung 5-10 ist das bruchmechanische Modell des Tastversuches MS-ST-01 dargestellt, wobei angenommen wurde, dass der Prüfkörper nicht gerissen ist. Die ermittelte Kraft in der Verstärkungsschraube beträgt 3,6 % im Verhältnis zur Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge. Dieses Ergebnis zeigt eine hervorragende Übereinstimmung zur gemessenen Kraft bei den Tastversuchen, wobei der gemessene Verstärkungsanteil im ungerissenen Zustand rund 4% der übertragenen Stabdübelkraft je Scherfuge beträgt, wie in der Abbildung 5-7 zu erkennen ist.

Die Modellierung nach BEJTKA [7] im gerissenen Zustand mit einem „weichen“ Verstärkungselement, welche in Abbildung 5-11 dargestellt ist, ergibt einen Verstärkungsanteil von rund 12% der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge. Auch dieses Modell stimmt gut mit den Ergebnissen der durchgeführten Tastversuchen überein, da auch dort ein durchgehender Riss ab dem Stabdübel entstand und die Messschraube als verstärkende Feder wirkte. Bei Tastversuch MS-ST-01 (Abbildung 5-5) beispielsweise betrug die Kraft im Verstärkungselement rund 14 % im Verhältnis zur Kraft im Stabdübel je Scherfuge, wobei der Wert nach dem Einreißen herangezogen wird. Zu diesem Zeitpunkt hat der Stabdübel noch keine große Verschiebung erfahren, somit ist das Kragarmmodell (Abbildung 5-11) mit dem Tastversuch (Abbildung 5-5) vergleichbar.

Das mechanische Bruchmodell des Tastversuchs nach SCHMID [6] ist in Abbildung 5-12 dargestellt. Dieses Modell lässt sich jedoch nicht auf die durchgeführten Tastversuche übertragen, da im Modell eine steife Verstärkung angenommen wird und der Kragarm nach dem Verstärkungselement wieder gebettet ist. Somit ergibt die statische Berechnung einen Wert von 49 % für die Verstärkungsschraube im Verhältnis zur übertragenen Stabdübelkraft je Scherfuge. Dieser Wert ist im Vergleich zu den durchgeführten Tastversuchen deutlich zu hoch und stimmt nicht mit den gemessenen Werten überein.

### 5-3.1.2 Modellierung einer einreihigen Stabdübelverbindung mit $n = 5$

Neben der Modellierung der Tastversuche mit einem Stabdübel und einer Verstärkungsschraube wurde auch eine einreihige, zweischnittige Stabdübelverbindung mit  $n = 5$  Stabdübel hintereinander in Faserrichtung und einem Dübeldurchmesser von  $d = 16$  mm in Form eines Kragarms modelliert. Hinter jedem Stabdübel wurden im Abstand von  $a_1/2 = 40$  mm eine Verstärkungsschraube mit der in Abschnitt 5-3.1.1 ermittelten Steifigkeit  $K_{ser} = 7040$  N/mm angesetzt. Für dieses Kragarmmodell wurde der Grenzfall der Versagensmechanismen 1b und 2 nach der Johansen Theorie (siehe Abbildung 5-9) ermittelt und die Stabdübel in den Mindestabständen in Faserrichtung ( $a_1 = 5d = 80$  mm) zueinander angeordnet. Daraus folgen für den Kragarm die Abmessungen  $t = 45$  mm und  $h = 80$  mm. Die zu erwartende mittlere übertragbare Kraft je Stabdübel und Scherfuge beträgt nach Gleichung (6.4) mit  $\rho_{mean} = 430$  kg/m<sup>3</sup> und  $M_{y,mean} = 480$  Nm (Edelstahl-Stabdübel) rund 21,3 kN. Für das Kragarmmodell ergibt sich ein zusätzliches Moment  $M = 0,852$  kNm ( $M = F/2 \cdot h/4$ ) und eine Querkraft  $V = 6,09$  kN ( $V = F/7$ ), wobei  $F = 42,6$  kN und  $h = 0,16$  m. Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-16 zeigen folglich die Ergebnisse der bruchmechanischen Modellberechnungen einer einreihigen Verbindung mit fünf Stabdübel.

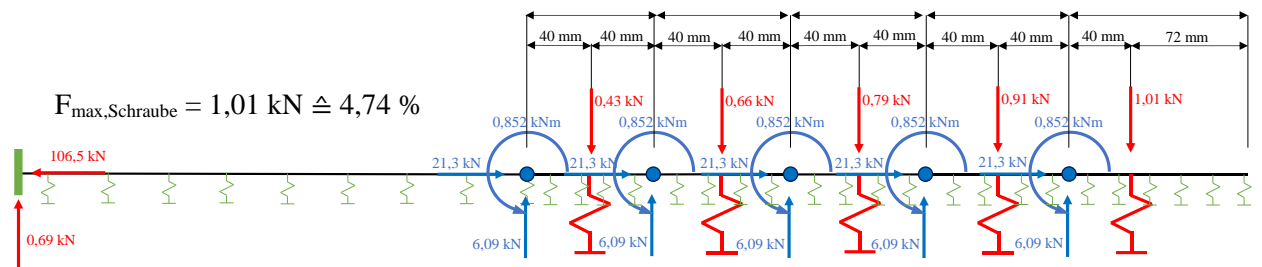


Abbildung 5-13: Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit  $n = 5$  – nicht gerissen, vollständig gebettet

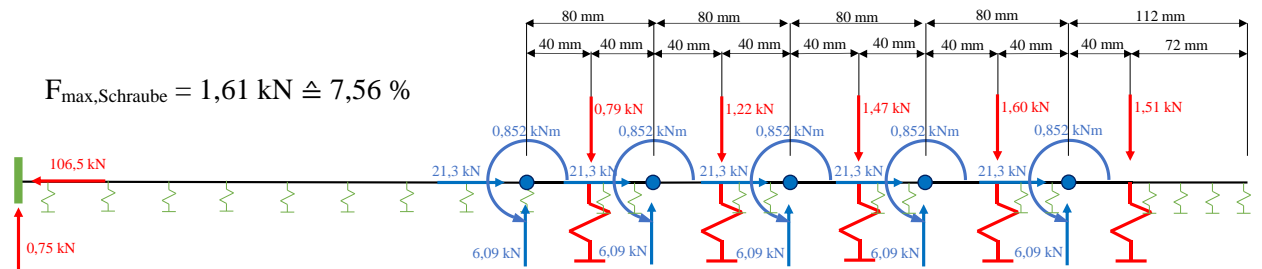


Abbildung 5-14: Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit  $n = 5$  – bis zur Schraube aufgerissen

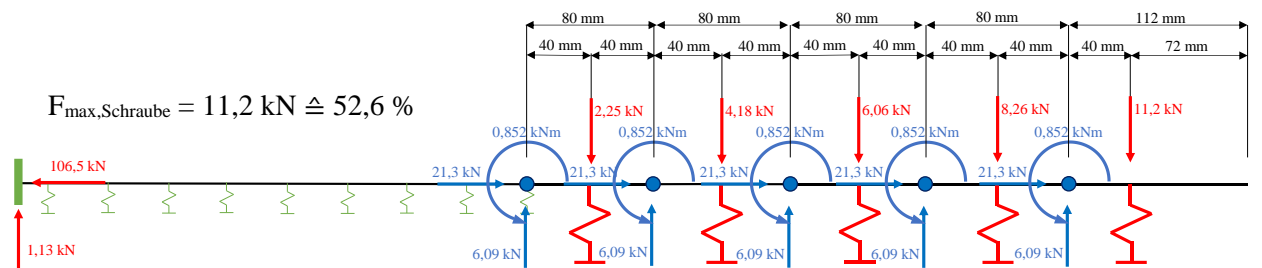


Abbildung 5-15: Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit  $n = 5$  – aufgerissen nach BEJTKA [7]

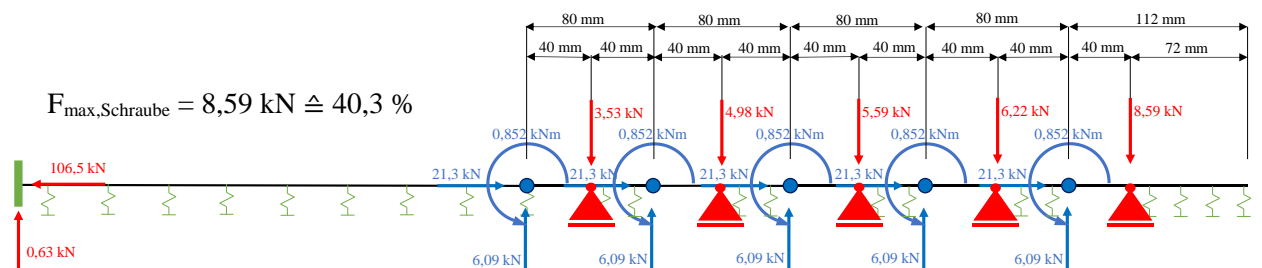


Abbildung 5-16: Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit  $n = 5$  – nach SCHMID [6]

Im ungerissenen Zustand ist die letzte Verstärkungsschraube zwischen Hirnholzende und Stabdübel am höchsten beansprucht. Die Kraft beträgt im vollständig gebetteten Zustand jedoch nur 4,7 % im Verhältnis zur Kraft je Stabdübel und Scherfuge (Abbildung 5-13). Wird angenommen, dass jeweils ein Riss vom Stabdübel bis zur Verstärkungsschraube entsteht, so beträgt der maximale Kraftanteil im Verstärkungselement 7,6 %. Dieses Modell ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Bei der Modellierung nach BEJTKA [7] wird angenommen, dass das Holz vom letzten Stabdübel bis zum Hirnholzende komplett durchreißt. Wie in Abbildung 5-15 zu erkennen ist, entstehen dabei sehr hohe Kräfte in der letzten Verstärkungsschraube. Der Kraftanteil im Verstärkungselement beträgt hierbei 52,6 %. Auch beim Modell nach SCHMID [6] entstehen Kräfte bis zu 40,3 % der Stabdübelkraft je Scherfuge in der Verstärkungsschraube. Dieses Modell berücksichtigt jedoch nicht die Nachgiebigkeit der Schrauben.

Die beiden letzten Modelle ergeben vergleichsweise große Kräfte im letzten Verstärkungselement. Welches Modell bzw. welcher Versagensmechanismus sich tatsächlich einstellt, sollte in weiterer Folge mithilfe verschiedener Prüfserien festgestellt und somit die tatsächlich auftretende Kraft im Verstärkungselement bestimmt werden.

### 5-3.1.3 Wahl von geeigneten Prüfkonfigurationen

Auf Grundlage der Ergebnisse der Arbeiten von SCHMID [6] und BEJTKA [7] und der Anwendung der Kragarmmodelle in Abschnitt 5-3.1.2 wurden folgende Prüfkonfigurationen getestet:

- Verbindung mit einem gewöhnlichen Stabdübel der Güte S235,  $\varnothing$  16 mm und Holzabmessungen von 100 x 160 mm
- Verbindung mit einem Edelstahl-Stabdübel  $\varnothing$  16 mm und Holzabmessungen von 100 x 160 mm
- Verbindung mit einem Edelstahl-Stabdübel  $\varnothing$  20 mm und Holzabmessungen von 100 x 160 mm
- einreihige Edelstahl-Stabdübelverbindung  $\varnothing$  16 mm mit  $n = 5$  Verbindungsmittel in Faserrichtung hintereinander und Holzabmessungen von 100 x 160 mm
- Edelstahl-Stabdübelverbindungen  $\varnothing$  16 mm mit zwei Reihen und zwei Spalten ( $n = 2$  und  $m = 2$ ) und Holzabmessungen von 100 x 160 mm

Es handelt sich dabei um zweiseitige Holz-Stahlblech-Holz Stabdübelverbindungen, wobei zu beachten war, dass die Grenزشlankheit der Versagensfälle 1b und 2 nach der Johansen Theorie erreicht wird. Das bedeutet, die Abmessungen wurden so gewählt, dass sich der Versagensfall im Übergangsbereich zwischen reinem Lochleibungsversagen und Fließmomentenbildung im Stabdübel befindet. Diese Grenزشlankheit konnte aufgrund des hohen mittleren Fließmomentes der Edelstahl-Stabdübel, welches in Vorversuchen ermittelt wurde, und einer Seitenholzdicke von 45 mm erreicht werden, ohne, dass ein Versagen des Nettoquerschnitts eintritt. Um den ungünstigsten Fall in Bezug auf die Spaltwirkung der Stabdübelverbindung abzubilden, wurden Edelstahl-Stabdübel gewählt, da diese sehr glatt sind und der Einfluss der Reibung minimal wird. Zusätzlich erfolgte eine Erhöhung der Gleitwirkung, indem die Edelstahl-Stabdübel mit einem Silikonspray eingesprüht wurden. Damit ein Vergleich der Spaltwirkung zwischen verschiedenen Stabdübelgüten angestellt werden kann, wurde zusätzlich zu den Edelstahl-Stabdübel-Prüfungen auch eine Prüfserie mit S235-Stabdübel bei gleichen Randbedingungen geprüft. Außerdem wurde eine Prüfserie bei gleichen Randbedingungen und einem Stabdübel Durchmesser von  $d = 20$  mm geprüft, um den Einfluss des Stabdübel Durchmessers zu untersuchen. Zusätzlich zu den Prüfserien mit einer Stabdübelreihe wurde auch eine Serie von verstärkten Stabdübelverbindungen mit zwei Reihen geprüft, um etwaige diesbezügliche Auswirkungen auf die resultierende Verstärkungskraft zu überprüfen. Alle Prüfserien und deren Prüfkörperabmessungen sind Tabelle 5-1 angeführt.

### 5-3.2 BEZEICHNUNG UND ANZAHL DER PRÜFKÖRPER

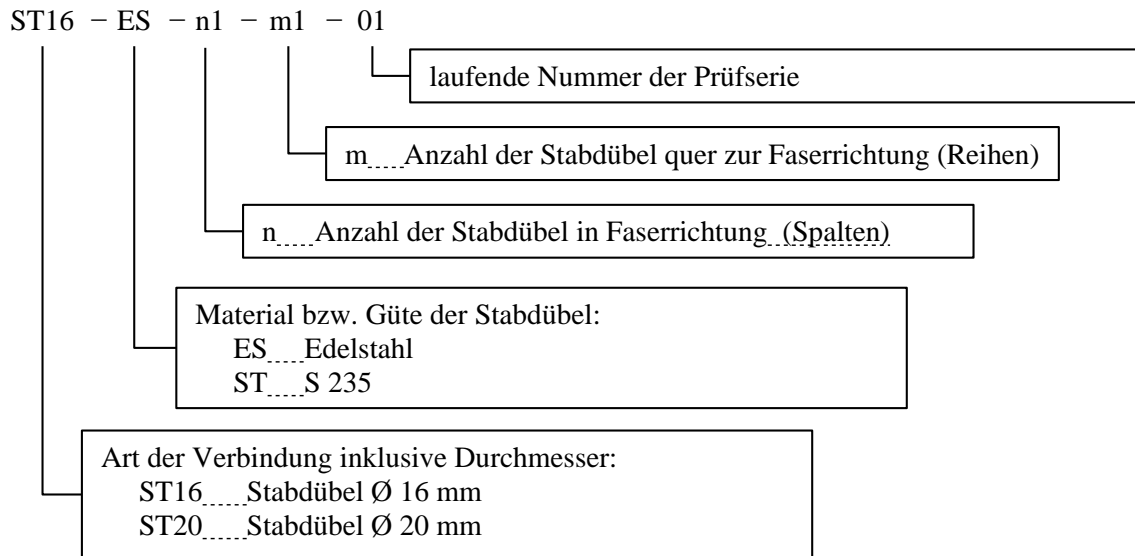


Abbildung 5-17: Bezeichnung der Prüfkörper

In Tabelle 5-1 sind die Prüfserien aufgelistet und die Abmessungen der zugehörigen Prüfkörper angeführt.

Tabelle 5-1: Benennung, Anzahl und Abmessungen der Prüfkörper der Prüfserien 1 bis 5

Prüfserien Nr.	Benennung	Anzahl n [-]	Länge l [mm]	Breite b [mm]	Höhe h [mm]
1	ST16-ST-n1-m1-xx	5	750	100	160
2	ST16-ES-n1-m1-xx	5	750	100	160
3	ST20-ES-n1-m1-xx	5	750	100	160
4	ST16-ES-n5-m1-xx	5	1000	100	160
5	ST16-ES-n2-m2-xx	5	1000	100	160

### 5-3.3 PRÜFVORBEREITUNG

Die Ermittlung der zu erwartenden Maximalkraft  $F_{\max,est}$  erfolgte auf Grundlage der Tastversuche und bekannter Ergebnisse aus Edelstahl-Stabdübel-Prüfungen. Es wurden die mittleren Tragfähigkeiten der Stabdübelverbindungen in Anlehnung an die Johansen Theorie [49] berechnet, wobei für die Rohdichte des Holzes und für das Fließmoment der Edelstahl-Stabdübel der aus Vorversuchen bekannte Mittelwert eingesetzt wurde. Es erfolgte eine zusätzliche Überprüfung der Ergebnisse mittels weiteren Vorversuchen.

Neben der Ermittlung der zu erwartenden Höchstlast, wurden für jede Prüfserie ein Nettoquerschnittsnachweis des Holzes der Güte GL24h und des Stahlblechs der Güte S235 sowie ein Lochleibungsnachweis für das Schlitzblech durchgeführt, um ein unerwünschtes Versagen zu verhindern. Die Nachweise wurden auf Basis der charakteristischen Tragfähigkeiten von Holz (GL24h) und Stahl (S235) geführt, wobei diese mit  $f_{t,0,k} = 16,5 \text{ N/mm}^2$  und  $f_{y,k} = 235 \text{ N/mm}^2$  angenommen wurden. Zusätzlich musste darauf geachtet werden, dass die maximalen Abmessungen und Höchstlasten die Möglichkeiten der Prüfmaschine (275 kN) nicht überschreiten. Die jeweiligen Nachweise sind in zugehörigen Skizzen der Prüfkonfigurationen in Abbildung 5-18 bis Abbildung 5-21 angeführt.

### 5-3.4 PRÜFKONFIGURATION UND PRÜFKONZEPT

Die Stabdübel wurden in Faserrichtung mit den Mindestabständen nach ÖNORM B1995-1-1:2014 [59] angeordnet. Wobei der Abstand der Stabdübel untereinander in Faserrichtung  $a_1 = 5d$ , der Abstand zum beanspruchten Hirnholzende  $a_{3,t} = 7d$  und der Abstand der Stabdübel untereinander rechtwinkelig zur Faserrichtung  $a_2 = 3d$  betrug. Zum unbeanspruchten Rand quer zur Faserrichtung wurden die Stabdübel ( $d = 16 \text{ mm}$ ) mit einem minimalen Abstand von  $a_{4,c} = 53,3 \text{ mm}$  angeordnet, somit ist der Mindestabstand von  $3d = 48 \text{ mm}$  eingehalten. Die Messschraube als Verstärkungselement wurde jeweils im Abstand von  $a_1/2$  zum Stabdübel eingedreht. Der Abstand des Verstärkungselements zum Stabdübel betrug  $50 \text{ mm}$  bei der Prüfserie ST20-ES-n1-m1 und  $40 \text{ mm}$  bei den restlichen Prüfserien. Die zu prüfende Stabdübelverbindung wurde im Prüfaufbau immer unten angeordnet. Der obere Anschluss wurde überdimensioniert ausgeführt und zusätzlich mit Schrauben gegen Aufspalten verstärkt, um ein garantiertes Versagen des unteren Anschlusses zu gewährleisten und somit die maximale Kraft in den Verstärkungsschrauben (Messschrauben) zu ermitteln. Die Prüfkörper, Schlitzbleche sowie die Messschrauben wurden in der Werkstatt bzw. im Labor des Instituts für Holzbau und Holztechnologie hergestellt.

In den Abschnitten 5-3.4.1 bis 5-3.4.4 sind die Prüfkfigurationen aller Prüfserien grafisch dargestellt und mit den betreffenden Abmessungen versehen. Zusätzlich sind jeweils die zu erwartende Maximalkraft und die Ergebnisse der Nachweise aus der Prüfplanung angeführt.

### 5-3.4.1 Prüfsérie ST16-ST-n1-m1

Errechnete Tragfähigkeit der zu prüfenden Stabdübelverbindung:  $F_{\max,est} = 32,0 \text{ kN}$

Nachweise:

- Nettoquerschnitt Holz: 216 kN > 32,0 kN ✓
- Nettoquerschnitt Stahlblech: 212 kN > 32,0 kN ✓
- Lochleibung Stahlblech: 62,0 kN > 32,0 kN ✓

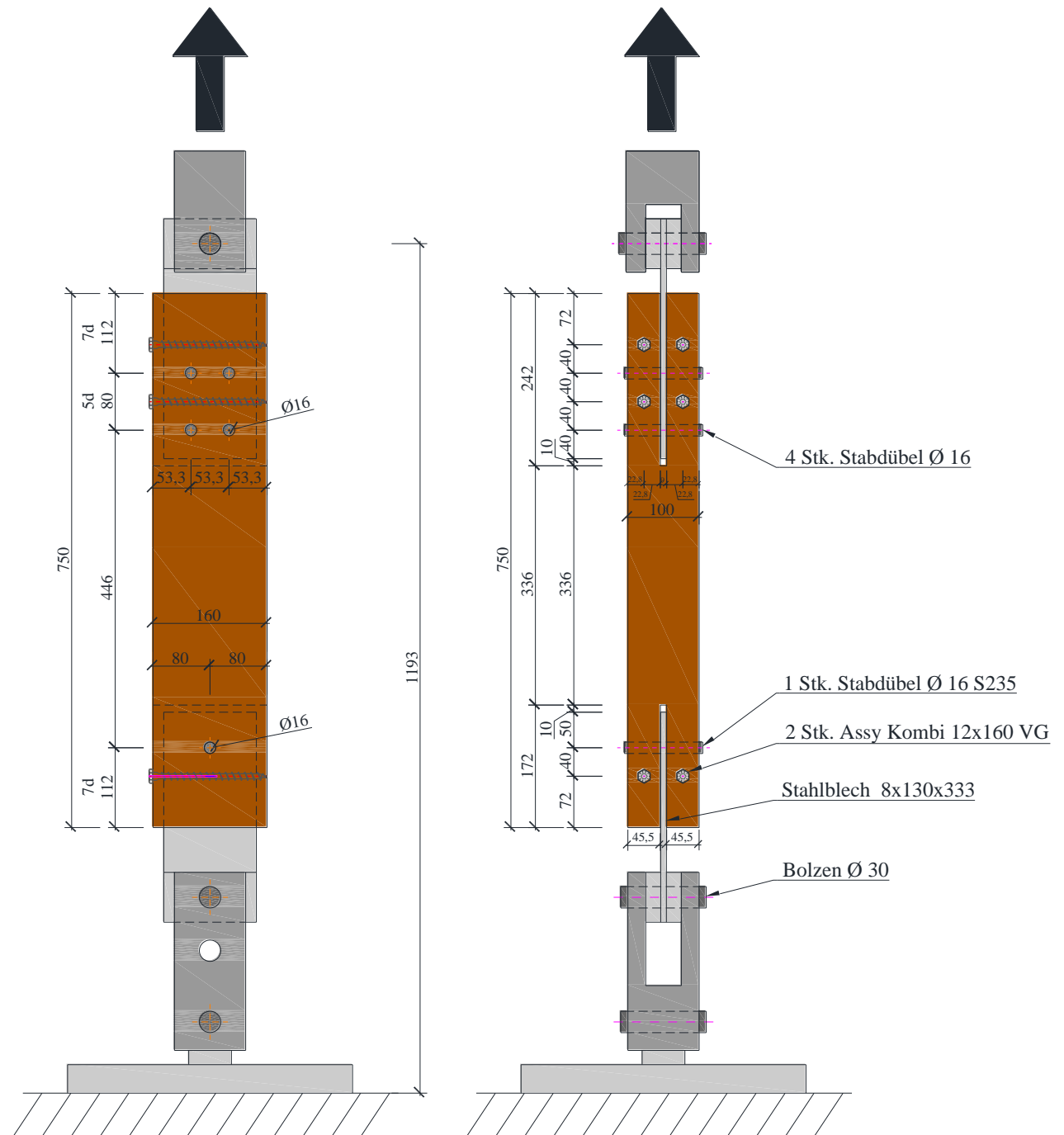


Abbildung 5-18: Prüfkfiguration der Prüfsérie ST16-ST-n1-m1 (Abmessungen in mm)



### 5-3.4.2 Prüfserie ST16-ES-n1-m1

Errechnete Tragfähigkeit der zu prüfenden Stabdübelverbindung:  $F_{\max,est} = 42,0 \text{ kN}$

Nachweise:

- Nettoquerschnitt Holz: 216 kN > 42,0 kN ✓
- Nettoquerschnitt Stahlblech: 212 kN > 42,0 kN ✓
- Lochleibung Stahlblech: 62,0 kN > 42,0 kN ✓

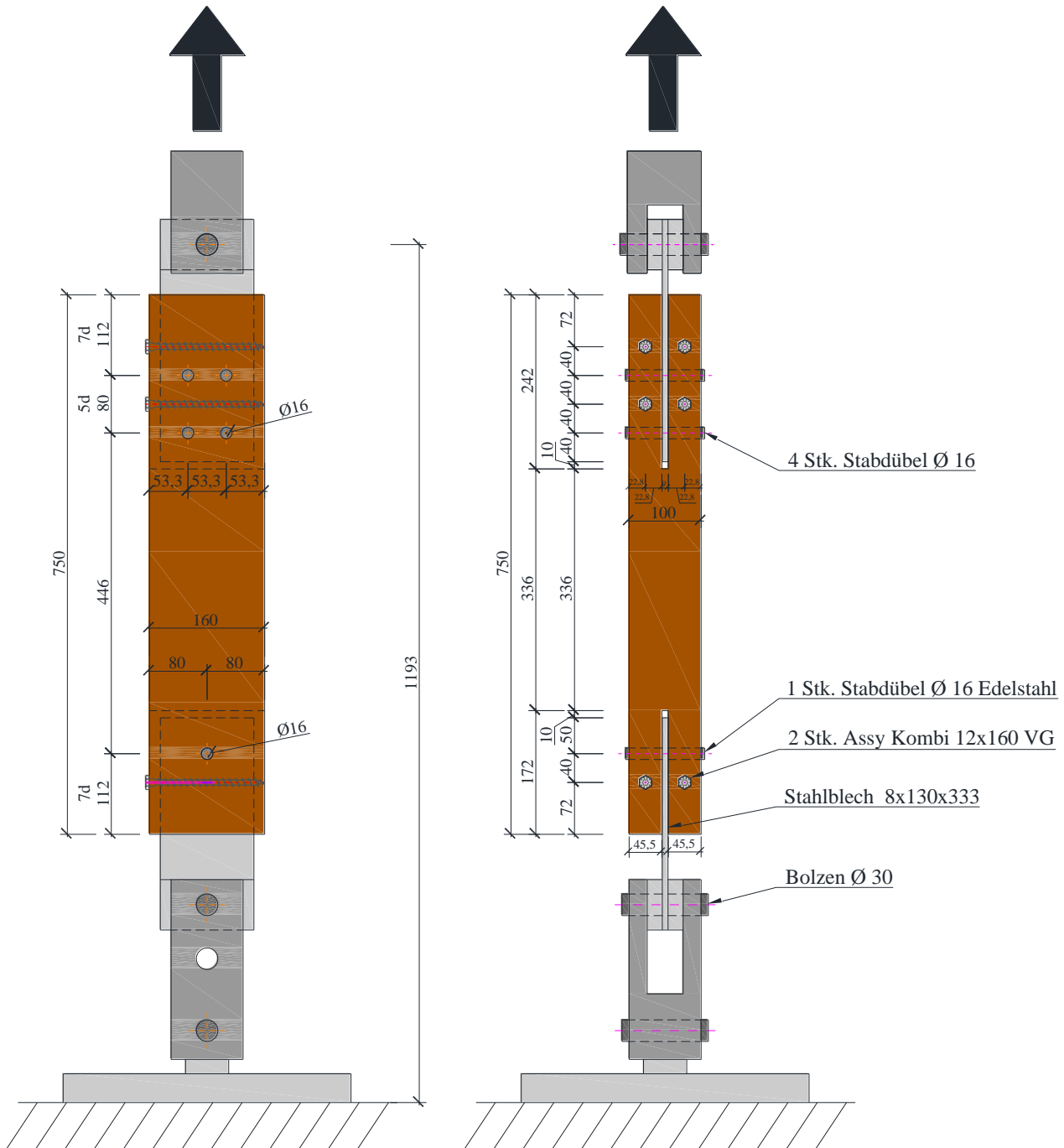


Abbildung 5-19: Prüfkfiguration der Prüfserie ST16-ES-n1-m1 (Abmessungen in mm)

### 5-3.4.3 Prüfsreihe ST20-ES-n1-m1

Errechnete Tragfähigkeit der zu prüfenden Stabdübelverbindung:  $F_{\max,est} = 50,4 \text{ kN}$

Nachweise:

- Nettoquerschnitt Holz: 245 kN > 50,4 kN ✓
- Nettoquerschnitt Stahlblech: 205 kN > 50,4 kN ✓
- Lochleibung Stahlblech: 79,0 kN > 50,4 kN ✓

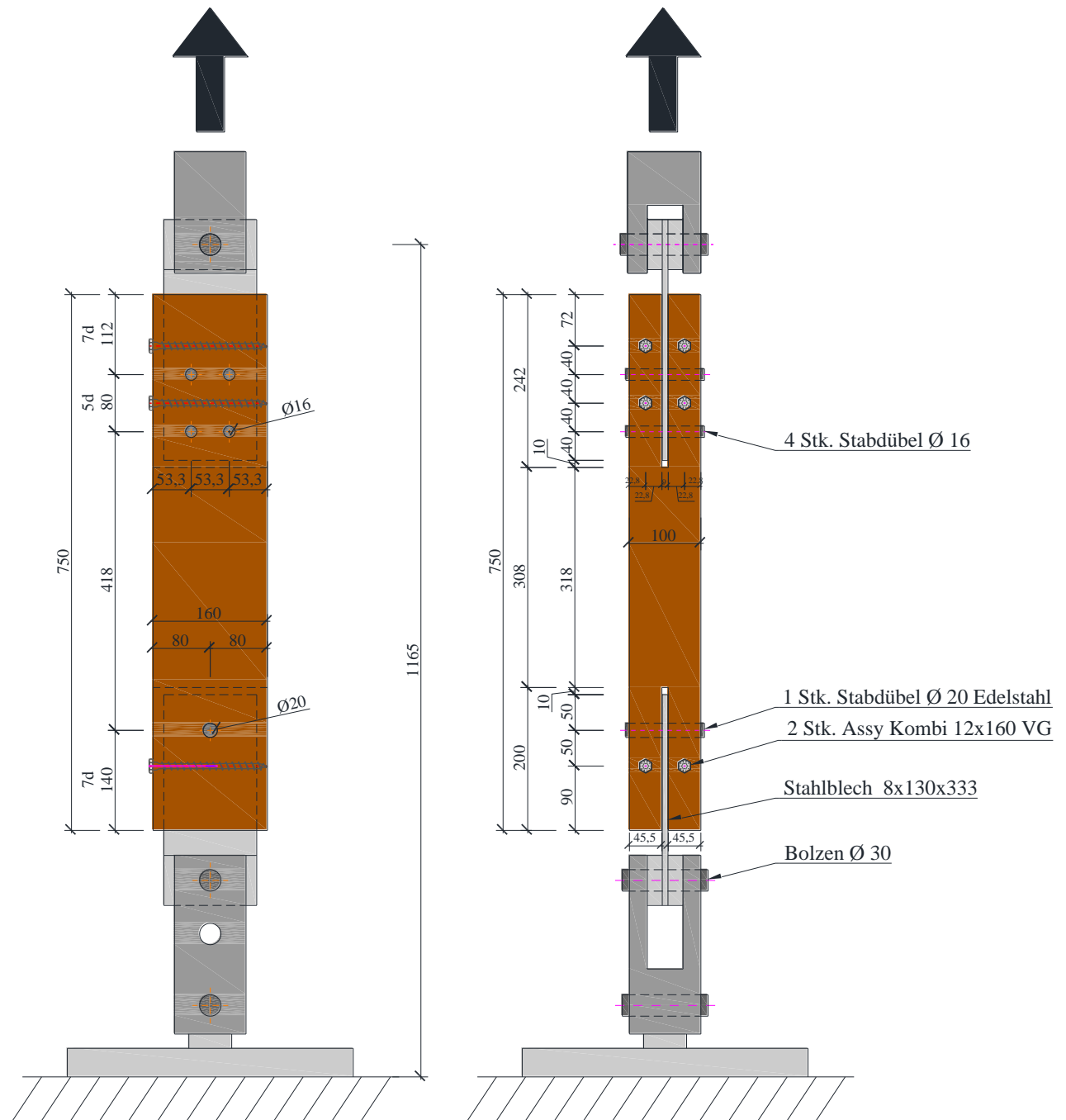


Abbildung 5-20: Prüfkfiguration der Prüfsreihe ST20-ES-n1-m1 (Abmessungen in mm)

### 5-3.4.4 Prüfserie ST16-ES-n5-m1

Errechnete Tragfähigkeit der zu prüfenden Stabdübelverbindung:  $F_{\max,est} = 210 \text{ kN}$

Nachweise:

- Nettoquerschnitt Holz: 216 kN > 210 kN ✓
- Nettoquerschnitt Stahlblech: 212 kN > 210 kN ✓
- Lochleibung Stahlblech: 62,0 kN > 42,0 kN ✓

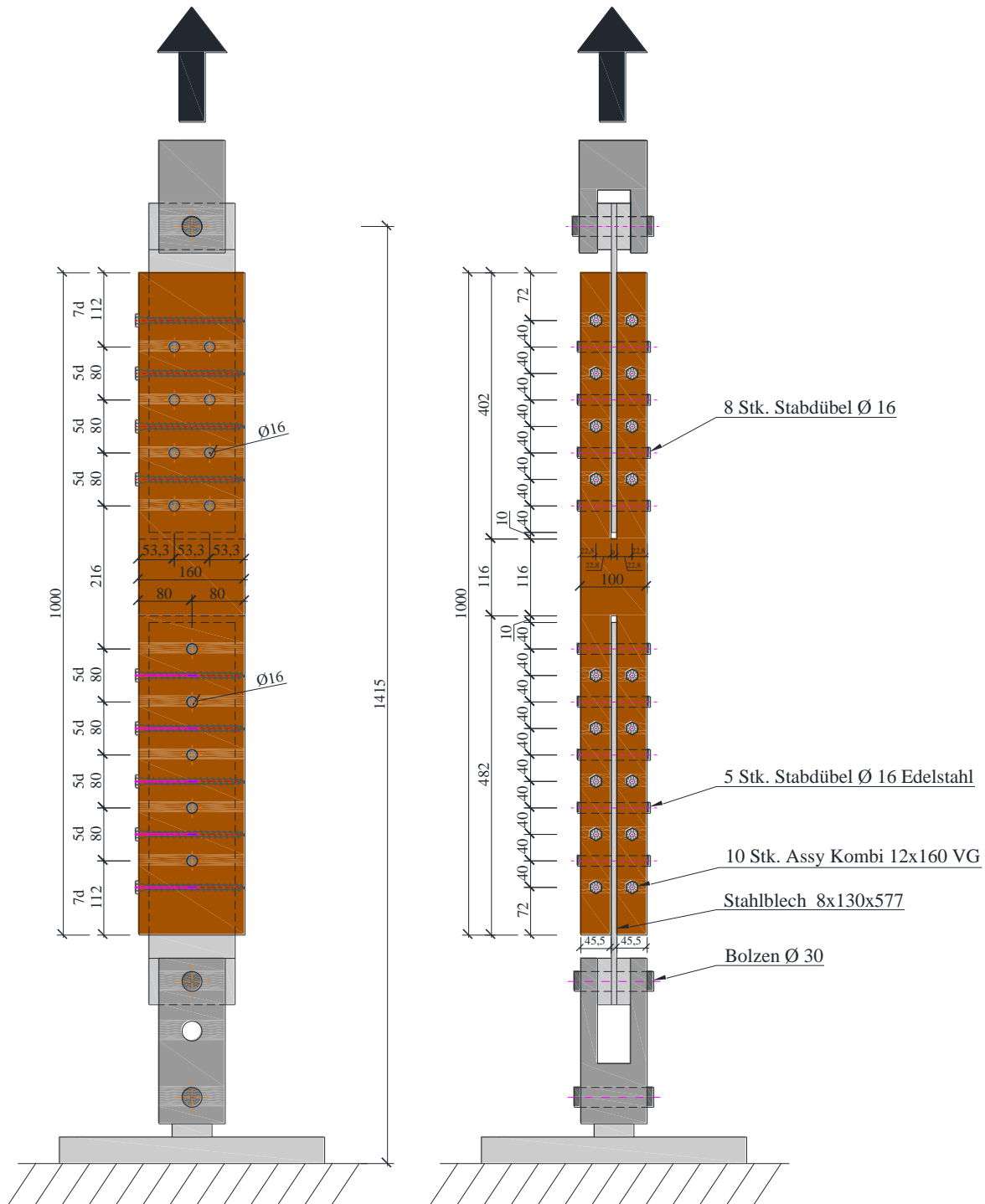


Abbildung 5-21: Prüfkongfiguration der Prüfserie ST16-ES-n5-m1 (Abmessungen in mm)

### 5-3.4.5 Prüfsérie ST16-ES-n2-m2

Errechnete Tragfähigkeit der zu prüfenden Stabdübelverbindung:  $F_{\max,est} = 168 \text{ kN}$

Nachweise:

- Nettoquerschnitt Holz: 192 kN > 168 kN ✓
- Nettoquerschnitt Stahlblech: 181 kN > 168 kN ✓
- Lochleibung Stahlblech: 62,0 kN > 42,0 kN ✓

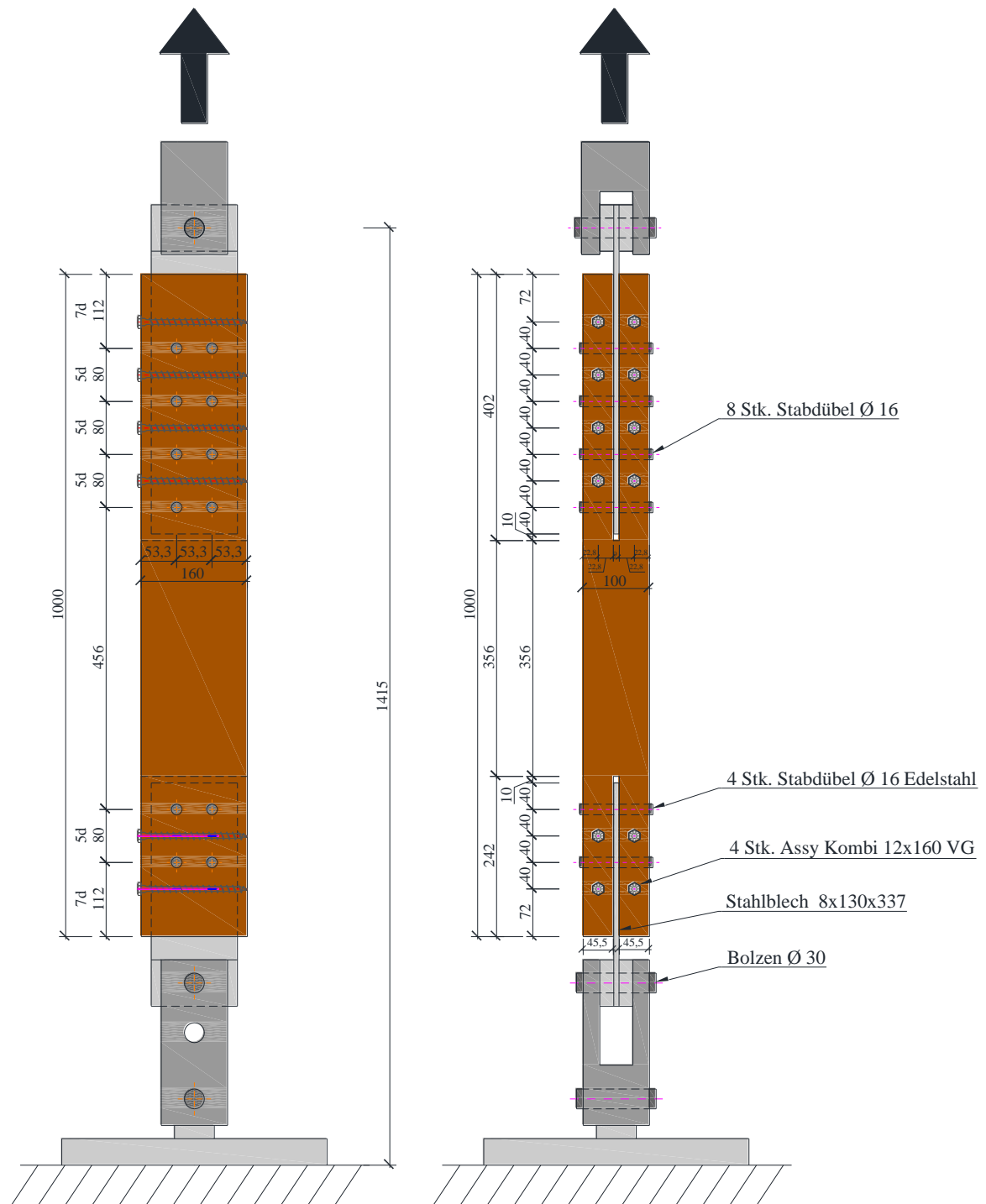
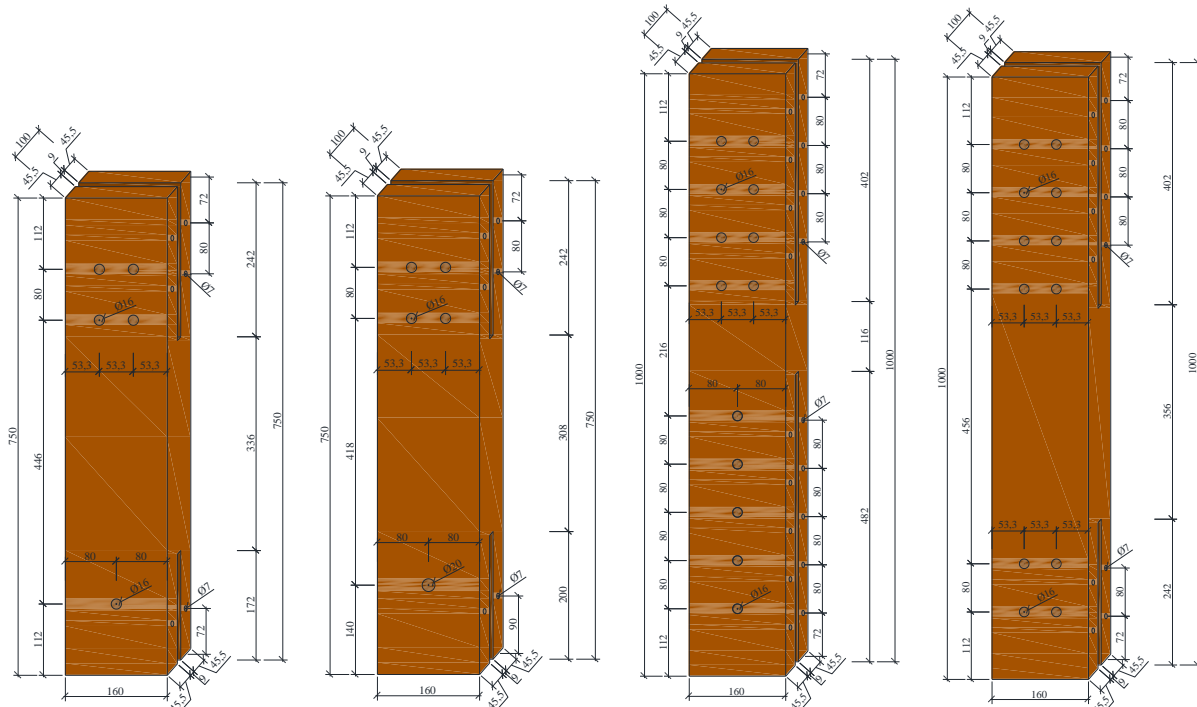


Abbildung 5-22: Prüfkfiguration der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2 (Abmessungen in mm)

### 5-3.5 HERSTELLUNG DER PRÜFKÖRPER

Um vergleichbare und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, sollte die zu prüfende Stabdübelverbindung in einem störungsfreien Bereich des Holzes ausgeführt werden. Somit können etwaige Einflüsse von Holzmerkmalen, wie Äste, Harzgallen, Reaktionsholz etc., minimiert werden. Der Einsatz von Vollholz war aufgrund der bereits bei der Trocknung einsetzenden Rissbildung nicht zielführend. Es wurden somit sortierte Fichtenholz-Lamellen der Festigkeitsklasse C24 zu BSH-Prüfkörpern der Festigkeitsklasse GL24h zusammengeklebt, um ideale Prüfkörpereigenschaften zu erlangen. In Abbildung 5-23 sind die Abmessungen der Prüfkörper dargestellt.



ST16-ST-n1-m1 (6 Stk.)    ST20-ES-n1-m1 (6 Stk.)    ST16-ES-n2-m2 (6 Stk.)    ST16-ES-n5-m1 (6 Stk.)  
 ST16-ES-n1-m1 (6 Stk.)

Abbildung 5-23: Abmessungen der Prüfkörper (Abmessungen in mm)

Für die Herstellung der Prüfkörper waren folgende Schritte notwendig:

1. Hobeln der einzelnen Rohlamellen
2. Einteilung der gehobelten Lamellen in fertige Lamellenlängen und Auskappen der Fehlerstellen
3. Aussortierung und Zusammenstellung der Lamellen zum gewünschten Prüfkörperaufbau
4. Verkleben der einzelnen Lamellen zu Brettschichtholz
5. Formatieren und genaues Ablängen der Prüfkörper
6. Bohren der Stabdübel- und Verstärkungsschraubenlöcher
7. Schlitzen der Prüfkörper
8. Beschriften der Prüfkörper

Bereits trockene Rohlamellen wurden auf eine Stärke von 33,3 mm gehobelt und danach sortiert, wie in Abbildung 5-24 gezeigt wird. Die Lamellen für die Prüfkörper sollten jeweils einen Bereich am Hirnholzende aufweisen, welcher möglichst frei von Holzmerkmalen ist. Die Größe des merkmalfreien Bereichs richtete sich nach der zu prüfenden Stabdübelkonfiguration (siehe Abbildung 5-23).



**Abbildung 5-24: Hobeln der Lamellen für die Prüfkörper: links: Hobelvorgang; rechts: fertig gehobelte Lamellen**

Nach diesen Kriterien wurden die Lamellen markiert und die gewünschten Prüfkörperlamellen nach den entsprechenden Längen (75 cm und 100 cm) mit Hilfe einer Tischkreissäge herausgekapt (Abbildung 5-25; links). Der Aufbau der BSH-Prüfkörper besteht aus jeweils drei Lamellen mit einer Dicke von 33,3 mm. Es wurde darauf geachtet, dass jeweils die rechte Seite (kernzugewandte Seite) außen liegt und sich die merkmalfreien Bereiche auf der gleichen Seite befinden (Abbildung 5-25; rechts). Die Prüfkörper wurden anschließend geordnet, seitlich markiert und für die Verklebung vorbereitet.



**Abbildung 5-25: Formatieren der Prüfkörperlamellen: links: Ablängen der Lamellen auf der Tischkreissäge und Zusammenstellen der BSH-Prüfkörper**

Mit Hilfe der Beleimungsanlage des Institutes für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz wurde der Polyurethan-Klebstoff Purbond HB 110 [89] aufgetragen und die einzelnen Lamellen miteinander verklebt. Anschließend wurden die BSH-Prüfkörper mit einem Pressdruck von rund 0,45 N/mm<sup>2</sup> verpresst und nach einer Aushärtezeit von rund vier Stunden wieder aus der Presse entnommen. Der Klebstoffauftrag sowie die Verpressung der einzelnen Lamellen ist in Abbildung 5-26 zusammengefasst.





**Abbildung 5-26: Kleben der Prüfkörper: links: Klebstoffauftrag; rechts: Verpressen der Lamellen**

Nach dem Verpressen der Prüfkörper wurden diese mit Hilfe der Tischkreissäge genau auf 750 mm bzw. auf 1000 mm abgelängt und auf die Maße 100 x 160 mm abgerichtet und gehobelt. Anschließend wurden die Löcher für Stabdübel und Verstärkungsschrauben bzw. Messschrauben gebohrt und die Prüfkörper mittels Tischkreissäge und Bandsäge eingeschlitzt, siehe Abbildung 5-27.



**Abbildung 5-27: Bearbeitung der Prüfkörper: links: Bohren der Stabdübellöcher; rechts: Schlitzen mit der Bandsäge**

Die fertigen Prüfkörper wurden beschriftet und in der Klimakammer bei Normbedingungen (20 °C und 65 % rel. LF) bis zum Prüfen gelagert. Der Stapel der fertigen Prüfkörper ist in Abbildung 5-28 zu sehen.



**Abbildung 5-28: Beschriftung und Lagerung der Prüfkörper**



### 5-3.6 HERSTELLUNG DER SCHLITZBLECHE UND VORBEREITUNG DER STABDÜBEL

Weiters wurden Schlitzbleche der Stahlgüteklasse S235 (Abbildung 5-29) angefertigt.

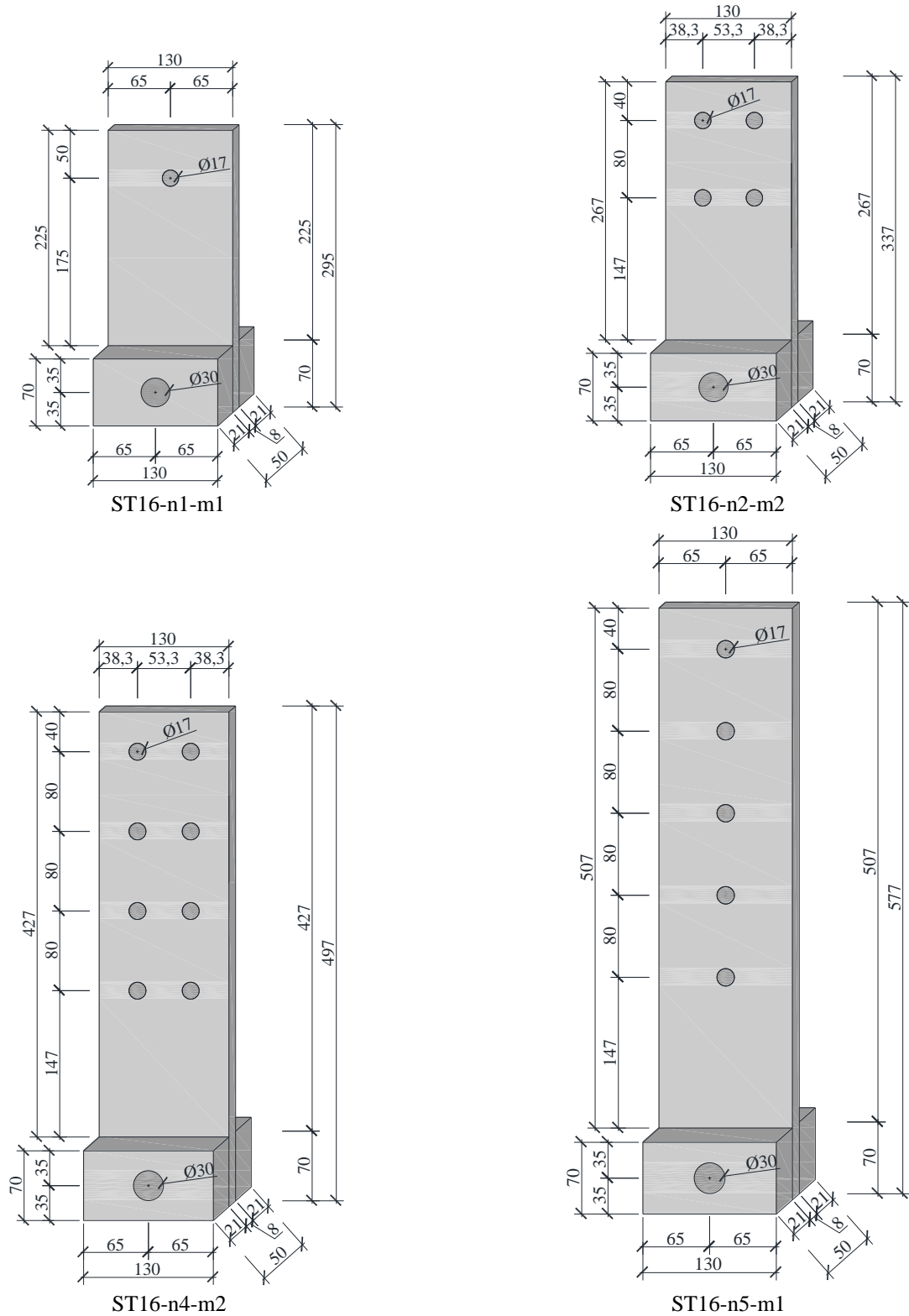


Abbildung 5-29: Abmessungen der Schlitzbleche (Abmessungen in mm)

Zur Herstellung der Schlitzbleche waren folgende Arbeitsschritte notwendig:

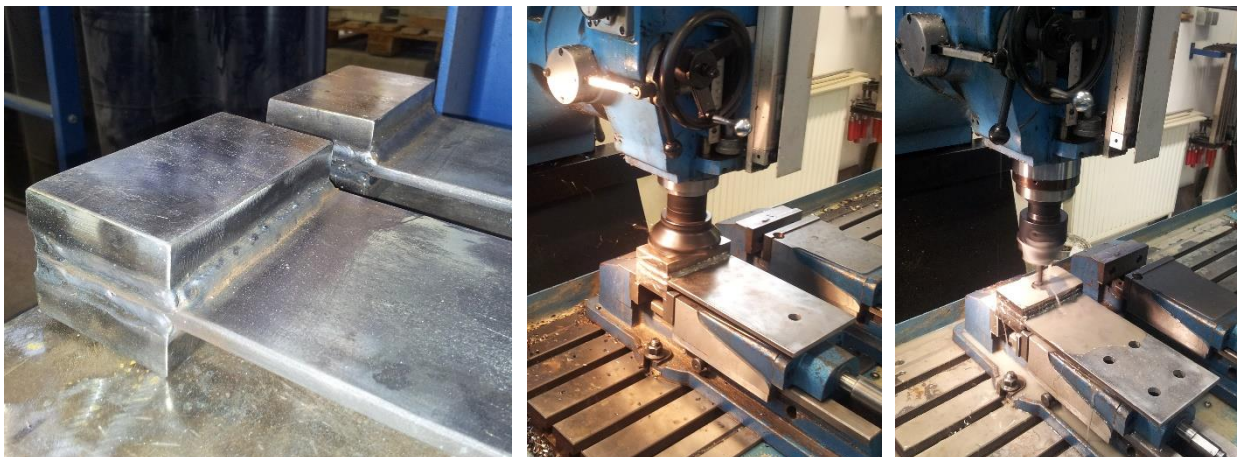
1. Ablängen des acht Millimeter dicken Flachstahl-Rohlings
2. Bohren der Stabdübellöcher
3. Zuschneiden der Backen
4. Aufschweißen der Backen für den Einspannbereich
5. Abfräsen der Backen im Einspannbereich auf 50 mm
6. Bohren der 30 mm – Passbohrung für den Einspannbolzen
7. Polieren des Schlitzblechs und Schleifen der Kanten

Im ersten Schritt wurden die Schlitzblech-Rohlinge aus einem acht Millimeter dicken Flachstahl mittels einer Metallbandsäge herausgeschnitten (Abbildung 5-30; links). Anschließend erfolgte die Bohrung der Löcher (Abbildung 5-30; rechts) mit den Abmessungen und Abständen nach Abbildung 5-29.



**Abbildung 5-30: Herstellen der Schlitzbleche: links: Ablängen des Flachstahls; rechts: Bohren der Löcher**

Im Einspannbereich war es erforderlich, die Schlitzbleche auf 50 mm zu verbreitern (Abbildung 5-31; links). Dafür wurden Abschnitte aus einem 25 mm dicken Flachstahl an die Schlitzbleche geschweißt und danach auf eine Einspanndicke von exakt 50 mm gefräst (Abbildung 5-31; Mitte). Die Herstellung der Passbohrung für den Einspannbolzen erfolgte mittels Metallbohrer und Reibahle (Abbildung 5-31; rechts).



**Abbildung 5-31: Bearbeiten der Schlitzbleche im Einspannbereich: links: Anschweißen der Backen; Mitte: Fräsen auf 50 mm Stärke; rechts: Bohren des Bolzenlochs**

In Abbildung 5-32 sind die vier fertig hergestellten Schlitzbleche dargestellt.



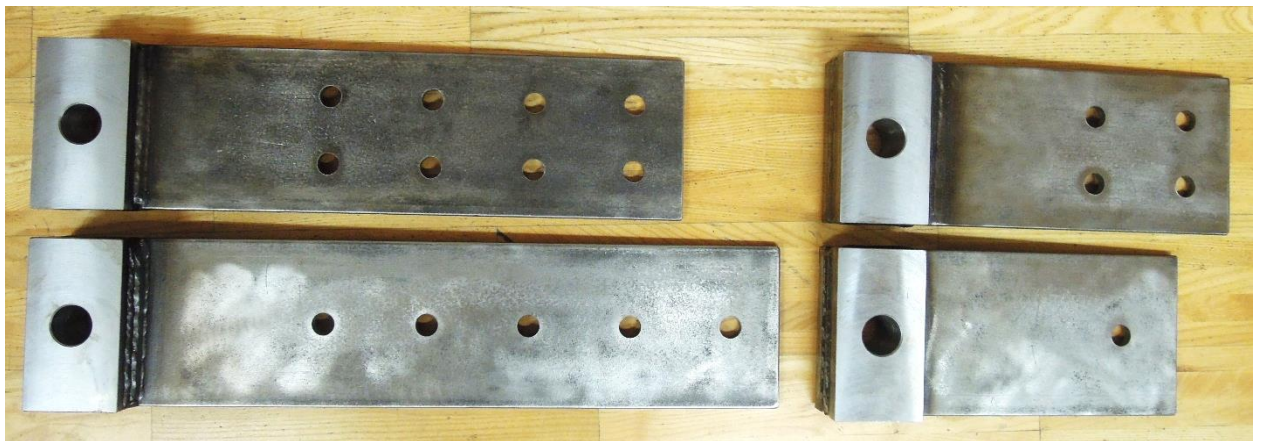


Abbildung 5-32: fertige Schlitzbleche

Edelstahl-Stabdübel mit einer Länge von 350 mm standen von anderen Projekten zur Verfügung und mussten lediglich auf 110 mm abgelängt und die Kanten gefast werden, um die Einbringung in die Holzprobekörper zu erleichtern. Diese Vorgänge werden in Abbildung 5-33 gezeigt.



Abbildung 5-33: Bearbeiten der Edelstahl-Stabdübel: links: Ablängen; rechts: Anbringen einer Fase

Die Edelstahl-Stabdübel wurden mit zusätzlich Silikonspray besprüht, um die Gleitfähigkeit zu erhöhen und somit den ungünstigsten Fall in Bezug auf die Spaltwirkung abzubilden. In Abbildung 5-34 sind alle zugeschnittenen Stabdübel sortiert dargestellt.



Abbildung 5-34: Stabdübel für die Prüfungen

### 5-3.7 HERSTELLUNG UND AUFBAU WEITERER MESSSCHRAUBEN FÜR DIE HAUPTPRÜFUNGEN

Für die durchgeführten Prüfserien wurden 20 Messschrauben aus dem Typ ASSY Kombi Sechskantschraube 12x160/145 [79] der Firma Adolf Würth GmbH & Co. KG hergestellt, wobei maximal acht Messschrauben gleichzeitig bei einer Prüfung zum Einsatz kamen. Es galt darauf zu achten, dass die Dehnmessstreifen in der Axialbohrung der Messschrauben exakt positioniert werden. Der Mittelpunkt des Messgitters muss sich dabei genau unterhalb des Stabdübels befinden, da dort der Spaltriss entlangführt. Aus den Abmessungen der Prüfkongfigurationen und Positionen der Stabdübel nach Abbildung 5-18 bis Abbildung 5-21 ergeben sich folgende Messschraubenaufbauten:

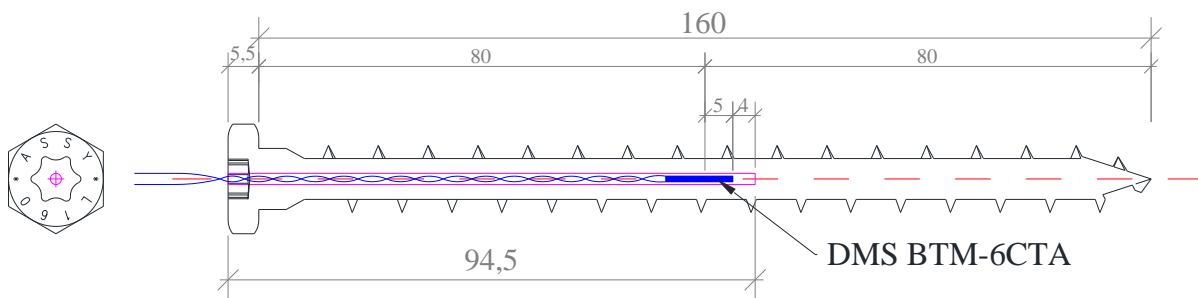


Abbildung 5-35: Aufbau der Messschrauben für eine Stabdübelreihe

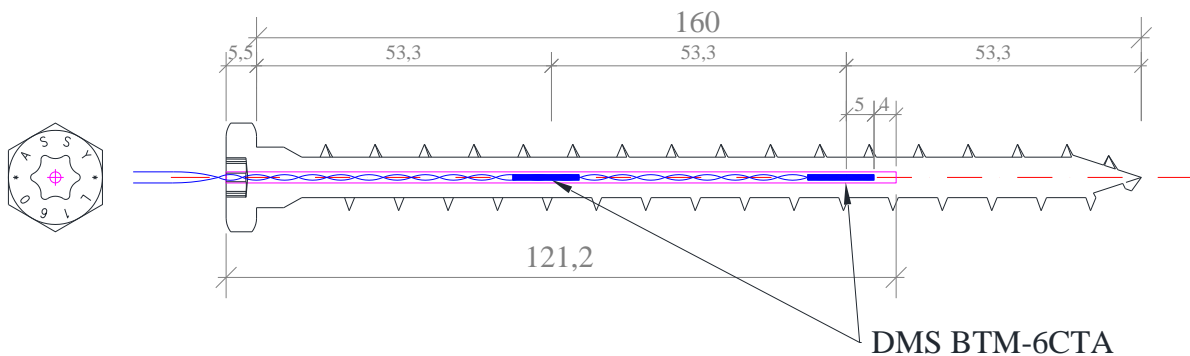


Abbildung 5-36: Aufbau der Messschrauben für zwei Stabdübelreihen

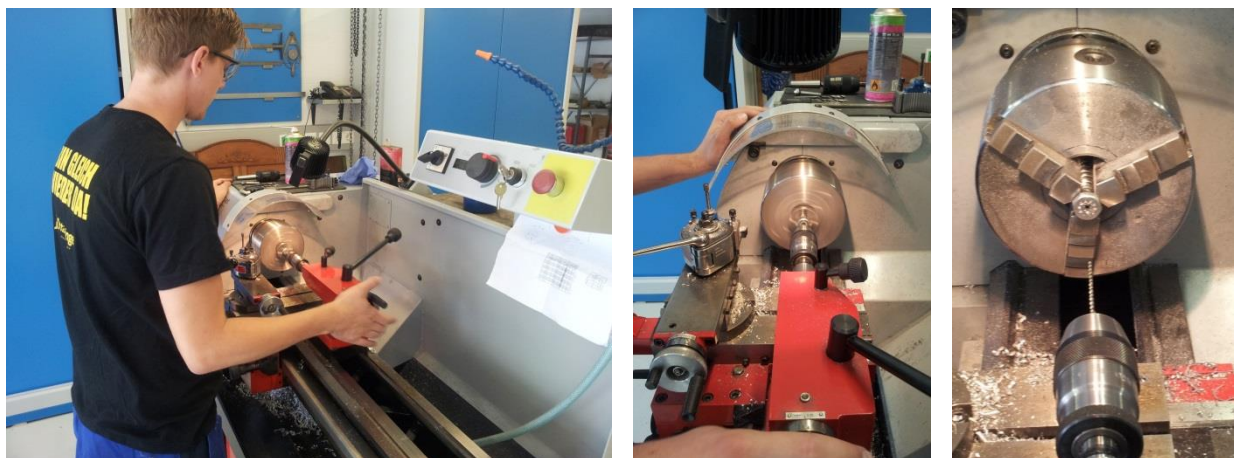
Für die neue Messschraubenreihe wurden die temperaturkompensierenden Dehnmessstreifen BTM-6CTA [80] der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. verwendet. Diese benötigen einen Drei-Leiter-Anschluss. Bei jenen Dehnmessstreifen, die nach Abbildung 5-36 am tiefsten im Bohrloch zu applizieren waren, mussten die Anschlussdrähte verlängert werden, da diese ursprünglich nur 85 mm lang waren. Dazu wurden sehr dünne kupferlackisolierte Drähte angelötet und die Anschlussstelle mittels Nitrilgummi wieder isoliert (Abbildung 5-37).





**Abbildung 5-37: Verlängerung der DMS-Drähte: links: Anlöten der Verlängerungsdrähte; rechts: elektrische Isolierung der Lötstelle**

Die axialen Bohrungen in den Schrauben haben einen Durchmesser von zwei Millimetern und wurden mit Hilfe einer Drehbank schrittweise hergestellt, wobei die Schraube um die eigene Achse rotierte und der Bohrer in das still stehende Spannfutter eingespannt wurde (Abbildung 5-38). Es wurden Bohrer der Güte HSS-E [90] bzw. HSS-TiN [91] verwendet, die es erst ermöglichten, ein Loch in die gehärteten Schrauben zu bohren.



**Abbildung 5-38: Bohren der axialen Löcher in die Messschrauben: links: Händischer Vorschub auf der Drehbank; Mitte: Bohren des Lochs; rechts: Einspannvorrichtung der Schrauben und Bohrkopf**

Nachdem die Bohrungen in den Schrauben fertiggelgt waren, wurden diese mit kleinen Bürsten sowie Druckluft gereinigt und sauber mit Aceton ausgewaschen. Die beiden Komponenten des Klebstoffs A2 [81] der Firma Tokyo Sokki Kenkyuio Co., Ltd. und die vorgebohrten Schrauben wurden auf ca. 50 °C erwärmt, um den Klebstoff flüssiger zu machen und eine Bläschenbildung zu vermeiden.

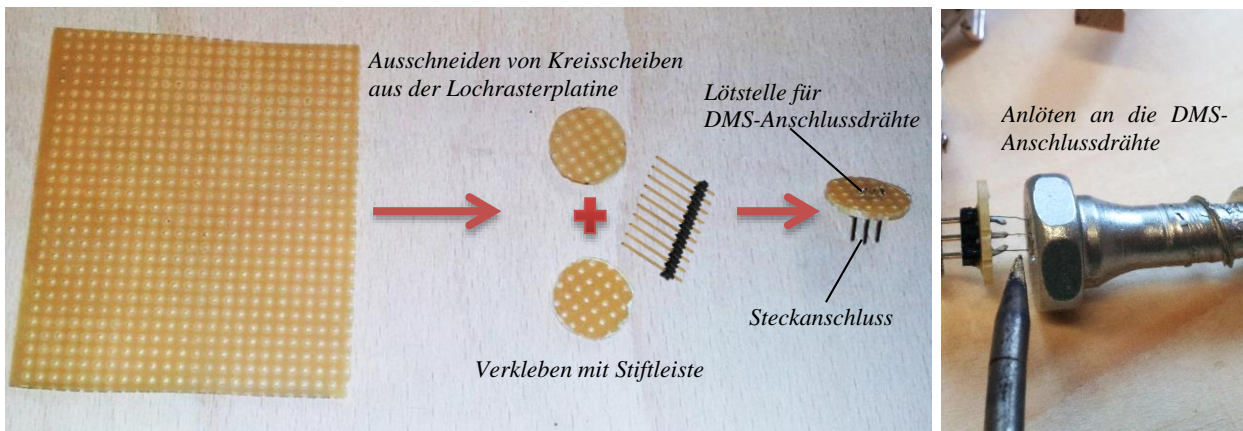
Nach dem Vermischen der beiden Klebstoffkomponenten wurde der Klebstoff mittels Spritze und langer Kanüle in das saubere Bohrloch gefüllt (Abbildung 5-39). Dabei war zu beachten, dass die Nadelspitze den Lochboden berührt und die Befüllung von unten nach oben erfolgte, um Lufteinschlüsse zu vermeiden.



**Abbildung 5-39: Applizierung der DMS: links außen: Reinigen der Bohrlöcher mit einer Bürste; links Mitte: Reinigen mit Aceton; rechts Mitte: Einfüllen des Klebstoffs; rechts außen: Einführen des DMS**

Durch Abwinkeln der DMS-Anschlussdrähte konnte die exakte Einbauposition der DMS im gereinigten Loch bestimmt werden. Nach dem Einführen der Dehnmessstreifen erfolgte die Aushärtung zwölf Stunden lang bei Raumtemperatur und anschließend drei Stunden lang im Elektroofen bei 140 °C.

Der Anschluss an die Verbindungskabel erfolgte über ein Stecksystem, welches aus einem runden Stück einer Lochrasterplatine und einem dreipoligen Platinensteckverbinder inklusive Stiftleiste hergestellt wurde (Abbildung 5-40). Verklebt wurden die Lochplättchen und die Stiftleisten mit einem nichtleitenden Sekundenklebstoff.



**Abbildung 5-40: Herstellung des Stecksystems für den Kabelanschluss**

In Abbildung 5-41 sind exemplarisch fertige Stecksysteme und der Anschluss der Verbindungskabel zum Messverstärker für Messschrauben mit einem bzw. zwei applizierten Dehnmessstreifen dargestellt.

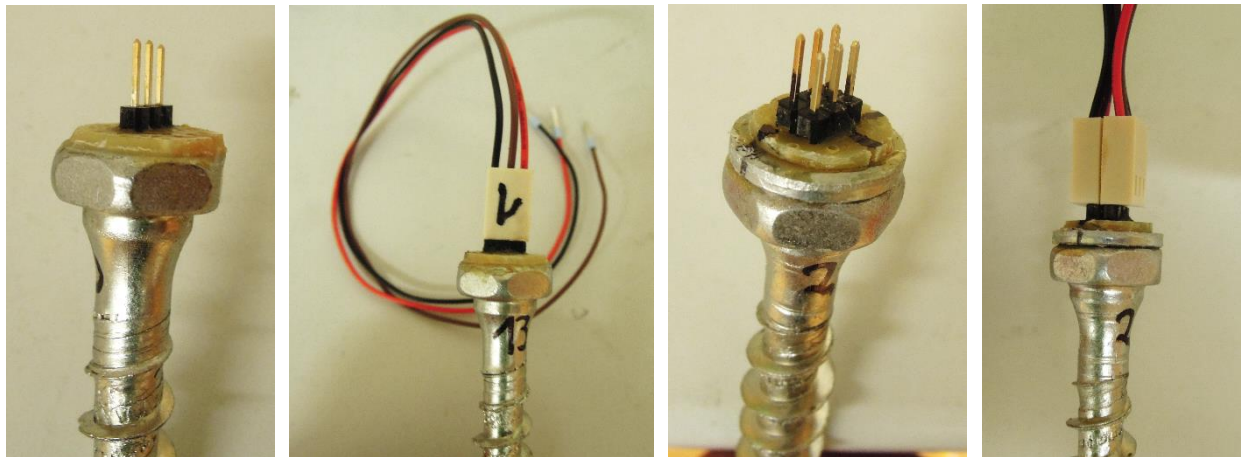


Abbildung 5-41: fertiges Stecksystem der neuen Messschraubenreihe: links: Stecksystem für Messschrauben mit einem applizierten DMS; rechts: Stecksystem für Messschrauben mit zwei applizierten DMS

### 5-3.8 BENENNUNG DER NEUEN MESSSCHRAUBEN FÜR DIE HAUPTPRÜFUNGEN

Es wurden zwei unterschiedliche Typen von Messschrauben hergestellt. Für die Prüfung von einreihigen Stabdübelverbindungen wurden 15 Messschrauben mit jeweils einem, und für die Prüfungen von zweireihigen Stabdübelverbindungen fünf Messschrauben mit jeweils zwei Dehnmessstreifen appliziert. Alle neu hergestellten Messschrauben, welche für die Stabdübelprüfserien eingesetzt werden sollten, sind vom Typ ASSY Kombi Sechskantschraube 12x160/145 mit Vollgewinde [79]. Die laufende Nummer der jeweiligen Messschrauben wurde an die Nummerierung der bereits hergestellten Prototypen angeknüpft und beginnt bei MS-11 (vgl. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Benennung der neuen Messschrauben

Messschraubenummer	Messschraubenaufbau	Einsatz in folgenden Prüfserien
MS-11 bis MS-25	ein applizierter DMS nach Abbildung 5-35	ST16-ST-n1-m1
		ST16-ES-n1-m1
		ST20-ES-n1-m1
		ST16-ES-n5-m1
MS-26 bis MS-30	zwei applizierte DMS nach Abbildung 5-36	ST16-ES-n2-m2

Die fertigen Messschrauben wurden jeweils unter dem Schraubenkopf mit der zugehörigen Nummer beschriftet. Zusätzlich erfolgte eine Kennzeichnung der richtigen Anschlussrichtung am Stecker, um ein falsches Anstecken der Verbindungskabel zu vermeiden. In Abbildung 5-42 sind die fertigen Messschrauben dargestellt.





Abbildung 5-42: fertig hergestellte Messschrauben

### 5-3.9 ERGEBNISSE DER KALIBRIERUNGSPRÜFUNGEN DER NEUEN MESSSCHRAUBENREIHE

Die Konfiguration und der Ablauf sowie die Auswertung der Kalibrierungsprüfungen von MS-11 bis MS-30 erfolgten ident zu den ersten Messschrauben-Prototypen und ist in Abschnitt 4-3 ausführlich erläutert. Alle hergestellten Messschrauben wurden vor dem Einsatz für die Stabdübelprüfungen zwei- bis dreimal kalibriert, wobei diese dazwischen immer wieder im Holz heraus- und hineingedreht wurden. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wurde für jede Messschraube ein Mittelwert der Steigung (Regressionskoeffizient  $b$ ) ermittelt, welcher letztendlich zur Bildung der Regressionsgeraden diente. Der Offset der Regressionsgeraden (Regressionskoeffizient  $a$ ) wurde für die weitere Verwendung der Messschrauben vernachlässigt, da die Messwerte vor jeder Messung zu Null gestellt werden. Somit ist der Regressionskoeffizient  $b$  jener Wert, der anschließend für die Umrechnung der Spannungsänderung [mV/V] in eine Kraft [N] herangezogen wurde. An dieser Stelle wird exemplarisch die Auswertung der Kalibrierungsprüfungen MS-19-01 angeführt. In Abbildung 5-43 ist der stufenweise Prüfablauf in Form eines Kraft-Zeit-Diagramms dargestellt. Die Be- und Entlastung erfolgte weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min. Die resultierende Kraft-Spannungsänderungsbeziehung wird in Abbildung 5-44 gezeigt; aus dieser wird mittels Regressionsanalyse (siehe Abschnitt 4-3.1.4) die Regressionsgerade ermittelt. In Abbildung 5-45 wird die Abweichung in Prozent der ermittelten Regressionsgeraden zur tatsächlich aufgetragenen Last der Prüfmaschine grafisch dargestellt, wobei die 10 %-Grenzen rot markiert sind. Die Abweichung in Newton wird in Abbildung 5-46 gezeigt.

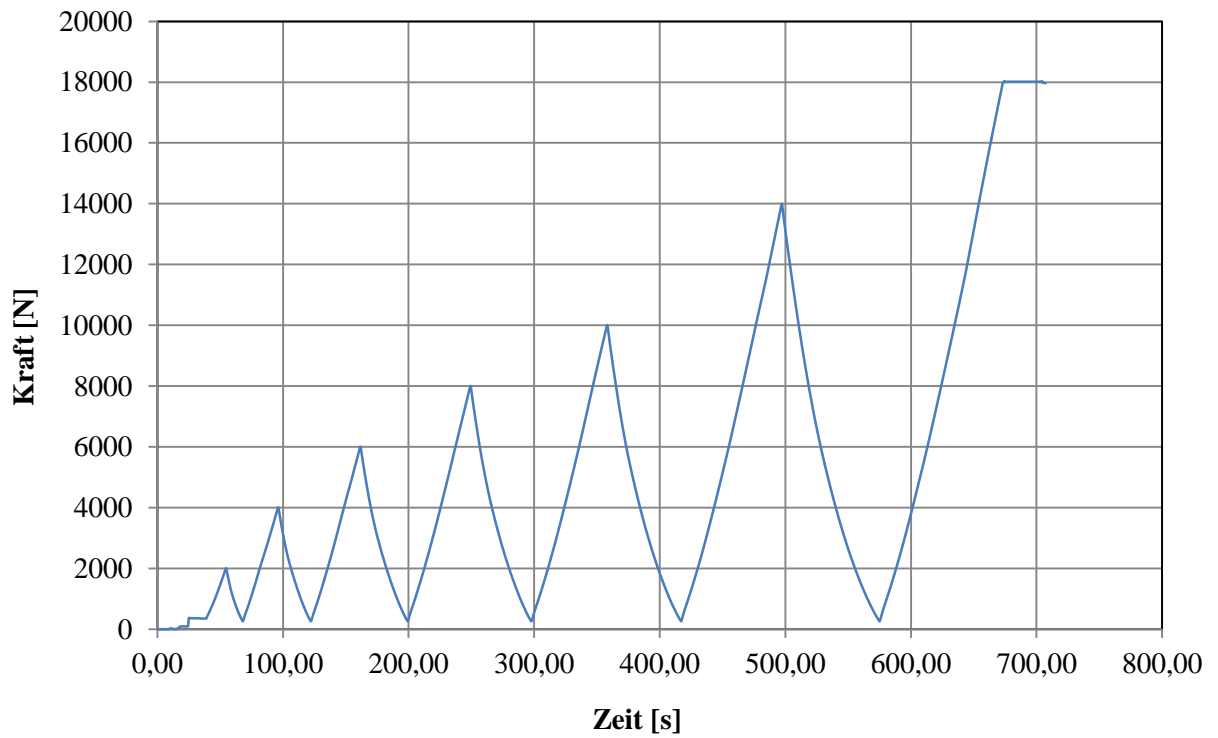


Abbildung 5-43: Prüfablauf der Kalibrierungsprüfung MS-19-01

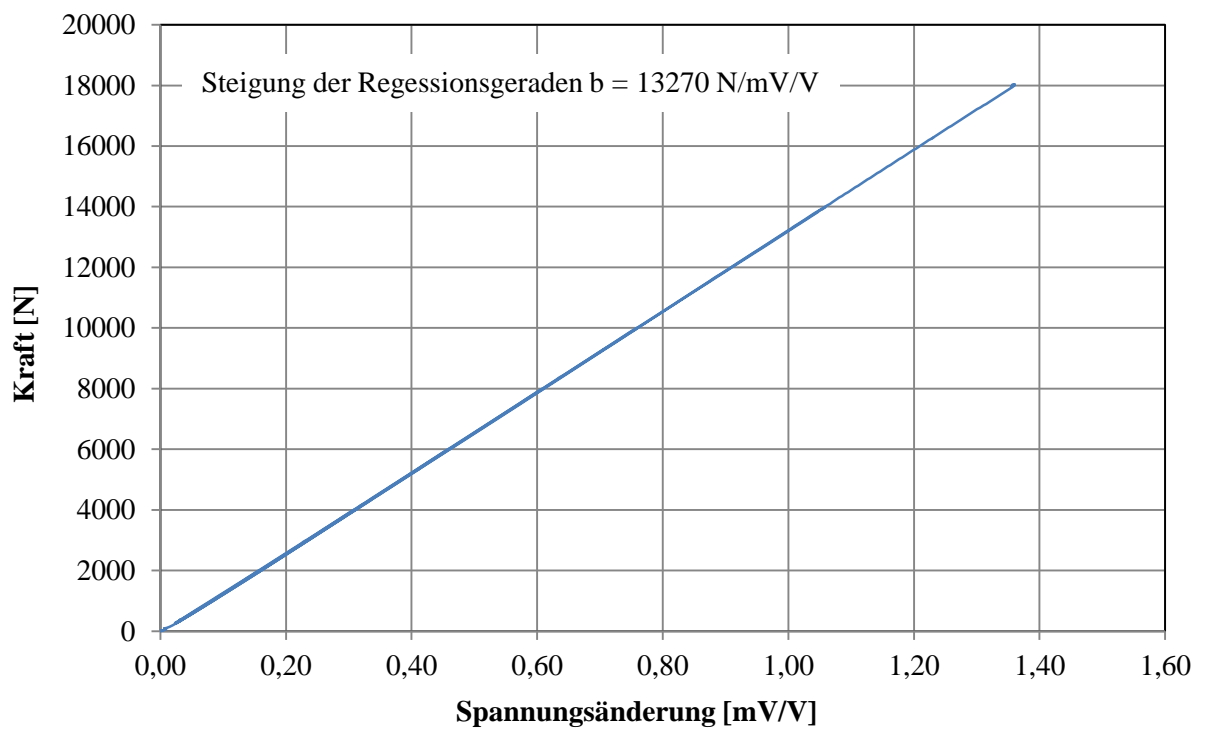


Abbildung 5-44: Kraft-Spannungsänderungs-Diagramm der Kalibrierungsprüfung MS-19-01

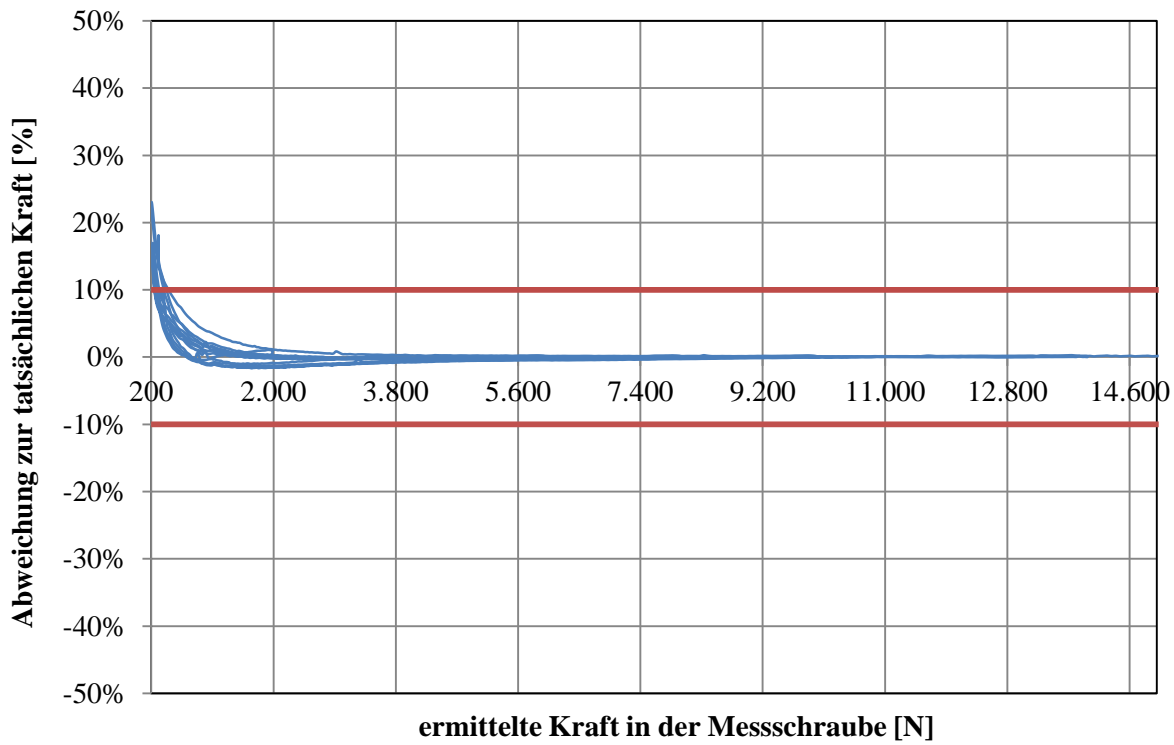


Abbildung 5-45: Abweichung der Regressionsgeraden zur tatsächlich aufgebrachten Kraft der Kalibrierungsprüfung MS-19-01( in Prozent)

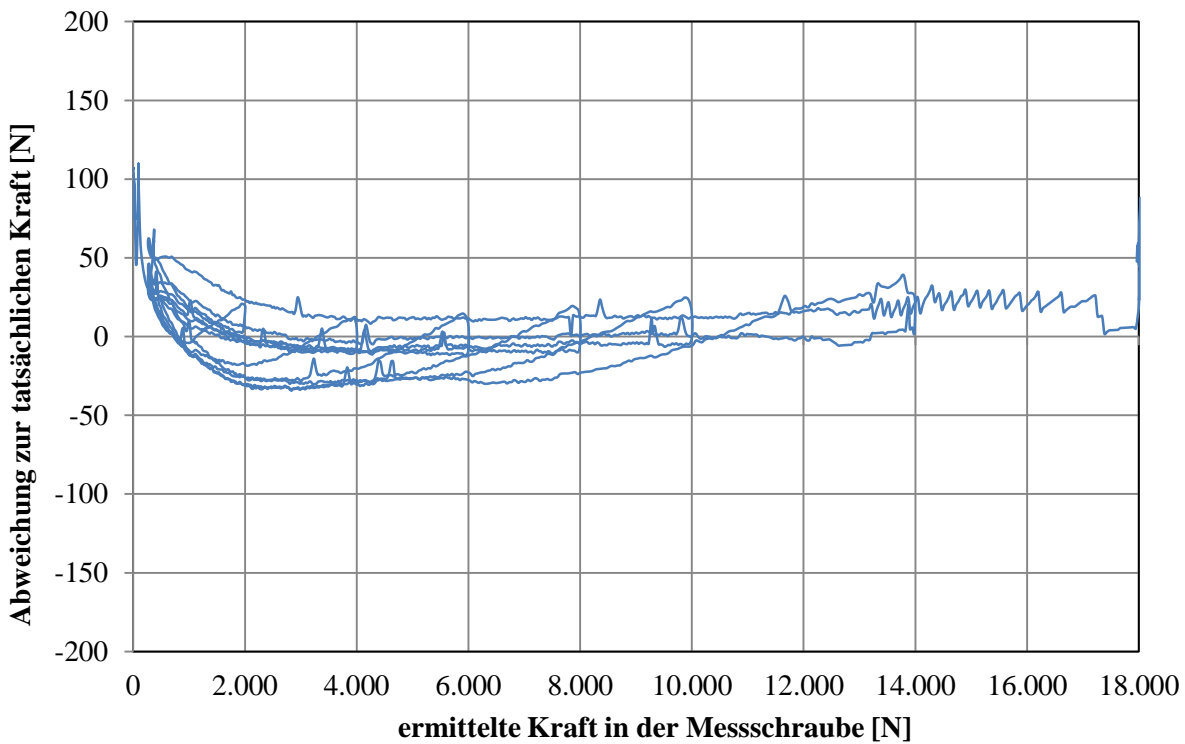


Abbildung 5-46: Abweichung der Regressionsgeraden zur tatsächlich aufgebrachten Kraft der Kalibrierungsprüfung MS-19-01( in Newton)

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen der Messschrauben MS-11 bis MS-25, welche mit einem DMS ausgestattet wurden, sind in Tabelle 5-3 angeführt.

**Tabelle 5-3:** *Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen der neuen Messschraubenreihe MS-11 bis MS-25*

Messschraube	Prüfungsbezeichnung	Standardfehler [N]	Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]	Regressionskoeffizienten		
				a [N]	b [N/mV/V]	$b_{\text{mittel}}$ [N/mV/V]
<b>MS-11</b>	MS-11-01	254	0,997540	513	13.590	<b>13.103</b>
	MS-11-02	188	0,997675	948	13.014	
	MS-11-03	251	0,995865	-707	12.706	
<b>MS-12</b>	MS-12-01	76,9	0,999620	-260	13.030	<b>13.099</b>
	MS-12-02	73,1	0,999641	-177	13.167	
<b>MS-13</b>	MS-13-01	117	0,999120	-13,1	14.544	<b>14.589</b>
	MS-13-02	129	0,997991	747	14.653	
	MS-13-03	165	0,998341	788	14.568	
<b>MS-14</b>	MS-14-01	60,6	0,999763	203	13.746	<b>13.762</b>
	MS-14-02	17,3	0,999981	-141	13.581	
	MS-14-03	82,3	0,998834	486	13.960	
<b>MS-15</b>	MS-15-01	370	0,991077	-975	14.541	<b>13.919</b>
	MS-15-02	118	0,999264	74,5	13.297	
<b>MS-16</b>	MS-16-01	43,0	0,999886	22,9	13.679	<b>13.652</b>
	MS-16-02	14,3	0,999987	18,2	13.625	
<b>MS-17</b>	MS-17-01	42,4	0,999886	-513	14.519	<b>14.453</b>
	MS-17-02	69,5	0,999704	-665	14.385	
<b>MS-18</b>	MS-18-01	85,6	0,999525	38,7	13.368	<b>13.294</b>
	MS-18-02	56,6	0,999805	-111	13.221	
<b>MS-19</b>	MS-19-01	19,9	0,999973	-107	13.301	<b>13.270</b>
	MS-19-02	21,4	0,999970	-15,0	13.239	
<b>MS-20</b>	MS-20-01	58,3	0,999776	210	13.864	<b>13.803</b>
	MS-20-02	31,3	0,999941	56,0	13.742	
<b>MS-21</b>	MS-21-01	144	0,998641	1041	13.111	<b>13.080</b>
	MS-21-02	83,9	0,999562	961	13.050	
<b>MS-22</b>	MS-22-01	39,8	0,999895	-410	14.298	<b>14.312</b>
	MS-22-02	30,8	0,999942	-166	14.326	
<b>MS-23</b>	MS-23-01	58,1	0,999777	94,4	13.531	<b>13.447</b>
	MS-23-02	58,8	0,999788	-86,2	13.363	
<b>MS-24</b>	MS-24-01	84,9	0,999521	661	13.322	<b>12.868</b>

	MS-24-02	90,5	0,999486	106	12.415	
<b>MS-25</b>	MS-25-01	220	0,996849	1743	13.773	<b>13.062</b>
	MS-25-02	184	0,997914	-478	12.350	
<b>Mittelwert</b>		101	0,9989	118	13.602	13.581
<b>Standardabweichung</b>		81,9	0,002	571	622	547
<b>COV</b>		80,9%	0,174%	485%	4,57%	4,03%

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse der Messschrauben MS-25 bis MS-30, welche mit zwei DMS ausgestattet wurden, sind in Tabelle 5-4 aufgelistet.

**Tabelle 5-4:** Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen der neuen Messschraubenreihe MS-26 bis MS-30

Messschraube	DMS Position	Standardfehler [N]	Bestimmtheits- maß R <sup>2</sup> [-]	Regressionskoeffizienten		
				a [N]	b [N/mV/V]	b <sub>mittel</sub> [N/mV/V]
<b>MS-26</b>	01 oben	82,8	0,999175	542	15.006	<b>15.481</b>
	02	156	0,996536	137	15.955	
<b>MS-26</b>	01 unten	56,1	0,999621	-5,50	13.767	<b>13.592</b>
	02	81,1	0,999057	-521	13.417	
<b>MS-27</b>	01 oben	31,5	0,999894	-90,0	13.080	<b>13.244</b>
	02	25,2	0,999917	37,8	13.408	
<b>MS-27</b>	01 unten	131	0,998160	-582	14.108	<b>14.163</b>
	02	83,2	0,999091	100	14.218	
<b>MS-28</b>	01 oben	87,5	0,998942	205	14.128	<b>14.073</b>
	02	28,6	0,999895	-6,10	14.019	
<b>MS-28</b>	01 unten	170	0,995993	57,2	14.183	<b>14.515</b>
	02	46,3	0,999725	-16,9	14.847	
<b>MS-29</b>	01 oben	63,5	0,999432	-27,1	13.801	<b>13.768</b>
	02	32,8	0,999801	-33,9	13.735	
<b>MS-29</b>	01 unten	111	0,998269	136	13.082	<b>13.273</b>
	02	56,7	0,999404	116	13.464	
<b>MS-30</b>	01 oben	52,5	0,999600	326	13.685	<b>14.004</b>
	02	44,8	0,999774	92,8	14.323	
<b>MS-30</b>	01 unten	121	0,997890	1240	12.584	<b>12.934</b>
	02	97,0	0,998945	477	13.284	
<b>Mittelwert</b>		77,9	0,9990	109	13.905	13.905
<b>Standardabweichung</b>		42,3	0,001	375	762	735
<b>COV</b>		54,4%	0,110%	342%	5,48%	5,28%

In Abbildung 5-47 sind die alle Regressionsgeraden der Kalibrierungsprüfungen der Messschrauben MS-11 bis MS-25 dargestellt, wobei nur der Wert der Steigung (b) herangezogen und der Offset (a) vernachlässigt wurde.

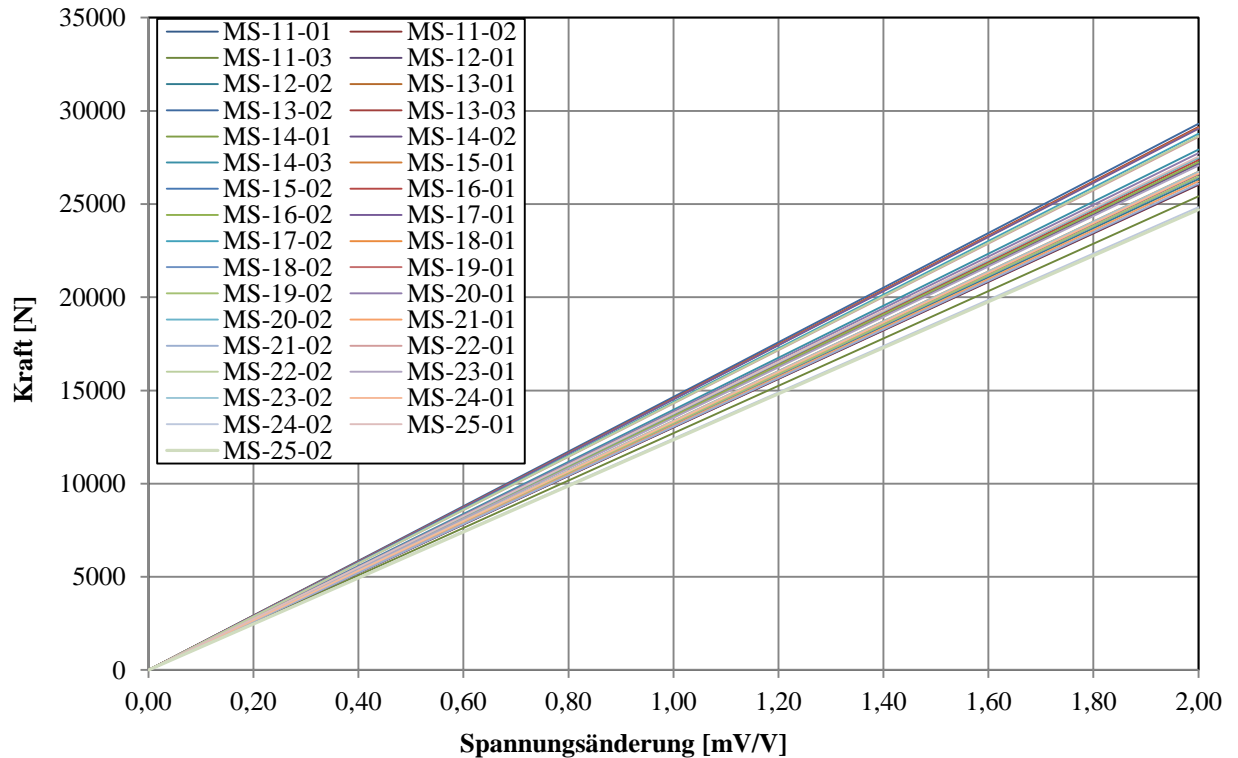


Abbildung 5-47: Regressionsgeraden der Messschrauben MS-11 bis MS-25

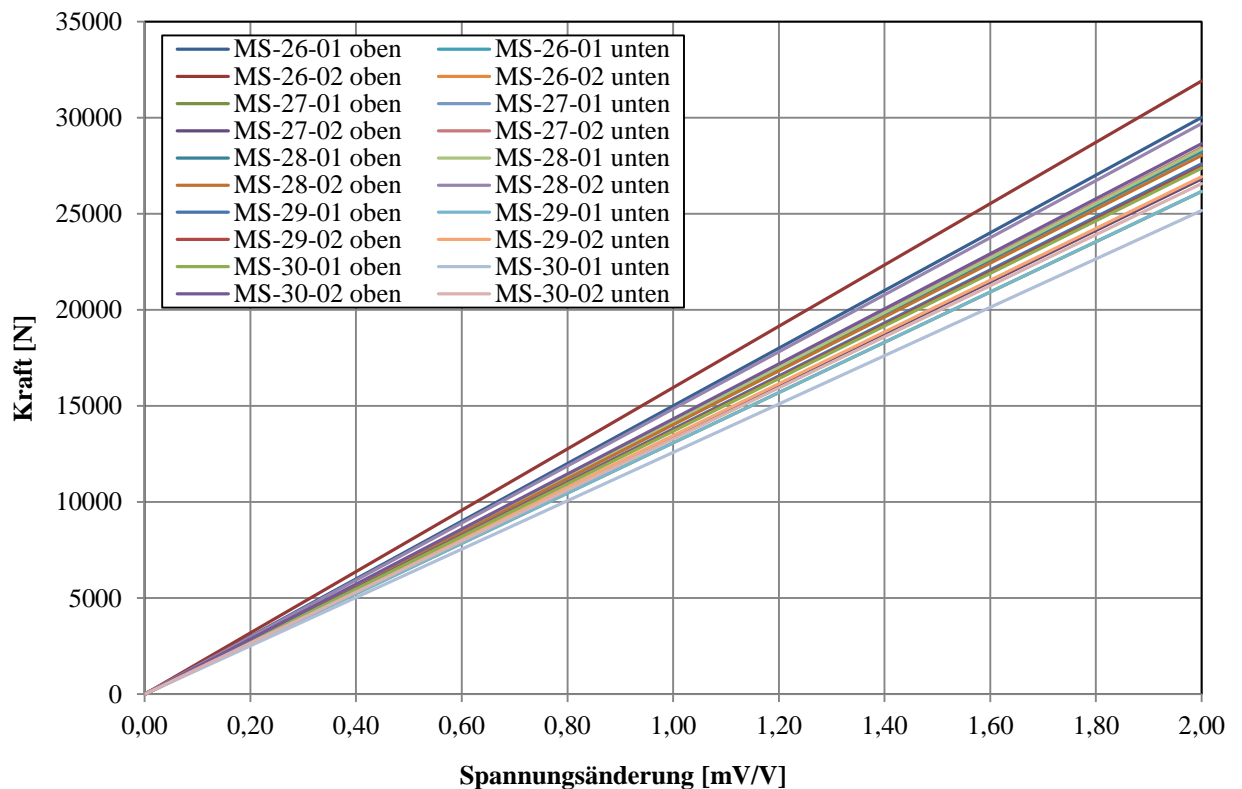


Abbildung 5-48: Regressionsgeraden der Messschrauben MS-26 bis MS-30



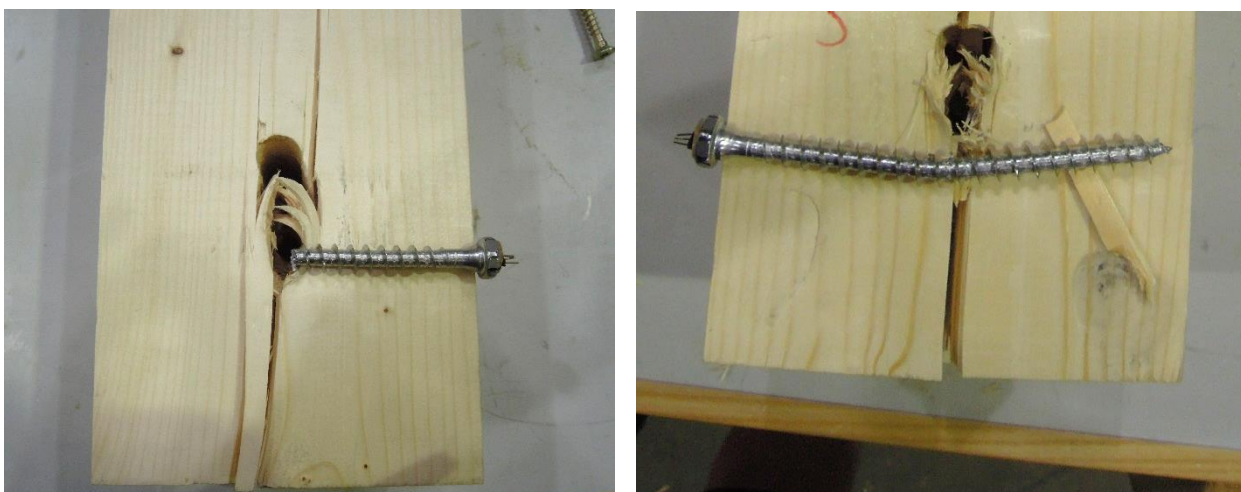
### 5-3.9.1 Interpretation der Ergebnisse

Der Verlauf der Kraft-Spannungsänderungs-Kurve in Abbildung 5-44 bildet trotz stufenweiser Be- und Entlastung eine Gerade, dessen Werte sehr genau korrelieren. Die Steigung der Regressionsgeraden  $b$ , welche mittels Regressionsanalyse ermittelt wurde, ist ebenfalls im Diagramm der Abbildung 5-44 angeführt. Die mittels dieser Steigung und Spannungsänderung des DMS in der Messschraube ermittelten Kräfte weichen nur sehr gering von den tatsächlich durch die Prüfmaschine aufgebraachten Lasten ab. In Abbildung 5-45 ist deutlich erkennbar, dass diese Abweichung ab einer Höhe von rund 300 N unter 10 % liegt. Die absolute Abweichung beträgt in diesem Bereich maximal 40 N (Abbildung 5-46). Die Messschraube MS-19 ist somit sehr präzise. Nicht alle Messschrauben erzielen eine perfekte Korrelation der Kalibrierungsergebnisse. Die präzisesten Messschrauben wurden anhand des kleinsten Standardfehlers und dem optimalsten Bestimmtheitsmaß (nahe eins) aus Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 gewählt. Zusätzlich wurde kontrolliert, wie stark die Steigungen der Regressionsgeraden einer Messschraube nach dem Heraus- und Hineindreihen voneinander abweichen. Die mit Abstand besten Ergebnisse erzielten die Messschrauben MS-16 und MS-19; diese wurden später auch für beinahe alle Prüfungen zur Ermittlung der Kraft in den Verstärkungsschrauben von Stabdübelverbindungen verwendet. Neben MS-16 und MS-19 wurden für die Prüfungen mit einer Stabdübelreihe die Messschrauben MS-12, MS-14, MS16, MS-18, MS-20 und MS-22 gewählt. Für die Prüfungen mit zwei Stabdübelreihen wurden MS-26, MS-27, MS28 und MS-29 verwendet.

Abbildung 5-47 und Abbildung 5-48 zeigen, dass die Steigung der Regressionsgeraden unterschiedlicher Messschrauben variieren. Die Unterschiede betragen bis zu 16 % bzw. 21 %; somit ist es notwendig, jede Messschraube für sich extra zu kalibrieren.

### 5-3.10 KALIBRIERUNG DER MESSSCHRAUBEN NACH DEM EINSATZ IN VERSTÄRKTEN STABDÜBELPRÜFSERIEN

Um die Prüfergebnisse der Ermittlung der Verstärkungskräfte in Stabdübelverbindungen aus Abschnitt 6-2 zu verifizieren, wurden die verwendeten Messschrauben nach der Durchführung der Hauptprüfungen (verstärkte Stabdübelprüfungen) ein weiteres Mal kalibriert. Vier Messschrauben wurden jedoch bei einer abschließenden Prüfung, welche bewusst bis zum absoluten Versagen der verstärkten Verbindung (entspricht dem Bruch der Verstärkungsschrauben) durchgeführt wurde, beschädigt und konnten anschließend nicht mehr kalibriert werden (Abbildung 5-49).



**Abbildung 5-49: Beschädigte Messschrauben: links: Bruch einer Messschraube; rechts: plastische Deformation einer Messschraube**

In Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 sind Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen vor und nach den Stabdübelprüfserien gegenübergestellt. Die mittels Regressionsanalyse ermittelten Steigungen  $b$  wurden verglichen und deren Abweichungen berechnet. Der Offset  $a$  wurde für diesen Vergleich vernachlässigt, da



dieser auch bei der Durchführung der Hauptprüfungen nicht berücksichtigt und die Messung bei Prüfstart immer zu Null gestellt wurde. Die Kalibrierungsergebnisse vor den Hauptprüfungen sind jeweils gemittelte Werte der einzelnen Messschrauben aus Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4. Lediglich MS-16 wurde vor der Durchführung der verstärkten Stabdübelprüfungen extra nochmals kalibriert.

**Tabelle 5-5:** *Vergleich der Regressionsanalysen von Messschrauben mit einem applizierten DMS vor und nach den Stabdübelprüfserien*

Messschraube	vor Prüfungen / nach Prüfungen	Standardfehler	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	Regressionskoef.		Abweichung von b
		[N]	[-]	a [N]	b [N/mV/V]	[%]
MS-12	vor Prüfungen	75,0	0,999631	-219	13.099	3,15 %
	nach Prüfungen	99,8	0,999186	-523	13.512	
MS-16	vor Prüfungen	60,1	0,999783	-40,9	13.251	1,15 %
	nach Prüfungen	34,9	0,999910	-9,62	13.099	
MS-17	vor Prüfungen	56,0	0,999795	-589	14.453	0,07 %
	nach Prüfungen	84,1	0,999491	-665	14.462	
MS-20	vor Prüfungen	44,8	0,999859	133	13.803	3,22 %
	nach Prüfungen	51,6	0,999802	166	13.359	

**Tabelle 5-6:** *Vergleich der Regressionsanalysen von Messschrauben mit zwei applizierten DMS vor und nach den Stabdübelprüfserien*

Messschraube	vor Prüfungen / nach Prüfungen	Standardfehler	Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	Regressionskoef.		Abweichung von b
		[N]	[-]	a [N]	b [N/mV/V]	[%]
MS-26 oben	vor Prüfungen	119	0,997856	340	15.481	10,7 %
	nach Prüfungen	32,3	0,999685	112	13.829	
MS-26 unten	vor Prüfungen	68,6	0,999339	-263	13.592	15,9 %
	nach Prüfungen	54,7	0,999097	53,6	11.436	
MS-27 oben	vor Prüfungen	28,3	0,999905	-26,1	13.244	0,31 %
	nach Prüfungen	16,1	0,999926	-20,6	13.284	
MS-27 unten	vor Prüfungen	107	0,998626	-241	14.163	1,34 %
	nach Prüfungen	44,1	0,999444	-101	13.973	
MS-28 oben	vor Prüfungen	58,0	0,999418	99,3	14.073	5,03 %
	nach Prüfungen	22,2	0,999863	-287	13.366	
MS-28 unten	vor Prüfungen	108	0,997859	20,2	14.515	4,07 %
	nach Prüfungen	47,1	0,999388	-691	13.924	
MS-29 oben	vor Prüfungen	48,2	0,999617	-30,5	13.768	4,53 %
	nach Prüfungen	54,3	0,999202	-283	13.145	
MS-29 unten	vor Prüfungen	83,8	0,998837	126	13.273	4,50 %
	nach Prüfungen	24,9	0,999832	-387	12.676	

Im Großen und Ganzen sind die Abweichungen der Steigungen der Regressionsgeraden in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 sehr gering. Nur die Messschraube MS-26 weist sowohl im DMS oben als auch im DMS unten nach den Prüfungen Abweichungen von über zehn Prozent im Vergleich zu den Kalibrierungsergebnissen davor auf. Abgesehen davon bestätigen die Ergebnisse eine einwandfreie Funktion der Messschrauben.

Bei den nachträglichen Kalibrierungsprüfungen der Messschrauben wurde zusätzlich zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine auch die Kraft in der Messschraube, welche mittels vorhandener Regressionsgerade ermittelt wurde, aufgezeichnet. Anschließend erfolgte ein Vergleich dieser gemessenen Kräfte. An dieser Stelle werden die Auswertungen der Kalibrierungsprüfungen der Messschrauben MS-16 und MS-17 abgebildet, wobei sich die Ergebnisse aller weiteren Messschrauben im Bereich zwischen den beiden Messschrauben bewegen. In den nachfolgenden Diagrammen sind der Vergleich der Regressionsgeraden ohne Offset (Abbildung 5-50 und Abbildung 5-53) sowie die Abweichungen der mittels Messschraube ermittelten Kraft von der aufgetragenen Last der Prüfmaschine prozentuell (Abbildung 5-51 und Abbildung 5-54) und in absoluten Werten (Abbildung 5-52 und Abbildung 5-55) dargestellt.

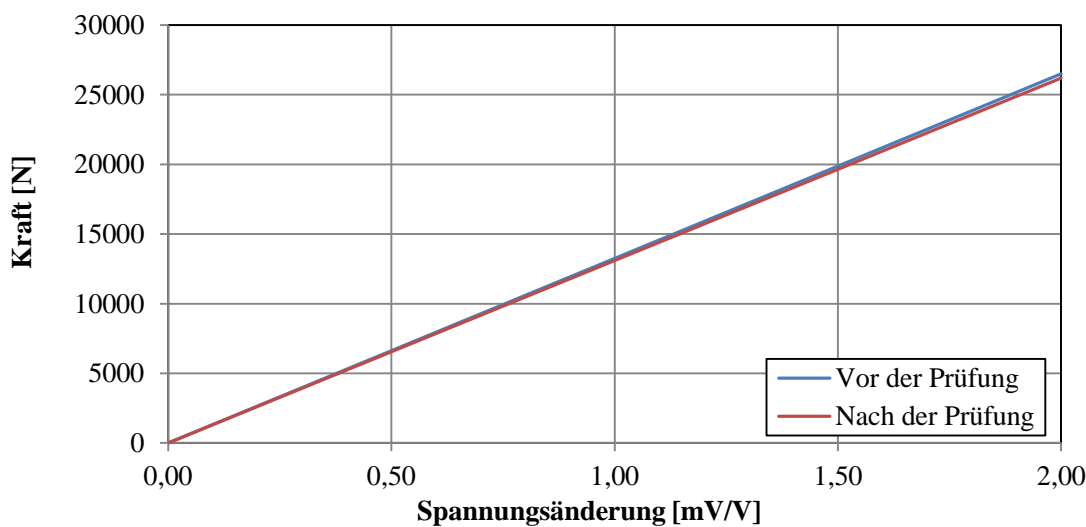


Abbildung 5-50: Regressionsgeraden von MS 16 vor und nach dem Einsatz bei den Hauptprüfungen

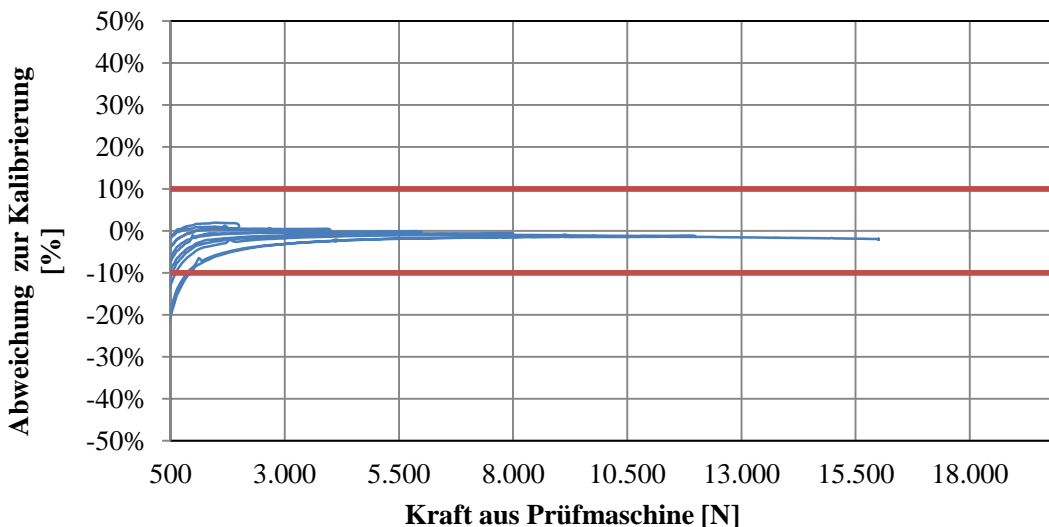


Abbildung 5-51: Abweichung der gemessenen Kraft von MS 16 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in %)

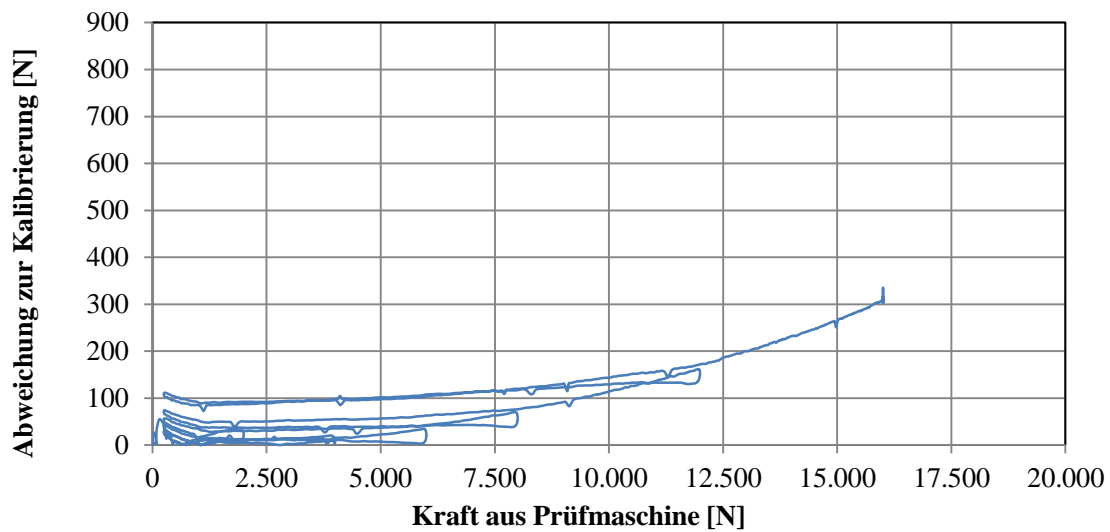


Abbildung 5-52: Abweichung der gemessenen Kraft von MS 16 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in N)

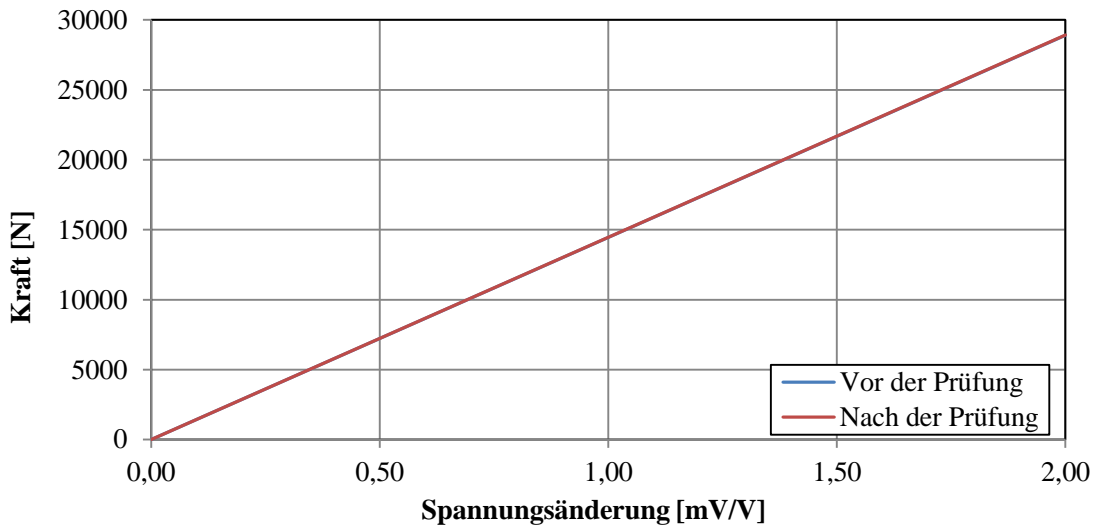


Abbildung 5-53: Regressionsgeraden von MS 17 vor und nach dem Einsatz bei den Hauptprüfungen

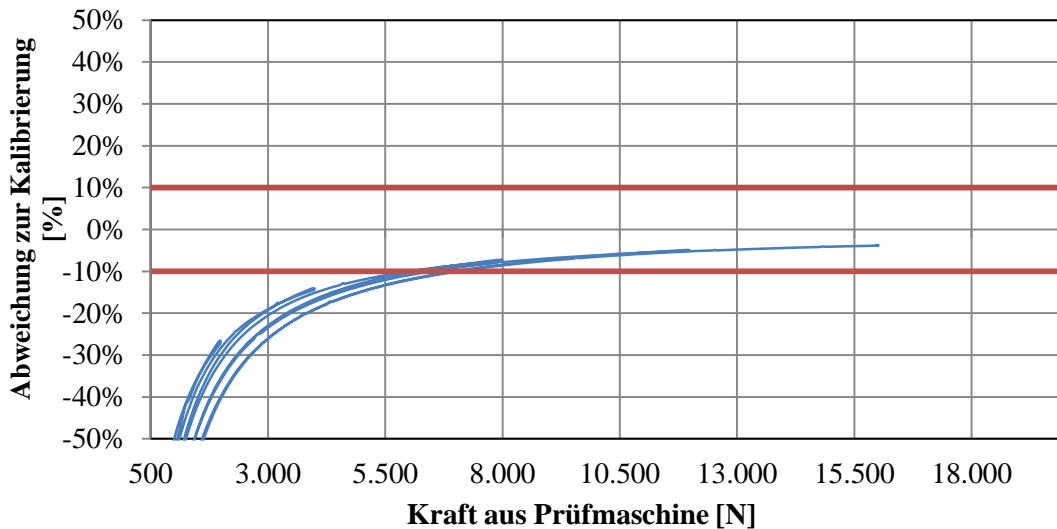


Abbildung 5-54: Abweichung der gemessenen Kraft von MS 17 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in %)

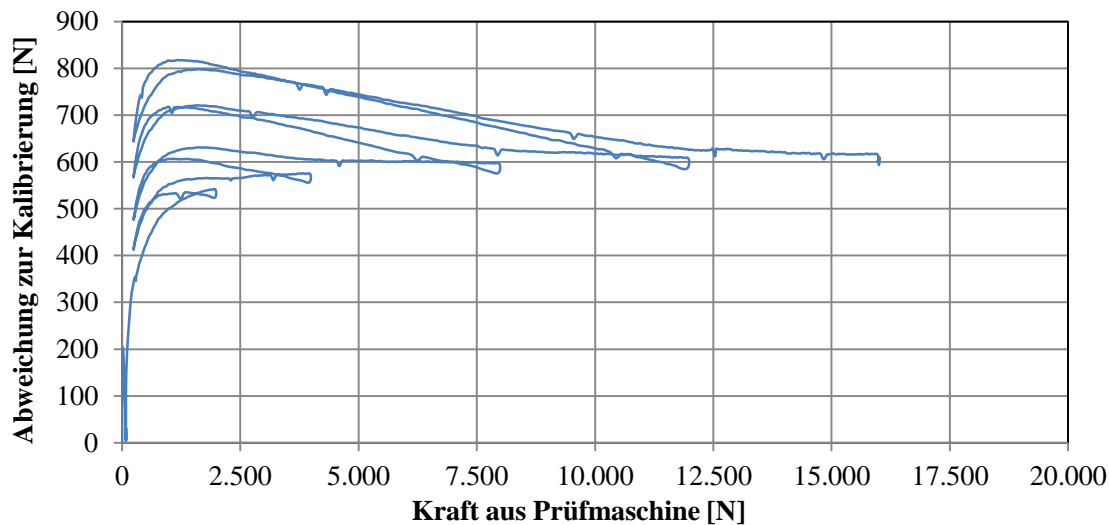
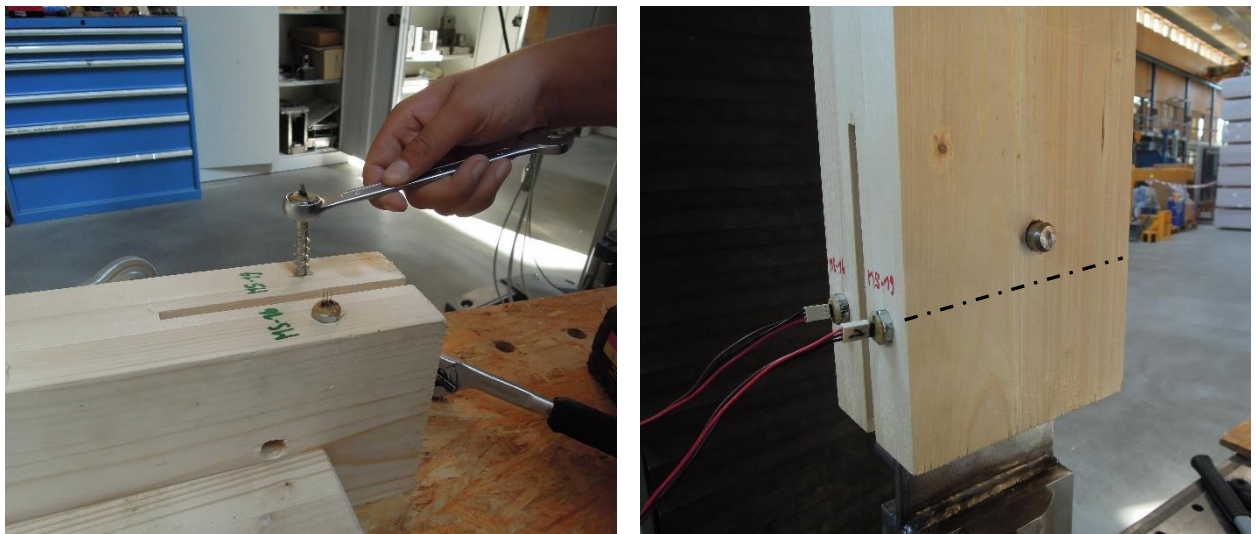


Abbildung 5-55: Abweichung der gemessenen Kraft von MS 17 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in N)

In Abbildung 5-50 und Abbildung 5-53 ist klar ersichtlich, dass die Abweichungen der Steigungen der Regressionsgeraden vor und nach den Prüfungen sehr gering sind, wie auch der Vergleich in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 zeigt. Die Messschraube MS-16 weist im Vergleich zur aufgetragenen Last der Prüfmaschine sehr geringe Abweichungen auf (Abbildung 5-51 und Abbildung 5-52) und gilt somit als sehr präzise. Ab einer Belastung von rund 500 N liegt die Abweichung bereits unter 10 %. Im Gegensatz dazu zeigt die Messschraube MS-17 trotz nahezu identischer Steigungen der Regressionsgeraden vor und nach den Hauptprüfungen (Abbildung 5-53) eine hohe Abweichung zur aufgetragenen Last der Prüfmaschine. Die Unterschiede der Messwerte liegen erst bei rund 6000 N unter 10 % (Abbildung 5-54). Dies ist auf den hohen Offset  $a$  zurückzuführen. Der Unterschied des Offsets der einzelnen Messschrauben lässt vermuten, dass dieser unter anderem von der Applizierung (Schmutz, Lufteinschlüsse, genaue Position) der DMS im Schrauben abhängt. Dies hat zur Folge, dass die Messschrauben mit hohem Offset im niedrigen Lastbereich ( $< 2$  kN) nicht sehr präzise sind, da die Dehnungsänderungen in diesem Bereich sehr klein sind. Die Kraft in den Messschrauben lag bei den Hauptprüfungen jedoch hauptsächlich im Bereich zwischen 6 kN und 10 kN, somit können die Ergebnisse als akzeptabel angesehen werden.

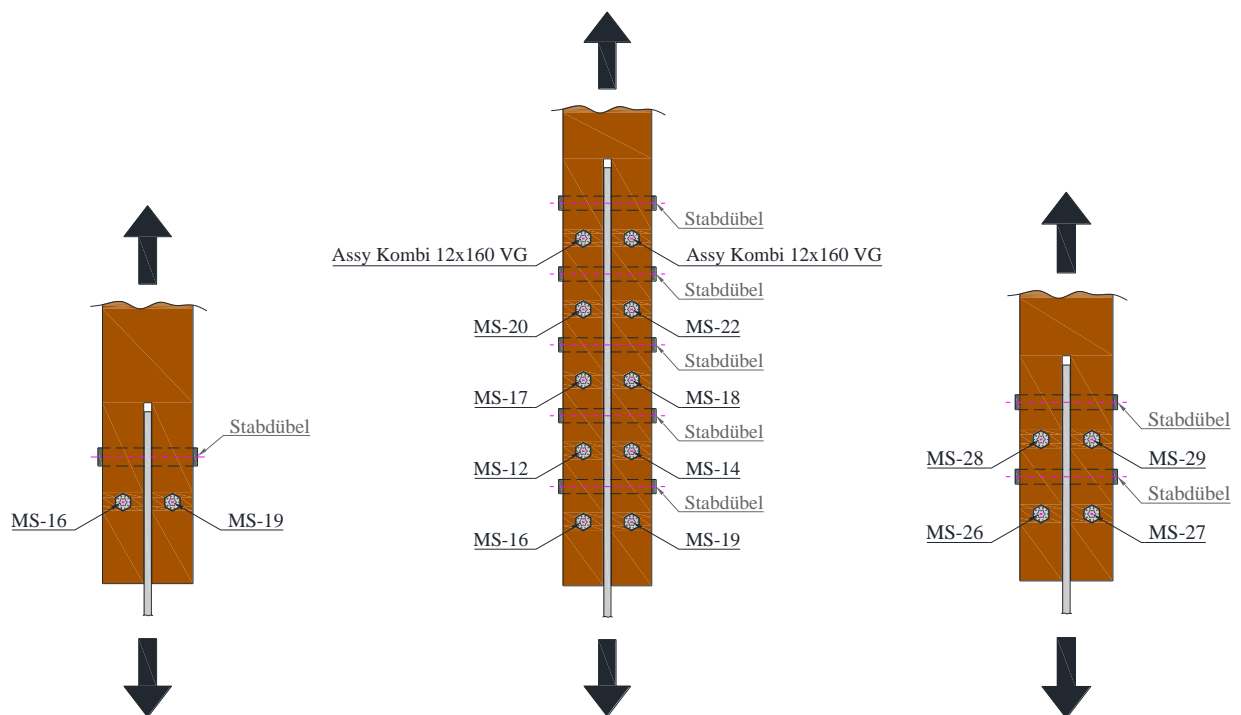
### 5-3.11 EINBRINGEN DER MESSSCHRAUBEN UND MESSUNG DER SPALTKRÄFTE

Der Anschluss der Messschrauben an den Messverstärker erfolgte über das Stecksystem, welches im Innensechsrund angebracht wurde. Somit war es möglich, die Messschrauben über den Außensechskantantrieb mit Hilfe eines Gabelschlüssels mühelos in die vorgebohrten Löcher einzudrehen. Dies geschah vor dem Anschluss der Verbindungskabel zum Messverstärker (Abbildung 5-56).



**Abbildung 5-56: Messschrauben im Prüfkörper: links: Eindrehen der Messschrauben; rechts: Stecksystem**

Für die Prüfungen zur Ermittlung der Kräfte in den Verstärkungsschrauben von Stabdübelverbindungen (Prüfserie eins bis fünf, siehe Tabelle 5-1), wurden die Messschrauben mit den besten Kalibrierungsergebnissen ausgewählt. Abbildung 5-57 zeigt wo die ausgewählten Messschrauben in den verschiedenen Prüfkongfigurationen positioniert wurden. Es standen acht Kabel für den Anschluss der Messschrauben an den Messverstärker zur Verfügung. So kam es, dass für die Prüfserie 4 (ST16-ES-n1-m1) handelsübliche Assy 3.0 Kombi 12 x 160 mm Sechskantschrauben mit Vollgewinde [79] als oberste Verstärkungselemente eingesetzt wurden (Abbildung 5-57; Mitte).



**Abbildung 5-57: Anordnung der Messschrauben: links: Prüfreihe 1-3; Mitte: Prüfreihe 4; rechts: Prüfreihe 5**

## 5-4 DURCHFÜHRUNG DER HAUPTPRÜFUNGEN

Die Prüfungen wurden an der Universalprüfmaschine lignum\_uni\_275 im Lignum Test Center des Instituts für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz durchgeführt. Die auf die Stabdübelverbindung aufgebrachte Prüfkraft wurde mittels Kraftmessdose erfasst. Die Messung und Auswertung der Kraft in den Messschrauben erfolgte mit Hilfe des Messverstärkers QuantumX MX840A [92] sowie MX410A [93] und der Messtechnik-Software Catman der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM).



*Abbildung 5-58: Universalprüfmaschine und Messverstärker QuantumX MX840A und MX410A*

Um zu kontrollieren, ob der erwartete Versagensmechanismus und die errechnete Tragfähigkeit der Verbindung erreicht werden, wurde für jede Prüfserie ein unverstärkter Vorversuch ohne Verstärkungsschrauben durchgeführt.



## 5-4.1 PRÜFKONFIGURATION UND PRÜFABLAUF

Die Abmessungen der Prüfkongfigurationen und zugehörige Erläuterungen sind in Abschnitt 5-3.4 zu finden. In Abbildung 5-59 ist exemplarisch die Konfiguration der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04 dargestellt und ergänzend beschriftet.

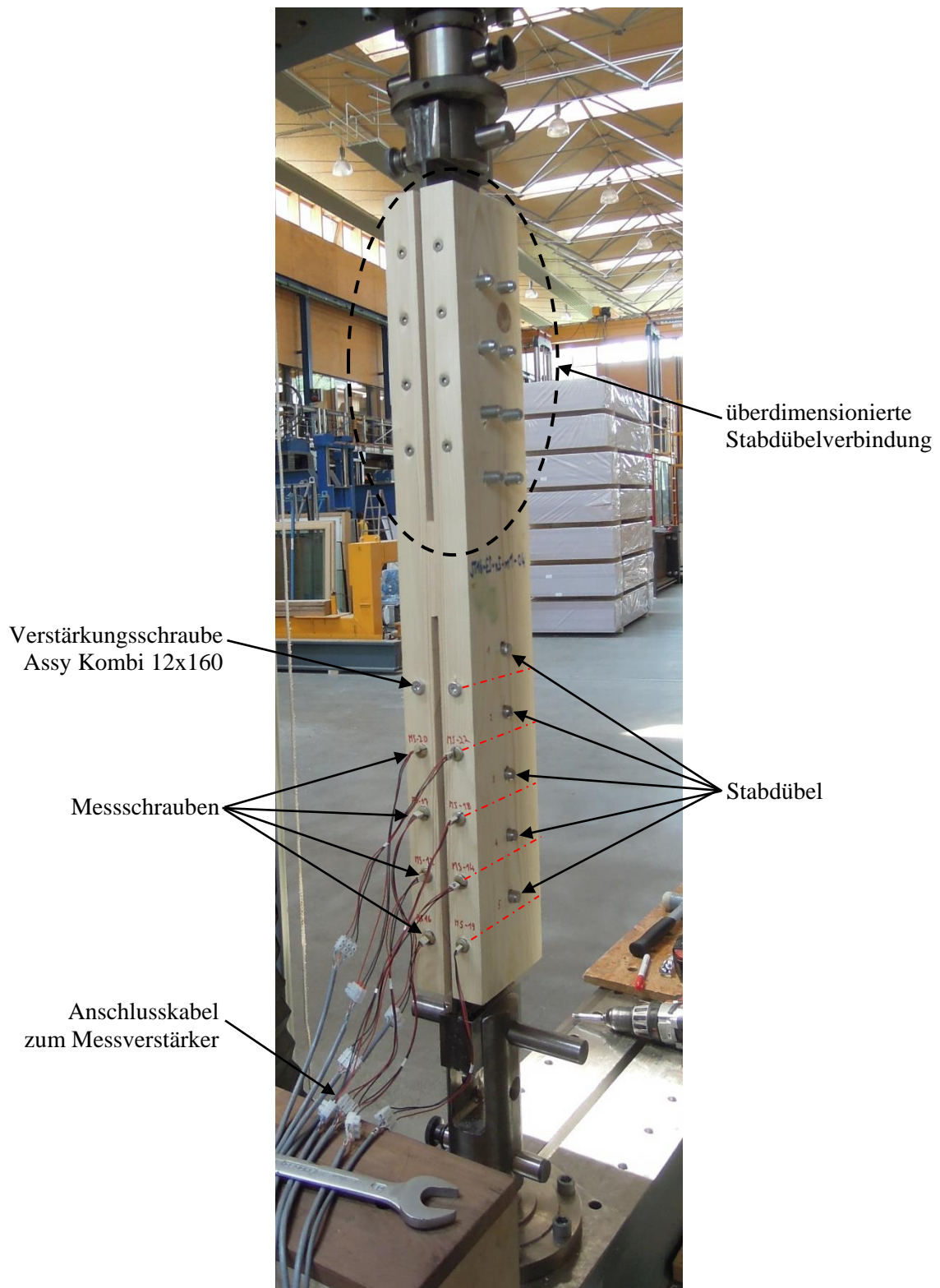


Abbildung 5-59: Konfiguration der Stabdübelprüfung ST16-ES-n5-m1-04



Der Prüfablauf richtete sich nach der zu erwartenden Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung  $F_{\max,est}$  und erfolgte, ähnlich wie bei den Tastversuchen (siehe Abschnitt 5-2.3.1), in Anlehnung an die ÖNORM EN 383 [94]. Zu Beginn wurde die Probe innerhalb von 120 Sekunden bis 40 % von  $F_{\max,est}$  kraftgesteuert ( $a_k$ ) belastet. Diese Last wurde 90 s gehalten, um das Verhalten der Kräfte in den Verstärkungsschrauben bei konstanter Last zu kontrollieren. Anschließend erfolgte eine kraftgesteuerte ( $a_k$ ) Entlastung auf zehn Prozent von  $F_{\max,est}$  innerhalb von 90 s. Auf diesem Level wurde die Kraft wieder 90 s lang gehalten, ehe erneut eine kraftgesteuerte ( $a_k$ ) Belastung auf 70 % von  $F_{\max,est}$  erfolgte. Danach wurde die Kraft weggesteuert ( $a_w$ ) bis zum Versagen der Verbindung erhöht. Der Prüfablauf ist in Abbildung 5-60 grafisch dargestellt.

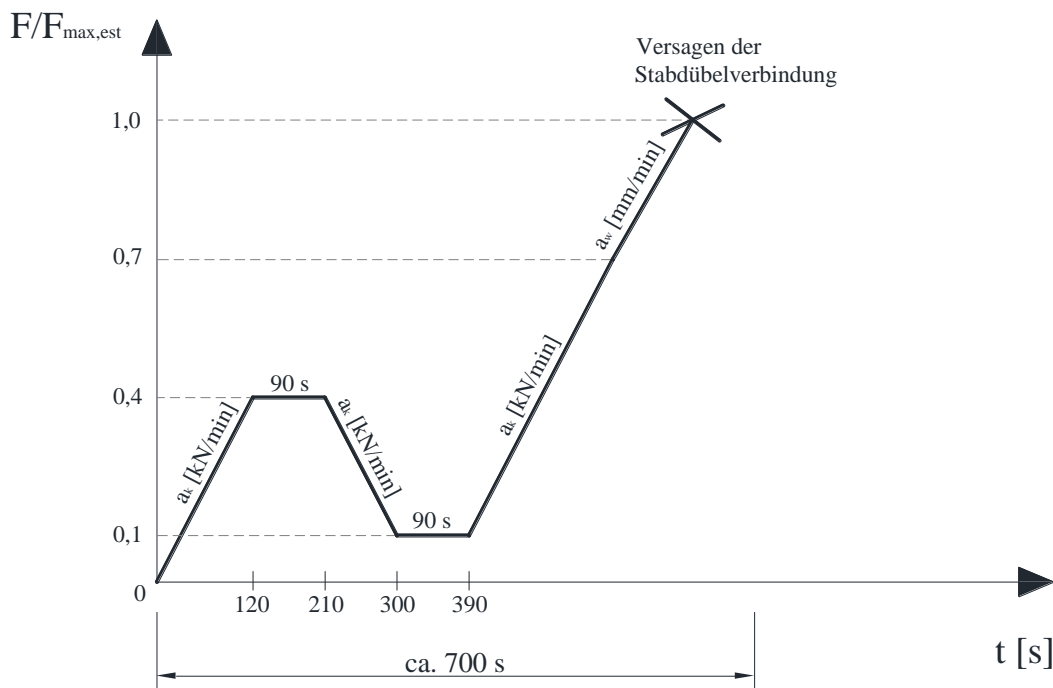


Abbildung 5-60: Ablauf der Stabdübelprüfungen der Hauptserien

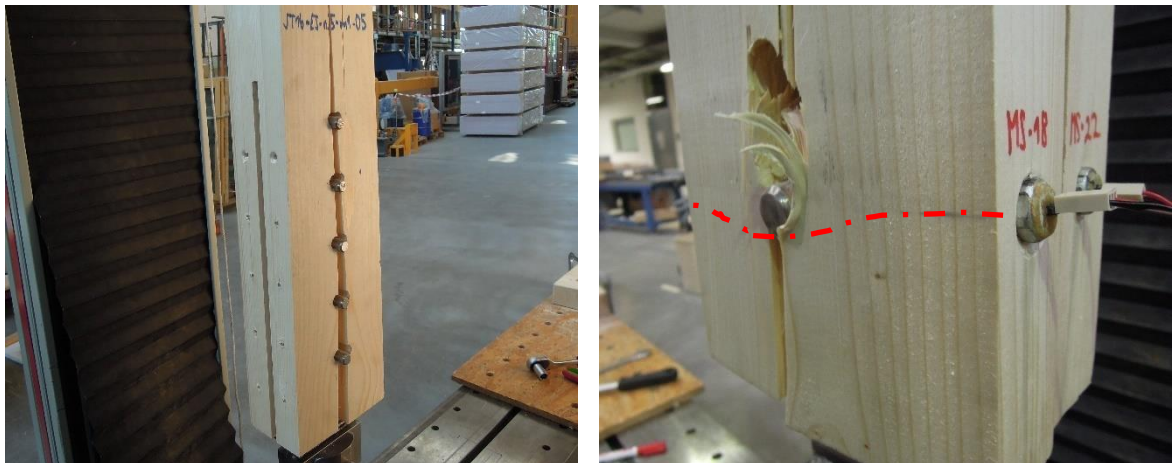
In Tabelle 5-7 sind die maßgebenden Parameter für den Prüfablauf der jeweiligen Prüfserien angeführt. Die zu erwartende Maximallast  $F_{\max,est}$  wurde vorab nach der Theorie von Johansen [49] ermittelt, wobei der Mittelwert der Tragfähigkeit bestimmt wurde, indem für die Rohdichte des Holzes und für das Fließmoment der Stabdübel bekannte Mittelwerte eingesetzt wurden (vgl. Gleichung (6.4)). Zusätzlich erfolgte eine Überprüfung der Ergebnisse mittels Vorversuchen.

Tabelle 5-7: Parameter für den Prüfablauf der Hauptserien

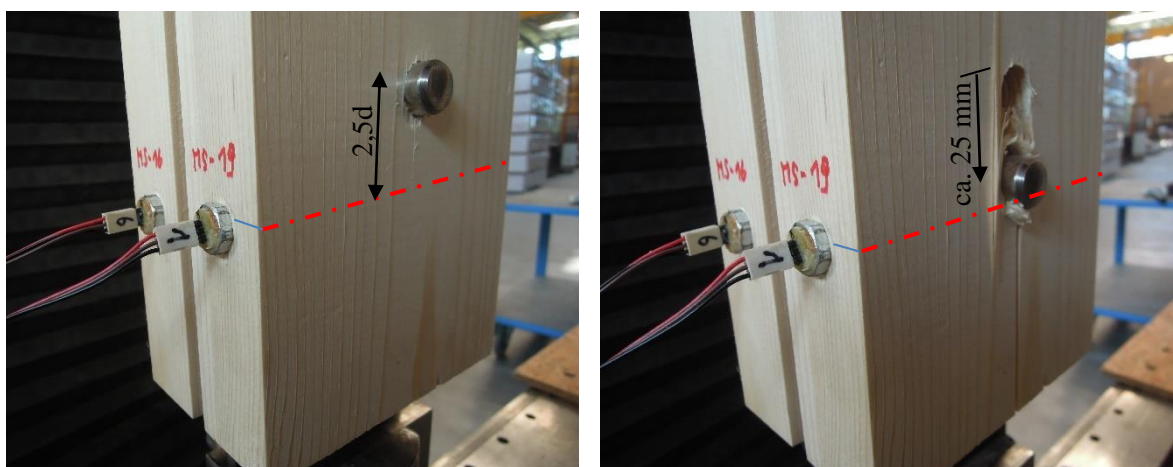
Prüfserie	$F_{\max,est}$ [kN]	10 % · $F_{\max,est}$ [kN]	40 % · $F_{\max,est}$ [kN]	70 % · $F_{\max,est}$ [kN]	$a_k$ [kN/min]	$a_w$ [mm/min]
ST16-ST-n1-m1	32,0	3,20	12,8	22,4	6,40	1,0
ST16-ES-n1-m1	42,0	4,20	16,8	29,4	8,40	1,0
ST20-ES-n1-m1	50,4	5,04	20,2	35,3	10,1	1,0
ST16-ES-n5-m1	168	16,8	67,2	118	33,6	1,0
ST16-ES-n2-m2	210	21,0	84,0	147	42,0	1,0

Es galt die Prüfung abubrechen, bevor es zum Verbiegen bzw. zur Beschädigung der Messschrauben kommt. Das Erkennen des richtigen Zeitpunkts gestaltete sich als schwierig, da die Kraft in den verstärkenden Messschrauben bis zu Schluss stetig anstieg und eine Deformierung der Messschraube von außen nicht ersichtlich war. Es erfolgte ein Herantasten an die maximale Verschiebung der Stabdübel, ohne die Messschrauben zu beschädigen. So kam es, dass die Prüfserie 1 (ST16-ST-n1-m1) zu einem früheren Zeitpunkt abgebrochen wurde als die restlichen Prüfserien. Dies hat zur Folge, dass die resultierende Kraft in den Messschrauben geringer war, da die Stabdübel eine kleinere Verschiebung erfuhren.

Die Vorversuche mit der Nummer 00 am Ende der Bezeichnung wurden jeweils ohne Verstärkungsschrauben durchgeführt, um zu überprüfen, ob und bei welcher Last ein Spalten der Stabdübelverbindung auftritt bzw. wie duktil die Verbindung ist (Abbildung 5-61; links). Mindestens vier Prüfungen jeder Serie wurden so weit durchgeführt, bis die maximale Kraft in der Messschraube erreicht wurde, ohne sie zu zerstören. Die Prüfung wurde abgebrochen sobald die Stabdübeln die Messschrauben berührten, (Abbildung 5-62). Jeweils ein Versuch wurde mit handelsüblichen Assy 3.0 Kombi 12 x 160 mm Sechskantschrauben mit Vollgewinde [79] als Verstärkungselemente durchgeführt und erst beim kompletten Versagen der Stabdübelverbindung und der Verstärkungsschrauben abgebrochen (Abbildung 5-61; rechts). Ein exemplarisches Bild der Verformung der Verstärkungsschrauben bei einer Prüfung bis zum absoluten Versagen der Verbindung wird in Abbildung 5-49 gezeigt.



**Abbildung 5-61: Versagen der Stabdübelverbindungen: links: Aufspalten einer unverstärkten Verbindung; rechts: Versagen der Verstärkungsschrauben**



**Abbildung 5-62: Versagen der Stabdübelverbindung: links: vor Prüfbeginn; rechts: Prüfung der Stabdübel bis zur Berührung der Messschrauben**

## KAPITEL 6: AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER PRÜFERGEBNISSE

### 6-1 BEEINFLUSSENDE HOLZTECHNOLOGISCHE PARAMETER

In diesem Abschnitt sind die ermittelten holztechnologischen Parameter angeführt, welche der Analyse und Interpretation der Prüfergebnisse dienen.

#### 6-1.1 ERMITTLUNG DER HOLZFEUCHTE

Die Holzfeuchtigkeit wurde mittels Gleichung (6.1) gemäß ÖNORM EN 13183-1 [95] berechnet. Zu diesem Zweck erfolgte unmittelbar nach der Prüfung die Entnahme von Darr- und Rohdichteproben aus den Prüfkörpern, welche jeweils den gesamten Querschnitt repräsentierten. Es wurde jeweils eine Probe aus beiden Seitenhölzern der Stabdübelverbindung entnommen. Diese hatten eine Abmessung von rund 20 x 45 x 160 mm. Anschließend wurden die Masse der Darrprobe nach der Prüfung bzw. vor der Trocknung und die Masse im darrtrockenen Zustand ermittelt.

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (6.1)$$

mit:            u        ...     Holzfeuchtigkeit der Probe [%]  
                  m<sub>u</sub>     ...     Probenmasse bei einer Holzfeuchtigkeit u [g]  
                  m<sub>0</sub>     ...     Probenmasse im darrtrockenen Zustand [g]

#### 6-1.2 ERMITTLUNG DER ROHDICHTE UND BEZUG AUF 12 % HOLZFEUCHTE

Zur Ermittlung der Rohdichte wurden die in Abschnitt 6-1.1 erwähnten Darrproben vor der Trocknung zusätzlich vermessen. Die Berechnung der Rohdichte erfolgte mittels Gleichung (6.2) nach ÖNORM ISO 3131 [96].

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (6.2)$$

mit:            ρ<sub>u</sub>     ...     Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit u [kg/m<sup>3</sup>]  
                  m<sub>u</sub>     ...     Probenmasse bei einer Holzfeuchtigkeit u [kg]  
                  V<sub>u</sub>     ...     Probenvolumen bei einer Holzfeuchtigkeit u [m<sup>3</sup>]

Um die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfkörper besser vergleichen zu können, erfolgte eine Korrektur der Rohdichte auf eine Referenzholzfeuchtigkeit von 12 % gemäß ÖNORM EN 384 [97].

$$\rho_{12} = \rho_u \left[ 1 + (12 - u) \frac{0,5}{100} \right] \quad (6.3)$$

mit:	$\rho_u$	...	Rohdichte bei einer Holzfeuchtigkeit $u$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
	$\rho_u$	...	Rohdichte bei einer Referenzholzfeuchtigkeit von $u = 12 \%$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
	$u$	...	Holzfeuchtigkeit der Probe [%]

### 6-1.3 JAHRINGLAGE

Die Jahrringlage ist ein weiteres holztechnologisches Merkmal, welches Einfluss auf die Spalteigenschaften von Holz hat. Es galt festzuhalten, welche Orientierung die mittlere Jahrringlage des Seitenholzes zur Stabdübelachse bzw. Rissfront hat. Dies ist entscheidend, da sich, wie in den Tastversuchen beobachtet werden konnte, bei einem geringen Winkel  $\alpha$  zwischen Jahrringtangente und Stabdübelachse die Spaltfestigkeit des Holzes vermindert und die Gefahr des Blockscherens erhöht. Aus diesem Grund erfolgte für die Prüfserien eins bis fünf eine pauschale Unterscheidung in tangentialer und radialer Orientierung der Jahrringtangente zur Stabdübelachse. In Abbildung 6-1 sind zur Verdeutlichung erneut die Bruchbilder der Tastversuche dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass ein Ausscheren eines Holz-Blockes unter dem Stabdübel und ein verstärktes Spaltversagen jeweils nur auf jener Seite eintraten, auf welcher der Winkel der Jahrringtangente  $\alpha$  sehr klein ist.

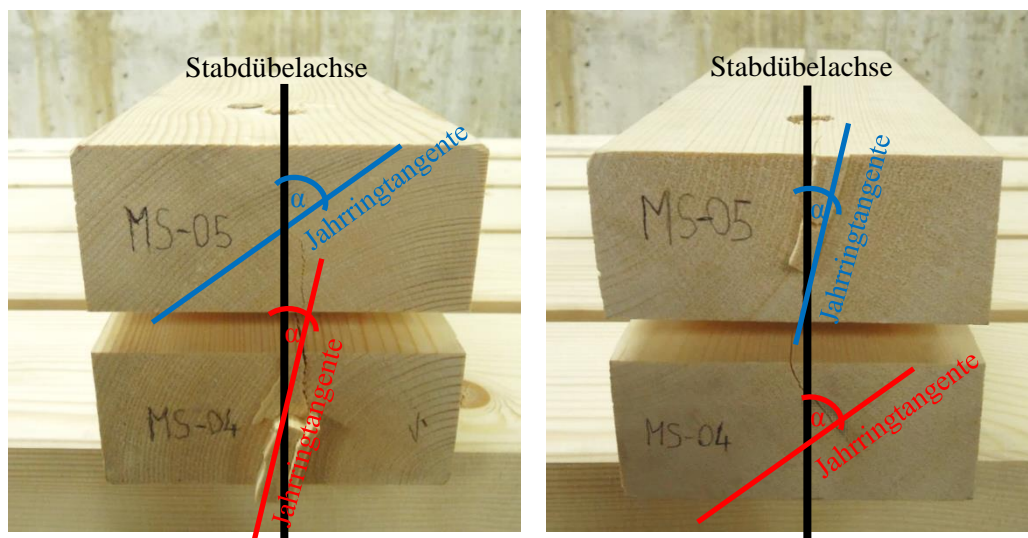


Abbildung 6-1: Winkel zwischen Jahrringtangente und Stabdübelachse

## 6-2 AUSWERTUNG DER PRÜFSERIEN UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE

In den Abschnitten 6-2.1 bis 6-2.4 sind die Ergebnisse der Hauptprüfungen angeführt, wobei jeweils eine Übersichtstabelle mit den Ergebnissen aller Prüfungen der jeweiligen Serie dargestellt wird. Zudem wird ein Kraft-Zeit-Diagramm aller Prüfungen der Serie abgebildet, welches die Prüfabläufe repräsentiert. Je Prüfserie wird anschließend eine repräsentative Prüfauswertung angeführt und anhand der Bruchbilder diskutiert. Alle weiteren Diagramme, Tabellen und Bruchbilder der Hauptprüfungen sind dem ANHANG B zu entnehmen. Die Ergebnisse der Prüfserie ST-16-ST-ES-n1-m1 werden an dieser Stelle nicht weiter diskutiert und befinden sich zur Gänze im ANHANG B-1, da sich bei all diesen Prüfungen ein Fließmoment und somit nicht der gewünschte Versagensmechanismus „Spalten“ ausbildete und die Prüfung zur Vermeidung einer Beschädigung der Messschraube frühzeitig abgebrochen wurden. Somit kam es bei diesen Prüfungen zu keinem Spaltversagen und die Kraft in den Verstärkungsschrauben blieb verhältnismäßig klein.

Die Übersichtstabelle gliedert sich in Spalten mit folgenden Werten für jede Prüfung:

- $u$  – Holzfeuchtigkeit [%]

Die Holzfeuchtigkeit  $u$  wurde für jedes Seitenholz separat ermittelt (Abschnitt 6-1.1). In der Auswertungstabelle wird jeweils der Mittelwert jedes Prüfkörpers angeführt.

- $\rho_i$  – Rohdichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Auch die Rohdichte  $\rho$  wurde für jedes Seitenholz separat bestimmt (6-1.2) und wurde in der Übersichtstabelle je Prüfkörper gemittelt.

Alle Rohdichte- und Holzfeuchtigkeitswerte der einzelnen Seitenhölzer je Prüfkörper sind im Anhang B-6 angeführt.

- $F_{\text{Joh}}$  – mittlere Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung [N] nach JOHANSEN [56]

Die mittlere Tragfähigkeit je Stabdübel und Scherfuge wurde nach Gleichung (6.4) berechnet:

$$F_{\text{Joh}} = R_{\text{mean}} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,\text{mean}} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,\text{mean}} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ 2 + \sqrt{\frac{4 \cdot M_{y,\text{mean}}}{f_{h,\text{mean}} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \Delta R_d \\ 2 \cdot \sqrt{M_{y,\text{mean}} \cdot f_{h,\text{mean}} \cdot d} + \Delta R_d \end{array} \right\} \quad (6.4)$$

mit:  $f_{h,\text{mean}}$  ... mittlere Lochleibungsfestigkeit [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ];  
 $f_{h,\text{mean}} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_i$   
 $M_{y,\text{mean}}$  ... mittleres Fließmoment [Nmm] nach BLASS und COLLING [98]

$$M_{y,\text{mean}} = \frac{f_{y,\text{ef}} \cdot d^3}{6} \quad (6.5)$$

$$f_{y,\text{ef}} = \min \left\{ \begin{array}{ll} \frac{0,9 \cdot (f_y + f_u)}{2} & \text{für } f_u < 450 \text{ MPa} \\ 0,9 \cdot f_u & \text{für } f_u > 450 \text{ MPa} \end{array} \right. \quad (6.6)$$

$\rho_i$  ... Rohdichte des Prüfkörpers [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



d	...	Durchmesser des Stabdübels [mm]; hier: 16 mm bzw. 20 mm
t <sub>1</sub>	...	Seitenholzdicke [mm]; hier: 45 mm
ΔR <sub>d</sub>	...	Seilwirkung [N]; hier: 0 N

Für die Stabdübel der Güte S235 (Prüfserie ST16-ST-n1-m1) wurde die Annahme  $f_{y,ef} = 600 \text{ N/mm}^2$  in Anlehnung an [98] getroffen.

Für die Edelstahl-Stabdübel mit einem Durchmesser von 16 mm wurde ein mittleres Fließmoment von  $M_{y,mean} = 480.000 \text{ Nmm}$  angenommen, welches aus Vorversuchen bekannt war. Für diese Prüfserien war jedoch ausschließlich das Lochleibungsversagen maßgebend.

- $F_{max,P}$  – maximale Kraft im Zuge der Prüfung am Plateau der Kraft-Weg-Kurve [N] (vgl. Abbildung 6-2).
- $F_{max}$  – maximale Kraft im Zuge der Prüfung [N]

Bei manchen Prüfkörpern wurde die Prüfung so lange fortgesetzt bis ein „Einhängen“ der Stabdübel in die Verstärkungsschrauben stattfand. Als Konsequenz stieg die Kraft durch den Einhängeneffekt weiter an (vgl. Abbildung 6-2).

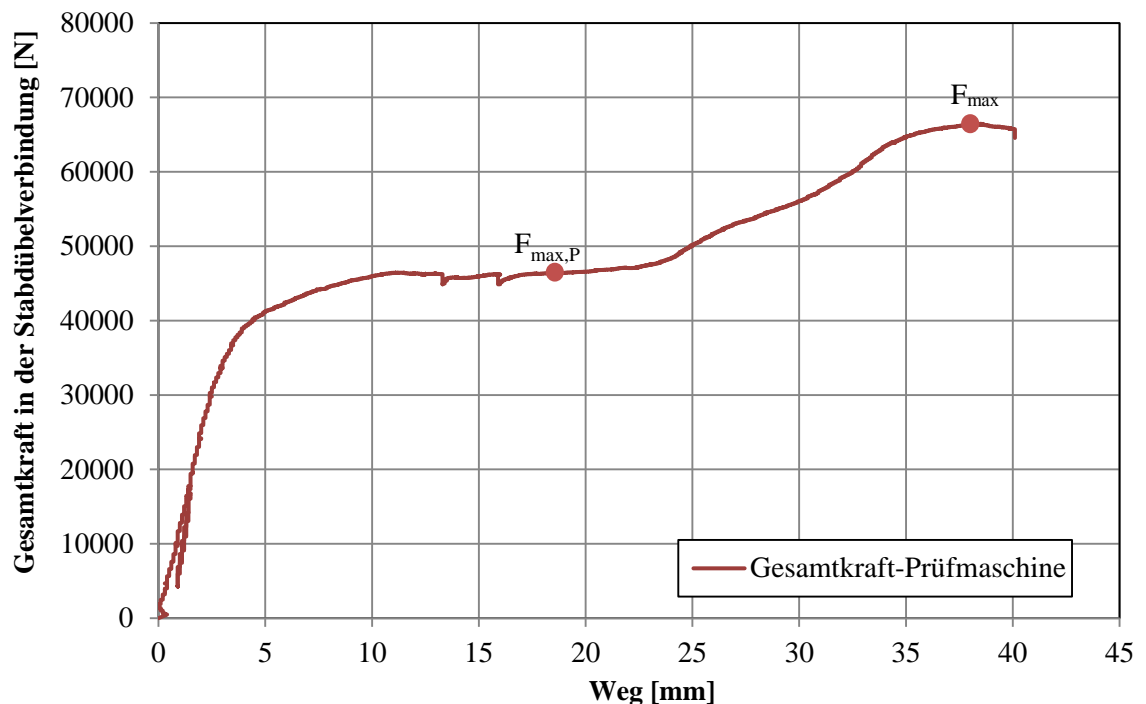


Abbildung 6-2: Beispiel für die maximale Kraft der Prüfmaschine  $F_{max}$  und Kraft am Plateau  $F_{max,P}$

- $\eta_S$  – Auslastung der Messschraube in Bezug auf die Ausziehtragfähigkeit [%]  
 $\eta_S$  ergibt sich aus dem Verhältnis der maximalen Kraft in der Messschraube zur mittleren axialen Tragfähigkeit der Schraube. Hierfür wurde die Berechnung der mittleren Ausziehtragfähigkeit nach RINGHOFER et al. [88] herangezogen.

$$R_{ax,mean} = 0,014 \cdot \rho_i^{1,11} \cdot d^{-0,33} \cdot d \cdot \pi \cdot l_{ef} \quad (6.7)$$

mit:	$R_{ax,mean}$	...	mittlere axiale Ausziehtragfähigkeit der Schraube [N]
	$\rho_i$	...	Rohdichte des Prüfkörpers [ $\text{kg/m}^3$ ]
	d	...	Durchmesser der Schraube [mm]; hier: d = 12 mm
	$l_{ef}$	...	effektive Einschraublänge [mm]; hier: $l_{ef} = 70 \text{ mm}$



- $\Phi_{P,j}$  – Verhältnis von  $F_{\max, \text{Plateau}}$  zu  $F_{\text{Johansen}}$  [%]
- $\Phi_{v-u}$  – Verhältnis von  $F_{\max, \text{Plateau}}$  der verstärkten Verbindung zu  $F_{\max, \text{Plateau}}$  der unverstärkten Verbindung [%]
- Spalten [j,n/b,e]

In dieser Spalte wird angegeben, ob ein Spaltversagen der Stabdübelverbindung auftrat. Dies ist auch in den beigefügten Bruchbildern zu erkennen. Dabei bedeuten:

j ... ja  
n ... nein  
b ... beidseitig  
e ... exzentrisch

- $\eta_{MS}$  – maximaler Kraftanteil in der Messschraube [%]

$\eta_{MS}$  gibt den maximalen Anteil der Kraft in der verstärkenden Messschraube wieder. Dieser wurde als Verhältnis der maximalen Kraft in der Messschraube zur maximalen Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge ermittelt, wobei hierfür  $F_{\max, \text{Plateau}}$  herangezogen und durch die Anzahl der Stabdübel und Scherfugen dividiert wurde. Dieser Wert wird anschließend mit der Vorgabe der ÖNORM B 1995-1-1 [59] (30 % Verstärkungskraft) verglichen. Es galt darauf zu achten, dass die maximale Kraft in der Messschraube zum Zeitpunkt vor der Berührung der Stabdübel mit den Messschrauben (Einhängeeffekt) ausgewertet wird (vgl. Abbildung 6-3), da durch ein Verbiegen der Messschrauben die Messung verfälscht wird und die Messwerte überproportional ansteigen. Je Serie wurde je eine Prüfung unverstärkt und eine Prüfung verstärkt jedoch ohne Messschrauben durchgeführt. Für alle weiteren Prüfungen mit Messschrauben als Verstärkungselement wurde  $\eta_{MS}$  ermittelt. Dabei bedeuten in der Spalte  $\eta_{MS}$ :

unverst. ... unverstärkte Prüfung

k. MS ... verstärkt jedoch ohne Messschrauben; diese Prüfung wurde bis zum Versagen der Verstärkungsschrauben durchgeführt.

Für alle Prüfserien der Hauptprüfungen erfolgte eine statistische Auswertung, wobei der minimale Wert (Min.), der maximale Wert (Max.), der Median ( $\bar{x}_{\text{med}}$ ), der Mittelwert ( $\bar{x}_{\text{arith.}}$ ), die Standardabweichung ( $\sigma$ ) und der Variationskoeffizient (COV) ermittelt wurden. Die für die Statistik unberücksichtigte unverstärkte Verbindung, sowie jene ohne Messschrauben sind in der Tabelle in hellgrüner Farbe hinterlegt.

Für jede Prüfung wurde ein Kraft-Weg-Diagramm erstellt, welches den Verlauf der Gesamtkraft in der Stabdübelverbindung (Kraft aus Prüfmaschine) und die zugehörigen gemessenen Kräfte in den Messschrauben sowie deren Mittelwert wiedergibt (Abbildung 6-3). Der auf der Abszisse aufgetragene Weg ist jener, welcher von der Prüfmaschine aufgezeichnet wurde. Die Ordinate der Messschraubenkraft auf der rechten Seite des Diagramms wurde im Vergleich zur Prüfmaschinenkraft skaliert, um die Ergebnisse übersichtlich darzustellen. Die Kurve „Gesamtkraft-Prüfmaschine“ wurde jeweils mit der maximalen Kraft am Plateau, auf die sich die Messschraubenkräfte beziehen, gekennzeichnet. Der Anteil der Kraft in den Messschrauben in Bezug zur Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge wird jeweils an der Stelle  $F_{\max, \text{Plateau}}$  und vor dem „Einhängen des Stabdübels“ ( $\eta_{MS}$ ) gekennzeichnet und neben der Kraft in Newton auch in Prozent (der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge) angegeben. In Abbildung 6-3 ist eine exemplarische Auswertung dargestellt und beschrieben.

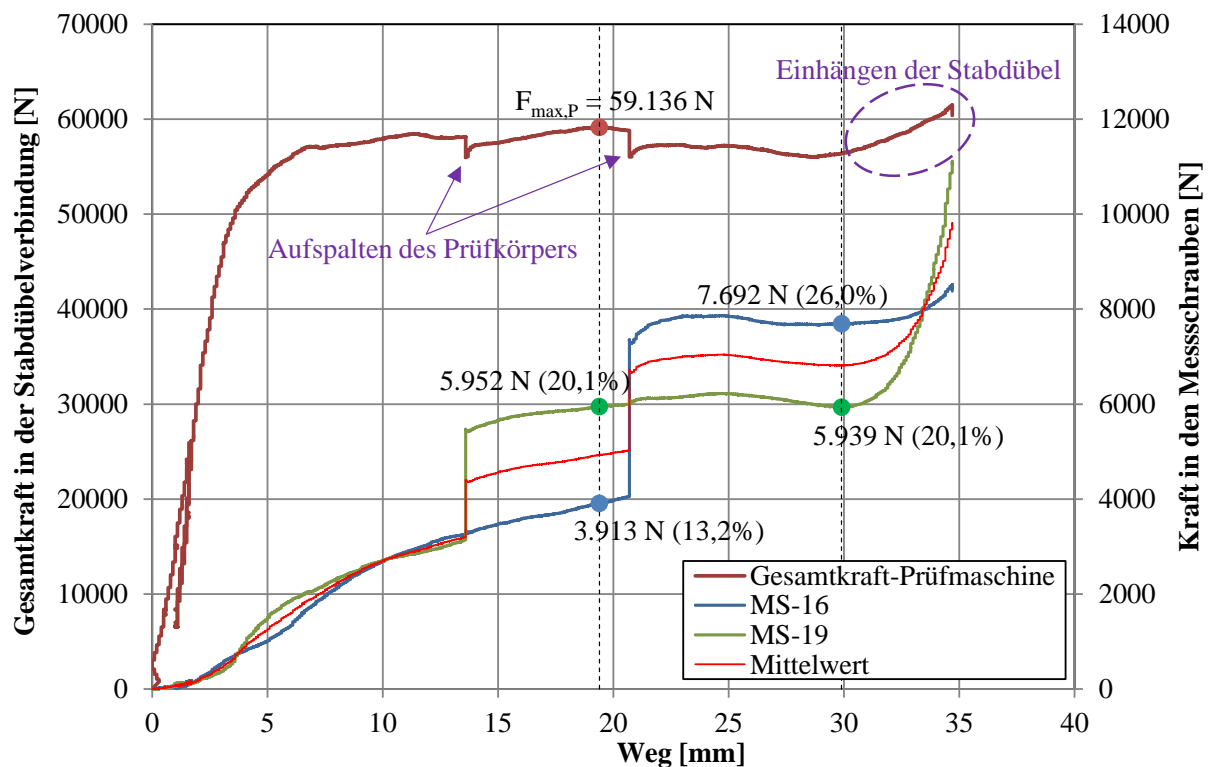


Abbildung 6-3: exemplarische Auswertung – Kraftanteil in der Messschraube

In Abbildung 6-3 ist deutlich erkennbar, dass beim Auftreten eines Risses (Aufspalten), die Kraft des Zusammenhaltes des Prüfkörpers quer zur Faserrichtung von der jeweiligen Messschraube übernommen wird und sich die gemessene Kraft in der Schraube schlagartig erhöht. Um einen Zusammenhang zwischen Aufspalten, Kraft in der Messschraube und Jahrringlage herstellen zu können, werden die Bruchbilder und Jahrring-Scans jeder einzelnen Prüfung angeführt, wobei in den Abschnitten 6-2.1 bis 6-2.4 jeweils eine Prüfung je Serie diskutiert wird, die restlichen Ergebnisse sind im ANHANG B zu finden

## 6-2.1 PRÜFSERIE ST16-ES-N1-M1

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n1-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{V-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	11,8%	453	44.885	47.955	66.460	k. MS	107%	146%	j/b	k. MS
01	10,8%	429	42.554	41.004	41.004	32,0%	96,4%	125%	j/b	26,6%
02	9,92%	379	37.577	33.502	33.502	26,6%	89,2%	102%	j/e	23,8%
03	12,0%	465	46.171	45.005	45.121	41,7%	97,5%	137%	j/b	32,2%
04	11,3%	472	46.771	49.760	51.051	48,7%	106%	152%	j/b	33,8%
05	10,3%	380	37.702	32.782	32.782	unver.	86,9%	100%	j/e	unver.
Min.	9,92%	379	37.577	33.502	33.502	26,6%	89,2%	102%	-	23,8%
$\bar{X}_{med}$	11,1%	447	44.362	43.005	43.063	36,8%	96,9%	131%	-	29,4%
Max.	12,0%	472	46.771	49.760	51.051	48,7%	106%	152%	-	33,8%
$\bar{X}_{arith.}$	11,0%	436	43.268	42.318	42.670	37,3%	97,3%	129%	-	29,1%
$\sigma$	0,857%	42,6	4.227	6.881	7.373	9,85%	7,07%	21,0%	-	4,68%
COV	7,79%	9,77%	9,77%	16,3%	17,3%	26,4%	7,26%	16,3%	-	16,1%

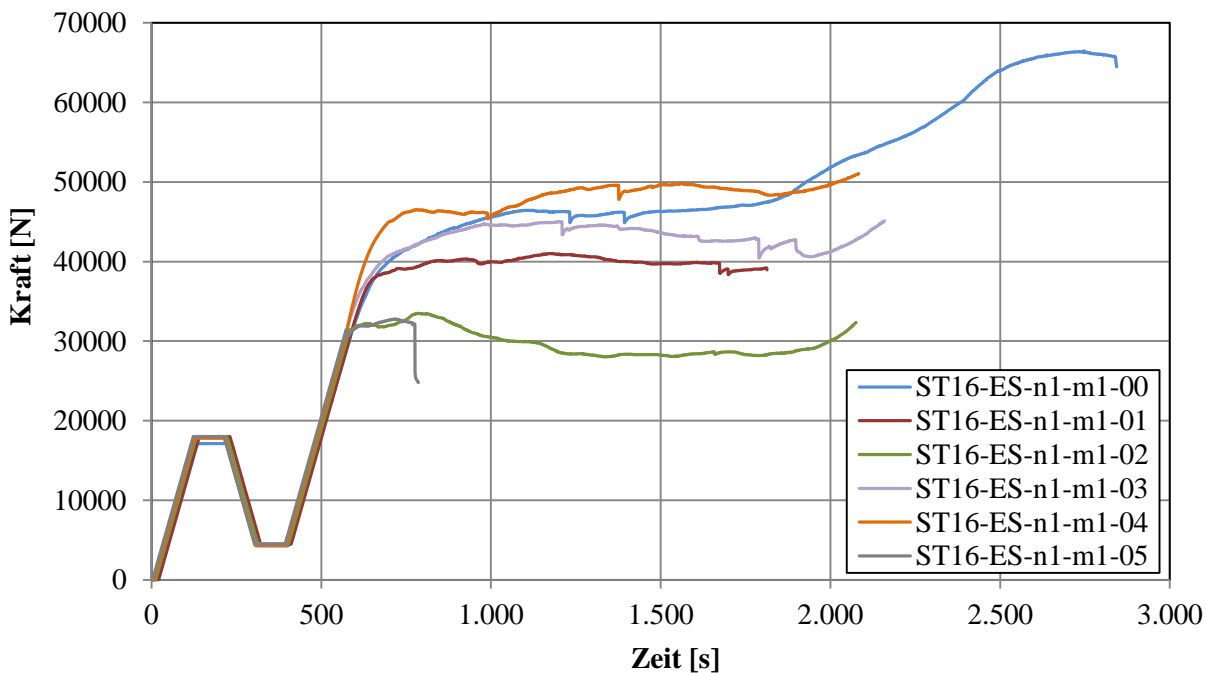


Abbildung 6-4: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1

Wie in Tabelle 6-1 und Abbildung 6-4 ersichtlich ist, liegen die Tragfähigkeiten der verstärkten Stabdübelverbindungen um rund 30 % höher als jene der unverstärkten Verbindung. Einzig die Prüfung ST16-ES-n1-m1-02 liegt deutlich unter den Tragfähigkeiten der restlichen verstärkten Verbindungen. Dies ist auf die vergleichsweise geringe Rohdichte des Prüfkörpers zurückzuführen, folglich ist auch der prozentuelle Anteil der Verstärkungskraft am niedrigsten. Weiters ist erkennbar, dass die verstärkten im Gegensatz zu unverstärkten Stabdübelverbindungen ein ausgeprägtes plastisches Plateau und somit ein „gutmütigeres“ Versagensverhalten aufweisen. Die Abweichungen der geprüften Tragfähigkeiten der Verbindungen ( $F_{\max,P}$ ) im Vergleich zu den mittels Gleichung (6.4) errechneten mittleren Tragfähigkeiten nach Johansen ( $F_{Joh.}$ ) liegt bei maximal 10,8 %. Das Verhältnis zwischen maximaler Kraft in der Verstärkungsschraube und maximaler Kraft je Stabdübel und Scherfuge  $\eta_{MS}$  beträgt bei Prüfung ST16-ES-n1-m1-01 26,6 % Dies ist im Vergleich zu den andern Ergebnissen etwas niedriger, da diese Prüfung frühzeitig abgebrochen und nicht bis zur Berührung von Stabdübel und Messschraube durchgeführt wurde. Bei allen verstärkten Prüfkörpern bis auf ST16-ES-n1-m1-02 sind beide Seitenhölzer vom Stabdübel bis zum Hirnholzende aufgerissen. Es wurde eine statistische Auswertung aller mit Messschrauben verstärkten Prüfkörper (01 bis 04) durchgeführt. Im Mittel beträgt  $\eta_{MS} = 29,1 \%$  und liegt nur knapp unter dem in der ÖNORM B 1995-1-1 [59] vorgegebenen Wert von 30%. Im folgenden Abschnitt 6-2.1.1 sind die detaillierten Ergebnisse von Prüfung ST16-ES-n1-m1-04 abgebildet und interpretiert. Alle weiteren Ergebnisse dieser Prüfserie sind dem ANHANG B-2 zu entnehmen.

### 6-2.1.1 Exemplarische Auswertung von Prüfung ST16-ES-n1-m1-04

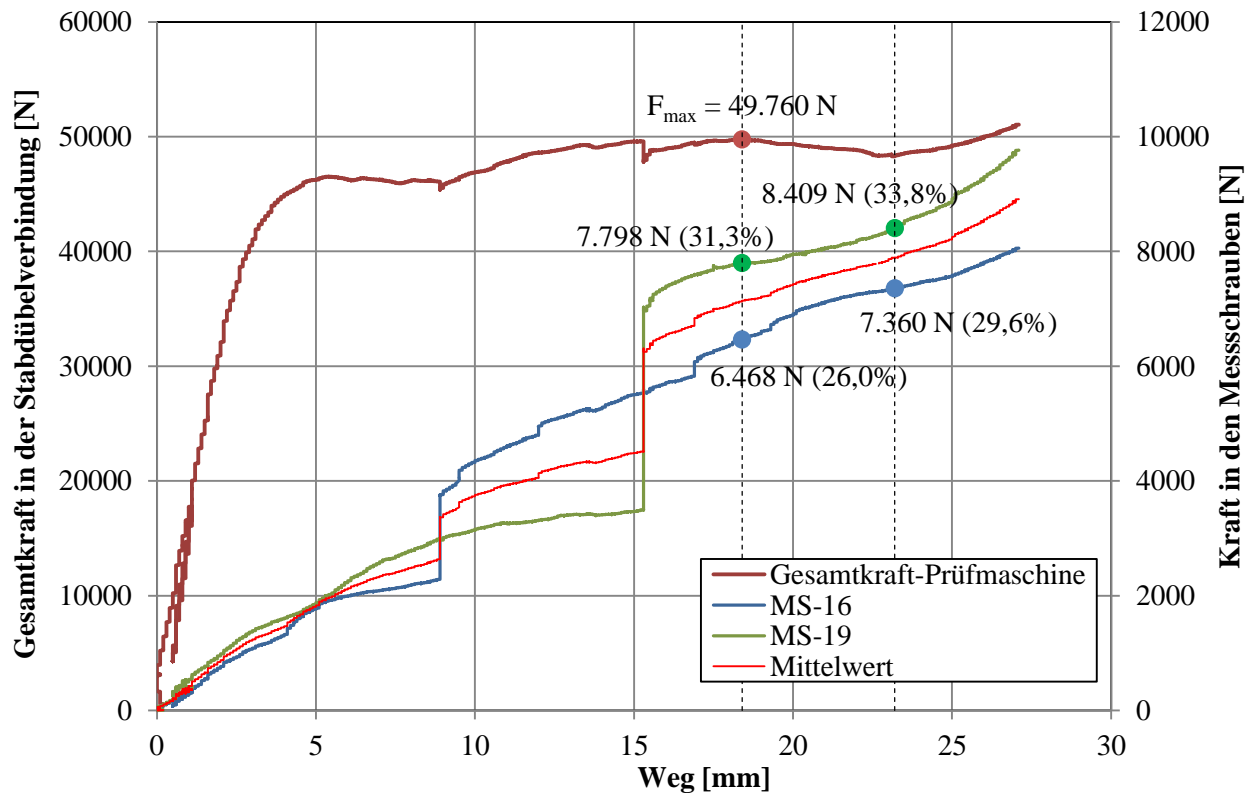


Abbildung 6-5: Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST16-ES-n1-m1-04



Abbildung 6-6: Bruchbilder der Prüfung ST16-ES-n1-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19



Abbildung 6-7: Jahring-Scan der Prüfung ST16-ES-n1-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19

In Abbildung 6-5 ist der Kraft-Weg-Verlauf der Prüfung ST16-ES-n1-m1-04 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Prüfkörper nach rund neun Millimetern Prüfmaschinenweg auf der Seite von MS-16 und nach rund 15 mm auf der Seite von MS-19 aufreißt. Der sprunghafte Kraftanstieg in MS-16 bei 15,3 mm Maschinenweg beträgt rund 3,8 kN und ist auf das Aufreißen des Seitenholzes zurückzuführen. An der selben Stelle ist auch ein plötzlicher kleiner Lastabfall der Prüfmaschine ersichtlich. Die Auswertung von  $\eta_{MS,max}$  erfolgte nach rund 23 mm, kurz bevor sich der Stabdübel bei den Messschrauben „einhängt“ und die Kraft der Prüfmaschine wieder ansteigt. An dieser Stelle beträgt die Kraft in MS-16 7360 N und in MS-19 8409 N. Dies sind 29,6 % bzw. 33,8 % im Verhältnis zur maximalen Kraft (am Plateau) je Stabdübel und Scherfuge. Nach der Berührung des Stabdübels mit den Messschrauben ist ein Anstieg der Prüfmaschinenkraft sowie der Messschraubenkraft ersichtlich. Die Bruchbilder in Abbildung 6-6 zeigen, dass beide Seiten bis zum Hirnholzende aufgespalten sind. Außerdem ist erkennbar, dass neben einem Spalt- und Lochleibungsversagen auch ein leichtes Verbiegen des Edelstahl-Stabdübels stattfand und sich ein Fließmoment bildete. Dies verifiziert die Annahme des Grenzfalls zwischen Versagensmechanismus 1b und 2 nach der Theorie von JOHANSEN [49] (siehe Abbildung 5-9). Der Stabdübel ist senkrecht (radial) zu den Jahrringen ausgerichtet (vgl. Abbildung 6-7). Dies ist bei nahezu allen Prüfkörpern der Fall, somit ist der Einfluss der Jahrringlage bei allen Prüfungen gleich. Alle weiteren Kraft-Weg-Diagramme, Bruchbilder und Jahrring-Scans dieser Prüfserie sind im ANHANG B-2 zu finden.

## 6-2.2 PRÜFSERIE ST20-ES-N1-M1

Tabelle 6-2: Ergebnisse der Prüfserie ST20-ES-n1-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	11,5%	441	52.107	53.400	65.523	64,5%	102%	101%	j/b	<b>33,9%</b>
01	11,4%	476	56.223	59.136	61.484	50,4%	105%	112%	j/b	<b>26,0%</b>
02	11,3%	503	59.414	65.328	65.328	52,7%	110%	124%	j/b	<b>35,6%</b>
03	11,5%	508	59.963	68.625	68.625	62,4%	114%	130%	j/b	<b>29,8%</b>
04	11,6%	502	59.311	65.648	65.648	56,4%	111%	125%	j/b	<b>33,1%</b>
05	11,9%	496	58.579	52.627	52.627	unver.	89,8%	100%	j/e	<b>unver.</b>
<b>Min.</b>	11,3%	441	52.107	53.400	61.484	50,4%	102%	101%	-	<b>26,0%</b>
$\bar{x}_{med}$	11,5%	502	59.311	65.328	65.523	56,4%	110%	124%	-	<b>33,1%</b>
<b>Max.</b>	11,6%	508	59.963	68.625	68.625	64,5%	114%	130%	-	<b>35,6%</b>
$\bar{x}_{arith.}$	<b>11,4%</b>	<b>486</b>	<b>57.404</b>	<b>62.427</b>	<b>65.322</b>	<b>57,3%</b>	<b>109%</b>	<b>119%</b>	-	<b>31,7%</b>
$\sigma$	0,108%	28,0	3.304	6.114	2.539	6,07%	4,73%	11,6%	-	<b>3,81%</b>
<b>COV</b>	0,948%	5,76%	5,76%	9,79%	3,89%	10,6%	4,36%	9,79%	-	<b>12,0%</b>

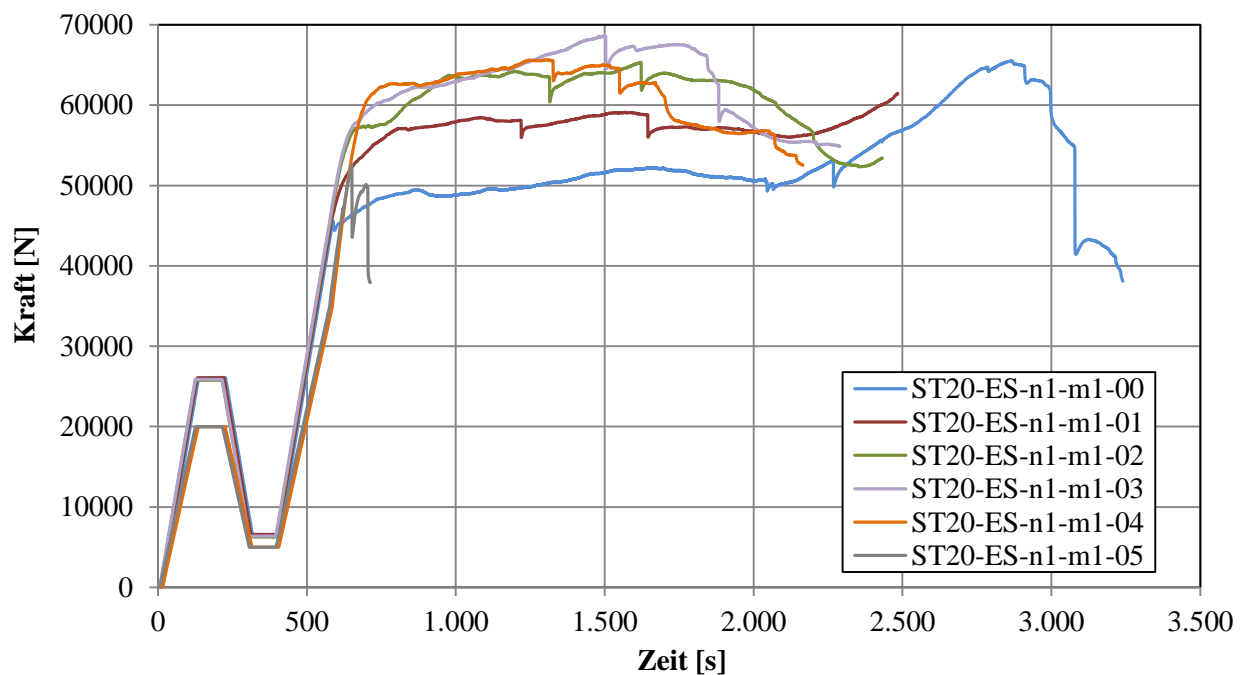


Abbildung 6-8: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST20-ES-n1-m1

Tabelle 6-2 zeigt unter anderem eine statistische Auswertung aller mit Messschrauben verstärkten Prüfungen (00 bis 04) der Prüfserie ST20-ES-n1-m1. Es ist auf einem Blick erkennbar, dass alle verstärkten Stabdübelverbindungen ein sehr duktileres Versagensverhalten aufweisen. Die Holzfeuchtigkeit liegt im Mittel bei  $u = 11,4\%$  und streut sehr gering ( $COV = 0,95\%$ ). Die mittlere Rohdichte liegt mit  $\rho_{\text{mittel}} = 486 \text{ kg/m}^3$  relativ hoch. Die Tragfähigkeiten der verstärkten Stabdübelverbindungen ( $F_{\text{max,P}}$ ) liegen alle über den berechneten mittleren Tragfähigkeiten nach Johansen ( $F_{\text{Joh.}}$ ), wobei die maximale Abweichung  $14\%$  beträgt. Die tatsächliche Tragfähigkeit der unverstärkten Verbindung liegt rund  $10\%$  unter der berechneten. Insgesamt liegt die Tragfähigkeit aller verstärkten Verbindungen im Mittel  $19\%$  über jener der unverstärkten Verbindungen. Dabei gilt, je höher die Rohdichte, desto höher die tatsächliche Tragfähigkeit. Somit ist die vergleichsweise geringe Tragfähigkeit der Prüfung ST20-ES-n1-m1-00, welche rund gleich hoch wie jene der unverstärkten Prüfung ist, auf die geringe Rohdichte zurückzuführen. In Abbildung 6-8 ist erkennbar, dass alle Prüfungen nach dem Abfall der Kraft vom Level des Plateaus aufgrund des „Einhängeeffekts“ wieder ansteigen. Es wurde jedoch lediglich Prüfung ST20-ES-n1-m1-00 bis zum absoluten Versagen der Verstärkungsschrauben durchgeführt. Da diese Prüfung zuletzt erfolgte, wurde eine Beschädigung der Messschrauben in Kauf genommen. Bei allen Prüfungen sind das plötzliche Auftreten eines Risses sowie der damit verbundenen Kraftanstieg in den Verstärkungsschrauben deutlich erkennbar und der jeweiligen Seite zuordenbar. Bei allen verstärkten Verbindungen bildete sich auf beiden Seiten ein Riss vom Stabdübel bis zum Hirnholzende. Im Mittel beträgt der maximale Verstärkungsanteil  $\eta_{\text{MS}} = 31,7\%$  und liegt über dem in der ÖNORM B 1995-1-1 [59] vorgegebenen Wert von  $30\%$ . Im folgenden Abschnitt 6-2.2.1 sind die detaillierten Ergebnisse von Prüfung ST20-ES-n1-m1-02 abgebildet und interpretiert. Alle weiteren Ergebnisse dieser Prüfserie sind im ANHANG B-3 zu finden.



### 6-2.2.1 Exemplarische Auswertung von Prüfung ST20-ES-n1-m1-02

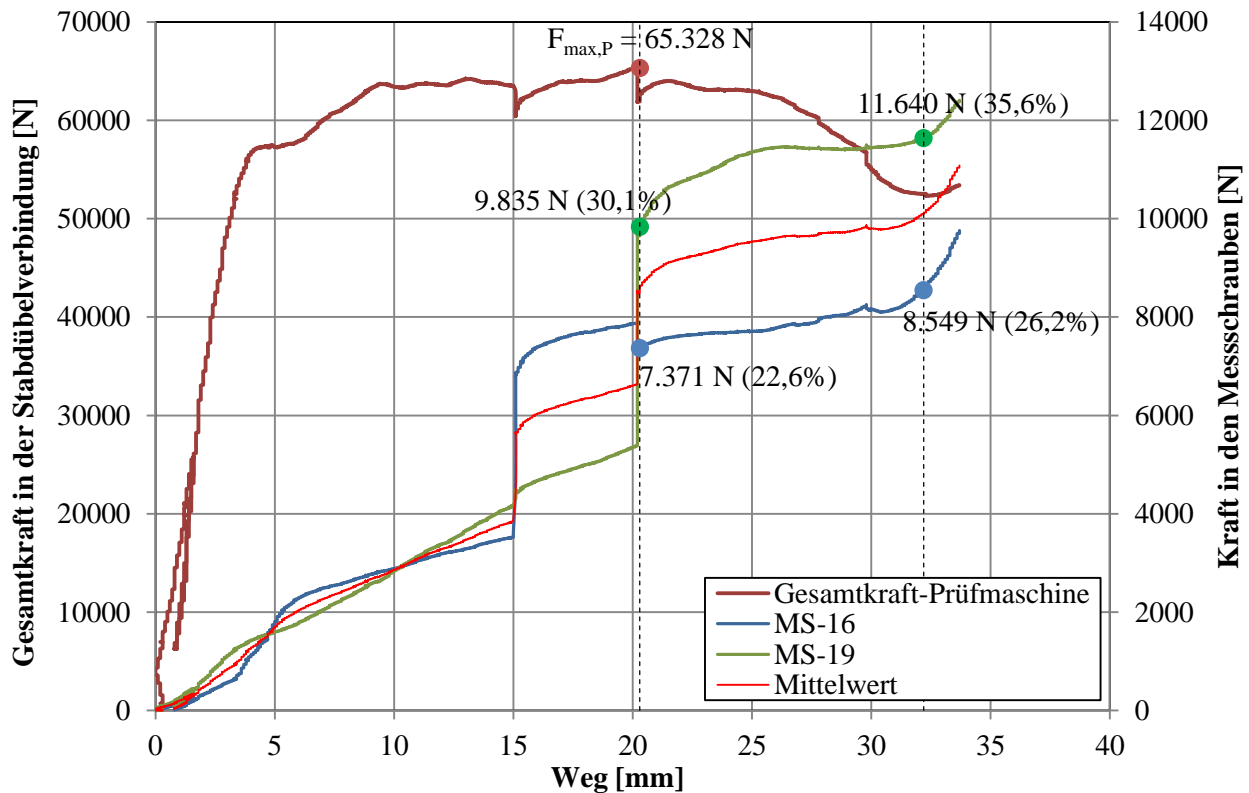


Abbildung 6-9: Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST20-ES-n1-m1-02

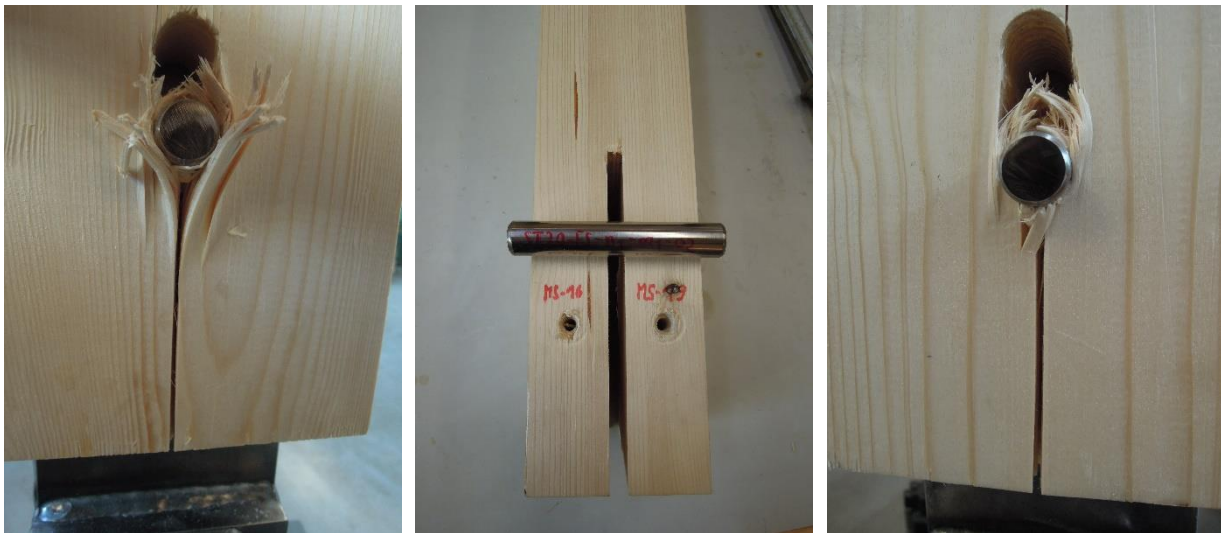


Abbildung 6-10: Bruchbilder der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19

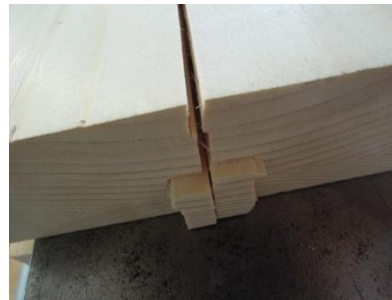


Abbildung 6-11: Bruchbilder der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02: Ausscheren eines Blockes unter dem Stabdübel auf der Seite MS-16



Abbildung 6-12: Jahrring-Scan der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19

Auch im Kraft-Weg-Diagramm der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02 sind die Stellen des Risseintrittes deutlich erkennbar. Den größten Kraftanstieg (4,7 kN) aufgrund eines Risses nach ca. 20 mm Maschinenweg sowie den größten Kraftanteil in der Verstärkungsschraube ( $\eta_{MS,max} = 35,6\%$ ) hat die Messschraube MS-19 zu verzeichnen. Dies ist auf die deutlich höhere Rohdichte dieses Seitenholzes (siehe Tabelle ANHANG 6) und das damit verbundene tendenziell sprödere Versagen zurückzuführen. In Abbildung 6-12 ist erkennbar, dass die Jahrringbreite sehr klein und die Rohdichte folglich groß ist. Nach einem Maschinenweg von rund 32 mm beträgt die Verstärkungskraft 8549 N ( $\eta_{MS} = 26,2\%$ ) in MS-16 und 11640 N ( $\eta_{MS} = 35,6\%$ ) in MS-19. Bei einer weiteren Belastung berührt der Stabdübel die Messschrauben und die Verstärkungskräfte sowie die Kraft der Prüfmaschine steigen rasant an. Um eine Beschädigung der Messschrauben zu verhindern, wurde die Prüfung an dieser Stelle abgebrochen. Abbildung 6-10 zeigt, dass der Prüfkörper ein Lochleibungs- und Spaltversagen ohne Fließmomentbildung aufweist. Zusätzlich ist in Abbildung 6-11 ein Ausscheren eines Blockes unter dem Stabdübel auf der Seite MS-16 in Schlitzblechnähe erkennbar.

### 6-2.3 PRÜFSERIE ST16-ES-N5-M1

Tabelle 6-3: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n5-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS,mittel}$ [%]	$\eta_{MS,max}$ [%]
00	11,4%	475	235.468	222.780	229.372	80,8%	94,6%	157%	j/b	-	<b>55,2%</b>
01	9,91%	393	195.079	178.729	178.729	78,3%	91,6%	126%	j/b	29,3%	<b>54,1%</b>
02	11,5%	467	231.817	214.624	214.624	70,3%	92,6%	151%	j/b	34,6%	<b>49,0%</b>
03	11,4%	444	220.150	198.021	198.021	60,3%	89,9%	140%	j/b	35,7%	<b>43,0%</b>
04	11,9%	434	215.037	189.957	189.957	73,8%	88,3%	134%	j/b	25,3%	<b>53,5%</b>
05	11,7%	461	228.546	141.920	141.920	unver.	62,1%	100%	j/b	unver.	<b>unver.</b>
Min.	9,91%	393	195.079	178.729	178.729	60,3%	88,3%	126%	-	25,3%	<b>43,0%</b>
$\bar{x}_{med}$	11,4%	444	220.150	198.021	198.021	73,8%	91,6%	140%	-	32,0%	<b>53,5%</b>
Max.	11,9%	475	235.468	222.780	229.372	80,8%	94,6%	157%	-	35,7%	<b>55,2%</b>
$\bar{x}_{arith}$	<b>11,2%</b>	<b>443</b>	<b>219.510</b>	<b>200.822</b>	<b>202.141</b>	<b>72,7%</b>	<b>91,4%</b>	<b>142%</b>	-	<b>31,2%</b>	<b>51,0%</b>
$\sigma$	0,768%	32,3	15.996	17.935	20.068	8,03%	2,41%	12,6%	-	4,87%	<b>5,03%</b>
COV	6,84%	7,29%	7,29%	8,93%	9,93%	11,0%	2,64%	8,93%	-	15,6%	<b>9,87%</b>

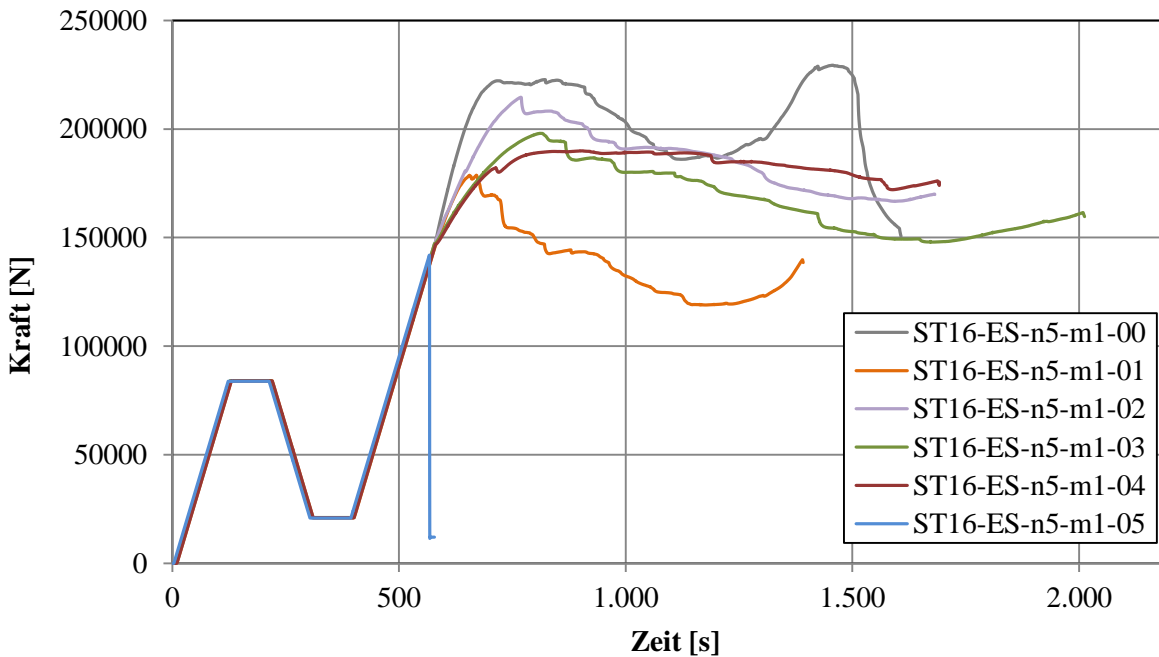


Abbildung 6-13: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n5-m1

Bei dieser Prüfserie mit fünf verstärkten und einer unverstärkten Stabdübelprüfung erfolgte eine statistische Auswertung der Prüfungen 01 bis 04 (vgl. Tabelle 6-3). Die Prüfkörper weisen im Mittel eine Holzfeuchte von  $u = 11,2\%$  und eine Rohdichte von  $\rho = 443 \text{ kg/m}^3$  auf. Die tatsächliche Tragfähigkeit ( $F_{\text{max,p}}$ ) liegt bei allen Prüfungen unter der mittleren Tragfähigkeit nach Johansen ( $F_{\text{Joh}}$ ), wobei die verstärkten Verbindungen um maximal  $11,7\%$  abweichen. Die Tragfähigkeit der unverstärkten Verbindung ist um  $37,9\%$  geringer als die berechnete und um  $42,0\%$  geringer als die mittlere Tragfähigkeit der verstärkten Verbindungen. Es ist jedoch anzumerken, dass die unverstärkte Verbindung im kraftgesteuerten Bereich und schlagartig aufgrund des Aufspaltens entlang der Stabdübelreihe versagte. Bei allen Prüfungen entstand auf beiden Seiten ein durchgehender Riss zwischen allen Stabdübeln sowie vom letzten Stabdübel bis zum Hirnholende. Die Prüfkörper 02 bis 04 wurden jeweils mit acht Messschrauben und zwei handelsüblichen Vollgewindeschrauben mit gleichem Durchmesser verstärkt. Bei den Prüfungen ST16-ES-n5-m1-00 und 01 wurde die Prüfgeschwindigkeit im weggesteuerten Bereich erhöht. Dies erklärt den frühzeitigen Lastabfall in Abbildung 6-13. Die Prüfung 00, welche bis zum Versagen der Verstärkungsschrauben durchgeführt wurde, war mit zwei Messschrauben an der untersten Stelle und acht handelsüblichen Schrauben hinter jedem Stabdübel darüber verstärkt, wobei diese dabei beschädigt wurden (vgl. Abbildung 6-14).

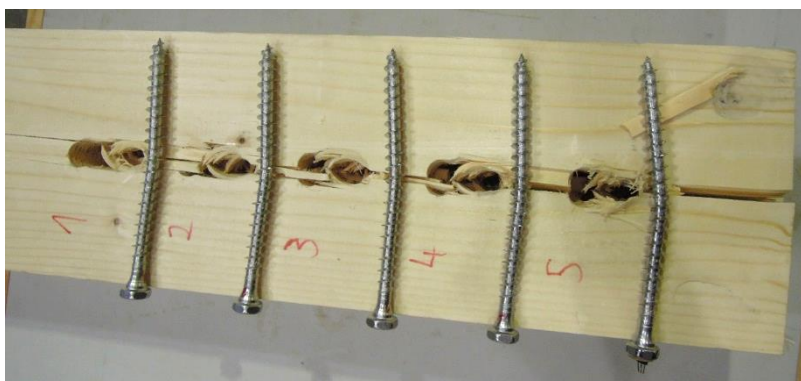
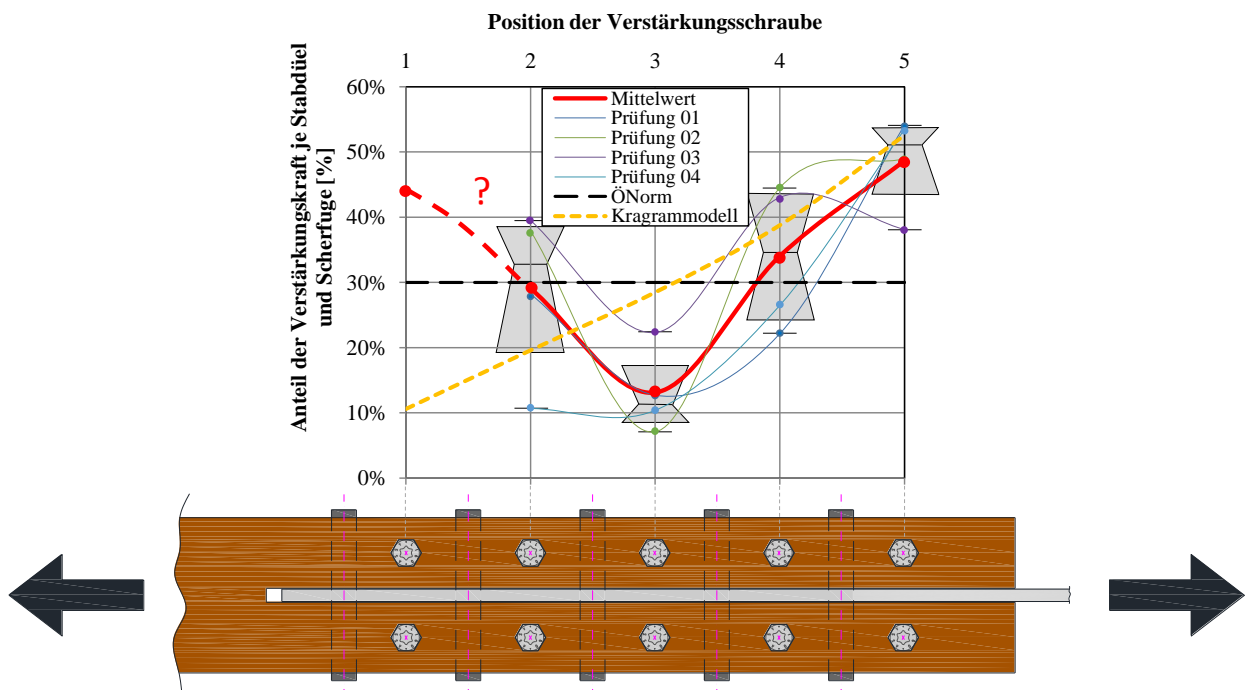


Abbildung 6-14: Verstärkungsschrauben nach dem Versagen der Prüfung ST16-ES-n5-m1-00

Die maximale Kraft in den Verstärkungsschrauben entstand im Allgemeinen in den untersten Messschrauben und liegt im Mittel bei  $\eta_{MS} = 51,0\%$  im Verhältnis zur maximalen Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge. Dies entspricht in etwa dem Ergebnis aus dem Kragarmmodell von BEJTKA [7] ( $\eta_{MS} = 52,6\%$ ; siehe Abbildung 5-15;) und liegt deutlich über dem in der ÖNORM B 1995-1-1 [59] angegebenen Wert von 30 %. Die Auslastung der Verstärkungsschrauben in Bezug auf ihre Ausziehtragfähigkeit beträgt zwischen 60,3 % und 80,8 %.

Das Verhältnis der Kraft in der Verstärkungsschraube zur Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge wird in Tabelle 6-3 jeweils für die Messschraube mit dem maximalen Kraftanteil ( $\eta_{MS,max}$ ), sowie für alle Verstärkungsschrauben einer Seite im Mittel ( $\eta_{MS,mittel}$ ) angegeben. Dabei wird jene Seite herangezogen, die zuerst versagt, bzw. welche die höheren Kräfte in den Messschrauben aufzeigt. Es ist zu erkennen, dass der mittlere Anteil der Verstärkungskraft im Verhältnis zur maximalen Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge 31,2 % beträgt und somit nicht weit vom Normwert (30 %) abweicht. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass in der untersten Messschraube ein mittlerer Verstärkungsanteil von  $\eta_{MS} = 52,6\%$  gemessen wurde.

In Abbildung 6-15 sind der Verlauf der Kräfte in den Verstärkungsschrauben in Relation zur Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge ( $\eta_{MS}$ ) nach dem gerissenen Kragarmmodell nach BEJTKA [7] aus Abbildung 5-15 und der festgehaltene Wert in ÖNORM B 1995-1-1 [59] grafisch dargestellt. Zusätzlich sind die Verläufe der Kraftanteile in den Messschrauben ( $\eta_{MS}$ ) der Prüfungen ST16-ES-n5-m1-01 bis 04 sowie deren Mittelwerte abgebildet und mit einem Boxplot hinterlegt. Es wurde auch hier jeweils der Verlauf jener Seite herangezogen, welcher zuerst versagte bzw. auf welcher die größten Kräfte in den Messschrauben auftraten. Da die erste Verstärkungsschraube (in der Verbindung ganz oben hinter dem ersten Stabdübel) nicht als Messschraube ausgeführt wurde, erfolgte eine ergänzende Annahme des mittleren Kraftverlaufs (strichlierte Linie).



**Abbildung 6-15:** Verlauf der Kräfte in den Verstärkungsschrauben einer einreihigen Verbindung mit  $n = 5$  Stabdübeln

Wie in Abbildung 6-15 gezeigt wird, ist der Verlauf der Kräfte in den Messschrauben nicht, wie angenommen, ähnlich dem ansteigenden Verlauf aus dem Kragarmmodell, sondern hat ausgeprägte Maxima am Anfang und am Ende der Stabdübelreihe. Dieser erinnert stark an die Arbeiten und Modelle von VOLKERSEN [48] und [99], JORISSEN [56], CRAMER [100], LANTOS [101], WILKINSON [102], DANNENBERG et al. [103] und ISYUMOV [104].

In Abbildung 6-16 sind die Übertragungskräfte der jeweiligen Stabdübeln bezogen auf die Gesamtlast der Verbindung nach LANTOS [101] in Form eines Säulendiagramms dargestellt. Dies gilt für Stabdübel, die hintereinander in Faserrichtung angeordnet sind. Beim Vergleich der (erweiterten) aus den Messungen ermittelten mittleren Verteilung der Verstärkungskräfte (Abbildung 6-15) mit dem Verlauf der Kraftverteilung der Stabdübel nach LANTOS [101] fällt auf, dass beide Verläufe gut übereinstimmen. In Abbildung 6-16 sind die beiden Kraftverteilungen übereinandergelegt und vergleichend dargestellt. Aufgrund des geringen Prüfumfanges ist die Aussagekraft dieses Vergleichs jedoch zu hinterfragen.

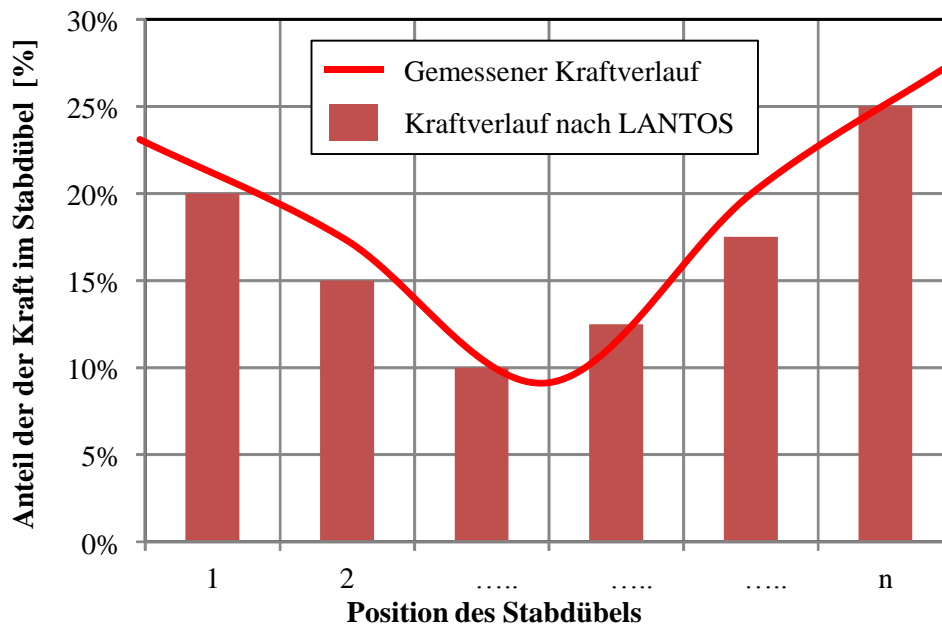


Abbildung 6-16: Vergleich des Kraftverlaufs der Stabdübel nach LANTOS [101] mit dem Verlauf der in den Prüfungen ermittelten Verstärkungskräfte

Festzustellen ist, dass der vorgefundene Kraftverlauf bzw. dessen Abbildung durch die angeführten Modelle eine Arbeitshypothese darstellt, die im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail verfolgt wurde. Somit ist eine gesonderte Abklärung erforderlich.

Angesichts dieser Erkenntnisse ist es denkbar, die äußeren Stabdübel einer Reihe mehr zu verstärken als die inneren, bzw. nur die äußeren Drittel dementsprechend zu verstärken.

Im folgenden Abschnitt 6-2.3.1 sind die detaillierten Ergebnisse von Prüfung ST16-ES-n5-m1-04 abgebildet und interpretiert. Alle weiteren Ergebnisse dieser Prüfserie sind dem ANHANG B-4 zu entnehmen.

### 6-2.3.1 Exemplarische Auswertung von Prüfung ST16-ES-n5-m1-04

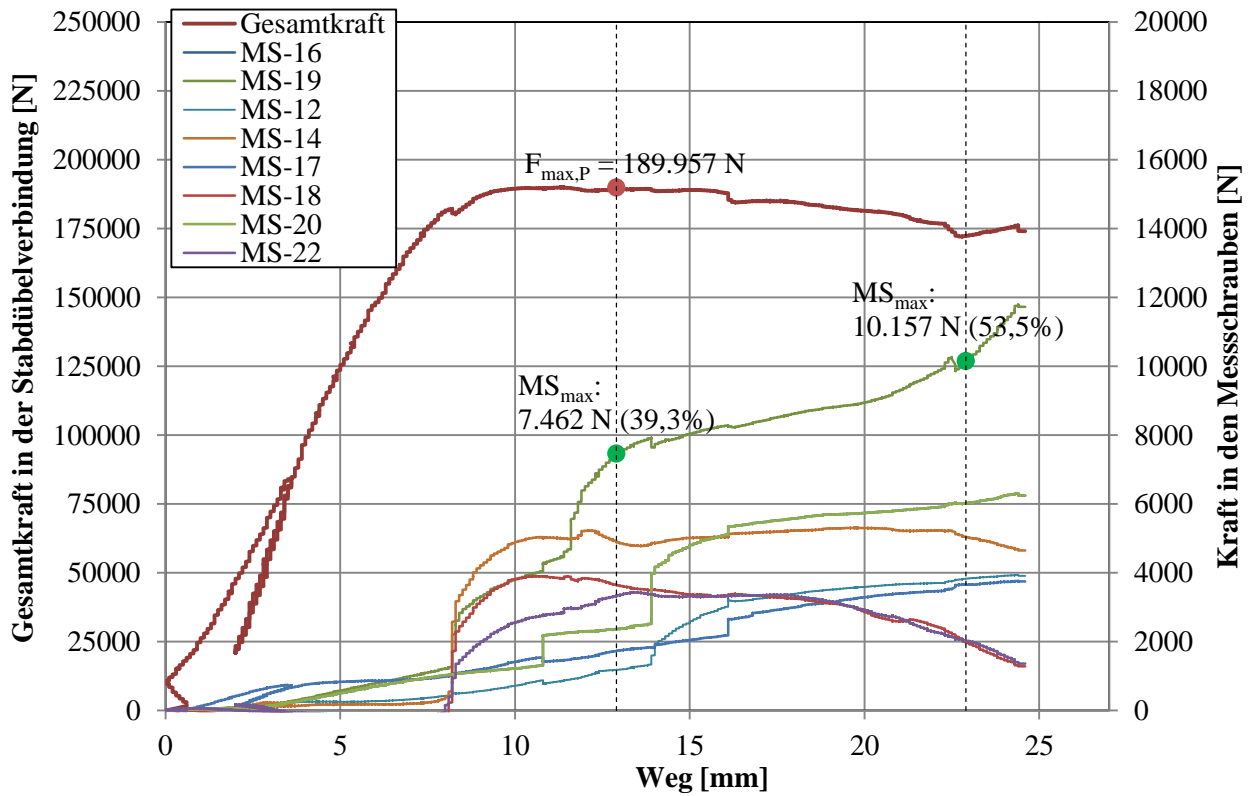


Abbildung 6-17: Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST16-ES-n5-m1-04

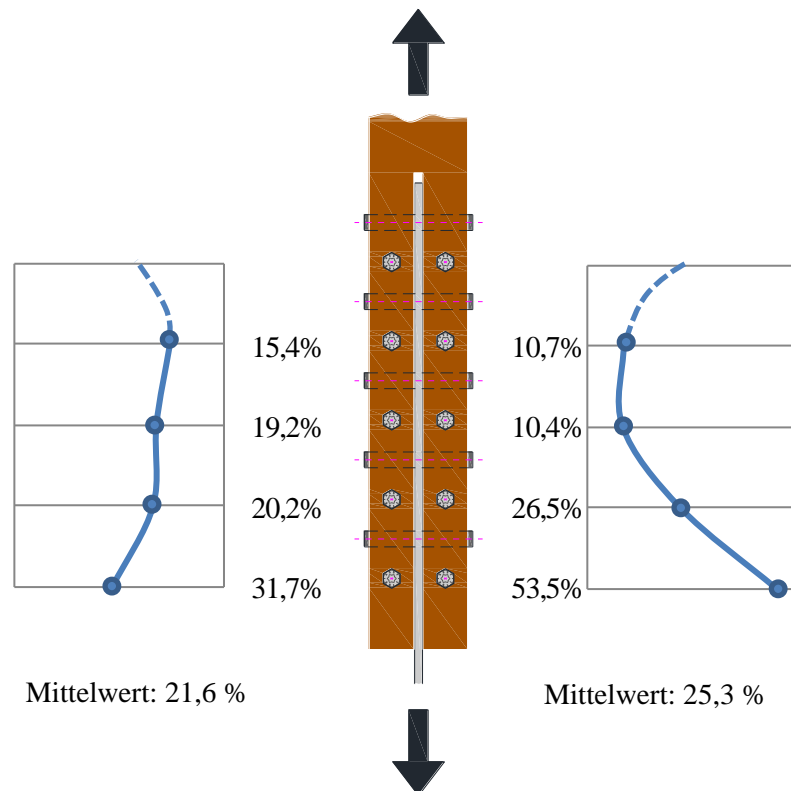


Abbildung 6-18: Verlauf der Verstärkungsnutzungsgrade der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04



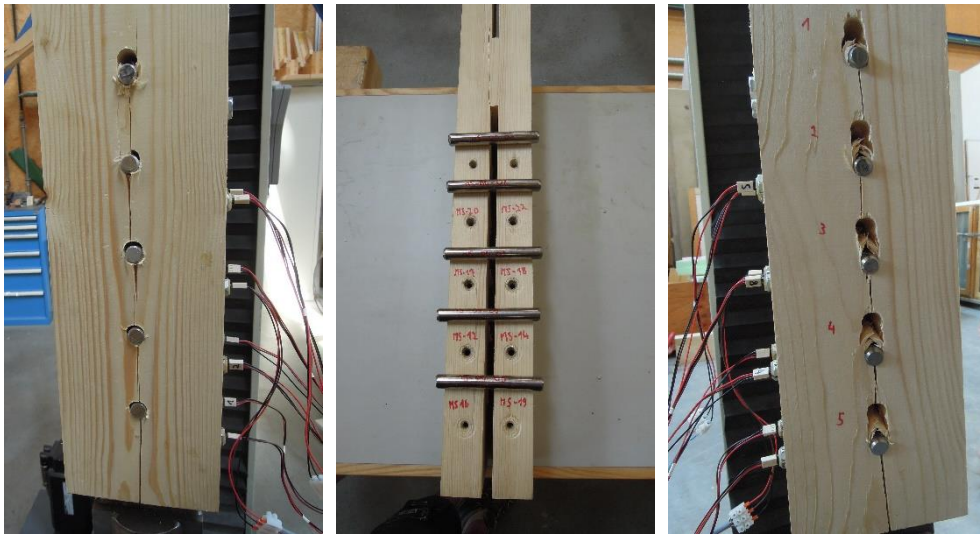


Abbildung 6-19: Bruchbilder der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19



Abbildung 6-20: Jahrring-Scan der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19

Aus Abbildung 6-17 ist zu erkennen, dass die Messschraube MS-19 bereits beim Erreichen von  $F_{\max,P}$  am Kraftplateau einen Anteil von  $\eta_{MS} = 39,3 \%$  in Bezug auf die Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge aufweist. Das bedeutet, dass die Verstärkungskraft bereits nach rund 13 mm Maschinenweg höher ist als der besagte Normwert (30 %). An der Prüfmaschinenkraft-Kurve sind die plötzlichen Kraftabfälle aufgrund des Aufspaltens kaum zu erkennen. Die Messschraubenkraft-Kurven weisen jedoch sprunghafte Anstiege an verschiedenen Stellen auf. Dies deutet auf die Rissbildung zwischen den Stabdübeln bzw. zwischen dem letzten Stabdübel und dem Hirnholzende hin. Der Kraftverlauf in den Messschrauben in Abbildung 6-18 zeigt, dass die Kräfte in den unteren Verstärkungsschrauben auf der (rechten) MS-19-Seite deutlich höher sind als gegenüber. Dies ist auf das einseitige Lochleibungsversagen zurückzuführen, welches in Abbildung 6-19 ersichtlich ist. Grund dafür ist die geringere Rohdichte der rechten Seite (vgl. Tabelle ANHANG 6), die sich auch anhand der größeren Jahrringbreite rückschließen lässt (vgl. Abbildung 6-20). Kurz bevor die Stabdübel die Messschrauben berührten stellte sich ein Verstärkungskraftanteil  $\eta_{MS} = 53,5 \%$  im letzten Verstärkungselement ein.

## 6-2.4 PRÜFSERIE ST16-ES-N2-M2

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n2-m2

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	10,9%	409	162.426	137.706	145.041	k. MS	84,8%	104%	j/b	k. MS
01	11,6%	471	186.891	179.817	179.817	63,7%	96,2%	136%	j/b	42,8%
02	11,2%	460	182.360	161.946	161.946	74,7%	88,8%	122%	j/b	54,2%
03	11,5%	451	178.846	164.814	164.814	78,5%	92,2%	124%	j/b	54,7%
04	11,2%	488	193.747	194.302	194.302	72,4%	100%	146%	j/b	46,8%
05	11,8%	424	168.059	132.683	132.683	unver.	79,0%	100%	j/b	unver.
06	9,90%	403	159.834	152.852	152.852	58,0%	95,6%	115%	j/b	38,5%
Min.	9,90%	403	159.834	152.852	152.852	58,0%	88,8%	115%	-	38,5%
$\bar{x}_{med}$	11,2%	460	182.360	164.814	164.814	72,4%	95,6%	124%	-	46,8%
Max.	11,6%	488	193.747	194.302	194.302	78,5%	100%	146%	-	54,7%
$\bar{x}_{arith}$	11,1%	455	180.336	170.746	170.746	69,4%	94,6%	129%	-	47,4%
$\sigma$	0,667%	32,1	12.742	16.355	16.355	8,40%	4,35%	12,3%	-	7,09%
COV	6,03%	7,07%	7,07%	9,58%	9,58%	12,1%	4,59%	9,58%	-	15,0%

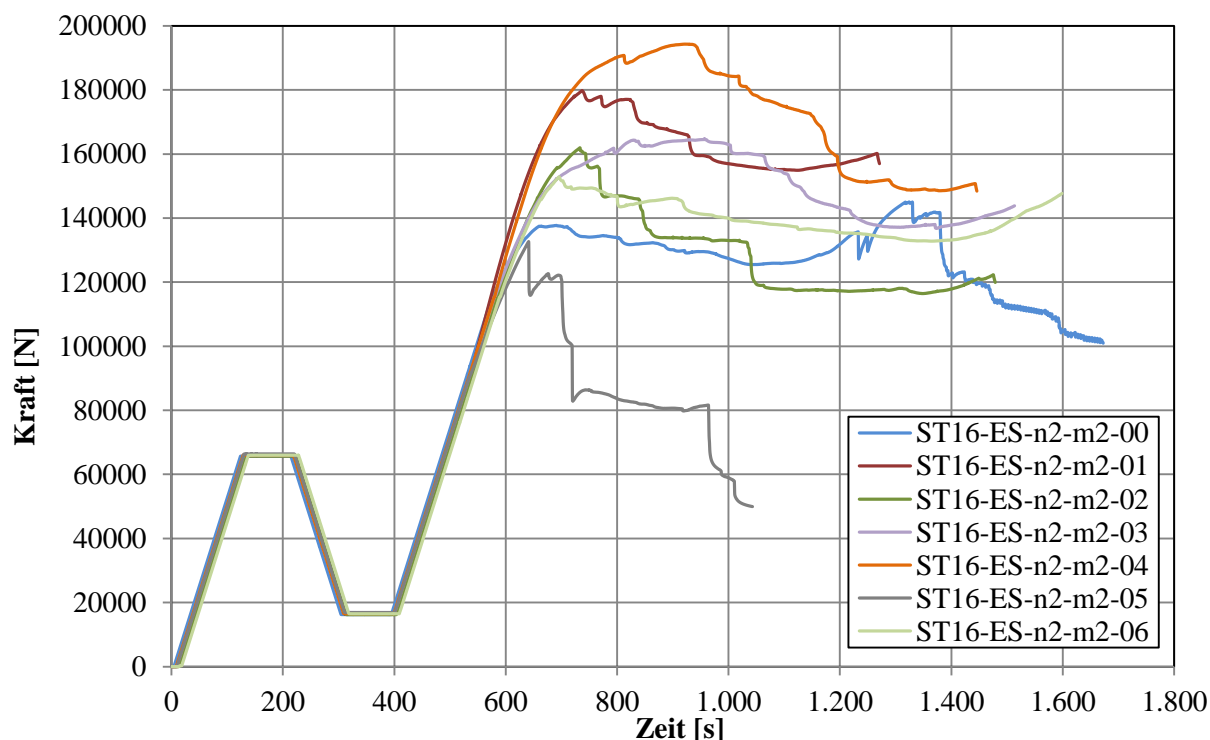
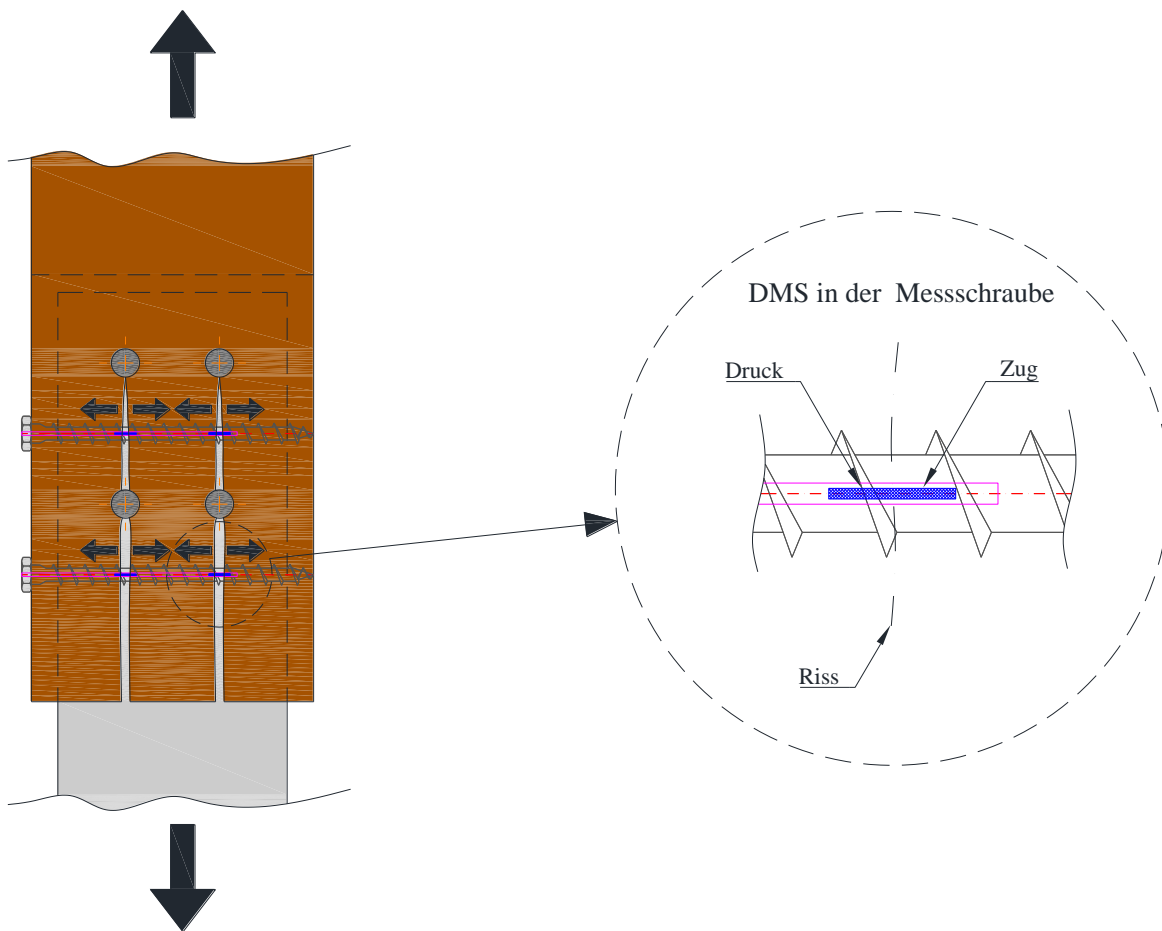


Abbildung 6-21: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n2-m2

Die Prüfserie ST16-ES-n2-m2 umfasst sieben Prüfungen, wobei Prüfung 05 unverstärkt und Prüfung 00 verstärkt jedoch ohne Messschrauben ausgeführt wurden. Diese beiden Prüfungen wurden in der statistischen Auswertung (Tabelle 6-4) nicht berücksichtigt. Die mit Messschrauben verstärkten Prüfkörper

weisen eine mittlere Rohdichte von  $\rho = 455 \text{ kg/m}^3$  sowie eine mittlere Holzfeuchtigkeit von  $u = 11,1 \%$  auf. Die tatsächliche Tragfähigkeit der verstärkten Stabdübelverbindung ( $F_{\max,P}$ ) liegt im Mittel 5,4 % unter der nach Gleichung (6.4) rechnerisch ermittelten Tragfähigkeit ( $F_{\text{Joh.}}$ ). Die unverstärkte Verbindung weist diesbezüglich eine Abweichung von 21,0 % auf (vgl. Tabelle 6-4). Im Durchschnitt erreichen die verstärkten Stabdübelverbindungen eine um 29 % höhere Tragfähigkeit als die unverstärkte Verbindung. Ausschließlich alle Prüfkörper sind während den Prüfungen aufgespalten. In Abbildung 6-21 ist erkennbar, dass die Prüfungen dieser Serie kein ausgeprägtes Kraftplateau aufweisen, sondern meist nach dem Erreichen der maximalen Tragfähigkeit einen Kraftabfall um bis zu 25 % aufweisen, bevor die Stabdübel die Verstärkungsschrauben berühren. Im Mittel beträgt der maximale Verstärkungsanteil  $\eta_{\text{MS}} = 47,4 \%$  und liegt auch bei dieser Prüfserie deutlich über den in der ÖNORM B 1995-1-1 [59] vorgegebenen Wert von 30%. Bei diesen Prüfungen lässt sich kein signifikanter Verlauf der Verstärkungskräfte ableiten; es konnte zudem beobachtet werden, dass einzelne Messschrauben eine Druckkraft aufzeichneten. Dies kann unter anderem mittels Abbildung 6-22 erklärt werden:



**Abbildung 6-22: Druckkraft in der Messschraube**

Wie in Abbildung 6-22 gezeigt wird, erfährt der mittlere Block zwischen den Stabdübelreihen eine Druckkraft. Somit steht eine Hälfte des DMS unter Druck und die andere Hälfte unter Zug. Außerdem kann der Fall eintreten, dass nur eine Seite aufreißt und dadurch der gesamte Dehnmessstreifen unter der zweiten Stabdübelreihe Druck erfährt. Es ist nicht außer Acht zu lassen, dass diese Tatsache eine exakte Positionierung der DMS in den Messschrauben erfordert. Da dies in der Praxis nur mit erheblichem Aufwand durchführbar ist, sind die Ergebnisse der Prüfserie ST-16-ES-n2-m2 mit Unsicherheiten behaftet und bei einer Interpretation kritisch zu betrachten.

Im folgenden Abschnitt 6-2.4.1 sind die detaillierten Ergebnisse von Prüfung ST16-ES-n2-m2-02 dargestellt und interpretiert. Alle weiteren Ergebnisse dieser Prüfserie sind dem ANHANG B-5 zu entnehmen.

### 6-2.4.1 Exemplarische Auswertung von Prüfung ST16-ES-n2-m2-02

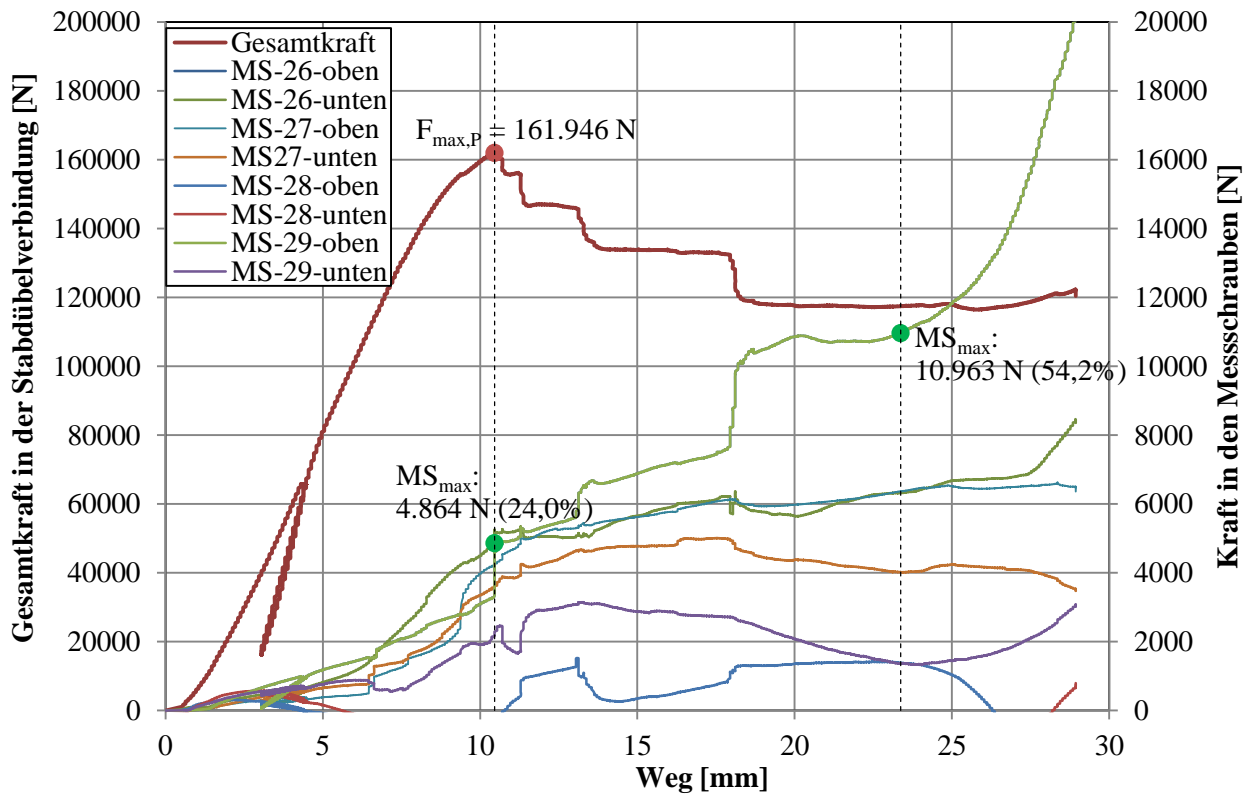


Abbildung 6-23: Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST16-ES-n2-m2-02

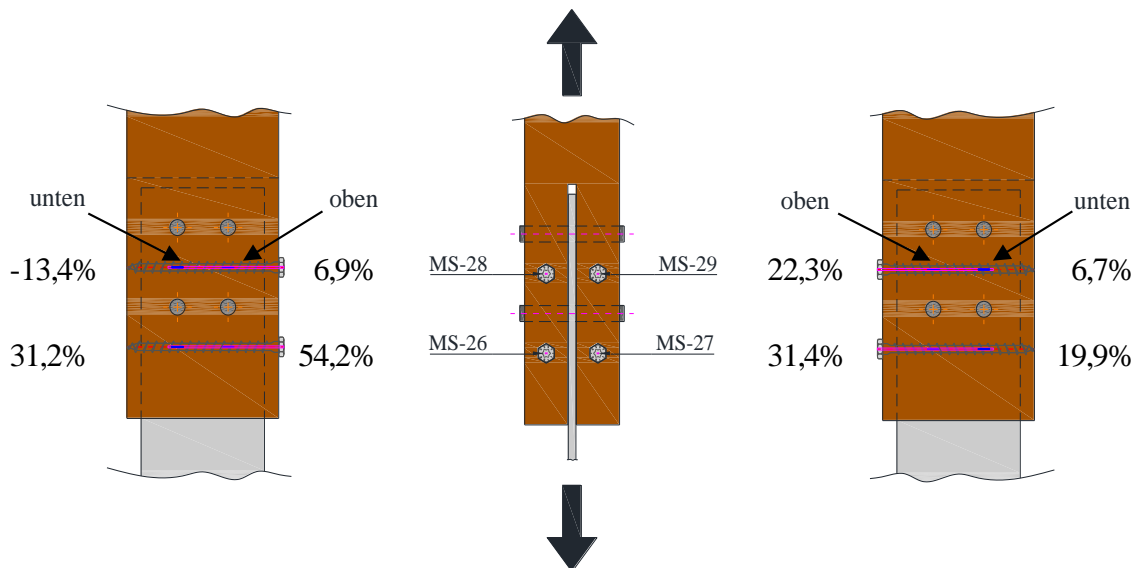


Abbildung 6-24:  $\eta_{MS,max}$  der Prüfung ST16-ES-n2-m2-02





Abbildung 6-25: Bruchbilder der Prüfung ST16-ES-n2-m2-02: links: Seite MS-26; rechts: Seite MS-27



Abbildung 6-26: Jahrring-Scan der Prüfung ST16-ES-n2-m2-02: links: Seite MS-26; rechts: Seite MS-27

Abbildung 6-23 zeigt den Verlauf der Kraft in der Stabdübelverbindung sowie jenen des prozentuellen Kraftanteils in den Verstärkungsschrauben ( $\eta_{MS}$ ). Nach dem Erreichen von  $F_{max,P}$  nimmt die Tragfähigkeit der Stabdübelverbindung um rund 25 % ab, bevor sich die Stabdübel bei den Verstärkungsschrauben „einhängen“ und die Tragfähigkeit wieder leicht ansteigt. An dieser Stelle (rund 23 mm Maschinenweg) beträgt  $\eta_{MS} = 54,2 \%$  in der Messschraube MS-26-unten, wobei unmittelbar danach die Berührung von Stabdübel und Messschraube stattfindet und die Verstärkungskraft rasant ansteigt. Die stufenweise Abnahme der Prüflast steht einer stufenweisen Zunahme der Verstärkungskraft von MS-26-unten gegenüber. In Abbildung 6-24 ist die Verteilung der Verstärkungskräfte grafisch dargestellt. Die unteren Messschrauben weisen jeweils in beiden DMS höhere Kräfte als die oberen Messschrauben auf. Im DMS MS-26-unten entstehen Druckkräfte, eine mögliche Erklärung liefert Abbildung 6-22. Wie aus Abbildung 6-25 erkennbar ist, kommt es unter mehreren Stabdübeln zu einem Ausscheren eines Blockes. Besonders ausgeprägt war diese Erscheinung an der Stelle MS-26-unten zu beobachten, daher waren dort auch sehr hohe Kräfte in der Messschraube zu verzeichnen.

## 6-2.5 VERGLEICH VON $N_{EF}/N$

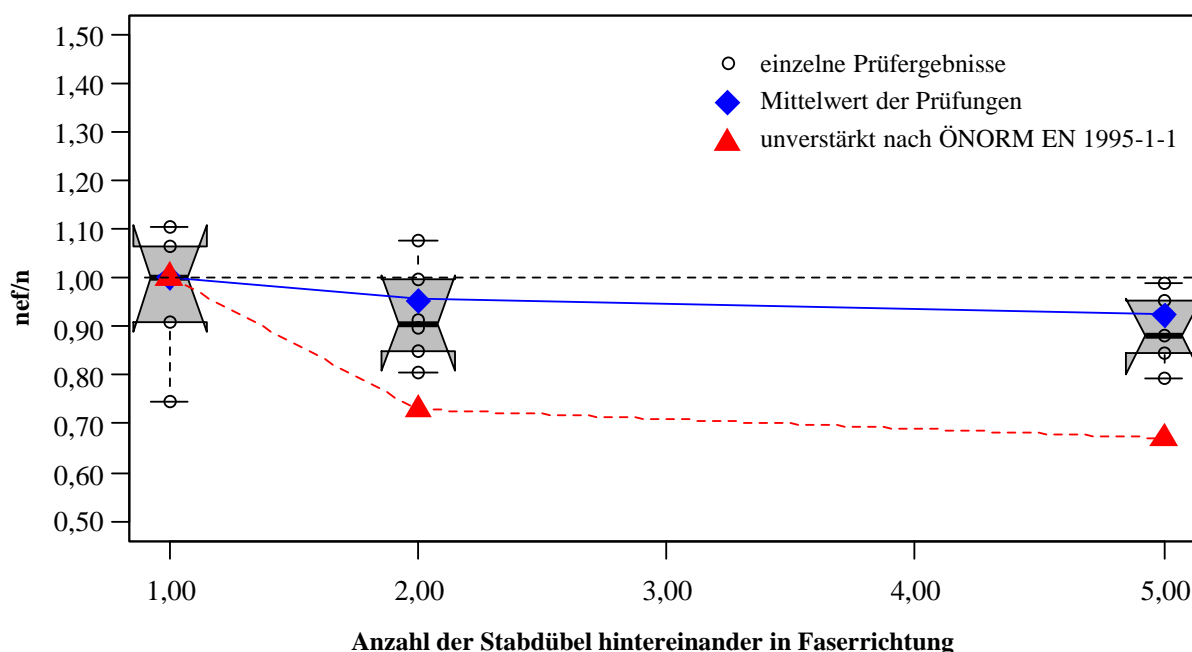
Laut ÖNORM B 1995-1-1 [59] darf die Anzahl von wirksamen, stiftförmigen Verbindungsmitteln ( $d > 12 \text{ mm}$ ) hintereinander in Faserrichtung mit  $n_{ef} = n$  angesetzt werden, wenn eine Querkzugverstärkung mit 30 % der Übertragungskraft je Verbindungsmittel und Scherfuge angeordnet wird. Für unverstärkte Verbindungen ist die Anzahl  $n$  nach Gleichung (6.8) abzumindern.

$$n_{ef} = \min \begin{cases} n \\ n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \end{cases} \quad (6.8)$$

mit:            n        ...     Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander in Faserrichtung [-]  
                  a<sub>1</sub>     ...     Abstand der Verbindungsmittel in Faserrichtung [mm]  
                  d        ...     Durchmesser der Verbindungsmittel [mm]

Bei Kräften rechtwinklig zur Faserrichtung darf die wirksame Anzahl der Verbindungsmittel  $n_{ef} = n$  gesetzt werden. Bei Kraft-Faser-Winkeln zwischen 0° und 90° sind die Werte für  $n_{ef}$  linear zu interpolieren. (vgl. [59])

Nachdem nun die Ergebnisse der Stabdübelprüfungen mit mehreren Verbindungsmitteln hintereinander in Faserrichtung vorliegen, wird untersucht, ob durch den Verstärkungseffekt die Annahme  $n = n_{ef}$  eingehalten wird. Hierzu werden die Ergebnisse der Tragfähigkeiten je Stabdübel ( $F_{max,p}/(n \cdot m)$ ) der Prüfserie ST16-ES-n1-m1, ST16-ES-n2-m2 und ST16-ES-n5-m1 auf den Mittelwert der Tragfähigkeit von ST16-ES-n1-m1 bezogen und miteinander verglichen. In Abbildung 6-27 ist der beschriebene Vergleich von  $n_{ef}/n$  in Form eines Boxplot-Diagramms mit Bezug auf den Median dargestellt. Der eingeschnürte Bereich der Boxplots, welcher zur Überprüfung der Signifikanz der Verteilungen dient, wurde mittels Wilcoxon-Mann-Whitney-Test [105], [106] ermittelt. Zusätzlich werden die Mittelwerte von  $n_{ef}$  mit dem jeweiligen  $n_{ef}$  einer unverstärkten Verbindung nach ÖNORM B 1995-1-1 [59] bzw. Gleichung (6.8) verglichen.



**Abbildung 6-27: Vergleich von  $n_{ef}/n$**

Abbildung 6-27 zeigt, dass sich die eingeschnürten Bereiche der Boxplots für unterschiedliche Verbindungsmittelanzahl  $n$  überschneiden und somit keine signifikante Abnahme von  $n_{ef}/n$  vorliegt. Außerdem befinden sich alle Werte von  $n_{ef}/n$  der Prüfungen ST16-ES-n2-m2 und ST16-ES-n5-m1 innerhalb des Bereichs vom minimalen und maximalen Wert von  $n_{ef}/n$  der Prüfung ST16-ES-n1-m1. Das heißt, dass die Annahme  $n_{ef} = n$ , welche nach ÖNORM B 1995-1-1 [59] für verstärkte Stabdübelverbindungen gilt, in Ordnung ist. Es ist jedoch anzumerken, dass ein leicht abfallender Trend für Verbindungen mit mehreren Verbindungsmitteln hintereinander in Faserrichtung zu erkennen ist. Die Aussagekraft dieses Vergleichs ist jedoch zu hinterfragen, da der Prüfumfang von fünf verstärkten Prüfungen je Serie relativ klein ist.



## 6-2.6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN DER PRÜFERGEBNISSE

Die Ergebnisse aller Prüfserien werden an dieser Stelle nochmals zusammengefasst und diskutiert. In Tabelle 6-5 sind die Mittelwerte aller Prüfserien, die in den Abschnitten 6-2.1 bis 6-2.4 ausgewertet und interpretiert wurden, angeführt.

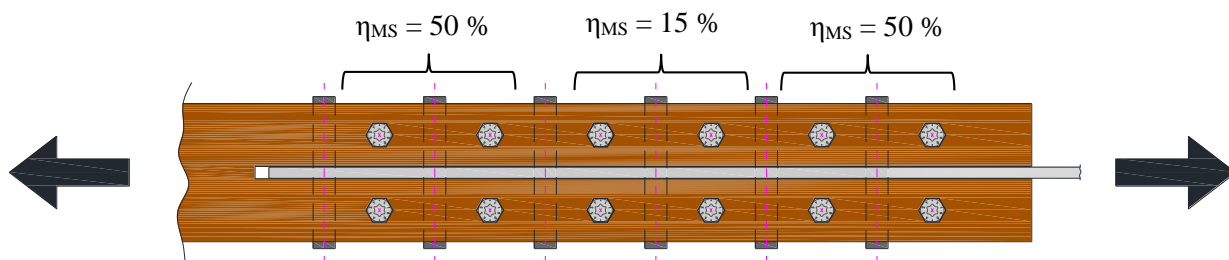
**Tabelle 6-5: Zusammenfassung der Prüfergebnisse**

Prüfserie	u [%]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>J</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_S$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	$\eta_{MS,mittel}$ [%]	$\eta_{MS,max}$ [%]
ST16-ES-n1-m1	11,0%	436	43.268	42.318	42.670	37,3%	97,3%	129%	29,1%	<b>29,1%</b>
ST20-ES-n1-m1	11,4%	486	57.404	62.427	65.322	57,3%	109%	119%	31,7%	<b>31,7%</b>
ST16-ES-n5-m1	11,2%	443	219.510	200.822	202.141	72,7%	91,4%	142%	31,2%	<b>51,0%</b>
ST16-ES-n2-m2	11,1%	455	180.336	170.746	170.746	69,4%	94,6%	129%	32,2%	<b>47,4%</b>

Es ist erkennbar, dass die maximalen Auslastungen der Messschrauben in Bezug auf ihre Herausziehtragfähigkeit ( $\eta_S$ ) im Mittel 72,7 % nicht überschreiten und diese ihre Funktion als Verstärkungselement von Stabdübelverbindungen somit erfüllen konnten. Im Durchschnitt liegt die Abweichung der berechneten mittleren Tragfähigkeit nach Johansen ( $F_{Joh.}$ ) von der tatsächlichen Tragfähigkeit ( $F_{max,P}$ ) unter zehn Prozent ( $\Phi_{P-J}$ ). Außerdem zeigt Tabelle 6-5 das durchschnittliche Verhältnis der Tragfähigkeiten von verstärkten Verbindungen zu unverstärkten Verbindungen der einzelnen Prüfserien ( $\Phi_{v-u}$ ). Unverstärkte, spaltgefährdete Verbindungen weisen bei den durchgeführten Prüfungen eine um 19 % bis 42 % geringere Tragfähigkeit auf.

Die maximale Verstärkungskraft beträgt für die Prüfserien mit einem Stabdübel rund 30 % der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge ( $\eta_{MS}$ ). Bei der Prüfserie ST20-ES-n1-m1 ( $\eta_{MS} = 31,7\%$ ) liegt dieser Wert etwas höher als bei Prüfserie ST16-ES-n1-m1 ( $\eta_{MS} = 29,1\%$ ). Dies ist auf die geringere Schlankheit (Seitenholzdicke zu Stabdübeldurchmesser) sowie der höheren Dichte der Prüfkörper der Serie ST20-ES-n1-m1 zurückzuführen. Die Prüfserien mit mehreren Stabdübeln hintereinander in Faserrichtung weisen einen deutlich höheren Kraftanteil in den Verstärkungsschrauben auf. Der in ÖNORM B 1995-1-1 [59] angegebene Anteil der Verstärkungskraft (30 %) wird bei den Prüfserien ST16-ES-n5-m1 und ST16-ES-n2-m2 jeweils in der unteren Verstärkungsschraube bereits nach einem Maschinenweg von 10 bis 15 mm überschritten und steigt bis zu  $\eta_{MS} = 51,0\%$  an. Dabei ist zu beachten, dass die Kraft in den Verstärkungselementen zur Mitte der Stabdübelreihe hin abnimmt (siehe Abbildung 6-15). Wird der Verstärkungsanteil aller Messschrauben der Seite der jeweiligen Stabdübelverbindung, die zuerst versagt, gemittelt, so liegt dieser Wert bei allen Prüfserien durchschnittlich bei  $\eta_{MS,mittel} \approx 30\%$  und somit im Bereich des angesprochenen Normwertes.

Aufgrund der Ergebnisse der Prüfserien wird vorgeschlagen, den Anteil der Querkraftverstärkung im Verhältnis zur Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge bei Verbindungen mit mehreren Stabdübeln hintereinander in Faserrichtung zu erhöhen. Der Vorschlag lautet, die äußeren beiden Drittel einer Stabdübelreihe mit  $\eta_{MS} = 50\%$  und das mittlere Drittel mit  $\eta_{MS} = 15\%$  der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge zu verstärken (vgl. Abbildung 6-28), um in der Nachweisführung  $n_{ef} = n$  setzen zu dürfen.



**Abbildung 6-28: Vorschlag der Verteilung der Verstärkungskraft**

## KAPITEL 7: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Selbstbohrende Holzschrauben werden im Ingenieurholzbau vorwiegend als Verbindungs-, jedoch auch als Verstärkungsmittel eingesetzt und sind dort nicht mehr wegzudenken. Welche Last jedoch tatsächlich in der einzelnen Schraube auftritt ist kaum auszumachen und nur mit großem Aufwand zu überwachen. Die Ermittlung der axialen Kraft in den Schrauben beruht speziell beim Einsatz als Verstärkungselement auf theoretischen Rechenmodellen. Vor allem aus diesen Gründen entstand die Idee, eine Messschraube zu produzieren, welche es ermöglicht, die tatsächlich auftretenden Kräfte in einer Schraube zu erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine derartige Messschraube entwickelt und hergestellt sowie verschiedene Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Ermittlung der Kraft in der Messschraube erfolgt mittels Dehnmessstreifen, die in einem entlang der Schraubenachse gebohrtem Loch appliziert werden. Zu diesem Zweck fand am Beginn dieser Arbeit eine Literaturrecherche zu den Grundlagen der DMS-Technik sowie zum Einsatz von Dehnmessstreifen im Holzbau statt. Es zeigte sich, dass die direkte Applizierung auf Holzoberflächen einige Schwierigkeiten mit sich bringt, jedoch auf metallischen Oberflächen, beispielsweise von Verbindungsmitteln, sehr gute Ergebnisse erzielt.

Für die Herstellung der Messschrauben-Prototypen wurden selbstbohrende Holzschrauben mit einem Durchmesser von zwölf Millimetern axial aufgebohrt und mit speziellen, temperaturkompensierenden Dehnmessstreifen appliziert. Die Verbindung zu einem Messverstärker erfolgte über ein Stecksystem sowie ein Kabel, welches mittels Drei-Leiter-Technik und Wheatstonescher Brückenschaltung angeschlossen wurde. Mit Hilfe einer Universalprüfmaschine wurde jede einzelne Messschraube stufenweise kalibriert. Es stellte sich heraus, dass die Messschrauben eine sehr hohe Genauigkeit aufweisen. Es ist jedoch notwendig alle Messschrauben einzeln zu kalibrieren. Mit Hilfe der aus den Kalibrierungsprüfungen gewonnenen Steigungen der Regressionsgeraden, wurde für jede Messschraube ein Umrechnungsfaktor zwischen Spannungsänderung im DMS und Kraft in der Messschraube ermittelt.

Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Messschrauben zeigten sich vor allem in der Sensortechnik für Untersuchungen im Labor sowie im Monitoring vom Tragverhalten von Verbindungssystemen in bestehenden Bauwerken. Da das Bauwerksmonitoring aufgrund der technologischen Weiterentwicklung von drahtlosen Verbindungsmöglichkeiten immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist die Messschraube prädestiniert für Echtzeitüberwachungen von Schraubenverbindungen im Ingenieurholzbau sowie als Vorwarnsystem bei Tragwerksüberbelastungen eingesetzt zu werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Schwerpunkt auf den Einsatz von Messschrauben als Verstärkungselement bei spaltgefährdeten Stabdübelverbindungen gesetzt. Dabei galt es, die auftretende Spaltkraft, welche bisher nur aus theoretischen Modellen (SCHMID [6] und BEJTKA [7]) bekannt war, messtechnisch zu erfassen. Laut ÖNORM B 1995-1-1 [59] sind spaltgefährdete Stabdübelverbindungen mit 30 % der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge zu verstärken, um die Anzahl der Hauptverbindungsmittel nicht abmindern zu müssen. Da dieser Wert in der Praxis immer wieder für Diskussionen sorgt, wurden fünf Prüfserien mit einem bzw. mehreren Stabdübeln hintereinander in Faserrichtung, welche mittels Messschrauben verstärkt wurden, geprüft. Dafür wurden Edelstahlstabdübel mit einem Durchmesser von 16 bzw. 20 mm eingesetzt und die Grenzsclankheit nach der Theorie von JOHANSEN [49] ermittelt, um die ungünstigsten Verhältnisse in Bezug auf die Spaltkraft zu erzielen. Es stellte sich heraus, dass die Angaben für die Dimensionierung der Verstärkungsmittel nach SCHMID [6] und ÖNORM B 1995-1-1 [59] auf der progressiven Seite liegen. Für Verbindungen mit einem Stabdübel wurde ein Verstärkungskraftanteil von knapp über 30 % der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge ermittelt. Bei Prüfungen von Verbindungen mit mehreren Stabdübeln hintereinander in Faserrichtung

erreichte der angesprochene Wert bis zu rund 50 % der Übertragungskraft je Stabdübel und Scherfuge. Es zeigte sich jedoch ein Verlauf der Verstärkungskraft, welcher zur Mitte der Stabdübelreihe hin abnimmt. Dies entspricht dem von VOLKERSEN [48] angegebenen Modell, welches die Schubkraftverteilung von langen Laschen- sowie von geklebten Verbindungen darstellt. Anhand dieser Erkenntnisse wird für spaltgefährdete Stabdübelverbindungen mit mehreren Verbindungsmitteln hintereinander in Faserrichtung eine Verstärkungskraft von 50 % in den äußeren zwei Dritteln und 15 % im inneren Drittel in Bezug auf die Kraft je Stabdübel und Scherfuge vorgeschlagen, um  $n_{ef} = n$  setzen zu dürfen. Um diese neuen Erkenntnisse zu verifizieren, wird vorgeschlagen, eine weitere Prüfserie mit umfangreicherer Prüfkörperanzahl sowie einer detaillierten Recherche im Bereich der Schubkraftverteilung von Stabdübelverbindungen mit mehreren hintereinander angeordneten Elementen durchzuführen.

Es ist zu beachten, dass die Herstellung der Messschrauben unter Laborbedingungen stattzufinden hat und äußere Einflüsse, wie Schmutz oder Luft einschüsse, bei der Applizierung der DMS einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Messschrauben haben. Der Einsatz der Messschrauben als Messinstrument bei verschiedenen labortechnischen Untersuchungen bewies deren Praxistauglichkeit und zeigte neue Anwendungsmöglichkeiten auf. Speziell im Monitoring von Schraubenverbindungen im Ingenieurholzbau steckt noch viel Potential. Die Messschraube bietet dabei die Möglichkeit, die resultierende Kraft in einer Verbindung eines Tragwerks zu messen und gegebenenfalls als Frühwarnsystem eingesetzt zu werden. Zudem könnte auch die Möglichkeit einer Reduzierung der Teilsicherheitsbeiwerte im Rahmen der Bemessung nach dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept gemäß Eurocode 0 [13] angedacht werden, wie es beispielsweise durch das „proof-loading“ [14] bei der Qualitätssicherung von Konstruktionsvollhölzern bereits gelungen ist.

# ANHANG

<b>ANHANG A</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis .....	IX
A-3	Tabellenverzeichnis .....	XV
<b>ANHANG B</b>	<b>DIAGRAMME DER AUSWERTUNG ALLER PRÜFSERIEN .....</b>	<b>XVI</b>
B-1	ST16-ST-n1-m1 .....	XVI
B-2	ST16-ES-n1-m1 .....	XXIII
B-3	ST20-ES-n1-m1 .....	XXX
B-4	ST16-ES-n5-m1 .....	XXXVII
B-5	ST16-ES-n2-m2 .....	XLIV
B-6	Holzfeuchtigkeit und Rohdichte aller Prüfkörper .....	LII

---



# ANHANG A VERZEICHNISSE

## A-1 Literaturverzeichnis

- [1] M. FLACH, Entwicklungen und Strategien für die Zukunft der Holzwirtschaft, Tagungsband „Holz verbindet“ – 1. Informationstage „Chancen und Entwicklungen im Holzbau“, pp 43-50, 2015.
- [2] H. J. BLASS und M. FRESE, Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Scientific Publishing, 2010.
- [3] H. KREUZINGER und S. WINTER, Evaluierung von Hallentragwerken - Die Schlussfolgerungen, Garmisch-Partenkirchen: Tagungsband des 12. Internationalen Holzbau-Forums, 2006.
- [4] PRODUKTDATENBLATT, *Dehnungsmeßstreifen für Messungen an Bolzen*, Bergisch Gladbach: Preusser-Messtechnik GmbH, DMS-E-155-02.
- [5] Midwest Dynamics PLC, [Online]. Available: [http://www.mwdynamics.com/services/custom\\_transducers\\_and\\_instrumented\\_bolts](http://www.mwdynamics.com/services/custom_transducers_and_instrumented_bolts). [Zugriff am 25.02.2015].
- [6] M. SCHMID, *Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz*, Dissertation an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 2002.
- [7] I. BEJTKA, *Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben*, Dissertation an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 2005.
- [8] M. KRUEGER und C. U. GROSSE, „Beitrag zur intelligenten Bauwerksüberwachung mit drahtlosen Sensornetzwerken,“ *Bautechnik 84*, Heft 7, pp. 502-508, 2007.
- [9] P. FELLMOSE, „Langzeitüberwachung von Holztragwerken,“ in *Tagungsband Karlsruher Tage 2012*, pp. 77-86, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012.
- [10] A. GAMPER, P. DIETSCH, M. MERK und S. WINTER, „Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen,“ *Bautechnik 90*, Heft 8, pp. 508-5019, 2013.
- [11] C. BRISCHKE, A. O. RAPP, R. BAYERBACH, N. MORSING, P. FYNHOLM und C. R. WELZBACHER, „Monitoring the ‘‘material climate’’ of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings,“ *Building and Environment 43*, p. 1575–1582, 2008.
- [12] S. GÜNTHER, *Langzeit-Monitoring von Wandaufbauten in Holz-Massivbauweise im Wohnbau „\_massive\_living“ in Graz*, Graz: Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2015.



- [13] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, *ÖNORM EN 1990 - Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [14] G. JEITLER, „„Proof loading“ als qualitätssichernde Maßnahme im Holzbau,“ Konferenzbeitrag, Wiener Leimholz Symposium 2008, Wien, 2008.
- [15] K. HOFFMANN, Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
- [16] PREUSSER-MESSTECHNIK GMBH, „Dehnungsmeßstreifen (DMS),“ [Online]. Available: [www.dms-technik.de](http://www.dms-technik.de). [Zugriff am 02 25 2015].
- [17] C. WHEATSTONE, *Scientific Papers*, London: The Physical Society of London, Taylor and Francis, 1879.
- [18] C. WHEATSTONE, „An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Vol. 133*, pp. 303-327, 1843.
- [19] W. THOMSON, „Elements of a Mathematical Theory of Elasticity,“ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 146*, pp. 481-498, 1856.
- [20] W. THOMSON, *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge: University Press, 1882.
- [21] ZSE Electronic Mess-Systeme & Sensortechnik GmbH, [Online]. Available: [http://www.zse.de/index.cfm/content/products/gr\\_id/222/theme/general.cfm](http://www.zse.de/index.cfm/content/products/gr_id/222/theme/general.cfm). [Zugriff am 25 02 2015].
- [22] STRAINERT COMPANY, „Custom internally strain gaged bolts and studs,“ [Online]. Available: <http://www.strainert.com>. [Zugriff am 25 02 2015].
- [23] B. M. RADCLIFFE, „A method for determining the elastic constants of wood by means of electric resistance strain gages,“ *Forest Products Journal 5*, pp. 77-80, 1955.
- [24] A. SILKER, „Making bonded wire electrical resistance strain gages for use on wood,“ *Forest Products Journal 17 (4)*, pp. 53-55, 1967.
- [25] A. SILKER, „Resistance strain gages and adhesives for wood,“ *Forest Products Journal 21*, pp. 40-43, 1971.
- [26] F.-W. BRÖKER, „Dehnungsmessungen an Holz mit direkt applizierten DMS,“ *Messtechnische Briefe 21/1985*, pp. 18-23, 1985.
- [27] R. J. BEER, M. VANEK und D. H. WALDEN, „Zuverlässigkeit einer DMS-Meßstelle auf Holz, Kurzzeitstabilität-Langzeitverhalten,“ *Holzforschung und Holzverwertung 42, 3*, pp. 48-51, 1990.
- [28] M. KUFNER, „Messungen mit Dehnungsmeßstreifen auf Holz und Holzwerkstoffen,“ in *Konferenzbeitrag, 8th Congress on Material Testing, 28 September – 1 October 1982*, pp. 889-894, OMIKK-Technoinform, Budapest, 1982.

- [29] M. KUFNER, „Messungen mit Dehnungsmeßstreifen auf Holz,“ in *Konferenzbeitrag, Symposium Dehnungsmesstechnik – Praktische Anwendung unter besonderen Anforderung zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit von Anlagen, Köln-Poll, 24. September 1987, pp. 1-11, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf, 1987.*
- [30] M. VANEK, Spannungsermittlung bei der Holz Trocknung mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen, Wien: Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 1983.
- [31] A. C. RUGE, „Strain gauge“. USA Patent US2340146 A, 25 01 1944.
- [32] E. E. SIMMONS, „Strain gauge“. USA Patent US2393714 A, 29 01 1946.
- [33] C. DUDESCU, „Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz,“ *Messtechnische Briefe 2/2008, pp. 2-26, 2008.*
- [34] C. DUDESCU, M. SOMOTECAN und M. HARDAU, „Aspects related direct application of strain gages on wood,“ in *Konferenzbeitrag, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, 25–28 November 2009, pp. 39-40, Vienna, Austria, DAAAM International, Wien, 2009.*
- [35] S. NEUHÄUSER, Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalenträgerwerken mittels Auflagerverschiebung, Dissertation am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2014.
- [36] J. SUDA, Messtechnik im konstruktiven Holzbau - Messaufbauten und Versuchsbeschreibungen, Wien: Diplomarbeit am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur, 2001.
- [37] P. NIEMZ, J. SCHREIBER, J. NAUMANN und M. STOCKMANN, „Experimentelle Ermittlung der Dehnungen im Probenquerschnitt bei Biegebelastung von Holzpartikelwerkstoffen,“ *Holz als Roh- und Werkstoff 65, pp. 459-468, 2007.*
- [38] J. NAUMANN, Grundlagen und Anwendung des In-plane-Moiréverfahrens in der experimentellen Festkörpermechanik, Düsseldorf: VDI Verlag, 1992.
- [39] J. EHLBECK und W. SIEBERT, „Praktikable Einleimmethode und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von grossen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern – Teil 1: Einleimmethode, Messverfahren, Haftspannungsverlauf,“ Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine Abt. Ingenieurholzbau der Universität Fridericana Karlsruhe, Karlsruhe, 1987.
- [40] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, *DIN 975:1986-09 Gewindestangen*, Berlin: Beuth Verlag, 1986.
- [41] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, *DIN 571:1986-12 Sechskant-Holzschrauben*, Berlin: Beuth Verlag, 1986.
- [42] H. J. BLASS und B. LASKEWITZ, „Axiale Kraftverteilung in der Bewehrung von Satteldachträgern mit gekrümmten Untergurt aus Brettschichtholz,“ *Bautechnik 79, Heft 7, pp. 446-454, 2002.*

- [43] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, *E DIN 1052:2000-05 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*, Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [44] A. BERNASCONI, „Aspekte des Tragverhaltens von eingeklebten Gewindestangen,“ in *Konferenzbeitrag, 15. internationalen Holzbauforum*, Garmisch-Partenkirchen, 2009.
- [45] B. WALLNER, Versuchstechnische Evaluierung feuchteinduzierter Kräfte in Brettschichtholz verursacht durch das Einbringen von Schraubstangen, Graz: Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, 2012.
- [46] T. UIBEL, *Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben*, Karlsruhe: Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2012.
- [47] A. RINGHOFER und G. SCHICKHOFER, „Investigations Concerning the Force Distribution along Axially Loaded Self-tapping Screws,“ RILEM Bookseries 9, 10.1007/978-94-007-7811-5\_19, 2014.
- [48] O. VOLKERSEN, Die Schubkraftverteilung auf die Verbindungselemente langer Laschenverbindungen, Wien: Dissertation an der Technischen Hochschule Wien, 1943.
- [49] K. W. JOHANSEN, „Theory of Timber Connections,“ *International Association for Bridge and Structural Engineering, Publication No. 9*, pp. 249-292, 1949.
- [50] H. J. BLASS und S. Martin, Spaltgefahr von Nadelhölzern, Karlsruhe : Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), 2002.
- [51] G. MARTEN, „Spalten und Tragfähigkeit von Nagelverbindungen,“ *Fortschritte und Forschung im Bauwesen, Reihe D, Heft 9*, pp. 55-89, 1953.
- [52] R. KEYLWERTH, „Spalten, Spaltbeanspruchung und Querfestigkeit des Holzes,“ *Holz als Roh- und Werkstoff 9*, pp. 1-7, 1951.
- [53] A. UGRENOVIC, „Planmäßige Untersuchungen über Spaltfestigkeit und Spaltbarkeit,“ *Holz als Roh- und Werkstoff, 3. Jg., Heft 5*, pp. 143-150, 1940.
- [54] A. UGRENOVIC, „Untersuchungen über die Spaltfestigkeit und ihren Zusammenhang mit dem Bau der Markstrahlen,“ *Holz als Roh- und Werkstoff, 4. Jg., Heft 1*, pp. 26-31, 1941.
- [55] A. UGRENOVIC, „Untersuchungen über die Abhängigkeit der Spaltfestigkeit von der Spaltebene und vom Feuchtigkeitsgehalt,“ *Holz als Roh- und Werkstoff, 5. Jg., Heft 7*, pp. 225-230, 1942.
- [56] A. JORISSEN, Double shear timber connections with dowl type fasteners, Delft: PhD-Thesis, Delft University Press, 1998.
- [57] H. G. L. PRION, F. LAM und R. MASTSCHUCH, „Reinforced bolted timber connections,“ RILEM Symposium on Joints in Timber Structures, pp. 133-142, Stuttgart, 2001.
- [58] R. MASTSCHUCH, Reinforced multiple bolt timber connections, Vancouver: Doctoral Thesis, University of British Columbia, 2000.

- [59] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, *ÖNORM B 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*“, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [60] T. BOGENBERGER, „Bruchenergie für Rollschub (Mode II) im Klebeflächenbereich,“ holz.bau forschungs gmbh, Graz, 2002.
- [61] D. GROSS und T. SEELIG, *Bruchmechanik - mit Einführung in die Mikromechanik*, 5. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [62] G. R. IRWIN, „Fracture,“ *Handbuch der Physik Vol. 3/6*, pp. 551-590, 1958.
- [63] K. B. BROBERG, *Cracks and Fracture*, London: Academic Press, 1999.
- [64] Z. P. BAZANT und J. PLANAS, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, Boca Raton: CRC Press , 1997.
- [65] O. BORTH, *Abschätzung der Tragfähigkeit von Queranschlüssen an Trägern aus Voll- und Brettschichtholz im Rahmen der linear-elastischen Bruchmechanik*, Weimar: Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2002.
- [66] M. SCHEFFLER, P. NIEMZ, M. DIENER, V. LUSTIG und H.-J. HARDKE, „Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit an Laubholz in den Rissöffnungsmodi I und II,“ *Holz als Roh- und Werkstoff* 62, pp. 93-100, 2004.
- [67] P. NIEMZ und M. DIENER, „Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit an Holzwerkstoffen,“ *Holz als Roh- und Werkstoff* 57, pp. 222-224, 1999.
- [68] A. REITERER und S. TSCHEGG, „The influence of moisture content on the mode I fracture behaviour of sprucewood,“ *Journal of Materials Science Vol. 37*, pp. 4487-4491, 2002.
- [69] L. DAUDEVILLE, „Fracture in spruce: experiment and numerical analysis by linear and non linear fracture mechanics,“ *Holz als Roh- und Werkstoff* 57, pp. 425-432, 1999.
- [70] S. AICHER, „Bruchenergien, kritische Energiefreisetzungsraten und Bruchzähigkeiten von Fichte bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Faserrichtung,“ *Holz als Roh- und Werkstoff* 52, pp. 361-370, 1994.
- [71] M. LOGEMANN und W. SCHELLING, „Die Bruchzähigkeit von Fichte und ihre wesentlichen Einflußparameter,“ *Holz als Roh- und Werkstoff* 50, pp. 117-121, 1992.
- [72] S. STANZL-TSCHEGG, E. TSCHEGG und A. TEISCHINGER, „Fracture energy of spruce wood after different drying procedures,“ *Wood and Fiber Science* 26 (4), pp. 467-478, 1994.
- [73] P. RODD, „Timber Joints with Improved Circular Dowel Fasteners,“ *Proceedings of the International Conference on Timber Engineering*, Vol. 1, pp. 26-37, Seattle, 1988.
- [74] H. WERNER, *Tragfähigkeit von Holz-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln unter Berücksichtigung streuender Einflußgrößen*, Dissertation an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana in Karlsruhe, 1993.

- [75] R. SCHNETGÖKE, C. KLINZMANN und H. Dietmar, „Zuverlässigkeitsorientierte Bewertung von Bauwerken auf Grundlage der Bauwerksüberwachung,“ *Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 8*, pp. 585-595, 2006.
- [76] P. DIETSCH und S. WINTER, „Typische Tragwerksmängel im Ingenieurholzbau und Empfehlungen für Planung, Ausführung und Instandhaltung,“ in *Tagungsband „8. Grazer Holzbau-Fachtagung“*, Graz, 2009.
- [77] OBERSTE BAUBEHÖRDE IM BAYRISCHEN STAATMINISTERIUM DES INNEREN, *Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten*, München, 2006.
- [78] H. J. BLASS, H. BRÜNINGHOFF, H. KREUZINGER, B. RADOVIC und S. WINTER, *Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz*, Wuppertal: Studiengemeinschaft Holzleimbau, 2006.
- [79] ETA-11/0190, *Europäische Technische Zulassung, „Würth Schrauben“, Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel*, Adolf Würth GmbH & Co. KG, Jahr 2013, gültig bis 27.06.2018.
- [80] PRODUKTDATENBLATT, *Bolt Strain Gauge series BTM*, Tokio: Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd..
- [81] PRODUKTDATENBLATT, *Operation Manual of TML Strain Gauge Adhesive Type A-2*, Tokyo: Tokyo Sokki kenkyujo Co., Ltd..
- [82] U. BANKHOFER und J. VOGEL, *Datenanalyse und Statistik - Eine Einführung für Ökonomen im Bachelor*, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2008.
- [83] P. SIBBERSTEN und H. LEHNE, *Statistik - Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*, Heidelberg: Springer Gabler, 2015.
- [84] PRODUKTDATENBLATT, *TOOLCRAFT Epoxydharz L*, Hirschau: Conrad Electronic SE, 2010.
- [85] ETA-07/0260, *Europäische Technische Zulassung, Injektionssystem Hilti HIT-RE 500-SD für gerissenen Beton*, Hilti Aktiengesellschaft, 2013, gültig bis 16.05.2018.
- [86] Z-9.1-707, *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, 2K-PUR-Klebstoff PURBOND CR 421 zum Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe*, Berlin: Purbond AG, 2015, gültig bis 01.06.2016.
- [87] PRODUKTDATENBLATT, *UHU Plus Endfest 2K-Epoxydharzkleber*, Bühl (Baden): UHU GmbH & Co. KG.
- [88] A. RINGHOFER, R. BRANDNER und G. SCHICKHOFER, „A Universal Approach for Withdrawal Properties of Self-Tapping Screws in Solid Timber and Laminated Timber Products,“ in *Konferenzbeitrag, International Network on Timber Engineering Research - INTER / 48 - 7 - 1*, Sibenik, Kroatien, 2015.
- [89] Z-9.1-616, *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, PUR-Klebstoff PURBOND HB 110 für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen*, Berlin: Purbond AG, 2014, gültig bis 30.09.2019.

- [90] PRODUKTDATENBLATT, *10072 Tieflochspiralbohrer PFX, zylindrisch, überlang, HSS-E*, Graz: Lackner & Urnitsch Präzisionsmaschinen und Werkzeuge Ges.m.b.H, 2015.
- [91] PRODUKTDATENBLATT, *10005 PROFI-Qualität DIN 338 TiN A002*, Graz: Lackner & Urnitsch Präzisionsmaschinen und Werkzeuge Ges.m.b.H, 2015.
- [92] PRODUKTDATENBLATT, *QuantumX MX840A Universalmessverstärker*, Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [93] PRODUKTDATENBLATT, *QuantumX MX410A Universalmessverstärker*, Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [94] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, *ÖNORM EN 383: Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
- [95] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, *ÖNORM EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2004.
- [96] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, *ÖNORM ISO 3131: Holz - Bestimmen der Dichte für physikalische und mechanische Prüfungen*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1996.
- [97] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT, *ÖNORM EN 384: Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2010.
- [98] H. J. BLASS und F. COLLING, „Load-carrying capacity of dowelled connections,“ in *Konferenzbeitrag, International Network on Timber Engineering Research - INTER / 48 - 7 - 3*, Sibenik, Kroatien, 2015.
- [99] O. VOLKERSEN, „Die Schubkraftverteilung in Leim- Niet- und Bolzenverbindungen,“ *Energie und Technik Heft 3/1953*, pp. 68-71, 1953.
- [100] C. O. CRAMER, „Load Distribution in Multiple-Bolt Tension Joints,“ *Journal of the Structural Division Vol. 94, No ST5*, pp. 1107-1117, 1968.
- [101] G. LANTOS, „Load Distribution of a Row of Fasteners Subjected to Lateral Load,“ *Wood Science, Vol. 1, No. 3*, pp. 129-136, 1969.
- [102] T. WILKINSON, „Load Distribution among Bolts Parallel to Load,“ *Journal of Structural Engineering Vol. 112, No. 4*, pp. 835-851, 1986.
- [103] L. J. DANNENBERG und R. C. SEXSMITH, „Shear-plate load distribution in laminated timber joints,“ Report No. 361, Department of Structural Engineering, Cornell University, Cornell, 1976.
- [104] N. ISYUMOV, „Load Distribution in Multiple Shear-plate Joints in Timber,“ Publication No. 1203, Department of Forests , Ottawa, 1967.



- [105] F. WILCOXON, „Individual Comparisons by Ranking Methods,“ *Biometrics Bulletin*, Vol. 1, No. 6., pp. 80-83, 1945.
- [106] D. WHITNEY und H. MANN, „On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other,“ *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 18, No. 1, pp. 50-60, 1947.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Schematischer Aufbau einer DMS-Messstelle [16] .....	3
Abbildung 2-2:	Hysterese bei DMS – Applikationen [15] .....	7
Abbildung 2-3:	Darstellung einer Wheatstoneschen Brückenschaltung [15] .....	8
Abbildung 2-4:	Anwendungsformen der Wheatstoneschen Brückenschaltung in der DMS-Technik [15] .....	9
Abbildung 2-5:	Bolzen mit DMS appliziert [4] .....	10
Abbildung 2-6:	Messschraube im Stahlbau [5].....	11
Abbildung 2-7:	zylindrische DMS in Bolzen [21].....	11
Abbildung 2-8:	Messbolzen im Stahlbau – verschiedene Formen [22].....	11
Abbildung 2-9:	4-Punkt-Biegeprüfung zur Ermittlung der Dehnung der Randfaser [33] .....	13
Abbildung 2-10:	geometrische Beziehungen bei einer Balkenbiegung [33] .....	13
Abbildung 2-11:	Prüfkonfiguration – Vergleich Moiré-Verfahren und DMS-Messung (Abmessungen in mm) [37].....	14
Abbildung 2-12:	exemplarische Anordnung der Dehnmessstreifen auf einer eingeklebten Gewindestange [39].....	15
Abbildung 2-13:	Satteldachträgerabmessungen für den 4-Punkt-Biegeprüfung [42].....	16
Abbildung 2-14:	Verteilung der Dehnmessstreifen auf den Gewindebolzen [42].....	17
Abbildung 2-15:	exemplarische Kraftverteilung eines Verstärkungselements in Satteldachträgern [42] .....	17
Abbildung 2-16:	exemplarischer Verlauf der Normalkraft in der Stahlstange bei $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ [44] .....	18
Abbildung 2-17:	exemplarischer Schubspannungsverlauf in der Kontaktfuge bei $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 90^\circ$ [44] .....	18
Abbildung 2-18:	Bearbeitung der Schraubstangen zur Anbringung der Dehnmessstreifen [45].....	19
Abbildung 2-19:	Messstelle auf Schraubstange [45]: links: applizierter DMS mit Anschlusskabel; rechts: Schutzhülse .....	20
Abbildung 2-20:	Zugangsloch zur Messstelle mittels eingebohrtem Loch [45].....	20
Abbildung 2-21:	verschlossene Messstelle [45] .....	20
Abbildung 2-22:	Prüfkörper zur Ermittlung der Spaltkräfte von Schrauben nach [46].....	21
Abbildung 2-23:	exemplarische Prüfkonfiguration zur Ermittlung der Spaltkräfte beim Eindrehen von Holzschrauben [46].....	22
Abbildung 2-24:	Prüfkörper nach der Prüfdurchführung [46].....	23
Abbildung 2-25:	Resultierende Kräfte in den Messschrauben im Bezug zur Einschraubtiefe [46] .	23
Abbildung 2-26:	Prüfkonfiguration der Ausziehprüfungen [47] .....	24
Abbildung 2-27:	Verteilung der Axialkraft in den Schrauben in Abhängigkeit vom Winkel $\alpha$ [47]	25
Abbildung 3-1:	Last-Verschiebungskurven von verstärkten und unverstärkten Stabdübelverbindungen .....	27
Abbildung 3-2:	Rissöffnungsarten nach IRWIN [62] aus [61].....	28
Abbildung 3-3:	Umfeld der Rissspitze beim K-Konzept [61] .....	28

Abbildung 3-4:	$K_I$ charakterisiertes Spannungsfeld [61].....	29
Abbildung 3-5:	Winkel zwischen Rissebene und Jahringtangente (Rissystem) [65] .....	31
Abbildung 3-6:	Rissfortschritt und Energiefreisetzung [61].....	32
Abbildung 3-7:	Modellbildung einer verstärkten Verbindung nach SCHMID [6].....	34
Abbildung 3-8:	Verformungslinie eines elastisch gebetteten Balkens [6].....	34
Abbildung 3-9:	Annahmen von WERNER [74] zur Berechnung der Spaltkraft $V$ .....	35
Abbildung 3-10:	Modellbildung einer verstärkten Verbindung nach BEJTKA [7].....	37
Abbildung 3-11:	Verstärkte Stabdübelverbindungen – bruchmechanische Modellvarianten [7].....	38
Abbildung 3-12:	Kragarmmodell nach BEJTKA [7].....	39
Abbildung 3-13:	exemplarische Ermittlung des Verstärkungsgrades $K_{ax,erf}$ [7] .....	41
Abbildung 3-14:	Einsatz von Messschrauben als Verstärkung bzw. „Messinstrument“ bei Stabdübelverbindungen .....	42
Abbildung 3-15:	Bauwerksbewertungskreislauf [75] .....	44
Abbildung 3-16:	Messschraube als Bauwerksmonitoringinstrument .....	45
Abbildung 4-1:	Aufbau einer Messschraube – Assy 3.0 Kombi 12 x 200 Prototyp.....	46
Abbildung 4-2:	Aufbau einer Messschraube – Assy 3.0 Kombi 12 x 160 VG Prototyp .....	46
Abbildung 4-3:	Messschrauben-Prototypen: links: aufgeschliffene Messschraube; Mitte: unterschiedliche Typen von Messschrauben mit Verkabelung; rechts: Detail Stecksystem .....	48
Abbildung 4-4:	Bildung der Brückenschaltung in den Anschlusskabeln: links: gelöteter Anschluss von unten; Mitte: schematische Skizze; rechts: gelöteter Anschluss von oben.....	49
Abbildung 4-5:	Anschlusskabel für die Messschrauben.....	49
Abbildung 4-6:	Bezeichnung der Messschrauben bzw. Kalibrierungsprüfungen.....	50
Abbildung 4-7:	Kalibrierungsprüfungen – Prüfkongfiguration .....	51
Abbildung 4-8:	Kalibrierungsprüfungen: links: Prüfkongfiguration; rechts: Einspannhülse .....	51
Abbildung 4-9:	Kalibrierungsprüfungen – Prüfablauf.....	52
Abbildung 4-10:	exemplarisches Kraft-Zeit-Diagramm für die Kalibrierprüfung MS-04-NH-03... ..	52
Abbildung 4-11:	exemplarisches Kraft-Spannungsänderungs-Diagramm für die für die Kalibrierprüfung MS-04-NH-03.....	53
Abbildung 4-12:	Regressionsgeraden der Messschrauben MS-01 bis MS-05.....	55
Abbildung 4-13:	Bezeichnung der Langzeitversuche .....	57
Abbildung 4-14:	Skizze der Prüfkongfiguration für die Langzeitversuche .....	58
Abbildung 4-15:	Foto der Prüfkongfiguration für die Langzeitversuche .....	58
Abbildung 4-16:	Langzeitprüfung der Messschraube MS-01 – Messzeit: 112 Stunden .....	59
Abbildung 4-17:	Langzeitprüfung der Messschraube MS-02 – Messzeit: 22 Stunden .....	60
Abbildung 4-18:	Langzeitprüfung der Messschraube MS-04– Messzeit: 34 Minuten.....	60
Abbildung 4-19:	Langzeitprüfung der Messschraube MS-05– Messzeit: 95 Stunden .....	61
Abbildung 4-20:	Kriechversuche verschiedener Klebstoffe; Herstellung: links: Einfüllen des Hilti-Klebstoffs [85]; Mitte: Einfüllend des Toolcraft-Klebstoffs [84], vermischt mit feinem Quarzsand; rechts: fertige Versuchskörper.....	62

Abbildung 4-21:	Kriechversuche verschiedener Klebstoffe – Versuchskonfiguration .....	63
Abbildung 4-22:	Kriechverlauf des TOOLCRAFT Epoxydharz L Klebstoffs [84] .....	63
Abbildung 4-23:	Kriechverlauf des TOOLCRAFT Epoxydharz L Klebstoffs mit feinem Sand vermischt.....	63
Abbildung 4-24:	Kriechverlauf des Hilti HIT-RE 500-SD Klebstoffs [85].....	64
Abbildung 4-25:	Kriechverlauf des A2-Klebstoffs [81] .....	64
Abbildung 4-26:	Kriechverlauf des Purbond CR 421 Klebstoffs [86] .....	64
Abbildung 4-27:	Kriechverlauf des UHU Plus Endfest 2K-Epoxydharzklebers [87] .....	65
Abbildung 5-1:	Versuchskonfiguration für Tastversuche einer mit Messschrauben verstärkten Stabdübelverbindung (Abmessungen in mm) .....	67
Abbildung 5-2:	Probekörper für die Tastversuche einer verstärkten Stabdübelverbindung (Abmessungen in mm).....	68
Abbildung 5-3:	Durchführung der verstärkten Stabdübel-Tastversuche – Versuchskonfiguration	69
Abbildung 5-4:	Tastversuche - Versuchsablauf.....	70
Abbildung 5-5:	Tastversuch der verstärkten Stabdübelverbindung MS-ST-01.....	71
Abbildung 5-6:	Tastversuch der verstärkten Stabdübelverbindung MS-ST-02.....	71
Abbildung 5-7:	Tastversuche MS-ST-01 und MS-ST-02 – Mittelwerte .....	72
Abbildung 5-8:	Bruchbilder der Tastversuche.....	72
Abbildung 5-9:	Versagensmechanismen nach Johansens Theorie, aus [6] .....	74
Abbildung 5-10:	Bruchmechanisches Modell für den Tastversuch – nicht gerissen, vollständig gebettet .....	75
Abbildung 5-11:	Bruchmechanisches Modell für den Tastversuch – aufgerissen nach BEJTKA [7].. .....	75
Abbildung 5-12:	Bruchmechanisches Modell für den Tastversuch – nach SCHMID [6] .....	76
Abbildung 5-13:	Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit $n = 5$ – nicht gerissen, vollständig gebettet.....	77
Abbildung 5-14:	Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit $n = 5$ – bis zur Schraube aufgerissen.....	77
Abbildung 5-15:	Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit $n = 5$ – aufgerissen nach BEJTKA [7].....	77
Abbildung 5-16:	Modell einer einreihigen Stabdübelverbindung mit $n = 5$ – nach SCHMID [6] ...	77
Abbildung 5-17:	Bezeichnung der Prüfkörper.....	79
Abbildung 5-18:	Prüfkonfiguration der Prüfserie ST16-ST-n1-m1 (Abmessungen in mm).....	81
Abbildung 5-19:	Prüfkonfiguration der Prüfserie ST16-ES-n1-m1 (Abmessungen in mm).....	82
Abbildung 5-20:	Prüfkonfiguration der Prüfserie ST20-ES-n1-m1 (Abmessungen in mm).....	83
Abbildung 5-21:	Prüfkonfiguration der Prüfserie ST16-ES-n5-m1 (Abmessungen in mm).....	84
Abbildung 5-22:	Prüfkonfiguration der Prüfserie ST16-ES-n2-m2 (Abmessungen in mm).....	85
Abbildung 5-23:	Abmessungen der Prüfkörper (Abmessungen in mm) .....	86
Abbildung 5-24:	Hobeln der Lamellen für die Prüfkörper: links: Hobelvorgang; rechts: fertig gehobelte Lamellen .....	87

Abbildung 5-25:	Formatieren der Prüfkörperlamellen: links: Ablängen der Lamellen auf der Tischkreissäge und Zusammenstellen der BSH-Prüfkörper.....	87
Abbildung 5-26:	Kleben der Prüfkörper: links: Klebstoffauftrag; rechts: Verpressen der Lamellen	88
Abbildung 5-27:	Bearbeitung der Prüfkörper: links: Bohren der Stabdübellöcher; rechts: Schlitzen mit der Bandsäge .....	88
Abbildung 5-28:	Beschriftung und Lagerung der Prüfkörper.....	88
Abbildung 5-29:	Abmessungen der Schlitzbleche (Abmessungen in mm) .....	89
Abbildung 5-30:	Herstellen der Schlitzbleche: links: Ablängen des Flachstahls; rechts: Bohren der Löcher.....	90
Abbildung 5-31:	Bearbeiten der Schlitzbleche im Einspannbereich: links: Anschweißen der Backen; Mitte: Fräsen auf 50 mm Stärke; rechts: Bohren des Bolzenlochs.....	90
Abbildung 5-32:	fertige Schlitzbleche .....	91
Abbildung 5-33:	Bearbeiten der Edelstahl-Stabdübel: links: Ablängen; rechts: Anbringen einer Fase .....	91
Abbildung 5-34:	Stabdübel für die Prüfungen.....	91
Abbildung 5-35:	Aufbau der Messschrauben für eine Stabdübelreihe .....	92
Abbildung 5-36:	Aufbau der Messschrauben für zwei Stabdübelreihen .....	92
Abbildung 5-37:	Verlängerung der DMS-Drähte: links: Anlöten der Verlängerungsdrähte; rechts: elektrische Isolierung der Lötstelle.....	93
Abbildung 5-38:	Bohren der axialen Löcher in die Messschrauben: links: Händischer Vorschub auf der Drehbank; Mitte: Bohren des Lochs; rechts: Einspannvorrichtung der Schrauben und Bohrkopf.....	93
Abbildung 5-39:	Applizierung der DMS: links außen: Reinigen der Bohrlöcher mit einer Bürste; links Mitte: Reinigen mit Aceton; rechts Mitte: Einfüllen des Klebstoffs; rechts außen: Einführen des DMS .....	94
Abbildung 5-40:	Herstellung des Stecksystems für den Kabelanschluss .....	94
Abbildung 5-41:	fertiges Stecksystem der neuen Messschraubenreihe: links: Stecksystem für Messschrauben mit einem applizierten DMS; rechts: Stecksystem für Messschrauben mit zwei applizierten DMS .....	95
Abbildung 5-42:	fertig hergestellte Messschrauben .....	96
Abbildung 5-43:	Prüfablauf der Kalibrierungsprüfung MS-19-01 .....	97
Abbildung 5-44:	Kraft-Spannungsänderungs-Diagramm der Kalibrierungsprüfung MS-19-01 .....	97
Abbildung 5-45:	Abweichung der Regressionsgeraden zur tatsächlich aufgebrauchten Kraft der Kalibrierungsprüfung MS-19-01( in Prozent) .....	98
Abbildung 5-46:	Abweichung der Regressionsgeraden zur tatsächlich aufgebrauchten Kraft der Kalibrierungsprüfung MS-19-01( in Newton).....	98
Abbildung 5-47:	Regressionsgeraden der Messschrauben MS-11 bis MS-25.....	101
Abbildung 5-48:	Regressionsgeraden der Messschrauben MS-26 bis MS-30.....	101
Abbildung 5-49:	Beschädigte Messschrauben: links: Bruch einer Messschraube; rechts: plastische Deformation einer Messschraube .....	102
Abbildung 5-50:	Regressionsgeraden von MS 16 vor und nach dem Einsatz bei den Hauptprüfungen .....	104

Abbildung 5-51:	Abweichung der gemessenen Kraft von MS 16 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in %) .....	104
Abbildung 5-52:	Abweichung der gemessenen Kraft von MS 16 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in N) .....	105
Abbildung 5-53:	Regressionsgeraden von MS 17 vor und nach dem Einsatz bei den Hauptprüfungen .....	105
Abbildung 5-54:	Abweichung der gemessenen Kraft von MS 17 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in %) .....	105
Abbildung 5-55:	Abweichung der gemessenen Kraft von MS 17 zur gemessenen Kraft der Prüfmaschine (in N) .....	106
Abbildung 5-56:	Messschrauben im Prüfkörper: links: Eindrehen der Messschrauben; rechts: Stecksystem .....	107
Abbildung 5-57:	Anordnung der Messschrauben: links: Prüfreihe 1-3; Mitte: Prüfreihe 4; rechts: Prüfreihe 5 .....	107
Abbildung 5-58:	Universalprüfmaschine und Messverstärker QuantumX MX840A und MX410A ... ..	108
Abbildung 5-59:	Konfiguration der Stabdübelprüfung ST16-ES-n5-m1-04 .....	109
Abbildung 5-60:	Ablauf der Stabdübelprüfungen der Hauptserie .....	110
Abbildung 5-61:	Versagen der Stabdübelverbindungen: links: Aufspalten einer unverstärkten Verbindung; rechts: Versagen der Verstärkungsschrauben.....	111
Abbildung 5-62:	Versagen der Stabdübelverbindung: links: vor Prüfbeginn; rechts: Prüfung der Stabdübel bis zur Berührung der Messschrauben.....	111
Abbildung 6-1:	Winkel zwischen Jahrringtangente und Stabdübelachse .....	113
Abbildung 6-2:	Beispiel für die maximale Kraft der Prüfmaschine $F_{\max}$ und Kraft am Plateau $F_{\max,P}$ .....	115
Abbildung 6-3:	exemplarische Auswertung – Kraftanteil in der Messschraube .....	117
Abbildung 6-4:	Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1 .....	118
Abbildung 6-5:	Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST16-ES-n1-m1-04.....	119
Abbildung 6-6:	Bruchbilder der Prüfung ST16-ES-n1-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19 .....	119
Abbildung 6-7:	Jahrring-Scan der Prüfung ST16-ES-n1-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19 .....	119
Abbildung 6-8:	Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST20-ES-n1-m1 .....	121
Abbildung 6-9:	Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST20-ES-n1-m1-02.....	122
Abbildung 6-10:	Bruchbilder der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19 .....	122
Abbildung 6-11:	Bruchbilder der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02: Ausscheren eines Blockes unter dem Stabdübel auf der Seite MS-16.....	123
Abbildung 6-12:	Jahrring-Scan der Prüfung ST20-ES-n1-m1-02: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19 .....	123
Abbildung 6-13:	Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n5-m1 .....	124
Abbildung 6-14:	Verstärkungsschrauben nach dem Versagen der Prüfung ST16-ES-n5-m1-00... ..	124



Abbildung 6-15:	Verlauf der Kräfte in den Verstärkungsschrauben einer Verbindung mit $n = 5$ Stabdübeln .....	125
Abbildung 6-16:	Vergleich des Kraftverlaufs der Stabdübel nach LANTOS [101] mit dem Verlauf der in den Prüfungen ermittelten Verstärkungskräfte.....	126
Abbildung 6-17:	Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST16-ES-n5-m1-04.....	127
Abbildung 6-18:	Verlauf der Verstärkungsnutzungsgrade der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04.....	127
Abbildung 6-19:	Bruchbilder der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19 .....	128
Abbildung 6-20:	Jahrring-Scan der Prüfung ST16-ES-n5-m1-04: links: Seite MS-16; rechts: Seite MS-19 .....	128
Abbildung 6-21:	Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2.....	129
Abbildung 6-22:	Druckkraft in der Messschraube.....	130
Abbildung 6-23:	Kraftanteil in den Messschrauben – Prüfung ST16-ES-n2-m2-02.....	131
Abbildung 6-24:	$\eta_{MS,max}$ der Prüfung ST16-ES-n2-m2-02.....	131
Abbildung 6-25:	Bruchbilder der Prüfung ST16-ES-n2-m2-02: links: Seite MS-26; rechts: Seite MS-27 .....	132
Abbildung 6-26:	Jahrring-Scan der Prüfung ST16-ES-n2-m2-02: links: Seite MS-26; rechts: Seite MS-27 .....	132
Abbildung 6-27:	Vergleich von $n_{ef}/n$ .....	133
Abbildung 6-28:	Vorschlag der Verteilung der Verstärkungskraft.....	134

## A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Dehnmessstreifen BTM – Abmessungen und Eigenschaften [4] .....	10
Tabelle 3-1:	K-Faktoren für ausgewählte Fälle [61] .....	30
Tabelle 3-2:	Bruchzähigkeiten einiger Werkstoffe [61] .....	31
Tabelle 3-3:	Bruchzähigkeiten für Laubholz [66] .....	31
Tabelle 3-4:	Reibungsbeiwerte für stiftförmige Verbindungsmittel aus Stahl [73] .....	35
Tabelle 4-1:	Verwendete Schrauben für MS-01 bis MS-05 .....	55
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der Regressionsanalysen der Teilgewinde-Messschrauben MS-01 bis MS-03 .....	56
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der Regressionsanalysen der Vollgewinde-Messschrauben MS-04 und MS-05 .....	56
Tabelle 5-1:	Benennung, Anzahl und Abmessungen der Prüfkörper der Prüfserien 1 bis 5 .....	79
Tabelle 5-2:	Benennung der neuen Messschrauben .....	95
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen der neuen Messschraubenreihe MS-11 bis MS-25 .....	99
Tabelle 5-4:	Ergebnisse der Kalibrierungsprüfungen der neuen Messschraubenreihe MS-26 bis MS-30 .....	100
Tabelle 5-5:	Vergleich der Regressionsanalysen von Messschrauben mit einem applizierten DMS vor und nach den Stabdübelprüfserien .....	103
Tabelle 5-6:	Vergleich der Regressionsanalysen von Messschrauben mit zwei applizierten DMS vor und nach den Stabdübelprüfserien .....	103
Tabelle 5-7:	Parameter für den Prüfablauf der Hauptserie .....	110
Tabelle 6-1:	Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n1-m1 .....	117
Tabelle 6-2:	Ergebnisse der Prüfserie ST20-ES-n1-m1 .....	120
Tabelle 6-3:	Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n5-m1 .....	123
Tabelle 6-5:	Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n2-m2 .....	129
Tabelle 6-6:	Zusammenfassung der Prüfergebnisse .....	134

# ANHANG B DIAGRAMME DER AUSWERTUNG ALLER PRÜFSERIEN

## B-1 ST16-ST-n1-m1

### B-1-1 Zusammenfassung der Ergebnisse aller Prüfungen der Serie

Tabelle ANHANG 1: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ST-n1-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	11,8%	424	39.205	42.800	42.800	k. MS	109%	-	j/e	k. MS
01	12,4%	442	40.064	40.190	40.190	15,1%	100%	-	n	10,6%
02	11,7%	451	40.455	44.319	44.319	16,2%	110%	-	n	11,2%
03	11,3%	433	39.620	45.280	45.280	22,6%	114%	-	n	13,7%
04	11,8%	456	40.701	49.604	49.604	15,6%	122%	-	n	9,13%
05	11,9%	445	40.185	46.660	46.660	13,5%	116%	-	n	8,68%
Min-	11,3%	433	39.620	40.190	40.190	13,5%	100%	-	-	8,68%
$\bar{x}_{med}$	11,8%	445	40.185	45.280	45.280	15,6%	114%	-	-	10,6%
Max.	12,4%	456	40.701	49.604	49.604	22,6%	122%	-	-	13,7%
$\bar{x}_{arith.}$	11,8%	445	40.205	45.211	45.211	16,6%	112%	-	-	10,7%
$\sigma$	0,368%	8,63	410	3.443	3.443	3,50%	8,08%	-	-	1,99%
COV	3,27%	1,94%	1,02%	7,61%	7,61%	21,1%	7,19%	-	-	18,7%

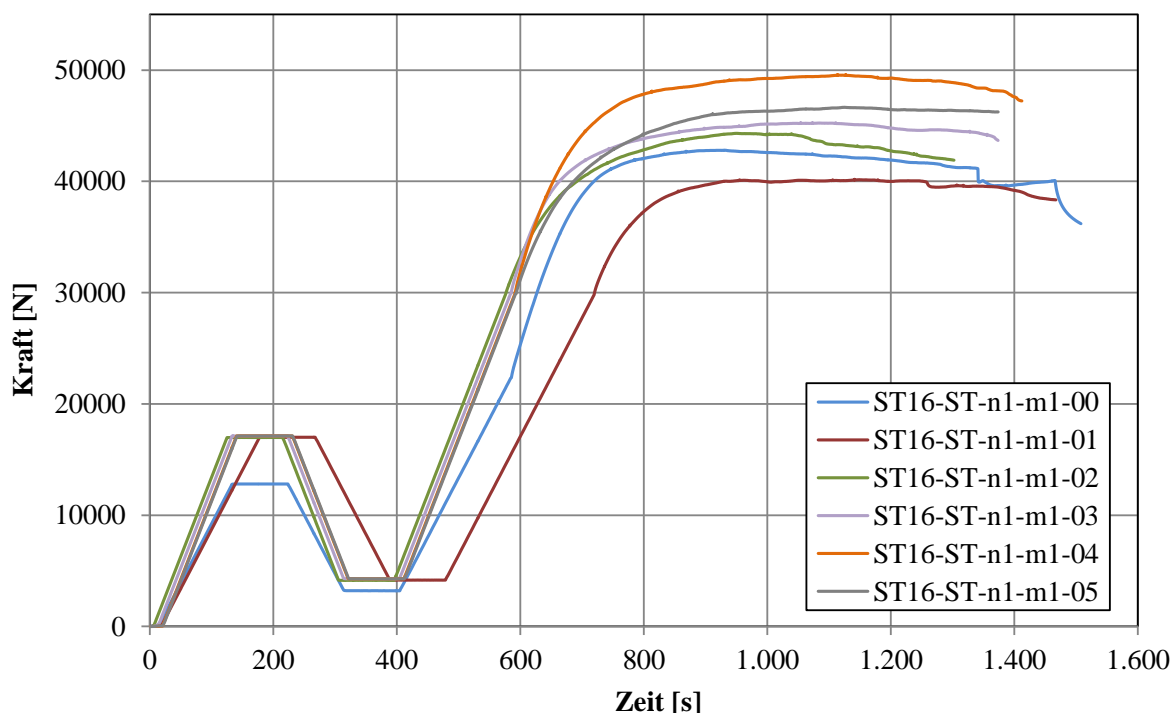


Abbildung ANHANG 1: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ST-n1-m1

**B-1-2 ST16-ST-n1-m1-00**

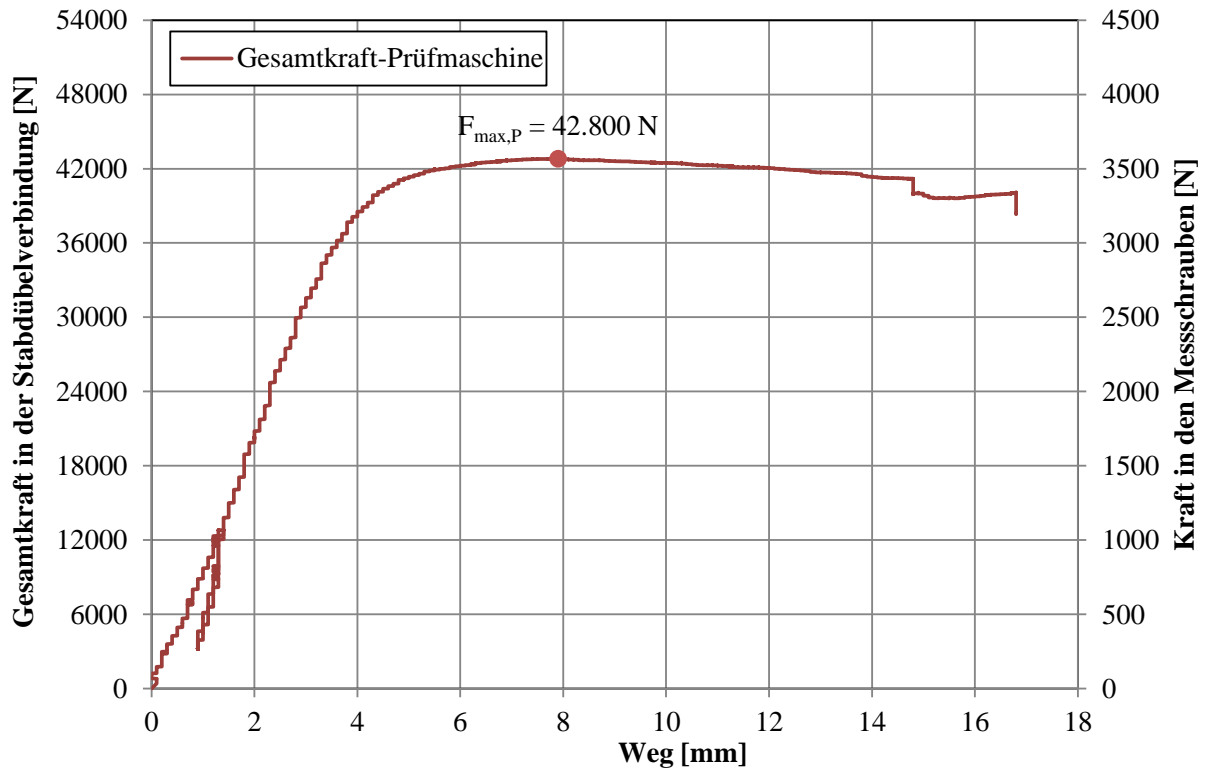


Abbildung ANHANG 2: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ST-n1-m1-00



Abbildung ANHANG 3: Bruchbilder ST16-ST-n1-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 4: Jahrring-Scan ST16-ST-n1-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

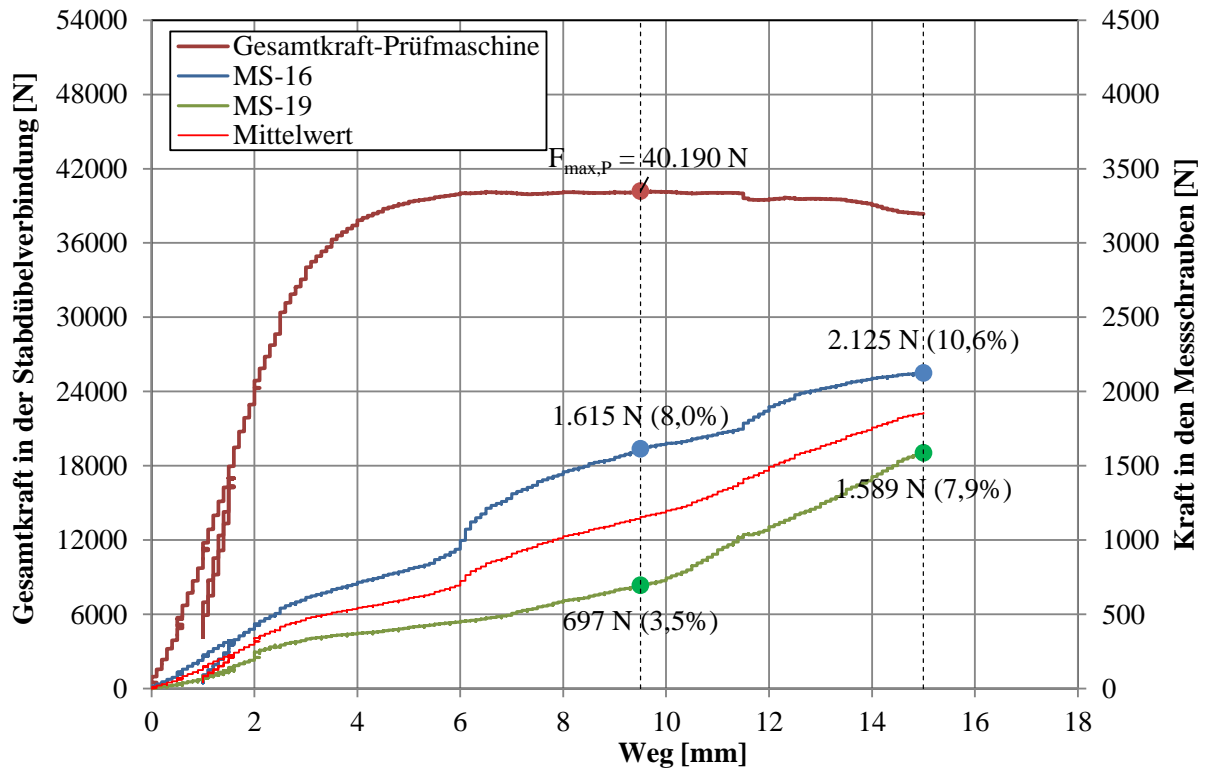
**B-1-3 ST16-ST-n1-m1-01**


Abbildung ANHANG 5: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ST-n1-m1-01



Abbildung ANHANG 6: Bruchbilder ST16-ST-n1-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 7: Jahring-Scan ST16-ST-n1-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



**B-1-4 ST16-ST-n1-m1-02**

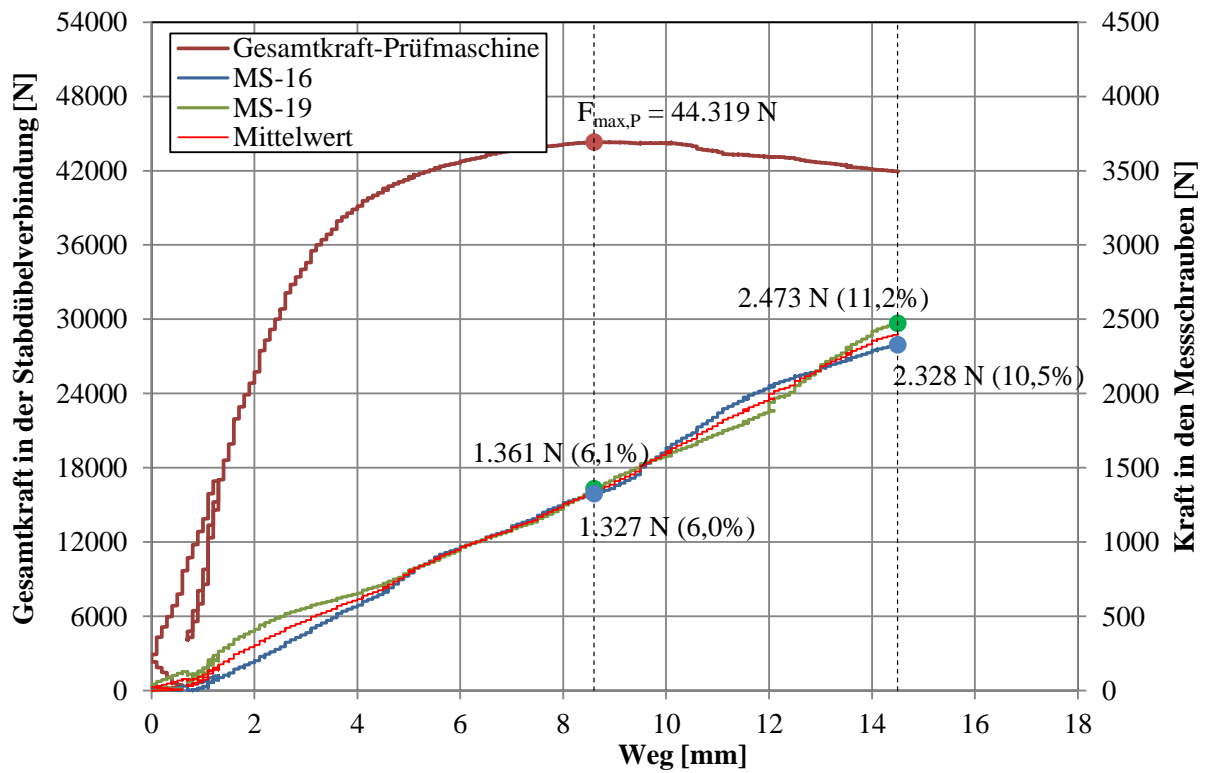


Abbildung ANHANG 8: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ST-n1-m1-02



Abbildung ANHANG 9: Bruchbilder ST16-ST-n1-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 10: Jahring-Scan ST16-ST-n1-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



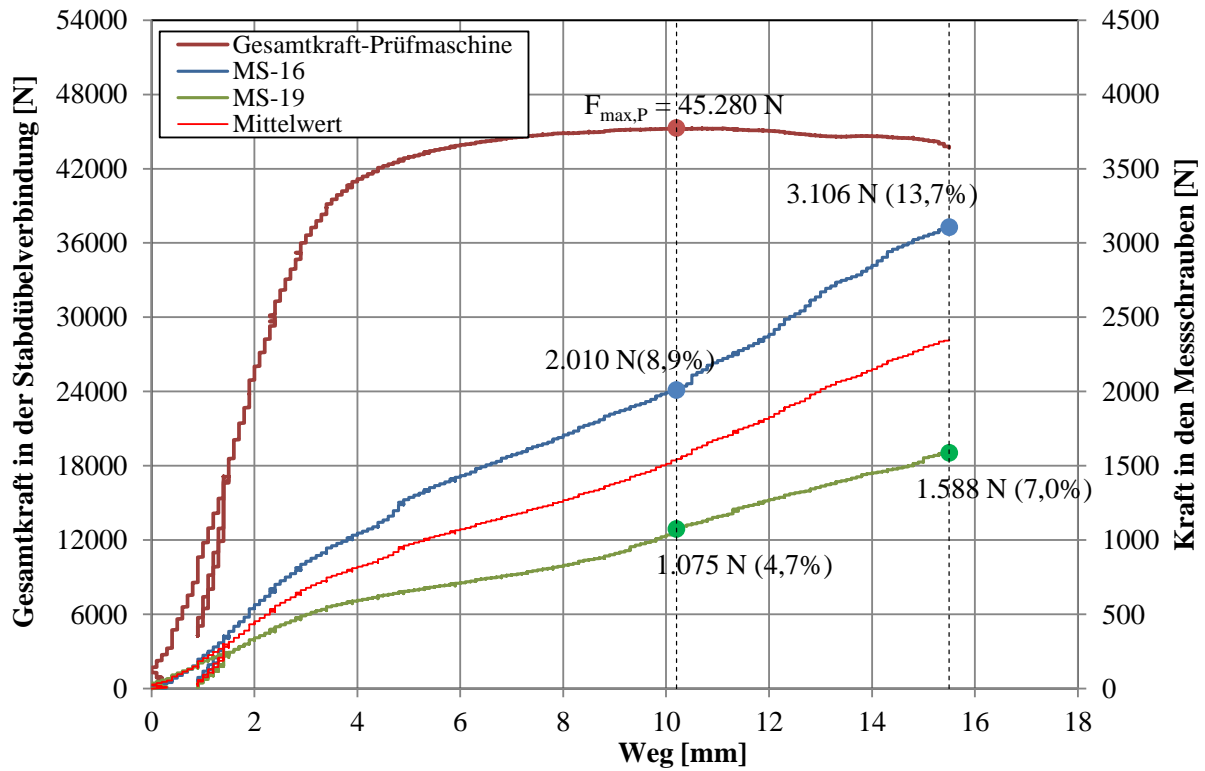
**B-1-5 ST16-ST-n1-m1-03**


Abbildung ANHANG 11: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ST-n1-m1-03



Abbildung ANHANG 12: Bruchbilder ST16-ST-n1-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 13: Jahring-Scan ST16-ST-n1-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

**B-1-6 ST16-ST-n1-m1-04**

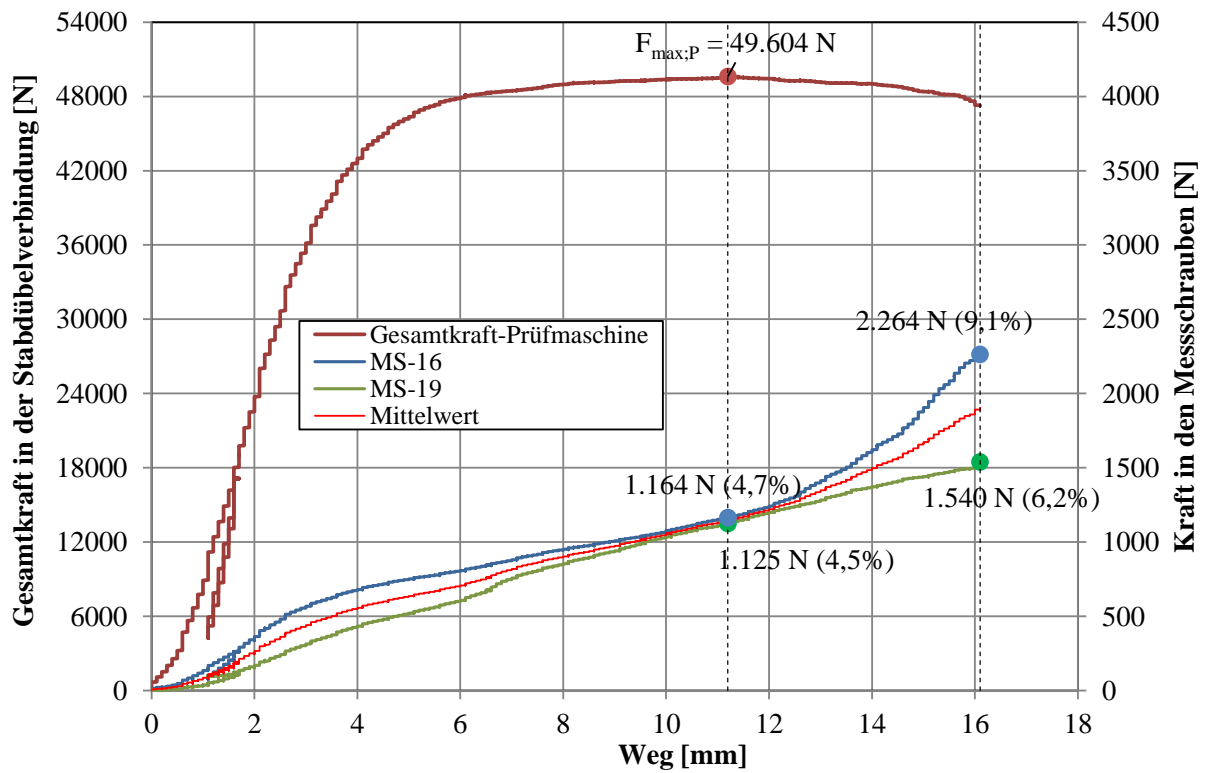


Abbildung ANHANG 14: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ST-n1-m1-04



Abbildung ANHANG 15: Bruchbilder ST16-ST-n1-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 16: Jahring-Scan ST16-ST-n1-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

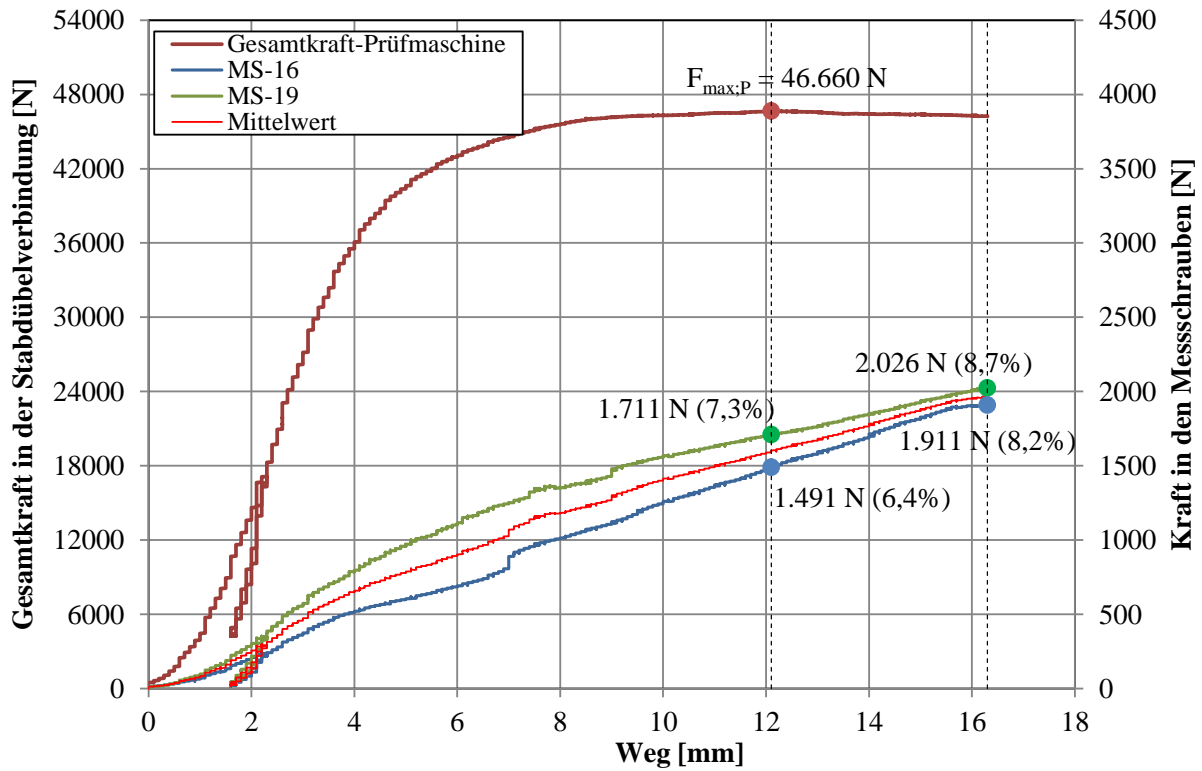
**B-1-7 ST16-ST-n1-m1-05**


Abbildung ANHANG 17: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ST-n1-m1-05



Abbildung ANHANG 18: Bruchbilder ST16-ST-n1-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 19: Jahring-Scan ST16-ST-n1-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

## B-2 ST16-ES-n1-m1

### B-2-1 Zusammenfassung der Ergebnisse aller Prüfungen der Serie

Tabelle ANHANG 2: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n1-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
<b>00</b>	11,8%	453	44.885	47.955	66.460	k. MS	107%	146%	j/b	<b>k. MS</b>
<b>01</b>	10,8%	429	42.554	41.004	41.004	32,0%	96,4%	125%	j/b	<b>26,6%</b>
<b>02</b>	9,92%	379	37.577	33.502	33.502	26,6%	89,2%	102%	j/e	<b>23,8%</b>
<b>03</b>	12,0%	465	46.171	45.005	45.121	41,7%	97,5%	137%	j/b	<b>32,2%</b>
<b>04</b>	11,3%	472	46.771	49.760	51.051	48,7%	106%	152%	j/b	<b>33,8%</b>
<b>05</b>	10,3%	380	37.702	32.782	32.782	unver.	86,9%	100%	j/e	<b>unver.</b>
<b>Min.</b>	9,92%	379	37.577	33.502	33.502	26,6%	89,2%	102%		<b>23,8%</b>
<b><math>\bar{x}_{med}</math></b>	11,1%	447	44.362	43.005	43.063	36,8%	96,9%	131%	-	<b>29,4%</b>
<b>Max.</b>	12,0%	472	46.771	49.760	51.051	48,7%	106%	152%		<b>33,8%</b>
<b><math>\bar{x}_{arith.}</math></b>	<b>11,0%</b>	<b>436</b>	<b>43.268</b>	<b>42.318</b>	<b>42.670</b>	<b>37,3%</b>	<b>97,3%</b>	<b>129%</b>	-	<b>29,1%</b>
<b><math>\sigma</math></b>	0,857%	42,6	4.227	6.881	7.373	9,85%	7,07%	21,0%	-	<b>4,68%</b>
<b>COV</b>	7,79%	9,77%	9,77%	16,3%	17,3%	26,4%	7,26%	16,3%	-	<b>16,1%</b>

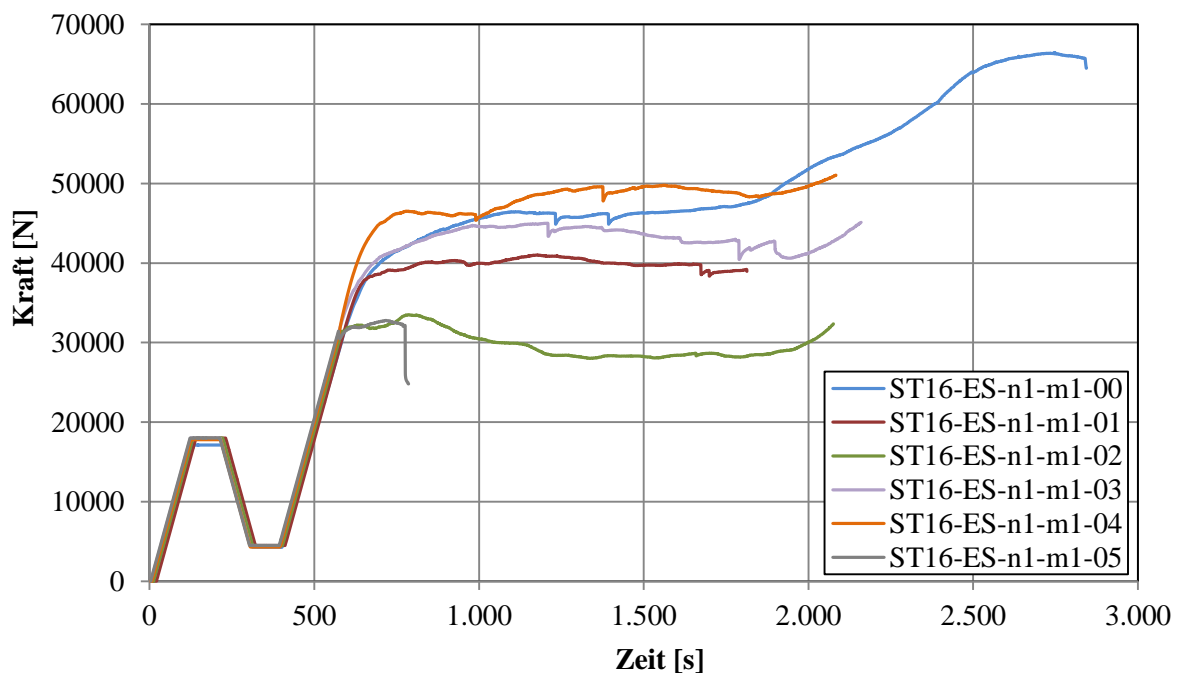


Abbildung ANHANG 20: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1



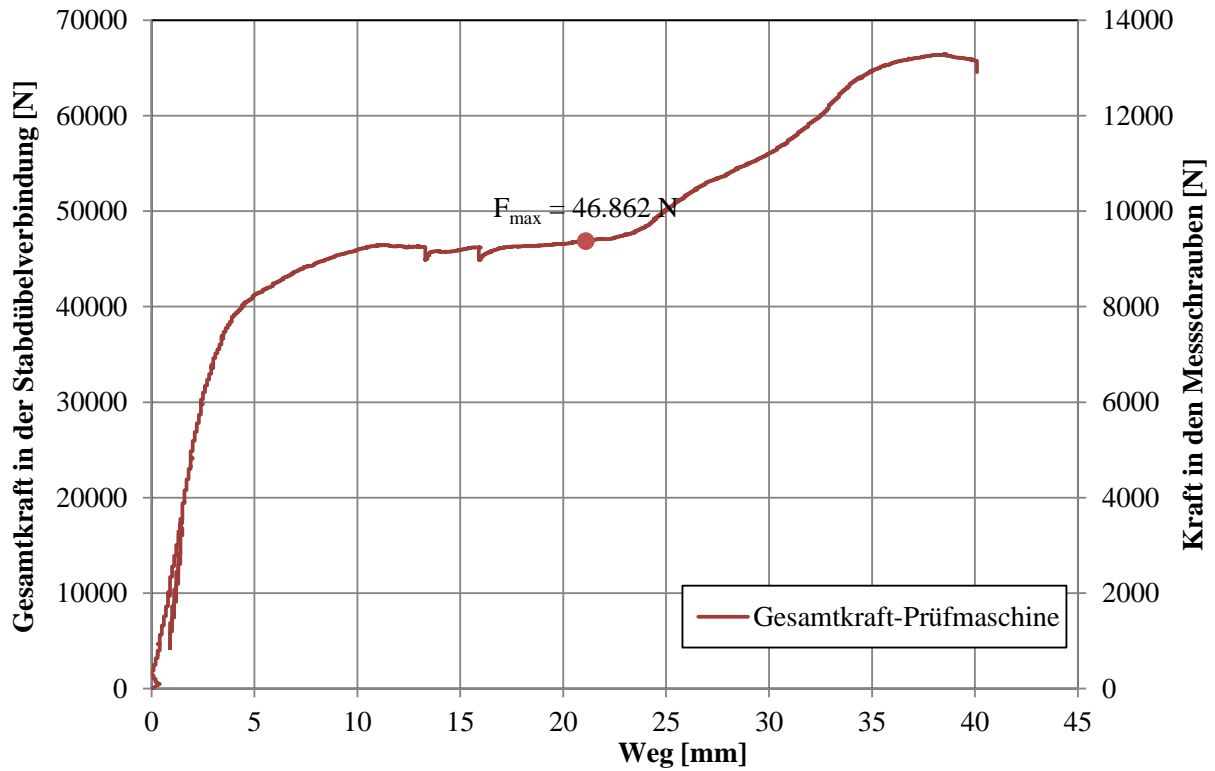
**B-2-2 ST16-ES-n1-m1-00**


Abbildung ANHANG 21: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n1-m1-00



Abbildung ANHANG 22: Bruchbilder ST16-ES-n1-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 23: Jahring-Scan ST16-ES-n1-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

**B-2-3 ST16-ES-n1-m1-01**

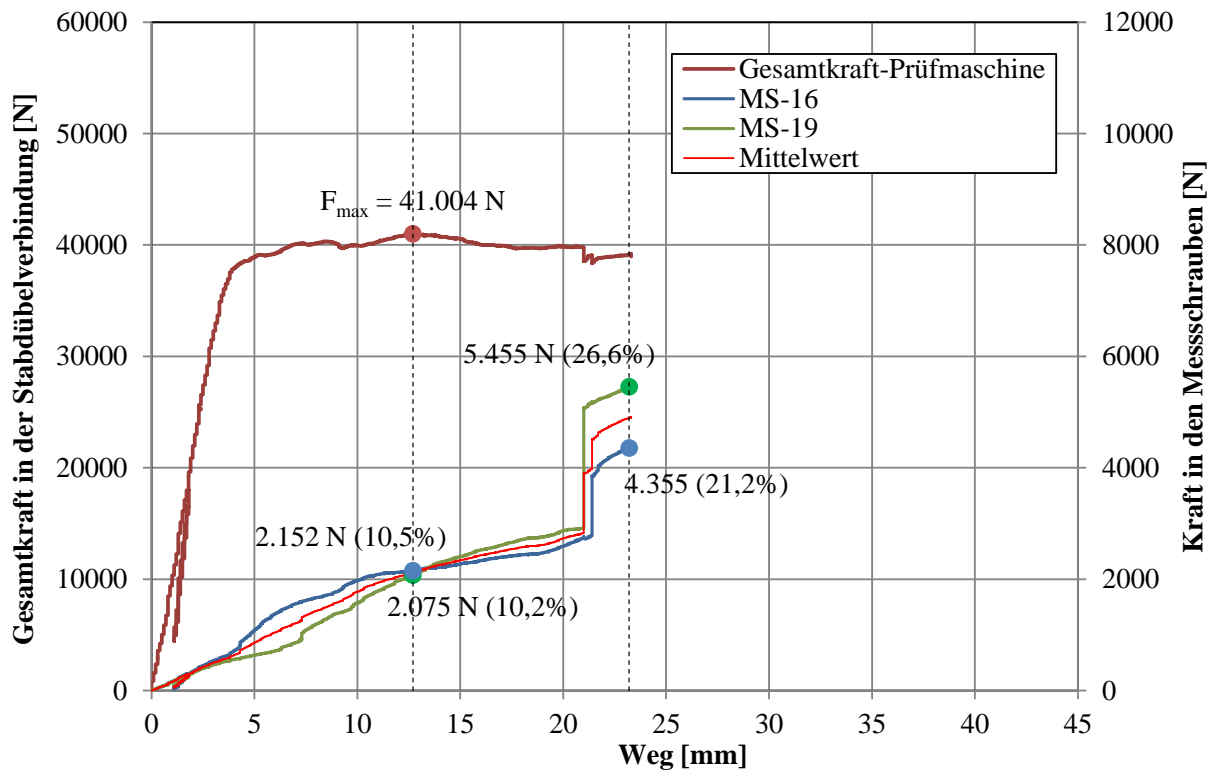


Abbildung ANHANG 24: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1-01



Abbildung ANHANG 25: Bruchbilder ST16-ES-n1-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 26: Jahring-Scan ST16-ES-n1-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



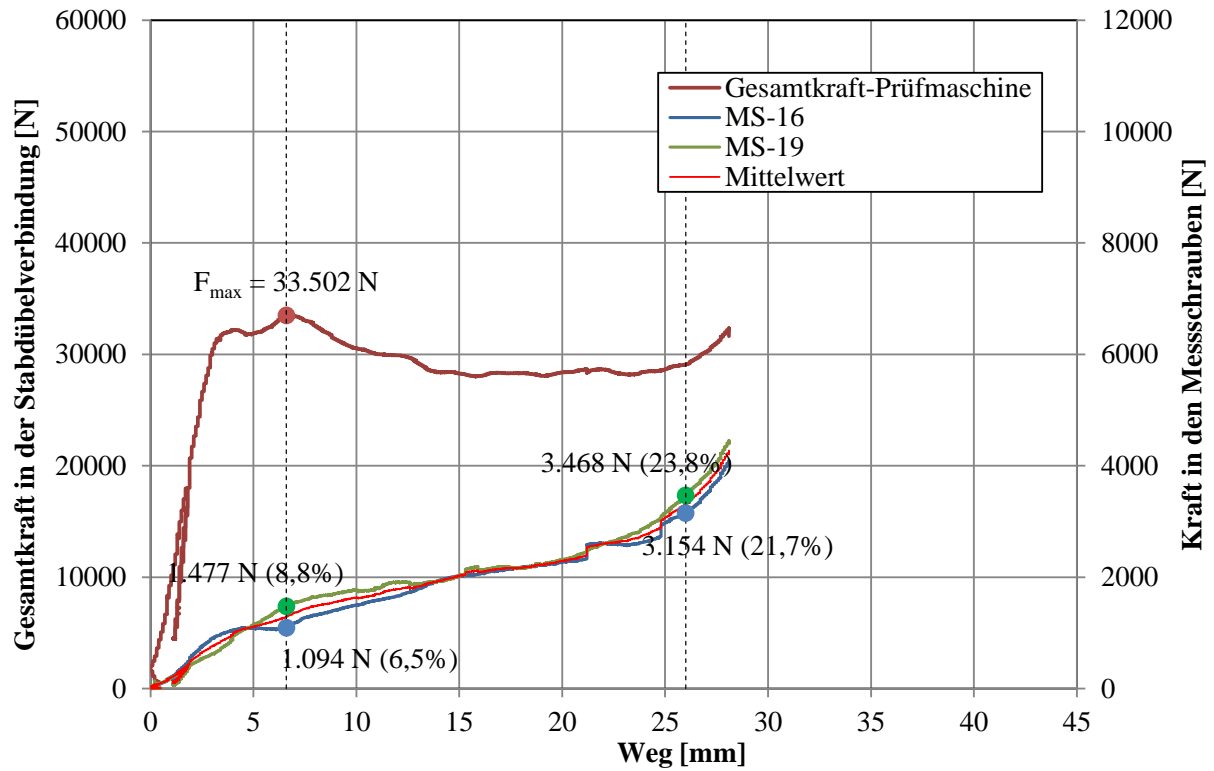
**B-2-4 ST16-ES-n1-m1-02**


Abbildung ANHANG 27: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1-02



Abbildung ANHANG 28: Bruchbilder ST16-ES-n1-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 29: Jahring-Scan ST16-ES-n1-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

**B-2-5 ST16-ES-n1-m1-03**

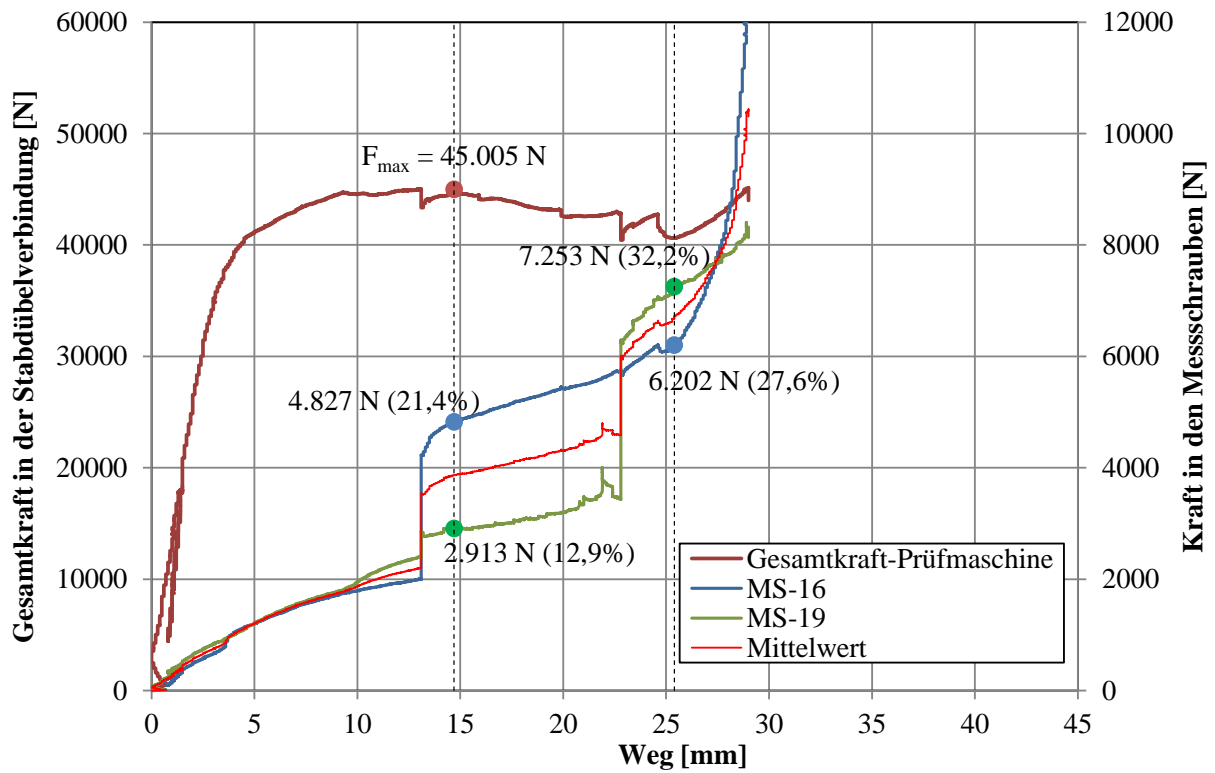


Abbildung ANHANG 30: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n1-m1-03



Abbildung ANHANG 31: Bruchbilder ST16-ES-n1-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 32: Jahring-Scan ST16-ES-n1-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

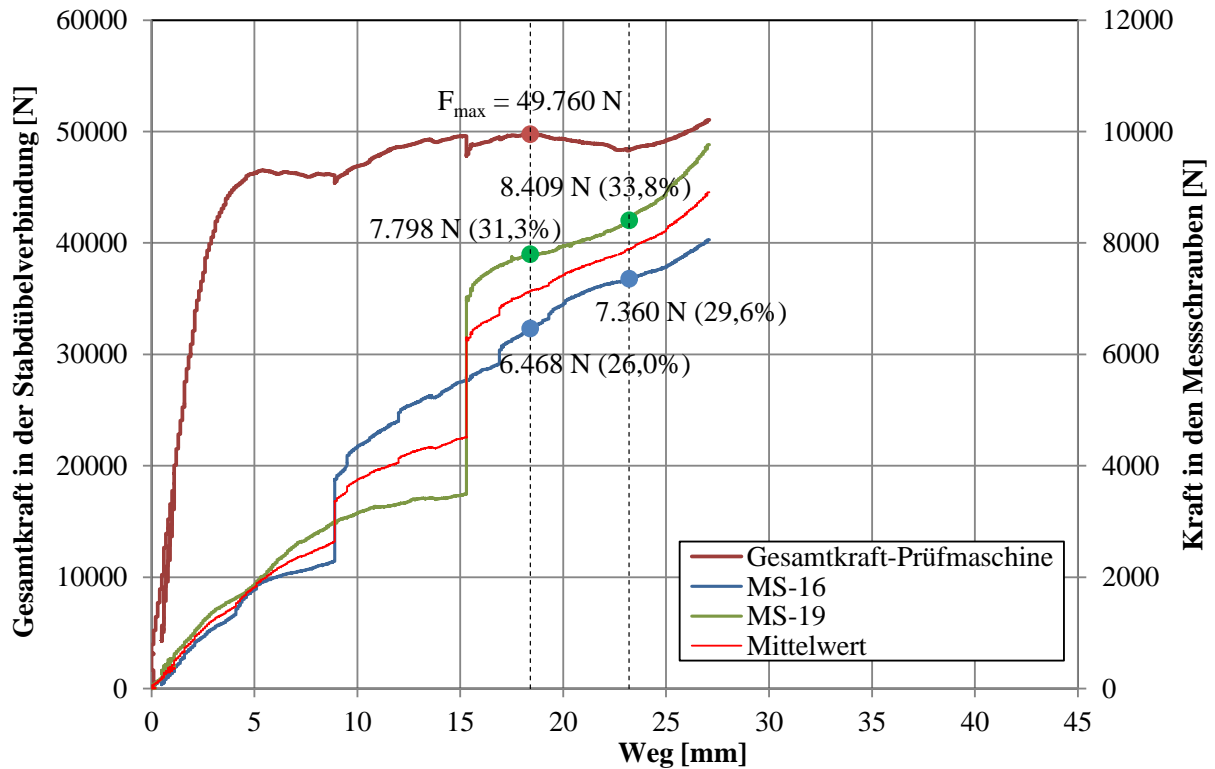
**B-2-6 ST16-ES-n1-m1-04**


Abbildung ANHANG 33: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1-04



Abbildung ANHANG 34: Bruchbilder ST16-ES-n1-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

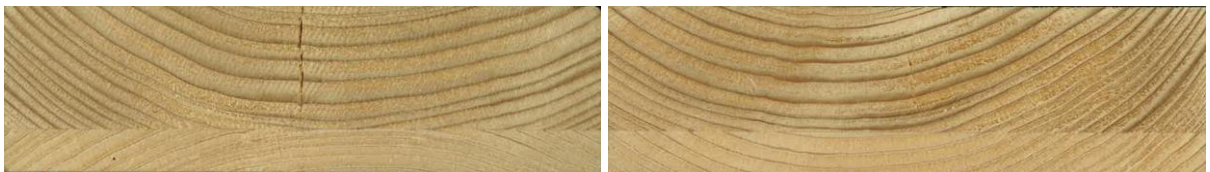


Abbildung ANHANG 35: Jahring-Scan ST16-ES-n1-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



**B-2-7 ST16-ES-n1-m1-05**

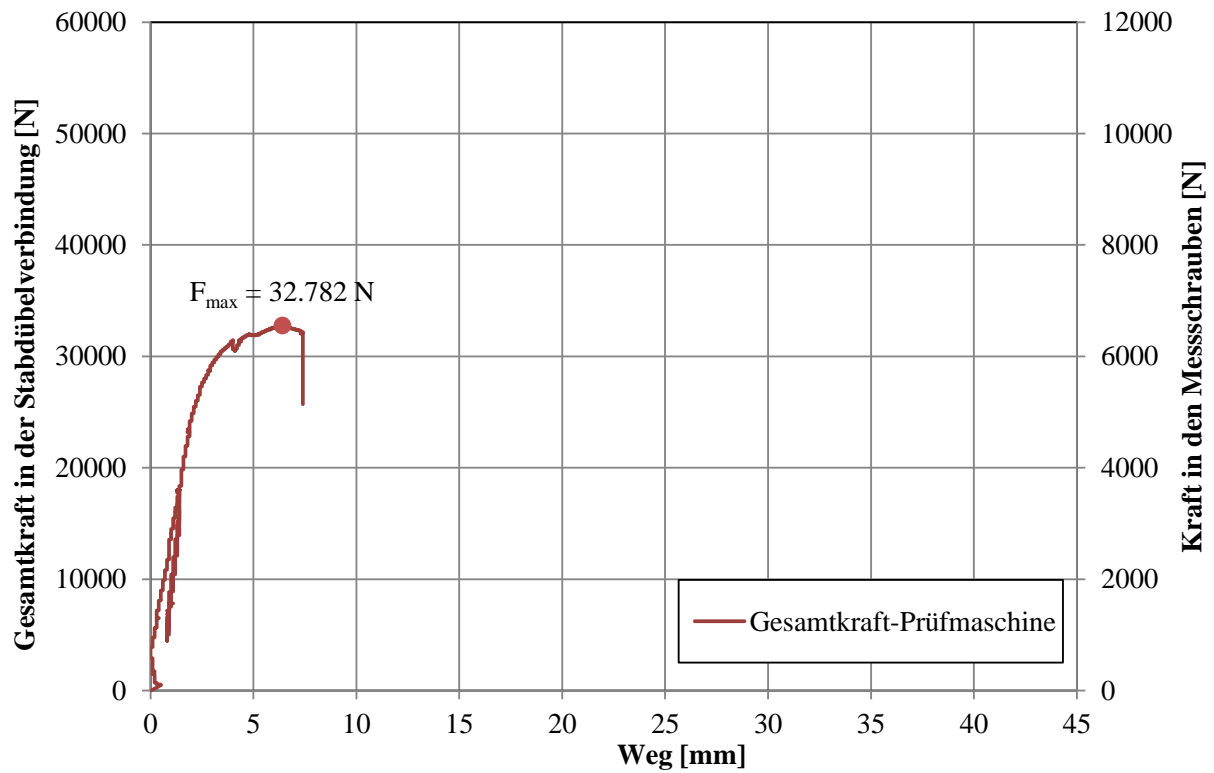


Abbildung ANHANG 36: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1-05



Abbildung ANHANG 37: Bruchbilder ST16-ES-n1-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 38: Jahring-Scan ST16-ES-n1-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

## B-3 ST20-ES-n1-m1

### B-3-1 Zusammenfassung der Ergebnisse aller Prüfungen der Serie

Tabelle ANHANG 3: Ergebnisse der Prüfserie ST20-ES-n1-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	11,5%	441	52.107	53.400	65.523	64,5%	102%	101%	j/b	33,9%
01	11,4%	476	56.223	59.136	61.484	50,4%	105%	112%	j/b	26,0%
02	11,3%	503	59.414	65.328	65.328	52,7%	110%	124%	j/b	35,6%
03	11,5%	508	59.963	68.625	68.625	62,4%	114%	130%	j/b	29,8%
04	11,6%	502	59.311	65.648	65.648	56,4%	111%	125%	j/b	33,1%
05	11,9%	496	58.579	52.627	52.627	unver.	89,8%	100%	j/e	unver.
Min.	11,3%	441	52.107	53.400	61.484	50,4%	102%	101%	-	26,0%
$\bar{x}_{med}$	11,5%	502	59.311	65.328	65.523	56,4%	110%	124%	-	33,1%
Max.	11,6%	508	59.963	68.625	68.625	64,5%	114%	130%	-	35,6%
$\bar{x}_{arith.}$	11,4%	486	57.404	62.427	65.322	57,3%	109%	119%	-	31,7%
$\sigma$	0,108%	28,0	3.304	6.114	2.539	6,07%	4,73%	11,6%	-	3,81%
COV	0,948%	5,76%	5,76%	9,79%	3,89%	10,6%	4,36%	9,79%	-	12,0%

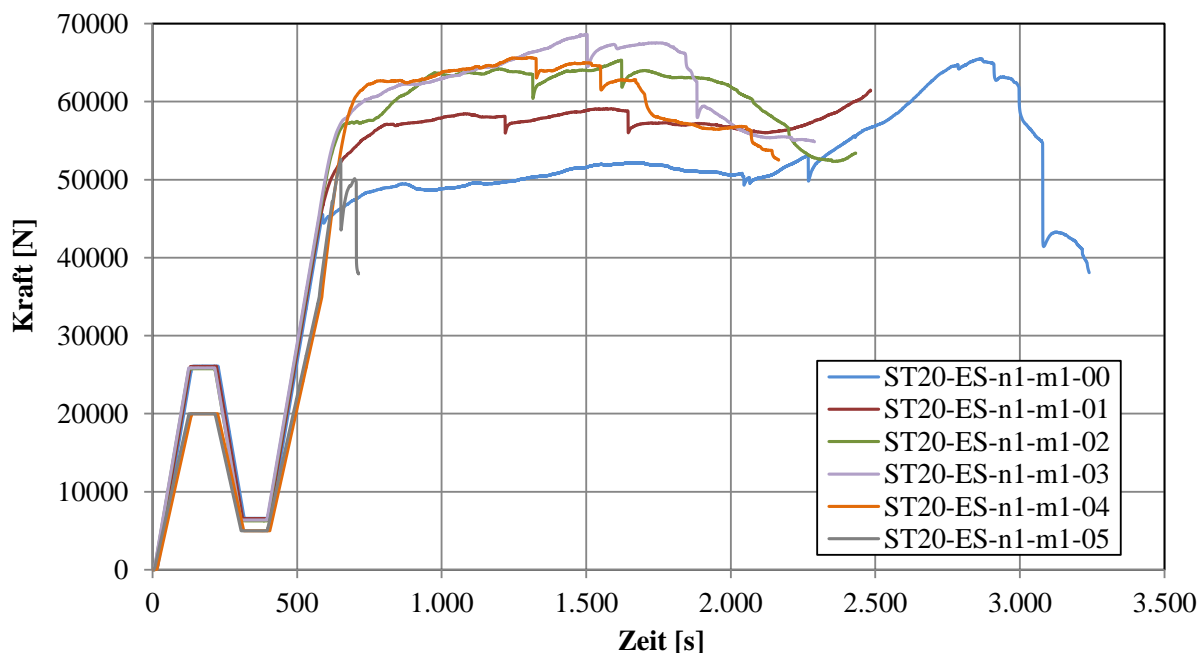


Abbildung ANHANG 39: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST20-ES-n1-m1

**B-3-2 ST20-ES-n1-m1-00**

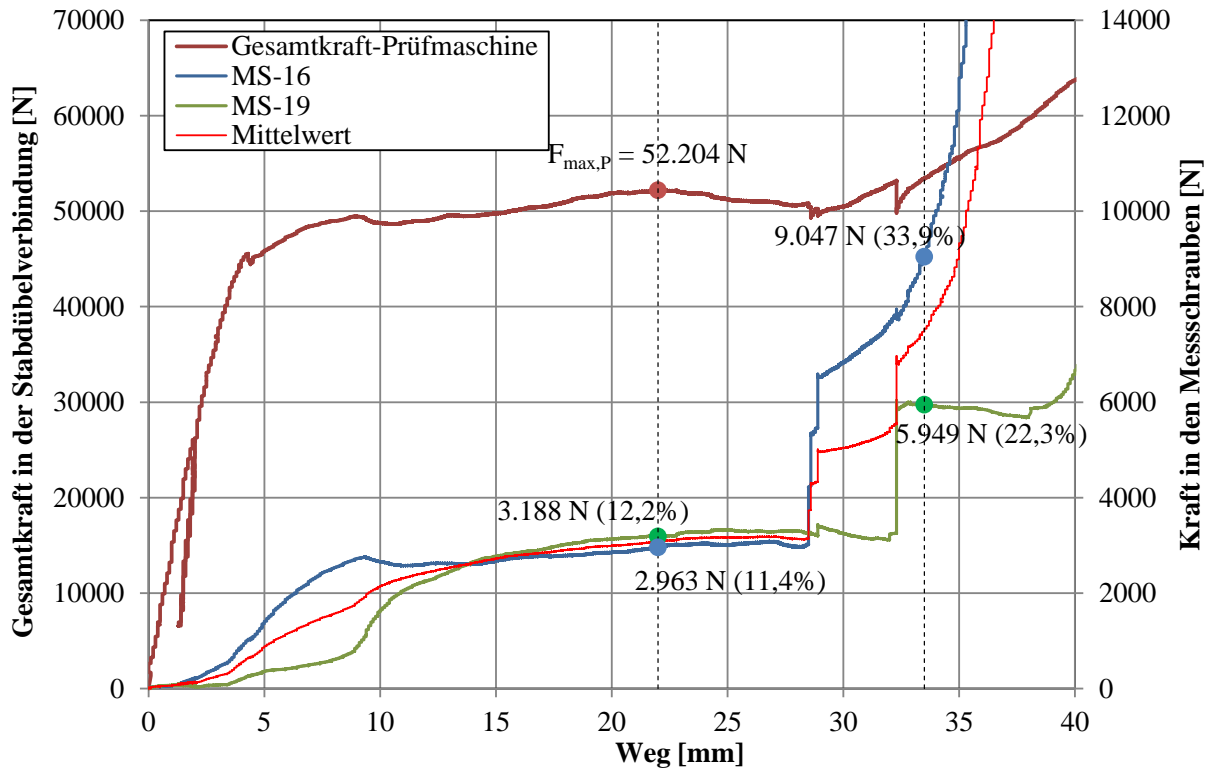


Abbildung ANHANG 40: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST20-ES-n1-m1-00



Abbildung ANHANG 41: Bruchbilder ST20-ES-n1-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 42: Jahring-Scan ST20-ES-n1-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



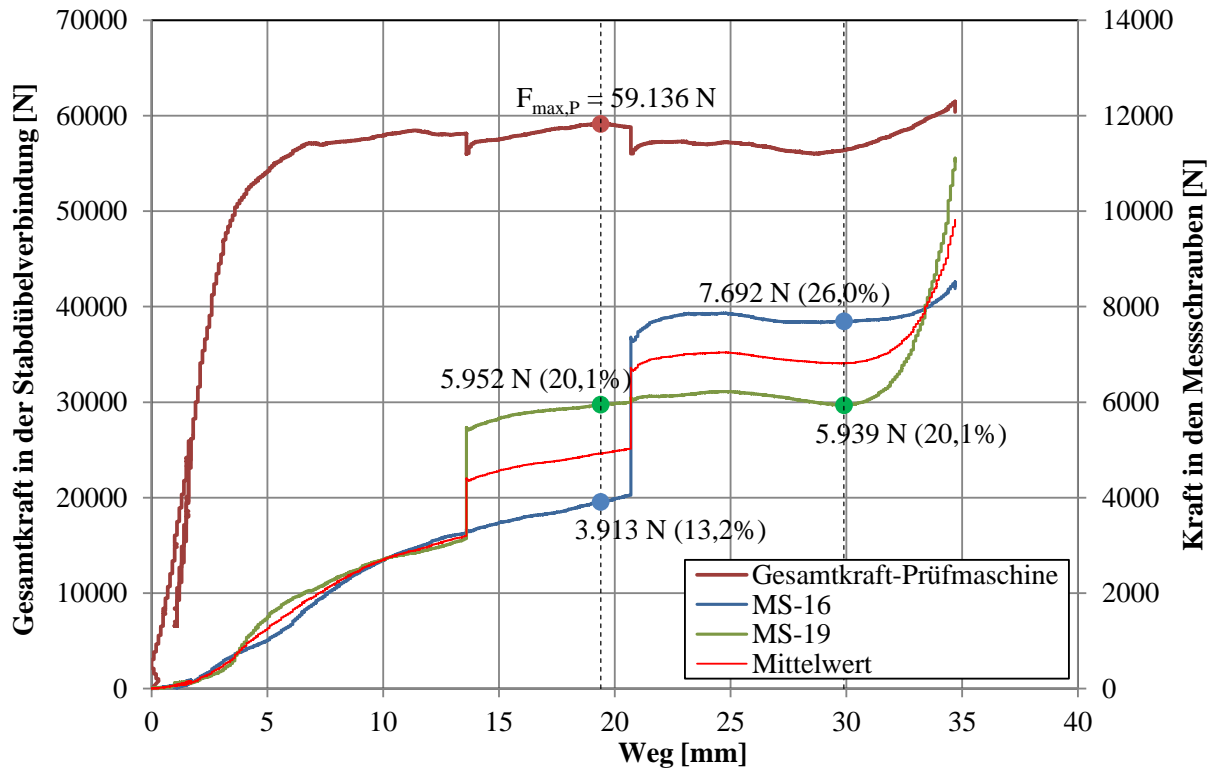
**B-3-3 ST20-ES-n1-m1-01**


Abbildung ANHANG 43: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST20-ES-n1-m1-01



Abbildung ANHANG 44: Bruchbilder ST20-ES-n1-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 45: Jahring-Scan ST20-ES-n1-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

**B-3-4 ST20-ES-n1-m1-02**

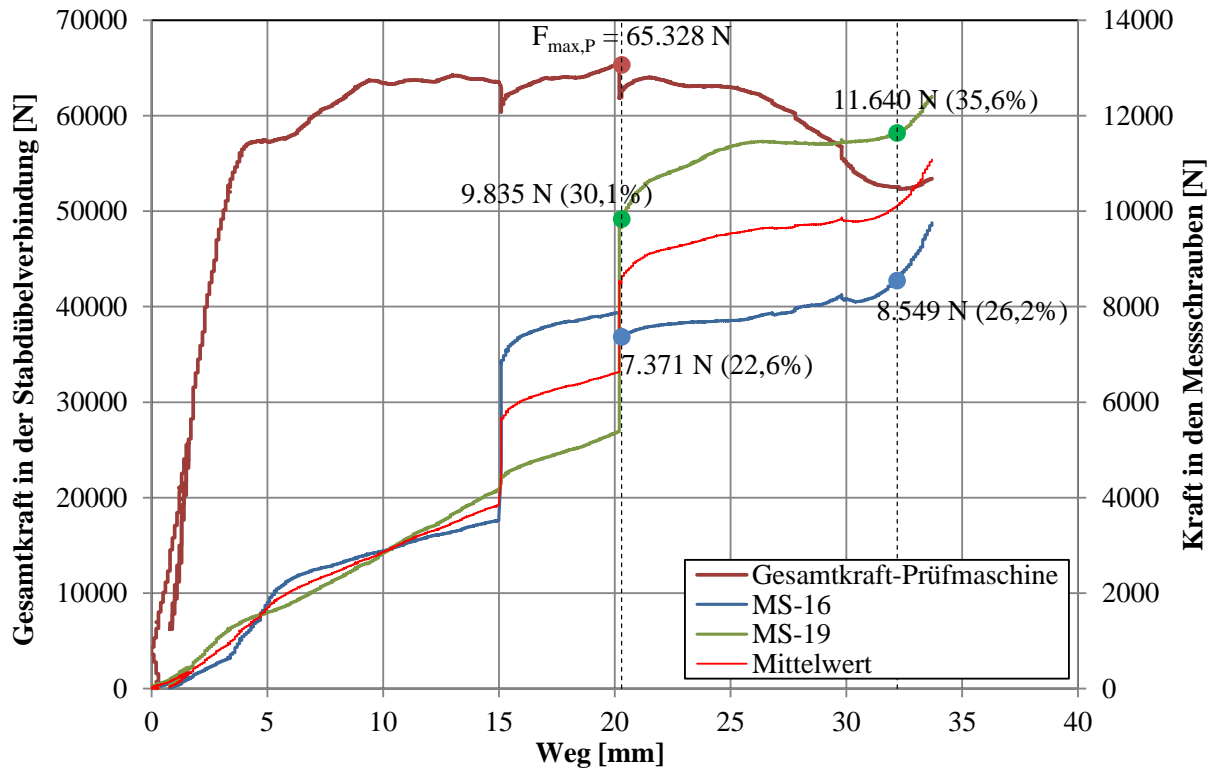


Abbildung ANHANG 46: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST20-ES-n1-m1-02



Abbildung ANHANG 47: Bruchbilder ST20-ES-n1-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 48: Jahring-Scan ST20-ES-n1-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

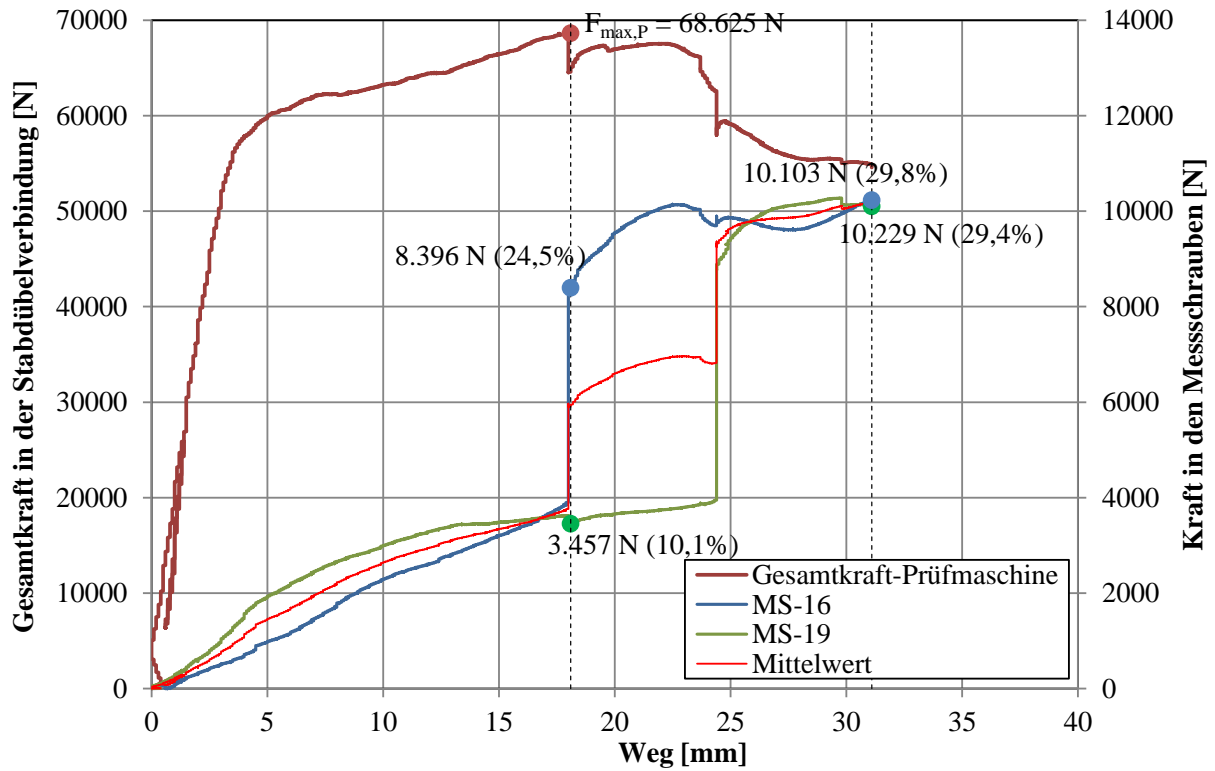
**B-3-5 ST20-ES-n1-m1-03**


Abbildung ANHANG 49: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST20-ES-n1-m1-03

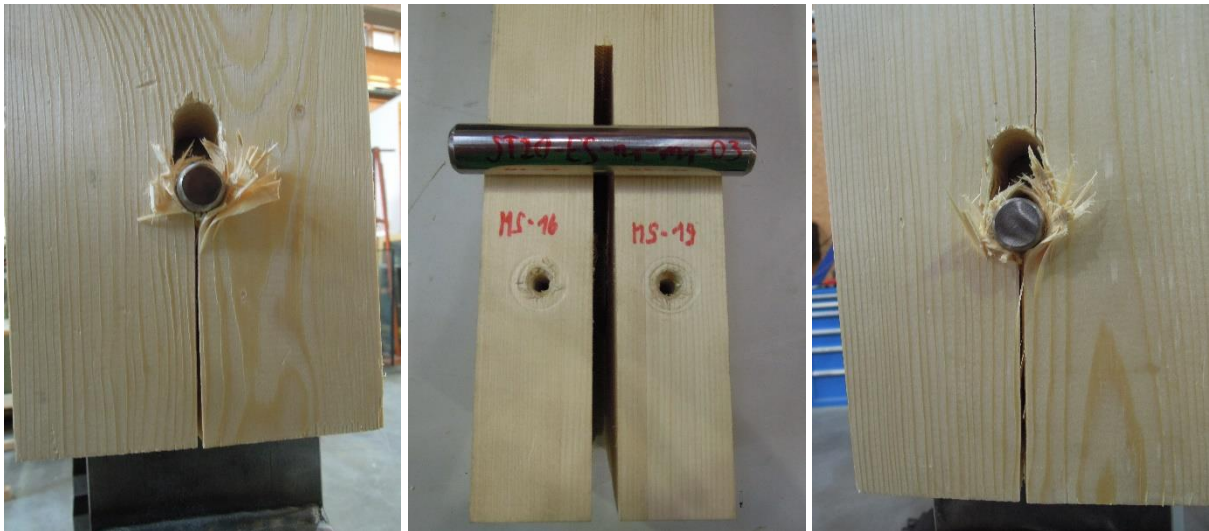


Abbildung ANHANG 50: Bruchbilder ST20-ES-n1-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 51: Jahring-Scan ST20-ES-n1-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



**B-3-6 ST20-ES-n1-m1-04**

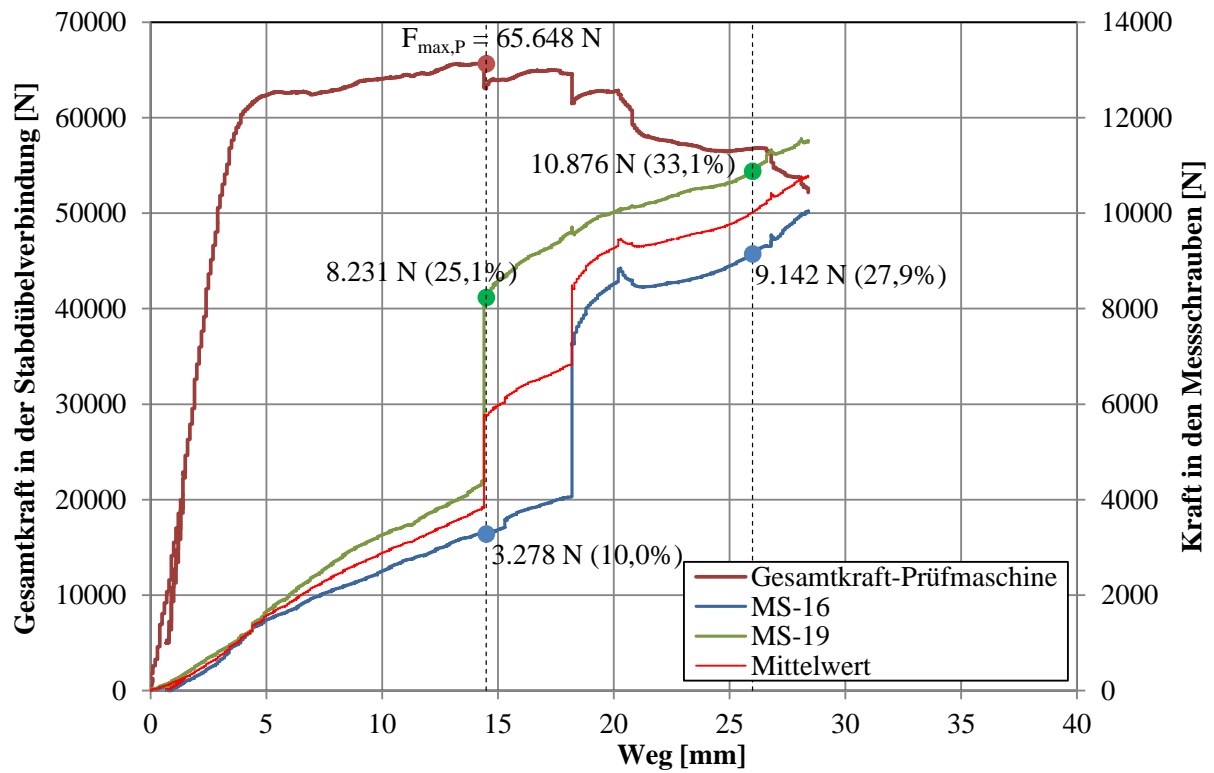


Abbildung ANHANG 52: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST20-ES-n1-m1-04



Abbildung ANHANG 53: Bruchbilder ST20-ES-n1-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 54: Jahring-Scan ST20-ES-n1-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

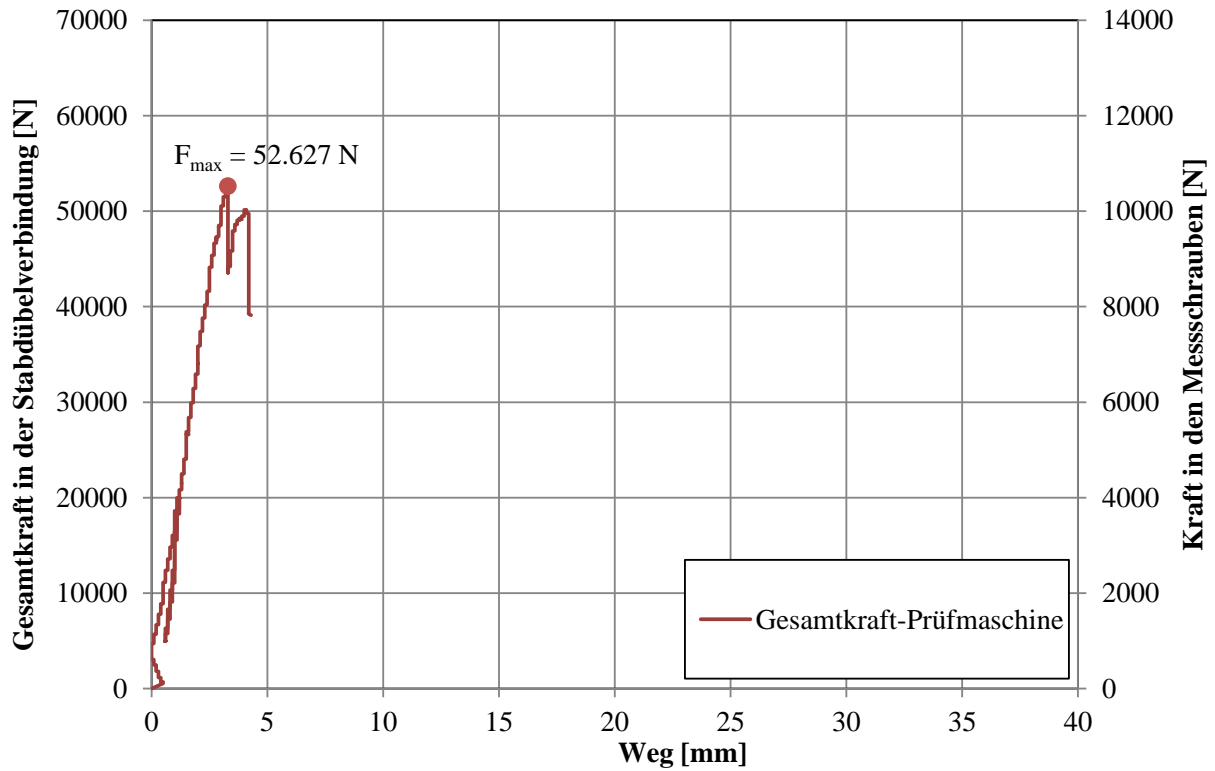
**B-3-7 ST20-ES-n1-m1-05**


Abbildung ANHANG 55: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n1-m1-05



Abbildung ANHANG 56: Bruchbilder ST20-ES-n1-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 57: Jahring-Scan ST20-ES-n1-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

## B-4 ST16-ES-n5-m1

### B-4-1 Zusammenfassung der Ergebnisse aller Prüfungen der Serie

Tabelle ANHANG 4: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n5-m1

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P,J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	11,4%	475	235.468	222.780	229.372	80,8%	94,6%	157%	j/b	55,2%
01	9,91%	393	195.079	178.729	178.729	78,3%	91,6%	126%	j/b	54,1%
02	11,5%	467	231.817	214.624	214.624	70,3%	92,6%	151%	j/b	49,0%
03	11,4%	444	220.150	198.021	198.021	60,3%	89,9%	140%	j/b	43,0%
04	11,9%	434	215.037	189.957	189.957	73,8%	88,3%	134%	j/b	53,5%
05	11,7%	461	228.546	141.920	141.920	unver.	62,1%	100%	j/b	unver.
Min.	9,91%	393	195.079	178.729	178.729	60,3%	88,3%	126%	-	43,0%
$\bar{x}_{med}$	11,4%	444	220.150	198.021	198.021	73,8%	91,6%	140%	-	53,5%
Max.	11,9%	475	235.468	222.780	229.372	80,8%	94,6%	157%	-	55,2%
$\bar{x}_{arith}$	11,2%	443	219.510	200.822	202.141	72,7%	91,4%	142%	-	51,0%
$\sigma$	0,768%	32,3	15.996	17.935	20.068	8,03%	2,41%	12,6%	-	5,03%
COV	6,84%	7,29%	7,29%	8,93%	9,93%	11,0%	2,64%	8,93%	-	9,87%

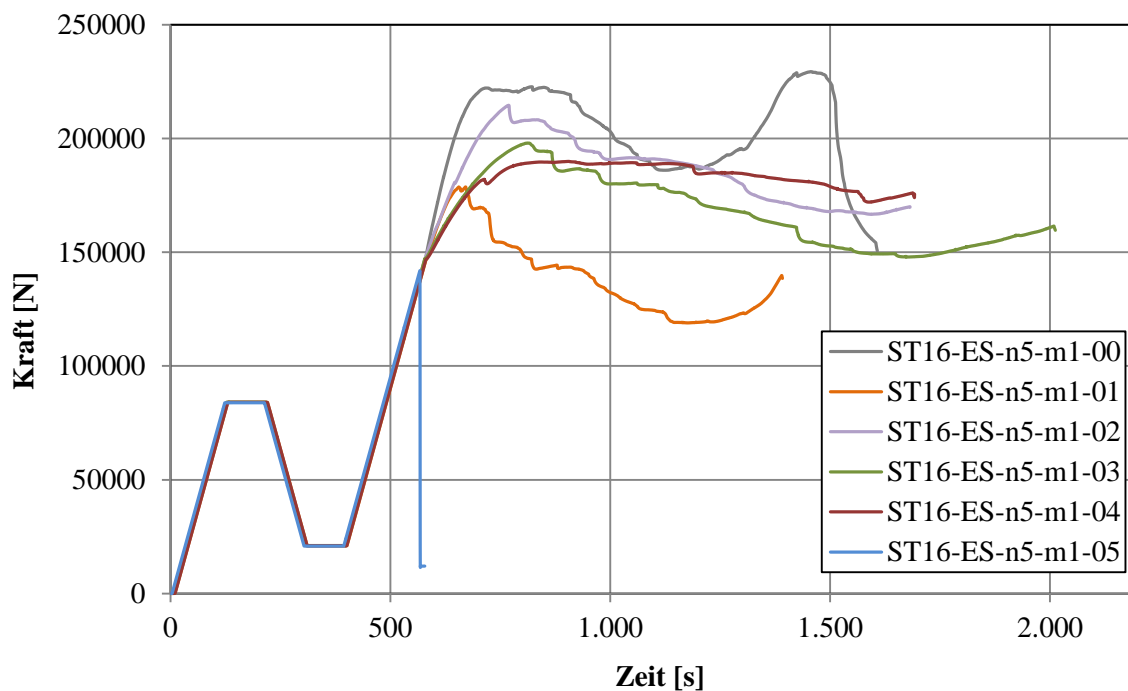


Abbildung ANHANG 58: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n5-m1



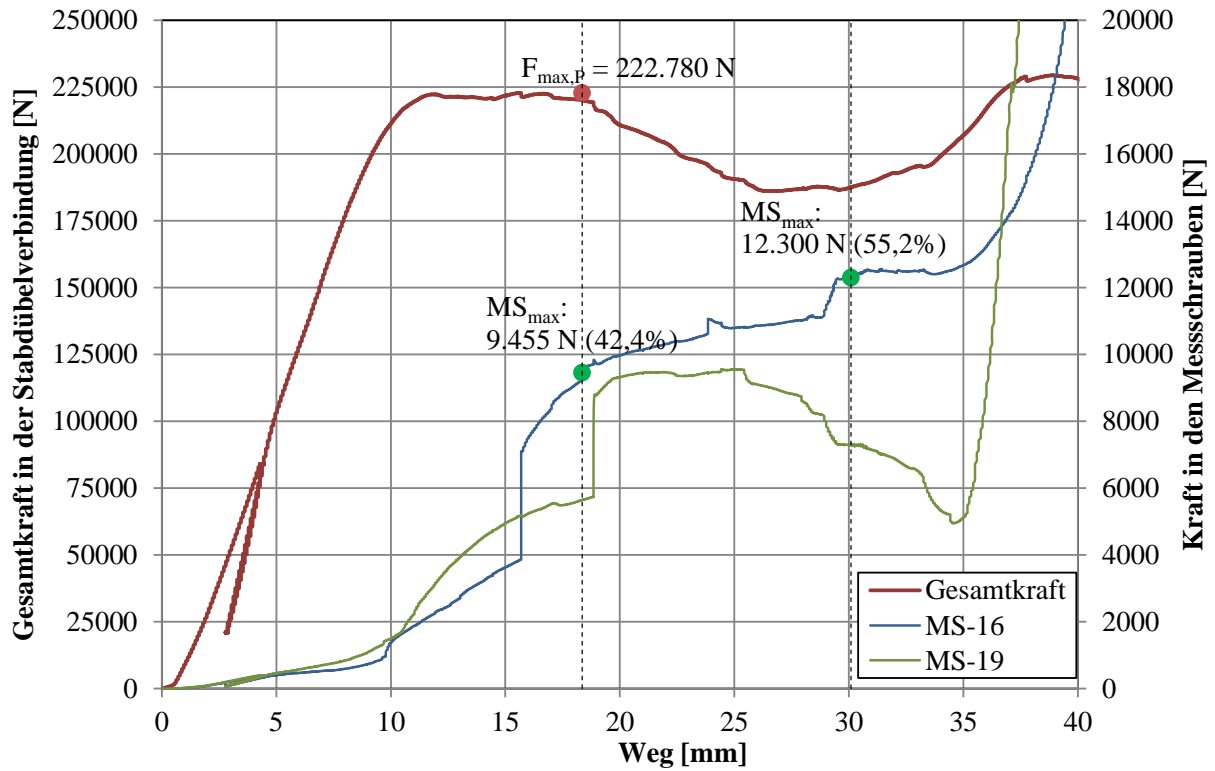
**B-4-2 ST16-ES-n5-m1-00**


Abbildung ANHANG 59: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n5-m1-00



Abbildung ANHANG 60: Bruchbilder ST16-ES-n5-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 61: Jahring-Scan ST16-ES-n5-m1-00: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

**B-4-3 ST16-ES-n5-m1-01**

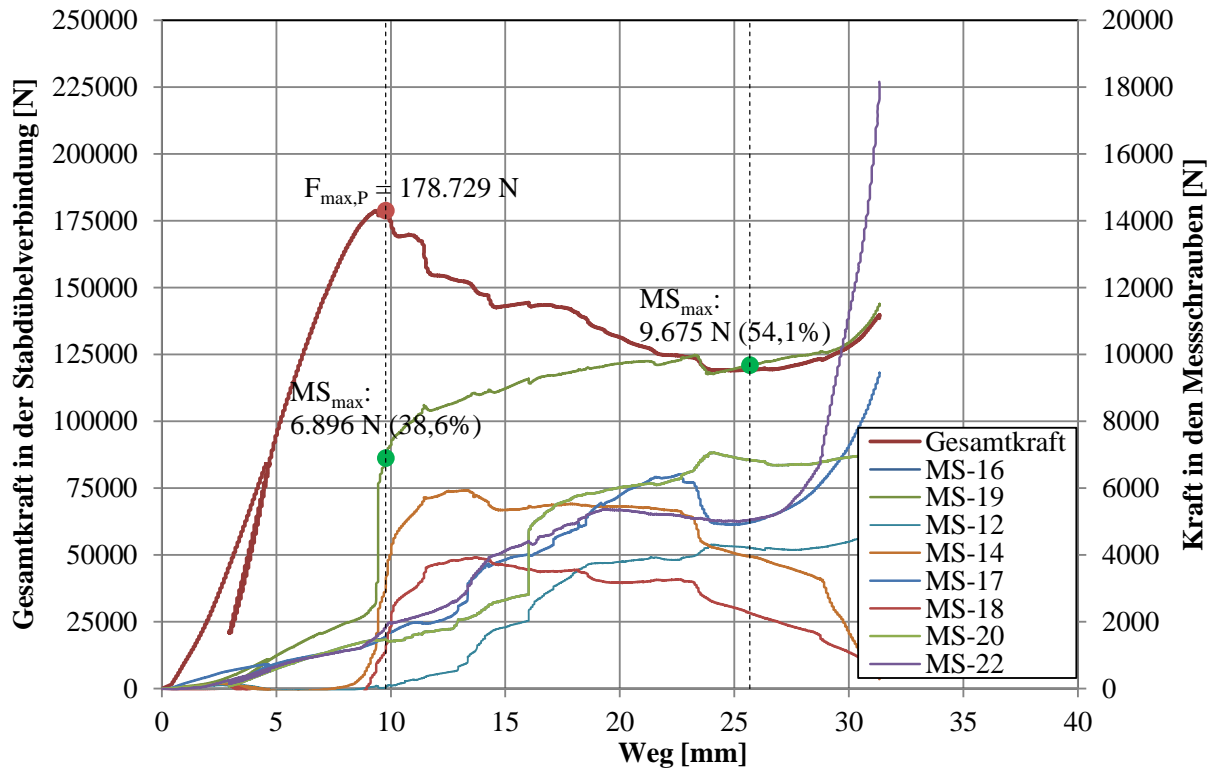


Abbildung ANHANG 62: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n5-m1-01

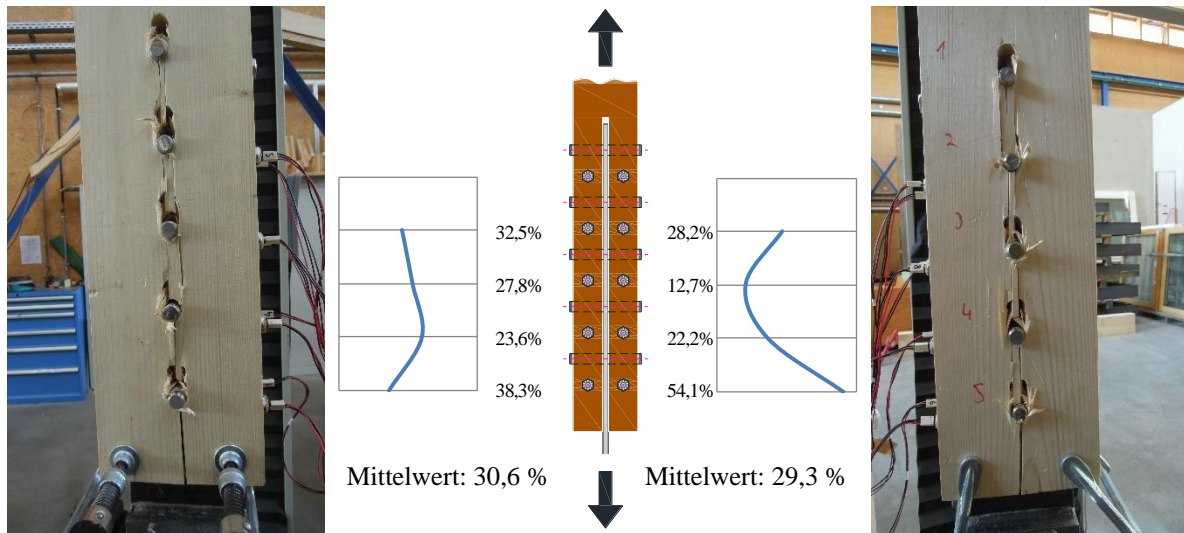


Abbildung ANHANG 63: Bruchbilder ST16-ES-n5-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 64: Jahring-Scan ST16-ES-n5-m1-01: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

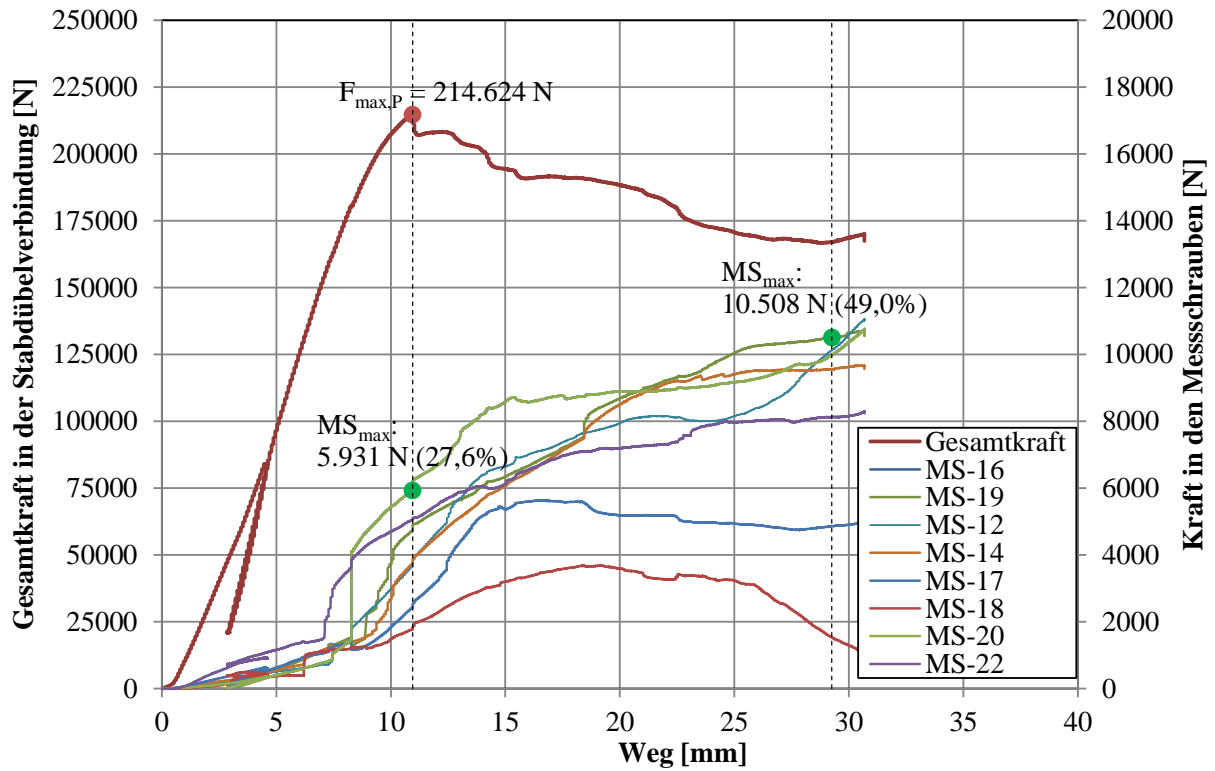
**B-4-4 ST16-ES-n5-m1-02**


Abbildung ANHANG 65: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n5-m1-02

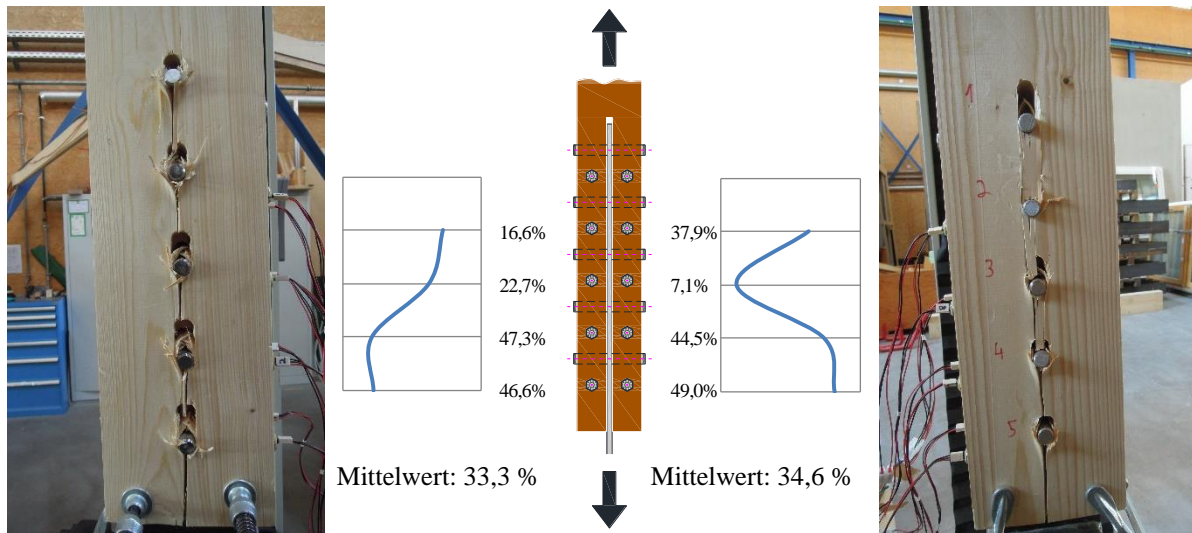


Abbildung ANHANG 66: Bruchbilder ST16-ES-n5-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 67: Jahring-Scan ST16-ES-n5-m1-02: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



**B-4-5 ST16-ES-n5-m1-03**

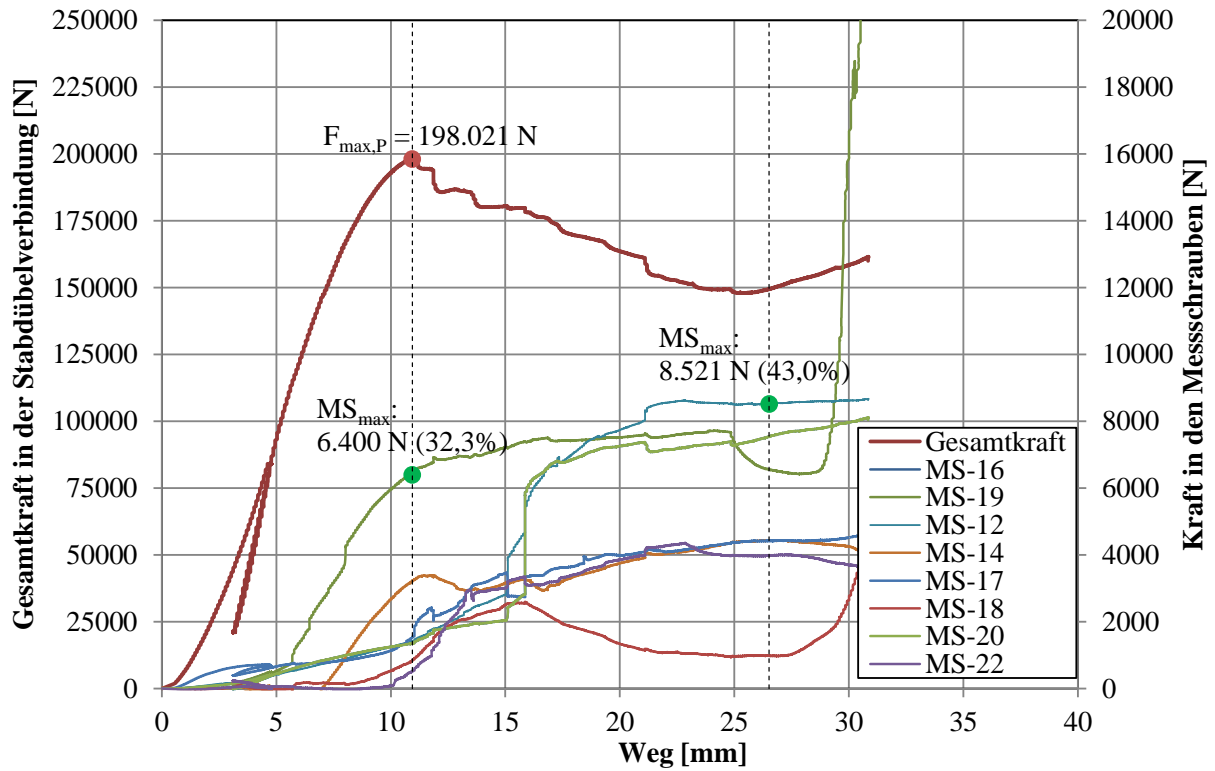


Abbildung ANHANG 68: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n5-m1-03

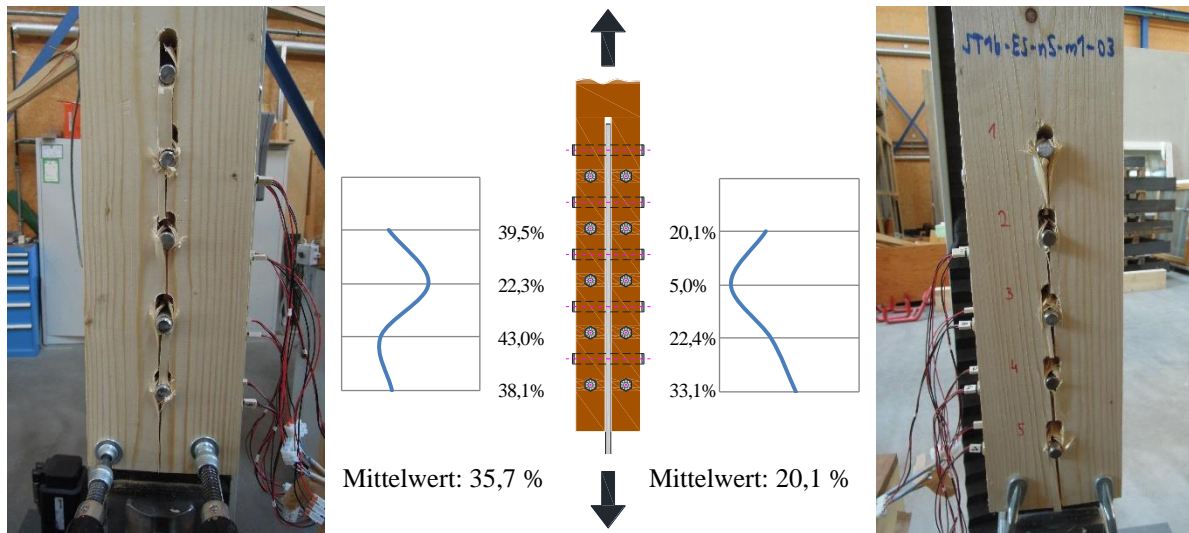


Abbildung ANHANG 69: Bruchbilder ST16-ES-n5-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 70: Jahring-Scan ST16-ES-n5-m1-03: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

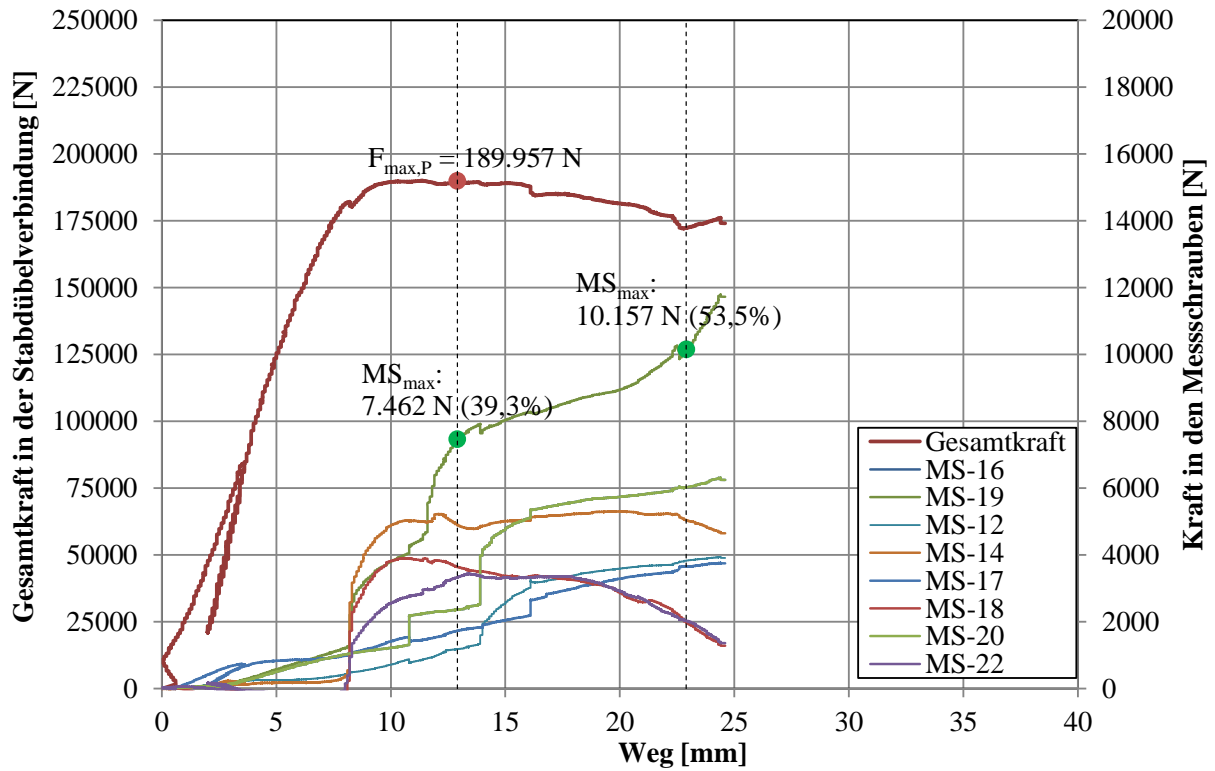
**B-4-6 ST16-ES-n5-m1-04**


Abbildung ANHANG 71: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n5-m1-04

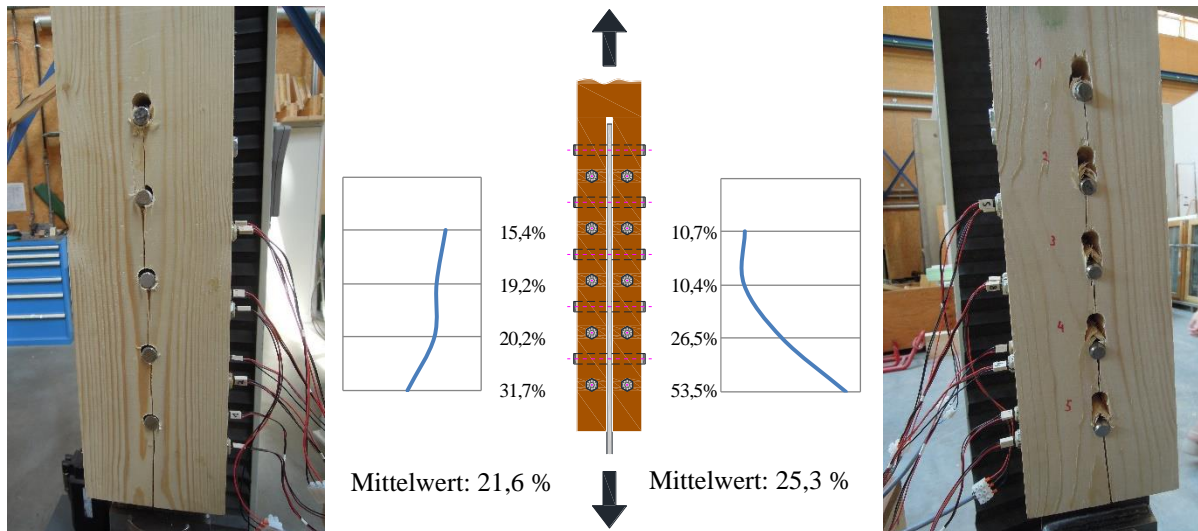


Abbildung ANHANG 72: Bruchbilder ST16-ES-n5-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 73: Jahring-Scan ST16-ES-n5-m1-04: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19

**B-4-7 ST16-ES-n5-m1-05**

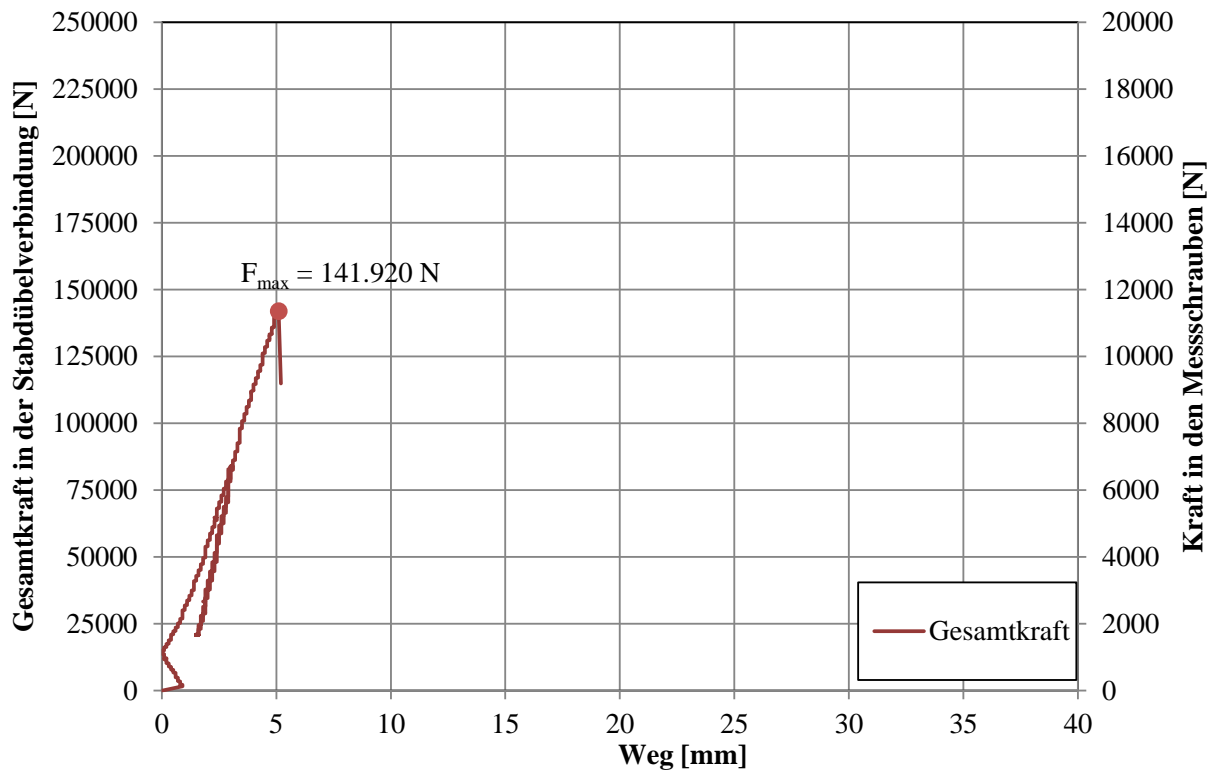


Abbildung ANHANG 74: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n5-m1-05

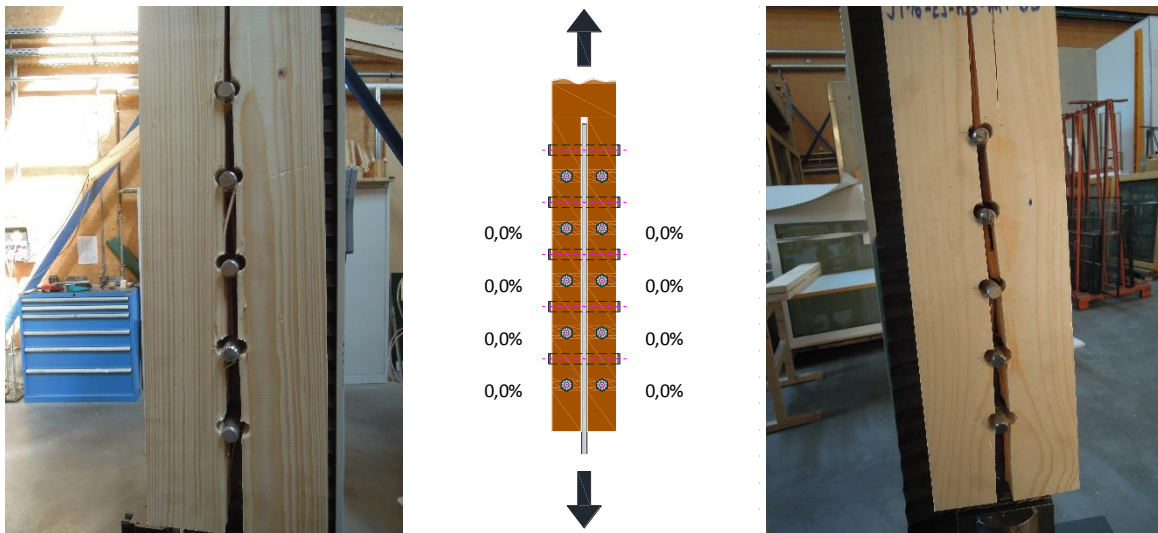


Abbildung ANHANG 75: Bruchbilder ST16-ES-n5-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



Abbildung ANHANG 76: Jahring-Scan ST16-ES-n5-m1-05: links: Seite MS16; rechts: Seite MS19



## B-5 ST16-ES-n2-m2

### B-5-1 Zusammenfassung der Ergebnisse aller Prüfungen der Serie

Tabelle ANHANG 5: Ergebnisse der Prüfserie ST16-ES-n2-m2

Prüf-Nr.	u [%]	$\rho_i$ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>Joh.</sub> [N]	F <sub>max,P</sub> [N]	F <sub>max</sub> [N]	$\eta_s$ [%]	$\Phi_{P-J}$ [%]	$\Phi_{v-u}$ [%]	Spalten [j,n/b,e]	$\eta_{MS}$ [%]
00	10,9%	409	162.426	137.706	145.041	k. MS	84,8%	104%	j/b	k. MS
01	11,6%	471	186.891	179.817	179.817	63,7%	96,2%	136%	j/b	42,8%
02	11,2%	460	182.360	161.946	161.946	74,7%	88,8%	122%	j/b	54,2%
03	11,5%	451	178.846	164.814	164.814	78,5%	92,2%	124%	j/b	54,7%
04	11,2%	488	193.747	194.302	194.302	72,4%	100%	146%	j/b	46,8%
05	11,8%	424	168.059	132.683	132.683	unver.	79,0%	100%	j/b	unver.
06	9,90%	403	159.834	152.852	152.852	58,0%	95,6%	115%	j/b	38,5%
Min.	9,90%	403	159.834	152.852	152.852	58,0%	88,8%	115%	-	38,5%
$\bar{x}_{med}$	11,2%	460	182.360	164.814	164.814	72,4%	95,6%	124%	-	46,8%
Max.	11,6%	488	193.747	194.302	194.302	78,5%	100%	146%	-	54,7%
$\bar{x}_{arith}$	11,1%	455	180.336	170.746	170.746	69,4%	94,6%	129%	-	47,4%
$\sigma$	0,667%	32,1	12.742	16.355	16.355	8,40%	4,35%	12,3%	-	7,09%
COV	6,03%	7,07%	7,07%	9,58%	9,58%	12,1%	4,59%	9,58%	-	15,0%

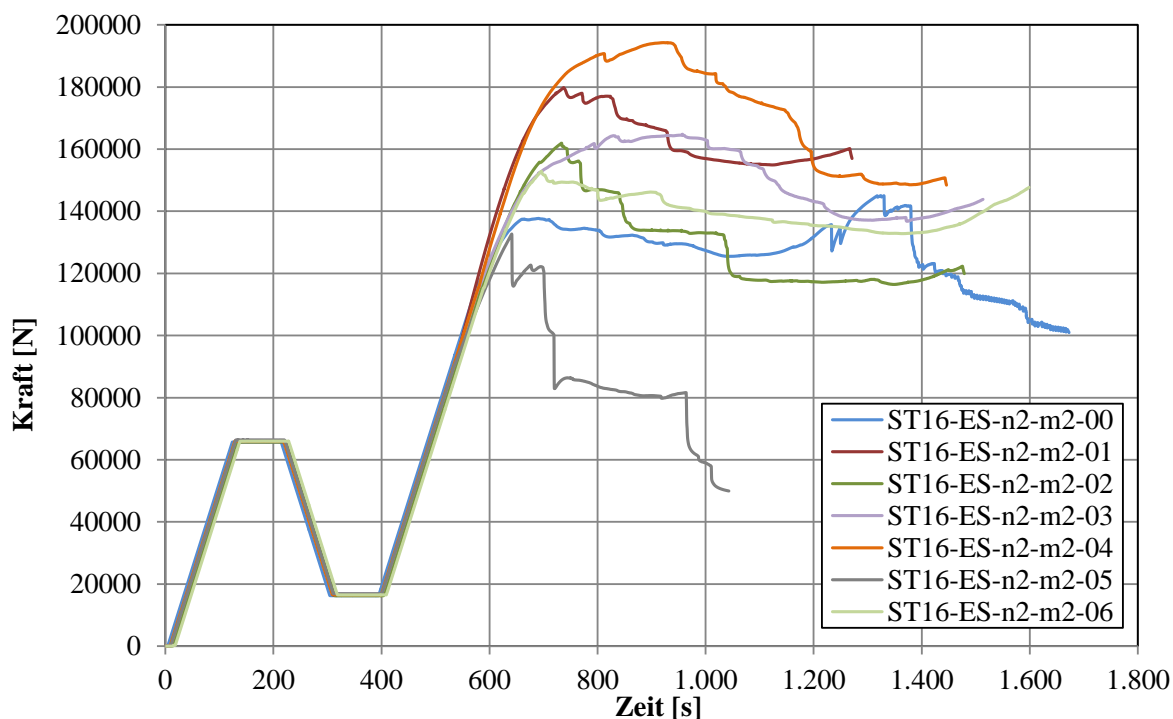


Abbildung ANHANG 77: Kraft-Zeit-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n2-m2

**B-5-2 ST16-ES-n2-m2-00**

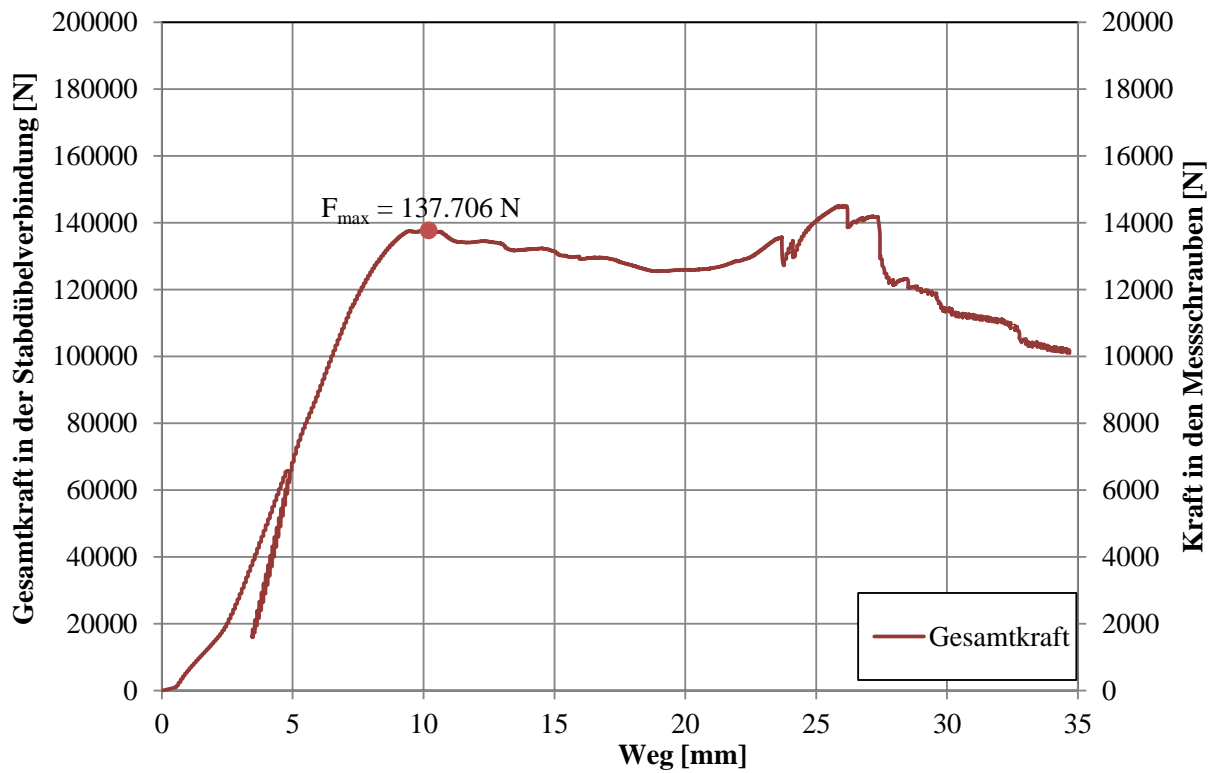


Abbildung ANHANG 78: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-00



Abbildung ANHANG 79: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-00: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 80: Jahring-Scan ST16-ES-n2-m2-00: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27

### B-5-3 ST16-ES-n2-m2-01

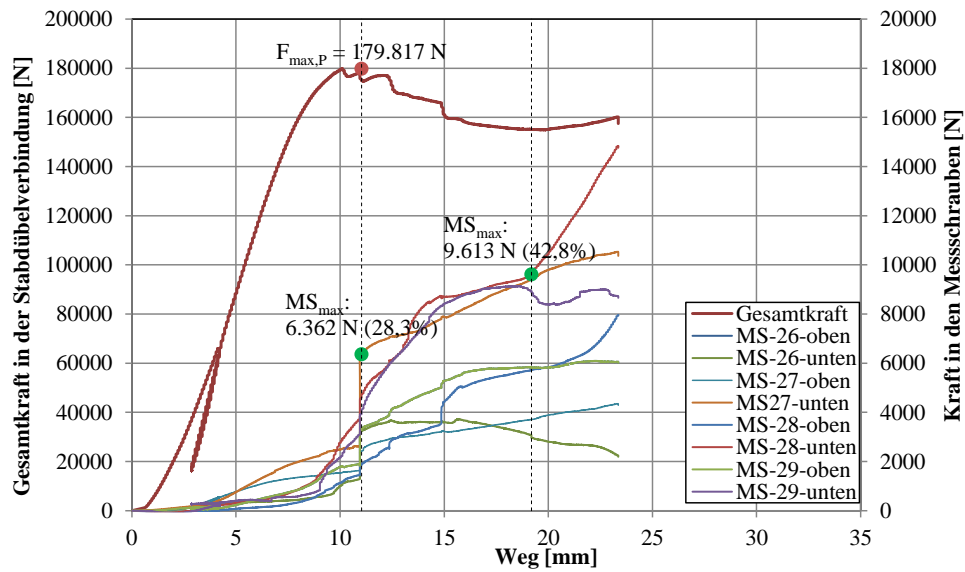


Abbildung ANHANG 81: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n2-m2-01

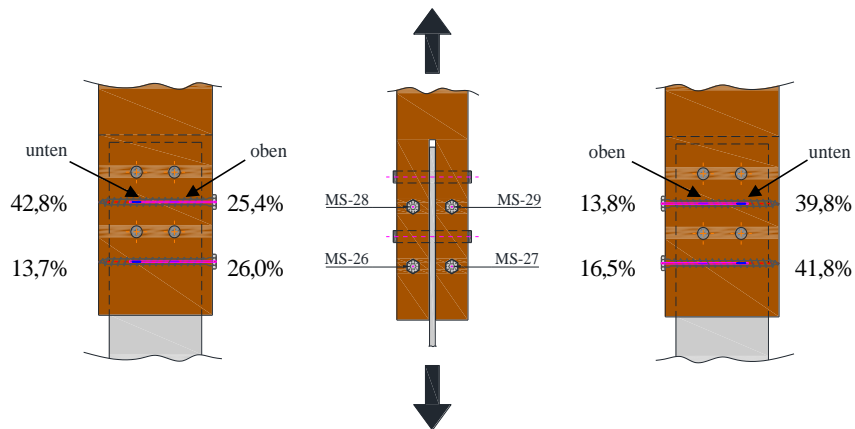


Abbildung ANHANG 82: Kraftanteile in den Messschrauben zum Zeitpunkt 2; Prüfserie ST16-ES-n2-m2-01



Abbildung ANHANG 83: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-01: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 84: Jahring-Scan ST16-ES-n2-m2-01: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27

### B-5-4 ST16-ES-n2-m2-02

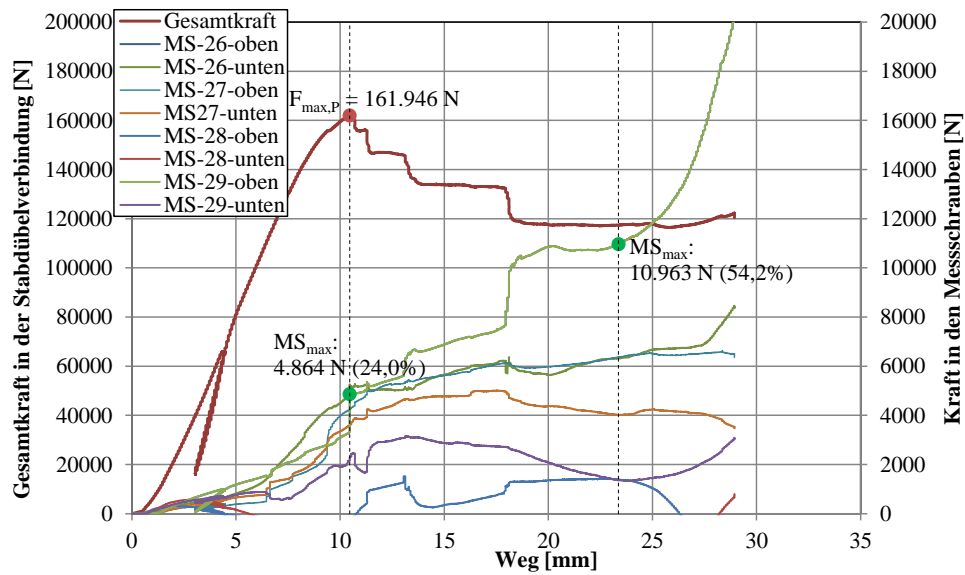


Abbildung ANHANG 85: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-02

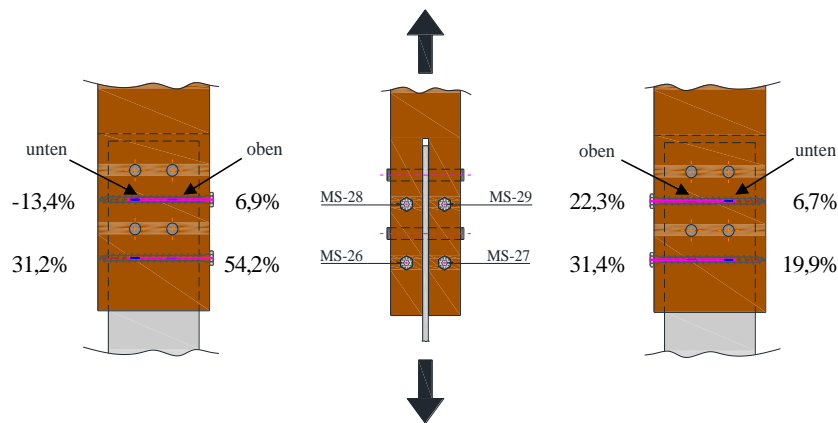


Abbildung ANHANG 86: Kraftanteile in den Messschrauben zum Zeitpunkt 2; Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-02



Abbildung ANHANG 87: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-02: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 88: Jahring-Scan ST16-ES-n2-m2-02: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



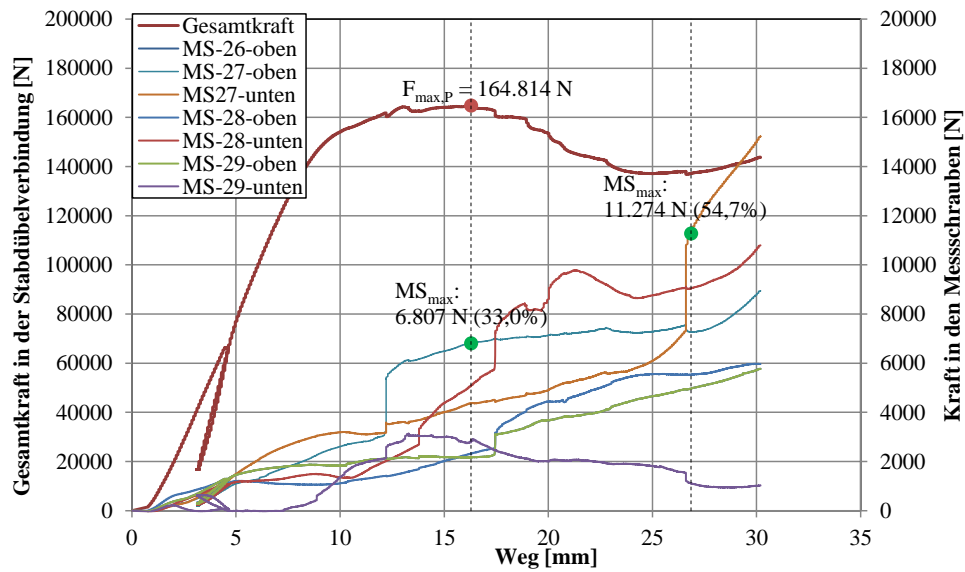
**B-5-5 ST16-ES-n2-m2-03**


Abbildung ANHANG 89: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-03

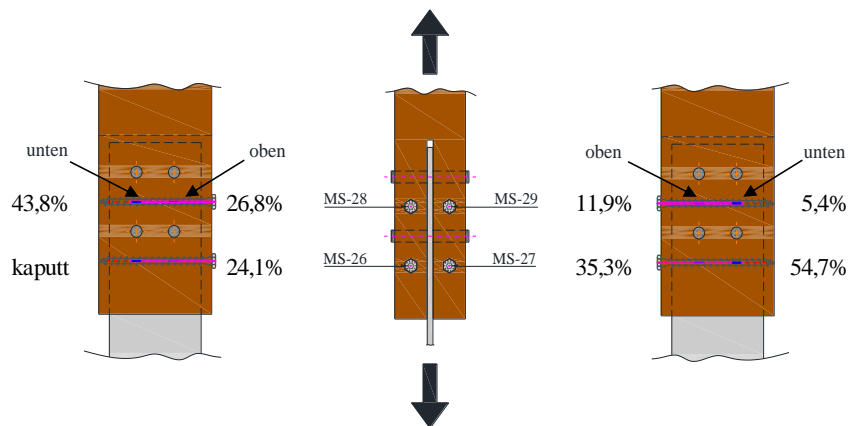


Abbildung ANHANG 90: Kraftanteile in den Messschrauben zum Zeitpunkt 2; Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-03



Abbildung ANHANG 91: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-03: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 92: Jahring-Scan ST16-ES-n2-m2-03: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27

**B-5-6 ST16-ES-n2-m2-04**

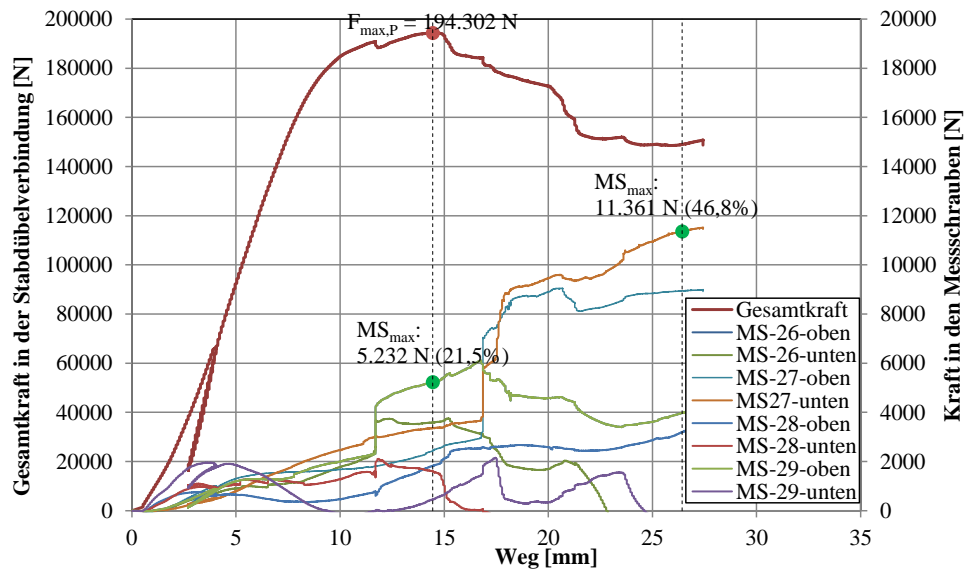


Abbildung ANHANG 93: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-04

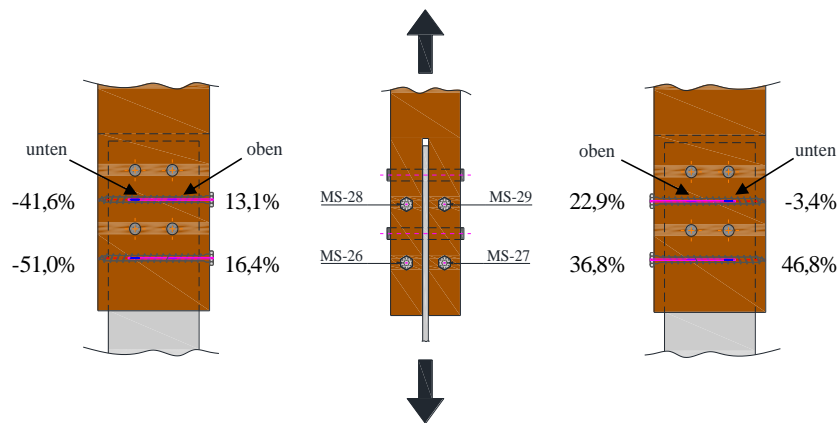


Abbildung ANHANG 94: Kraftanteile in den Messschrauben zum Zeitpunkt 2; Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-04

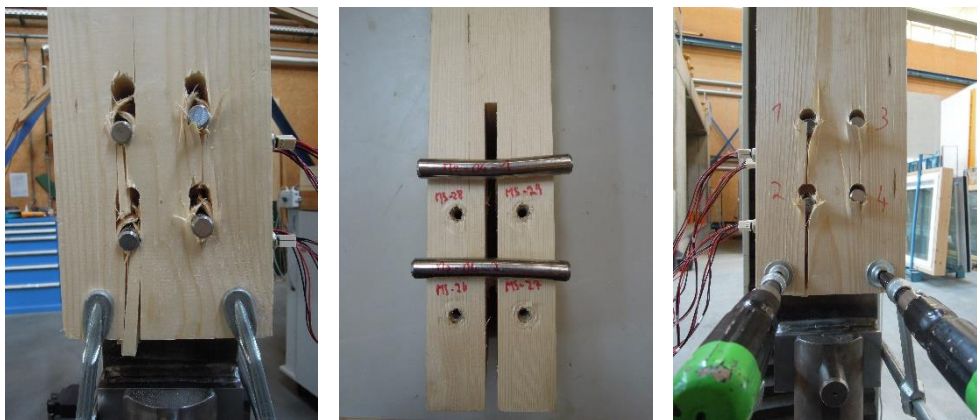


Abbildung ANHANG 95: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-04: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 96: Jahrring-Scan ST16-ES-n2-m2-04: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



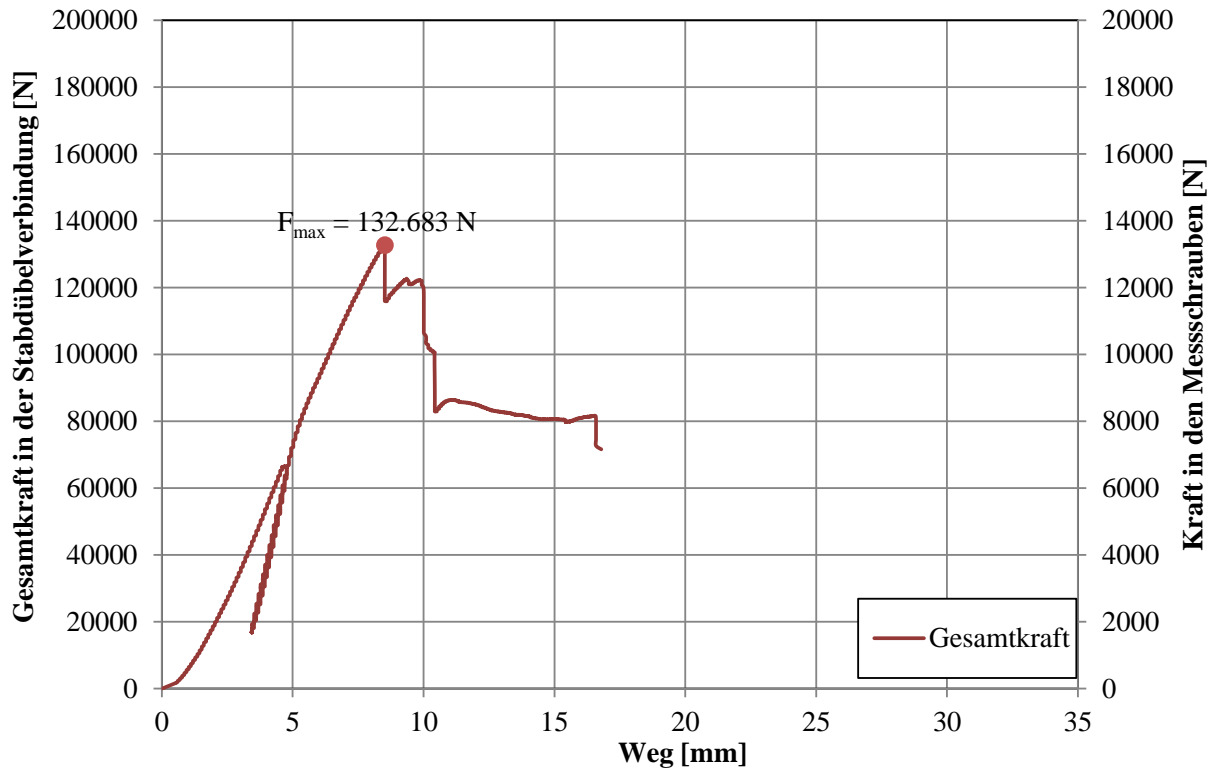
**B-5-7 ST16-ES-n2-m2-05**


Abbildung ANHANG 97: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfserie ST16-ES-n2-m2-05

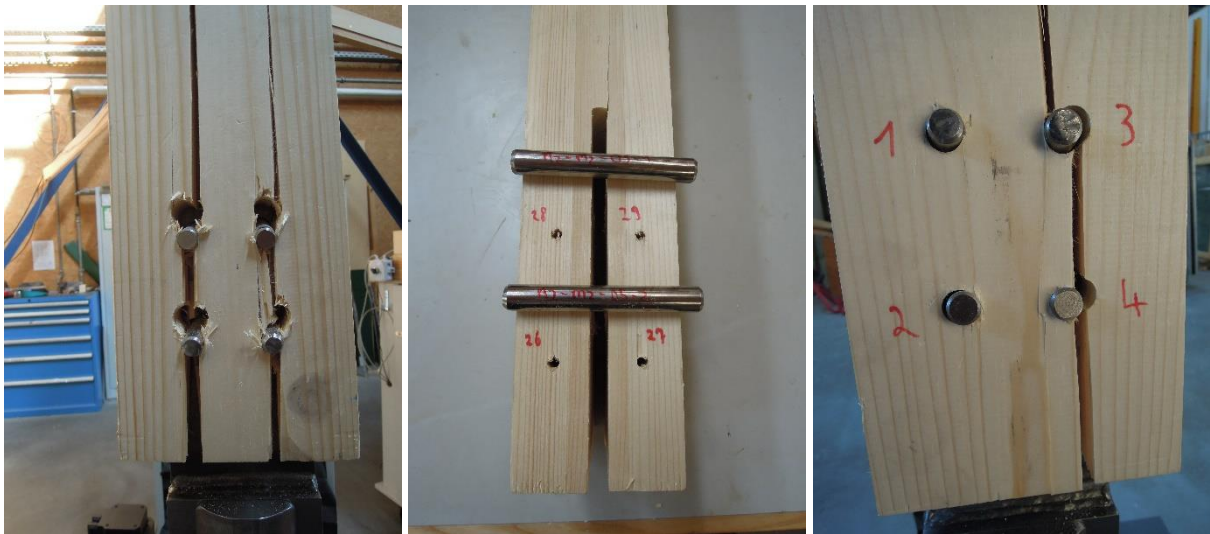


Abbildung ANHANG 98: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-05: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 99: Jahrring-Scan ST16-ES-n2-m2-05: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27

**B-5-8 ST16-ES-n2-m2-06**

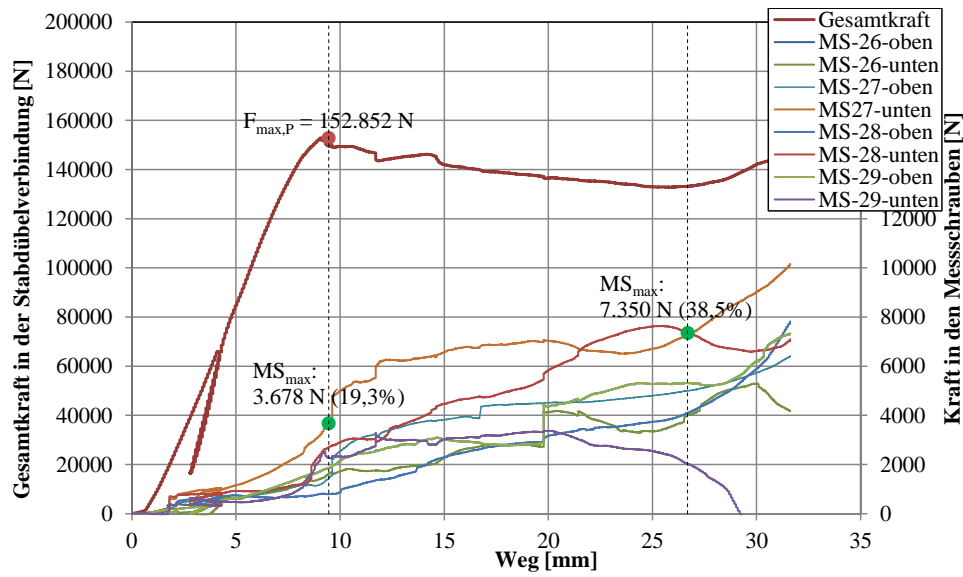


Abbildung ANHANG 100: Kraft-Weg-Diagramm der Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-06

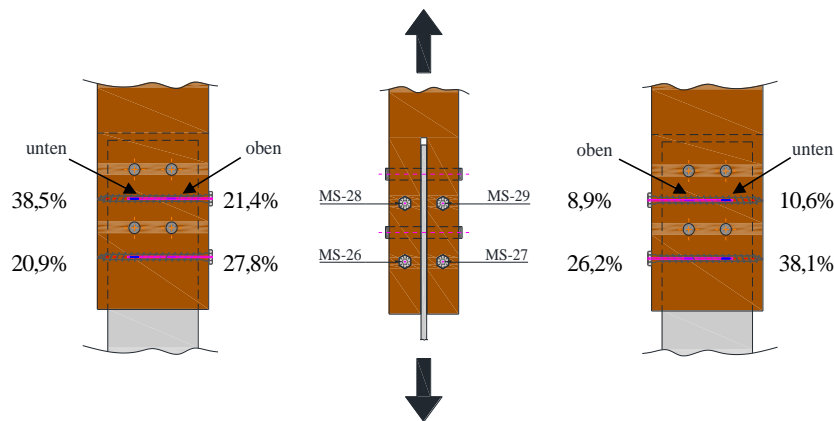


Abbildung ANHANG 101: Kraftanteile in den Messschrauben zum Zeitpunkt 2; Prüfsérie ST16-ES-n2-m2-06



Abbildung ANHANG 102: Bruchbilder ST16-ES-n2-m2-06: links: Seite MS26; rechts: Seite MS27



Abbildung ANHANG 103: Jahrring-Scan ST16-ES-n2-m2-06: links: Seite MS27; rechts: Seite MS27

## B-6 Holzfeuchtigkeit und Rohdichte aller Prüfkörper

Tabelle ANHANG 6: Holzfeuchtigkeiten und Rohdichten aller Prüfkörper

Prüfkörper	Holzfeuchte u [%]		Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Seite MS16/26	Seite MS19/27	Seite MS16/26	Seite MS19/27
ST16-ST-n1-m1-00	11,7%	11,9%	426	423
ST16-ST-n1-m1-01	12,2%	12,6%	467	418
ST16-ST-n1-m1-02	12,1%	11,3%	463	438
ST16-ST-n1-m1-03	11,3%	11,3%	411	456
ST16-ST-n1-m1-04	11,9%	11,7%	470	442
ST16-ST-n1-m1-05	11,7%	12,0%	427	463
ST16-ES-n1-m1-00	11,8%	11,9%	488	417
ST16-ES-n1-m1-01	10,1%	11,6%	419	439
ST16-ES-n1-m1-02	9,92%	9,92%	374	384
ST16-ES-n1-m1-03	11,9%	12,0%	445	486
ST16-ES-n1-m1-04	11,3%	11,3%	477	466
ST16-ES-n1-m1-05	9,91%	10,7%	341	420
ST20-ES-n1-m1-00	11,1%	11,8%	385	498
ST20-ES-n1-m1-01	11,4%	11,4%	513	439
ST20-ES-n1-m1-02	11,3%	11,3%	463	544
ST20-ES-n1-m1-03	11,6%	11,3%	507	508
ST20-ES-n1-m1-04	11,7%	11,5%	496	508
ST20-ES-n1-m1-05	12,2%	11,5%	478	515
ST16-ES-n5-m1-00	11,6%	11,1%	492	457
ST16-ES-n5-m1-01	9,83%	9,99%	380	407
ST16-ES-n5-m1-02	11,9%	11,1%	472	463
ST16-ES-n5-m1-03	11,3%	11,4%	456	432
ST16-ES-n5-m1-04	12,0%	11,9%	452	415
ST16-ES-n5-m1-05	11,8%	11,6%	497	425
ST16-ES-n2-m2-00	10,3%	11,4%	373	446
ST16-ES-n2-m2-01	11,6%	11,5%	469	473
ST16-ES-n2-m2-02	11,1%	11,3%	470	450
ST16-ES-n2-m2-03	11,5%	11,4%	458	444
ST16-ES-n2-m2-04	11,1%	11,3%	447	530
ST16-ES-n2-m2-05	11,8%	11,8%	428	419
ST16-ES-n2-m2-06	9,93%	9,93%	401	404



Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl