Einfluss exzentrisch positionierter runder Einzeldurchbrüche und Gruppen von Durchbrüchen auf die Tragfähigkeit von Brettschichtholzträgern

Entwicklung von Bemessungsverfahren und Konstruktionsregeln für Verstärkungsmaßnahmen

Schlussbericht zu IGF-Vorhaben 18048 N

Autoren	Martin Danzer, M.Sc. Dr.-Ing. Philipp Dietsch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Forschungsstelle	Technische Universität München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Zeitraum	05/2014 – 02/2017

Vorwort

Das IGF-Vorhaben 18048 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. - iVTH, Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sowie Unterstützung zur Durchführung der dargestellten Arbeiten bedanken wir uns herzlich.

Darüber hinaus gilt unser besonderer Dank:

- Der Firma Wiehag GmbH für die kostenlose Bearbeitung, Lieferung und Bereitstellung von Prüfkörpern aus Brettschichtholz mit Durchbrüchen
- Der Firma Grossmann Bau GmbH & Co. KG für die kostenlose Bearbeitung, Lieferung und Bereitstellung von Prüfkörpern aus Brettschichtholz mit Durchbrüchen
- Der Firma Spax International GmbH & Co. KG für die kostenlose Bereitstellung von Verstärkungselementen in Form von Vollgewindeschrauben sowie Gewindestangen
- Den Mitarbeitern der MPA Bau der TUM für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen
- Den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses für die fachliche Begleitung, die Diskussionsbeiträge sowie die konstruktiven Anregungen in den Sitzungen:
    - Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß (Blaß & Eberhart GmbH)
    - Dr.-Ing. Tobias Wiegand (Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.)
    - DI Alfons Brunauer (Wiehag GmbH)
    - Dipl.-Ing (FH) Matthias Götz (Grossmann Bau GmbH & Co. KG)
    - Dipl.-Ing. (FH) Micha Hochstrate (Spax International GmbH & Co. KG)

Kurzfassung

Dieses Forschungsvorhaben befasst sich mit Untersuchungen an Brettschichtholzträgern mit runden Durchbrüchen. Die inhaltlichen Schwerpunkte liegen dabei auf der experimentellen und numerischen Untersuchung exzentrisch positionierter Einzeldurchbrüche sowie mehrerer in horizontaler Richtung nebeneinanderliegender bzw. in vertikaler Richtung übereinanderliegender Durchbrüche. Neben Betrachtungen im unverstärkten Zustand wird der verstärkte Zustand in Form eingedrehter, innenliegender Verstärkungselemente untersucht sowie der Effekt dieser Verstärkungsart quantifiziert.

Grundlage der Untersuchungen bilden zwei Versuchsreihen, im kleinen Maßstab anhand der Trägergröße $b x h = 120\,\text{mm} \times 400\,\text{mm}$ sowie im großen Maßstab anhand der Trägergröße $b x h = 200\,\text{mm} \times 1000\,\text{mm}$. In unverstärkten sowie mittels Vollgewindeschrauben und Gewindestangen verstärkten Konfigurationen werden die Einflüsse o.g. Parameter versuchstechnisch quantifiziert sowie eine Datenbasis zur Validierung begleitender Simulationen und die Ableitung von Bemessungsregeln geschaffen.

In begleitenden FEM-Berechnungen werden die mechanischen Auswirkungen exzentrischer Anordnungen getrennt anhand der einzelnen Spannungskomponenten aufgezeigt. In Rahmen von Parameterstudien werden auf Grundlage eines Weibull-basierten Bemessungsansatzes Untersuchungen hinsichtlich der Querzugproblematik im unverstärkten Zustand vorgestellt. Anhand dieser Untersuchungen wird ein Bemessungskonzept für exzentrische, runde Durchbrüche im unverstärkten Zustand abgeleitet, welches an eigenen sowie in der Literatur zugänglichen Versuchsergebnissen zentrischer Anordnungen validiert wird.

Hinsichtlich Gruppenanordnungen wird der Einfluss des lichten Abstands in Parameterstudien anhand der Beurteilungskenngröße abgeschätzter Durchrisslasten im unverstärkten Zustand quantifiziert. Auf Basis dieser Untersuchungen werden für Gruppenanordnungen – bestehend aus bis zu drei Durchbrüchen – Abminderungsbeiwerte in Abhängigkeit des lichten Abstands abgeleitet.

Anhand von Untersuchungen an verstärkten Durchbrüchen wird der Einfluss unterschiedlicher Neigungen der Verstärkungselemente in getrennter Form auf die Querzug- sowie Schubspannungsverteilungen dargestellt. Aus Betrachtungen bezüglich der in den geneigten Verstärkungselementen auftretenden Kräfte werden vereinfachte Bemessungskenngrößen ermittelt. Dehnungsmessungen in den Verstärkungselementen der Großversuche bestätigen die Größenordnung. Infolge vereinfachter simulationstechnischer Betrachtungen sowie einer begrenzten Variation von Parametern kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch kein allgemeingültiges Bemessungskonzept angegeben werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Abstract

This research project deals with investigations on glulam beams with round holes. The main focus is on experimental and numerical investigations on single holes arranged eccentrically and groups of holes arranged in horizontal and vertical direction. Thereby the unreinforced state as well as the reinforced state by means of screwed in, internal reinforcing elements is considered and the effect of this type of reinforcement is quantified.

Basis of the investigations are two experimental test series in the form of small-scale tests with cross-sectional dimensions $b x h$ = 120 mm x 400 mm and in the form of large-scale tests with cross-sectional dimensions $b x h$ = 200 mm x 1000 mm. In unreinforced and reinforced configurations – reinforced by fully threaded screws and threaded rods – the influence of the above mentioned parameters is quantified and a data base for validating associated simulations and for deriving design rules is generated.

In associated numerical investigations the structural behaviour of eccentric arrangements of holes is shown separately by means of the individual stress components. In parametric studies investigations regarding stress in tension perpendicular to the grain related to a Weibull based design approach are presented in the unreinforced state. Based on these investigations a design approach for eccentric, round holes without reinforcement is derived and validated by results of own tests on eccentric arrangements as well as by tests on centric arrangements documented in literature.

With regard to groups of holes the influence of the clear distance is quantified in parametric studies in the unreinforced state. The influence is determined by calculated load-bearing capacities which describe a failure in tension perpendicular to the grain in the form of a crack over the whole beam width. Based on these investigations reduction factors are derived for groups of holes, consisting of up to three holes.

By means of investigations on reinforced holes the influence of different inclinations of the reinforcing elements is shown separately for loading in tension perpendicular to the grain and shear. By considering the forces occurring in the inclined reinforcing elements simplified design parameters are derived. Strain measurements in the reinforcing elements applied in the large-scale tests confirm the order of magnitude of these parameters. However, no general design concept can be given at this stage due to the simplified nature of numerical considerations and the limited variation of parameters. For this purpose further investigations are necessary.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **I**

Kurzfassung ..... **II**

Abstract ..... **III**

Inhaltsverzeichnis ..... **IV**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.2 Stand von Forschung und Technik 2

1.3 Zielsetzung 7

2 Experimentelle Untersuchungen **8**

2.1 Kleinversuche 8

2.1.1 Versuchsprogramm 8

2.1.2 Material & Prüfkörpereigenschaften 10

2.1.3 Versuchsaufbau & Durchführung 11

2.1.4 Untersuchungsmethodik 12

2.1.5 Auswertung & Ergebnisse 15

2.2 Großversuche 19

2.2.1 Versuchsprogramm 19

2.2.2 Material & Prüfkörpereigenschaften 22

2.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung 22

2.2.4 Untersuchungsmethodik 23

2.2.5 Auswertung & Ergebnisse 25

3 Numerische Untersuchungen **32**

3.1 Simulationsmodell 32

3.1.1 Ohne Verstärkungselemente 32

3.1.2 Mit Verstärkungselementen 33

3.1.3 Laterale Verbundsteifigkeit Verstärkungselement - Holz 34

3.1.4 Axiale Verbundsteifigkeit Verstärkungselement - Holz 35

3.1.5 Verifizierung des numerischen Modells 38

3.2 Vergleich Versuch-Simulation 39

3.2.1 Bestimmung von Versagenslasten im unverstärkten Zustand 39

3.2.2 Vergleich Kleinversuche 41

3.2.3 Vergleich Großversuche 43

3.2.4 Bestimmung von Versagenslasten im verstärkten Zustand 44

3.2.5 Bewertung 47

3.3 Exzentrischer Durchbruch ohne Verstärkung 47

3.3.1 Genereller Einfluss der Ausmitte/Position auf das Tragverhalten 47

3.3.2 Beanspruchung in Faserrichtung 49

3.3.3 Schubbeanspruchung 50

3.3.4 Beanspruchung quer zur Faserrichtung ... 52
3.3.5 Spannungsinteraktion ... 54
3.3.6 Versagenslasten auf Grundlage des Weibull-Ansatzes ... 55
3.4 Verstärkung exzentrischer Durchbrüche mittels innenliegender Verstärkungen ... 57
3.4.1 Einfluss der Verstärkung im ungerissenen Zustand ... 58
3.4.2 Einfluss der Verstärkung im teilgerissenen Zustand ... 62
3.4.3 Betrachtungen zur Bemessung der Verstärkungen ... 64
3.4.4 Dehnungsmessungen in Gewindestangen der Großversuche ... 68
3.5 Gruppenanordnungen ... 75
3.5.1 Horizontale Gruppe ... 75
3.5.2 Vertikale Gruppe ... 81
4 Bemessungsregeln und Konstruktionsgrundsätze ... 87
4.1 Unverstärkter Zustand ... 87
4.1.1 Exzentrische Anordnung ... 87
4.1.2 Gruppeneinfluss horizontal ... 93
4.1.3 Gruppeneinfluss vertikal ... 95
4.2 Verstärkter Zustand ... 96
4.3 Konstruktionsgrundsätze ... 97
5 Zusammenfassung ... 98
6 Literaturverzeichnis ... 101
Veröffentlichungen ... 101
Normen und Regelwerke ... 104
Software/Hardware ... 105
7 Anhang ... 106
Anhang A Versuchsdaten Kleinversuche ... 106
Anhang B Versuchsdaten Großversuche ... 109
Anhang C Versuchsdaten axiales Verbundverhalten Vollgewindeschrauben ... 111
Anhang D Bewertung Sicherheitsniveau Bemessungskonzept ... 112

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Dachtragwerke in Gestalt von Brettschichtholzträgern finden bei weitgespannten Konstruktionen in Sport-, Lager- und Fertigungshallen ebenso Anwendung wie bei Verwaltungsgebäuden und Bildungseinrichtungen. Die Bauhöhe dieser Träger bewegt sich etwa bei einem Fünfzehntel bis einem Zwanzigstel der Spannweite und erreicht durchaus Höhen von mehr als zwei Metern. Architektonische Gründe oder auch nutzerspezifische Anforderungen an das verfügbare Lichtraumprofil führen häufig zu der Erfordernis, Rohrleitungen für Zu-/Abwasser, Lüftung und Heizung etc. in der Ebene der Tragkonstruktion anzuordnen. Im Resultat müssen in den Trägern Durchbrüche angeordnet werden, welche das Tragverhalten dieser erheblich beeinflussen. Zur Bemessung derartiger Durchbrüche in Brettschichtholzträgern existieren derzeit auf europäischer Ebene in EN 1995-1-1:2010 keine normativen Regelungen. Zwar bieten einzelne Mitgliedsländer Nachweisverfahren und Konstruktionsregeln zu Durchbrüchen in Form nicht widersprechender, ergänzender Angaben (NCI) an, die Handhabung ist jedoch sehr unterschiedlich, so dass keine einheitliche Umsetzung in den europäischen Ländern vorliegt. Zudem schränken die Regelungen die Positionierung von Durchbrüchen z.T. erheblich ein, wie am Beispiel der Vorgaben des Nationalen Anhangs von Deutschland (DIN EN 1995-1-1/NA:2013) in Abbildung 1 ersichtlich ist. Runde Einzeldurchbrüche ohne Verstärkung dürfen demnach bis zu einer Durchbruchgröße $d/h = 0{,}15$ ausgeführt werden, mit innenliegender Verstärkung bis zu einer Durchbruchgröße $d/h = 0{,}30$. Exzentrische Anordnungen sind nur in sehr geringem Maße möglich, da im unverstärkten Zustand Mindestmaße für den oberen/unteren Restquerschnitt von $h_{ro(ru)} \geq 0{,}35h$ und im verstärkten Zustand von $h_{ro(ru)} \geq 0{,}25h$ gefordert werden. Detaillierte Kenntnisse in Form experimenteller und theoretischer Untersuchungen zum Tragverhalten bei größeren Ausmitten bzw. kleineren Randabständen sind bisher kaum vorhanden. Eine zuverlässige Bestimmung der Tragfähigkeit exzentrischer Anordnungen würde zu einer deutlichen Ausweitung das praktischen Anwendungsfeldes führen.

$\ell_v \geq h$	$\ell_z \geq 1{,}5\,h$, jedoch mindestens 300 mm	$\ell_A \geq h/2$	$h_{ro(ru)} \geq 0{,}35 \cdot h$	$a \leq 0{,}4\,h$	$h_d \leq 0{,}15 \cdot h$

Maße in Millimeter

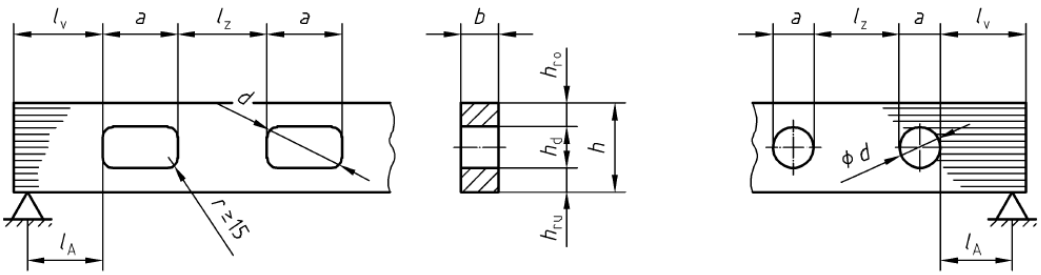


Abbildung 1: Bild NA.7 – Unverstärkte Durchbrüche (DIN EN 1995-1-1/NA:2013)

Ein häufig vorkommender Fall in der Praxis ist die Anordnung von mehreren Durchbrüchen in einem Träger, da im Bereich der Gebäudetechnik nur selten eine einzelne Ver-/Entsorgungsleitung alleine ausreichend ist. Von Seiten der Planung besteht daher häufig der Wunsch einer gebündelten Anordnung auf möglichst kleinem Raum, um eine weitläufige Verteilung der Leitungen über größere Gebäudebereiche zu vermeiden. Die normativen Regelungen in DIN EN 1995-1-1/NA:2013 schließen eine gegenseitige Beeinflussung der Durchbrüche einer Gruppe aus, indem

im unverstärkten Fall ein Mindestabstand von $l_z = 1{,}5h$ bzw. im verstärkten Fall von $l_z = 1{,}0h$ gefordert wird, mindestens jedoch 300 mm. Die Festlegung der geometrischen Randbedingungen ausschließlich in Abhängigkeit der Trägerhöhe ohne Berücksichtigung der Durchbruchgröße führt insbesondere bei großen Trägerhöhen und kleinen Durchbrüchen zu sehr restriktiven Vorgaben. Zudem sind bisher nur Anordnungen mehrerer in Faserrichtung hintereinanderliegender Durchbrüche zulässig, die Möglichkeit übereinanderliegender Durchbrüche wird nicht geboten. Für die praxisrelevanten Anwendungsfälle existieren bisher kaum experimentelle oder theoretische Untersuchungen, die eine abgesicherte Beurteilung der Tragfähigkeit bzw. der gegenseitigen Beeinflussung erlauben.

1.2 Stand von Forschung und Technik

Unverstärkte Einzeldurchbrüche

Eine umfassende Zusammenstellung von Versuchen und Berechnungsansätzen zu unverstärkten Durchbrüchen findet sich in DANIELSSON (2006). An dieser Stelle sollen lediglich einige wesentliche Quellen genannt werden, die für die Entwicklung der normativen Regeln im nationalen Raum maßgebend waren.

Erste Versuche an Trägern mit unverstärkten Durchbrüchen wurden in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen ergab sich, dass in Abhängigkeit von Belastung und Geometrie der Durchbrüche Spannungskonzentrationen auftreten, wobei die Querzugsspannung als primär schädigungsrelevant identifiziert wurde.

Grundlage des nationalen Bemessungskonzeptes nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013 sind Untersuchungen von KOLB & EPPLE (1985). Bei dem von ihnen entwickelten Bemessungsansatz handelt es sich um einen semi-empirischen Ansatz, bei welchem sich die resultierende Querzugkraft aus einem Querkraft- sowie einem Momentenanteil zusammensetzt. Die Zugkraft infolge des Querkraftanteils wird dabei über einen Anteil der parabelförmigen Schubspannungsverteilung des ungeschwächten Querschnitts vereinfachend bis zum Schnittpunkt der 45°-Diagonale und dem Durchbruchrand ermittelt, siehe Abbildung 2. Bei alleiniger Beanspruchung durch ein Moment konnten die Autoren in eigenen FE-Berechnungen zwar keine Querzugspannungen feststellen, jedoch wiesen frühere theoretische wie auch experimentelle Untersuchungen (u.a. KRABBE & SCHOWE (1977), JOHANNESSON (1983)) diesen Anteil nach. Daher wurde für die resultierende Querzugkraft ein aus Versuchen ermittelter, empirischer Momentenanteil berücksichtigt. Über die vereinfachende Umrechnung der resultierenden Querzugkraft in eine vom Durchbruchrand ausgehend linear abnehmende Spannungsverteilung wird letztendlich ein Spannungsnachweis geführt, der in den wesentlichen Zügen bis in die heutige Normengeneration (DIN EN 1995-1-1/NA:2013) Bestand hat. Infolge späterer Erkenntnisse zur Volumenabhängigkeit der Querzugfestigkeit wurde im genannten Bemessungsmodell noch ein zusätzlicher Beiwert $k_{t,90}$ ergänzt.

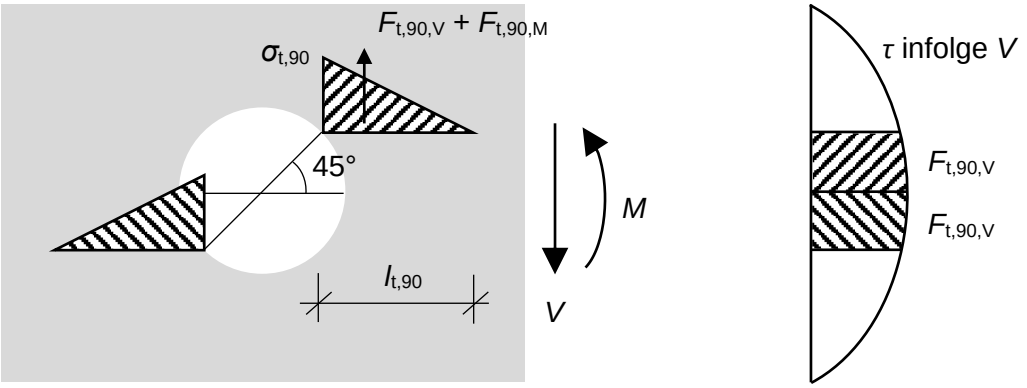


Abbildung 2: Bemessungskonzept nach KOLB & EPPLE (1985)

Die experimentellen Untersuchungen vor der Jahrhundertwende beschränkten sich überwiegend auf geringere Trägerhöhen und auflagernahe Durchbruchsituationen. Die Datenbasis an Versuchsergebnissen wurde durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen von HÖFFLIN (2005) sowie AICHER & HÖFFLIN (2006) durch gezielte Variation der Parameter Trägerhöhe (h = 450 mm; 900 mm), Durchbruchgröße (d/h = 0,20; 0,30; 0,40) sowie Schnittkraftverhältnis (M/V = 1,5h; 5h) ausgeweitet. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde ein wesentlicher Maßstabseffekt bestätigt. Basierend auf ihren experimentellen Untersuchungen stellten die Autoren einen neuen Bemessungsvorschlag für runde Durchbrüche unter Berücksichtigung der inhomogenen Spannungsverteilung im Durchbruchsbereich und einer Weibull-Gesetzmäßigkeit für die volumenabhängige Querzugfestigkeit vor.

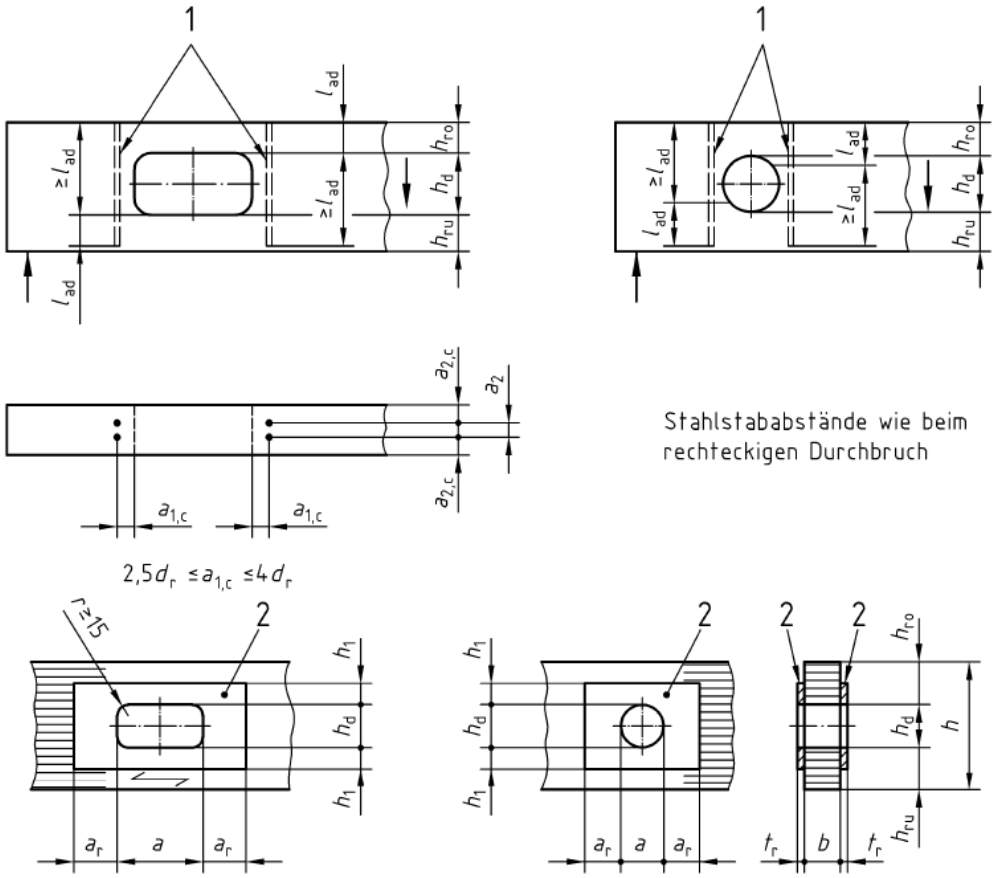
Die Eignung bruchmechanischer Ansätze zur Beschreibung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen ist seit den 80er Jahren zunehmend Gegenstand der europäischen Holzforschung. Als erster Anwendungsbereich hat das Bemessungskonzept für ausgeklinkte Träger auf der Grundlage der Bruchmechanik in zahlreichen Normenwerken (u.a. EN 1995-1-1:2010) Eingang gefunden. Der Bemessungsvorschlag geht auf GUSTAFSSON (1988) und LARSEN & GUSTAFSSON (1989) zurück. Zur Vereinfachung der Nachweisführung wird das Bruchkriterium im Kontext technischer Regelwerke auf einen fiktiven Schubspannungsnachweis unter Berücksichtigung eines aus Versuchswerten empirisch ermittelten Abminderungsfaktors reduziert. In Anlehnung an dieses Bemessungsverfahren war im Entwurf prEN 1995-1-1:2003 ein entsprechender Vorschlag für Durchbrüche enthalten, indem das mechanische Problem eines Durchbruchs auf die Betrachtung eines ausgeklinkten Trägers reduziert wurde. Infolge z.T. erheblicher Diskrepanzen von berechneten und experimentellen Tragfähigkeiten wurde dieser Ansatz jedoch wieder verworfen, so dass in der aktuellen Fassung der EN 1995-1-1:2010 kein Nachweisverfahren für Durchbrüche enthalten ist.

Verstärkte Einzeldurchbrüche

Infolge des geringen Tragvermögens von Trägern mit unverstärkten Durchbrüchen wurden bereits in den 70er und 80er Jahren Versuche an Trägern mit verstärkten Durchbrüchen durchgeführt (u.a. KOLB & FRECH (1977), KOLB & EPPLE (1985)). Als Verstärkungselemente kamen damals vor allem aufgeklebte Holzwerkstoffplatten und eingeklebte Stahlstäbe zum Einsatz. Seit einigen Jahren stellen selbstbohrende Vollgewindeschrauben eine einfach herzustellende Alternative dar.

Entsprechend dem zugrundeliegenden Bemessungskonzept werden die Verstärkungen in der aktuell gültigen Normenfassung DIN EN 1995-1-1/NA:2013 in ihren Wirkungsrichtungen jeweils

senkrecht zur Faser angeordnet und auf die volle auftretende Querzugkraft bemessen, siehe Abbildung 3. Aus verschiedenen Untersuchungen der vergangenen Jahre ist jedoch ersichtlich, dass im auflagernahen Bereich durch eine geneigte Anordnung offenbar ein höheres Lastniveau erreichbar ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse wesentlicher Quellen im Hinblick auf eine optimierte Anordnung von innenliegenden Verstärkungselementen in Trägern mit Durchbrüchen zusammengestellt.



Legende

1 innen liegende Verstärkung
2 außen liegende Verstärkung

Abbildung 3: Bild NA.12 - Beispiele für Verstärkungen von Durchbrüchen für die querzugbeanspruchten Bereiche 1 und 2 nach Bild NA.11 (DIN EN 1995-1-1/NA:2013)

KOLB & EPPLE (1985) führten Versuche an Trägern aus Furnierschichtholz mit verstärkten runden sowie rechteckigen Durchbrüchen durch. Bereits zu dieser Zeit kamen neben aufgeklebten Baufurnierplatten auch eingeleimte Betonrippenstähle mit zwei verschiedenen Neigungen von $\alpha = 90°$ bzw. $\alpha = 60°$ zwischen Stabachse und Holzfaserrichtung zum Einsatz. Im Fall der unter $\alpha = 60°$ angeordneten Betonrippenstähle wurden im Vergleich zu den unter $\alpha = 90°$ angeordneten geringere Dehnungen quer zur Faser gemessen. Hinsichtlich der erreichten Tragfähigkeiten kann jedoch keine bewertende Aussage getroffen werden, da die Versuche mit Betonrippenstählen alle vorzeitig abgebrochen wurden.

BLAß & BEJTKA (2003) untersuchten u.a. den Einfluss innenliegender Verstärkungselemente in Form von Vollgewindeschrauben auf die Tragfähigkeit von Vollholz-/Brettschichtholzträgern mit runden sowie rechteckigen Durchbrüchen im auflagernahen Bereich. Träger mit rechteckigen

Durchbrüchen wurden sowohl in unverstärkter Konfiguration als auch in verstärkten Konfigurationen mit Neigungen $\alpha = 90°$ bzw. $\alpha = 45°$ zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung geprüft. Runde Durchbrüche wurden unverstärkt sowie verstärkt mit einer Neigung $\alpha = 90°$ zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung geprüft. Verstärkte, rechteckige Durchbrüche wiesen bei unter einem Winkel $\alpha = 90°$ eingebrachten Schrauben im Vergleich zu den unverstärkten Durchbrüchen Traglaststeigerungen auf Versagensniveau von etwa 44 % auf, bei unter einem Winkel $\alpha = 45°$ eingebrachten Schrauben Traglaststeigerungen von bis zu 97 %. Verstärkte, runde Durchbrüche mit unter einem Winkel $\alpha = 90°$ eingebrachten Schrauben erreichten dagegen nur Traglaststeigerungen von etwa 14 %. Die Autoren begründen dieses Verhalten damit, dass senkrecht zur Faser eingebrachte Vollgewindeschrauben die Steifigkeit der Träger kaum erhöhen können. Geneigte Anordnungen führen hingegen zu geringeren Schubverzerrungen und damit zu geringeren Schubspannungen, so dass in diesem Fall höhere Traglasten erreicht werden.

ARDALANY (2012) untersuchte verschiedene Verstärkungsvarianten an Durchbrüchen in Trägern aus Furnierschichtholz. In Bezug auf Vollgewindeschrauben mit unterschiedlicher Neigung wurden Winkel $\alpha = 90°$ sowie $\alpha = 45°$ zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung an zwei verschiedenen Trägerhöhen (b/h = 45 mm/200 mm bzw. b/h = 45 mm/300 mm) betrachtet. Es handelte sich dabei um runde Durchbrüche mit einer Durchbruchgröße d/h = 0,40 im auflagernahen Bereich. Im Fall der geringeren Tragerhöhe betrug die Laststeigerung auf dem Niveau der mittleren Durchrisslasten bei einem Winkel $\alpha = 90°$ im Vergleich zur unverstärkten Konfiguration 17 %, bei einem Winkel $\alpha = 45°$ hingegen 69 %. Auf Versagensniveau ist jedoch keine Aussage möglich, da bei beiden verstärkten Konfigurationen ein globales Biegeversagen in Feldmittte auftrat. Im Fall der größeren Trägerhöhe war auf dem Niveau der mittleren Durchrisslasten nahezu kein Unterschied zwischen den beiden Neigungen festzustellen ($\alpha = 90°$: Laststeigerung 14 %, $\alpha = 45°$: Laststeigerung 18 %). Das letztendliche Versagen war in beiden verstärkten Konfigurationen wiederum ein globales Biegeversagen in Feldmitte.

DRÖSCHER ET AL. (2016) untersuchten das Potenzial verschiedener Verstärkungsvarianten an Trägern mit großen runden Durchbrüchen im hoch schubbeanspruchten Bereich. Die Verstärkungsvariante in Form von Vollgewindeschrauben unter einem Winkel $\alpha = 90°$ zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung resultierte im Vergleich zu einem unverstärkten Durchbruch auf dem Versagensniveau in einer Steigerung der Tragfähigkeit um 25 %. Geneigte Schraubstangen unter einem Winkel von $\alpha = 45°$ resultierten in einer Steigerung der Tragfähigkeit um 81 %, gekreuzte Schraubstangen unter einem Winkel von $\alpha = 40°$ resultierten in einer Steigerung der Tragfähigkeit um 99 % und gekreuzte, eingeklebte Gewindestangen (STRAHM (2013), basierend auf E. GEHRI) unter einem Winkel von $\alpha = 40°$ resultierten in einer Steigerung der Tragfähigkeit um 143 %.

Die wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchungen ist, dass bei runden Einzeldurchbrüchen eine Verstärkung mit rechtwinklig zur Faser angeordneten Schrauben wenig effektiv ist. Da das Versagen des Trägers durch ein Überschreiten der Querzug- und Schubfestigkeit in der Durchbruchumgebung eintritt, kann durch die Schrauben zwar die geringe Querzugfestigkeit des Holzes kompensiert werden, bezüglich der erhöhten Schubspannungen bleiben sie jedoch wirkungslos. Eine effiziente Verstärkung runder Durchbrüche kann mit geneigt angeordneten Schrauben erzielt werden, die als Querzug- und Schubbewehrung fungieren.

Gruppenanordnungen

Hinsichtlich Gruppenanordnungen in horizontaler Richtung führen geringe Abstände zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Durchbrüche, so dass die Berechnungsverfahren für Einzeldurchbrüche nicht ohne Weiteres auf Gruppen übertragen werden können. In der Literatur sind nur wenige Versuche zu Gruppen von Durchbrüchen mit geringeren als den oben genannten Abständen dokumentiert:

KOLB & FRECH (1977) prüften im Rahmen ihrer experimentellen Untersuchungen zwei Träger mit nebeneinanderliegenden Durchbrüchen. Über die Trägerlänge waren insgesamt jeweils 9 Durchbrüche mit lichten Abständen im Bereich der Durchbruchgröße verteilt. Die Versuchsdurchführung erfolgte als 4-Punkt-Biegeversuch, wobei die äußeren beiden Durchbrüche im querkraftbeanspruchten Bereich lagen. Infolge der extremen Randbedingungen (hohe Anzahl der Durchbrüche, sehr geringe Abstände, variierende Belastungsart der einzelnen Durchbrüche, nur 2 Versuche) lassen sich jedoch kaum systematische Aussagen zur gegenseitigen Beeinflussung treffen.

ARDALANY (2012) berichtet von Versuchen an Furnierschichtholzträgern mit Gruppen von 2 nebeneinanderliegenden Durchbrüchen, dokumentiert im APA REPORT T2009L-30 (2009). Bei Durchbruchgrößen bis zu d/h = 0,33 entsprachen die lichten Abstände durchgehend den 2-fachen Durchbruchgrößen. Die Tragfähigkeit der Prüfkörper mit Gruppenanordnung reduzierte sich demnach im Vergleich zu Prüfkörpern ohne Durchbrüche auf minimal 48 %. In eigenen numerischen Untersuchungen variierte der Autor den lichten Abstand zwischen 2 Durchbrüchen und betrachtete die Änderung der Kräfte in unter $\alpha = 90°$ zur Holzfaserrichtung eingebrachten Verstärkungselementen. Die Untersuchungen wurden an drei verschiedenen Bauteilhöhen h = 200 mm - 400 mm durchgeführt, wobei die relativen Durchbruchgrößen jedoch nur minimal zwischen d/h = 0,267 und d/h = 0,32 variierten. Als Ergebnis dieser Berechnungen wird ein Abstand von 1,5h angegeben, ab dem eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden kann.

TAPIA & AICHER (2016) untersuchten den Einfluss reduzierter Abstände von 2 runden Durchbrüchen experimentell sowie mittels numerischer Berechnungen. In den numerischen Berechnungen betrachteten die Autoren am Beispiel b/h = 120 mm/450 mm; d/h = 0,3 die maximalen Querzugspannungen sowie resultierenden Querzugkräfte bei einer Änderung des lichten Abstandes. Mit abnehmendem lichten Abstand nehmen die resultierenden Querzugkräfte in den beiden äußeren Bereichen der Gruppe näherungsweise linear zu, die resultierenden Querzugkräfte in den inneren Bereichen bleiben bis zu einem lichten Abstand $l_z = 0{,}5h$ näherungsweise konstant, nehmen bei einer weiteren Reduktion des lichten Abstands jedoch progressiv ab. Am Beispiel mit einem lichten Abstand $l_z = 0{,}15h$ zeigen sie anhand der resultierenden Querzugkräfte, dass eine vergleichende Betrachtung der Gruppensituation als ein großer umschreibender Durchbruch auf der sicheren Seite liegen würde. In Versuchen an insgesamt 6 Prüfkörpern (b/h = 120 mm/450 mm; d/h = 0,3) wurden 2 Einzeldurchbrüche, Gruppen von 2 Durchbrüchen mit variierenden lichten Abständen ($l_z = h$, $l_z = h/2$, $l_z = 0{,}15h$) sowie einem umschreibenden Durchbruch der Situation mit dem geringsten lichten Abstand geprüft. Auf Versagensniveau ergaben sich im Vergleich zum maßgebenden Einzeldurchbruch in der o.g. Reihenfolge Traglastreduktionen von 0 %, 16 %, 13 % und 25 %.

Hinsichtlich Gruppenanordnungen in vertikaler Richtung liegen bis heute weder normative Regelungen noch Untersuchungen zu dieser Thematik vor. Insbesondere bei hohen Trägern in Kombination mit vergleichsweise kleinen Durchbrüchen ($d/h \leq 0{,}15$) kann dies eine wirtschaftliche und raumsparende Alternative zu einer horizontalen Anordnung darstellen. Infolge bisher nicht

vorhandener Kenntnisse über den Einfluss auf das Tragverhalten sollen Untersuchungen dazu ebenso Gegenstand dieses Vorhabens sein.

1.3 Zielsetzung

Zur Untersuchung der in Abschnitt 1 genannten Thematik waren im Rahmen des Forschungsvorhabens 2 Versuchsreihen in unterschiedlichem Maßstab, sowie begleitende numerische Berechnungen vorgesehen. Die damit verbundenen Ziele lassen sich wie folgt charakterisieren.

- Abgesicherte Kenntnisse über das Tragverhalten von Trägern mit runden Durchbrüchen, insbesondere über die Einflüsse der Parameter Ausmitte, gegenseitige Beeinflussung einer Gruppenanordnung und Verstärkungseffekt mittels innenliegender Verstärkungselemente
- Ausweitung der praxisbezogenen Anwendungsfälle durch Untersuchung von über die bestehenden normativen Grenzen hinausgehenden Konfigurationen
- Abdeckung eines möglichst großen Bereichs des praxisrelevanten Anwendungsgebiets durch Versuche in unterschiedlichem Maßstab
- Generierung einer versuchsbasierten Datenbasis zur Validierung von begleitenden numerischen Untersuchungen sowie zum Ableiten von Bemessungs- und Konstruktionsregeln
- Parameterstudien in Form numerischer Berechnungen zu o.g. Parametern, um Aussagen über den durch die Versuche abgedeckten Bereich hinaus treffen zu können
- Erarbeitung von Bemessungs- und Konstruktionsregeln

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Kleinversuche

Die Bezeichnung “Kleinversuche“ bedeutet in diesem Zusammenhang durchgehend Versuche an Trägern mit Querschnittsabmessungen b/h = 120 mm/400 mm. Diese Querschnittsgröße wurde in Kombination mit der Durchbruchgröße im Vorfeld als untere Grenze abgeschätzt, um auch im verstärkten Zustand ausreichend Laststeigerungspotenzial vor einem globalen Trägerversagen sicherstellen zu können. Hinsichtlich der Durchbruchform wurden aufgrund der höheren Praxisrelevanz infolge der geringeren Störung des Spannungsflusses ausschließlich runde Durchbrüche betrachtet. Als Verstärkung kamen ausschließlich innenliegende Verstärkungselemente in Form von selbstbohrenden Vollgewindeschrauben gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-519 zum Einsatz.

2.1.1 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm der Kleinversuche umfasste folgende 4 Serien mit unterschiedlichen Konfigurationen:

- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35 (ohne sowie mit Verstärkung)
- Horizontale Gruppen (ohne sowie mit Verstärkung)
- Vertikale Gruppe (ohne sowie mit Verstärkung)
- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,25 (ohne Verstärkung)

Aus den vier Serien resultierten insgesamt 20 verschiedene Konfigurationen mit je 3 identischen Prüfkörpern, d.h. in Summe 60 Einzelprüfungen. Eine Übersicht über das Versuchsprogramm ist in Abbildung 4 dargestellt.

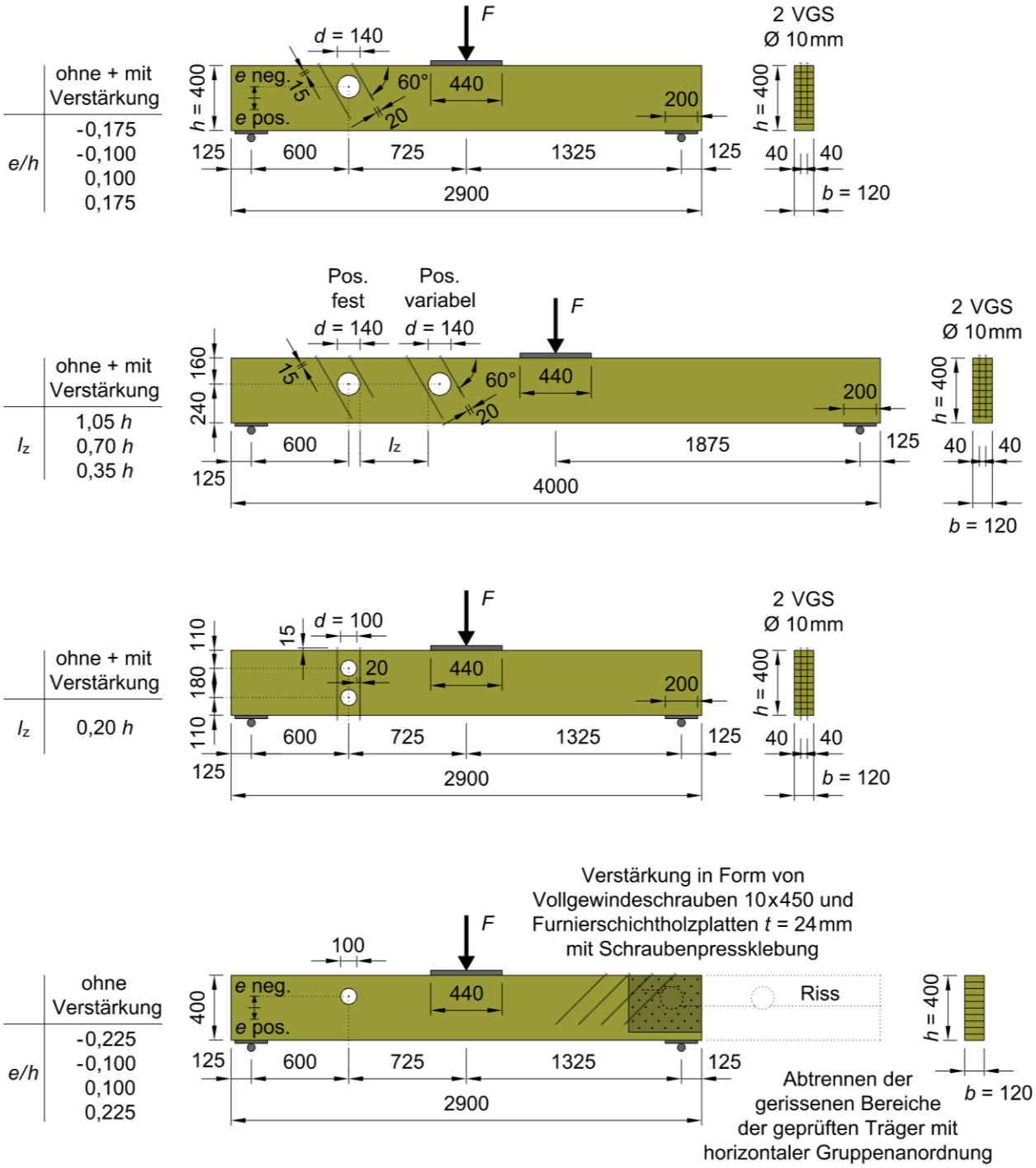


Abbildung 4: Versuchskonfigurationen der Kleinversuche, Maße in mm

Hinsichtlich der Lage in Trägerlängsrichtung wurde sich durchgehend auf den auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich ($M/V = 1{,}5\,h$) konzentriert. Durch einen Mindestabstand von 1,5 h zu den nächstgelegenen Lasteinleitungspunkten sollte ein Einfluss letztgenannter auf die Durchbruchsbereiche ausgeschlossen werden.

Hinsichtlich exzentrischer Anordnungen von Durchbrüchen wurde die Ausmitte e über die Trägerhöhe in vier Stufen variiert ($e/h = \pm 0{,}175$; $\pm 0{,}100$). Die Ausmitte e beschreibt hierbei entsprechend der Definition in Abbildung 4 die Lage des Durchbruchzentrums ausgehend von der Schwerachse des Trägers. Eine positive Ausmitte bedeutet, dass das Durchbruchzentrum unter der Wirkung eines positiven Moments – bezogen auf den Bruttoquerschnitt – im Bereich positiver Biegespannungen liegt, bei einer negativen Ausmitte im Bereich negativer Biegespannungen. Die

4 genannten Stufen liegen alle außerhalb der bisher gemäß DIN EN 1995-1-1/NA:2013 zulässigen Grenzen.

Gruppenanordnungen in horizontaler Richtung wurden in Form von 3 Konfigurationen mit variierendem lichten Abstand (l_z = 1,05 h; 0,70 h; 0,35 h), welche ebenfalls über die bisher normativ zulässigen Grenzen hinausgehen, geprüft. Dabei wurde die Position des auflagernahen Durchbruchs (M/V = 1,5 h) stets beibehalten, während die Position des auflagerfernen Durchbruchs variiert wurde. Um einen Vergleich zwischen den Konfigurationen exzentrischer Einzeldurchbrüche und horizontaler Gruppen zu ermöglichen, wurde für diese Versuche durchgehend ein Durchmesser d/h = 0,35 verwendet.

In vertikaler Richtung wurde aufgrund der eingeschränkten Variationsmöglichkeiten infolge der geometrischen Randbedingungen nur eine Gruppenanordnung mit einem kleineren Durchmesser (d/h = 0,25) geprüft.

Um auch für die vertikale Gruppe einen Vergleich mit exzentrischen Einzeldurchbrüchen ermöglichen zu können, wurde das ursprünglich angesetzte Versuchsprogramm um 4 Konfigurationen exzentrischer Einzeldurchbrüche (d/h = 0,25) erweitert. In Anlehnung an das Vorgehen von KOLB & EPPLE (1985) wurden 10 der 12 Prüfkörper zweimalig getestet, indem von den geprüften Gruppenprüfkörpern die gerissenen Bereiche abgetrennt und die Durchbrüche auf der gegenüberliegenden Seite eingebracht wurden. Für die verbleibenden 2 Prüfkörper konnte ungeprüftes Material verwendet werden.

Die Serien exzentrische Einzeldurchbrüche (d/h = 0,35), horizontale und vertikale Gruppen wurden sowohl ohne als auch mit Verstärkung geprüft. Als Verstärkungselemente wurden durchgehend selbstbohrende Vollgewindeschrauben d = 10 mm verwendet. Über die Querschnittsbreite gesehen wurden jeweils 2 Verstärkungselemente angeordnet. Der senkrechte Randabstand zwischen Schraubenachse und Durchbruchrand betrug durchgehend 2 d (20 mm). Die Neigung zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung wurde mit Ausnahme der Konfiguration vertikale Gruppe (α = 90°) zu α = 60° gewählt. Damit war beabsichtigt, einen Verstärkungseffekt bezüglich beider Beanspruchungen, Querzug und Schub, zu generieren.

2.1.2 Material & Prüfkörpereigenschaften

Hinsichtlich des Materials wurde durchgehend Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 28h verwendet. Der Bezug der Prüfkörper erfolgte von 2 Herstellern, wobei jede Konfiguration Material beider Hersteller enthielt. Die Durchbrüche wurden mit Ausnahme der beidseitig zu prüfenden Träger werkseitig herausgefräst. Im Hinblick auf ein leichteres und exakteres Einbringen der Vollgewindeschrauben wurden werkseitig Pilotbohrungen Ø 6 mm über eine Teillänge der Verstärkungselemente eingebracht. Diese wurden vor Ort am Prüfinstitut vollendet und die Vollgewindeschrauben im Anschluss eingedreht. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung lagen eine mittlere Rohdichte ρ_{mean} = 465 kg/m³ (COV = 3,0 %) sowie eine mittlere Holzfeuchte u_{mean} = 11,8 % (COV = 10,7 %) vor. Abbildung 5 enthält die zugehörigen Verteilungen der genannten Prüfkörpereigenschaften, getrennt für beide Hersteller.

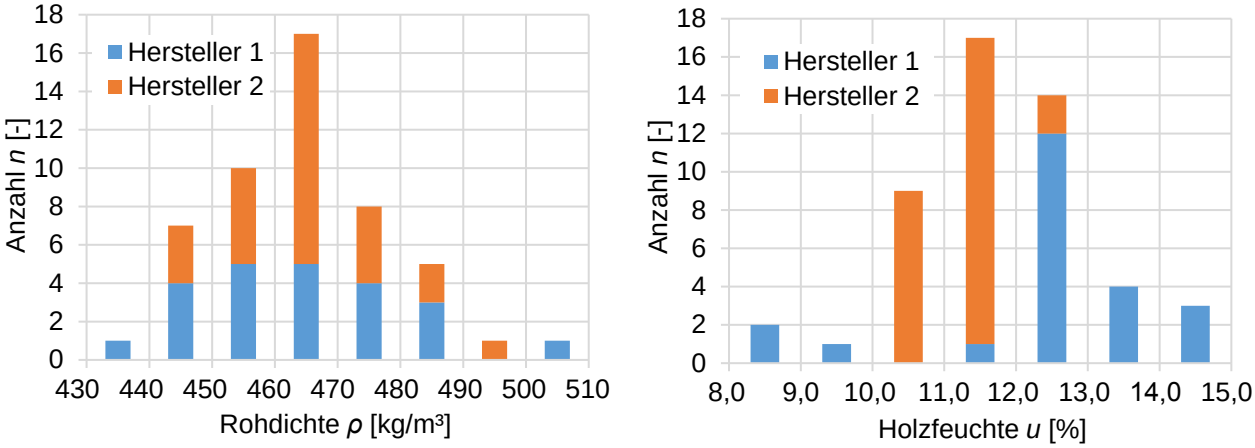


Abbildung 5: Prüfkörpereigenschaften der Kleinversuche

Die Ermittlung der jeweiligen Rohdichten erfolgte über die Bestimmung der Massen sowie der Abmessungen der Prüfkörper. Die Holzfeuchten wurden vor der Versuchsdurchführung über elektronische Widerstandsmessungen mithilfe einer GANN Hydromette M 4050 bestimmt. Dabei wurden an allen Prüfkörpern 3 Lamellen auf Höhe des Durchbruchs ausgewählt, an denen eine Rissbildung zu erwarten war. Ausgehend von beiden Seitenflächen der Prüfkörper erfolgten an jeder dieser Lamellen zwei Messungen in 30-40 mm Tiefe. Die in Abbildung 5 dargestellten Werte stellen jeweils Mittelwerte aus den sich durch dadurch ergebenden 6 Einzelmessungen dar.

Eine versuchstechnische Ermittlung der Schubfestigkeiten an Referenzprüfkörpern ohne Durchbruch erfolgte nicht. Eine Abschätzung auf Basis der schubbeanspruchten Flächen in Anlehnung an BRANDNER ET AL. (2012) ergibt für die beiden Prüfkörpergrößen unter der Annahme eines Lastausbreitungswinkels von 30° ausgehend von den Lasteinleitungsplatten folgende Werte:

Trägerlänge 2900 mm: $f_{v,mean} = 40{,}2 \cdot A_{shear}^{-0{,}2} = 40{,}2 \cdot (120\,mm \cdot 774\,mm)^{-0{,}2} = 4{,}08\,N/mm^2$

Trägerlänge 4000 mm: $f_{v,mean} = 40{,}2 \cdot A_{shear}^{-0{,}2} = 40{,}2 \cdot (120\,mm \cdot 1324\,mm)^{-0{,}2} = 3{,}66\,N/mm^2$

2.1.3 Versuchsaufbau & Durchführung

Der Versuchsaufbau entsprach gemäß Abbildung 4 durchgehend einem 3-Punkt Biegeversuch. Zur Lasteinleitung quer zur Faser wurden an den beiden Auflagerpunkten sowie im Bereich des Prüfzylinders Lastverteilungsplatten aus Stahl angeordnet.

Die Lastaufbringung erfolgte weggesteuert mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit des Prüfzylinders. Im unverstärkten Fall wurde bei den kurzen Trägern eine konstante Vorschubgeschwindigkeit v = 1,8 mm/min und bei den langen Trägern v = 3,0 mm/min bis zum globalen Versagen gewählt. Die verstärkten Träger wurden in Anlehnung an das Belastungsverfahren nach DIN EN 26891:1991 mit gewählten Laststufen F = 60 kN und F = 15 kN geprüft (Lastaufbringung bis 0,4 F_{est}, 30 s konstant halten, Lastreduktion auf 0,1 F_{est}, 30 s konstant halten, Laststeigerung bis zum Bruch). Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei den kurzen Trägern v = 2,4 mm/min und bei den langen Trägern v = 4,0 mm/min.

2.1.4 Untersuchungsmethodik

Zur Auswertung und Ableitung der Ergebnisse wurden verschiedene Untersuchungstechniken parallel angewandt:

- Setzungsmessungen

Standardmäßig wurden in allen Versuchen die Durchbiegungen der Prüfkörper in Feldmitte mittels eines Seilzuggebers aufgenommen (vgl. Abbildung 6). Die Messung erfolgte an der Unterseite der Prüfkörper. Eine Aufnahme/Gegenrechnung von Verformungen quer zur Faser im Auflagerbereich erfolgte nicht.

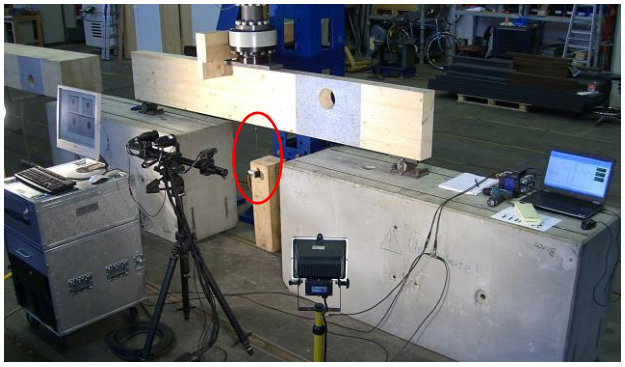


Abbildung 6: Setzungsmessung

Eine Zusammenstellung der Last-Verformungsdiagramme aller Einzelprüfungen findet sich in Anhang A.

- Optisches Messsystem

Neben Setzungsmessungen wurden zudem flächige Dehnungsverteilungen an den Seitenflächen der Prüfkörper im Durchbruchsbereich mittels des optischen Messsystems ARAMIS aufgenommen. Zur Sicherstellung zuverlässiger Messergebnisse wurde die Oberflächenstruktur im Messbereich durch das Aufbringen eines kontrastreichen, stochastischen Sprühmusters verbessert. Ein weiterer Vorteil dieser Messmethode bestand in der kontinuierlichen Aufnahme des Versuchsablaufs, was im Nachgang eine Kontrolle maßgebender Lastniveaus an den definierten Schädigungsstufen erlaubte. Abbildung 7 zeigt neben der Messeinrichtung und dem aufzunehmenden Bereich eine exemplarische Auswertung der Dehnungsverteilung quer zur Faser.

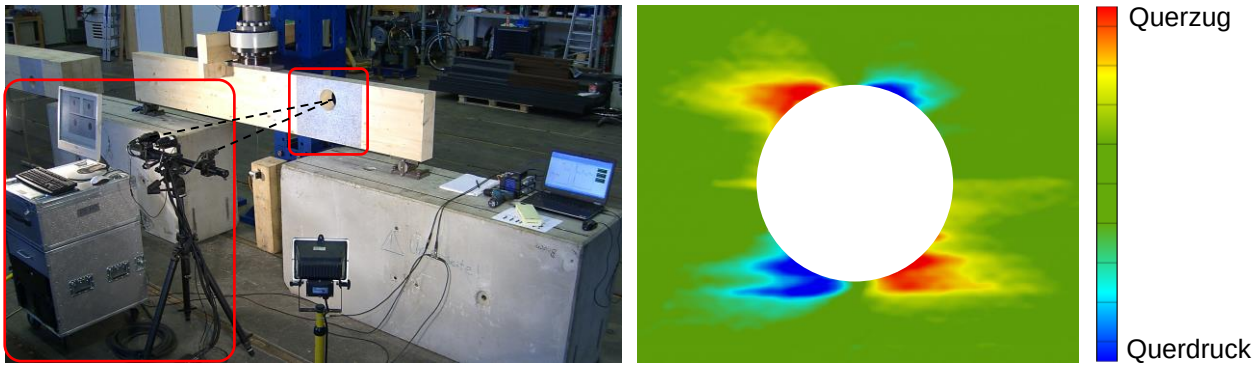


Abbildung 7: Optisches Messsystem ARAMIS (links: Messsystem; rechts: Dehnungsverteilung ε_{90})

- Dehnungsmessung am Prüfkörper

Ergänzend zum optischen Messsystem wurden an einigen Prüfkörpern an der Prüfkörperrückseite sowie am Durchbruchrand Dehnmessstreifen (Trägergröße 18,5 mm x 5,3 mm; Messgittergröße 10 mm x 3,1 mm) angeordnet (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 8: DMS-Applikation am Prüfkörper

4 DMS dienten der Erfassung der Querdehnungsverteilung über die Prüfkörperbreite und 4 weitere DMS der Erfassung der Querdehnungsverteilung in Trägerlängsrichtung (Abklingverhalten). Die Anordnung orientierte sich dabei an der Stelle, an der gemäß den numerischen Untersuchungen die maximale Querzugbeanspruchung und demzufolge eine beginnende Rissbildung zu erwarten war. Ein zusätzlicher DMS in Faserrichtung wurde zur Erfassung von möglichen Spannungskonzentrationen infolge der Umlagerung von Biegespannungen angeordnet.

- Dehnungsmessung in Verstärkungselementen

Darüber hinaus wurden anhand ausgewählter Verstärkungselemente Dehnungsmessungen mittels innenliegender Dehnmessstreifen – vom Ansatz ähnlich den Untersuchungen von WOLFTHALER (2015) – durchgeführt. Die prinzipielle Applikation der Dehnmessstreifen in den Vollgewindeschrauben zeigt Abbildung 9.

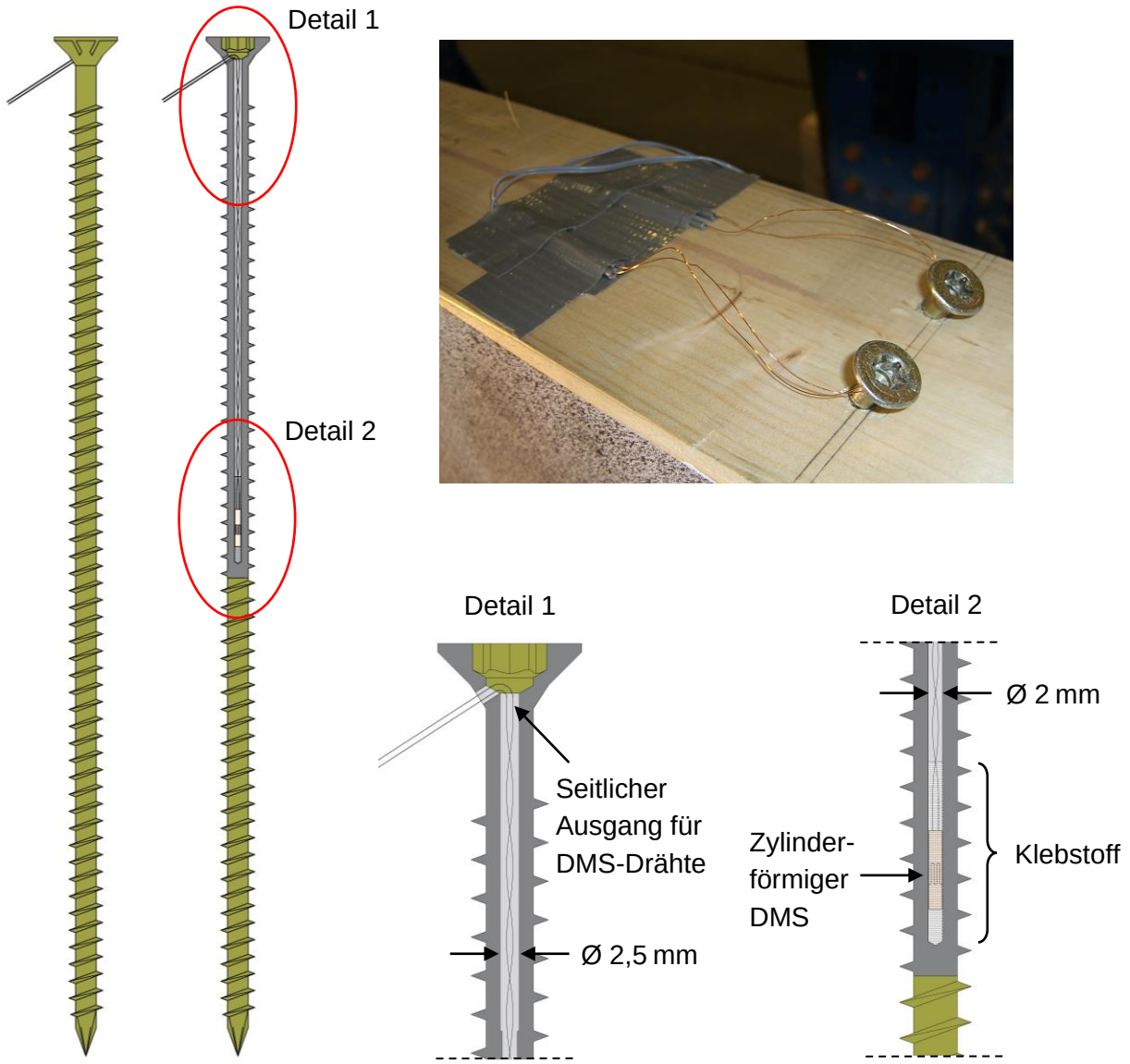


Abbildung 9: DMS-Applikation in den Vollgewindeschrauben

Ausgehend vom Schraubenkopf wurde in Längsrichtung der Schraube eine zentrische Bohrung Ø 2 mm hergestellt. Die Bohrlochtiefen variierten in Abhängigkeit der Einbausituation und betrugen im Maximalfall 155 mm. Bei größeren Bohrlochtiefen war herstellungsbedingt im Anfangsbereich eine Aufweitung auf Ø 2,5 mm erforderlich. Die Bohrlochtiefe wurde dabei etwas größer als die jeweilige Endlage des DMS ausgeführt. Durch ausreichenden Abstand des DMS zum Ende der Bohrung konnte sichergestellt werden, dass der Messbereich außerhalb der inhomogenen Dehnungsverteilung infolge der sprunghaften Querschnittsänderung lag. Nach dem Einbringen eines geeigneten Epoxid-Zweikomponentenklebstoffs in die zuvor gereinigte Bohrung wurde ein zylinderförmiger Dehnmessstreifen (Ø 1,9 mm, Trägerlänge 11 mm, Messgitterlänge 3 mm) im noch flüssigen Klebstoff positioniert. Die DMS-Drähte wurden durch eine seitliche Bohrung unterhalb des Schraubenkopfs nach außen geführt, um die Messschrauben vor dem eigentlichen Einbringen in die Prüfkörper herstellen zu können. Der Erhärtungsprozess des Klebstoffs erfolgte bei Raumtemperatur.

2.1.5 Auswertung & Ergebnisse

- Schädigungsverlauf

In den meisten Versuchen war ein 3-stufiger Schädigungsverlauf entsprechend Abbildung 10 zu beobachten.

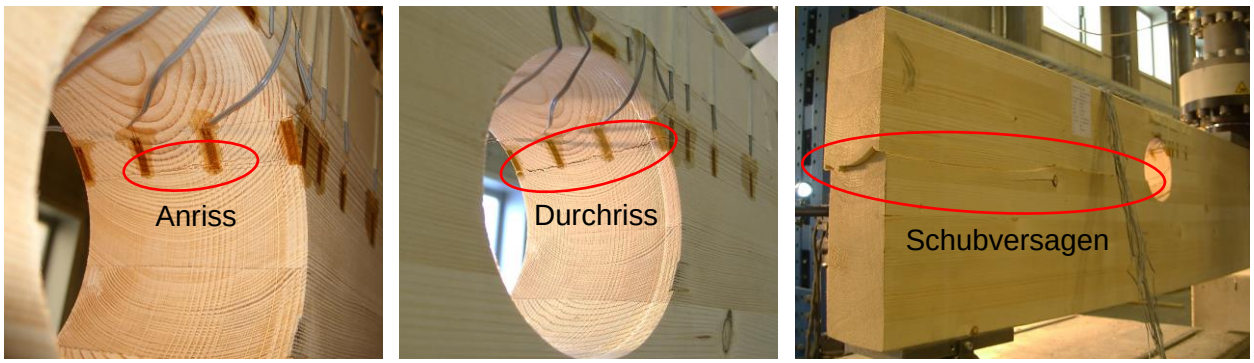


Abbildung 10: Stufenweiser Schädigungsverlauf

Das erste Anzeichen einer beginnenden Schädigung äußerte sich in Form eines lokalen Aufreißens im mittleren Bereich der Querschnittsbreite im querzugbeanspruchten Bereich (Anriss). Eine weitere Laststeigerung führte anschließend zu einem Risswachstum in Richtung der beiden Seitenflächen der Prüfkörper, bis ein über die gesamte Querschnittsbreite durchgehender Riss vorlag (Durchriss). Die letzte Stufe lässt sich als fortschreitendes Querzug-/Schubversagen in Trägerlängsrichtung bis zum Trägerende beschreiben (Höchstlast).

Aufgrund dieser Charakteristik wurden sämtliche Versuchsergebnisse entsprechend diesen drei Stufen differenziert. Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse aller Einzelprüfungen.

Tabelle 1: Versuchsergebnisse aller Einzelprüfungen (Anr. = Anriss, Dur. = Durchriss, Hö. = Höchstlast)

	Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35																							
	ohne Verstärkung												mit Verstärkung											
	e/h = -0,175			e/h = -0,100			e/h = 0,100			e/h = 0,175			e/h = -0,175			e/h = -0,100			e/h = 0,100			e/h = 0,175		
	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.
Nr. 1	38,0	58,9	58,9	40,2	56,9	56,9	48,4	51,1	-	56,1	56,1	56,1	78,5	102,2	115,0	51,2	104,3	109,7	83,0	91,6	91,6	65,0	77,0	78,0
Nr. 2	62,3	72,6	72,6	42,5	50,8	50,8	53,2	60,9	60,9	33,8	44,9	63,6	85,3	-	-	56,9	103,8	103,8	73,2	89,8	89,8	67,9	79,7	83,4
Nr. 3	53,4	57,2	57,2	55,7	55,7	55,7	48,0	53,3	58,8	45,4	49,9	49,9	66,0	104,1	112,4	69,3	91,7	110,1	49,1	79,5	85,6	67,9	81,8	85,6
V_{mean} [kN]	51,2	62,9	62,9	46,1	54,4	54,4	49,9	55,1	59,8	45,1	50,3	56,5	76,6	103,1	113,7	59,1	99,9	107,8	68,5	87,0	89,0	66,9	79,5	82,3
COV [%]	24,0	13,4	13,4	18,1	5,9	5,9	5,8	9,3	2,4	24,6	11,1	12,1	12,8	1,3	1,6	15,6	7,1	3,2	25,5	7,5	3,5	2,5	3,0	4,7

	Horizontale Gruppen																	
	ohne Verstärkung									mit Verstärkung								
	l_z = 0,35h			l_z = 0,70h			l_z = 1,05h			l_z = 0,35h			l_z = 0,70h			l_z = 1,05h		
	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.
Nr. 1	31,1	37,3	39,2	36,2	42,6	45,7	48,0	49,7	49,7	34,3	-	66,9	40,5	-	65,3	42,5	76,5	89,2
Nr. 2	42.5	42,9	44,0	36,2	41,4	42,2	49,2	56,9	60,0	40,1	52,8	83,3	45,8	-	84,1	56,2	-	75,4
Nr. 3	21,8	39,8	39,8	35,0	42,3	42,3	26,5	55,1	55,8	53,6	-	71,8	35,6	-	65,3	53,6	-	74,4
V_{mean} [kN]	31,8	40,0	41,0	35,8	42,1	43,4	41,2	53,9	55,2	42,6	-	74,0	40,6	-	71,6	50,7	-	79,7
COV [%]	32,6	7,0	6,4	2,0	1,6	4,6	31,0	6,9	9,4	23,2	-	11,3	12,6	-	15,1	14,3	-	10,3

Globales Biege-/Schubversagen außerhalb Durchbruchsbereich

	Vertikale Gruppe					
	ohne Verstärkung			mit Verstärkung		
	l_z = 0,20h			l_z = 0,20h		
	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.
Nr. 1	71,0	71,0	71,0	60,6	76,3	76,3
Nr. 2	60,8	66,5	66,5	60,9	69,2	84,3
Nr. 3	43,7	52,4	65,9	62,5	62,5	84,2
V_{mean} [kN]	58,5	63,3	67,8	61,3	69,3	81,6
COV [%]	23,6	15,3	4,1	1,7	9,9	5,6

	Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,25											
	ohne Verstärkung											
	e/h = -0,225			e/h = -0,100			e/h = 0,100			e/h = 0,225		
	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.
Nr. 1	59,6	71,0	79,3	36,0	51,6	55,7	43,5	48,7	55,7	52,6	59,9	73,4
Nr. 2	52,7	57,9	76,0	36,7	55,2	58,5	50,2	60,4	67,0	70,0	70,0	71,8
Nr. 3	45,0	66,0	72,5	36,7	60,6	65,1	42,3	52,8	64,1	49,8	69,2	71,4
V_{mean} [kN]	52,4	65,0	75,9	36,5	55,8	59,8	45,3	54,0	62,3	57,5	66,4	72,2
COV [%]	13,9	10,1	4,5	1,1	8,1	8,0	9,4	11,0	9,4	19,1	8,4	1,5

mit Verstärkung: Neue Prüfkörper mit erstmaliger Prüfung

Bei der folgenden Darstellung der Versuchsergebnisse wird auf die Schädigungscharakteristik nur dann nochmal explizit eingegangen, falls ein von dieser Charakteristik abweichender Schädigungsverlauf vorlag. Die Darstellung erfolgt getrennt für die 4 Serien. Um die Traglasten besser einordnen zu können, wird die erreichte Höchstlast im verstärkten Zustand jeweils als Schubspannung bezogen auf den Bruttoquerschnitt, d.h. ohne Berücksichtigung einer Querschnittsschwächung durch einen Durchbruch, angegeben.

- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35 (ohne und mit Verstärkung)

Im unverstärkten Zustand war auf allen drei Schädigungsstufen nur ein geringfügiger Einfluss der Ausmitte festzustellen, siehe Abbildung 11. Aus der Differenz zwischen den erreichten Anriss- und Höchstlastlasten ergibt sich ein Lastzuwachs von etwa 20 %, was einem vergleichsweise spröden Versagensverhalten gleichkommt. Die Ergebnisse auf Anrissniveau weisen dabei im Vergleich zu den beiden folgenden Schädigungsstufen größere Streuungen auf, was im Einklang mit den Ergebnissen von AICHER & HÖFFLIN (2006) ist.

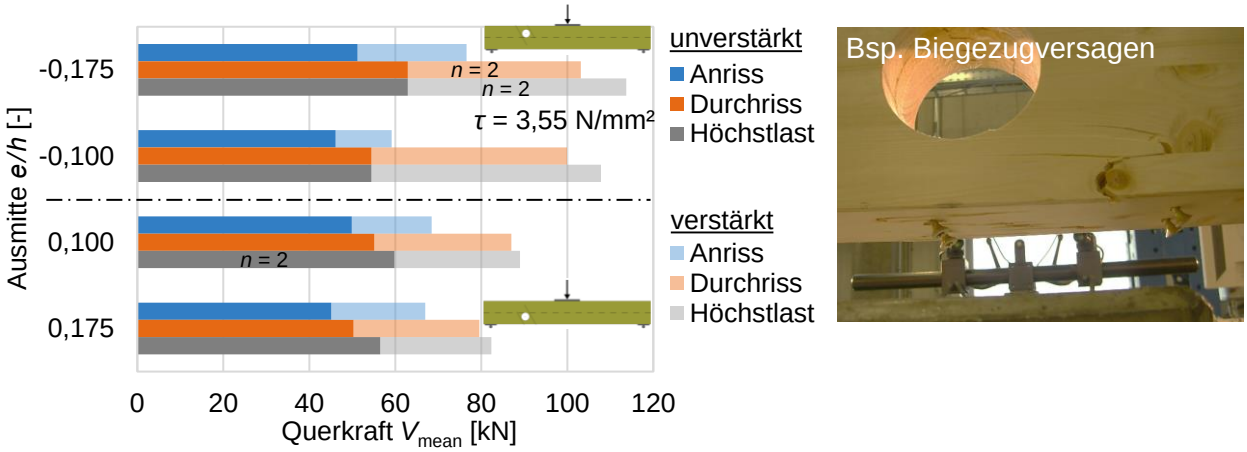


Abbildung 11: Versuchsergebnisse exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35 (Mittelwerte)

Im Vergleich zum unverstärkten Zustand bewegen sich die Lastzuwächse im verstärkten Zustand auf Anrissniveau in einem Bereich von etwa 40 %, auf Durchriss- und Höchstlastniveau in Abhängigkeit der Ausmitte bis zu 98 %. Deutlich zu erkennen sind dabei die abnehmenden Lastwerte bei einer Verlagerung der Durchbruchposition vom Biegedruck- in Richtung des Biegezugbereichs. Im Fall der Konfiguration e/h = 0,175 (mit Verstärkung) trat ein zusätzlicher Versagensmodus in Form eines Biegezugversagens im unteren Restquerschnitt im Bereich der Verstärkungselemente auf.

- Horizontale Gruppen (ohne und mit Verstärkung)

Im unverstärkten Zustand resultierte ein abnehmender lichter Abstand auf allen drei Schädigungsstufen in abnehmenden Traglasten, d.h. einer zunehmenden gegenseitigen Beeinflussung der Durchbrüche, siehe Abbildung 12. Ein Vergleich der Gruppenkonfiguration mit dem größten lichten Abstand l_z = 1,05h und der Konfiguration des vergleichbaren Einzeldurchbruchs lässt bei diesem lichten Abstand auf einen geringen gegenseitigen Einfluss schließen. Jedoch ist dieser Vergleich nur für den Durchbruch an der Position M/V = 1,5h möglich, da für den weiter vom Auflager entfernten Durchbruch der Gruppe kein entsprechender Einzeldurchbruch geprüft wurde.

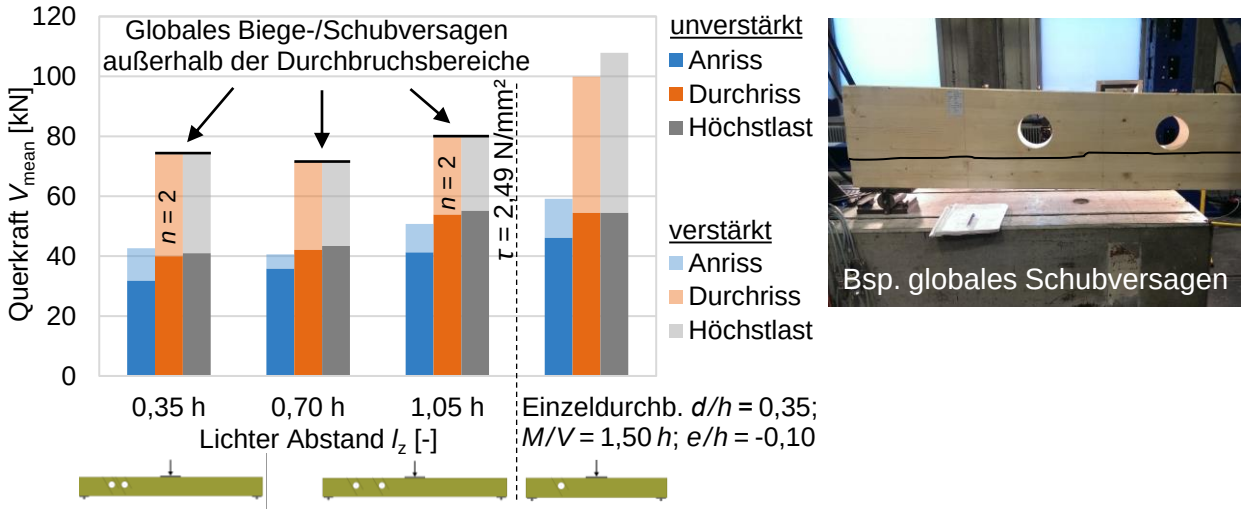


Abbildung 12: Versuchsergebnisse horizontale Gruppen (Mittelwerte)

Durch die Anordnung von Verstärkungen wurden auf Anrissniveau ähnliche prozentuale Laststeigerungen erreicht wie im Fall der exzentrischen Einzeldurchbrüche. Die Lastzuwächse an den Schädigungsstufen Durchriss und Höchstlast waren in den überwiegenden Fällen aufgrund eines vorzeitigen Schub-/Biegeversagens außerhalb der Durchbruchsbereiche beschränkt. Die Laststeigerungen betrugen im Fall des geringsten lichten Abstandes auf Höchstlastniveau rund 80 %.

- Ergebnisse vertikale Gruppe (ohne und mit Verstärkung)

Das Versagen der vertikalen Gruppe im unverstärkten Zustand trat im Vergleich zu entsprechenden exzentrischen Durchbrüchen bei geringfügig niedrigeren Lasten auf, siehe Abbildung 13. Daraus ist unter den gewählten Randbedingungen nur ein geringfügiger gegenseitiger Einfluss der beiden Durchbrüche abzuleiten.

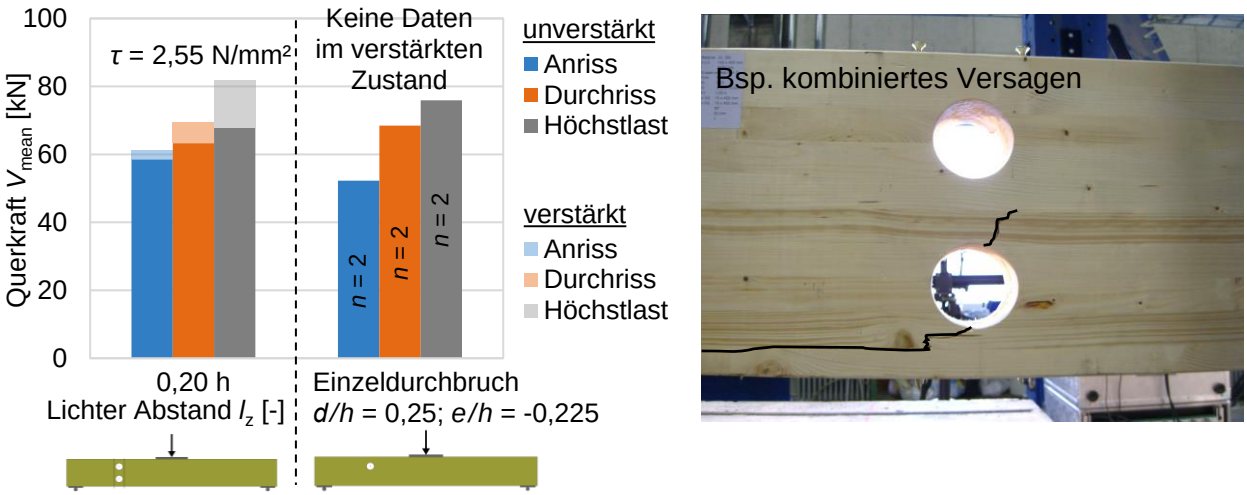


Abbildung 13: Versuchsergebnisse vertikale Gruppe (Mittelwerte)

Im verstärkten Zustand waren verschiedene Versagensmodi zu beobachten: Schubversagen im Bereich der Durchbrüche, Biegezugversagen im unteren Restquerschnitt im Bereich der Vollgewindeschrauben, kombiniertes Querzug-Biegezug-Schubversagen. Der Verstärkungseffekt fällt im Vergleich zu den exzentrischen Einzeldurchbrüchen mit geneigter Anordnung der Vollgewindeschrauben gering aus (etwa 20 %).

- Ergebnisse Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,25 (ohne Verstärkung)

Im Fall der exzentrischen Durchbrüche d/h = 0,25 war ein ausgeprägterer Einfluss der Ausmitte mit höheren Lastwerten bei größeren Ausmitten zu beobachten, siehe Abbildung 14.

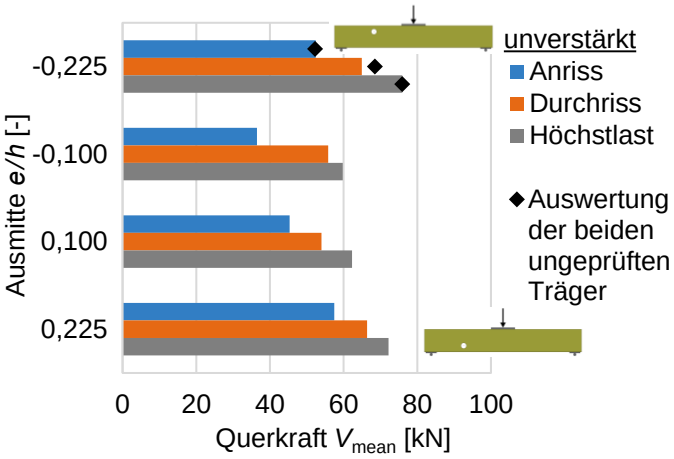


Abbildung 14: Versuchsergebnisse exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,25 (Mittelwerte)

Aufgrund der teils ungewöhnlich niedrigen Lastwerte werden für weitere Betrachtungen nur die Versuchsergebnisse der beiden neuen Prüfkörper herangezogen (siehe dazu Abschnitt 3.2.2). Möglicherweise verursachte der erste Prüfzyklus der anderen 10 Prüfkörper eine Art Vorschädigung, welche im zweiten Prüfzyklus dann zu geringeren Lastwerten führte.

2.2 Großversuche

Die Bezeichnung “Großversuche“ bedeutet in diesem Zusammenhang durchgehend Versuche an Trägern mit Querschnittsabmessungen b/h = 200 mm/1000 mm. Diese obere Grenze wurde zum einen vor dem Hintergrund einer anlagentechnischen Beschränkung der Prüfzylinderkräfte von F = 1000 kN gewählt und zum anderen, um einen übermäßigen Materialverbrauch zu vermeiden. Wie bei den Kleinversuchen beschränkten sich die Untersuchungen auf runde Durchbrüche. Als Verstärkung kamen ausschließlich innenliegende Verstärkungselemente in Form von eingedrehten Gewindestangen gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-9.1-832 zum Einsatz.

2.2.1 Versuchsprogramm

Für das in Abbildung 15 dargestellte Versuchsprogramm der Großversuche wurde sich hinsichtlich der relativen Positionen und der relativen Größen der Durchbrüche an den Kleinversuchen orientiert. Dabei waren ausschließlich verstärkte Konfigurationen mit über die Querschnittsbreite gesehen je 2 Gewindestangen d = 16 mm vorgesehen. Der senkrechte Randabstand zwischen Gewindestangenachse und Durchbruchrand wurde durchgehend zu 35 mm (~2d) gewählt.

Aus der Serie der exzentrischen Einzeldurchbrüche wurden eine Konfiguration im Biegedruckbereich (e/h = -0,175) sowie eine Konfiguration im Biegezugbereich (e/h = 0,175) gewählt. Die Wahl fiel auf die beiden maximalen Ausmitten, um einen möglichst ausgeprägten Unterschied im Tragverhalten zu erhalten. Die Neigung der Gewindestangen der Konfiguration e/h = 0,175 wurde auf Grundlage der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen von α = 60° auf α = 45° angepasst.

Aus der Serie der horizontalen Gruppen wurde die Konfiguration mit dem geringsten lichten Abstand $l_z = 0{,}35h$ gewählt, da für diese Konfiguration der größte gegenseitige Einfluss der Durchbrüche zu erwarten war.

Da die Serie vertikale Gruppe nur aus einer Konfiguration bestand, wurde diese für die Großversuche übernommen. Um jedoch einen im Gegensatz zu den Kleinversuchen erhöhten Verstärkungseffekt generieren zu können, wurde die Neigung der Gewindestangen ebenfalls von $\alpha = 90°$ auf $\alpha = 45°$ angepasst.

Zusätzlich zu diesen ursprünglich vorgesehenen Konfigurationen wurde das Versuchsprogramm um zwei unverstärkte Konfigurationen exzentrischer Einzeldurchbrüche $d/h = 0{,}40$ unter reiner Momentenbeanspruchung erweitert. Als damit verbundene Zeile lassen sich nennen:

- Ausdehnung der Untersuchungen auf Trägerbereiche unter reiner Momentenbeanspruchung
- Untersuchungen hinsichtlich der Konzentration von Spannungen in Faserrichtung, siehe hierzu Abschnitt 3.3.2
- Untersuchungen hinsichtlich der kombinierten Wirkung verschiedener Spannungskomponenten, siehe hierzu Abschnitt 3.3.5

Aus diesen 6 verschiedenen Konfigurationen mit je 4 identischen Prüfkörpern ergab sich in Summe ein Versuchsumfang von 24 Einzelprüfungen.

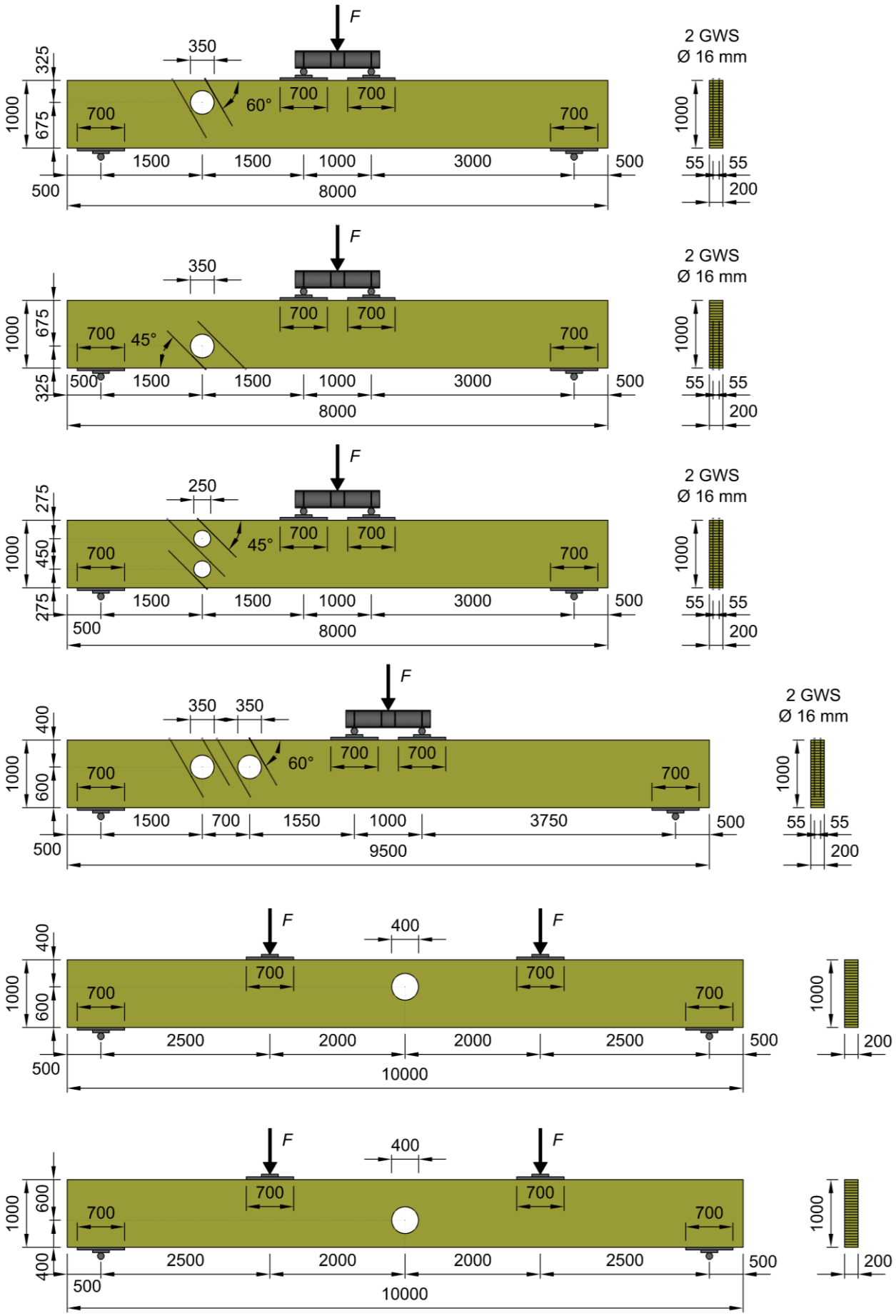


Abbildung 15: Versuchskonfigurationen der Großversuche, Maße in mm

2.2.2 Material & Prüfkörpereigenschaften

Für die halbe Anzahl der Prüfkörper wurde Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 24h verwendet, für die andere Hälfte Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 28h. Der Bezug erfolgte wiederum von 2 Herstellern, wobei in jeder Konfiguration Material beider Hersteller und beider Festigkeitsklassen vertreten war. Die Durchbrüche sowie Pilotbohrungen Ø 12 mm über eine Teillänge der Verstärkungselemente wurden werkseitig eingebracht. Im Prüfinstitut wurden die Pilotbohrungen vollendet und die Gewindestangen eingedreht. Die Prüfkörper der Festigkeitsklasse GL 24h wiesen eine mittlere Rohdichte ρ_{mean} = 444 kg/m³ (*COV* = 1,6 %) sowie eine mittlere Holzfeuchte u_{mean} = 11,3 % (*COV* = 14,8 %), die der Festigkeitsklasse GL 28h eine mittlere Rohdichte ρ_{mean} = 474 kg/m³ (*COV* = 1,5 %) sowie eine mittlere Holzfeuchte u_{mean} = 12,4 % (*COV* = 13,3 %) auf. In Abbildung 16 sind die Verteilungen der Prüfkörpereigenschaften, getrennt nach Herstellern und Festigkeitsklassen, dargestellt.

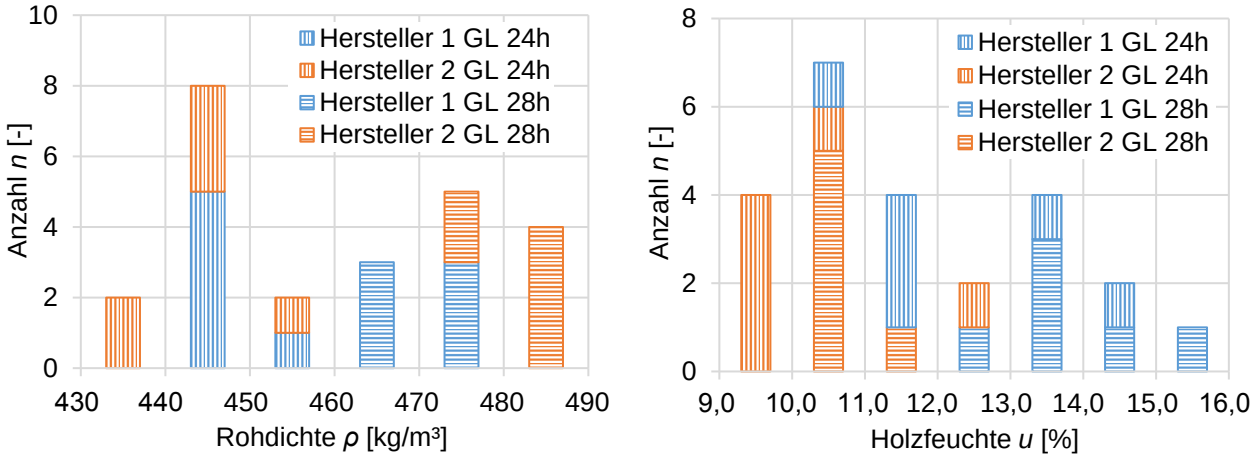


Abbildung 16: Prüfkörpereigenschaften der Großversuche

Die Ermittlung der Prüfkörpereigenschaften erfolgte analog zu der Vorgehensweise bei den Kleinversuchen.

Eine versuchstechnische Ermittlung der Schubfestigkeiten an Referenzprüfkörpern ohne Durchbruch erfolgte nicht. Eine Abschätzung auf Basis der schubbeanspruchten Flächen in Anlehnung an BRANDNER ET AL. (2012) ergibt für die beiden verstärkten Prüfkörpergrößen unter der Annahme eines Lastausbreitungswinkels von 30° ausgehend von den Lasteinleitungsplatten folgende Werte:

Trägerlänge 8000 mm: $f_{v,mean} = 40{,}2 \cdot A_{shear}^{-0{,}2} = 40{,}2 \cdot (200\,mm \cdot 1723\,mm)^{-0{,}2} = 3{,}14\,N/mm^2$

Trägerlänge 9500 mm: $f_{v,mean} = 40{,}2 \cdot A_{shear}^{-0{,}2} = 40{,}2 \cdot (200\,mm \cdot 2473\,mm)^{-0{,}2} = 2{,}92\,N/mm^2$

2.2.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau der unverstärkten Konfigurationen unter ausschließlicher Momentenbeanspruchung entsprach gemäß Abbildung 15 einem 4-Punkt Biegeversuch, der Aufbau der verstärkten Konfigurationen unter vorwiegender Schubbeanspruchung einem 3-Punkt Biegeversuch. Aufgrund der hohen aufzubringenden Lasten im Fall des 3-Punkt Biegeversuchs wurde die Lasteinleitung im Bereich des Prüfzylinders im Vergleich zu den Kleinversuchen über einen Verteilungsträger auf zwei Lasteinleitungspunkte aufgelöst.

Die Prüfung der verstärkten Konfigurationen erfolgte wiederum in Anlehnung an DIN EN 26891:1991. Für die kurzen Träger wurden die Laststufen F = 240 kN und F = 60 kN sowie eine konstante Vorschubgeschwindigkeit v = 5,0 mm/min gewählt, für die langen Träger F = 180 kN und F = 45 kN sowie eine konstante Vorschubgeschwindigkeit v = 6,5 mm/min. Die Durchführung der 4-Punkt Biegeversuche erfolgte in Form einer Kombination aus kraftgesteuerter und weggesteuerter Belastung, um den Einfluss unterschiedlicher Steifigkeitsverteilungen innerhalb des Trägers zu minimieren. Bis zu dem Lastniveau F = 225 kN erfolgte die Lastaufbringung kraftgesteuert (v = 65 kN/min), ab diesem Niveau bis zum globalen Versagen weggesteuert (v = 6,5 mm/min).

2.2.4 Untersuchungsmethodik

Aufgrund der im Vergleich zu den Kleinversuchen weitgehend gleichen Untersuchungstechniken werden nur darüber hinaus gehende bzw. davon abweichende Methoden dargestellt.

- Setzungsmessung

Messungen analog zu Kleinversuchen

Eine Zusammenstellung von Last-Verformungsdiagrammen aller Einzelprüfungen findet sich in Anhang B.

- Optisches Messsystem

Messungen analog zu Kleinversuchen

- Dehnungsmessung am Prüfkörper

Messungen der Querdehnungsverteilungen analog zu Kleinversuchen

Zusätzlich wurden Dehnungsmessungen auf der Prüfkörperoberfläche zur Untersuchung der Konzentration von Spannungen in Faserrichtung durchgeführt. Abbildung 17 zeigt die prinzipielle DMS-Applikation am Beispiel der Versuchskonfiguration d/h = 0,40, e/h = 0,100. Im Fall der negativen Ausmitte erfolgte die Anordnung in analoger Weise am oberen Restquerschnitt.

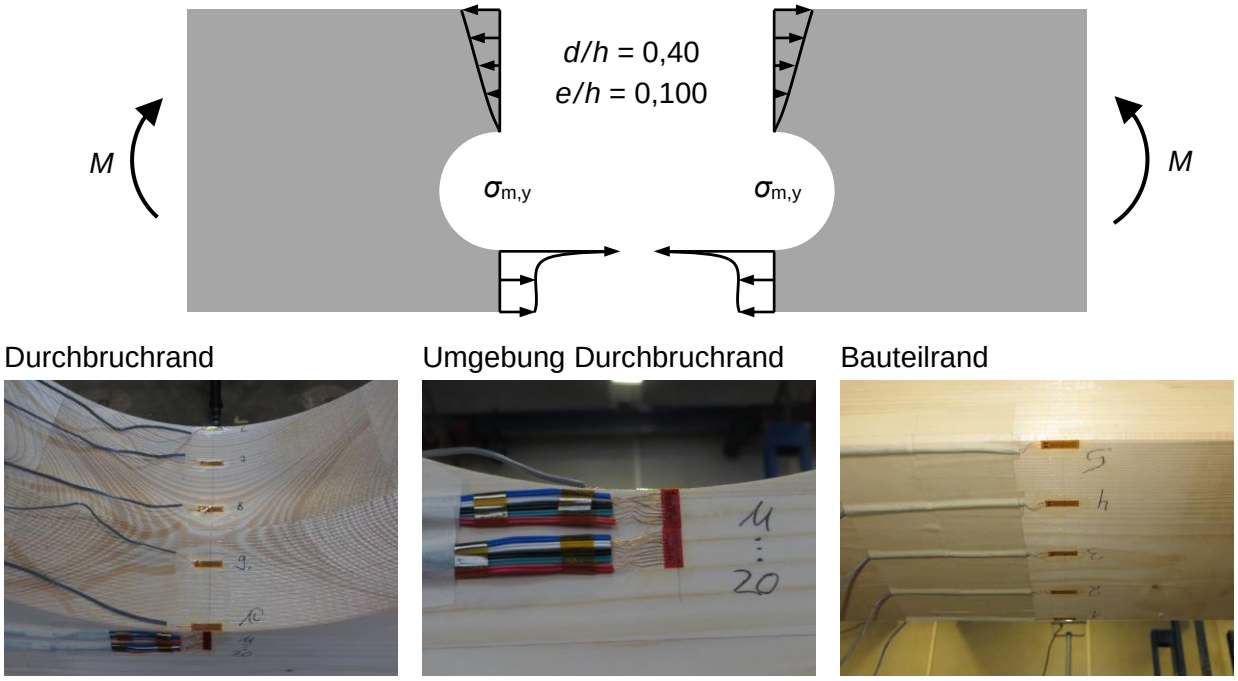


Abbildung 17: DMS-Applikation zur Untersuchung der Spannungskonzentration in Faserrichtung

Zur Erfassung der maximalen Biegespannung wurden am Durchbruchrand 5 Dehnmessstreifen (Trägergröße 18,5 mm x 5,3 mm; Messgittergröße 10 mm x 3,1 mm) über die Bauteilbreite angeordnet. Um eine Relation zu den Werten am Bauteilrand zu erhalten, wurden am Bauteilrand ebenfalls 5 DMS dieser Art über die Bauteilbreite angeordnet. Zudem wurden zur Erfassung des Abklingverhaltens ausgehend vom Durchbruchrand 2 DMS-Ketten mit jeweils 5 Messgittern im 2 mm Intervall (Trägergröße 12,0 mm x 5,0 mm; Messgittergröße 1,4 mm x 1,0 mm) platziert.

- Dehnungsmessung in Verstärkungselementen

Die Dehnungsmessung in den Gewindestangen erfolgte analog zum Vorgehen bei den Vollgewindeschrauben, siehe 2.1.4. Infolge der größeren Bohrtiefen (bis zu 380 mm) wurden die Bohrungen stufenweise mit 3 verschiedenen Durchmessern ausgeführt. Vom Kopf beginnend bis zu einer Bohrtiefe von 80 mm betrug der Durchmesser 5,0 mm, im Mittelstück bis zu einer Bohrtiefe von 260 mm 4,2 mm und im Endbereich, in dem der DMS platziert wurde, wiederum 2,0 mm, siehe Abbildung 18. Die Kalibrierung der Gewindestangen erfolgte in Form von Zugversuchen bis zu einem Lastniveau von 30 kN.

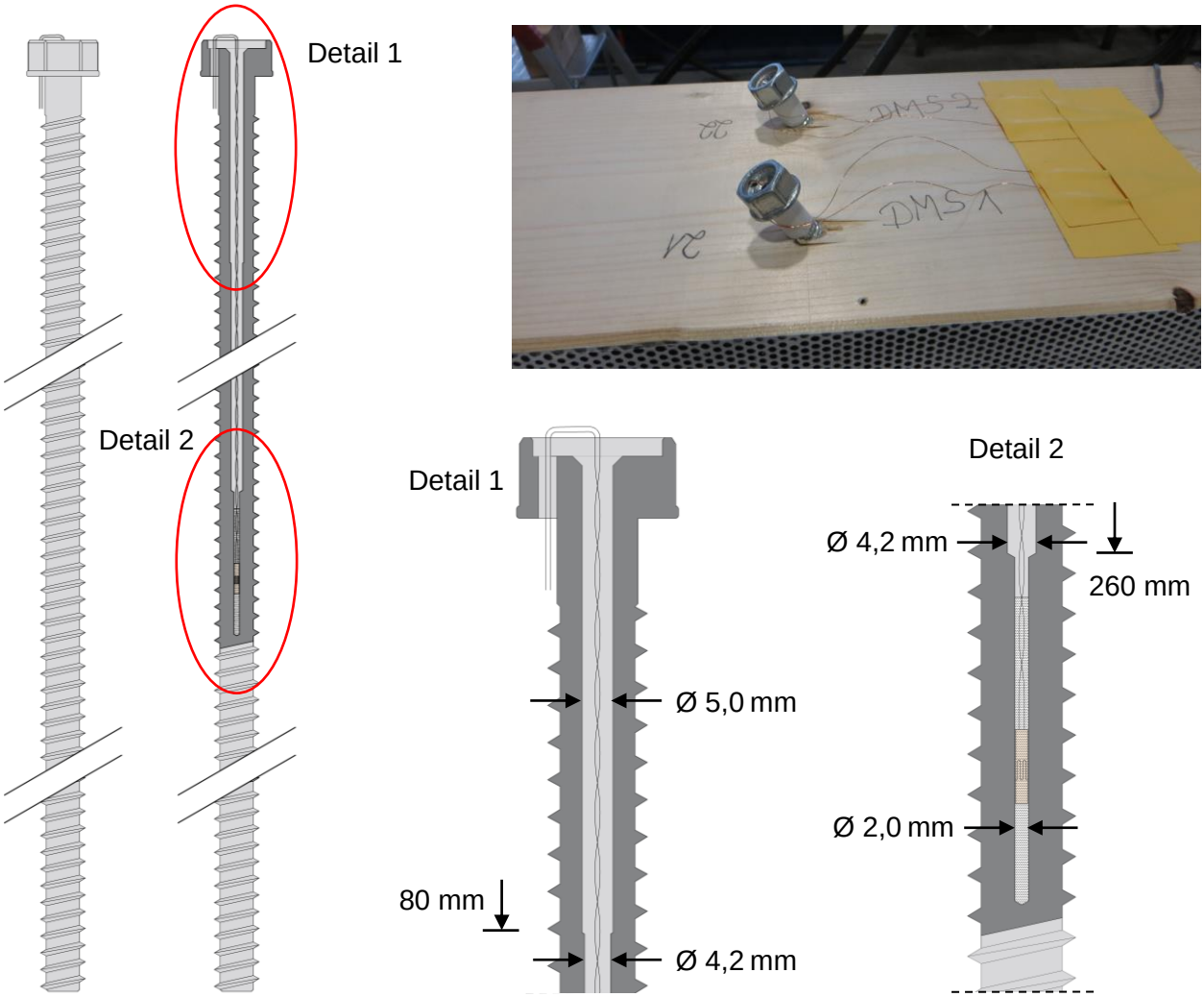


Abbildung 18: DMS-Applikation in den Gewindestangen

2.2.5 Auswertung & Ergebnisse

Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der in sämtlichen Einzelprüfungen erzielten Ergebnisse. Für die Ermittlung von Mittelwerten und statistischen Kenngrößen wurde nicht zwischen den beiden Festigkeitsklassen unterschieden.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse aller Einzelprüfungen (Anr. = Anriss, Dur. = Durchriss, Hö. = Höchstlast)

		Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35 mit Verstärkung						Horizontale Gruppe mit Verstärkung			Vertikale Gruppe mit Verstärkung		
		e/h = -0,175			e/h = 0,175			l_z = 0,35h			l_z = 0,20h		
		Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.
GL 24h	Nr. 1	175,8	318,4	393,0	165,9	253,0	287,6	179,6	308,0	349,0	230,5	-	246,7
	Nr. 2	192,4	350,7	362,0	210,9	247,3	275,9	162,8	-	266,2	215,4	288,0	324,8
GL 28h	Nr. 1	243,8	334,3	351,0	225,2	245,7	298,4	149,4	289,4	335,7	190,2	266,5	324,8
	Nr. 2	258,5	362,8	369,4	229,4	229,4	279,3	170,6	281,4	314,4	220,2	361,6	362,7
V_{mean} [kN]		217,6	341,5	368,8	207,8	243,8	285,3	165,6	292,9	316,3	214,0	305,4	337,4
COV [%]		18,3	5,7	4,8	14,0	4,2	3,5	7,7	4,7	11,5	8,0	16,3	6,5
		Globales Biege-/Schubversagen außerhalb Durchbruchsbereich											
		Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,40 ohne Verstärkung											
		e/h = -0,100			e/h = 0,100								
		Anr.	Dur.	Hö.	Anr.	Dur.	Hö.						
GL 24h	Nr. 1	696,1	801,3	867,6	623,1	658,4	715,8						
	Nr. 2	830,8	863,8	1113,0	668,7	834,4	834,4						
GL 28h	Nr. 1	476,6	740,5	949,8	703,3	887,6	936,3						
	Nr. 2	803,6	888,8	1085,2	808,5	808,5	853,9						
M_{mean} [kNm]		701,8	823,6	1003,9	700,9	797,2	835,1						
COV [%]		22,9	8,1	11,5	11,3	12,3	10,9						

- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35

Die Auswertung der beiden Konfigurationen zeigt ein ähnliches Bild wie im Fall der Kleinversuche, siehe Abbildung 19. Dabei äußerte sich das Versagen des Prüfkörpers e/h = 0,175, GL 24h, Nr. 2 auf Höchstlastniveau in Form eines schrittweisen globalen Biegeversagens in Feldmitte, ausgehend von einer Keilzinkenverbindung. Anhand des Last-Verformungsdiagramms in Abbildung B - 1 im Anhang B ist dies an den stufenweisen Lastabfällen erkennbar. Dies entspricht bei einer erreichten Querkraft V = 275,9 kN einer Biegerandspannung $\sigma_{m,y}$ = 24,8 N/mm².

Auf Anrissniveau führt eine Anordnung im Biegedruckbereich zu geringfügig höheren Lastwerten, auf Durchriss- und Höchstlastniveau zu deutlich höheren Werten. Ein relativer Vergleich der Höchstlasten zwischen den beiden Ausmitten ergibt einen Verhältniswert, der im Vergleich zu demjenigen der Kleinversuche geringfügig höher ausfällt, d.h. die angepasste Neigung der Verstärkungselemente führte zu einer Verbesserung des Tragverhaltens, jedoch nur geringfügig (Großversuche: $V_{mean}(e/h = 0{,}175) / V_{mean}(e/h = -0{,}175) = 0{,}77$; Kleinversuche: $V_{mean}(e/h = 0{,}175) / V_{mean}(e/h = -0{,}175) = 0{,}72$).

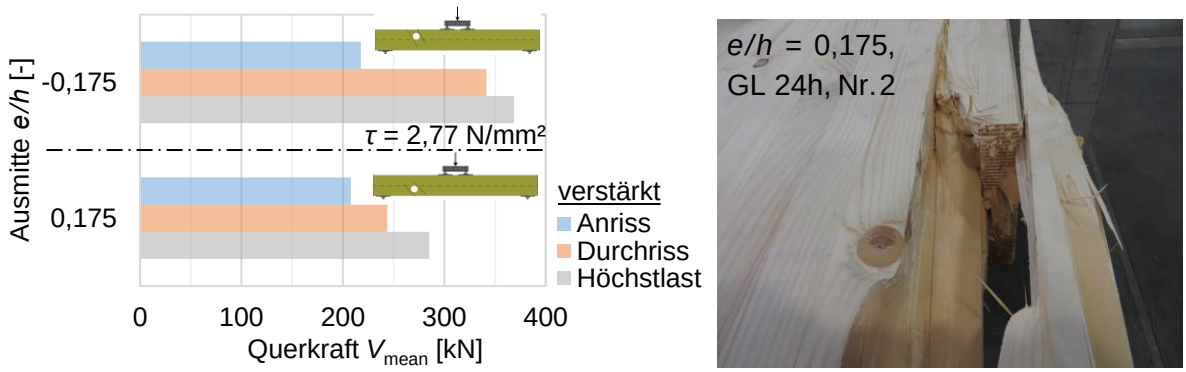


Abbildung 19: Versuchsergebnisse exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35 (Mittelwerte)

- Horizontale Gruppe

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der horizontalen Gruppe dargestellt. Im Gegensatz zu den Kleinversuchen war in 3 der 4 Versuche ein Durchriss noch vor dem letztendlichen Versagen zu beobachten. Das letztendliche Versagen fand wiederum außerhalb der Durchbruchsbereiche in Form eines globalen Biege-/Schubversagens statt. Das vergleichsweise frühe Biegezugversagen in Feldmitte des Prüfkörpers GL 24h, Nr. 2 wurde durch ein Versagen einer Keilzinkung initiiert (Biegerandspannung $\sigma_{m,y}$ = 29,9 N/mm²). Da bei den anderen 3 Prüfkörpern ebenfalls ein globales Versagen auf Höchstlastniveau auftrat, wurde dieser bei der Auswertung auf Höchstlastniveau trotz der geringen erreichten Lasten mitberücksichtigt.

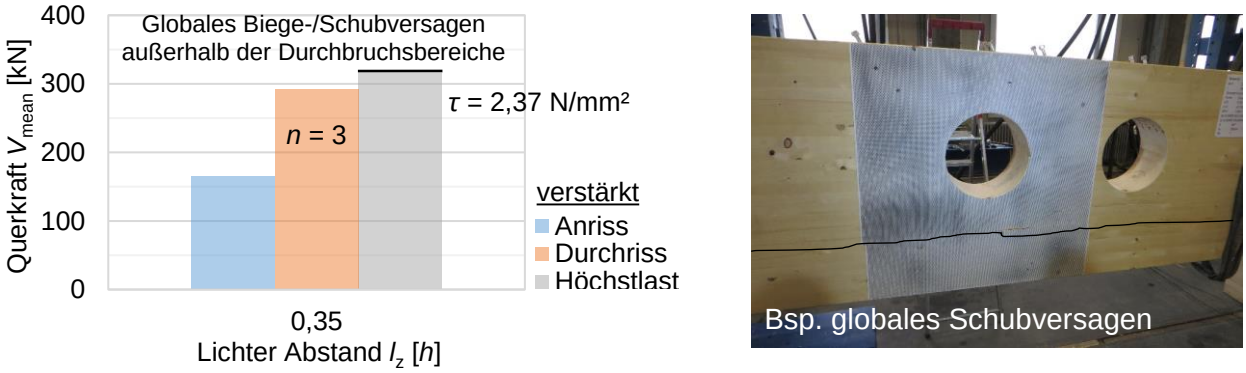


Abbildung 20: Versuchsergebnisse horizontale Gruppe (Mittelwerte)

- Vertikale Gruppe

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der vertikalen Gruppe dargestellt. Der Prüfkörper GL 24h, Nr. 1 versagte sehr früh in Form eines Biegezugversagens in Feldmitte (Biegerandspannung $\sigma_{m,y}$ = 22,2 N/mm²). Die Ergebnisse dieses Prüfkörpers können daher nur auf Anrissniveau berücksichtigt werden. Bei zwei Prüfkörpern trat ein kombiniertes Versagen in Form eines Querzug-Biegezug-Schubversagens im unteren Restquerschnitt im Bereich der Verstärkungselemente auf, welches sich bis zum Trägerende fortsetzte. Der vierte Prüfkörper versagte in Form eines Biegezugversagens im unteren Restquerschnitt, ebenfalls im Bereich der Verstärkungselemente. Vergleicht man die Mittelwerte der erreichten Schubtragfähigkeiten verstärkter exzentrischer Einzeldurchbrüche sowie verstärkter vertikaler Gruppenanordnungen der Klein- und Großversuche

mit den abgeschätzten Schubtragfähigkeiten in den Abschnitten 2.1.2 und 2.2.2, so ergeben sich folgende Werte:

Kleinversuche:	Exzentrische Einzeldurchbrüche	$\tau / f_{v,mean}$ = 3,55/4,08 = 0,87
	Vertikale Gruppe (VGS 90°)	$\tau / f_{v,mean}$ = 2,55/4,08 = 0,63
Großversuche:	Exzentrische Einzeldurchbrüche	$\tau / f_{v,mean}$ = 2,77/3,14 = 0,88
	Vertikale Gruppe (GWS 45°)	$\tau / f_{v,mean}$ = 2,53/3,14 = 0,80

Aus diesen Werten ist ersichtlich, dass eine Anordnung der Verstärkungselemente unter α = 45° effektiver ist, infolge der dargestellten Versagensformen konnte das Potential der geneigten Verstärkungselemente jedoch nur zum Teil ausgeschöpft werden.

Ein Nachweis der Biegezugspannung am Bauteilrand unter Zugrundelegung der Nettoquerschnittswerte und unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung durch die beiden Gewindestangen würde bei einem Mittelwert der Querkraft V = 337,4 kN auf Höchstlastniveau eine Biegezugspannung $\sigma_{m,y,net}$ = 25,9 N/mm² ergeben. Dieser vergleichsweise geringe Wert sowie die vom Durchbruch in Richtung Trägerende verlaufende Versagensform zeigen den Einfluss der Spannungskonzentration in Faserrichtung auf.

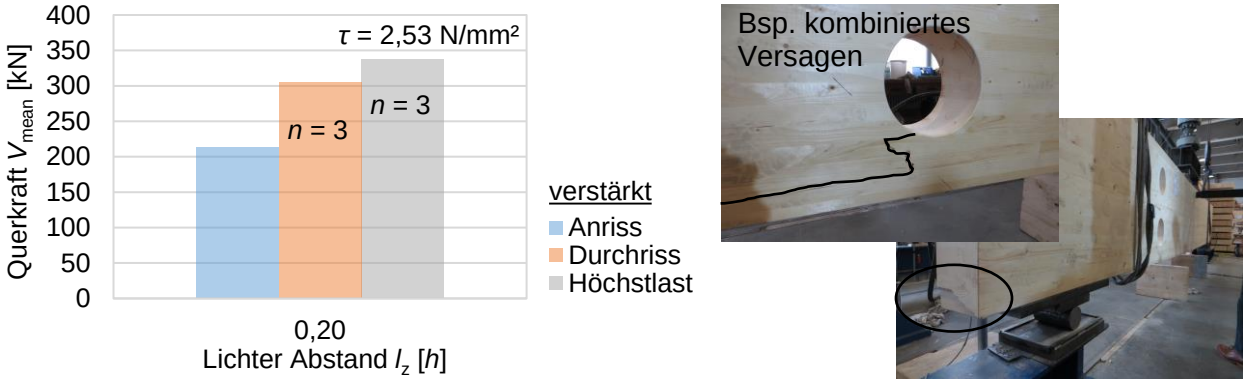


Abbildung 21: Versuchsergebnisse vertikale Gruppe (Mittelwerte)

- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,40 unverstärkt

Auf Anriss- und Durchrissniveau ist an den Versuchsergebnissen kaum ein Unterschied zwischen den gewählten Anordnungen in der Biegedruck- sowie der Biegezugzone zu erkennen, siehe Abbildung 22. Das letztendliche Biegezugversagen trat jedoch im Fall e/h = 0,100 früher auf, d.h. der Einfluss des Durchbruchs auf die Tragfähigkeit war in diesem Fall ausgeprägter.

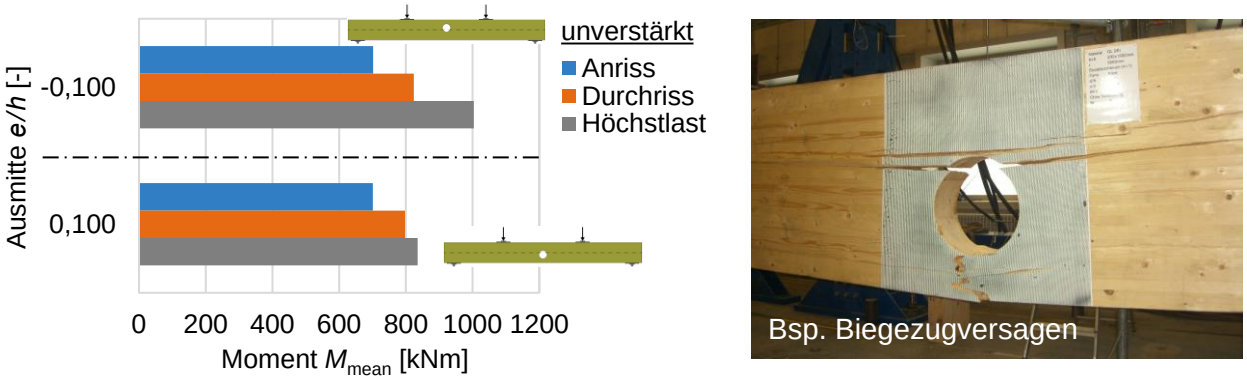


Abbildung 22: Versuchsergebnisse exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,40 unverstärkt (Mittelwerte)

Hinsichtlich der Konzentration von Spannungen in Faserrichtung werden im Folgenden die Ergebnisse einer Konfiguration im Biegedruckbereich sowie einer Konfiguration im Biegezugbereich dargestellt und miteinander verglichen. Es werden dabei jeweils Ergebnisse am Bauteilrand, am Durchbruchrand sowie über eine begrenzte Ausdehnung vom Rand des Durchbruchs ausgehend betrachtet.

Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsmessungen für eine Anordnung im Biegedruckbereich (e/h = -0,100). Ein Vergleich zwischen Bauteilrand und Durchbruchrand bestätigt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen in Form von deutlich höheren Dehnungswerten am Durchbruchrand. Bis zu einem Moment von etwa M = 600 kNm liegt am Durchbruchrand ein annähernd linear elastisches Verhalten vor. Bei weiterer Laststeigerung nehmen die Dehnungen überproportional zu, d.h. das linear elastische Verhalten geht in ein plastisches Verhalten über. Anhand der DMS-Ketten an den Seitenflächen ist gut erkennbar, dass die Dehnungswerte mit zunehmender Entfernung vom Durchbruchrand rasch abnehmen und sich die plastische Zone mit zunehmender Belastung ausgehend vom Durchbruchrand immer weiter ausdehnt.

Ein Nachweis unter Zugrundelegung der Nettoquerschnittswerte würde bei einem Mittelwert des Moments M = 1003,9 kNm auf Höchstlastniveau eine Biegedruckspannung am Bauteilrand von $\sigma_{m,y,net}$ = -39,9 N/mm² ergeben.

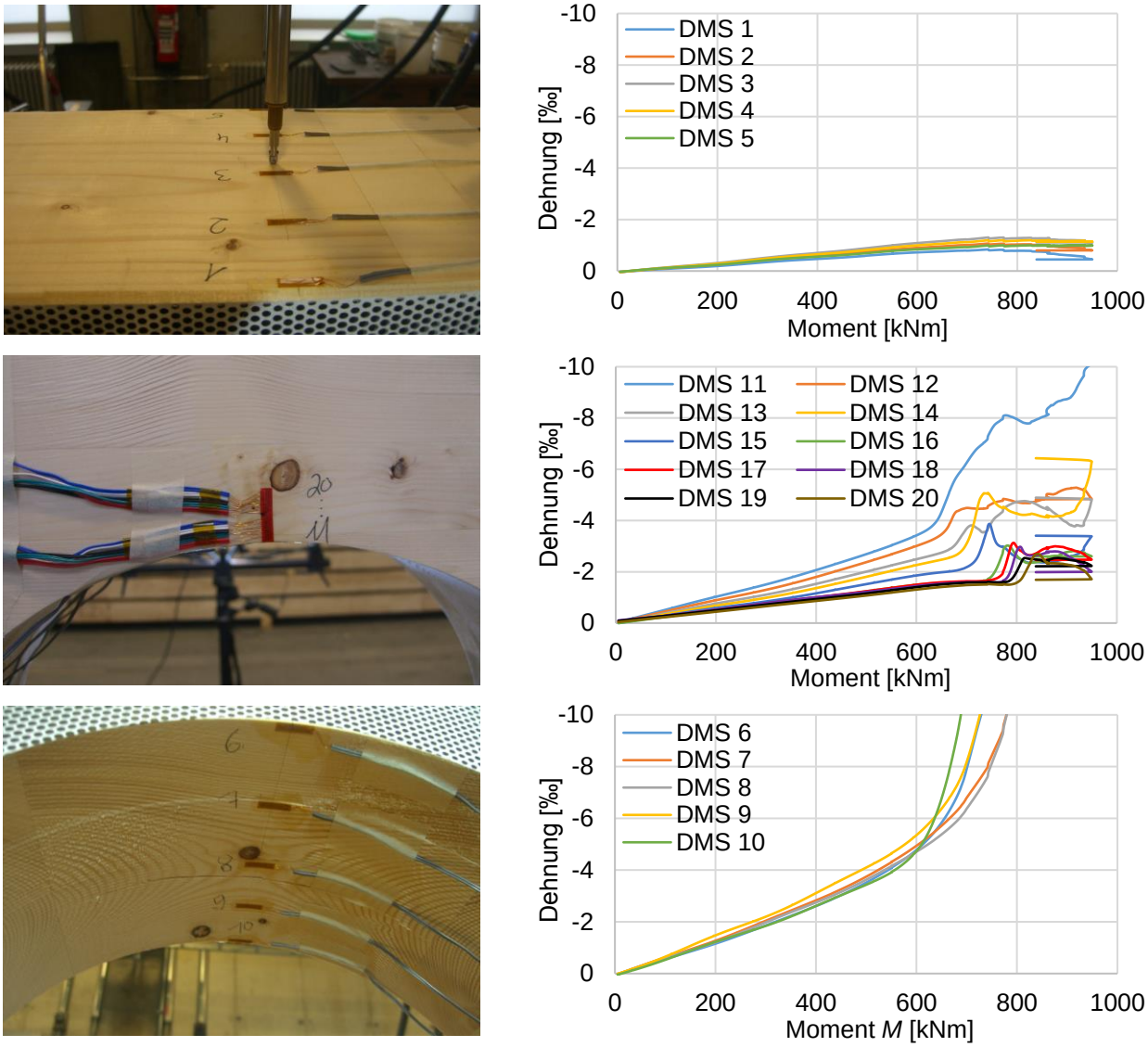


Abbildung 23: Dehnungsmessungen im Biegedruckbereich; e/h = -0,100, Prüfkörper Nr. 1, GL 28h

An einem anderen Prüfkörper konnte die Ausbildung einer Druckfalte beobachtet werden, siehe Abbildung 24.

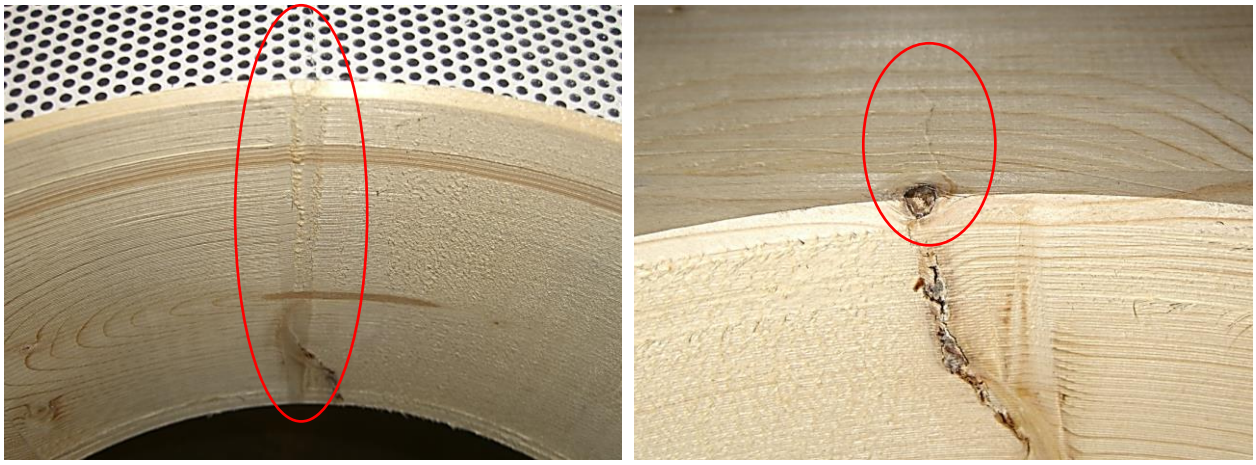


Abbildung 24: Ausbildung einer Druckfalte (e/h = -0,100, Prüfkörper Nr. 2, GL 24h)

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Dehnungsmessungen für eine Anordnung im Biegezugbereich (e/h = 0,100). Auch hier liegen am Durchbruchrand im Vergleich zum Bauteilrand deutlich höhere Dehnungswerte vor. Ebenso zeigen die Ergebnisse der DMS-Ketten eine Abnahme der Dehnungswerte mit zunehmendem Abstand vom Durchbruchrand. Im Unterschied zu einer Anordnung in der Biegedruckzone liegt bis zum endgültigen Versagen ein linear elastisches Verhalten vor. Aufgrund des schlagartigen Biegeversagens im unteren Restquerschnitt kann trotz der verschiedenen Auswertetechniken keine Aussage dazu getroffen werden, ob das Biegeversagen am Bauteilrand oder am Durchbruchrand begonnen hat. Ein Nachweis unter Zugrundelegung der Nettoquerschnittswerte würde bei einem Mittelwert des Moments M = 835,1 kNm auf Höchstlastniveau eine Biegezugspannung am Bauteilrand von $\sigma_{m,y,net}$ = 33,2 N/mm² ergeben.

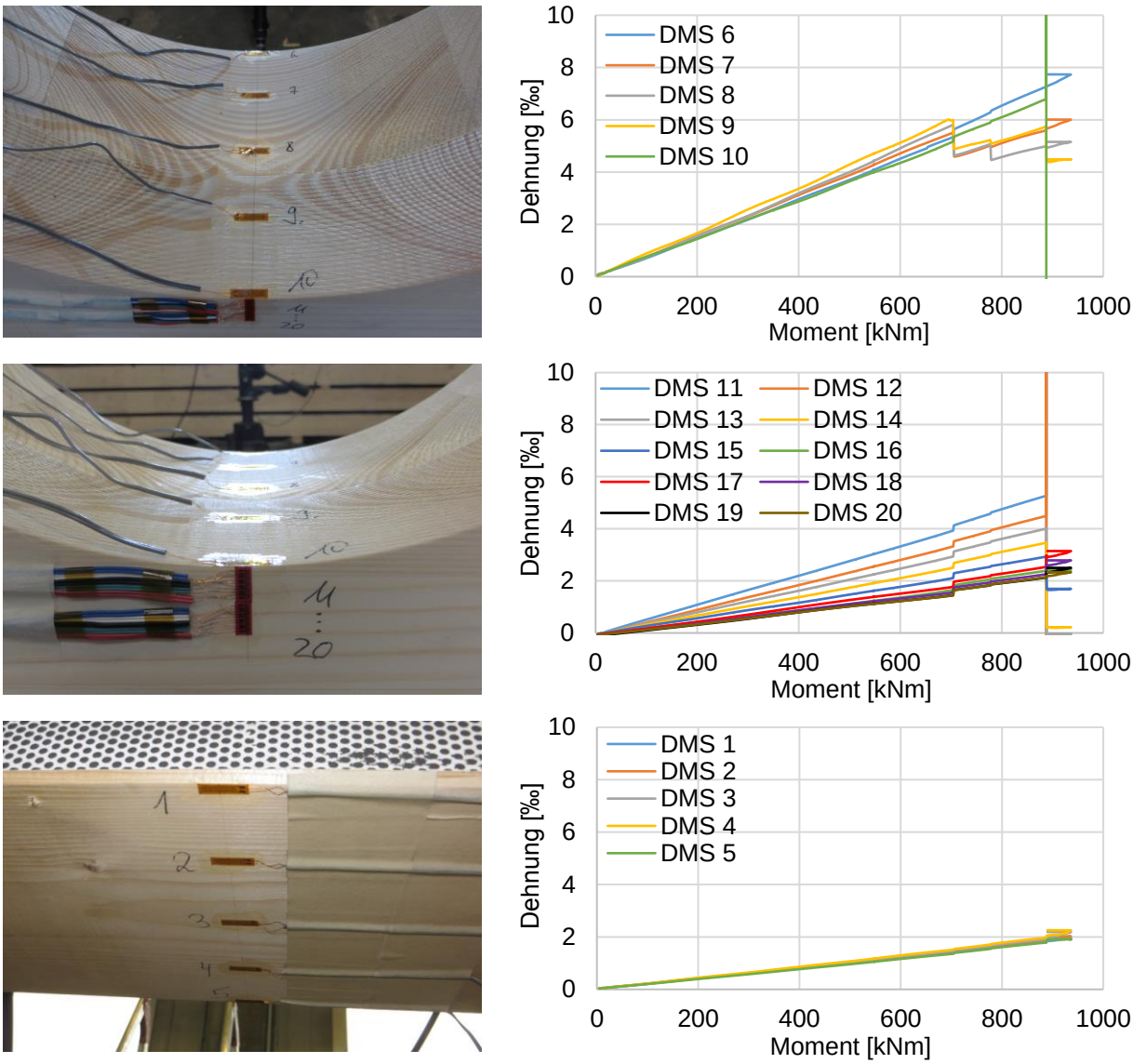


Abbildung 25: Dehnungsmessungen im Biegezugbereich; e/h = 0,100, Prüfkörper Nr. 1, GL 28h

3 Numerische Untersuchungen

3.1 Simulationsmodell

3.1.1 Ohne Verstärkungselemente

Zur Simulation des Tragverhaltens von unverstärkten Trägern mit Durchbrüchen wurde innerhalb des FEM-Programms ANSYS ein zweidimensionales Simulationsmodell gemäß Abbildung 26 erstellt. Zur Reduzierung des Berechnungsaufwands wurde unter Ausnutzung der Symmetrie lediglich eine Trägerhälfte modelliert.

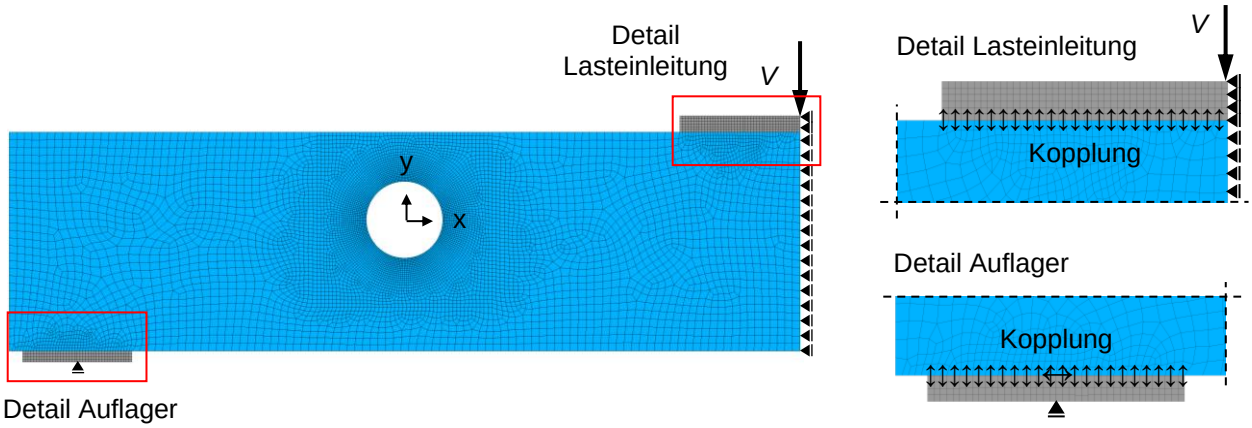


Abbildung 26: Simulationsmodell ohne Verstärkungselemente

Für die Modellierung der Träger wurden 8-knotige Scheibenelemente PLANE 183 verwendet, welchen ein orthotropes Materialverhalten von Brettschichtholz zugewiesen wurde. Die zugrundeliegenden Steifigkeitseigenschaften orientierten sich an den in DIN EN 14080:2013 angegebenen Mittelwerten:

- GL 24h: $E_{0,mean} = E_x = 11500$ N/mm², $E_{90,mean} = E_y = 300$ N/mm², $G_{mean} = 650$ N/mm²
- GL 28h: $E_{0,mean} = E_x = 12600$ N/mm², $E_{90,mean} = E_y = 300$ N/mm², $G_{mean} = 650$ N/mm²

Als Querkontraktionszahl wurde auf Grundlage der Untersuchungen von NEUHAUS (1981) $\nu_{xy} = \nu_{yx} \cdot E_x / E_y = 0{,}41$ gewählt (1. Index: Lastrichtung, 2. Index: Verformungsrichtung; Orientierungen: x in Faserrichtung, y quer zur Faserrichtung).

Durch eine explizite Modellierung der Lastverteilungsplatten aus Stahl wurde eine realitätsnahe Abbildung der Lasteinleitung bzw. -ausbreitung angestrebt. Um eine Verbundtragwirkung von Träger und Lastverteilungsplatten auszuschließen, wurden diese entsprechend den Details in Abbildung 26 nur in vertikaler Richtung gekoppelt.

Die Berechnung erfolgte ausschließlich im linear elastischen Bereich.

3.1.2 Mit Verstärkungselementen

Zur Simulation des verstärkten Zustands wurde das in Abschnitt 3.1.1 erläuterte Modell um die Verstärkungselemente in Form von 2-knotigen Balkenelementen BEAM 188 ergänzt, siehe Abbildung 27. Diese weisen einen entsprechend dem Kerndurchmesser der Vollgewindeschrauben kreisförmigen Querschnitt sowie ein – für Stahl kennzeichnend – isotropes Materialverhalten auf.

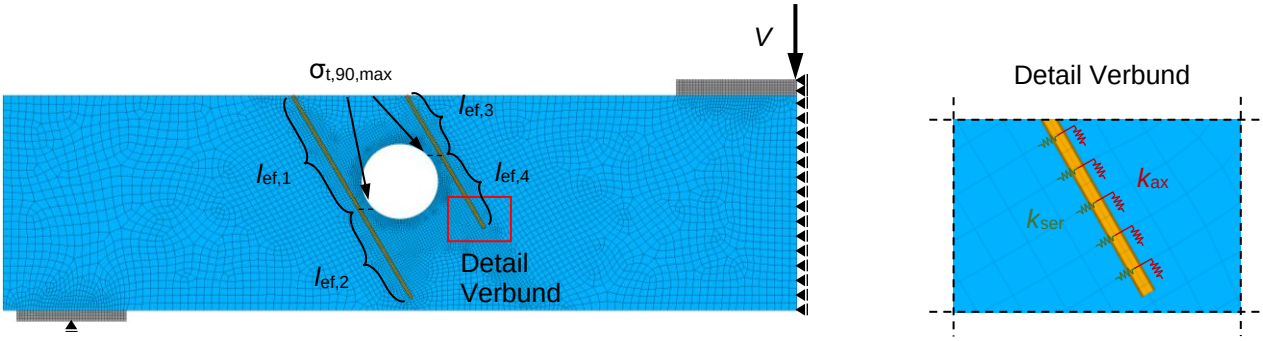


Abbildung 27: Simulationsmodell mit Verstärkungselemente

Die Interaktion zwischen Vollgewindeschraube und Holz wurde sowohl in axialer Richtung (Verbundsteifigkeit k_{ax}) als auch in lateraler Richtung (Lochleibungssteifigkeit k_{ser}) über Federelemente COMBIN 39 realisiert, siehe schematische Darstellung in Abbildung 27. Da die Berechnungen ausschließlich im linear elastischen Bereich durchgeführt wurden, wurden sowohl in axialer als auch in lateraler Richtung konstante Steifigkeitswerte verwendet. Die Herleitung der zugrundeliegenden Werte wird in den folgenden beiden Abschnitten erläutert. Die wirksamen Längen l_{ef} wurden jeweils in Abhängigkeit der Lage der maximalen Querzugspannungen am Durchbruchrand infolge vorangegangener Berechnungen ohne Verstärkungselemente bestimmt.

Um Aussagen zur Wirkungsweise der Verstärkungselemente und den damit erzielbaren Effekten treffen zu können, wurde neben dem ungerissenen Zustand auch der teilgerissene Zustand mithilfe der vereinfachten modelltechnischen Umsetzung entsprechend Abbildung 28 betrachtet. Die Vereinfachung bestand darin, einen potentiellen Riss abzubilden, indem die Elemente des Trägers in einem vorgegebenen Rissbereich “eliminiert“ wurden. Programmtechnisch bedeutet dies, dass diese Elemente zwar weiterhin vorhanden sind, durch eine Reduktion der Steifigkeitswerte auf Werte nahe 0 jedoch wirkungslos werden.

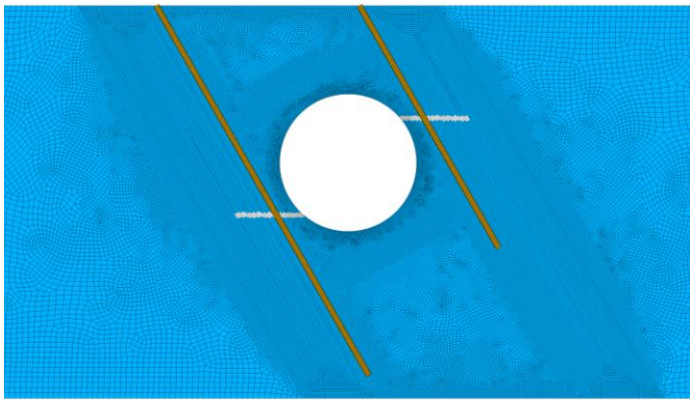


Abbildung 28: Vereinfachte Simulation des teilgerissenen Zustands

3.1.3 Laterale Verbundsteifigkeit Verstärkungselement - Holz

BLAß ET AL. (2006) untersuchten das Verhalten selbstbohrender Vollgewindeschrauben sowohl unter axialer als auch unter lateraler Beanspruchung. Im Fall einer lateralen Beanspruchung geben die Autoren für die Lochleibungsspannung $\sigma_{h,s}$ und die Lochleibungsfestigkeit $f_{h,s}$ folgende Gleichungen an (Hinweis: Die Autoren verwenden die Bezeichnung α als Winkel zwischen Kraft- und Holzfaserrichtung; abweichend davon wird im Rahmen dieses Forschungsberichts die Bezeichnung α als Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung verwendet):

$$\sigma_{h,s}(w) = f_{h,s} \cdot [K_2 + K_3 \cdot (w - w_s)] \cdot \left[1 - e^{\left(-K_1 \cdot \frac{w - w_s}{K_2}\right)}\right] \leq f_{h,s} \qquad \text{in N/mm}^2 \tag{1}$$

mit

	K_1 in N/mm³	K_2 in N/mm²	K_3 in N/mm³	w_s in mm
α = 0°, ε = 90°	1,287	1,029	-0,010	0,022
ε = 0°	1,678	0,878	0,021	0,010

K_i Kurvenparameter
w_s Anfangsverformung
α Winkel Kraftrichtung - Holzfaserrichtung
ε Winkel Schraubenachse - Holzfaserrichtung

$$f_{h,s} = \frac{0{,}022 \cdot \rho^{1{,}24} \cdot d^{-0{,}3}}{2{,}5 \cdot cos^2\varepsilon + sin^2\varepsilon} \qquad \text{in N/mm}^2 \tag{2}$$

mit d Schraubennenndurchmesser in mm
ρ Rohdichte des Holzes in kg/m³
ε Winkel Schraubenachse - Holzfaserrichtung

Eine Auswertung dieser beiden Gleichungen für Vollgewindeschrauben d = 10 mm sowie einem Mittelwert der Rohdichte ρ_{mean} = 460 kg/m³ ist in Abbildung 29 für verschiedene, im Rahmen dieser Arbeit relevante Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung dargestellt.

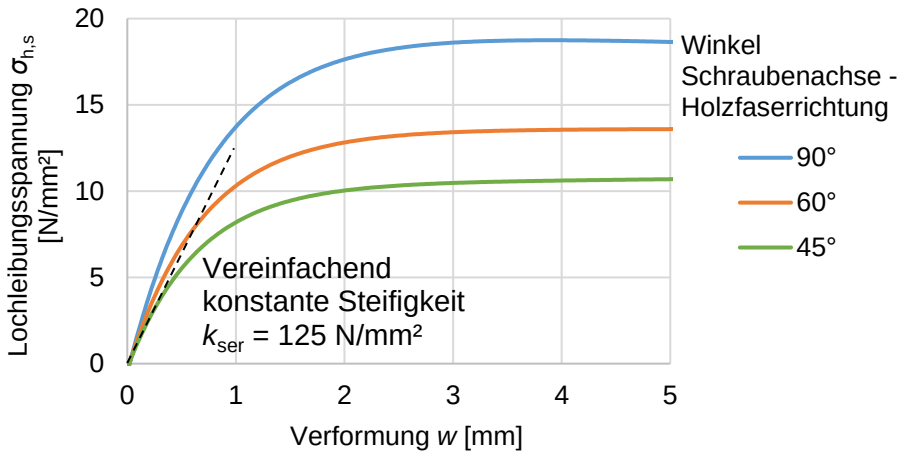


Abbildung 29: Last-Verformungsverhalten von Vollgewindeschrauben d = 10 mm unter lateraler Beanspruchung in Holz mit ρ_{mean} = 460 kg/m³

Da im ungerissenen Zustand nur kleine Verformungen senkrecht zur Schraubenachse auftreten, kann in guter Näherung von einem linearen Last-Verformungsverhalten, gleichbedeutend einem

konstanten Steifigkeitswert k_{ser}, ausgegangen werden. Aufgrund der untergeordneten Bedeutung des Verhaltens senkrecht zur Schraubenachse wurde vereinfachend unabhängig von der Schraubenneigung eine Steifigkeit k_{ser} = 125 N/mm² verwendet (Einheit: Kraft in N je mm Länge einer Vollgewindeschraube d = 10 mm je mm Verformung). Zur Implementierung in Form von Federwerten wurde dieser Steifigkeitswert mit den Abständen der jeweiligen Federelemente multipliziert.

3.1.4 Axiale Verbundsteifigkeit Verstärkungselement - Holz

Die Wirkungsweise von Vollgewindeschrauben kommt vorrangig bei einer Beanspruchung in Schraubenrichtung zum Tragen. Großen Einfluss auf das Tragverhalten hat dabei das axiale Verbundverhalten zwischen Schraube und Holz. Mithilfe des von BLAß ET AL. (2006) in Herausziehversuchen ermittelten axialen Verschiebungsmoduls K_{ax} lässt sich das Verhalten im gerissenen Zustand realitätsnah beschreiben. Um auch das Verhalten auch im ungerissenen Zustand möglichst zutreffend beschreiben zu können, wurde das axiale Verbundverhalten in Anlehnung an das Vorgehen von MESTEK & WINTER (2011) untersucht. Die Ermittlung der axialen Verbundsteifigkeit erfolgt dabei in 2 Schritten, einem versuchsbasierten sowie einem simulationsbasierten Schritt:

- Versuche

Im Rahmen der Versuche wurden die für die folgenden Parameterstudien relevanten Parameter wirksame Länge l_{ef} und Winkel zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung α in folgenden Stufen variiert:

- l_{ef} = 80 mm / 120 mm / 180 mm
- α = 45° / 60° / 90°

Abbildung 30 zeigt eine Zusammenstellung der verschiedenen Prüfkörperkonfigurationen. Bei 5 Prüfkörpern je Konfiguration ergab sich daraus ein Versuchsumfang von insgesamt 45 Prüfkörpern.

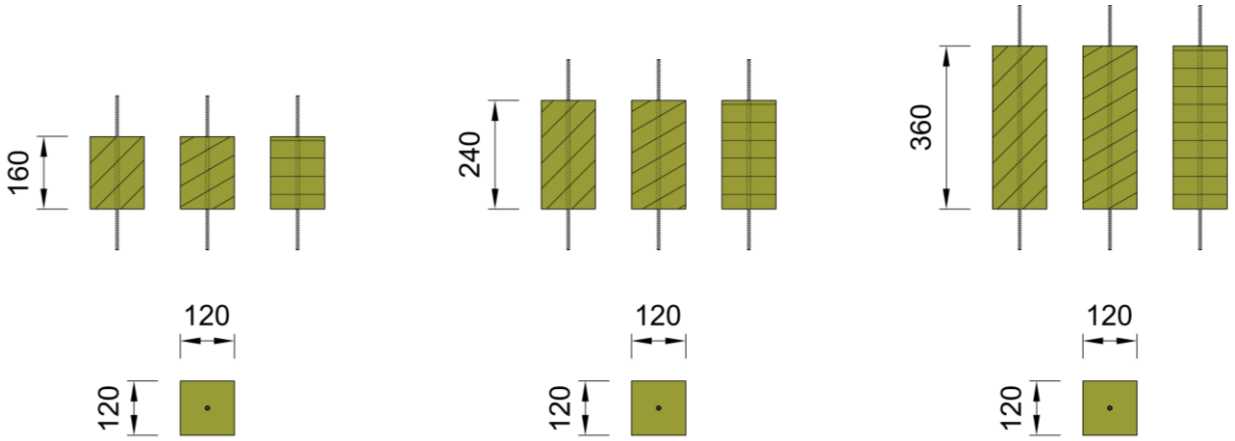


Abbildung 30: Prüfkörperkonfiguration zur Ermittlung der axialen Verbundsteifigkeit, Maße in mm

Bei den Prüfkörpern handelte es sich um quaderförmige Trägerausschnitte (Grundfläche 120 mm x 120 mm) mit je einer zentrisch eingedrehten, an beiden Enden überstehenden

Vollgewindeschraube d = 10 mm. Das verwendete Material entsprach Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL 28h und wies eine mittlere Rohdichte ρ_{mean} = 471 kg/m³ (COV = 4,7 %) auf. Die Holzfeuchte bewegte sich im Bereich der gemessenen Holzfeuchten der Prüfkörper der Kleinversuche.

Aufgrund des Umstands, dass sich der axiale Verbund unter einer Druckbeanspruchung vergleichbar zu dem unter einer Zugbeanspruchung verhält, wurden die Versuche aufgrund der einfacheren Umsetzbarkeit in Form von Druckversuchen durchgeführt. Der zugehörige Versuchsaufbau sowie eine exemplarische Auswertung dieser Versuche sind in Abbildung 31 dargestellt.

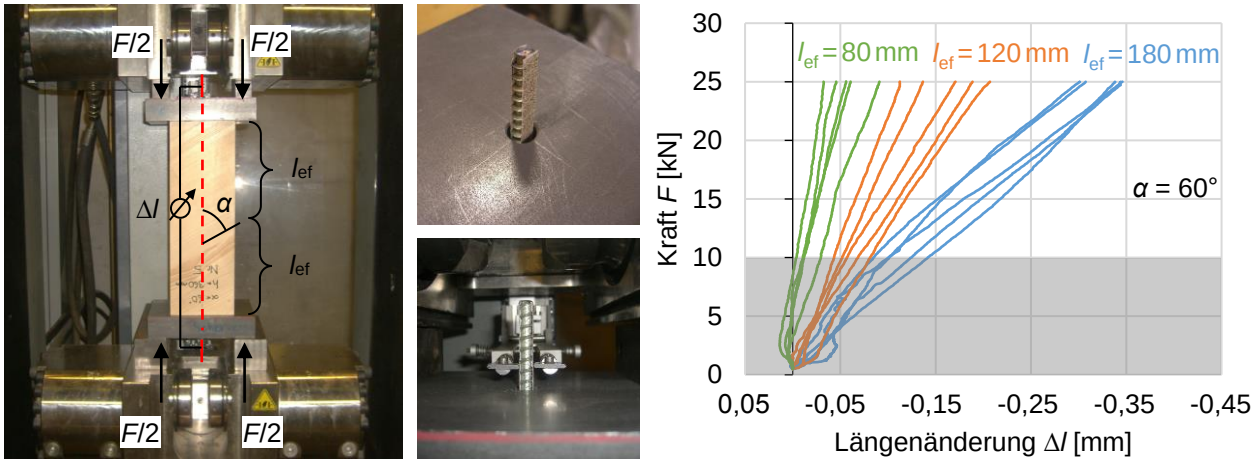


Abbildung 31: Versuchsaufbau zur Ermittlung der axialen Verbundsteifigkeit k_{ax} sowie eine exemplarische Auswertung für eine Schraubenneigung α = 60°

Die Lastaufbringung erfolgte weggesteuert mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit v = 0,5 mm/min der Prüfzylinder. Über Bohrungen in den Lasteinleitungsplatten wurde sichergestellt, dass die Druckkraft der Prüfmaschine ausschließlich auf den Holzquerschnitt aufgebracht wurde. Parallel zur Lastaufbringung wurden die Längenänderungen der Vollgewindeschrauben zwischen den beiden überstehenden Enden über entsprechende Messfühler (Extensometer) aufgezeichnet. Zur besseren Haftung der Messfühler wurden vor der Versuchsdurchführung das Gewinde der Vollgewindeschrauben im Angriffsbereich beidseits abgeschliffen sowie Schleifpapierstreifen aufgeklebt. Die Versuchsergebnisse der Prüfkörper mit einer Schraubenneigung α = 60° sind in Abbildung 31 dargestellt, diejenigen der Schraubenneigungen α = 45° sowie α = 90° finden sich in Anhang C.

Anschließend wurde jede Last-Verformungskurve im Bereich zwischen F = 10 kN und F = 25 kN durch eine lineare Funktion angenähert. Der Grund für die Vernachlässigung des Bereichs bis F = 10 kN liegt darin, dass infolge minimaler Herstellungsungenauigkeiten häufig eine gewisse Kraft erforderlich war, bis der gesamte Querschnitt unter Druckspannungen stand und sich ein annähernd lineares Verhalten einstellte. Abschließend wurden von den Steigungen dieser Funktionen (aufgebrachte Kraft ΔF je Längenänderung Δl der VGS) die Kehrwerte (Längenänderung Δl der VGS je aufgebrachter Kraft ΔF) ermittelt und aus den jeweils 5 Einzelwerten die Mittelwerte gebildet. Eine Zusammenstellung dieser Ergebnisse findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Längenänderungen Δl der Vollgewindeschrauben je aufgebrachter Kraft ΔF [µm/kN]

		α = 90°			α = 60°			α = 45°		
		l_{ef} [mm]			l_{ef} [mm]			l_{ef} [mm]		
		180	120	80	180	120	80	180	120	80
Prüfkörper Nr.	1	17,24	8,89	3,16	15,06	7,97	2,86	10,66	3,25	1,93
	2	13,90	7,30	3,78	15,08	5,65	1,98	9,94	3,34	1,20
	3	16,65	7,87	3,26	16,64	7,62	4,27	9,61	5,48	1,68
	4	15,31	8,31	4,22	12,96	4,80	2,03	10,79	4,81	1,39
	5	18,63	7,74	3,41	13,29	8,29	3,39	9,22	5,42	1,93
$\Delta l_{VGS,mean}$	[µm/kN]	16,35	8,02	3,57	14,61	6,87	2,91	10,04	4,46	1,63
Standardabw.	[µm/kN]	1,81	0,61	0,43	1,50	1,55	0,97	0,68	1,10	0,33
COV	[%]	11,1	7,5	12,2	10,3	22,5	33,3	6,7	24,6	20,1

- Simulation

In einem zweiten Schritt wurden die 9 Konfigurationen der oben beschriebenen Druckversuche mittels des in Abbildung 32 dargestellten numerischen Modells simuliert. Der Verbund zwischen Vollgewindeschraube und Holz wurde dabei in axialer Richtung wiederum über Federelemente abgebildet. Senkrecht zur Schraubenachse wurde vereinfachend eine starre Kopplung angesetzt.

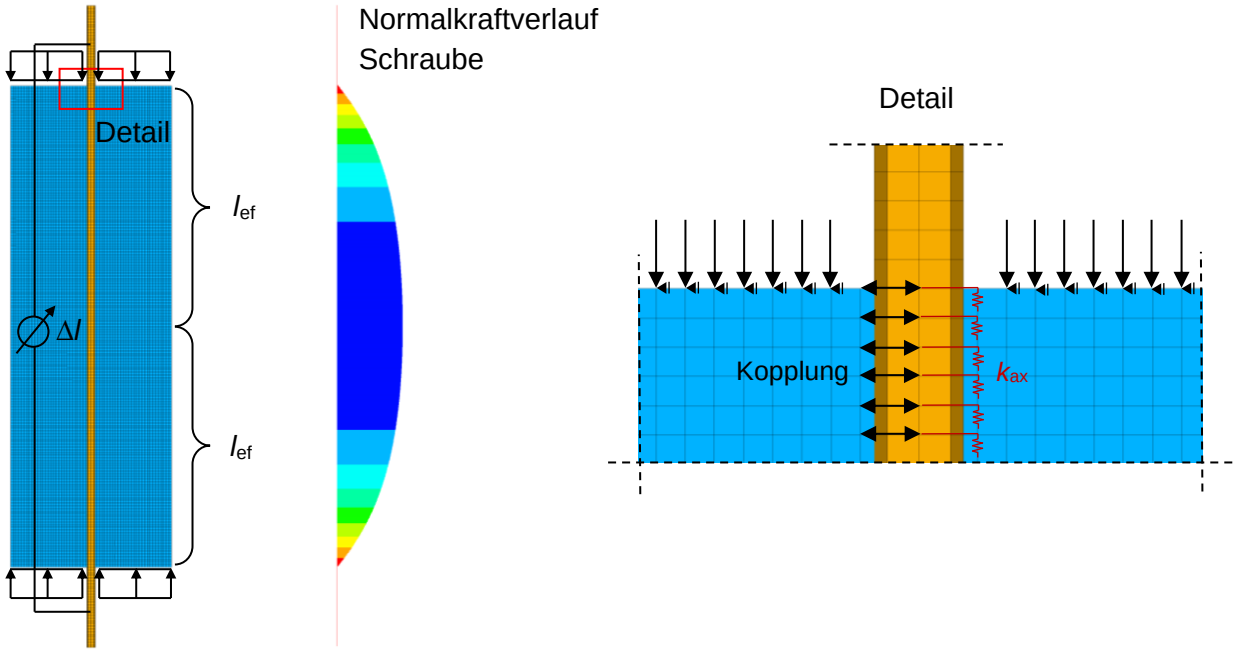


Abbildung 32: Simulationsmodell zur Bestimmung der axialen Verbundsteifigkeiten k_{ax}

Unter der Annahme einer entlang der wirksamen Länge l_{ef} konstanten Verteilung der axialen Verbundsteifigkeit k_{ax} wurden die Federwerte iterativ angepasst, bis die in den Simulationen erhaltenen Längenänderungen der Vollgewindeschrauben mit den Mittelwerten gemäß Tabelle 3 übereinstimmten. Aus einer Umrechnung der Federwerte in entsprechende Verbundsteifigkeiten folgen die in Tabelle 4 aufgelisteten Ergebnisse. Die angegebene Einheit der axialen

Verbundsteifigkeit k_{ax} entspricht einer Kraft in N je mm Länge einer Vollgewindeschraube d = 10 mm je mm Verformung.

Tabelle 4: Ermittelte Verbundsteifigkeiten k_{ax}

		α = 90°			α = 60°			α = 45°		
		l_{ef} [mm]			l_{ef} [mm]			l_{ef} [mm]		
		180	120	80	180	120	80	180	120	80
ρ_{mean}	[kg/m³]	468	465	478	474	484	471	475	459	470
$\Delta l_{Schraube,mean}$	[µm/kN]	16,35	8,02	3,57	14,61	6,87	2,91	10,04	4,46	1,63
k_{ax}	[N/mm²]	262	327	402	470	553	712	665	807	1011

Im Hinblick auf eine flexible Anwendung für verschiedene Durchbruchsituationen wurde aus den Ergebnissen für jede Schraubenneigung eine Näherungsgleichungen abgeleitet. Ein Vergleich der in Tabelle 4 ermittelten Werte und dieser Näherungsgleichungen ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Näherungsgleichungen orientieren sich dabei grundsätzlichen an der von BLAß ET AL. (2006) hergeleiteten Gleichung des axialen Verschiebungsmoduls, einzig jeweils im Wert des Vorfaktors angepasst.

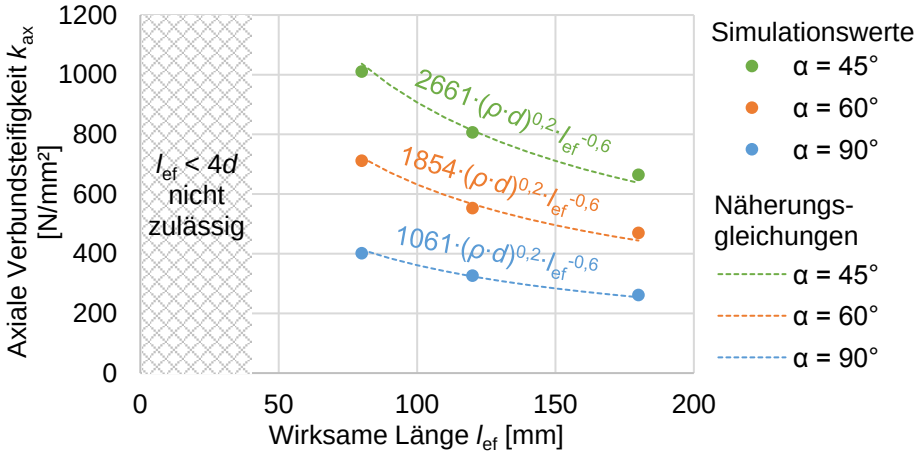


Abbildung 33: Axiale Verbundsteifigkeiten k_{ax}

3.1.5 Verifizierung des numerischen Modells

Zur Verifizierung des numerischen Modells sowie der ermittelten Werte der axialen Verbundsteifigkeiten werden in Abbildung 34 anhand von 2 Beispielen exzentrischer Durchbrüche Ergebnisse der versuchsbasierten Dehnungsmessungen in den Vollgewindeschrauben mit den im numerischen Modell ermittelten Werten verglichen. Die Vollgewindeschrauben im numerischen Modell wurden dabei mit demselben Nettoquerschnitt modelliert, wie die in den Prüfkörpern mit DMS bestückten Vollgewindeschrauben.

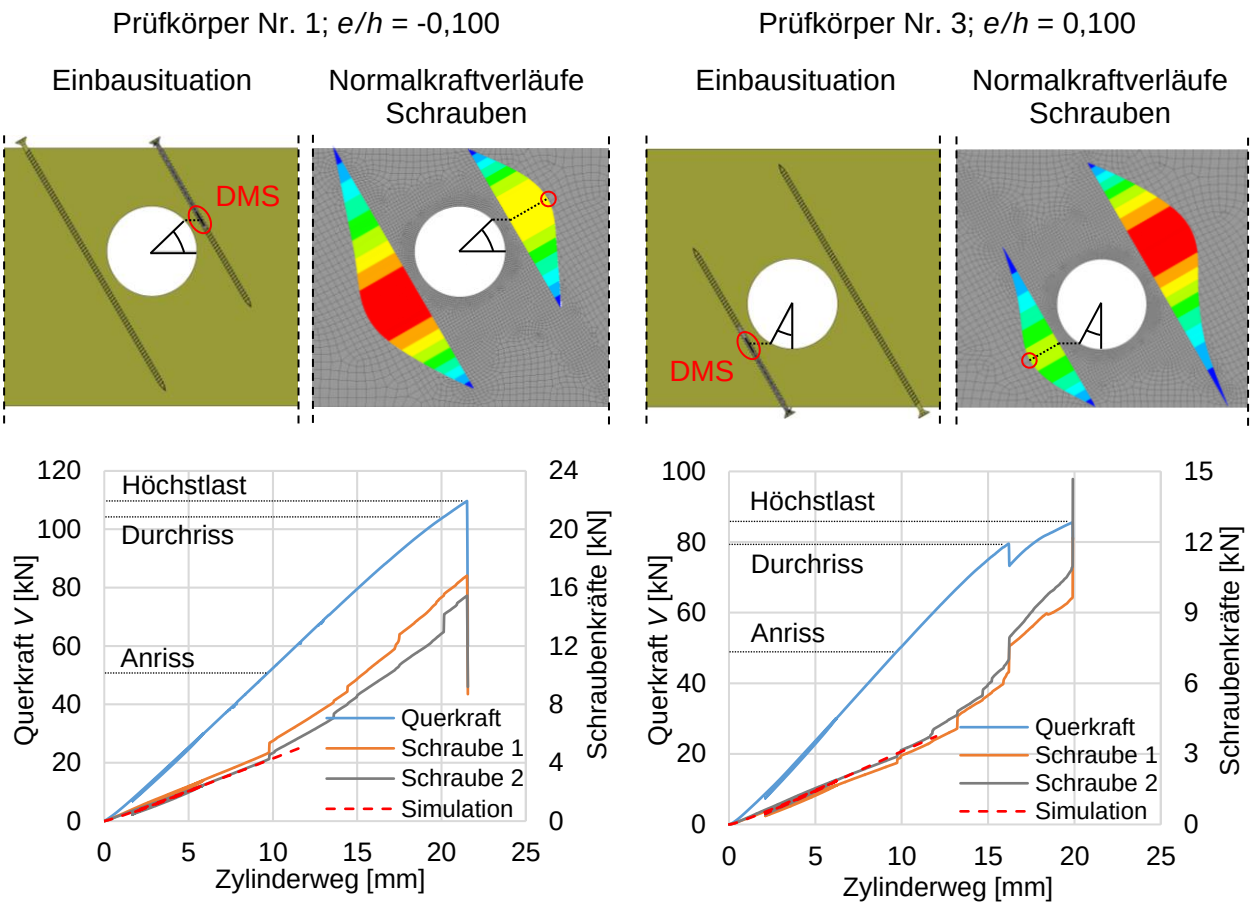


Abbildung 34: Beispiele von Dehnungsmessungen in Verstärkungselementen und Vergleich mit Simulation

Aufgrund der Tatsache, dass die Berechnungen nur im linear elastischen Bereich durchgeführt wurden, kann ein Vergleich nur bis zum Niveau einer beginnenden Rissbildung geführt werden (Anriss). Der Vergleich zwischen Versuch - Simulation zeigt jedoch, dass sich mit dem numerischen Modell die Realität im Bereich bis zum ersten Anriss ausreichend gut beschreiben lässt und bestätigt daher die Zuverlässigkeit der gewählten Methodik.

3.2 Vergleich Versuch-Simulation

3.2.1 Bestimmung von Versagenslasten im unverstärkten Zustand

Zur Abschätzung der Tragfähigkeiten mithilfe des in Abschnitt 3.1 dargestellten Simulationsmodells wurde der von HÖFFLIN (2005) untersuchte Bemessungsansatz auf Grundlage der Weibull-Theorie (WEIBULL (1939)) herangezogen. In Kombination mit der Theorie des schwächsten Gliedes handelt es sich bei dieser um eine wahrscheinlichkeitsbasierte Theorie, die vor allem für spröde Werkstoffe anwendbar ist, da sich mit dieser die Anhäufung von Schwachstellen bei zunehmendem Bauteilvolumen ohne Lastumlagerungsmöglichkeit beschreiben lässt.

Als Tragfähigkeit wird im Rahmen der numerischen Untersuchungen ein Querzugversagen verstanden. Da bei einem zweidimensionalen Simulationsmodell über die Bauteilbreite konstante Materialeigenschaften sowie dementsprechend auch konstante Ergebnisse vorliegen, stellen die damit abgeschätzten Tragfähigkeiten einem durchschnittlichen Wert über die Bauteilbreite dar. Ein Vergleich mit Versuchsergebnissen wird daher auf der Ebene der Durchrisslasten geführt.

Entsprechend den Gleichungen (3) - (5) wird für die Berechnung neben der Verteilung der Spannungen im betrachteten querzugbeanspruchten Volumen über den Verteilungsbeiwert k_{dis} auch die Größe des querzugbeanspruchten Volumens über den Volumenbeiwert k_{vol} berücksichtigt.

$$\sigma_{t,90,max} = k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,m} \tag{3}$$

$$k_{dis} = \left(\frac{V}{V^*}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad \text{mit} \quad V^* = \int \left(\frac{\sigma_{t,90}(x,y,z}{\sigma_{t,90,max}}\right)^k dV \tag{4}$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad \text{mit} \quad V_0 = 0{,}01m^3 \; und \; k = 5 \tag{5}$$

Eine anschauliche Darstellung der querzugbeanspruchten Volumina am Beispiel eines Durchbruchs findet sich in Abbildung 35. Verglichen mit der Querzugbeanspruchung bei gekrümmten/satteldachförmigen Bauteilen ist die Größe der querzugbeanspruchten Volumina von Durchbrüchen gering. In den meisten Fällen ist sie kleiner – teils auch deutlich kleiner – als das Referenzvolumen V_0.

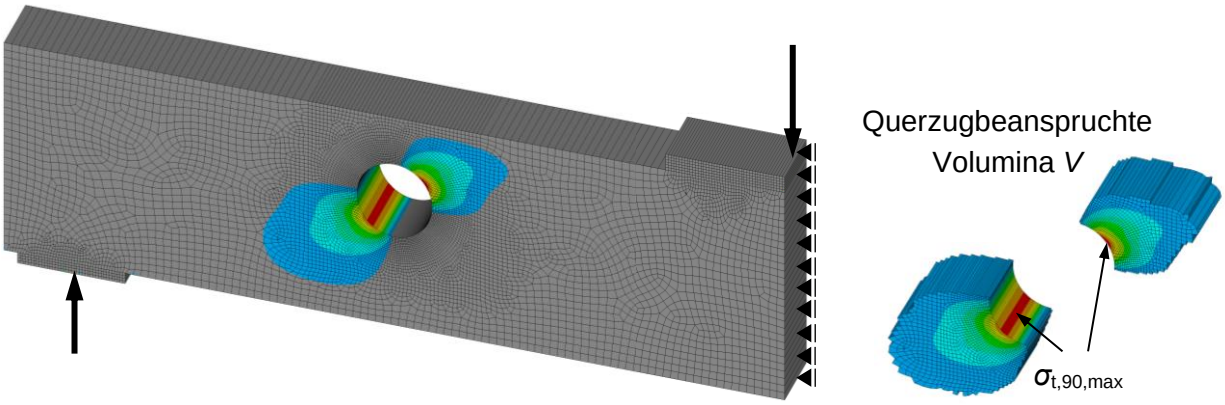


Abbildung 35: Querzugbeanspruchte Volumina an einem Durchbruch

Die folgenden Gegenüberstellungen mit den Versuchsergebnissen sowie Parameterstudien werden durchgehend auf dem Niveau von mittleren Festigkeiten geführt. Die zugrundeliegende Mittelwert der Querzugfestigkeit für das Referenzvolumen V_0 wurde auf Grundlage der Untersuchungen von AICHER & DILL-LANGER (1997) sowie BLAß ET AL. (1998) mit $f_{t,90,mean}$ = 0,83 N/mm² abgeschätzt.

Zusätzlich zu einer Gegenüberstellung im unverstärkten Zustand wird in den folgenden Abbildungen zur Abschätzung des Übergangs vom ungerissenen in den gerissenen Zustand die Auswertung auch für den Zustand vorhandener Verstärkungselemente durchgeführt. Dabei ist sich jedoch vor Augen zu führen, dass der Effekt der Verstärkungselemente infolge der nach einem Anriss auftretenden Verformungen quer zur Faser größer als im ungerissenen Zustand ist. Da die zugrundeliegende Theorie für spröde Versagensformen ausgelegt ist, stellt die Ermittlung daher für den verstärkten Zustand eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung dar.

3.2.2 Vergleich Kleinversuche

- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35

In Abbildung 36 ist für den Fall der exzentrischen Einzeldurchbrüche ein Vergleich der Versuchsergebnisse und der mit dem numerischen Modell abgeschätzten Durchrisslasten dargestellt. Im unverstärkten Zustand kann durchgehend von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden. Im verstärkten Zustand wird die Tendenz annähernd wiedergegeben, die abgeschätzten Werte fallen jedoch durchgehend etwas niedriger aus.

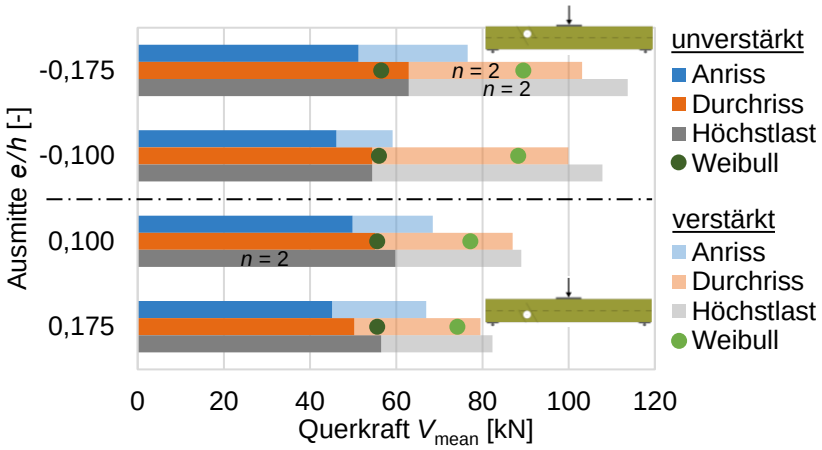


Abbildung 36: Vergleich Versuchsergebnisse - ermittelte Versagenslasten exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35

Der Grund für die abnehmenden Durchrisslasten bei einer Verlagerung der Durchbrüche von der Biegedruckseite in Richtung der Biegezugseite kann aus Abbildung 37 abgelesen werden. In Abhängigkeit der Ausmitte variieren die Positionen der maximalen Querzugspannungen am Durchbruchrand. In der Folge variieren auch die Abstände zwischen diesen Positionen und den Verstärkungselementen. Je größer dieser Abstand, desto geringer der Verstärkungseffekt.

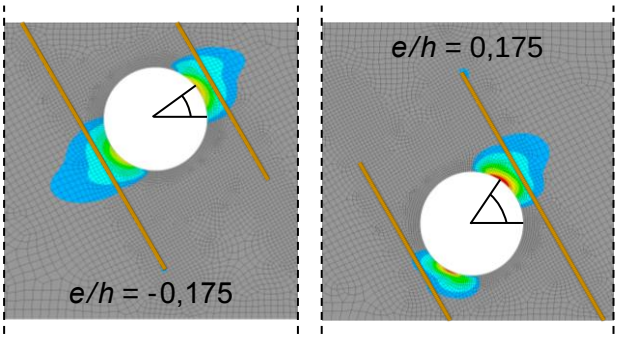


Abbildung 37: Verteilungen der Querzugspannungen zweier verschiedener Konfigurationen im verstärkten Zustand auf gleichem Lastniveau

- Horizontale Gruppen

Auch im Fall der horizontalen Gruppen zeigt sich im unverstärkten Zustand eine gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 38. Im verstärkten Zustand kann aufgrund des vorzeitigen globalen Versagens keine klare Aussage getroffen werden. Jedoch kann auch hier davon ausgegangen werden, dass die entsprechenden Versuchswerte unterschätzt werden.

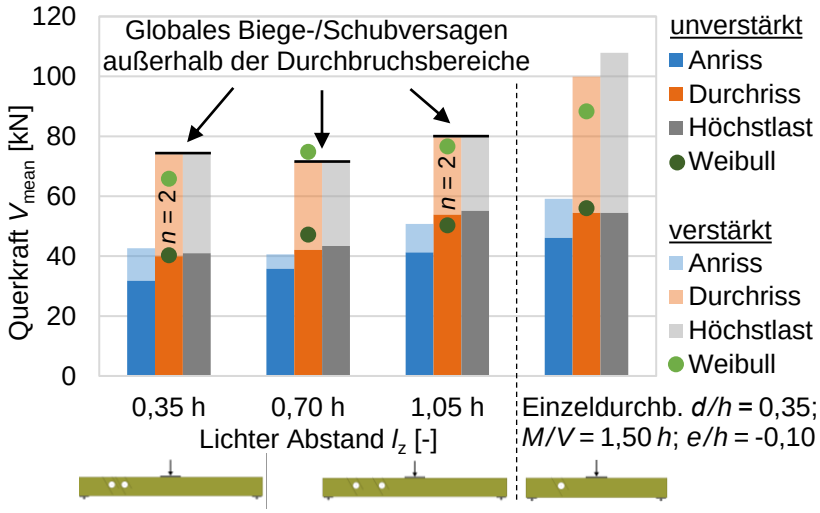


Abbildung 38: Vergleich Versuchsergebnisse - ermittelte Versagenslasten horizontale Gruppen

- Vertikale Gruppe

Im Fall der vertikalen Gruppen zeigt sich ebenfalls durchgehend eine gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 39.

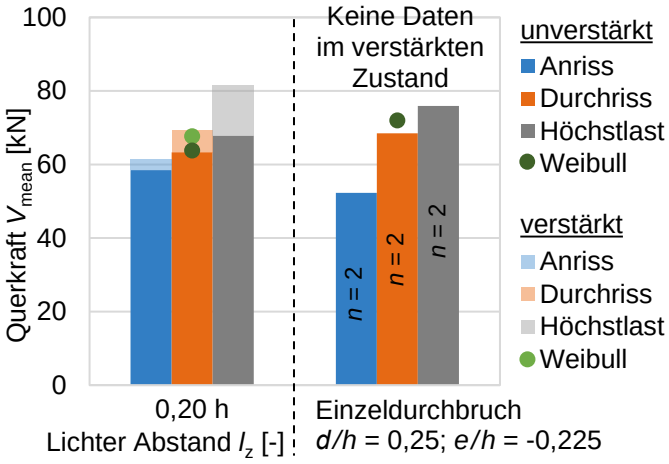


Abbildung 39: Vergleich Versuchsergebnisse - ermittelte Versagenslasten vertikale Gruppe

Der vergleichsweise geringe Verstärkungseffekt kann ebenfalls anhand der Verteilungen der Querzugspannungen erklärt werden, siehe Abbildung 40. Im unverstärkten Zustand war der obere Durchbruch maßgebend für die Bemessung. Aufgrund des vergleichsweise geringen Abstands zwischen den maximalen Querzugspannungen und den Verstärkungselementen ist der Verstärkungeffekt dort deutlich sichtbar. Im Gegensatz dazu zeigt sich am unteren Durchbruch nur ein vergleichsweise geringer Verstärkungseffekt. Aufgrund des größeren Abstandes zwischen maximaler Querzugspannung und Verstärkungselement war dieser Durchbruch maßgebend.

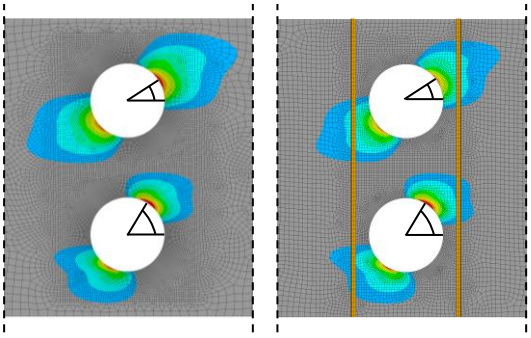


Abbildung 40: Verteilungen der Querzugspannungen im unverstärkten Zustand (links) sowie im verstärkten Zustand (rechts) auf gleichem Lastniveau

- Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,25

Die in Abschnitt 2.1.5 teilweise unerwartet niedrigen Versuchswerte sind in Abbildung 41 den Simulationswerten gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Versuchswerte zum Teil deutlich unter den abgeschätzten Werten liegen. Eine separate Auswertung der beiden neuen Prüfkörper zeigt dagegen eine recht gute Übereinstimmung.

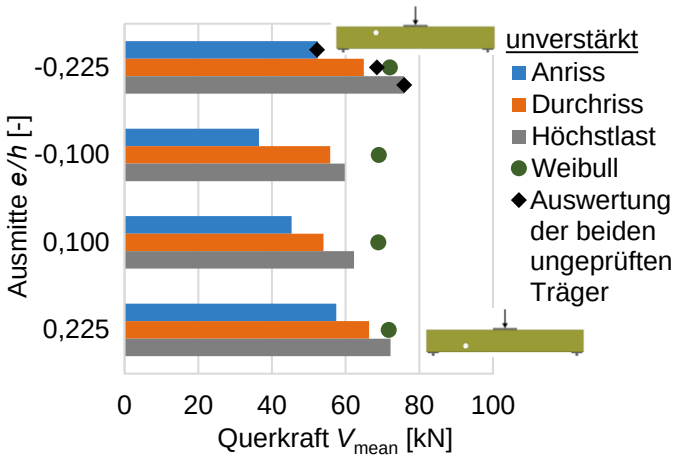


Abbildung 41: Vergleich Versuchsergebnisse - ermittelte Versagenslasten exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,25

3.2.3 Vergleich Großversuche

Im Fall der unverstärkten Großversuche unter einer reinen Beanspruchung durch ein Moment zeigt sich ebenfalls bei beiden Ausmitten eine gute Übereinstimmung, siehe Abbildung 42. Die mithilfe numerischer Berechnungen ermittelten Werte stellen einen Mittelwert dar, der sich aus zwei verschiedenen Berechnungen mit den Materialparametern der Festigkeitsklassen GL 24h sowie GL 28h ergibt.

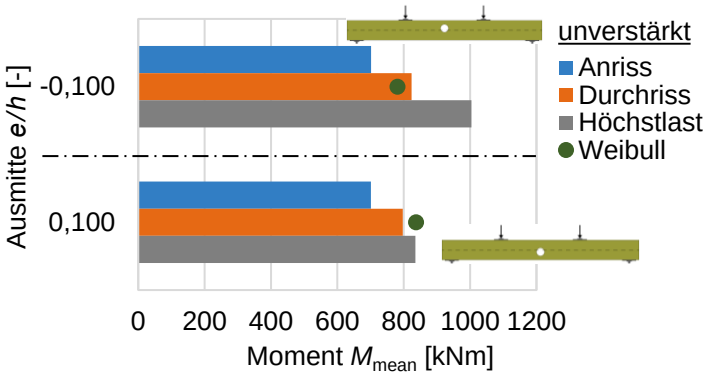


Abbildung 42: Vergleich Versuchsergebnisse - ermittelte Versagenslasten exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,40

3.2.4 Bestimmung von Versagenslasten im verstärkten Zustand

Im Folgenden wird anhand der beiden exzentrischen Konfigurationen $e/h = \pm 0{,}175$ der Kleinversuche dargestellt, inwieweit sich das letztendliche Schubversagen auf Höchstlastniveau mit dem vorgestellten Simulationsmodell ohne Berücksichtigung einer Rissbildung abschätzen lässt. Dazu sind in Abbildung 43 die Spannungsverteilungen im Durchbruchsbereich unter den in den Versuchen ermittelten Höchstlasten dargestellt. Auf Basis von mittleren Elementspannungen sind an den Orten der maximalen Schubspannungen am Durchbruchrand zusätzlich die Werte der Spannungen in Faserrichtung sowie quer zur Faserrichtung angegeben.

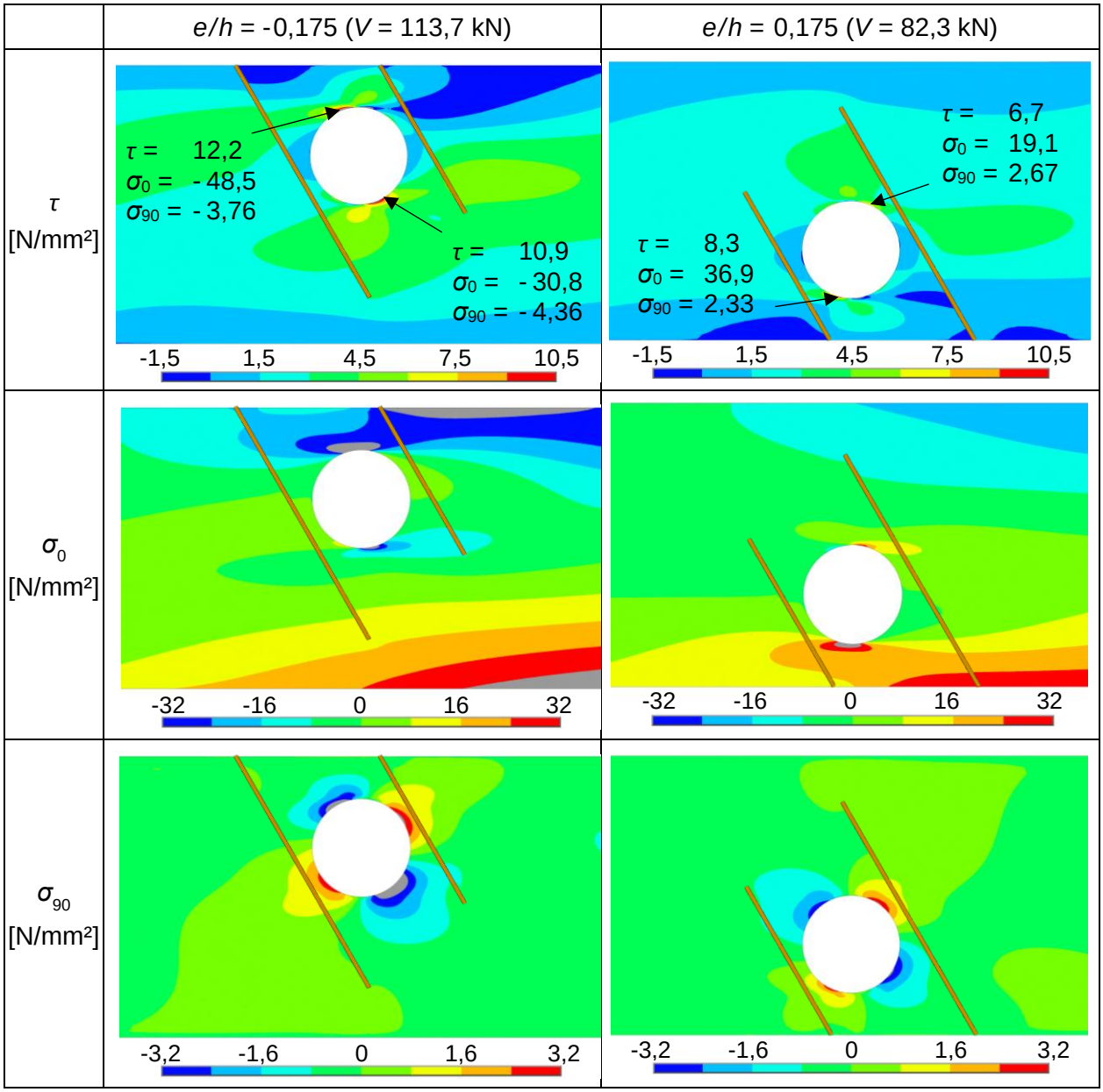


Abbildung 43: Mithilfe des Simulationsmodells ermittelte Spannungsverteilungen im Durchbruchsbereich unter den in den Versuchen ermittelten Höchstlasten

Da bei diesen Spannungsverteilungen lokale Konzentrationen mit teilweise sehr hohen Spannungswerten in allen drei Komponenten vorliegen, erscheint eine alleinige Betrachtung der Schubspannungen als wenig sinnvoll. Daher wurde zur Beurteilung ein Interaktionskriterium nach HEMMER (1985) herangezogen, das neben Spannungen quer zur Faser auch Spannungen in Faserrichtung berücksichtigt. Die im Rahmen der Arbeit von HEMMER (1985) ermittelte Bruchfunktion lautet:

$$F_1 \cdot \sigma_{90} + F_2 \cdot \sigma_0 + F_{11} \cdot {\sigma_{90}}^2 + F_{22} \cdot {\sigma_0}^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_{90} \cdot \sigma_0 + 3 \cdot F_{112} \cdot {\sigma_{90}}^2 \cdot \sigma_0 + 3 \cdot F_{122} \cdot \sigma_{90} \cdot {\sigma_0}^2 + F_{66} \cdot \tau^2 + 3 \cdot F_{166} \cdot \sigma_{90} \cdot \tau^2 + 3 \cdot F_{266} \cdot \sigma_0 \cdot \tau^2 + 12 \cdot F_{1266} \cdot \sigma_{90} \cdot \sigma_0 \cdot \tau^2 = 1 \quad (6)$$

mit

F_1	0,094	[mm²/N]
F_2	-0,00522	
F_{11}	0,0482	[mm⁴/N²]
F_{22}	0,000418	
F_{66}	0,0103	
F_{12}	-0,00113	
F_{112}	-0,000110	[mm⁶/N³]
F_{122}	0,0000204	
F_{166}	0,000310	
F_{266}	0,0000527	
F_{1266}	0,00000221	[mm⁸/N⁴]

Eine Gegenüberstellung der mithilfe Gleichung (6) ermittelten Bruchfunktionen für die an den markierten Punkten jeweils vorliegenden Spannungen in Faserrichtung und den an diesen Punkten aus der FE-Berechnung ermittelten Schubspannungen/Spannungen quer zur Faser findet sich in Abbildung 44. Weder bei einer Anordnung im Biegedruck- noch im Biegezugbereich zeigt sich eine akzeptable Übereinstimmung. Da bei einer Anordnung im Biegezugbereich die querzugbeanspruchten Bereiche in Bereichen hoher Schubspannungen liegen, ist davon auszugehen, dass die Querzug-/Schubspannungen durch einen Anriss/Durchriss teilweise umgelagert werden bzw. sich abbauen. Im Gegensatz dazu liegen die Bereiche hoher Schubspannungen bei einer Anordnung im Biegedruckbereich in den querdruckbeanspruchten Regionen, so dass dort kein Aufreißen quer zur Faser zu erwarten ist. Jedoch zeigt sich auch dort keine gute Übereinstimmung.

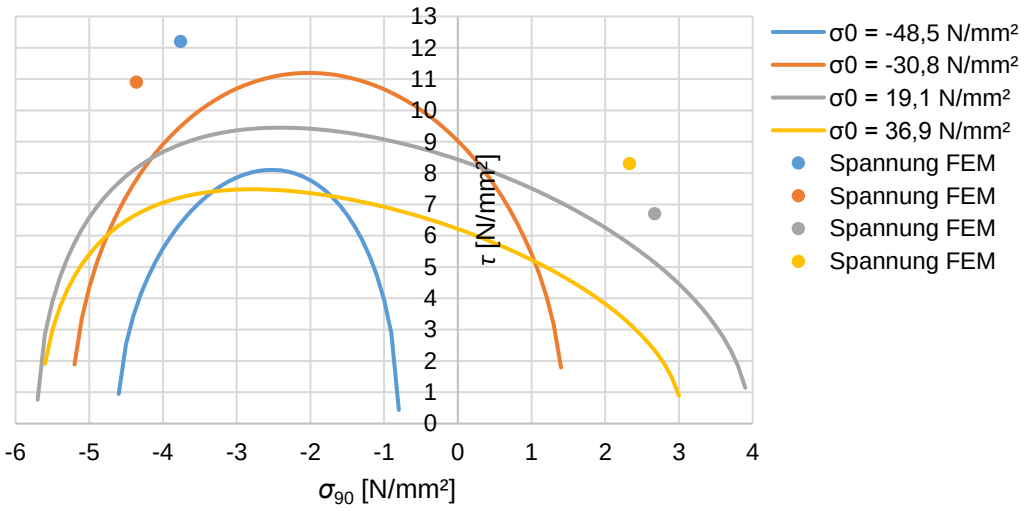


Abbildung 44: Gegenüberstellung der nach HEMMER (1985) ermittelten Bruchfunktionen mit den aus den FE-Berechnungen vorliegenden Spannungen

3.2.5 Bewertung

Mit Ausnahme der zweimalig geprüften Versuchskörper der Versuchsreihe “exzentrische Einzeldurchbrüche *d/h* = 0,25“ zeigt sich bei allen anderen unverstärkten Konfiguration eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und dem Weibull-basierten Bemessungsansatz, so dass dieser als Grundlage für folgende Untersuchungen im unverstärkten Fall dient.

Im verstärkten Fall kann der genannte Ansatz eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung für den Übergang vom ungerissenen in den teilgerissenen Zustand darstellen, da die ermittelten Werte durchgehend etwas unter den Versuchswerten liegen.

Für eine Abschätzung von Versagenslasten auf Basis von Höchstlasten im verstärkten Zustand konnte mit dem Simulationsmodell ohne Berücksichtigung einer Rissbildung keine ausreichende Übereinstimmung erreicht werden. Infolgedessen werden für Betrachtungen hinsichtlich des Effekts der Verstärkungen sowie zur Ermittlung von auftretenden Kräften in den Verstärkungselementen vereinfachte Untersuchungen unter Ansatz von vorgegebenen Rissen durchgeführt, siehe Abschnitt 3.4.

3.3 Exzentrischer Durchbruch ohne Verstärkung

3.3.1 Genereller Einfluss der Ausmitte/Position auf das Tragverhalten

Mechanisch betrachtet führt die Anordnung eines Durchbruchs dazu, dass die im Bereich der Querschnittsschwächung liegenden Spannungsanteile des ungeschwächten Querschnitts nicht mehr ungestört übertragen werden können. In der Folge kommt es am Durchbruchrand sowie in der unmittelbaren Umgebung des Durchbruchs zu Spannungsumlagerungen, welche im Vergleich zum ungeschwächten Querschnitt zusätzliche Beanspruchungen in Faserrichtung, quer zur Faserrichtung sowie Schubbeanspruchungen erzeugen. Qualitativ lässt sich der Einfluss der Ausmitte auf diese zusätzlichen Beanspruchungen anhand des am häufigsten vorkommenden Beispiels eines Biegeträgers in Abbildung 45 erläutern.

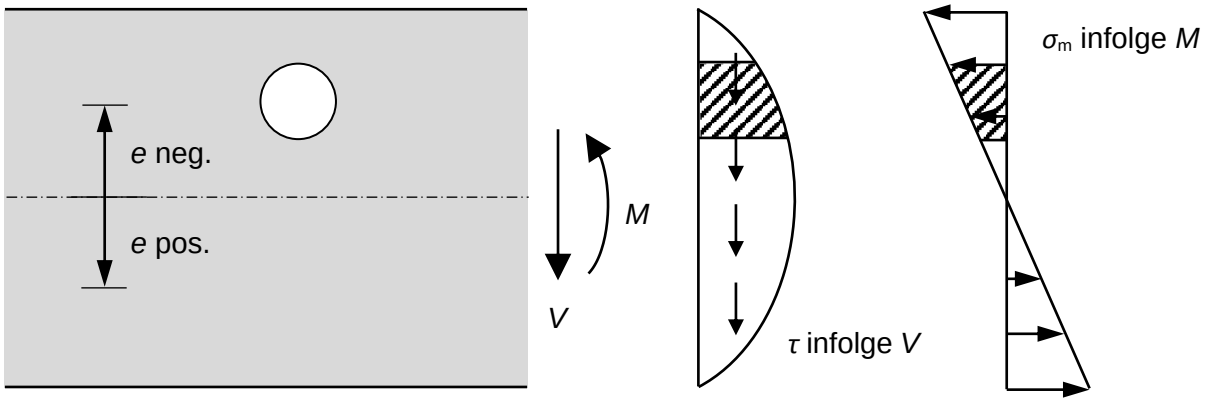


Abbildung 45: Durchbruch in Biegeträger

Entsprechend der technischen Biegetheorie treten bei einem balkenförmigen Bauteil über die Querschnittshöhe gesehen eine parabolische Verteilung der Schubspannungen τ infolge einer Querkraft V sowie eine lineare Verteilung der Biegespannungen $\sigma_{m,y}$ infolge eines Moments M auf. Mit zunehmender Ausmitte verändern sich die beiden umzulagernden Spannungsanteile in der Größe dahingehend, dass diese im Fall der Schubspannungen geringfügig abnehmen sowie im Fall der Biegespannungen deutlich zunehmen. Dementsprechend wirkt sich eine zunehmende

Ausmitte im Hinblick auf das Tragverhalten im Fall der umzulagernden Schubspannungen günstig sowie im Fall der umzulagernden Biegespannungen ungünstig aus. Für jede Gesamtbetrachtung eines Durchbruchs ist eine Superposition dieser beiden gegenläufigen Effekte erforderlich. Die Position des Durchbruchs im Träger (Ausmitte e/h, Schnittkraftverhältnis M/V) bestimmt dabei, in welchem Verhältnis diese Superposition stattfindet und inwieweit daraus ein günstiger/ungünstiger Effekt resultiert.

HAASE (1997) bestimmte u.a. auf Grundlage der Scheibentheorie analytische Lösungen der Differentialgleichungen der drei Spannungskomponenten am Durchbruchrand sowie anhand von FEM-Berechnungen in der Durchbruchumgebung. Die Untersuchungen wurden für verschiedene Belastungssituationen durchgeführt und basierten auf der Annahme einer unendlich ausgedehnten Scheibe und einem ausreichenden Abstand des Durchbruchs zum Scheibenrand. Da im vorliegenden Bericht vorwiegend exzentrische Anordnungen mit teilweise sehr geringen Randabständen betrachtet werden, wird der Einfluss der Ausmitte in den folgenden Abschnitten 3.3.2 - 3.3.4 anhand von FEM-Berechnungen quantitativ erläutert. Die Betrachtungen erfolgen dabei getrennt für die verschiedenen Spannungskomponenten. Hinsichtlich der Belastungssituationen wird sich auf die für einen Biegeträger charakteristischen Beanspruchungen in Form eines Moments *"M"* sowie einer Querkraft *"V"* beschränkt.

Durch die Implementierung in Form zweier Lastfälle lassen sich die Spannungsverteilungen im Bereich des Durchbruchs infolge einer reinen Momentenbeanspruchung sowie einer näherungsweisen reinen Querkraftbeanspruchung erzeugen, siehe Abbildung 46. Als Materialparameter wurden die Mittelwerte der Festigkeitsklasse GL 28h nach DIN EN 14080:2013 zugrunde gelegt.

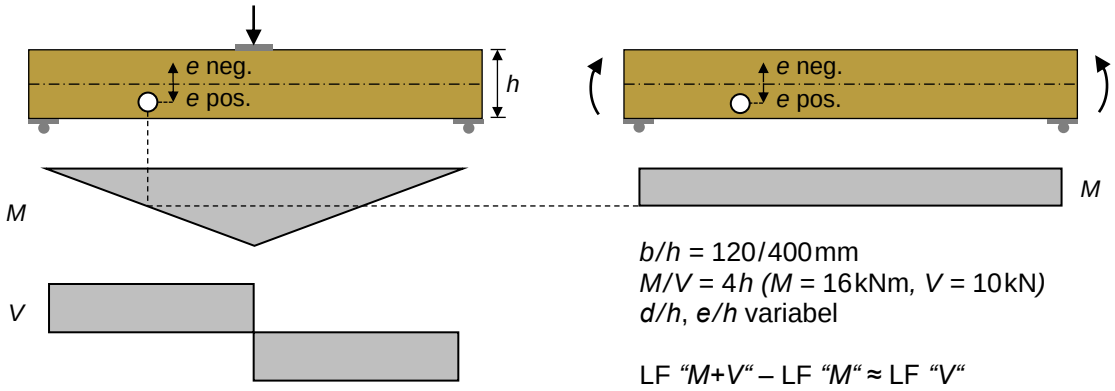


Abbildung 46: Implementierte Lastfälle

Die Abbildungen der folgenden Abschnitte sind jeweils so aufgebaut, dass die einzelnen Zeilen Anordnungen von Durchbrüchen mit unterschiedlichen Ausmitten (Biegedruckbereich, zentrische Anordnung, Biegezugbereich) enthalten. In den linken bzw. rechten Spalten der Abbildungen sind die Spannungen resultierend aus einer reinen Momentenbeanspruchung M (links) bzw. Querkraftbeanspruchung V (rechts) abgebildet. Zum besseren Verständnis sind für ausgewählte Fälle zusätzlich die aus dem FE-Modell entnommenen und für die Abbildungen abstrahierten Spannungsverteilungen entlang eines vertikalen Schnitts durch den Träger im Zentrum des Durchbruchs jeweils mit einem Vergleich zu den Verläufen am Bruttoquerschnitt dargestellt. Die mittleren Spalten der Abbildungen zeigen Diagramme mit den Spannungsverteilungen entlang des abgewickelten Durchbruchrandes (φ = 0° - 360°) getrennt für die Beanspruchungen *"M"* und *"V"*.

3.3.2 Beanspruchung in Faserrichtung

Abbildung 47 veranschaulicht die Verteilung der Spannungen in Faserrichtung.

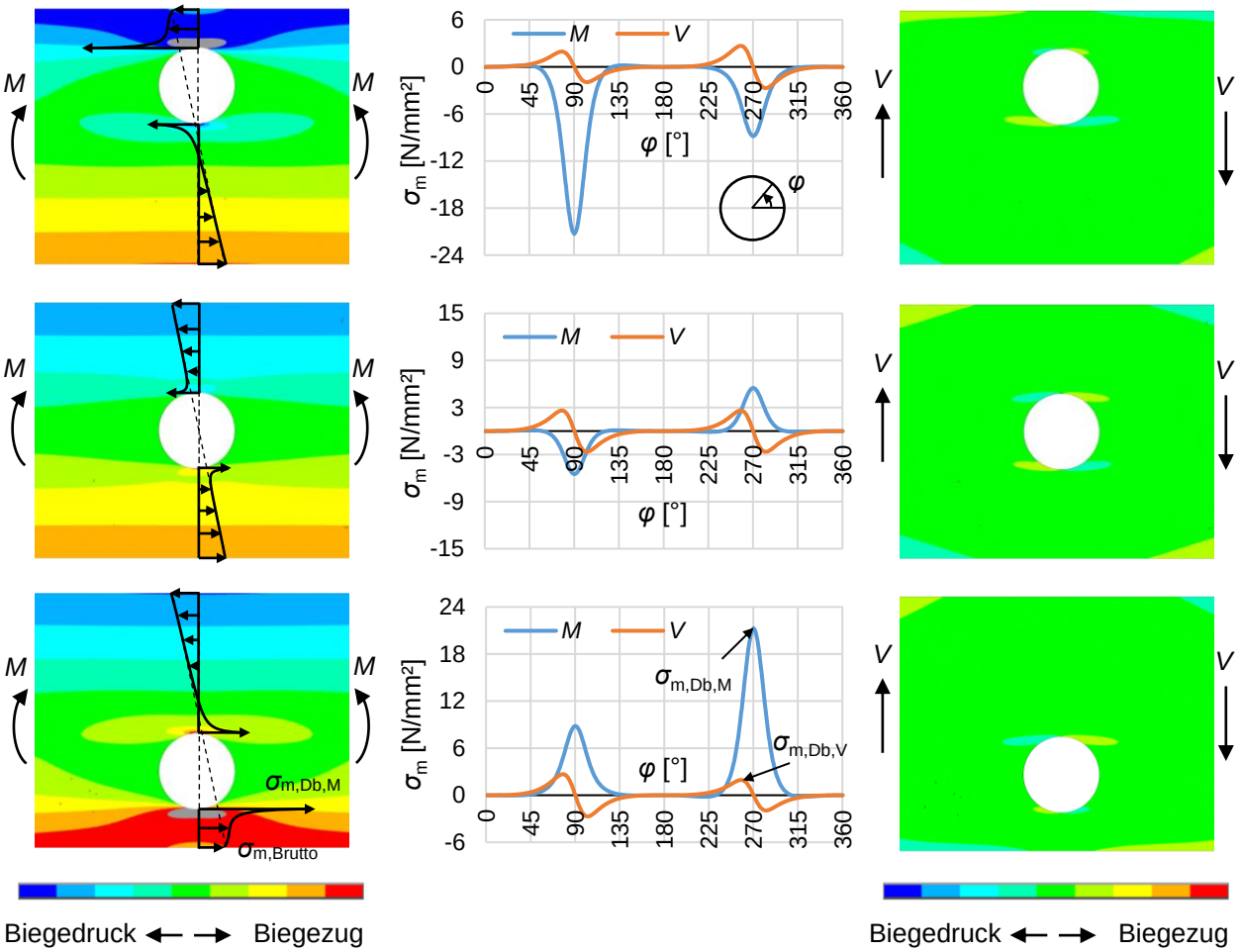


Abbildung 47: Verteilungen der Biegespannungen am Durchbruchrand sowie in der Durchbruchumgebung am Beispiel d/h = 0,30; e/h = -0,20/0/0,20

Infolge einer Momentenbeanspruchung treten aufgrund des Flusses der Biegespannungen um den Durchbruch an den außenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes ($\varphi = 90°$ bei Anordnung im Biegedruckbereich, $\varphi = 270°$ bei Anordnung im Biegezugbereich) maßgebende Spannungsspitzen auf, die ein Vielfaches der Biegespannungen am Bauteilrand betragen können. Deutlich zu erkennen ist zudem der Größenunterschied im Vergleich zu einer zentrischen Anordnung, welcher mit zunehmender Ausmitte stetig anwächst. Diese Erkenntnis würde jedoch der bisher üblichen Vorgehensweise eines Nachweises der Biegespannungen im Durchbruchsbereich unter Zugrundelegung des Nettoquerschnitts widersprechen. Da zudem nicht bekannt ist, inwieweit diese konzentrierten Verteilungen tatsächlich im Bauteil auftreten, wurde versucht, diesen Sachverhalt im Rahmen der Großversuche genauer zu betrachten, siehe 2.2.1.

Die dargestellten Verteilungen der Spannungen in Faserrichtung können eine geometrische Einschränkung hinsichtlich der exzentrischen Lage von Durchbrüchen bedingen. Mit diesen Einflüssen beschäftigten sich FALK ET AL. (2003). Im Rahmen der dort beschriebenen Biegeversuche zur Bestimmung des Einflusses von Querschnittsschwächungen auf die Tragfähigkeit zeigte sich bei Anordnungen im Biegedruckbereich in den überwiegenden Fällen ein lokales Ausknicken des Restquerschnitts oberhalb der Bohrungen. Bei einer Anordnung im Biegezugbereich trat meist

ein Biegezugversagen im Durchbruchsbereich auf. Dabei wurden vergleichsweise kleine Durchbrüche (d/h = 0,13 bzw. d/h = 0,23) bei gleichzeitig großen Ausmitten (e/h = 0,30 bzw. d/h = 0,25) untersucht.

Bei einer Querkraftbeanspruchung treten die Maxima hingegen an den innenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes, leicht versetzt sowie symmetrisch verteilt zur Position 90°/270°, auf. Mit zunehmender Ausmitte nehmen die Werte leicht ab, im Vergleich zur Momentenbeanspruchung tritt die Differenz zur zentrischen Anordnung deutlich weniger ausgeprägt auf.

Der in Abschnitt 3.3.1 dargestellte Einfluss der Ausmitte kann quantitativ aus Abbildung 48 abgelesen werden. Dort dargestellt sind – getrennt für die Lastfälle *"M"* und *"V"* – die Verhältniswerte der maximalen Biegespannungen am der Trägerkante näheren Durchbruchrand zu den maximalen Biege-/Schubspannungen am Bruttoquerschnitt. Der Grund für den Bezug auf am Bruttoquerschnitt ermittelte Werte liegt in der einfacheren Ableitbarkeit aus bekannten Größen wie beispielsweise dem Widerstandsmoment eines Rechteckquerschnitts ($b \cdot h^2/6$). Die Bezeichnungen der Spannungen finden sich auch in Abbildung 47 bzw. Abbildung 49. Im Fall einer Momentenbeanspruchung steigen die Werte mit zunehmender Ausmitte deutlich an, im Fall einer Schubbeanspruchung sinken die Werte mit zunehmender Ausmitte geringfügig ab.

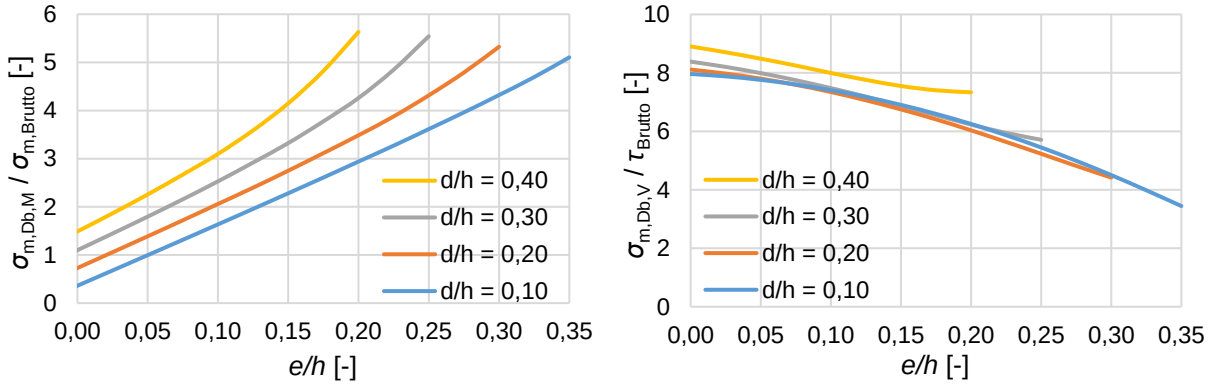


Abbildung 48: Verhältniswerte der max. Biegespannungen am Durchbruchrand zu den max. Biege-/Schubspannungen am Bruttoquerschnitt getrennt für die Lastfälle "M" und "V"

3.3.3 Schubbeanspruchung

Hinsichtlich der Schubspannungsverteilungen liegen die Maxima infolge *"M"* an den außenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes, leicht versetzt sowie symmetrisch verteilt zur Position 90°/270°, siehe Abbildung 49.

Infolge einer Querkraft befinden sich die Maxima – vergleichbar mit den Spannungen in Faserrichtung – an den innenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes, ebenfalls leicht versetzt sowie symmetrisch verteilt zur vertikalen Symmetrieachse.

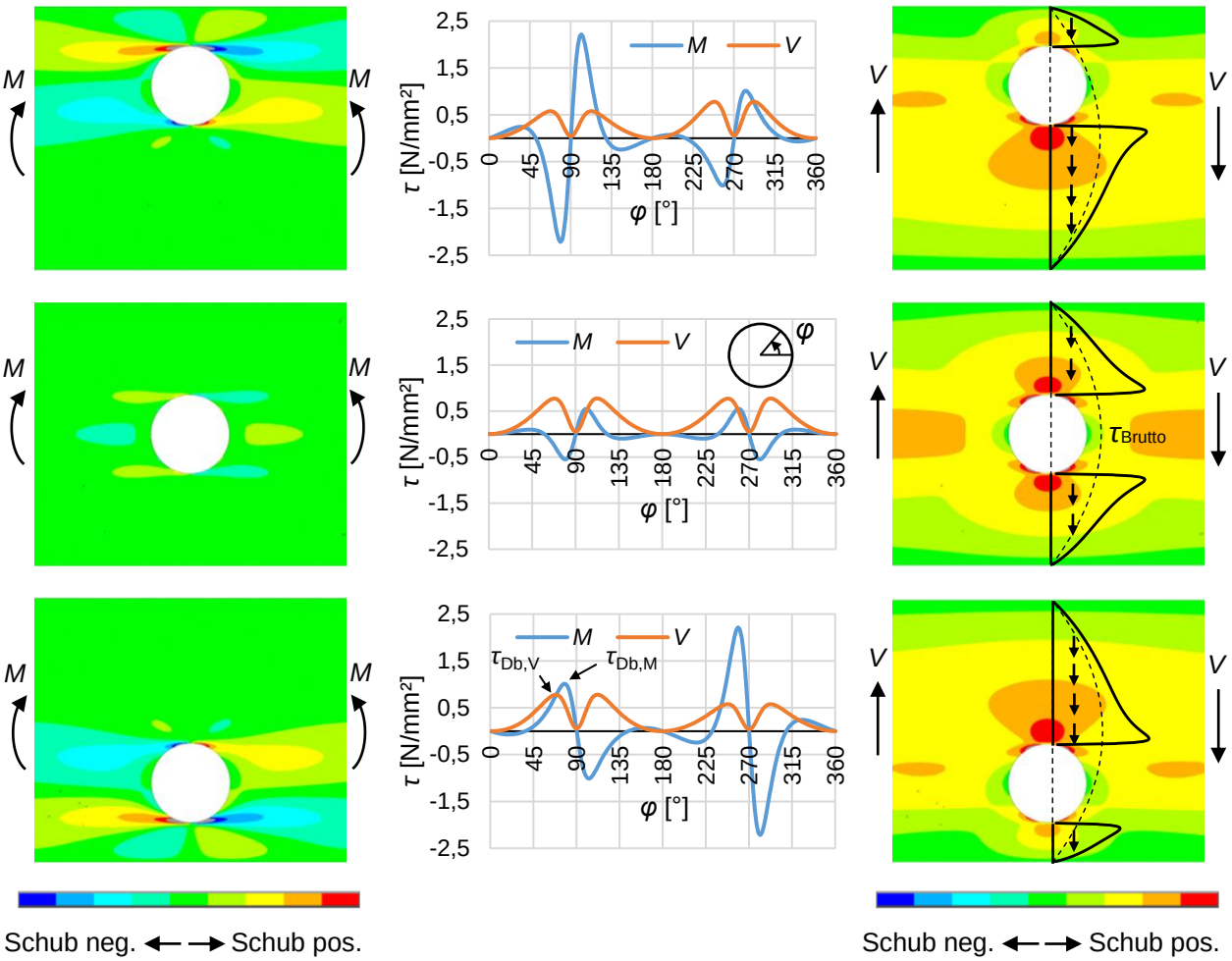


Abbildung 49: Verteilungen der Schubspannungen am Durchbruchrand sowie in der Durchbruchumgebung am Beispiel d/h = 0,30; e/h = -0,20/0/0,20

Eine Momentenbeanspruchung in Kombination mit einer zunehmenden Ausmitte führt wiederum zu einem starken Anstieg der Spannungswerte, eine Querkraftbeanspruchung zu einer leichten Abnahme. Beispielhaft sind dazu in Abbildung 50 für den Quadrant I (0°-90°) die maximalen Schubspannungen am Durchbruch als Verhältniswerte zu den maximalen Biege-/Schubspannungen am Bruttoquerschnitt dargestellt.

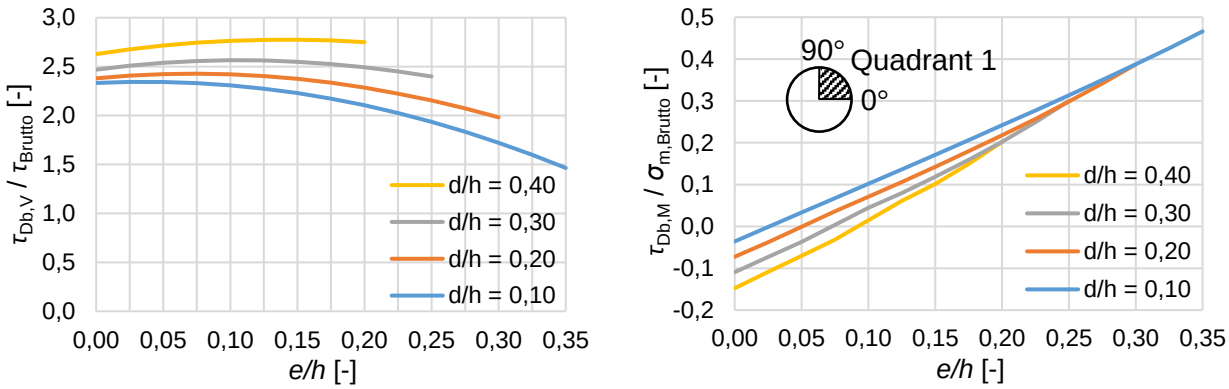


Abbildung 50: Verhältniswerte der max. Schubspannungen am Durchbruchrand zu den max. Biege-/Schubspannungen am Bruttoquerschnitt getrennt für die Lastfälle "M" und "V"

3.3.4 Beanspruchung quer zur Faserrichtung

Hinsichtlich der Spannungen quer zur Faser führt eine zunehmende Ausmitte in der Biegedruckzone dazu, dass sich die beiden querzugbeanspruchten Bereiche infolge einer Momentenbeanspruchung in Richtung der seitlichen Bereiche des Durchbruchrandes (φ = 0°/180°) verschieben, siehe Abbildung 51. Bei einer Anordnung in der Biegezugzone liegen die Maxima an den außenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes, leicht versetzt sowie symmetrisch verteilt zur Position 270°. Im Gegensatz zu einer Anordnung in der Biegedruckzone unterscheiden sich die beiden querzugbeanspruchten Bereiche in der Biegezugzone in ihrer Größe.

Die Maxima infolge einer Querkraft treten wiederum an den innenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes auf und nehmen mit zunehmender Ausmitte ab.

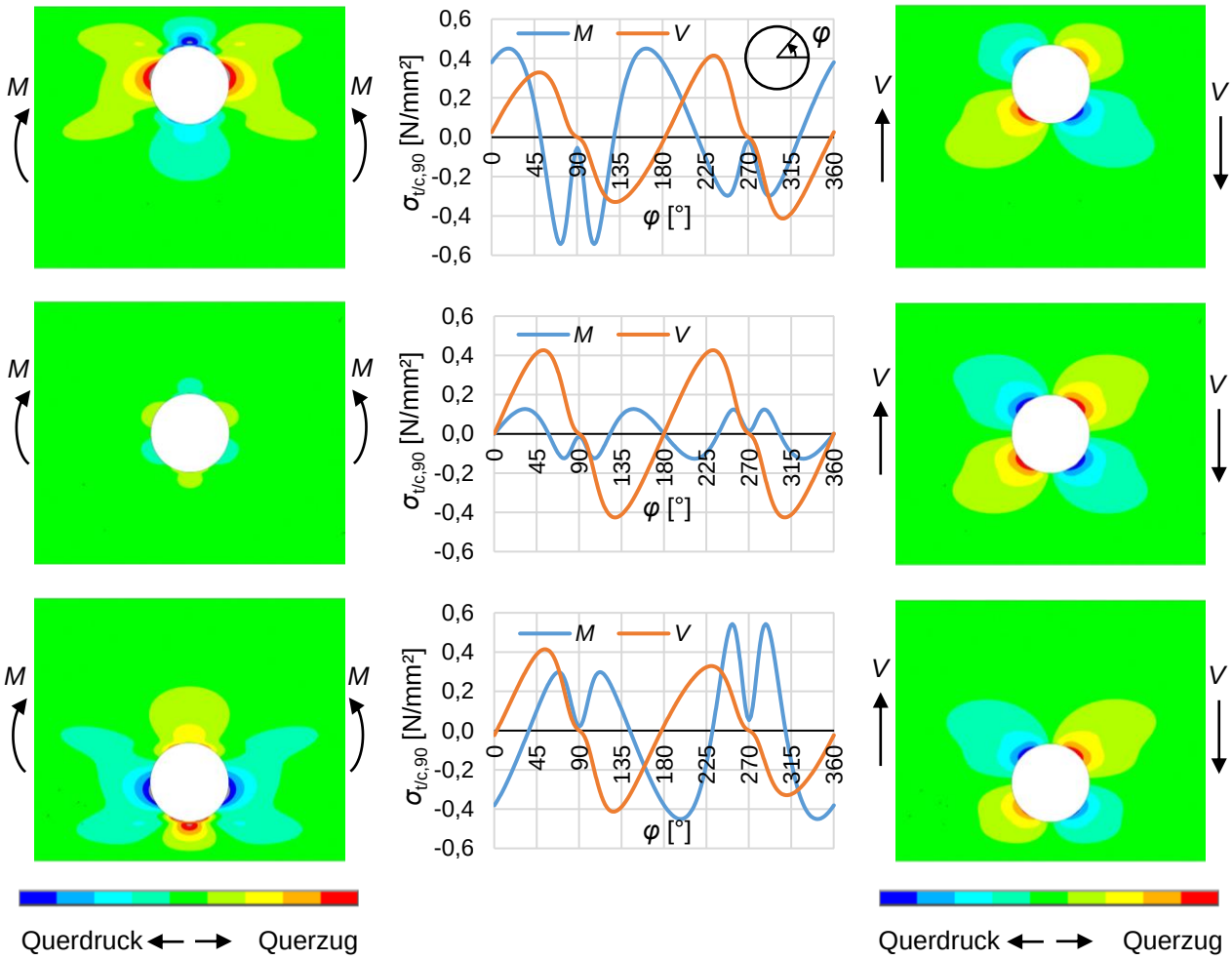


Abbildung 51: Verteilungen der Spannungen quer zur Faser am Durchbruchrand sowie in der Durchbruchumgebung am Beispiel d/h = 0,30; e/h = -0,20/0/0,20

Da für die Erarbeitung eines Bemessungskonzeptes nicht nur die Spannungsverteilungen sondern auch die resultierenden Querzugkräfte sowie die Lagen möglicher Versagensebenen von Bedeutung sind, wurden die Untersuchungen dahingehend erweitert. In Abbildung 52 sind die resultierenden Querzugkräfte in Abhängigkeit der Durchbruchgröße und der Ausmitte getrennt für beide Belastungssituationen dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber, wurden in den Abbildungen nur die querzugbeanspruchten Bereiche dargestellt. Die horizontalen Pfade wurden in ihrer Lage jeweils so definiert, dass sie durch die Maximalwerte der Querzugspannungen am Durchbruchrand verlaufen. Die Ermittlung der resultierenden Querzugkräfte wurde in den Quadranten

I und III durchgeführt, da eine Überlagerung der querzugbeanspruchten Bereiche nur in diesen beiden Quadranten maßgebend werden kann.

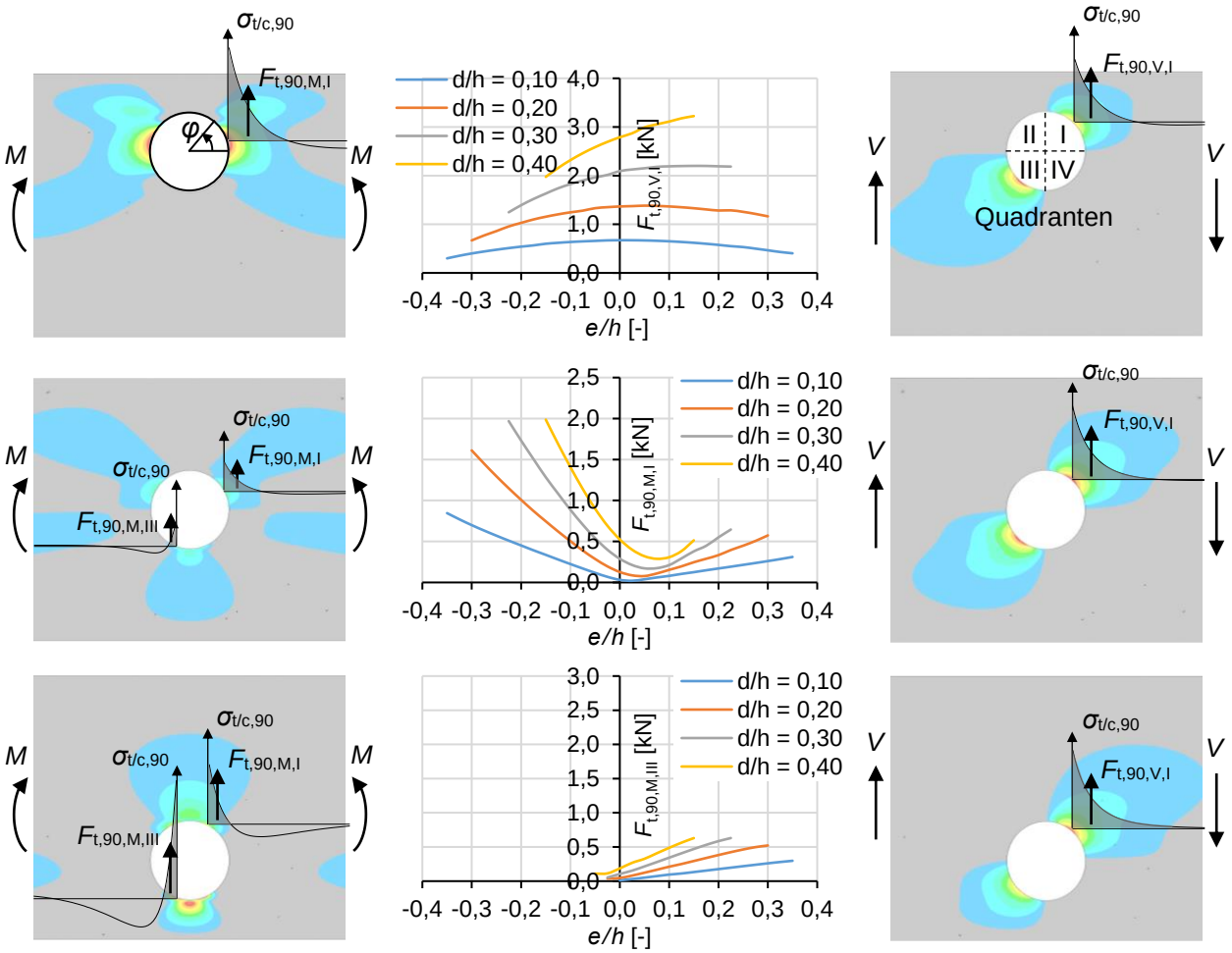


Abbildung 52: Resultierende Querzugkräfte in den Quadranten I und III auf Höhe der maximalen Querzugspannungen für die Lastfälle "M" und "V"

Die Auswertung im Fall einer Querkraftbeanspruchung erfolgte nur für den Quadrant I, da die ermittelten Werte denjenigen in Quadrant III bei einer zur Trägerachse spiegelbildlichen Anordnung entsprechen. Die maximalen Querzugspannungen treten bei den gewählten Orthotropieverhältnissen unabhängig von Durchmesser und Ausmitte konstant bei etwa $\varphi = 53°$ im Quadrant I beziehungsweise $\varphi = 232°$ im Quadrant III auf.

Im Fall einer Momentenbeanspruchung ist jedoch eine Unterscheidung erforderlich, da die querzugbeanspruchten Bereiche bei einer Anordnung des Durchbruchs im Biegezugbereich den querdruckbeanspruchten Bereichen im Fall einer Anordnung im Biegedruckbereich entsprechen, siehe Abbildung 51. Die maximalen Querzugspannungen im Quadrant III treten bei den gewählten Orthotropieverhältnissen unabhängig von Durchmesser und Ausmitte konstant bei etwa $\varphi = 252°$ auf. Im Quadrant I jedoch variiert die Lage in Abhängigkeit der Ausmitte. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 53 als Funktion in Abhängigkeit des Verhältnisses e/d ersichtlich. Anschaulich kann dieser Verhältniswert anhand des umzulagernden Spannungsanteils der Biegespannungen als Verhältnis aus konstantem und linearem Spannungsanteil interpretiert werden. Für betragsmäßig große e/d-Werte nähert sich das Verhalten einem Durchbruch unter konstanter Druck-/Zugspannung an, da der Einfluss des linearen Anteils immer geringer wird. Daraus resultieren in der Darstellung auch die asymptotischen Näherungen an konstante Werte. Insgesamt kann die Lage etwa in einem Bereich $\varphi = 0° - 72°$ variieren.

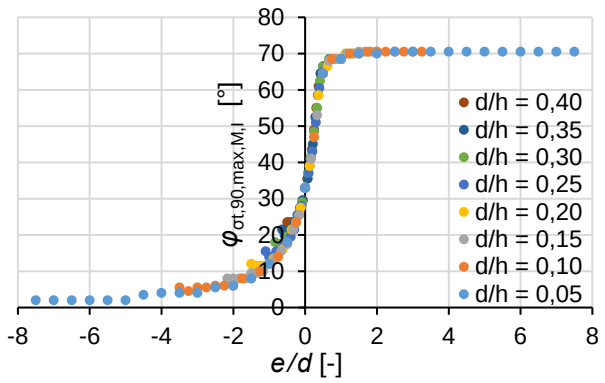


Abbildung 53: Lage der maximalen Querzugspannungen am Durchbruchrand infolge einer Momentenbeanspruchung im Quadrant I

3.3.5 Spannungsinteraktion

Es ist seit langem bekannt, dass in Holzbauteilen das gleichzeitige Auftreten verschiedener Spannungskomponenten im Vergleich zu einer getrennten Betrachtung der einzelnen Komponenten ein Versagen auf einem niedrigeren Niveau bedingen kann. Zur Quantifizierung des Einflusses der Spannungsinteraktion bei exzentrisch angeordneten Durchbrüchen wurde am Beispiel der Trägergröße b/h = 120 mm/400 mm im Rahmen einer Parameterstudie entlang des Durchbruchrandes ein Kriterium mit quadratischer Interaktion der einzelnen Spannungskomponenten (NORRIS) ausgewertet, siehe Abbildung 54. Als Widerstände wurden die charakteristischen Werte der Festigkeitsklasse GL 28h nach DIN EN 14080:2013 verwendet ($f_{m,k}$ = 28 N/mm², $f_{t,90,k}$ = 0,5 N/mm², $f_{c,90,k}$ = 2,5 N/mm², $f_{v,k}$ = 3,5 N/mm² ohne Berücksichtigung eines Rissfaktors k_{cr}). Die Beanspruchung wurde dabei für jede Durchbruchsituation so angepasst, dass sich infolge der Querzugbeanspruchung ein Ausnutzungsgrad von 1,0 ergibt. Zum einen lassen sich dadurch die Ergebnisse untereinander vergleichen und zum anderen kann an den Größenanteilen > 1,0 der Einfluss der Spannungen in Faserrichtung sowie der Schubspannungen direkt abgelesen werden.

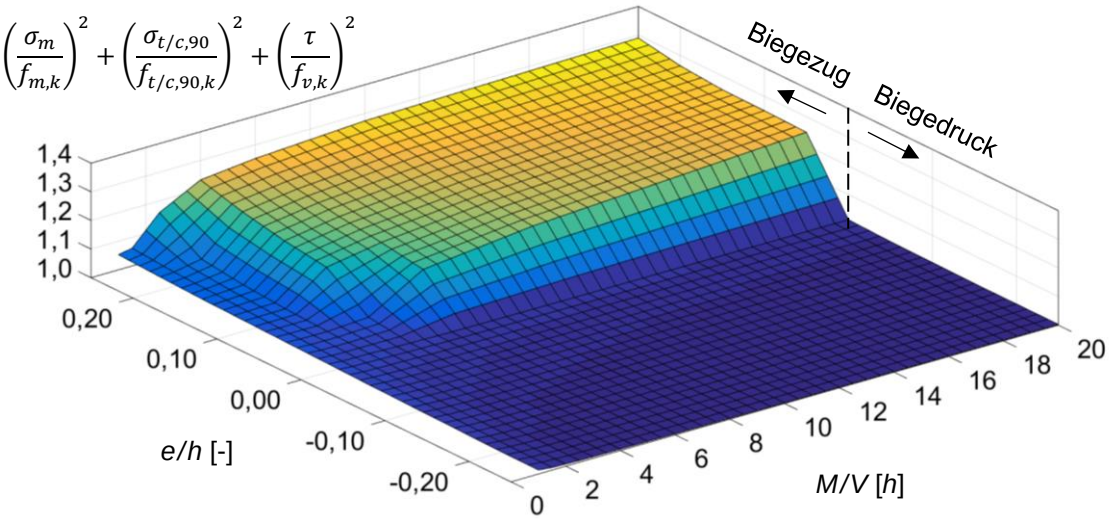


Abbildung 54: Spannungsinteraktion am Beispiel d/h = 0,30 in Abhängigkeit der Lage des Durchbruchs

Es ist ersichtlich, dass das gleichzeitige Auftreten der verschiedenen Spannungskomponenten bei auflagernahen Durchbrüchen (kleines Schnittkraftverhältnis M/V), bei zentrischen Anordnungen sowie bei Anordnungen im Biegedruckbereich von vernachlässigbarem Einfluss ist. Dies

deckt sich mit Folgerungen von KOLB & EPPLE (1985) und HÖFFLIN (2005) für zentrische Durchbrüche. Bei einer Anordnung im Biegezugbereich und Schnittkraftverhältnissen $M/V \geq 2{,}5h$ sind hingegen deutliche Erhöhungen zu erkennen. Begründen lässt sich dies dadurch, dass die Bereiche hoher Spannungen für alle Spannungskomponenten in ähnlichen Bereichen liegen (etwa im Bereich 250° - 270°), siehe 3.3.2 - 3.3.4.

Hinsichtlich der Interaktion von Spannungen an Durchbrüchen gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansichten. SCHEER & HAASE (2000) halten ein Versagenskriterium auf Basis eines kombinierten Spannungszustandes für nicht sinnvoll, da die Querzugbeanspruchbarkeit vom beanspruchten Volumen abhängt und somit unterschiedliche Faseranschnittswinkel berücksichtigt werden müssten. Da unklar ist, inwieweit o.g. Sachverhalt zutreffend ist, wurden versucht, diese Fragestellung in zusätzlichen Versuchen zu klären. Entsprechend Abbildung 54 war dazu eine Anordnung im Biegezugbereich bei einem möglichst großen Schnittkraftverhältnis am besten geeignet. Versuchstechnisch umgesetzt wurde dies im Rahmen der Großversuche mittels der Konfiguration $d/h = 0{,}40$, $e/h = 0{,}10$ in einem 4-Punkt Biegeversuch, siehe Abschnitt 2.2.1. Aus einem Vergleich der Versuchsergebnisse und der abgeschätzten Durchrisslasten unter alleiniger Berücksichtigung der Querzugbeanspruchung ergab sich eine recht gute Übereinstimmung, siehe 3.2.3, jedoch kann daraus der Einfluss der Interaktion nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

3.3.6 Versagenslasten auf Grundlage des Weibull-Ansatzes

Da sich in den Abschnitten 3.2.2 sowie 3.2.3 im unverstärkten Zustand durchgehend eine gute Übereinstimmung der Versuchswerte mit den abgeschätzten Durchrisslasten aus den numerischen Berechnungen in Kombination mit dem Bemessungsansatz nach Weibull gezeigt hatte, wurde versucht, die Datenbasis zur Ableitung eines Bemessungsverfahrens zu erweitern. Unter Variation der Parameter Durchbruchgröße d/h, Ausmitte e/h sowie Schnittkraftverhältnis M/V wurden für die in den Kleinversuchen verwendete Trägergröße $b/h = 120\,\text{mm}/400\,\text{mm}$ die für die Bemessung maßgebenden Durchrisslasten bestimmt. Dabei wurde – wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt – eine mittlere Querzugfestigkeit von $f_{t,90,mean} = 0{,}83\ \text{N/mm}^2$ zugrunde gelegt. In Abbildung 55 sind die Ergebnisse für zwei verschiedene Durchbruchgrößen in Abhängigkeit der genannten Parameter dargestellt. Dabei zeigt sich, dass eine Ausmitte im auflagernahen Bereich (kleines Schnittkraftverhältnis) hinsichtlich eines Querzugversagens eine geringfügig günstige Wirkung hat, mit zunehmendem Momenteneinfluss (steigendes Schnittkraftverhältnis) jedoch eine zunehmend ungünstige. Entsprechend Abbildung 45 lässt sich dies mit den umzulagernden Spannungsanteilen erklären. Im auflagernahen Bereich hat der Momentenanteil nur einen untergeordneten Einfluss. Der umzulagernde Anteil der Schubspannungsverteilung nimmt hier mit zunehmender Ausmitte ab, so dass höhere Durchrisslasten erreicht werden. Mit zunehmendem Schnittkraftverhältnis nimmt der Einfluss des umzulagernden Anteils der Biegespannungsverteilung jedoch zu, so dass infolgedessen die Durchrisslasten entsprechend abfallen.

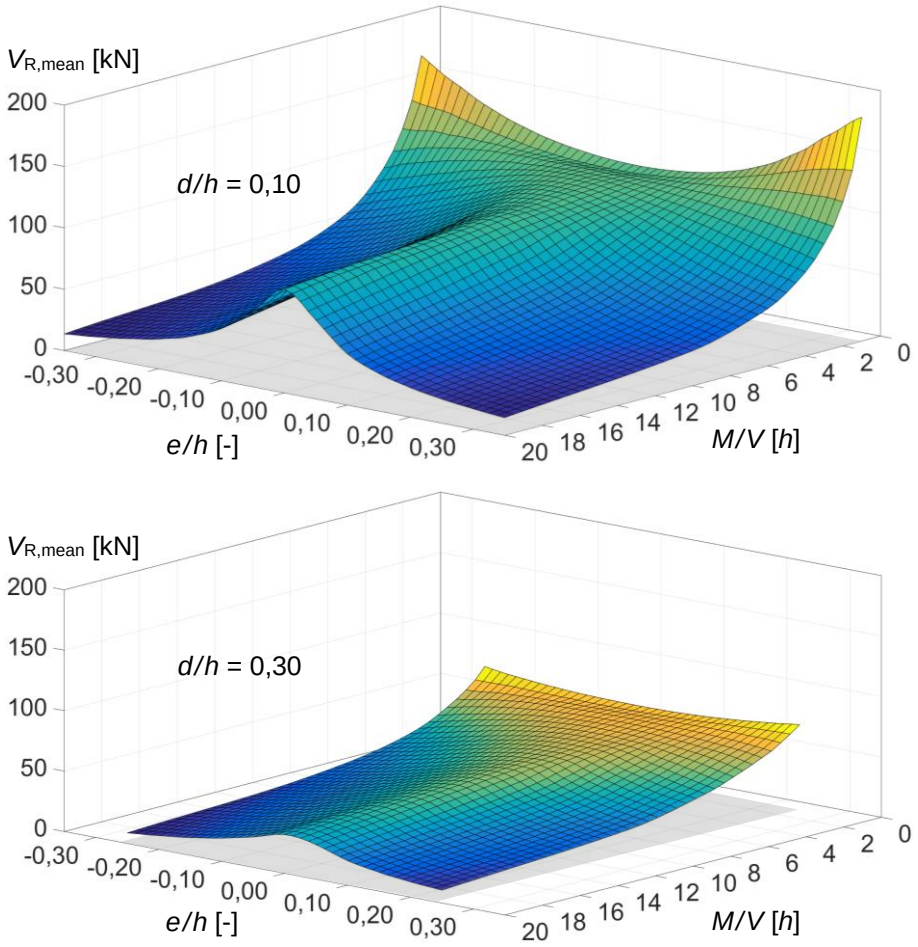


Abbildung 55: Abgeschätzte Durchrisslasten zweier Durchbruchgrößen in Abhängigkeit der Position im Träger

Der Einfluss der Ausmitte für die beiden oben dargestellten Durchbruchgrößen lässt sich detaillierter aus Abbildung 56 ablesen. Dort dargestellt sind alle ermittelten Durchrisslasten im Verhältnis zu den ermittelten Durchrisslasten bei zentrischer Anordnung (e/h = 0). Werte ≤1,0 deuten eine geringere Beanspruchbarkeit im Vergleich zur zentrischen Anordnung an, Werte >1,0 eine höhere. Daraus ist ersichtlich, dass eine Ausmitte bei kleinen Durchbrüchen (d/h = 0,10) bis etwa einem Schnittkraftverhältnis M/V = 2,5h und bei größeren Durchbrüchen (d/h = 0,30) bis etwa einem Schnittkraftverhältnis M/V = 1,5h – 2,0h einen positiven bis neutralen Effekt auf ein Querzugversagen hat. Mit zunehmendem Schnittkraftverhältnis schnüren sich die Positionen konstanter Verhältniswerte zunehmend ein.

Es wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Aussagen nur für die Komponente Querzug gelten und die anderen Spannungskomponenten zu einer zusätzlichen Eingrenzung führen können, siehe dazu Abschnitt 3.3.2.

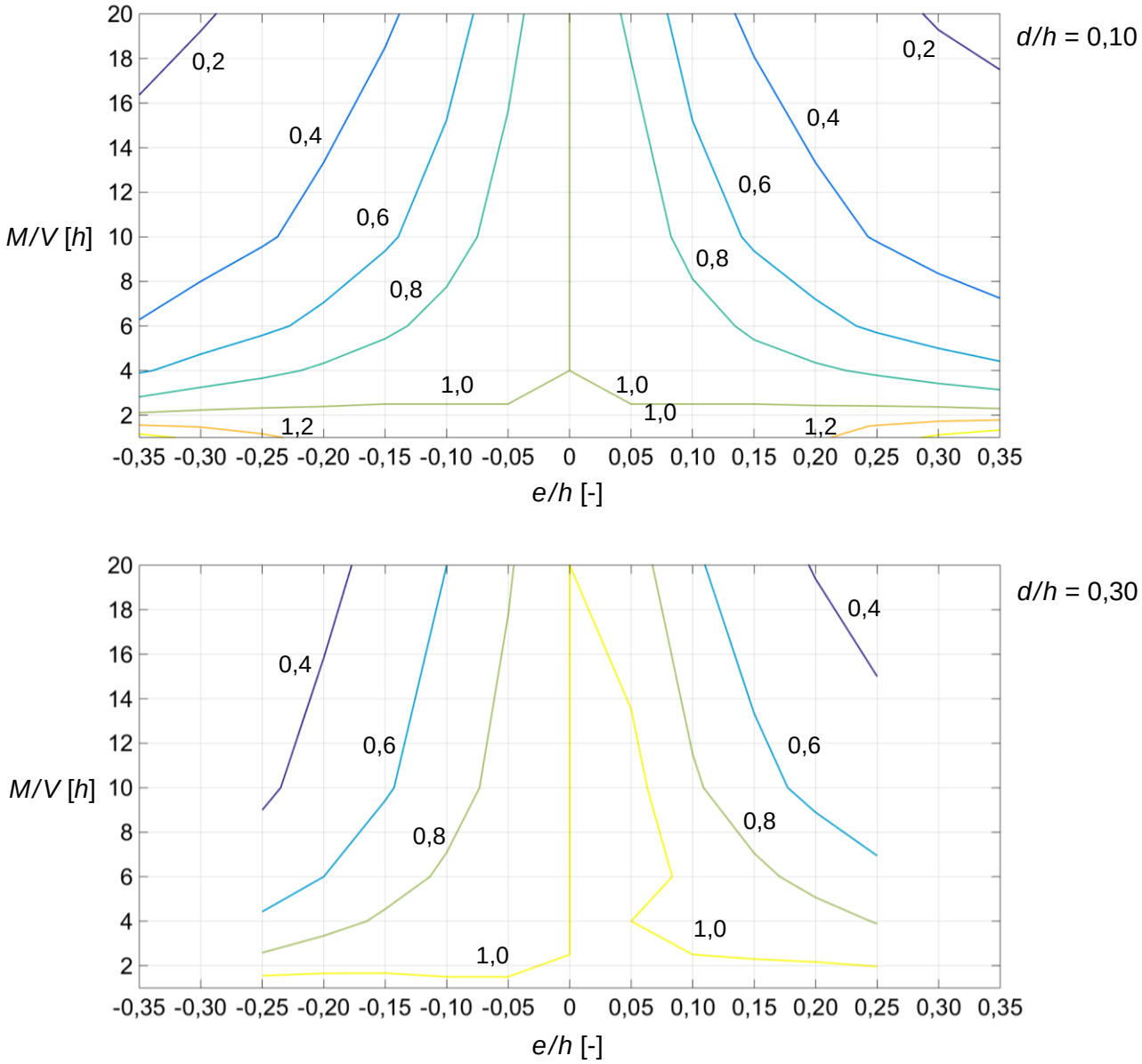


Abbildung 56: Verhältniswerte der ermittelten Durchrisslasten zu den Durchrisslasten bei einer zentrischen Anordnung

3.4 Verstärkung exzentrischer Durchbrüche mittels innenliegender Verstärkungen

Zur Quantifizierung des Effekts der Verstärkungselemente auf exzentrisch angeordnete Durchbrüche, wird in den Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.3 die Versuchsserie “Exzentrische Einzeldurchbrüche d/h = 0,35“ der Kleinversuche hinsichtlich den beiden Beanspruchungen Querzug sowie Schub sowohl im ungerissenen als auch im teilgerissenen Zustand näher betrachtet, siehe Abbildung 57. Zur Darstellung des Einflusses verschiedenartig geneigter Verstärkungselemente werden die drei in Abschnitt 3.1.4 behandelten Neigungen α = 90°, 60°, 45° herangezogen. Wie in den durchgeführten Versuchen werden dabei über die Querschnittsbreite gesehen jeweils 2 Vollgewindeschrauben d = 10 mm angesetzt. Der lotrechte Abstand der Verstärkungselemente zwischen Schraubenachse und Durchbruchrand wird mit 20 mm (= 2 d) angenommen.

3.4.1 Einfluss der Verstärkung im ungerissenen Zustand

Zunächst wird der Einfluss der Verstärkung im ungerissenen Zustand getrennt für die Beanspruchungen Querzug sowie Schub erläutert. Die Darstellungsweise erfolgt für jede Durchruchsituation anhand zweier Pfade, welche die potentiellen Rissebenen darstellen sollen, siehe Abbildung 57.

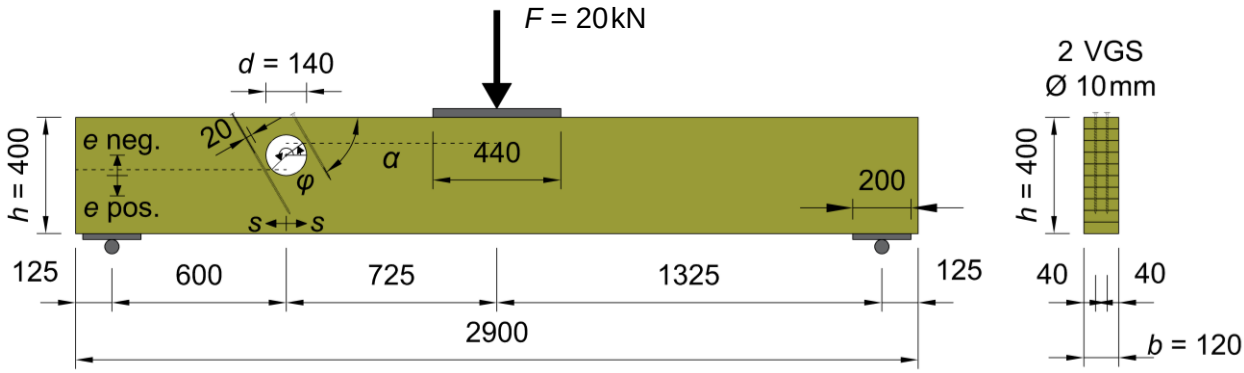


Abbildung 57: Lage der Pfade entlang der potentiellen Rissebenen

Ein Pfad erstreckt sich von Durchbruchmitte bis Trägermitte und ein Pfad von Durchbruchmitte bis Trägerende. Die Variable s kennzeichnet in beide Richtungen den horizontalen Abstand von der Mitte des Durchbruchs. Die Position der Pfade orientiert sich dabei an den Stellen, die aus den Versuchen als potentielle Rissebenen ermittelt wurden. In den folgenden Diagrammen ist die Position der Pfade jeweils über die Angabe des Winkels φ beschrieben. Eine schematische Darstellung der Pfadpositionen am Durchbruch dient der leichteren Nachvollziehbarkeit.

Der Übersichtlichkeit wegen beschränkt sich die Darstellung der Ergebnisse entlang dieser Pfade auf die zwei extremalen Ausmitten $e/h = \pm 0{,}175$. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Verläufe zu ermöglichen, sind die Ergebnisse durchgehend für eine Querkraft $V = 10\,\text{kN}$ ($F = 20\,\text{kN}$) ermittelt worden. Die dargestellten Verläufe beschreiben die Situationen im Träger ohne einen Durchbruch, mit einem unverstärkten Durchbruch sowie mit einem unter $\alpha = 90°/60°/45°$ geneigten Vollgewindeschrauben verstärkten Durchbruch. Zusätzlich sind in den äußeren Bereichen der Diagramme jeweils die Summen der Kräfte in den beiden Vollgewindeschrauben angegeben.

- Querzug

In Abbildung 58 sind die Verläufe der Querzugspannungen für die beiden genannten Fälle dargestellt. Ohne einen Durchbruch sind erst ab Abständen von etwa $1{,}5d$ Einflüsse aus den Lasteinleitungspunkten ersichtlich. Bei der Lage des Durchbruchs in der Biegedruckzone sind die größten Reduktionen bei unter $\alpha = 60°$ geneigten Vollgewindeschrauben festzustellen, bei der Lage in der Biegezugzone bei unter $\alpha = 45°$ geneigten Vollgewindeschrauben. Während unter $\alpha = 90°$ geneigte Verstärkungselemente in der Biegedruckzone noch zu einer sichtbaren Reduktion der Querzugspannungen führen, ist in der Biegezugzone kaum ein Effekt erkennbar. Generell liegen die Schraubenkräfte der beiden geneigten Anordnungen deutlich über denen einer senkrechten Anordnung. Die höchsten Schraubenkräfte liegend durchgehend bei $\alpha = 45°$ vor.

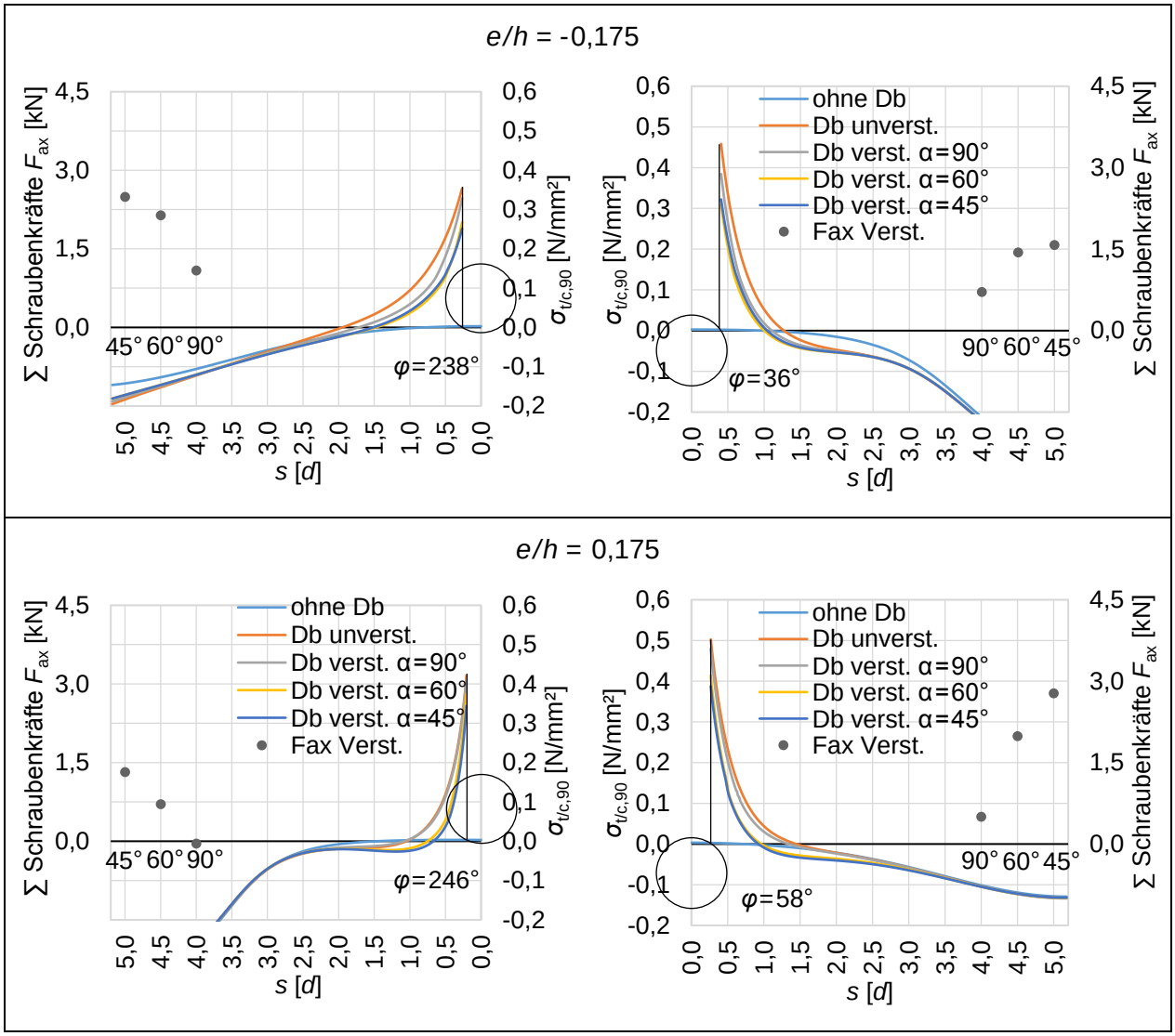


Abbildung 58: Verläufe der Querzugspannungen entlang der beiden potentiellen Rissebenen infolge einer Querkraft V = 10kN

Werden nicht die Spannungen entlang der potentiellen Rissebenen betrachtet sondern die Durchrisslasten infolge Querzug nach Abschnitt 3.2.1 ermittelt, die eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung für einen Übergang vom ungerissenen in den teilgerissenen Zustand beschreiben, so lassen sich daraus ähnliche Schlussfolgerungen ziehen, siehe Abbildung 59.

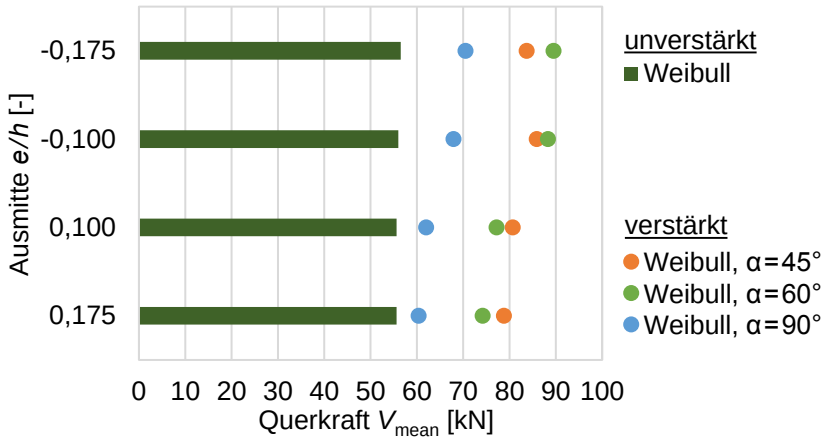


Abbildung 59: Ermittelte Durchrisslasten infolge Querzug für verschiedene Neigungen der Verstärkungselemente mit einem konstanten lotrechten Abstand a zum Durchbruchrand

Diesen Untersuchungen liegt – wie oben erwähnt – ein konstanter lotrechter Abstand *a* zwischen Schraubenachse und Durchbruchrand zugrunde. Bei unterschiedlichen Neigungen der Verstärkungselemente resultieren daraus jedoch unterschiedliche horizontale Abstände zwischen den Verstärkungselementen und den maximalen Querzugspannungen am Durchbruchrand. Im Zuge der Untersuchungen hat sich jedoch gezeigt, dass der Abstand der Verstärkungselemente von den maximalen Querzugspannungen einen deutlichen Einfluss für das Lastniveau von Querzugrissen hat. In Abbildung 60 wurde dieser quantifiziert, indem der Abstand der Verstärkungselemente vom Durchbruchrand für eine konstante Neigung der Verstärkungselemente (α = 60°) variiert wurde. Ein zunehmender Abstand *a* resultierte dabei in abnehmenden Durchrisslasten, wobei die Änderungen zwischen den einzelnen Stufen mit zunehmendem Abstand abnehmen. Für sehr große Abstände nähern sich die Werte denen des unverstärkten Zustands an.

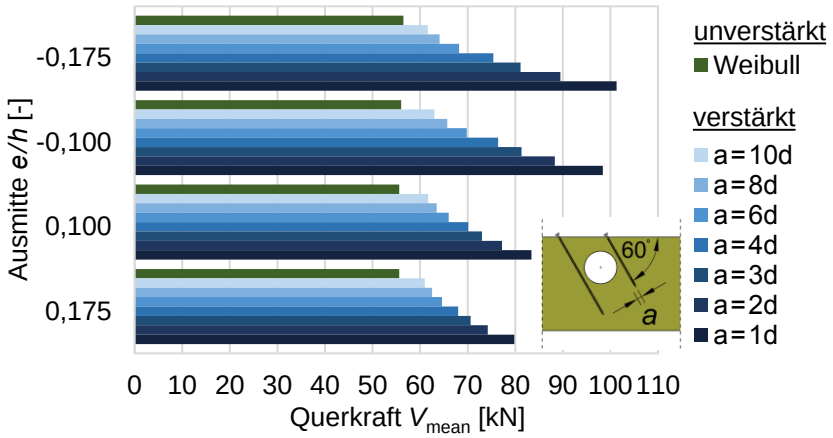


Abbildung 60: Ermittelte Durchrisslasten infolge Querzug in Abhängigkeit des Abstandes der Verstärkungselemente

Um keinen kombinierten Einfluss aus Neigung und Abstand sondern nur den Einfluss der Neigung alleine bewerten zu können, wurde die in Abbildung 59 dargestellte Untersuchung wiederholt. Dabei wurde der Schnittpunkt zwischen der Schraubenachse von unter α = 90° angeordneten Verstärkungen im Abstand *a* = 10 mm vom Durchbruchrand und der potentiellen Rissebene als Fixpunkt verwendet, durch den alle drei verschiedenartig geneigten Verstärkungselemente verliefen. Das Ergebnis davon ist in Abbildung 61 dargestellt. Wenngleich sich die Werte im Vergleich zur Abbildung 59 geringfügig ändern, zeigt sich, dass bei einer geneigten Anordnung eine stärkere Reduktion der Querzugbeanspruchung vorliegt.

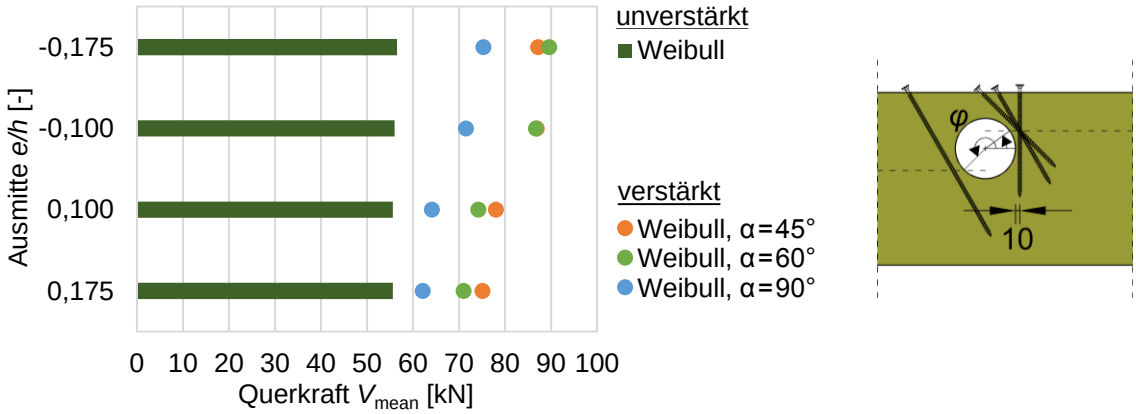


Abbildung 61: Ermittelte Durchrisslasten infolge Querzug für verschiedene Neigungen der Verstärkungselemente mit einem konstanten horizontalen Abstand zur maximalen Querzugspannung

- Schub

Analog zu den Verläufen der Querzugspannungen enthält Abbildung 62 die Verläufe der Schubspannungen entlang der definierten Pfade. Die Summe der Kräfte in den beiden Verstärkungselementen wurde aus den Darstellungen zu Querzug übernommen, so dass die Information in beiden Fällen vorhanden ist.

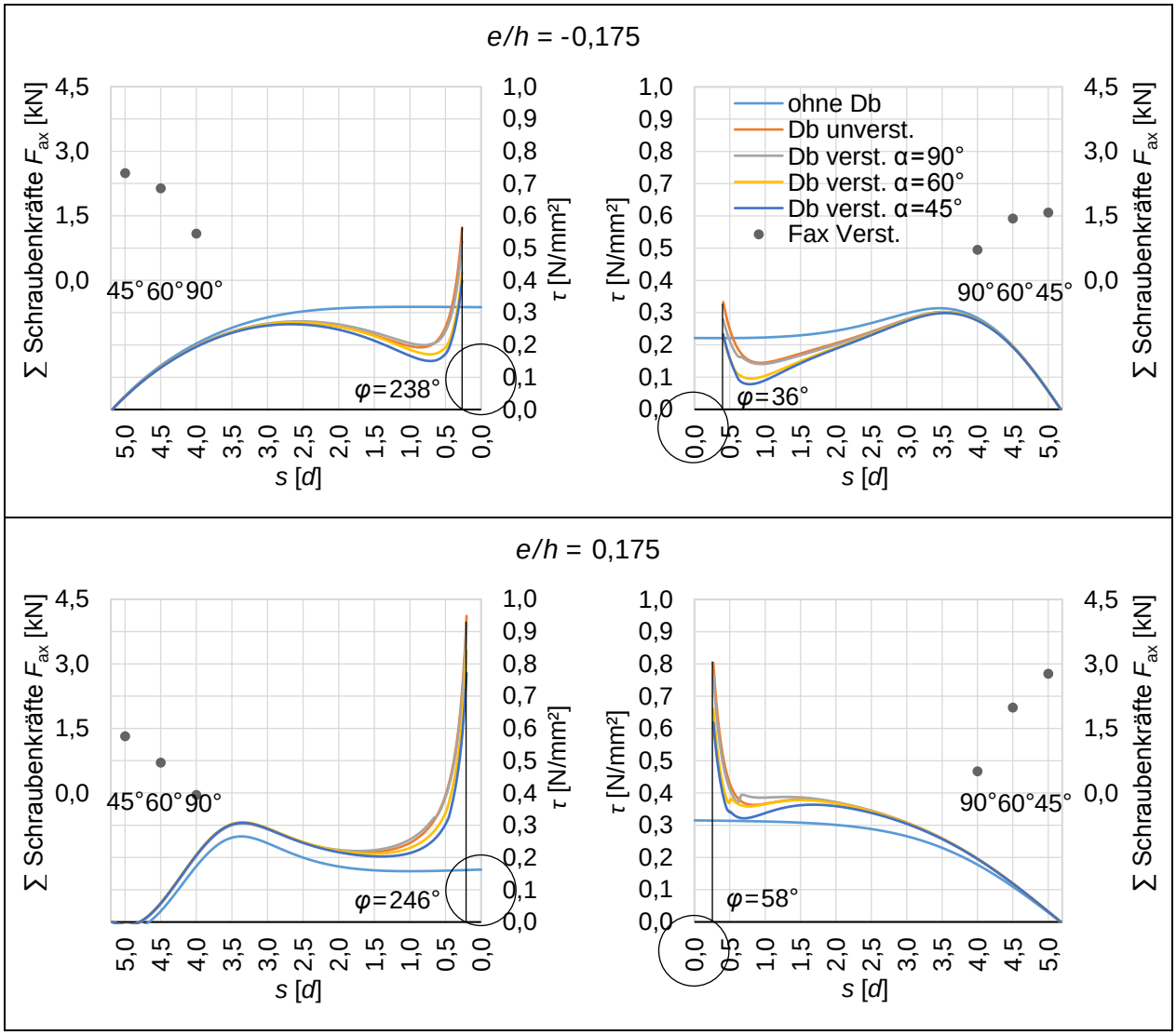


Abbildung 62: Verläufe der Schubspannungen entlang der beiden potentiellen Rissebenen infolge einer Querkraft V = 10kN

Aus einem Vergleich der beiden Ausmitten fallen in erster Linie zwei Dinge auf. Zum einen treten bei einer Anordnung in der Biegezugzone ausgeprägtere Spannungsspitzen direkt am Durchbruch auf. Zum anderen liegen bei einer Anordnung in der Biegezugzone im Vergleich zur Situation ohne Durchbruch entlang des Pfades durchgehend höhere Spannungswerte vor, bei einer Anordnung in der Biegedruckzone hingegen niedrigere.

Dieses Verhalten lässt sich in erster Linie auf zwei Gründe zurückführen: In der Biegezugzone liegen die potentiellen Rissebenen bei größeren Winkeln φ, d.h. näher an den außen-/innenliegenden Bereichen des Durchbruchrandes (270°/90°). Entsprechend Abbildung 49 befinden sich in diesen Bereichen höhere Schubspannungen infolge der Querkraftbeanspruchung. Zudem resultiert die Momentenbeanspruchung in der Biegezugzone in einer erhöhenden Wirkung, in der Biegedruckzone hingegen eher in einer senkenden Wirkung.

Betrachtet man die Reduktionen der Schubspannungen in Abhängigkeit der Neigung der Verstärkungselemente, so zeigt sich bei unter $\alpha = 90°$ angeordneten Verstärkungen so gut wie keine Wirkung, was auf die geringe Steifigkeit quer zur Schraubenachse zurückzuführen ist. Geneigte Anordnungen reduzieren die auftretenden Schubspannungen deutlicher, wobei die größten Reduktionen durchgehend für $\alpha = 45°$ festzustellen sind.

3.4.2 Einfluss der Verstärkung im teilgerissenen Zustand

In den durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass ein Aufreißen des Querschnitts quer zur Faser auch durch eine geneigte Anordnung innenliegender Verstärkungselemente nicht verhindert werden kann. Im Zuge von über Bild- und Videoaufnahmen ausgewertete Risslängen vor dem Versagen auf Höchstlastniveau konnten bis zu einer maximalen Länge von $\sim d/2$ ermittelt werden. Zur Bewertung der Auswirkungen wird im Folgenden der teilgerissene Zustand in stark vereinfachter Weise betrachtet, indem auf beiden Seiten des Durchbruchs jeweils ein Riss der Länge $d/2$ entsprechend Abschnitt 3.1.2 angesetzt wird. In analoger Weise zum vorherigen Abschnitt werden die Auswirkungen auf die Querzugspannungen, die Schubspannungen sowie die Kräfte in den Verstärkungselementen anhand des dort dargestellten Beispiels diskutiert. Die folgenden Diagramme zeigen wiederum die Situationen im Träger ohne einen Durchbruch, mit einem unverstärkten Durchbruch ohne Risse sowie mit einem unter $\alpha = 90°/60°/45°$ geneigten Vollgewindeschrauben verstärkten Durchbruch mit Rissen. Die Summen der Kräfte in den beiden Vollgewindeschrauben sind für den ungerissenen sowie für den gerissenen Fall angegeben.

- Querzug

Abbildung 63 stellt die Verläufe der Querzugspannungen für den teilgerissenen Fall dar. Das Einfügen eines Risses führt zu einem Anstieg der Kräfte in den Verstärkungselementen, indem ein Teil der Spannungen im Rissbereich von diesen aufgenommen wird. Gleichzeitig lagert sich auch ein Anteil der Spannungen im Holzquerschnitt um und führt an der Rissspitze zu erhöhten Spannungskonzentrationen. Bei geneigten Anordnungen sind die verbliebenen, umgelagteren Anteile geringer als bei einer Anordnung unter $\alpha = 90°$. Die Anstiege der Schraubenkräfte fallen im Betrag ähnlich aus.

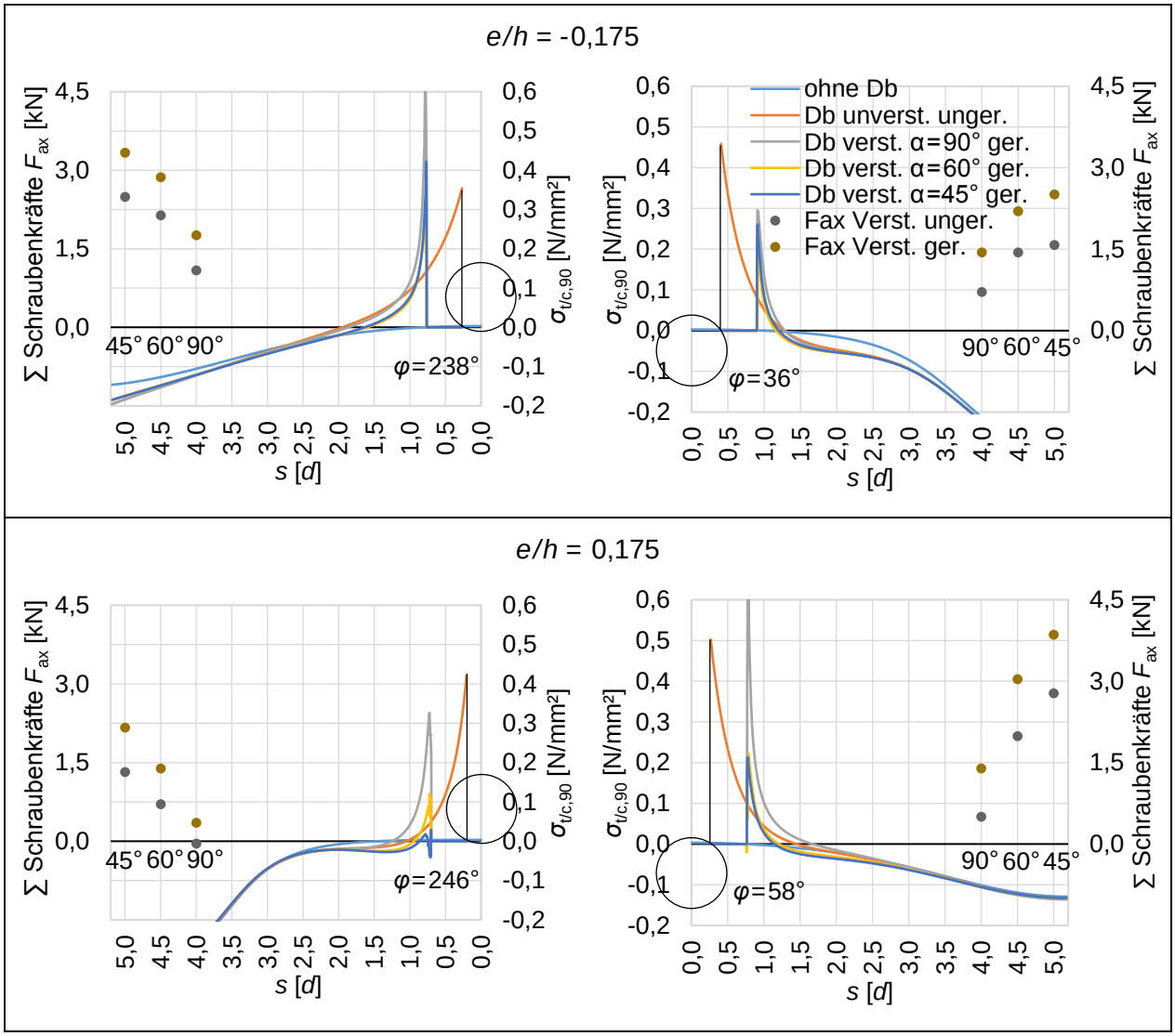


Abbildung 63: Verläufe der Querzugspannungen entlang der beiden potentiellen Rissebenen infolge einer Querkraft V = 10kN unter Vorhandensein von Rissen der Länge d/2

- Schub

Abbildung 64 stellt die Verläufe der Schubspannungen für den teilgerissenen Fall dar. Wie im ungerissenen Fall lassen sich die größten Reduktionen mit unter α = 45° geneigten Verstärkungselementen erreichen. Für diesen Fall werden die Schubspannungen bei der Anordnung im Biegedruckbereich nahezu vollständig von den Verstärkungselementen aufgenommen, bei der Anordnung im Biegezugbereich verbleiben größere Spannungskonzentrationen im Bereich der Rissspitze.

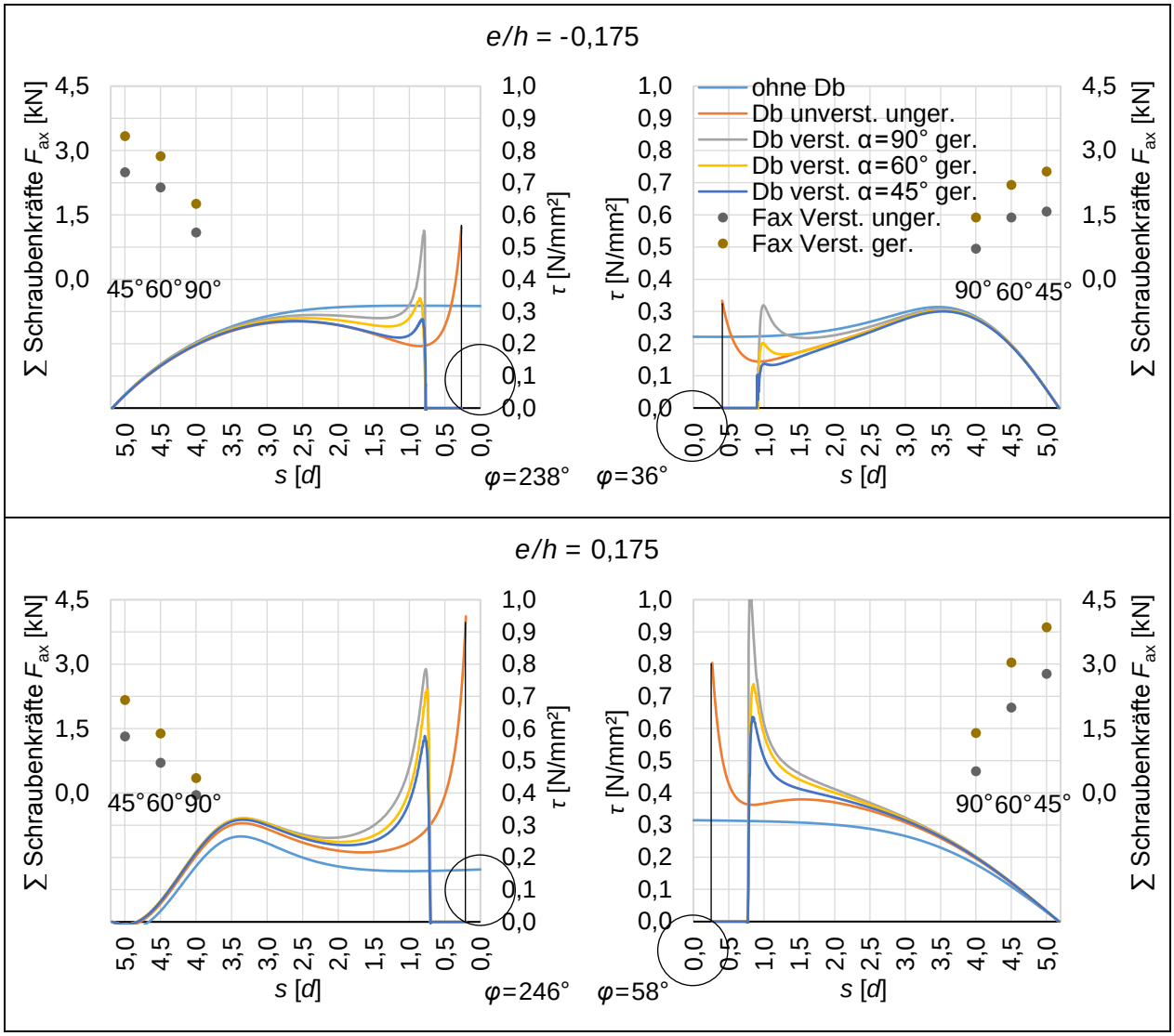


Abbildung 64: Verläufe der Schubspannungen entlang der beiden potentiellen Rissebenen infolge einer Querkraft V = 10kN unter Vorhandensein von Rissen der Länge d/2

3.4.3 Betrachtungen zur Bemessung der Verstärkungen

Anhand der mit dem vereinfachten Modell in den vorhergehenden beiden Abschnitten ermittelten Kräfte in den Verstärkungselementen wird der Frage nachgegangen, über welche Arten resultierender Spannungsanteile sich diese für eine Bemessung ermitteln lassen. Die damit verbundene Frage lautet: Ist es möglich, die auftretenden Kräfte in geneigten Verstärkungselementen nur anhand über Winkelbeziehungen umgerechneter resultierender Querzugkräfte zu ermitteln oder ist eine Betrachtung von Schubanteilen erforderlich? Im Folgenden werden daher 2 Betrachtungen vorgestellt. Die erste Betrachtung erfolgt in Abhängigkeit der resultierenden Querzugkräfte, siehe Abbildung 65 sowie Abbildung 66, die zweite in Abhängigkeit des Schubflusses, siehe Abbildung 67 sowie Tabelle 5 und Tabelle 6.

- Ermittlung in Abhängigkeit resultierender Querzugkräfte

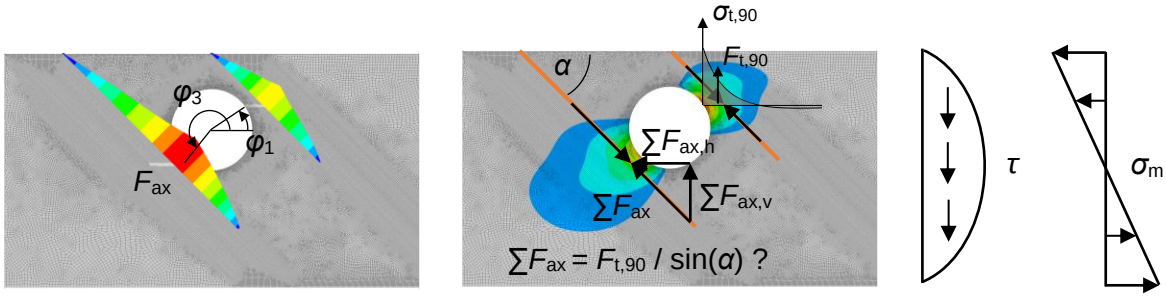


Abbildung 65: Schematische Darstellung der Ermittlung der Kräfte in den Verstärkungselementen über resultierende Querzugkräfte

In Abbildung 65 ist die Ermittlung der Kräfte in den Verstärkungselementen über die resultierenden Querzugkräfte schematisch dargestellt. Das Integral über den Verlauf der Querzugspannungen entlang des dargestellten Pfades ergibt die resultierende Querzugkraft $F_{t,90}$. Unter der Annahme, dass im teilgerissenen Zustand die gesamte Querzugkraft den Vertikalkomponenten der Schraubenkräfte entspricht, würden sich die Schraubenkräfte über die angegebene Winkelfunktion berechnen lassen. Die Betrachtungen sind jeweils für beide querzugbeanspruchte Bereiche separat zu führen.

Inwieweit diese vereinfachte Betrachtung zutrifft, ist in Abbildung 66 für beide Beispiele und beide querzugbeanspruchte Bereiche dargestellt. Dort sind die in den numerischen Berechnungen ermittelten Kräfte in den Verstärkungselementen den über Winkelbeziehungen umgerechneten resultierenden Querzugkräften gegenübergestellt.

Die resultierenden Querzugkräfte $F_{t,90}$ wurden dabei über eine Integration der Querzugspannungen bis zum Nulldurchgang im unverstärkten, ungerissenen Zustand bestimmt. Für diesen Fall blieben die umgelagerten resultierenden Querzuganteile, die nach einer Rissbildung noch im Träger vorhanden sind, unberücksichtigt.

Für die Ermittlung der resultierenden Querzugkräfte $F_{t,90,ef}$ wurden die umgelagerten resultierenden Querzuganteile abgezogen. Dieser Zustand sollte die zu diesem Zeitpunkt tatsächlich in den Verstärkungselementen vorhandenen Querzuganteile realistischer abbilden.

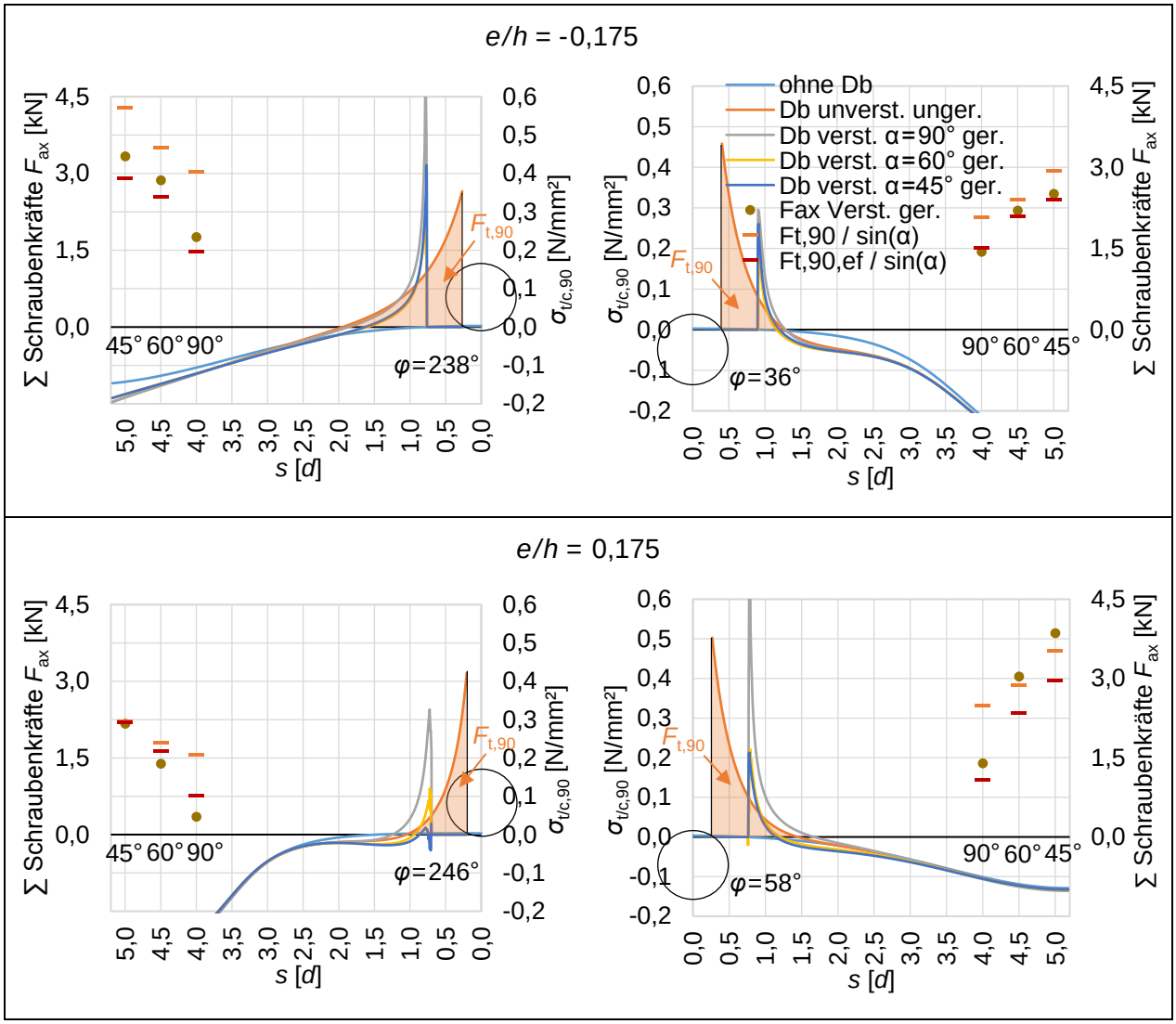


Abbildung 66: Gegenüberstellung der ermittelten Kräfte in den Verstärkungselementen und der über Winkelbeziehungen umgerechneten resultierenden Querzugkräfte infolge einer Querkraft V = 10 kN unter Vorhandensein von Rissen der Länge d/2

Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass ein Ansatz der vollen resultierenden Querzugkraft bei einer Anordnung im Biegedruckbereich auf der sicheren Seite liegen würde. Bei einer Anordnung im Biegezugbereich können sich aus der Umrechnung der resultierenden Querzugkräfte auch geringere Kräfte ergeben als in den Verstärkungselementen entsprechend dem numerischen Modell vorhanden sind (φ = 58°, α = 45° bzw. 60°), wenngleich sich die Differenz nur in der Größenordnung von etwa 10 % bewegt. Vergleichsrechnungen mit einer Verstärkung 2xd = 12 mm (nicht abgebildet) ergaben für diese beiden Fälle bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen Summen der beiden Schraubenkräfte $\sum F_{ax}$ = 3,31 kN im Fall α = 60° bzw. $\sum F_{ax}$ = 4,33 kN im Fall α = 45° (Differenz ~23 %). Aufgrund dieser Überschreitungen erfolgt die Darstellung im Folgenden in Abhängigkeit des aufgenommenen Schubflusses.

- Ermittlung in Abhängigkeit des Schubflusses

An Durchbrüchen treten Schubspannungen sowohl infolge der Querkraft als auch infolge eines Moments auf. Der Schubanteil infolge des vorhandenen Moments wird im Rahmen dieser Untersuchungen für die Auslegung der Verstärkung vereinfachend vernachlässigt. Berechnungen an

einem verstärkten Träger unter einer Beanspruchung durch ein Moment zeigten, dass das Vorhandensein von Rissen zu Umlagerungen der Schubanteile im Träger führt, gleichzeitig die Kräfte in den Verstärkungselementen jedoch nur in einer geringen Größe vorhanden sind. Infolgedessen werden die Kräfte in den Verstärkungselementen im Folgenden nur in Abhängigkeit des Schubflusses infolge der Querkraft V beschrieben.

In Abbildung 67 ist die Umrechnung der Kräfte in den Verstärkungselementen in Abhängigkeit des Schubflusses auf Höhe der Rissebenen schematisch dargestellt.

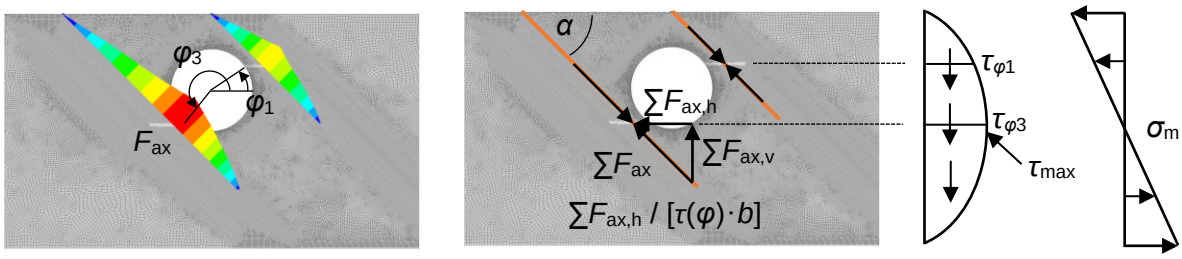


Abbildung 67: Schematische Darstellung der Ermittlung der Kräfte in den Verstärkungselementen über den Schubfluss auf Höhe der Rissebenen

Für eine Umrechnung werden die Schubspannungen $\tau_{\varphi 1}$ bzw. $\tau_{\varphi 3}$ auf Höhe der potentiellen Rissebenen, beschrieben über die Winkel φ_1 bzw. φ_3, herangezogen. Tabelle 5 enthält eine Zusammenstellung der ermittelten Werte für die zwei Neigungen $\alpha = 60°$ sowie $\alpha = 45°$. Der von den Verstärkungselementen aufgenommene Schubfluss ist dabei in Abhängigkeit der Durchbruchgöße d angegeben.

Tabelle 5: Ermittlung des von den Verstärkungselementen (je 2 x VGS ϕ10) aufgenommenen Schubflusses infolge einer Querkraft V = 10 kN unter Vorhandensein von Rissen der Länge d/2

h	[mm]	400
b	[mm]	120
d/h	[-]	0,35
V	[kN]	10
Verstärkung	-	2x ϕ**10**
τ_{max}	[N/mm²]	0,313

e/h	[-]	-0,175	-0,175	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	0,175
φ	[°]	36	238	36	238	58	246	58	246
$\tau(\varphi)$	[N/mm²]	0,216	0,312	0,216	0,312	0,312	0,172	0,312	0,172
$\sum F_{ax}$	[kN]	2,20	2,87	2,51	3,34	3,04	1,39	3,86	2,17
α	[°]	60	60	45	45	60	60	45	45
$\sum F_{ax,h} = \sum F_{ax} \cdot \cos(\alpha)$	[kN]	1,10	1,43	1,77	2,36	1,52	0,69	2,73	1,53
$\sum F_{ax,v} = \sum F_{ax} \cdot \sin(\alpha)$	[kN]	1,91	2,48	1,77	2,36	2,63	1,20	2,73	1,53
$\sum F_{ax,h} / [\tau(\varphi) \cdot b]$	[d]	0,30	0,27	0,49	0,45	0,29	0,24	0,52	0,53

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, werden bei einer Neigung $\alpha = 60°$ der Schubfluss über eine Länge von etwa 0,3d und bei einer Neigung $\alpha = 45°$ der Schubfluss über eine Länge von etwa 0,53d aufgenommen. Eine Vergleichsberechnung mit einem größeren Durchmesser der Verstärkungselemente lieferte geringfügig höhere Werte, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Ermittlung des von den Verstärkungselementen (je 2 x VGS ϕ 12) aufgenommenen Schubflusses infolge einer Querkraft V = 10 kN unter Vorhandensein von Rissen der Länge d/2

h	[mm]	400
b	[mm]	120
d/h	[-]	0,35
V	[kN]	10
Verstärkung	-	2x ϕ**12**
τ_{max}	[N/mm²]	0,313

e/h	[-]	-0,175	-0,175	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	0,175
φ	[°]	36	238	36	238	58	246	58	246
$\tau(\varphi)$	[N/mm²]	0,216	0,312	0,216	0,312	0,312	0,172	0,312	0,172
$\sum F_{ax}$	[kN]	2,28	3,12	2,64	3,74	3,31	1,41	4,33	2,25
α	[°]	60	60	45	45	60	60	45	45
$\sum F_{ax,h} = \sum F_{ax} \cdot \cos(\alpha)$	[kN]	1,14	1,56	1,86	2,64	1,65	0,71	3,06	1,59
$\sum F_{ax,v} = \sum F_{ax} \cdot \sin(\alpha)$	[kN]	1,97	2,70	1,86	2,64	2,86	1,22	3,06	1,59
$\sum F_{ax,h} / [\tau(\varphi) \cdot b]$	[d]	0,31	0,30	0,51	0,51	0,32	0,24	0,58	0,55

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um eine konkrete Auswertung am Beispiel einer definierten Risslänge sowie einer vorgegebenen Steifigkeit der Verstärkungselemente handelt. Einer Variation dieser Parameter wird zu abweichenden Ergebnissen führen. Jedoch sollte es sich bei der zugrundeliegenden Trägergröße in Kombination mit den verwendeten Verstärkungselementen um durchaus übliche, im Fall 2xd = 12 mm eher um hohe Verhältnisse der Steifigkeiten Verstärkung – Träger handeln, so dass diese auch für andere Trägergrößen eine realistische Abschätzung ermöglichen können.

3.4.4 Dehnungsmessungen in Gewindestangen der Großversuche

Im Folgenden werden für die Prüfkörper der Großversuche, für welche Dehnungsmessungen in den Gewindestangen vorgenommen wurden, Betrachtungen zur Bemessung der Verstärkungselemente diskutiert und mit den Erkenntnissen des vorhergehenden Abschnitts verglichen.

Tabelle 7 enthält eine Zusammenstellung der über die Dehnungsmessungen in den Gewindestangen ermittelten Werte. Die zugrundeliegenden Daten der einzelnen Prüfkörper und Gewindestangen finden sich im Anschluss an diese Tabelle. In Tabelle 7 wurde in Abhängigkeit der Durchbruchgröße der Anteil des Schubflusses infolge der Querkraft V ermittelt, welcher den Horizontalanteilen der in den Gewindestangen gemessenen Kräfte auf Höhe der angeordneten DMS entspricht. Zum Vergleich sind die Kräfte in den Verstärkungselementen angegeben, die sich aus einer Umrechnung der nach Abschnitt 4.1.1 bestimmten resultierenden Querzugkräfte ergeben würden.

Aus der Betrachtung der ermittelten Schubflussanteile ist ersichtlich, dass diese im Vergleich zu den in Abschnitt 3.4.3 bestimmten Schubflussanteilen für beide Neigungen im Mittel geringfügig kleiner ausfallen, die grundsätzliche Größenordnung jedoch bestätigen. Im Fall der vertikalen

Gruppe ist die Aussagekraft jedoch eingeschränkt, da die Rissbildung zum Zeitpunkt des vorzeitigen Biegezugversagens geringer einzuschätzen ist, als bei einem späteren Versagen am Durchbruch.

Ein Vergleich der umgerechneten resultierenden Querzugkräfte, bestimmt nach Abschnitt 4.1.1, mit den gemessenen Kräften in den Verstärkungselementen zeigt, dass diese Herangehensweise für die dargestellten Fälle auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefern würde. Ursachen hierfür sind:

- Die in Abschnitt 4.1.1 angegebenen Gleichungen für die resultierenden Querzugkräfte sind auf der sicheren Seite liegende Näherungen der aus FEM-Berechnungen abgeleiteten Größen
- Die maximalen resultierenden Querzugkräfte $F_{t,90,V}$ und $F_{t,90,M}$ werden vereinfachend addiert, obwohl diese an unterschiedlichen Positionen am Durchbruchrand liegen. Für den Fall d/h = 0,35, e/h = -0,175 wurde $F_{t,90,V}$ an der Stelle φ = 51° ermittelt, $F_{t,90,M}$ an der Stelle φ = 19,5°. Die Rissebene befindet sich an der Stelle φ = 36°, so dass die vorliegende resultierende Querzugkraft überschätzt wird.
- Die geringeren Schubflussanteile deuten an, dass die Steifigkeitsverhältnisse Gewindestange – BSH Träger im Vergleich zu den Kleinversuchen geringer sind.

Tabelle 7: Zusammenstellung der von den Gewindestangen aufgenommenen Schubflussanteile, ermittelt über versuchsbasierte Dehnungsmessungen in den Gewindestangen

		Exzentrische Durchbrüche				Gr. vert.
Material	[-]	GL 24h	GL 28h	GL 24h	GL 28h	GL 28h
Prüfkörper Nr.	[-]	1	1	1	1	1
e/h	[-]	-0,175	-0,175	0,175	0,175	-0,225
Querkraft V	[kN]	393,0	351,0	265,7	298,4	324,8
τ_{max}	[N/mm²]	2,95	2,63	1,99	2,24	2,44
φ	[°]	36,0	36,0	244,5	244,5	33,0
$\tau(\varphi)$	[N/mm²]	2,04	1,82	1,11	1,25	1,60
$\sum F_{ax}$	[kN]	79,8	71,3	48,8	64,1	50,9
α	[°]	60	60	45	45	45
$\sum F_{ax,h} = \sum F_{ax} \cdot \cos(\alpha)$	[kN]	39,9	35,7	34,5	45,3	36,0
$\sum F_{ax,v} = \sum F_{ax} \cdot \sin(\alpha)$	[kN]	69,1	61,7	34,5	45,3	36,0
$\sum F_{ax,h}/[\tau(\varphi) \cdot b]$	[d]	0,28	0,28	0,44	0,52	0,45
Zum Vergleich:						
$F_{t,90,V}$ nach 4.1.1	[kN]	72,6	64,8	49,1	55,1	38,9
$F_{t,90,M}$ nach 4.1.1	[kN]	28,0	25,0	7,4	8,3	19,4
$(F_{t,90,V}+F_{t,90,M})/\sin(\alpha)$	[kN]	116,1	103,7	79,9	89,7	82,4

- Exzentrischer Durchbruch *e/h* = -0,175, GL 24h, Nr. 1

In Abbildung 68 sind das Last-Verformungsverhalten des unter α = 60° verstärkten Prüfkörpers sowie die gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen dargestellt. Die beiden DMS wurden auf der auflagerfernen Seite des Durchbruchs auf Höhe des Schnittpunkts zwischen dem Winkel φ = 36° - Durchbruchrand platziert.

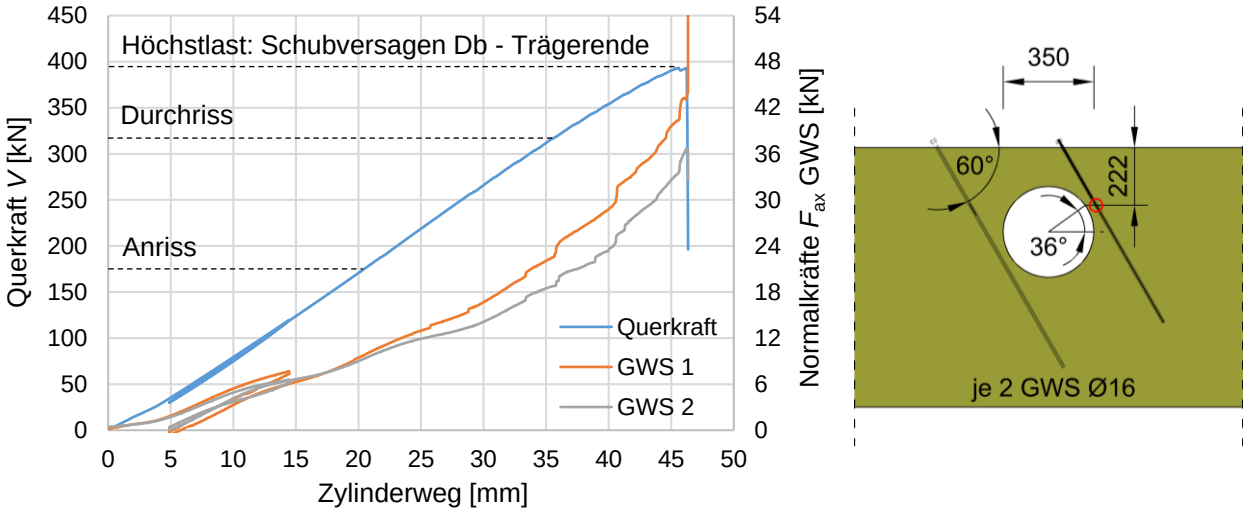


Abbildung 68: Versuchsergebnisse des exzentrischen Durchbruchs e/h = -0,175, GL 24h, Nr. 1 in Form des Last-Verformungsverhaltens sowie der gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen

Auf Höchstlastniveau setzte ein Schubversagen vom Durchbruch bis zum Trägerende ein, siehe Abbildung 69. Bei der Querkraft V = 393,0 kN wurden in den Gewindestangen Kräfte F_{ax} = 43,2 kN bzw. 36,6 kN gemessen.

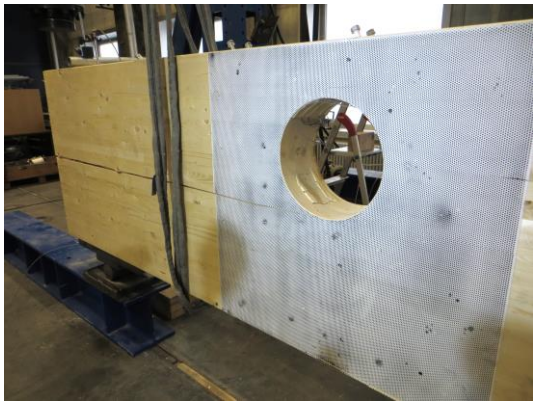


Abbildung 69: Schubversagen Durchbruch – Trägerende auf Höchstlastniveau

- Exzentrischer Durchbruch *e/h* = -0,175, GL 28h, Nr. 1

Analog zum vorherigen Beispiel sind in Abbildung 70 das Last-Verformungsverhalten des unter α = 60° verstärkten Prüfkörpers sowie die gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen dargestellt. Die Position der beiden DMS war an derselben Stelle wie in Abbildung 68 dargestellt.

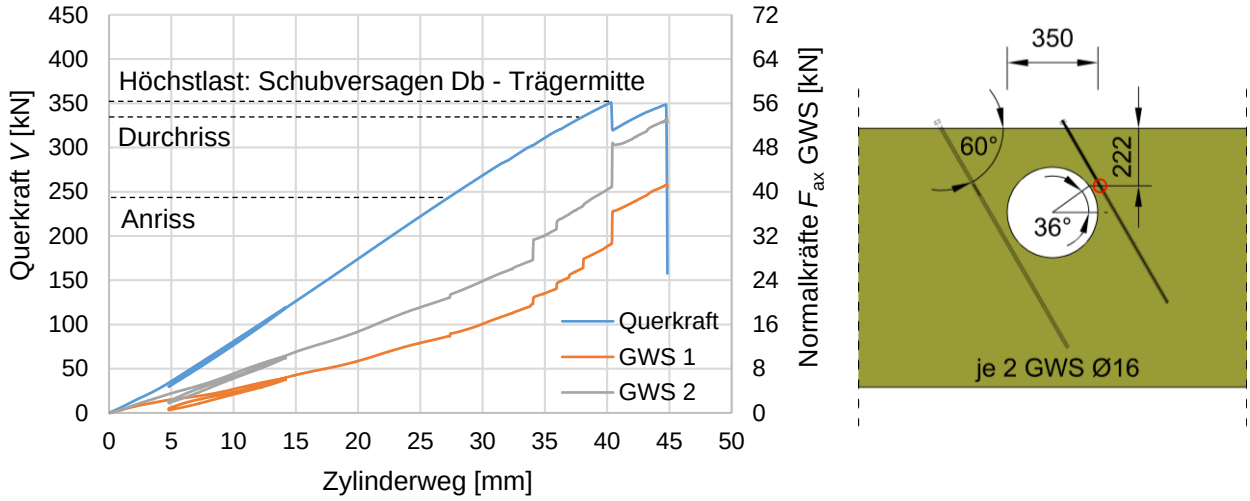


Abbildung 70: Versuchsergebnisse des exzentrischen Durchbruchs e/h = -0,175, GL 28h, Nr. 1 in Form des Last-Verformungsverhaltens des Prüfkörpers sowie der gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen

Auf Höchstlastniveau trat ein Schubversagen vom Durchbruch in Richtung Trägermitte ein, jedoch außerhalb der beiden teilgerissenen Bereiche an einer Lamellengrenze, siehe Abbildung 71. Für die Betrachtung der Kräfte in den Gewindestangen wird der Zustand kurz vor diesem Schubversagen herangezogen, da es sich hierbei bereits um ein beginnendes globales Versagen handelt. Bei der Querkraft V = 351,0 kN wurden in den Gewindestangen Kräfte F_{ax} = 40,8 kN bzw. 30,5 kN gemessen.

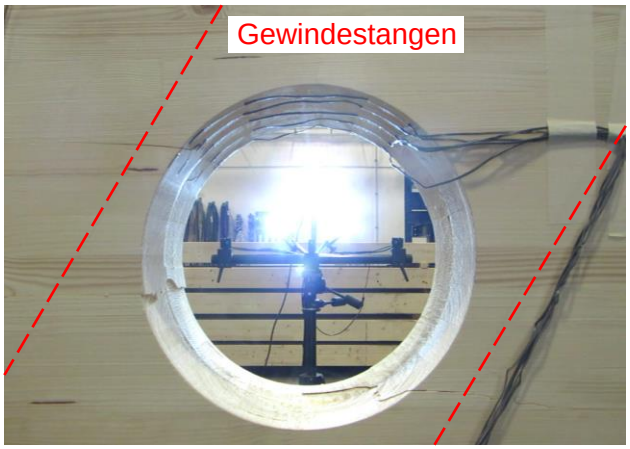


Abbildung 71: Schubversagen Durchbruch – Trägermitte auf Höchstlastniveau

- Exzentrischer Durchbruch e/h = 0,175, GL 24h, Nr. 1

In Abbildung 72 sind das Last-Verformungsverhalten des unter α = 45° verstärkten Prüfkörpers sowie die gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen dargestellt. Die beiden DMS wurden auf der auflagernahen Seite des Durchbruchs auf Höhe des Schnittpunkts zwischen dem Winkel φ = 244,5° - Durchbruchrand platziert.

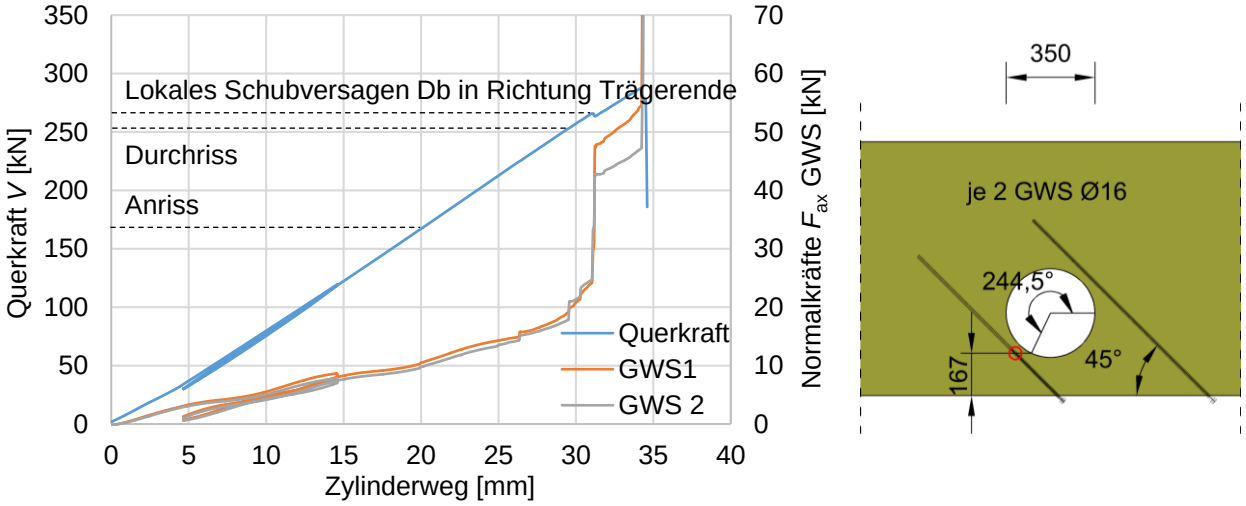


Abbildung 72: Versuchsergebnisse des exzentrischen Durchbruchs e/h = 0,175, GL 24h, Nr. 1 in Form des Last-Verformungsverhaltens des Prüfkörpers sowie der gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen

Ein Blick auf die Entwicklung der ermittelten Kräfte in den Gewindestangen im Versuchsverlauf zeigt einen sehr ausgeprägten Anstieg bei dem Lastniveau V = 265,7 kN. Nach einem kurzen Öffnen des Risses setzte unmittelbar anschließend ein Schubversagen ein, siehe Abbildung 73. Da sich dieses Schubversagen zunächst nicht komplett bis zum Trägerende erstreckte, wurde das globale Schubversagen erst nach einem kurzen weiteren Lastanstieg erreicht. Für die Auslegung der Verstärkung wird der Zeitpunkt unmittelbar vor dem beginnenden Schubversagen angesehen, da die Verstärkung ansonsten eher als globale Schubverstärkung bemessen werden würde. Bei dem erwähnten Lastniveau V = 265,7 kN wurden in den Gewindestangen Kräfte F_{ax} = 24,1 kN bzw. 24,7 kN gemessen.

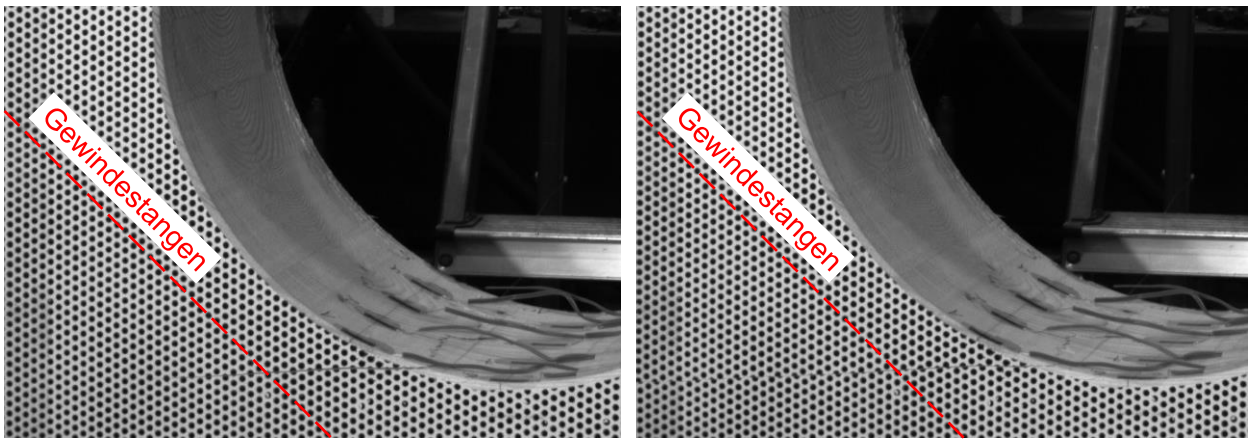


Abbildung 73: Lokales Schubversagen Durchbruch in Richtung Trägerende (Aufnahmen ARAMIS); links: Situation kurz vorher; rechts: Situation kurz nachher

- Exzentrischer Durchbruch *e/h* = 0,175, GL 28h, Nr. 1

In Abbildung 74 sind das Last-Verformungsverhalten des unter α = 45° verstärkten Prüfkörpers sowie die gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen dargestellt. Die Position der beiden DMS war an derselben Stelle wie in Abbildung 72 dargestellt.

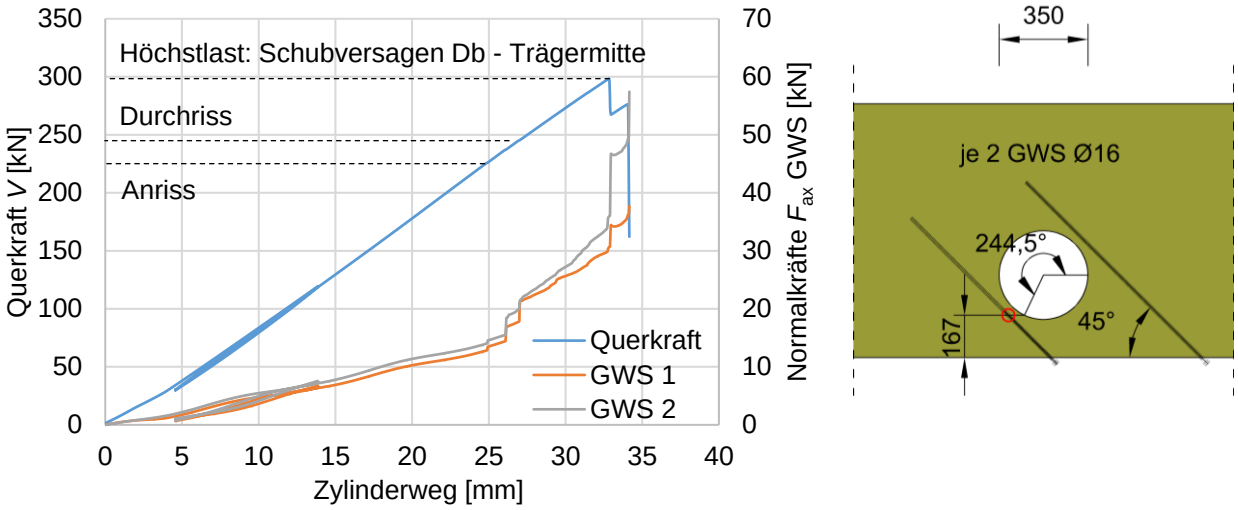


Abbildung 74: Versuchsergebnisse des exzentrischen Durchbruchs e/h = 0,175, GL 28h, Nr. 1 in Form des Last-Verformungsverhaltens des Prüfkörpers sowie der gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen

Auf Höchstlastniveau setzte ein Schubversagen vom Durchbruch Richtung Trägermitte ein, siehe Abbildung 75 mit entsprechender Kennzeichnung der Rissebene. Kurz darauf versagte der Träger bei geringerer Last in Form eines globalen Schubversagens bis zum Trägerende. Bei dem erreichten Lastniveau V = 298,4 kN wurden in den Gewindestangen Kräfte F_{ax} = 29,9 kN bzw. 34,2 kN gemessen.

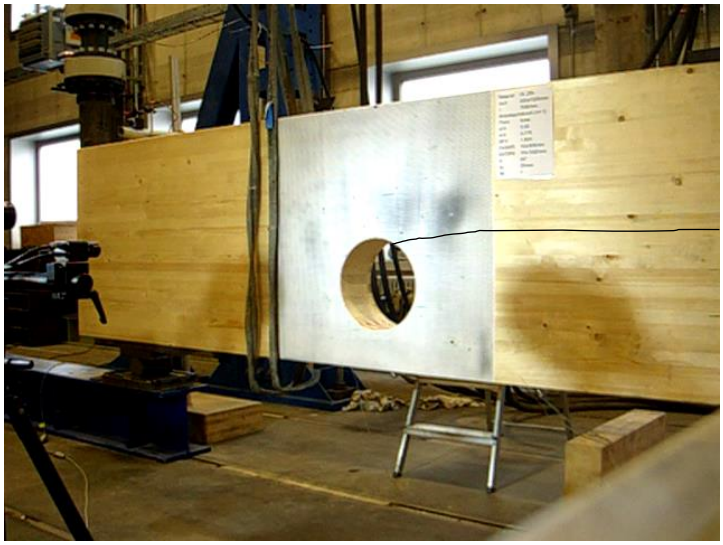


Abbildung 75: Schubversagen Durchbruch – Trägermitte auf Höchstlastniveau

- Vertikale Gruppe, GL 28h, Nr. 1

In Abbildung 76 sind das Last-Verformungsverhalten des unter α = 45° verstärkten Prüfkörpers sowie die gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen dargestellt. Die beiden DMS wurden auf der auflagerfernen Seite des Durchbruchs auf Höhe des Schnittpunkts zwischen dem Winkel φ = 33° - Durchbruchrand platziert.

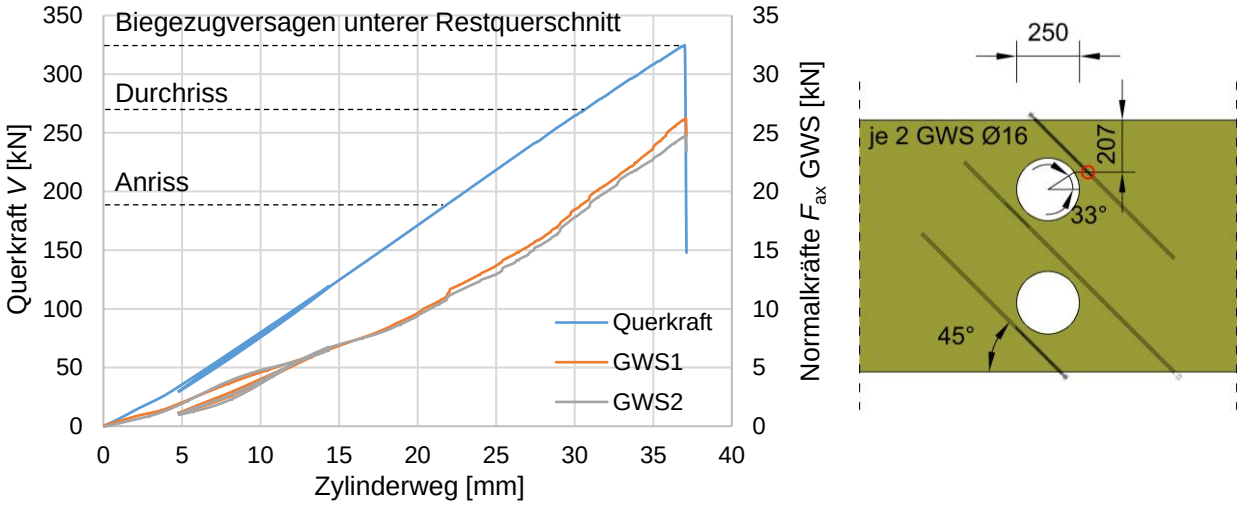


Abbildung 76: Versuchsergebnisse der vertikalen Gruppe GL 28h, Nr. 1 in Form des Last-Verformungsverhaltens des Prüfkörpers sowie der gemessenen Kräfte in den beiden Gewindestangen

Auf Höchstlastniveau wurde kein Schubversagen im Bereich der Durchbrüche erreicht, da vorher ein Biegezugversagen im unteren Restquerschnitt im Bereich der Gewindestangen auftrat, siehe Abbildung 77. Zum Zeitpunkt des Biegezugversagens lagen eine Querkraft V = 324,8 kN sowie Kräfte in den Gewindestangen F_{ax} = 26,2 kN bzw. 24,7 kN vor.

Abbildung 77: Biegezugversagen unterer Restquerschnitt

3.5 Gruppenanordnungen

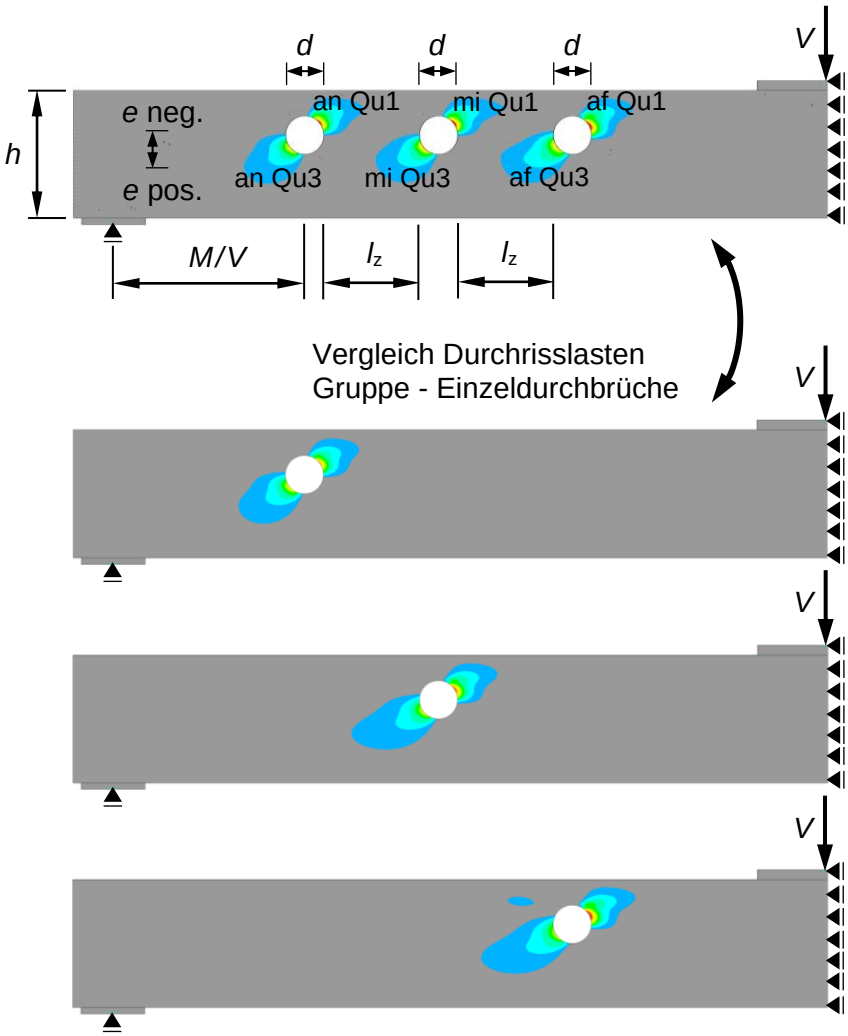
Neben Parameterstudien an Einzeldurchbrüchen wurden ebenso Untersuchungen an Gruppen von Durchbrüchen zur Bestimmung der gegenseitigen Beeinflussung durchgeführt. Möglichkeiten der Gruppenanordnung wurden sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung berücksichtigt. Grundsätzlich sind verschiedene Kenngrößen zur Bewertung einer gegenseitigen Beeinflussung denkbar. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde sich an den Ergebnissen der Versuche orientiert, indem die gegenseitige Beeinflussung anhand des für die Tragfähigkeit im unverstärkten Zustand maßgebenden Querzugversagens bewertet wurde. Die Abschätzung des Querzugversagens erfolgte wie in den Parameterstudien zu den exzentrischen Durchbrüchen mithilfe numerischer Berechnungen in Kombination mit einer Abschätzung der Tragfähigkeit auf Grundlage der Weibull-Theorie.

3.5.1 Horizontale Gruppe

Im Fall der horizontalen Anordnung wurde der Einfluss der Gruppenanordnung bestimmt, indem der lichte Abstand l_z zwischen den Durchbrüchen einer Gruppe (2 bzw. 3 Durchbrüche) variiert und für jede Konfiguration ein Vergleich mit den Einzeldurchbrüchen in entsprechender Lage durchgeführt wurde. In Abbildung 78 ist das Vorgehen unter Angabe der variierten Parameter dargestellt. Um eine möglichst umfassende Aussage zu erhalten, wurden die Untersuchungen sowohl an vergleichsweise kleinen Durchbrüchen (d/h = 0,10) als auch an vergleichsweise großen Durchbrüchen (d/h = 0,30) durchgeführt. Die obere Grenze des lichten Abstandes wurde mit $l_z = 2{,}0h$ etwas konservativer als die Vorgabe in DIN EN 1995-1-1/NA:2013 gewählt. Die unteren Grenzen entsprachen mit $l_z = 0{,}25h/0{,}125h$ in etwa den einfachen Durchmessern der Durchbrüche. Noch geringere lichte Abstände würden zu einem zunehmenden Verhalten der Gruppe als ein großer gemeinsamer Durchbruch führen. Dieses Verhalten wurde im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen jedoch von Beginn an ausgeschlossen. Die Lage der Durchbrüche im Träger wurde über eine Anordnung in der Biegedruckzone (e/h = -0,15), eine zentrische Anordnung (e/h = 0,00) sowie über eine Anordnung in der Biegezugzone (e/h = 0,15) berücksichtigt. In Trägerlängsrichtung wurden ebenfalls 3 Positionen vom auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich ($M/V = 1{,}5h$) über ein mittleres Schnittkraftverhältnis ($M/V = 6{,}0h$) bis hin zu einem reinen momentenbeanspruchten Bereich (M/V = “∞“) abgedeckt. Dabei blieb die Position des auflagernahen Durchbruchs jeweils unverändert, während die Positionen der auflagerfernen Durchbrüche entsprechend den gewählten lichten Abständen variiert wurden.

Hinter den Bezeichnungen der querzugbeanspruchten Bereiche in Abbildung 78 stehen folgende Bedeutungen:

- an Qu1/3: auflagernaher Durchbruch Quadrant 1/3
- mi Qu1/3: mittlerer Durchbruch Quadrant 1/3
- af Qu1/3: auflagerferner Durchbruch Quadrant 1/3



Variierte Parameter:

- Anzahl der Durchbrüche: n = 2; 3
- Durchbruchgröße: d/h = 0,10; 0,30
- Lichter Abstand: l_z = 2,0h - 0,25h/0,125h
- Ausmitte: e/h = -0,15; 0,00; 0,15
- Schnittkraftverhältnis: M/V = 1,5h; 6,0h; “∞“

Abbildung 78: Prinzipielles Vorgehen und variierte Parameter

Zur Darstellungsweise der Ergebnisse in Abbildung 79 - Abbildung 82 sei folgender Hinweis gegeben: Da ein Querzugversagen einer Gruppe und der entsprechenden Einzeldurchbrüche an verschiedenen Stellen beginnen kann, wurde zwei verschiedene Darstellungsweisen gewählt.

In Abbildung 79 und Abbildung 81 wurde für jede Konfiguration die minimale Versagenslast aller querzugbeanspruchten Bereiche der Gruppe ins Verhältnis gesetzt zur minimalen Versagenslast aller querzugbeanspruchten Bereiche der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche, d.h. die Gruppe wurde als eine Einheit betrachtet und die entsprechenden Einzeldurchbrüche ebenfalls als eine Einheit. Diese Darstellungsweise bietet den Vorteil, direkt eine quantitative Aussage über die maßgebenden Tragfähigkeiten ablesen zu können. Dadurch geht jedoch die Information verloren, wie ausgeprägt die Auswirkungen in den einzelnen Bereichen ausfallen. Zudem kann es sein, dass hinter dem Wert der Reduktion ein Vergleich von unterschiedlichen Durchbrüchen der Gruppenanordnung und der Einzeldurchbrüche steckt.

Dagegen erfolgt die Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 80 und Abbildung 82 für jeden querzugbeanspruchten Bereich separat. Die expliziten Vergleiche der jeweils zugehörigen querzugbeanspruchten Bereiche bieten den Vorteil, die jeweiligen Änderungen in den einzelnen Bereichen der Gruppe ablesen zu können. Allerdings kann aus den einzelnen Reduktionen nicht automatisch gefolgert werden, welche für die Tragfähigkeit maßgebend ist.

- 2 Durchbrüche:

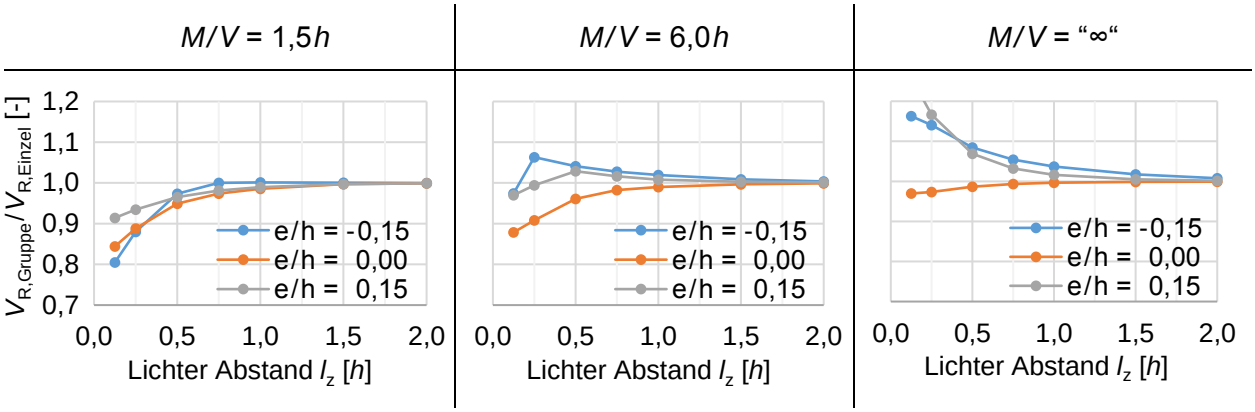


Abbildung 79: Vergleich der Versagenslasten der Gruppen mit den minimalen Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (d/h = 0,10)

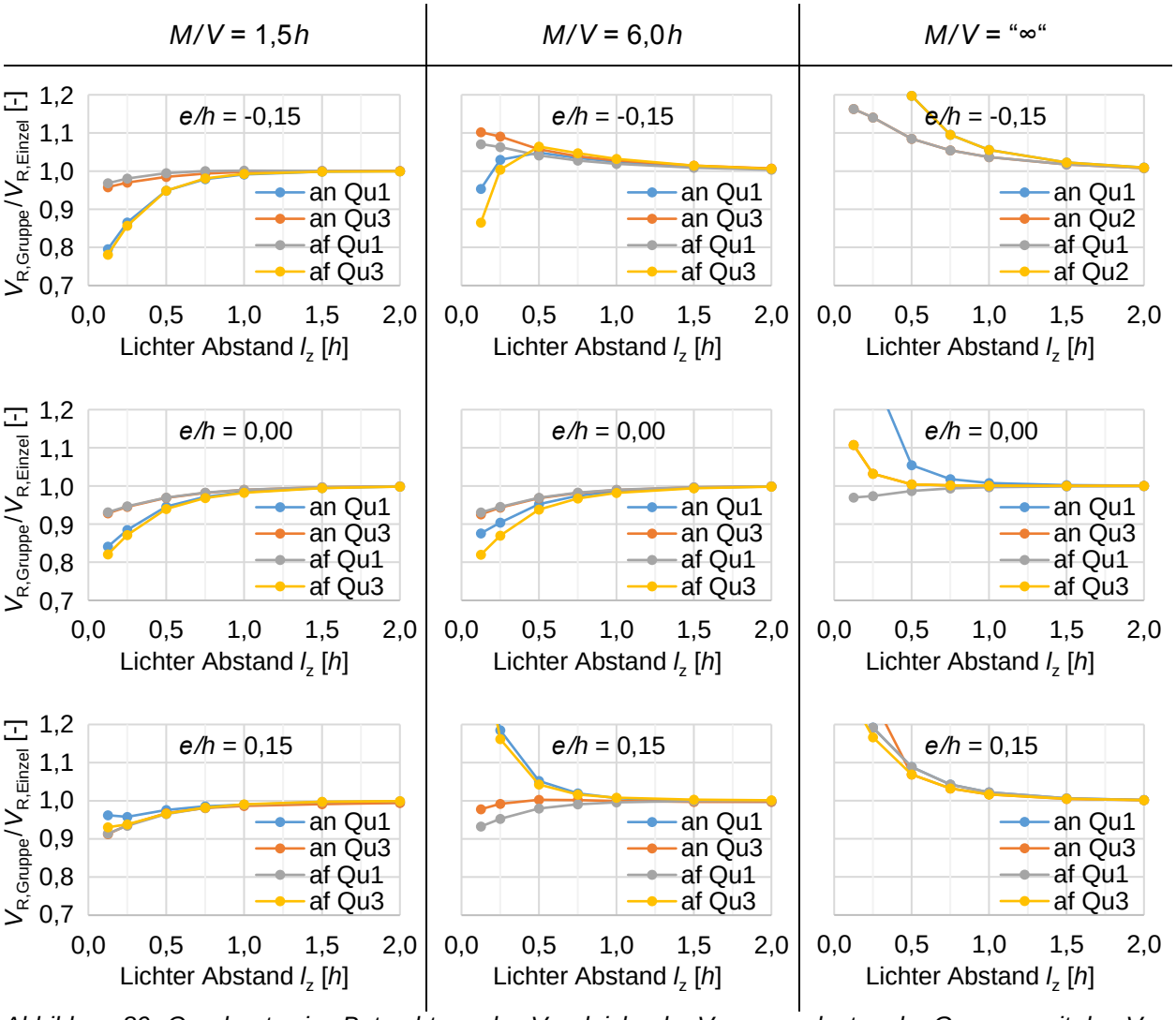


Abbildung 80: Quadrantweise Betrachtung des Vergleichs der Versagenslasten der Gruppen mit den Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (d/h = 0,10)

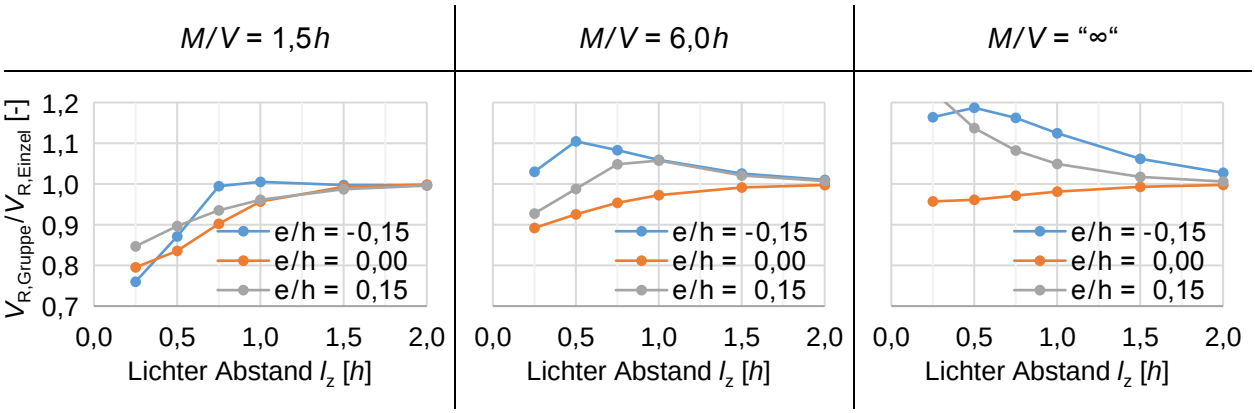


Abbildung 81: Vergleich der Versagenslasten der Gruppen mit den minimalen Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (d/h = 0,30)

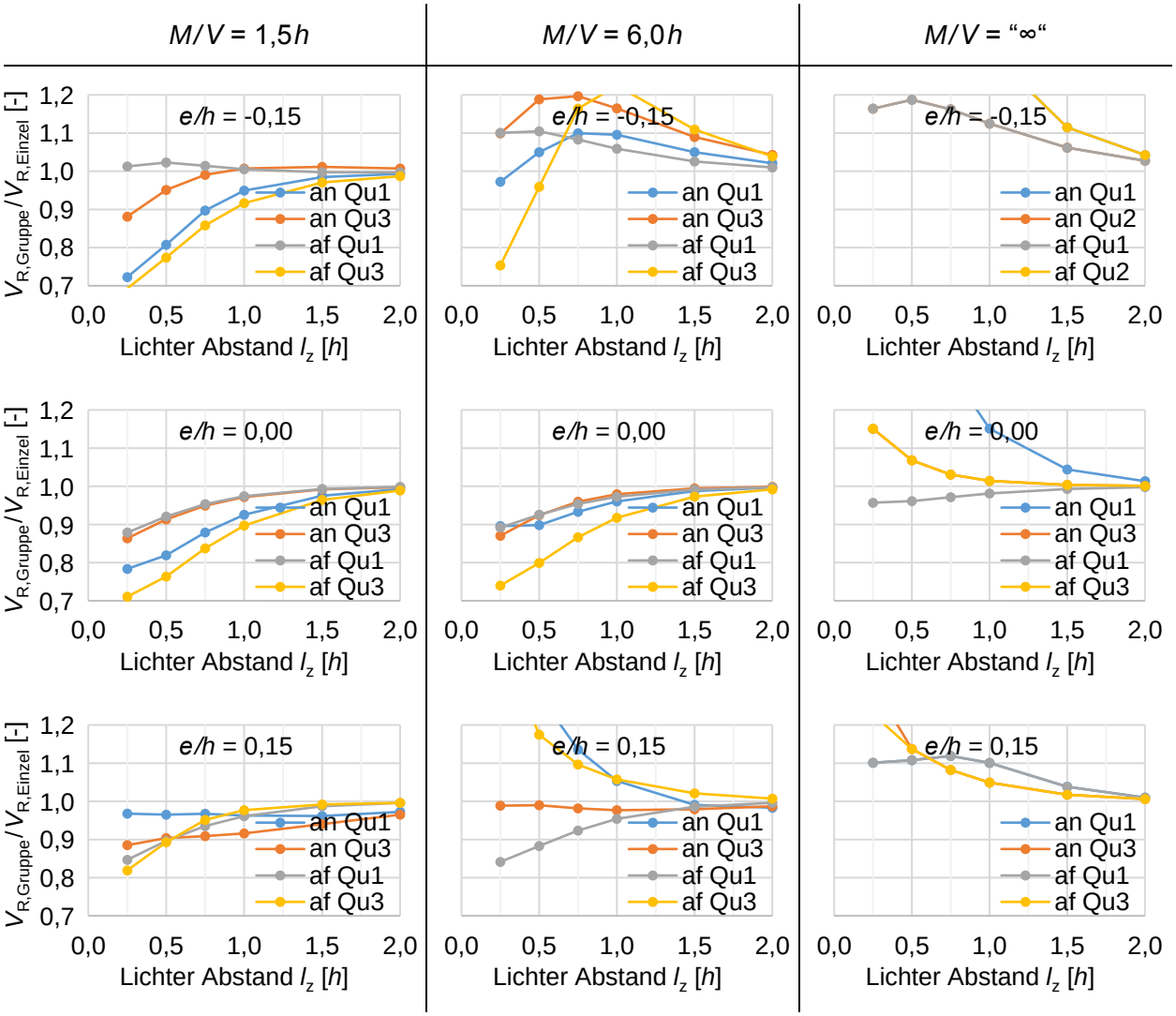


Abbildung 82: Quadrantweise Betrachtung des Vergleichs der Versagenslasten der Gruppen mit den Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (d/h = 0,30)

- 3 Durchbrüche:

Aufgrund der Feststellung, dass der größte tragfähigkeitsmindernde Einfluss einer Gruppe von 2 Durchbrüchen im auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich auftritt, wurden die Untersuchungen für Gruppen von 3 Durchbrüchen auf diesen Bereich eingegrenzt ($M/V = 1{,}5h$). Abbildung 83 und Abbildung 84 veranschaulichen die Ergebnisse für diesen Fall in analoger Form zu den Gruppen von 2 Durchbrüchen.

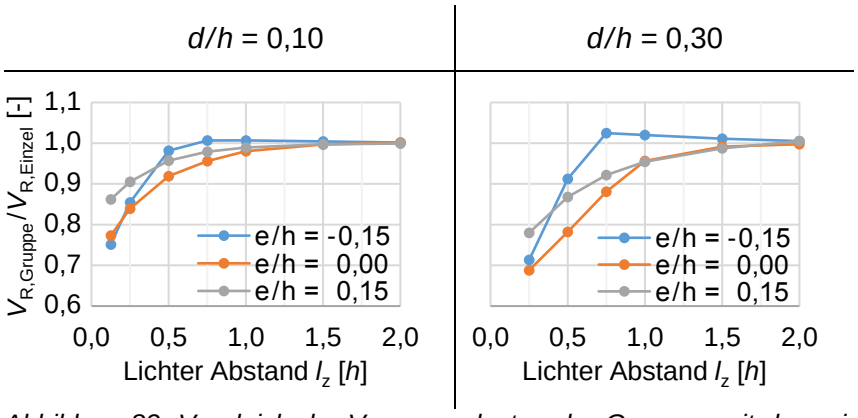


Abbildung 83: Vergleich der Versagenslasten der Gruppen mit den minimalen Versagenslasten der drei entsprechenden Einzeldurchbrüche ($M/V = 1{,}5h$)

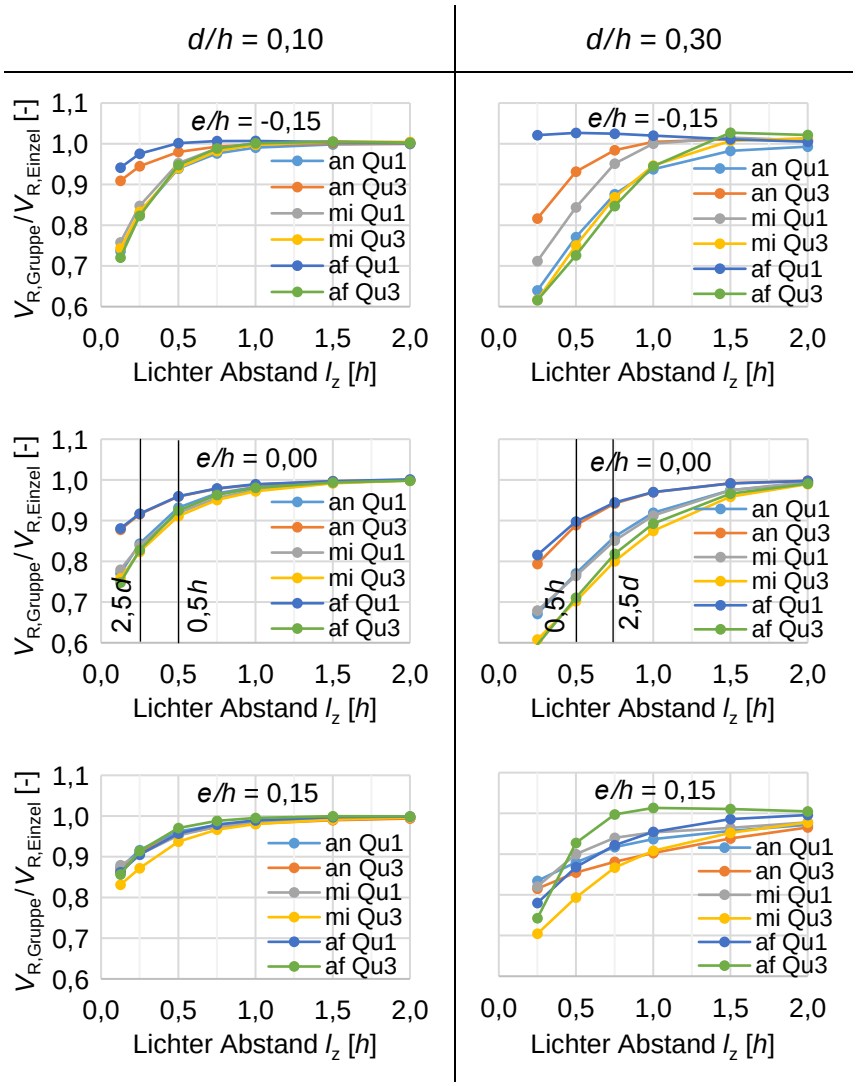


Abbildung 84: Quadrantweise Betrachtung des Vergleichs der Versagenslasten der Gruppen mit den Versagenslasten der drei entsprechenden Einzeldurchbrüche ($M/V = 1{,}5h$)

Hinsichtlich des gegenseitigen Einflusses lassen sich die wichtigsten Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Das Ausmaß des gegenseitigen Einflusses ist nicht nur abhängig vom lichten Abstand, sondern auch von der Ausmitte und dem Schnittkraftverhältnis, d.h. allgemein von der Position der Gruppe im Träger.
- Ein zunehmender Momenteneinfluss wirkt sich generell positiv auf den gegenseitigen Einfluss aus.
- Bei einer ausmittigen Anordnung im momentenbeanspruchten Bereich liegt infolge der Gruppenanordnung eine tragfähigkeitssteigernde Wirkung vor.
- Der größte tragfähigkeitsmindernde Einfluss tritt im auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich auf, überwiegend bei einer zentrischen Anordnung.
- Hinsichtlich der einzelnen querzugbeanspruchten Bereiche einer Gruppe im auflagernahen Bereich zeigt sich in den äußeren Bereichen der Gruppe (an Qu3, af Qu1) ein geringerer Einfluss als in den Bereichen zwischen den einzelnen Durchbrüchen.
- Bei einer Gruppe von 3 Durchbrüchen treten geringfügig größere Abminderungen auf als bei einer Gruppe von 2 Durchbrüchen, d.h. die Anzahl der Durchbrüche ist ebenfalls von Bedeutung.
- Die Durchbruchgröße hat ebenfalls einen Einfluss auf das Ausmaß des gegenseitigen Einflusses:
  Betrachtet man beispielsweise die Ergebnisse einer Gruppe von 3 Durchbrüchen an der Position M/V = 1,5h; e/h = 0,00; l_z = 0,5h in Abbildung 84, so ist im Fall der Durchbruchgröße d/h = 0,10 noch kaum ein Einfluss festzustellen, im Fall d/h = 0,30 jedoch bereits ein nennenswerter. Wählt man für den lichten Abstand keinen absoluten Wert in Abhängigkeit der Höhe sondern einen relativen Wert in Abhängigkeit des Durchmessers (z.B. l_z = 2,5d), so erhält man für unterschiedliche Durchmesser vergleichbare Abminderungen. Zur leichteren Nachvollziehbarkeit wurden die angesprochenen lichten Abstände in den beiden Diagrammen markiert.
- Das Mindestmaß l_z = 1,5h, ab dem gemäß DIN EN 1995-1-1/NA:2013 ein gegenseitiger Einfluss vernachlässigt werden darf, erscheint nach diesen Ergebnissen bei der Durchbruchgröße d/h = 0,10 eher konservativ, bei der Durchbruchgröße d/h = 0,30 passend. Bei noch größeren Durchbrüchen ist zu erwarten, dass sich dieses Mindestmaß vergrößert.

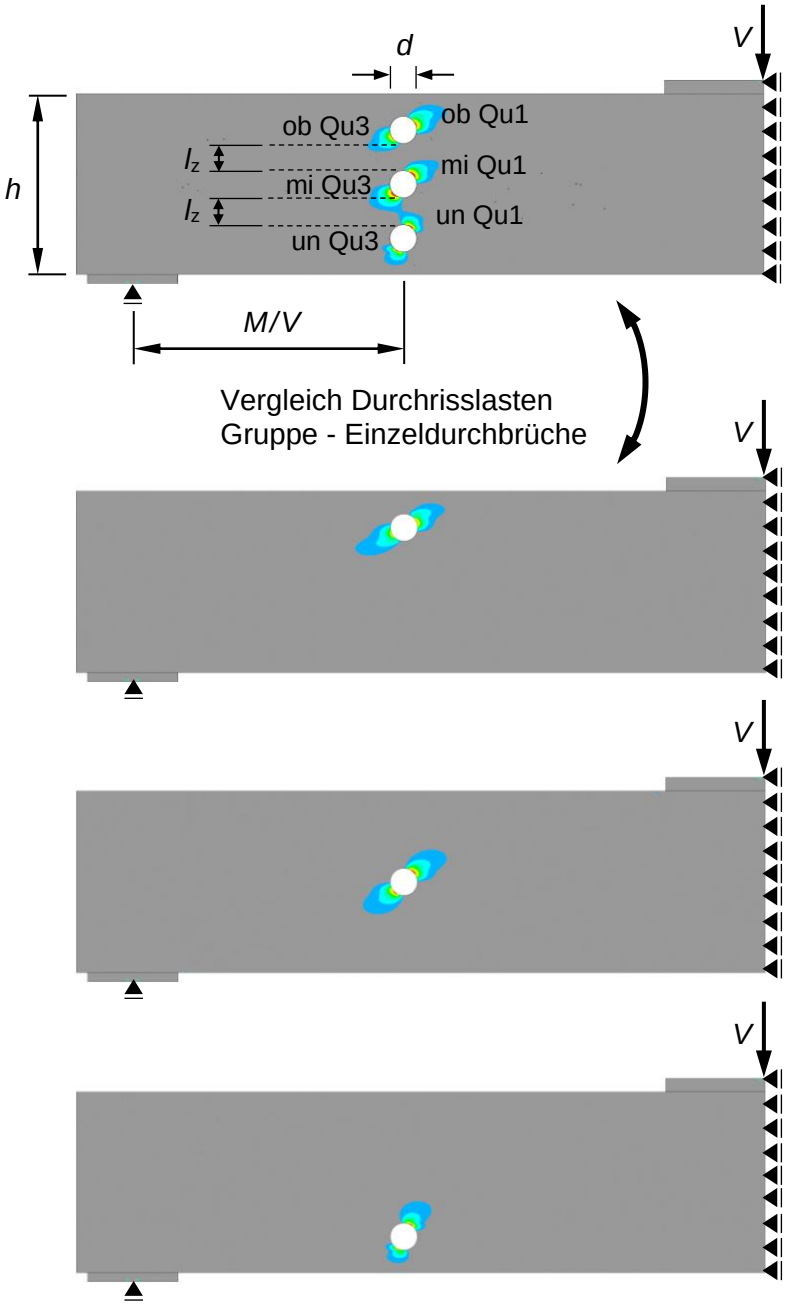
3.5.2 Vertikale Gruppe

Eine Anordnung von mehreren Durchbrüchen in vertikaler Richtung beschränkt sich generell eher auf große Trägerhöhen und geringe relative Durchbruchgrößen. Um auch für diese Möglichkeit der Anordnung den gegenseitigen Einfluss von Durchbrüchen einer Gruppe bestimmen zu können, wurde in analoger Weise zur Bestimmung bei einer horizontalen Anordnung vorgegangen, siehe Abbildung 85. Im Hinblick auf eine ausreichende Variationsmöglichkeit der lichten Abstände, mussten bei einer zu betrachtenden Anzahl von bis zu drei Durchbrüchen vergleichsweise geringe Durchbruchgrößen (d/h = 0,075; d/h = 0,15) gewählt werden. Infolge des begrenzenden Maßes der Bauteilhöhe ergaben sich je nach Anzahl und Größe der Durchbrüche zwangsläufig variierende lichte Abstände. Hinsichtlich der Verteilung über die Bauteilhöhe wurden ausschließlich zur Schwerachse des Trägers symmetrische Anordnungen betrachtet. Analog

zur Vorgehensweise bei einer horizontalen Anordnung wurde zunächst ein Teil der Untersuchungen bei verschiedenen Schnittkraftverhältnissen (M/V = 1,5h; M/V = 10,0h; M/V = "∞") durchgeführt.

Hinter den Bezeichnungen der querzugbeanspruchten Bereiche in Abbildung 85 stehen folgende Bedeutungen:

- ob Qu1/3: oberer Durchbruch Quadrant 1/3
- mi Qu1/3: mittlerer Durchbruch Quadrant 1/3
- un Qu1/3: unterer Durchbruch Quadrant 1/3



Variierte Parameter:

- Anzahl der Durchbrüche:
  n = 2; 3
- Durchbruchgröße:
  d/h = 0,075; 0,15
- Lichter Abstand:
  l_z unterschiedlich in Abh. von d/h und n
- Ausmitte:
  Anordnung nur symmetrisch zur Schwerachse
- Schnittkraftverhältnis:
  M/V = 1,5h; 10,0h; "∞"

Abbildung 85: Prinzipielles Vorgehen und variierte Parameter

- 2 Durchbrüche:

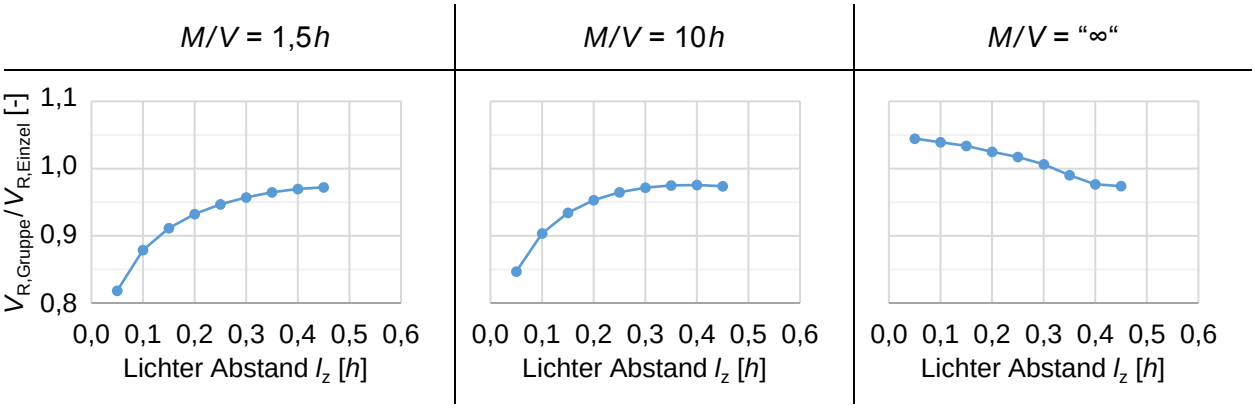


Abbildung 86: Vergleich der Versagenslasten der Gruppen mit den minimalen Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (d/h = 0,15)

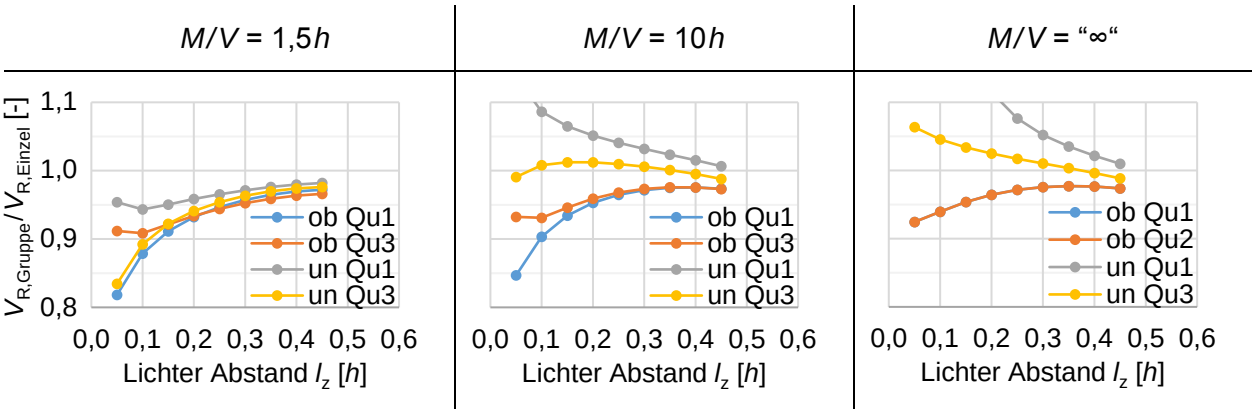


Abbildung 87: Quadrantweise Betrachtung des Vergleichs der Versagenslasten der Gruppen mit den Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (d/h = 0,15)

Nachdem sich in den Untersuchungen zu Gruppen von 2 Durchbrüchen mit unterschiedlichen Schnittkraftverhältnissen der auflagernahe, vorwiegend schubbeanspruchte Bereich hinsichtlich des gegenseitigen Einflusses als maßgebend herauskristallisiert hatte, wurden die Untersuchungen mit verschiedenen Durchbruchgrößen sowie unterschiedlicher Anzahl auf diesen Bereich (M/V = 1,5h) eingegrenzt.

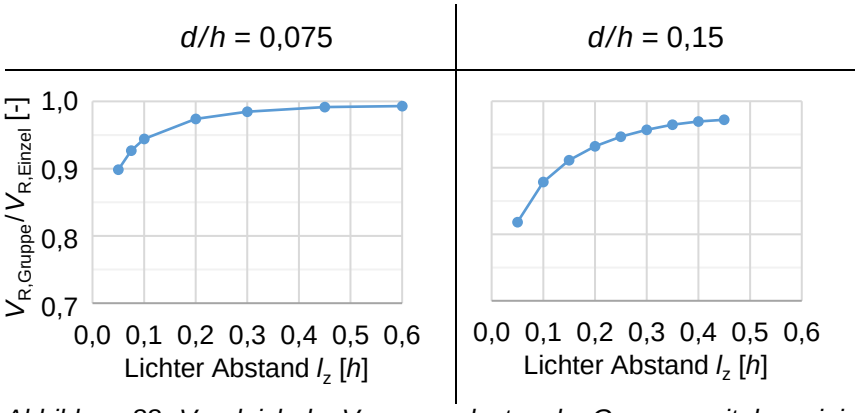


Abbildung 88: Vergleich der Versagenslasten der Gruppen mit den minimalen Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (M/V = 1,5h)

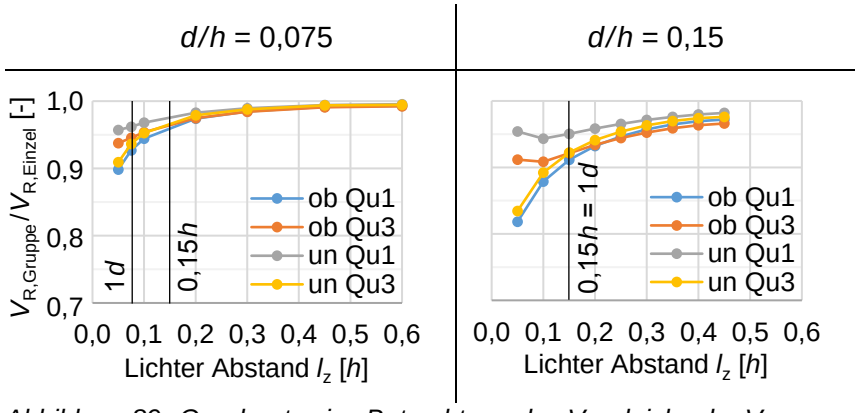


Abbildung 89: Quadrantweise Betrachtung des Vergleichs der Versagenslasten der Gruppen mit den Versagenslasten der beiden entsprechenden Einzeldurchbrüche (M/V = 1,5h)

- 3 Durchbrüche:

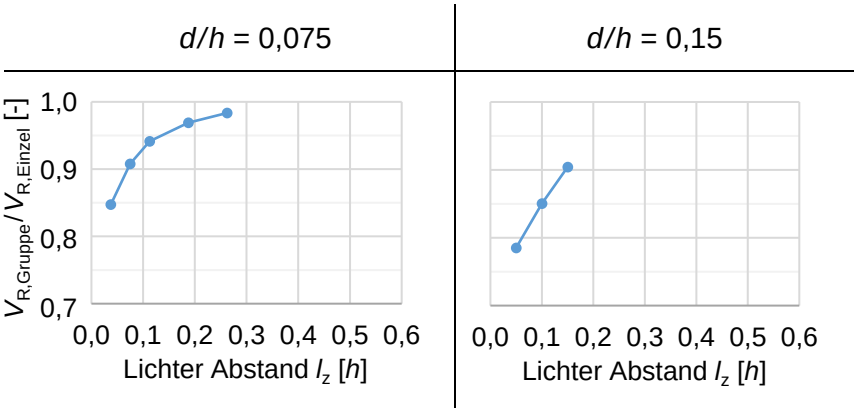


Abbildung 90: Vergleich der Versagenslasten der Gruppen mit den minimalen Versagenslasten der drei entsprechenden Einzeldurchbrüche (M/V = 1,5h)

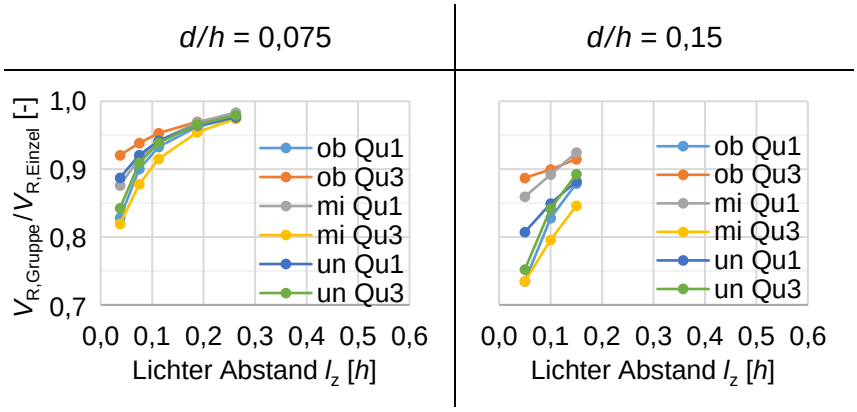


Abbildung 91: Quadrantweise Betrachtung des Vergleichs der Versagenslasten der Gruppen mit den Versagenslasten der drei entsprechenden Einzeldurchbrüche (M/V = 1,5h)

Hinsichtlich des gegenseitigen Einflusses lassen sich die wichtigsten Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Das Ausmaß des gegenseitigen Einflusses ist nicht nur abhängig vom lichten Abstand, sondern auch vom Schnittkraftverhältnis, d.h. allgemein von der Position der Gruppe im Träger.
- Ein zunehmender Momenteneinfluss wirkt sich generell positiv auf den gegenseitigen Einfluss aus.
- Der größte tragfähigkeitsmindernde Einfluss tritt im auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich auf.
- Verglichen mit horizontalen Anordnungen tritt ein nennenswerter gegenseitiger Einfluss erst bei geringen Abständen auf.
- Ähnlich zu den Ergebnissen bei einer horizontalen Anordnung zeigt sich die Größe des gegenseitigen Einflusses näherungsweise in Abhängigkeit des relativen Abstandes l_z:
  Ein Vergleich der Ergebnisse einer Gruppe von 2 Durchbrüchen in Abbildung 89 ergibt bei einem absoluten Abstand $l_z = 0{,}15h$ nennenswerte Unterschiede, bei einem relativen Abstand $l_z = 1{,}0d$ hingegen ähnliche Werte. Die entsprechenden lichten Abstände wurden in den Diagrammen wiederum gekennzeichnet.
- Bei einer Gruppe von 3 Durchbrüchen treten geringfügig größere Abminderungen auf als bei einer Gruppe von 2 Durchbrüchen, d.h. wie im Fall einer horizontalen Anordnung ist die Anzahl der Durchbrüche ebenfalls von Bedeutung.
- Bei ausreichend großem Abstand nähert sich der gegenseitige Einfluss einer vernachlässigbaren Größe an ($l_z \geq \sim 5d$).

4 Bemessungsregeln und Konstruktionsgrundsätze

4.1 Unverstärkter Zustand

4.1.1 Exzentrische Anordnung

- Nachweis der Querzugbeanspruchung

Nachdem sich in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchswerten und den numerischen Berechnungen in Kombination mit dem Weibull-basierten Bemessungsansatz gezeigt hatte, wurde versucht, die Ergebnisse dieses Ansatzes getrennt für die Lastfälle „Querkraft“ und „Moment“ auf das Format des bestehenden Bemessungsansatzes in DIN EN 1995-1-1/NA:2013 zu übertragen, siehe folgende Gleichung (7).

$$\frac{\sigma_{t,90,V}}{k_{dis,V} \cdot k_{vol,V} \cdot f_{t,90}} + \frac{\sigma_{t,90,M}}{k_{dis,M} \cdot k_{vol,M} \cdot f_{t,90}} = \frac{\frac{F_{t,90,V}}{l_{t,90,V}} + \frac{F_{t,90,M}}{l_{t,90,M}}}{0{,}5 \cdot b \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90}} \tag{7}$$

Die additive Berücksichtigung eines Querkraft- und eines Momentenanteils soll dabei eine flexible Anwendung über den gesamten Trägerbereich ermöglichen. Dazu wurden in einem ersten Schritt die querzugbeanspruchten Bereiche infolge der beiden getrennten Lastfälle „Querkraft“ sowie „Moment“ in Abhängigkeit der Durchbruchgröße und der Ausmitte in numerischen Berechnungen mit dem Weibull-basierten Bemessungsansatz ausgewertet. In einem zweiten Schritt wurden für die resultierenden Querzugkräfte entlang der höchstbeanspruchten Pfade Gleichungen abgeleitet. Durch entsprechende Anpassung der Abklinglängen wurde abschließend versucht, getrennt für die beiden Lastfälle eine möglichst gute Übereinstimmung der beiden Seiten zu erreichen. Die daraus erzielten Gleichungen sind im Folgenden dargestellt:

Die Anwendungsgrenzen entsprechend den Untersuchungen lauten:

- Durchbruchgröße $d/h \leq 0{,}40$
- Randabstand $h_{ro/ru} \geq Max \begin{pmatrix} 0{,}1h \\ \frac{3}{8}d \end{pmatrix}$

$$\frac{\frac{F_{t,90,V}}{l_{t,90,V}} + \frac{F_{t,90,M}}{l_{t,90,M}}}{0{,}5 \cdot b \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90}} \leq 1 \tag{8}$$

mit

$$F_{t,90,V,I/III} = \frac{V \cdot 0{,}7d}{4 \cdot h} \cdot \left[3 - \left(\frac{0{,}7d}{h}\right)^2\right] \cdot k_{exz} \tag{9}$$

$$k_{exz} = 0{,}1 + \frac{d}{h} + 4{,}5 \cdot \frac{h_{ro/ru}}{h} + 0{,}2 \cdot \frac{d}{h} \cdot \frac{h_{ro/ru}}{h} - 4{,}9 \cdot \left(\frac{h_{ro/ru}}{h}\right)^2 \tag{10}$$

$$l_{t,90,V,I/III} = 1{,}3 \cdot d \tag{11}$$

und

$$F_{t,90,M,I} = M \cdot \frac{d}{h^3} \cdot Max \begin{Bmatrix} -0{,}62 \cdot (e - 0{,}13 \cdot d) \\ -0{,}2 \cdot (e - 0{,}45 \cdot d) \\ 0{,}3 \cdot (e - 0{,}08 \cdot d) \end{Bmatrix} \tag{12}$$

$$l_{t,90,M,I} = 0{,}8 \cdot d \cdot \left(1 - \frac{e}{d}\right) \qquad mit\ 0{,}6 \cdot d \leq l_{t,90,M,I} \leq 1{,}0 \cdot d \tag{13}$$

$$F_{t,90,M,III} = M \cdot \frac{d}{h^3} \cdot 0{,}22 \cdot (e + 0{,}19 \cdot d) \tag{14}$$

$$l_{t,90,M,III} = 0{,}4 \cdot d \tag{15}$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{b \cdot \frac{5}{36} \cdot (0{,}875^2 - 0{,}5^2) \cdot d^2 \cdot \pi}\right)^{0{,}2} \qquad \text{mit } V_0 = 0{,}01m^3 \tag{16}$$

Im Gegensatz zu einer zentrischen Anordnung können bei exzentrischen Anordnungen beide querzugbeanspruchte Bereiche maßgebend werden. Hinsichtlich der Nachweisführung bedeutet dies, dass sowohl Quadrant I als auch Quadrant III zu betrachten sind.

Zur Bestimmung der resultierenden Querzugkraft $F_{t,90,V,I/III}$ infolge einer Querkraft V wurde ein Beiwert k_{exz} in Abhängigkeit der Randabstände $h_{ro/ru}$ abgeleitet, mit dem die resultierende Querzugkraft eines zentrischen Durchbruchs zu multiplizieren ist, siehe Gleichungen (9) und (10). Im Quadrant I ist der Abstand h_{ro} zu verwenden, im Quadrant III entsprechend der Randabstand h_{ru}. Dass sich für zentrische Durchbrüche Werte > 1 ergeben, liegt an 2 Umständen. Zum einen erfolgte die Ermittlung der Querzugkräfte entlang der Pfade ausschließlich unter Berücksichtigung der Querzugspannungen, zum anderen wurden die Pfade ausgehend von den maximalen Querzugspannungen am Durchbruchrand positioniert. Diese liegen unter Berücksichtigung der mittleren Steifigkeitswerte der Festigkeitsklasse GL 28h entsprechend DIN EN 14080:2013 bei etwa 53°, während die über eine Integration der Schubspannungen erfolgte Ermittlung nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013 bis zur Position 45° erfolgt.

Die Bestimmung der resultierenden Querzugkräfte $F_{t,90,M,I}$ sowie $F_{t,90,M,III}$ infolge eines Moments M erfolgt über bereichsweise lineare Näherungsgleichungen, siehe Gleichungen (12) und (14).

Folgende Abbildung enthält eine Gegenüberstellung der im Rahmen der Parameterstudie ermittelten Querzugkräfte aus Abbildung 52 mit den über die angegebenen Gleichungen ermittelten Querzugkräften (die gestrichelten Linien sind über die angegebenen Gleichungen ermittelt).

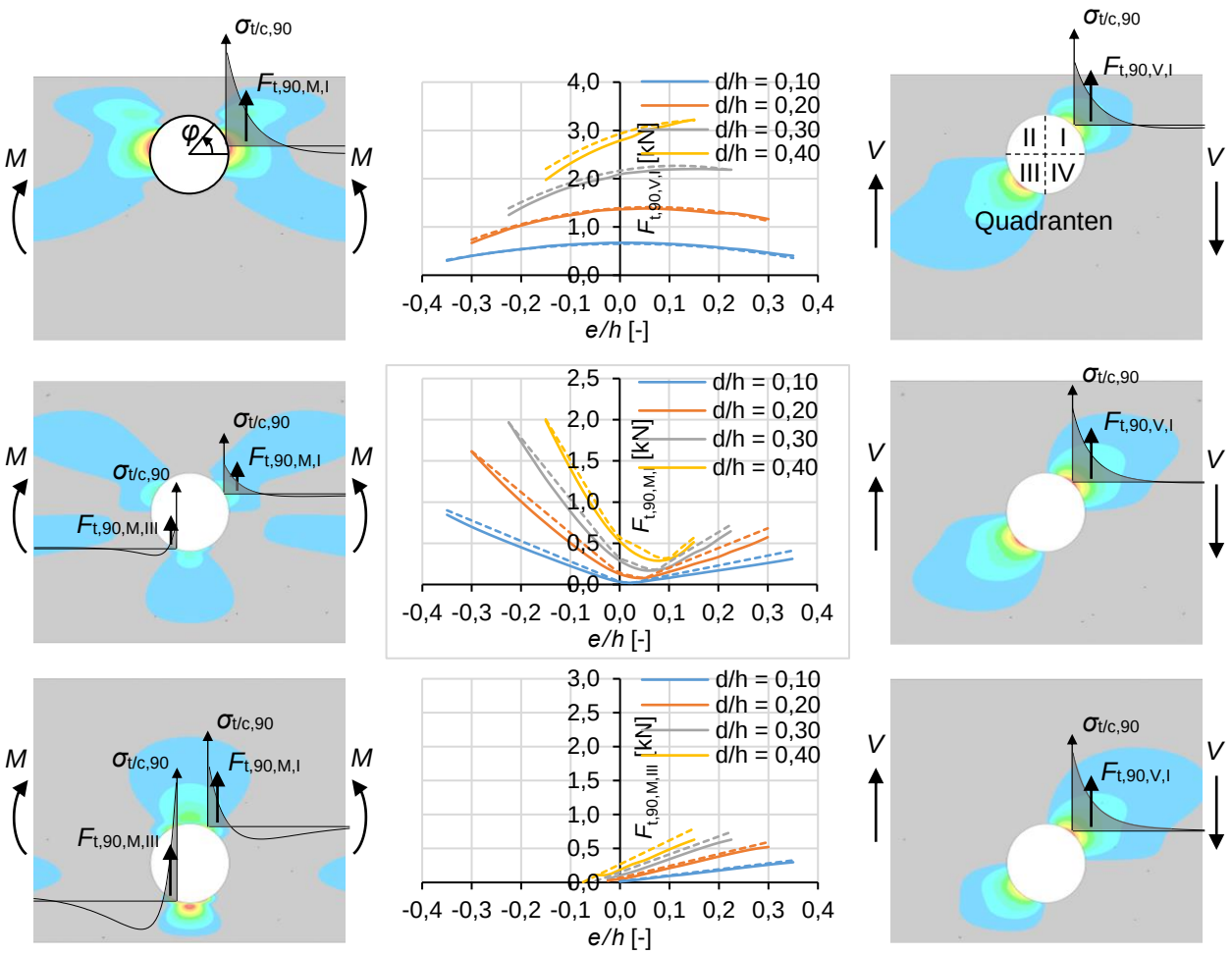


Abbildung 92: Vergleich zwischen den in FEM Berechnungen und über die angegebenen Gleichungen ermittelten Querzugkräften

Der zugrundeliegende Hintergrund des Beiwerts k_{vol} ist ein Volumen in Form eines Kreisringsegments mit einer konstanten Breite b, einem Öffnungswinkel $\theta = 50°$ sowie einer radialen Ausdehnung von $\Delta r = 0{,}375\,d$, siehe Abbildung 93. Berechnungen unter Variation des Öffnungswinkels und der radialen Ausdehnung (Vergrößerung) haben gezeigt, dass sich das Ergebnis im Vergleich zu dieser festgelegten Größe um weniger als 3 % verändert, weshalb dieser Integrationsbereich als ausreichend erachtet wird.

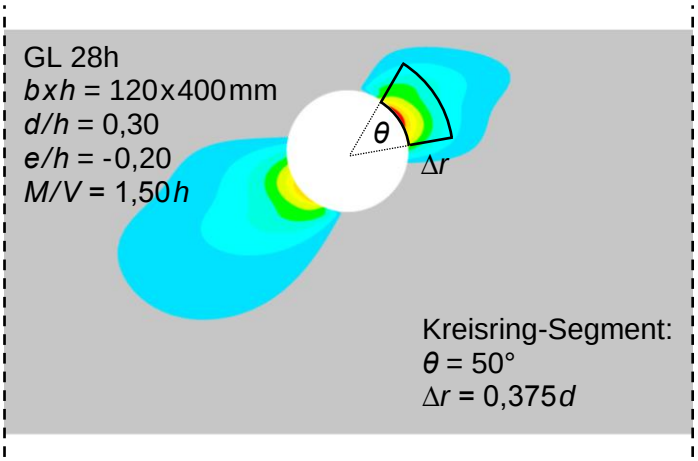


Abbildung 93: Definition des Volumens von k_{vol}

Ein Vorteil dieses Bemessungskonzepts ist, dass es flexibel für unterschiedliche Trägerbereiche anwendbar ist. Wie aus Abbildung 92 ersichtlich ist, können die querzugbeanspruchten Bereiche infolge einer Querkraft sowie infolge eines Moments in Abhängigkeit der Ausmitte an unterschiedlichen Positionen auftreten, so dass ein daraus resultierender Zustand im Vergleich zu einer vereinfachten Addition der Maximalwerte der beiden Einzelzustände zu geringeren Beanspruchungen führt. Da im Bemessungskonzept jedoch nur die beiden Einzelzustände unabhängig von deren Position addiert werden, kommt es zu auf der sicheren Seite liegenden Abweichungen. Ein exemplarischer Vergleich zwischen dem vorgestellten Bemessungskonzept und der numerischen Auswertung am Beispiel d/h = 0,30 aus Abbildung 55 ist in folgender Abbildung dargestellt. Daraus zeigt sich, dass die geringsten Abweichungen bei sehr kleinen Schnittkraftverhältnissen (überwiegender Einfluss der Querkraft, geringer Einfluss des Moments), bei sehr großen Schnittkraftverhältnissen (überwiegender Einfluss des Moments, geringer Einfluss der Querkraft), sowie bei zentrischen Durchbrüchen (überwiegender Einfluss der Querkraft, geringer Einfluss des Moments) auftreten.

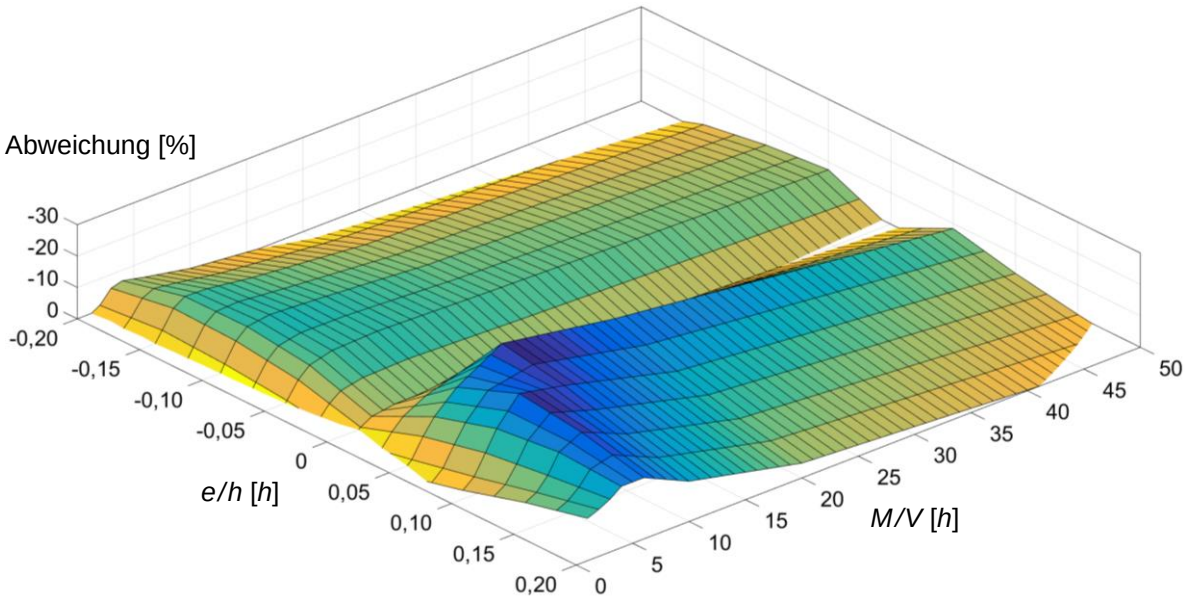


Abbildung 94: Abweichung der mit dem Bemessungskonzept ermittelten Tragfähigkeit im Vergleich zur numerischen Auswertung für die beispielhafte Durchbruchgröße d/h = 0,30

Zur Bewertung des Sicherheitsniveaus wird abschließend ein Vergleich zwischen den aus Versuchsergebnissen sowie mithilfe des Bemessungskonzepts ermittelten charakteristischen Tragfähigkeiten aufgezeigt, siehe Abbildung 95 sowie Tabelle 8. Dabei werden sowohl die eigenen Versuchsergebnisse als auch die Ergebnisse aus Untersuchungen zu zentrischen Durchbrüchen von AICHER & HÖFFLIN (2006) herangezogen. Die Bestimmung charakteristischer Werte aus Versuchsergebnissen erfolgte in Anlehnung an DIN EN 14358:2016 unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung in Kombination mit einem globalen Variationskoeffizient nach DIN EN 14545:2009 auf Basis aller in Abbildung 95 bzw. Tabelle 8 angegebener Versuchsergebnisse. Für die Ermittlung über das Bemessungskonzept wurde ein charakteristischer Wert $f_{t,90,k}$ = 0,5 N/mm² verwendet.

Zum Vergleich wurden in Anhang D die charakteristischen Werte der Versuche für jede Reihe über individuelle Variationskoeffizienten ermittelt.

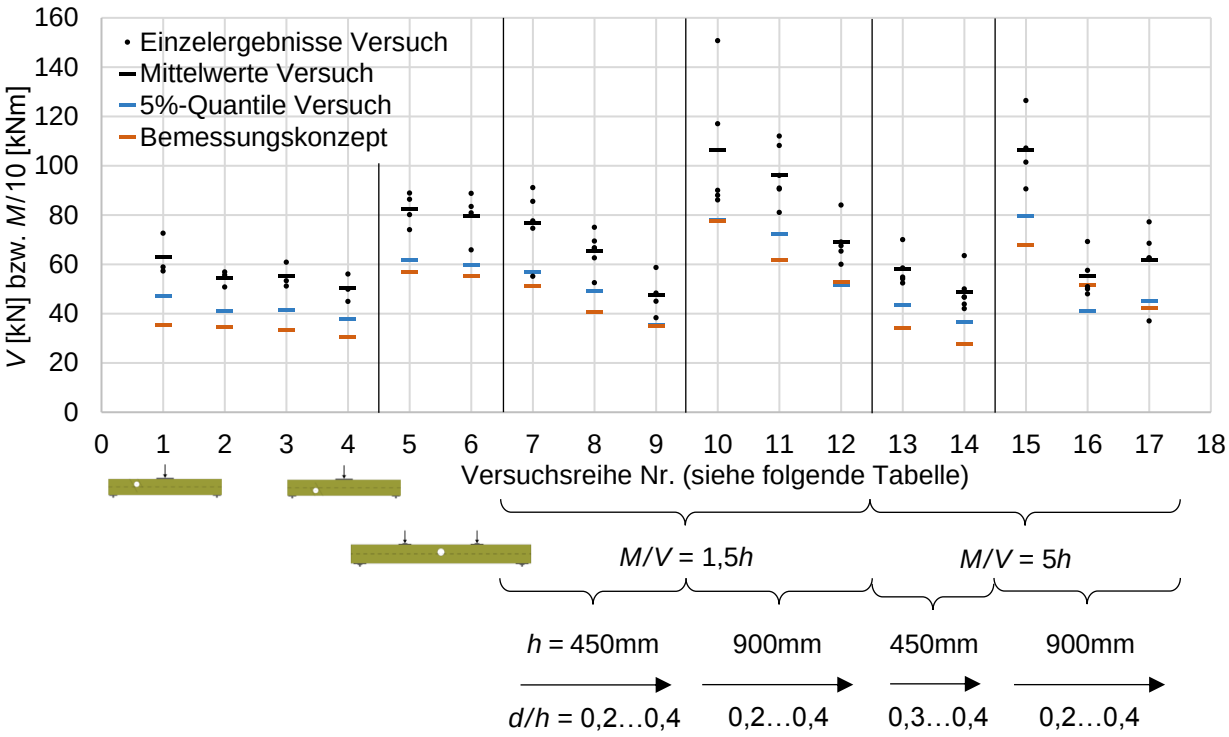


Abbildung 95: Vergleich Versuchsergebnisse – Bemessungskonzept auf Basis eines globalen Variationskoeffizienten

Tabelle 8: In Abbildung 95 zugrundeliegende Daten (Durchrisslasten)

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Eigene Versuche						AICHER & HÖFFLIN (2006)										
b [mm]	120	120	120	120	200	200	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
h [mm]	400	400	400	400	1000	1000	450	450	450	900	900	900	450	450	900	900	900
d/h [-]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,40	0,40	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
e/h [-]	-0,175	-0,10	0,10	0,175	-0,10	0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M/V [*h*]	1,5	1,5	1,5	1,5	∞	∞	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	5	5	5	5	5
V [kN] bzw. *M*/10 [kNm]	58,9	56,9	51,1	56,1	80,1	65,8	85,5	52,5	38,3	88,0	96,0	67,5	58,5	50,0	107,1	48,0	62,6
	72,6	50,8	60,9	44,9	86,4	83,4	91,1	75,0	45,0	86,1	112,0	84,0	70	63,5	101,4	50,9	77,2
	57,2	55,7	53,3	49,9	74,0	88,8	74,6	69,4	48,3	90,0	90,5	60,0	52,4	43,8	126,4	50,0	68,5
					88,9	80,8	77,6	62,6	58,7	117,0	81,0	69,0	54,8	46,7	90,6	69,2	62,5
							55,1	66,7		150,7	90,9	65,3	54,1	46,7		57,5	37,0
								66,5			108,2			42,0			
Mittelwerte Versuch	62,9	54,4	55,1	50,3	82,4	79,7	76,8	65,5	47,6	106,4	96,4	69,2	58,0	48,8	106,4	55,1	61,6
$\bar{y}$	4,136	3,996	4,007	3,914	4,409	4,372	4,327	4,175	3,850	4,642	4,563	4,230	4,054	3,878	4,660	4,000	4,091
s_y	0,130	0,060	0,091	0,111	0,082	0,129	0,194	0,121	0,177	0,243	0,121	0,124	0,116	0,147	0,139	0,148	0,282
COV_g	0,158																
k_s	1,797																
5%-Quantile Versuch	47,1	41,0	41,4	37,7	61,9	59,7	57,0	49,0	35,4	78,2	72,2	51,8	43,4	36,4	79,6	41,1	45,1
Bemessungskonzept	35,4	34,7	33,2	30,5	56,7	55,2	51,0	40,7	34,8	77,4	61,7	52,8	34,0	27,9	67,9	51,6	42,2

Der Vergleich zeigt, dass die 5%-Quantilwerte der Versuche mit Ausnahme der Versuchsreihe 16 nicht wesentlich überschritten werden. Bei dieser Versuchsreihe liegen mehrere Versuchsergebnisse unterhalb der mittels des Bemessungsmodells ermittelten charakteristischen Tragfähigkeit, jedoch erscheinen die Versuchsergebnisse dieser Versuchsreihe ungewöhnlich niedrig. Zum einen ist bei einem Vergleich der Versuchsreihen 15 - 17 kein klarer Trend erkennbar, obwohl die Durchbruchgröße bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen stetig zunimmt. Zum anderen zeigt ein Vergleich der Versuchsreihen 13 und 16, dass sich bei einer doppelt so großen Trägerhöhe und gleicher relativer Durchbruchgröße dennoch geringere Tragfähigkeiten ergeben. Ein Vergleich der Versuchsreihen unterschiedlicher Schnittkraftverhältnisse (10 - 12 mit 15 - 17) zeigt im Fall der Durchbruchgrößen d/h = 0,20 und d/h = 0,40 nur einen geringen Einfluss, im Fall der Durchbruchgröße d/h = 0,30 jedoch einen sehr deutlichen. Insofern wird die Aussagekraft dieser Werte (Versuchsreihe 16) als weniger relevant eingeschätzt.

- Nachweis der Beanspruchung in Faserrichtung

Hinsichtlich eines Nachweises der Beanspruchung in Faserrichtung sind verschiedene Ansätze möglich:

Zum einen wäre ein Biegenachweis nach der klassischen Balkentheorie unter Zugrundelegung von Netto-Querschnittswerten auf der Einwirkungsseite sowie der Zugfestigkeit $f_{t,0}$ auf der Widerstandsseite denkbar. Das Heranziehen der Zugfestigkeit wird damit begründet, dass unabhängig von der genauen Spannungsverteilung über den gesamten Restquerschnitt eine hohe Zugbeanspruchung vorliegt. Jedoch wird der auftretenden Spannungskonzentration ober-/unterhalb des Durchbruchs bei dieser Nachweisform nur in stark vereinfachter Weise Rechnung getragen. Auf diese Art ermittelte Biegerandspannungen von Großversuchen mit Biegezugversagen im Restquerschnitt resultierten in folgenden Mittelwerten, siehe Abschnitt 2.2.5:

- Exzentrische Einzeldurchbrüche, rein “M“, e/h = -0,100 $\sigma_{m,y,net}$ = -39,9 N/mm²
- Exzentrische Einzeldurchbrüche, rein “M“, e/h = 0,100 $\sigma_{m,y,net}$ = 33,2 N/mm²
- Vertikale Gruppe, verstärkt $\sigma_{m,y,net}$ = 25,9 N/mm²

Insbesondere der ermittelte Wert im Fall der vertikalen Gruppe deutet jedoch an, dass dieses Vorgehen nicht zwingend auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert, da die angegebene Biegerandspannung einen für den Mittelwert der Zugfestigkeit vergleichsweise geringen Wert darstellt. Für eine belastbare Aussage sind hierzu weitere Untersuchungen erforderlich.

Ein weiterer Ansatz wäre ein Biegenachweis auf Grundlage der maximalen Spannungswerte am Durchbruchrand. In Abschnitt 3.3.2 wurden im Rahmen einer Parameterstudie getrennt für die Beanspruchungen “*M*“ und “*V*“ entsprechende Erhöhungsfaktoren zur Bestimmung der maximalen Spannungswerte am Durchbruchrand ermittelt. Ohne Berücksichtigung eines Größeneffekts sowie einer wahrscheinlichkeitsbasierten Betrachtung des Auftretens von Schwachstellen in diesem Bereich stellt dieses Vorgehen jedoch eine sehr konservative und restriktive Nachweisform dar. Hierzu sind ebenfalls weitere Untersuchungen erforderlich.

4.1.2 Gruppeneinfluss horizontal

Für die Ableitung eines Abminderungsbeiwerts zur Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung horizontal nebeneinanderliegender Durchbrüche wurden die Ergebnisse aus Abschnitt 3.5.1 auf Basis einer Betrachtung der Gruppe sowie der entsprechenden Einzeldurchbrüche als jeweils eine Einheit herangezogen. Demzufolge kann folgender Abminderungsbeiwert angegeben werden:

$$k_{space,hor} = Min \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 - 0{,}2 \cdot \dfrac{1{,}5\,h - l_z}{1{,}5\,h} \\ 1 - 0{,}4 \cdot \dfrac{5\,d - l_z}{5\,d} \end{Bmatrix} \tag{17}$$

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit einer unverstärkten Gruppe ist dieser Abminderungsbeiwert mit der minimalen Querzugtragfähigkeit, berechnet aus einer Betrachtung aller entsprechenden Einzeldurchbrüche, zu multiplizieren.

Die Anwendungsgrenzen entsprechend den Untersuchungen lauten:

- Durchbruchgröße $d/h \leq 0{,}30$
- Lichter Abstand $l_z \geq 1d$
- Anzahl der Durchbrüche $n \leq 3$

Um die Problemstellung für die Praxis handhabbar zu gestalten, wurden dabei folgende Vereinfachungen getroffen:

- Keine Unterscheidung hinsichtlich der Lage der Gruppe innerhalb des Trägers
  Die Herleitung erfolgte für den maßgebenden, auflagernahen Bereich. Für Anordnungen im überwiegend momentenbeanspruchten Bereich stellt Gleichung (17) eine auf der sicheren Seite liegende Vereinfachung dar.
- Keine Berücksichtigung der Anzahl der Durchbrüche
  Die Untersuchungen wurden unter Berücksichtigung einer Gruppengröße von 2 bzw. 3 Durchbrüchen durchgeführt. Eine Unterscheidung nach der Anzahl der Durchbrüche erscheint bei nur 2 verschiedenen Anzahlen zu wenig aussagekräftig und wurde daher vereinfachend vernachlässigt.

Im Folgenden sind die Werte des oben angegebenen Abminderungsbeiwerts den Ergebnissen der Untersuchungen gegenübergestellt:

- 2 Durchbrüche (M/V = 1,5h)

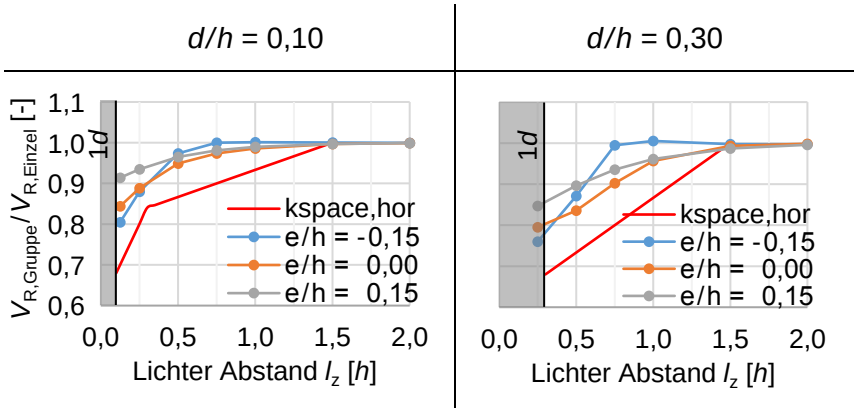


Abbildung 96: Gegenüberstellung des Abminderungsbeiwerts entsprechend Gleichung (17) und der ermittelten Werte nach Abschnitt 3.5.1 für Gruppen von 2 Durchbrüchen

- 3 Durchbrüche (M/V = 1,5h)

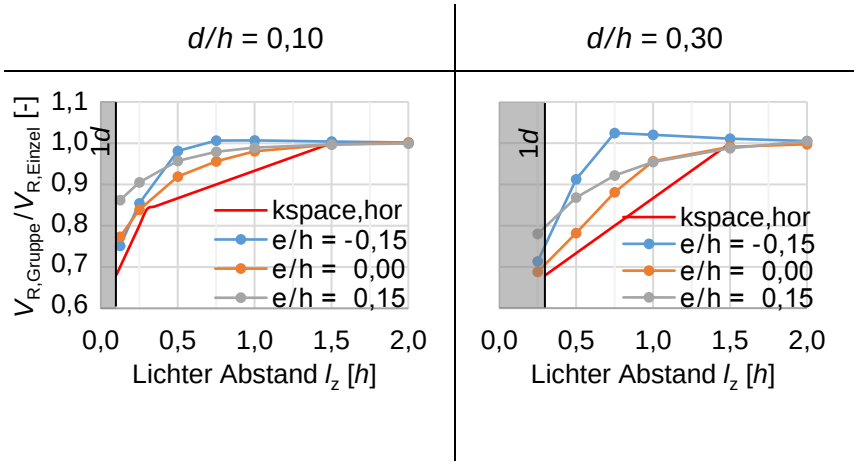


Abbildung 97: Gegenüberstellung des Abminderungsbeiwerts entsprechend Gleichung (17) und der ermittelten Werte nach Abschnitt 3.5.1 für Gruppen von 3 Durchbrüchen

Ein Vergleich mit den unverstärkten Gruppenkonfigurationen der Kleinversuche ist nicht ohne weiteres möglich. Zum einen wurden in den Versuchen ein größerer Durchmesser verwendet (d/h = 0,35) und zum anderen liegt als vergleichender Einzeldurchbruch in Form von Versuchswerten nur der Durchbruch an der Position M/V = 1,5h vor. Die weiter vom Auflager entfernten Durchbrüche der Gruppen wurden nicht versuchstechnisch als Einzeldurchbrüche geprüft. Infolge des höheren Momentenanteils ist zu erwarten, dass diese den jeweils maßgebenden der beiden Einzeldurchbrüche darstellen. Ungeachtet dessen ergeben sich in Bezug auf den Einzeldurchbruch an der Position M/V = 1,5h Verhältniswerte von 0,99 (l_z = 1,05h), 0,77 (l_z = 0,70h) sowie 0,73 (l_z = 0,35h). Eine Ermittlung entsprechend o.g. Gleichung würde auch für diese Situation auf der sicheren Seite liegen.

4.1.3 Gruppeneinfluss vertikal

Für die Ableitung eines Abminderungsbeiwerts zur Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung vertikal übereinanderliegender Durchbrüche wurden die Ergebnisse aus Abschnitt 3.5.2 auf Basis einer Betrachtung der Gruppe sowie der entsprechenden Einzeldurchbrüche als jeweils eine Einheit herangezogen. Demzufolge kann folgender Abminderungsbeiwert angegeben werden:

$$k_{space,vert} = Min\left\{\begin{matrix} 1 \\ 1 - 0{,}15 \cdot \dfrac{5\,d - l_z}{5\,d} \end{matrix}\right\} \tag{18}$$

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit einer unverstärkten Gruppe ist dieser Abminderungsbeiwert mit der minimalen Querzugtragfähigkeit, berechnet aus einer Betrachtung aller entsprechenden Einzeldurchbrüche, zu multiplizieren.

Die Anwendungsgrenzen entsprechend den Untersuchungen lauten:

- Anordnung symmetrisch zur Trägerachse
- Durchbruchgröße $d/h \leq 0{,}15$
- Lichter Abstand $l_z \geq 1d$
- Anzahl der Durchbrüche $n \leq 3$

Für lichte Abstände $l_z \geq 5d$ kann eine gegenseitige Beeinflussung näherungsweise vernachlässigt werden. Eine Berücksichtigung der Anzahl der Durchbrüche wird als unrelevant erachtet, da in der Praxis keinesfalls mehr als 3 Durchbrüche vorkommen werden.

In Abbildung 98 sowie Abbildung 99 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dem ermittelten Abminderungsbeiwert gegenübergestellt.

- 2 Durchbrüche (M/V = 1,5h)

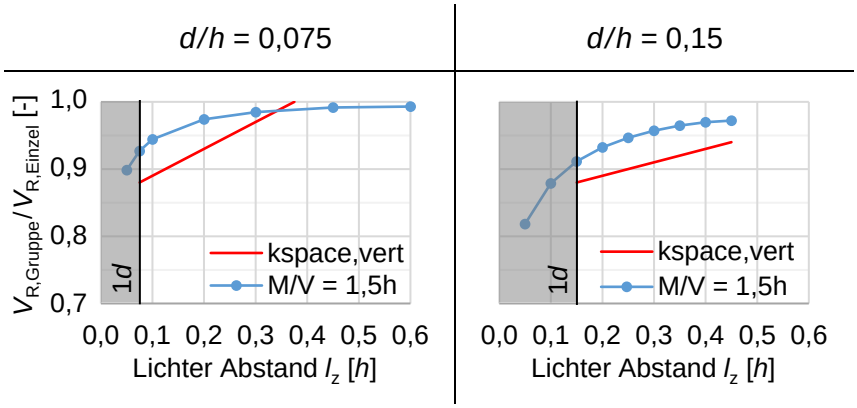


Abbildung 98: Gegenüberstellung des Abminderungsbeiwerts entsprechend Gleichung (18) *und der ermittelten Werte nach Abschnitt 3.5.2 für Gruppen von 2 Durchbrüchen*

- 3 Durchbrüche (M/V = 1,5h)

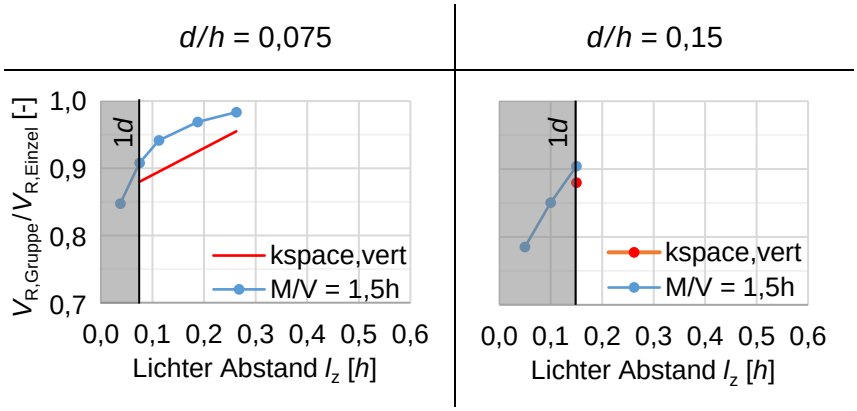


Abbildung 99: Gegenüberstellung des Abminderungsbeiwerts entsprechend Gleichung (18) *und der ermittelten Werte nach Abschnitt 3.5.2 für Gruppen von 3 Durchbrüchen*

Ein Vergleich des Abminderungsbeiwerts mit dem Ergebnis der unverstärkten Gruppe der Kleinversuche ist auch hier nicht ohne weiteres möglich, da die Bedingungen der Versuche (d/h = 0,25; l_z = 0,8d) außerhalb der oben genannten Anwendungsgrenzen liegen. Jedoch zeigt das Verhältnis 0,92 aus Gruppentragfähigkeit und vergleichbaren Einzeldurchbrüchen (nur die beiden ungeprüften an der Stelle e/h = -0,225), dass der gegenseitige Einfluss hinsichtlich eines Querzugversagens gering ausfällt. Eine Extrapolation in Gleichung (18) würde den Wert 0,87 liefern.

4.2 Verstärkter Zustand

In Abschnitt 3.4.3 wurden in numerischen Berechnungen anhand eines vereinfachten Simulationsmodells zwei Beispiele der Kleinversuche bezüglich der in den geneigten Verstärkungselementen auftretenden Kräften betrachtet. Für die Anordnung in der Biegedruckzone zeigte sich, dass eine Umrechnung der vollen resultierenden Querzugkräfte - ermittelt aus den Integralen über die Verläufe der Querzugspannungen - auf die geneigte Ebene eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung darstellt. Für die Anordnung in der Biegezugzone traten jedoch auch Fälle auf, in denen die Kräfte in den Verstärkungselementen auf diese Weise geringfügig unterschätzt

wurden, wobei die Differenz vom Steifigkeitsverhältnis zwischen Verstärkung und Träger beeinflusst wird. Infolgedessen wurden über die Horizontalanteile der Kräfte in den Verstärkungselementen die Anteile des Schubflusses infolge der Querkraft auf Höhe der potentiellen Rissebenen ermittelt, welche von den Verstärkungselementen aufgenommen wurden. Bei einer Neigung α = 60° wurden diese über eine Länge von etwa 0,3d ermittelt und bei einer Neigung α = 45° über eine Länge von etwa 0,55d.

Dehnungsmessungen in den Verstärkungselementen der Großversuche bestätigten die Größenordnung der angegebenen Werte, lieferten jedoch im Vergleich zu den in numerischen Berechnungen der Kleinversuche ermittelten Werte durchgehend etwas niedrigere Werte. Vergleichende Betrachtungen über eine Umrechnung der resultierenden Querzugkräfte – ermittelt nach Abschnitt 4.1.1 – stellten für die vorliegenden Fälle eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung dar. Gründe hierzu sind in Abschnitt 3.4.4 aufgeführt

Infolge der vereinfachten simulationstechnischen Betrachtungen mit angenommenen Risslängen und einer Betrachtung weniger Beispiele kann jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein allgemeingültiges Bemessungskonzept angegeben werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen und Parameterstudien erforderlich.

4.3 Konstruktionsgrundsätze

- In der Biegedruckzone angeordnete Durchbrüche führten im Vergleich zu in der Biegezugzone angeordneten Durchbrüchen sowohl in den Kleinversuchen als auch in den Großversuchen zu höheren Tragfähigkeiten. Hinsichtlich praxisbezogener Anordnungen wird daher bei exzentrischen Anordnungen der Biegedruckbereich empfohlen.
- Im auflagernahen, vorwiegend schubbeanspruchten Bereich wird eine geneigte Anordnung der Verstärkungselemente empfohlen, da diese zu einer Reduktion der auftretenden Querzug- und Schubspannungen führen. Numerische Untersuchungen anhand der Konfigurationen der geprüften exzentrischen Einzeldurchbrüche der Kleinversuche (d/h = 0,35; e/h = -0,175 bis 0,175) mit getrennten Betrachtungen hinsichtlich Querzug und Schub und verschiedenartig geneigten Verstärkungselementen (α = 90°, 60°, 45°) führten zu folgenden Ergebnissen: Die Querzugbeanspruchungen werden bei Anordnungen der Durchbrüche in der Biegedruckzone am meisten mittels unter α = 60° angeordneten Verstärkungselementen reduziert, bei Anordnungen in der Biegezugzone mittels unter α = 45° angeordneten Verstärkungselementen. Die Schubbeanspruchungen werden durchgehend mittels unter α = 45° angeordneten Verstärkungselementen am meisten reduziert.
- Exzentrische Anordnungen führen im Vergleich zu zentrischen Anordnungen zu ausgeprägten Konzentrationen von Spannungen in Faserrichtung an den außenliegenden Bereichen des Durchbruchs. Bei Anordnungen von Durchbrüchen in der Biegezugzone mit geringen Randabständen wird von innenliegenden Verstärkungselementen ohne genaueren Nachweis der Biegezugspannungen im Restquerschnitt abgeraten. Zum einen wird der Restquerschnitt durch das Einbringen der innenliegenden Verstärkungselemente geschwächt. Zum anderen führt eine geneigte Anordnung der Verstärkungselemente dazu, dass diese Querschnittsschwächung nahe des Bereichs der angesprochenen Spannungskonzentrationen liegt. In den Großversuchen trat im Fall der vertikalen Gruppe bei einer verbleibenden Höhe des unteren Restquerschnitts h_{ru} = 0,15h ein Biegezugversagen/kombiniertes Versagen im Bereich der Verstärkungselemente auf. Eine Bestimmung

der Biegezugspannungen am Bauteilrand im unteren Restquerschnitt unter Zugrundelegung der Nettoquerschnittswerte und unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung durch die Verstärkungselemente ergab vergleichsweise geringe Mittelwerte der Spannungen $\sigma_{m,y,net}$ = 25,9 N/mm².

5 Zusammenfassung

Dieser Bericht handelt von experimentellen und numerischen Untersuchungen an Brettschichtholzträgern mit runden Durchbrüchen. Insbesondere wurden die Einflüsse exzentrisch positionierter Einzeldurchbrüche sowie Gruppenanordnungen von Durchbrüchen in horizontaler sowie vertikaler Richtung behandelt. Dabei werden neben Betrachtungen im unverstärkten Zustand der verstärkte Zustand in Form eingedrehter, innenliegender Verstärkungselemente untersucht sowie der Effekt dieser Verstärkungsart quantifiziert.

Die Grundlage des Forschungsvorhabens bildeten 2 Versuchsreihen in unterschiedlichem Maßstab (Kleinversuche $b x h$ = 120 mm x 400 mm; Großversuche $b x h$ = 200 mm x 1000 mm).

Im Rahmen der Kleinversuche zeigte sich bei einer Durchbruchgröße d/h = 0,35 im unverstärkten Zustand nur ein geringfügiger Einfluss der Ausmitte. Im verstärkten Zustand äußerte sich der Einfluss der Ausmitte ausgeprägter in Form abnehmender Tragfähigkeiten bei einer Verlagerung der Position des Durchbruchs vom Biegedruck- in Richtung des Biegezugbereichs. Die erreichten Tragfähigkeitssteigerungen infolge unter einem Winkel α = 60° angeordneter Verstärkungselemente belaufen sich auf Höchstlastniveau im Vergleich zum unverstärkten Zustand auf bis zu 98 %, abhängig von der exzentrischen Position der Durchbrüche. Im Fall einer horizontalen Gruppenanordnung von 2 Durchbrüchen sank die Tragfähigkeit bei Verringerung des lichten Abstandes bis minimal l_z = 1,0d im unverstärkten Zustand auf dem Niveau der Durchrisslasten auf etwa 73 % ab. Im verstärkten Zustand (Neigung der Verstärkungselemente α = 60°) kann hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung keine Aussage getroffen werden, da auf Höchstlastniveau an allen Prüfkörper ein globales Biege-/Schubversagen festzustellen war. Im Fall der vertikalen Gruppenanordnung in Form zweier Durchbrüche kleiner Größe (d/h = 0,25) zeigte sich im unverstärkten Zustand im Vergleich zu exzentrischen Durchbrüchen gleicher Größe nur ein geringer gegenseitiger Einfluss, indem die Durchrisslasten auf etwa 92 % sanken. Im verstärkten Zustand (Neigung der Verstärkungselemente α = 90°) zeigte sich nur ein geringer Verstärkungseffekt, was zum einen auf die Neigung der Verstärkungselemente α = 90° und zum anderen auf verschiedene Versagensmodi zurückzuführen ist.

Im Rahmen der Großversuche wurden vier verstärkte Konfigurationen der Kleinversuche (zwei exzentrische Anordnungen e/h = ±0,175, eine horizontale Gruppenanordnung l_z = 1,0d sowie eine vertikale Gruppenanordnung) sowie zwei unverstärkte Konfigurationen geprüft. In den Konfigurationen “exzentrischer Einzeldurchbruch e/h = 0,175“ sowie “vertikale Gruppe“ wurde die Anordnung der Verstärkungselemente optimiert, indem die Neigung auf α = 45° angepasst wurde. Dadurch konnte das Verhältnis der erreichten Höchstlasten der beiden Anordnungen e/h = ±0,175 im Vergleich zu den Kleinversuchen geringfügig von 0,72 auf 0,77 gesteigert werden. Im Fall der vertikalen Gruppe erhöhte sich das Verhältnis aus erreichter und abgeschätzter Schubtragfähigkeit von 0,63 (Kleinversuche) auf 0,80. Jedoch konnte das Potenzial der geneigten Anordnung infolge des Versagens auf Biegezug im unteren Restquerschnitt nur zum Teil ausgeschöpft werden. Die Prüfkörper der horizontalen Gruppe zeigten wie im Fall der Kleinversuche

ein globales Versagen außerhalb der Durchbruchsbereiche. Dehnungsmessungen an Prüfkörpern zweier Konfigurationen unverstärkter, exzentrischer Durchbrüche unter reiner Momentenbeanspruchung konnten das konzentrierte Auftreten von Spannungen in Faserrichtung an den außenliegenden Bereichen des Durchbruchs versuchstechnisch nachweisen. Hinsichtlich der Größenordnung können diese konzentrierten Dehnungen ein Vielfaches der Werte am Bauteilrand betragen. Bei einer Anordnung im Biegedruckbereich äußerte sich dies in der messtechnisch erfassten Ausbildung einer Zone mit plastischen Stauchungen. Bei einer Anordnung im Biegezugbereich traten diese Konzentrationen ebenfalls in Form positiver Dehnungen auf, inwieweit diese das letztendliche Biegezugversagen beeinflussten, kann aus dem beobachteten Versagensmechanismus jedoch nicht beantwortet werden.

In begleitenden FEM-Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung von Verstärkungsmaßnahmen wurden die Untersuchungen ausgeweitet. Im unverstärkten Zustand wurde zunächst der Einfluss der Ausmitte getrennt anhand der einzelnen Spannungskomponenten erläutert und die Bereiche hoher Spannungskonzentrationen bestimmt. In Bezug auf das für den unverstärkten Zustand maßgebende Querzugversagen zeigte sich zwischen den numerischen Berechnungen in Kombination mit einem Weibull-basierten Bemessungsansatz und den Versuchen durchgehend eine gute Übereinstimmung, so dass dieser Ansatz für folgende Untersuchungen weiterverwendet wurde. Auf Grundlage einer Bestimmung der resultierenden Querzugkräfte in Abhängigkeit der Ausmitte, getrennt für die Beanspruchungen Querkraft und Moment, wurde ein Bemessungskonzept abgeleitet, bei dem die Auswertung auf Grundlage der Weibull-Theorie in das derzeit bestehende Nachweisformat übertragen wurde. Durch die vereinfachte Addition der beiden Querzuganteile ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Überlagerung bewegt sich das Nachweisformat auf der sicheren Seite. Eine Validierung anhand der eigenen Versuchsergebnisse unverstärkter Konfigurationen sowie anhand in der Literatur zugänglicher Versuchsergebnisse unverstärkter, zentrischer Durchbrüche wurde gegeben.

Für numerische Betrachtungen des verstärkten Zustandes wurde zunächst die axiale Verbundsteifigkeit zwischen Vollgewindeschraube – Holz für verschiedene Neigungen zwischen Schraubenachse und Holzfaserrichtung in kombinierten Versuchen und Simulationen bestimmt. Dies in das Simulationsmodell implementierte Verbundsteifigkeit konnte mit Dehnungsmessungen in den Vollgewindeschrauben validiert werden. Eine Bestimmung von Versagenslasten auf Höchstlastniveau auf Basis maximaler Spannungswerte am Durchbruchrand im ungerissenen Zustand war unzureichend genau. Infolgedessen wurde der verstärkte, teilgerissene Zustand in stark vereinfachter Weise abgebildet, indem auf beiden Seiten des Durchbruchs jeweils ein Riss der über Bild- und Videoaufzeichnungen von Versuchen abgeschätzten Länge $d/2$ angesetzt wurde. Der Effekt der Verstärkungselemente wurde anhand getrennter Betrachtungen hinsichtlich Querzug und Schub und verschiedenartig geneigter Verstärkungselemente (α = 90°, 60°, 45°) am Beispiel der Kleinversuche (d/h = 0,35; e/h = -0,175 bis 0,175) quantifiziert. Bei Anordnungen in der Biegedruckzone wurden die größte Reduktion der Querzugbeanspruchung im Träger bei unter α = 60° geneigten Verstärkungselementen erreicht, bei Anordnungen in der Biegezugzone bei unter α = 45° geneigten Verstärkungselementen. Die größte Reduktion der Schubbeanspruchung wurde durchgehend bei unter α = 45° geneigten Verstärkungselementen erzielt. Numerische Betrachtungen hinsichtlich der in den geneigten Verstärkungselementen auftretenden Kräfte am Beispiel zweier exzentrischer Konfigurationen der Kleinversuche ergaben, dass eine vereinfachte Umrechnung der resultierenden Querzugkräfte auf die geneigte Ebene auf der sicheren (Anordnung Biegedruckzone) teilweise aber auch geringfügig auf der unsicheren Seite (Anordnung Bie-

gezugzone) liegen kann. Eine alternative Bestimmung der Horizontalanteile der Kräfte in Abhängigkeit des Schubflusses infolge der Querkraft auf Höhe der potentiellen Rissebenen ergaben bei einer Neigung α = 60° Längen von etwa 0,3d und bei einer Neigung α = 45° Längen von etwa 0,55d. Dehnungsmessungen in Verstärkungselementen der Großversuche bestätigten diese Größenordnung der angegebenen Werte, lieferten jedoch im Vergleich zu den in numerischen Berechnungen der Kleinversuche ermittelten Werte durchgehend etwas niedrigere Werte. Vergleichende Betrachtungen über eine Umrechnung der resultierenden Querzugkräfte – ermittelt nach Abschnitt 4.1.1 – stellten für die vorliegenden Fälle eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung dar. Infolge der vereinfachten simulationstechnischen Betrachtungen mit angenommenen Risslängen und einer Betrachtung weniger Beispiele kann jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein allgemeingültiges Bemessungskonzept angegeben werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Hinsichtlich Gruppenanordnungen von Durchbrüchen in horizontaler Richtung wurde die gegenseitige Beeinflussung im Rahmen einer Parameterstudie unter Variation des lichten Abstandes quantifiziert. Als Beurteilungskriterium wurden in numerischen Berechnungen basierend auf einem Weibull-basierten Bemessungsansatz die Durchrisslasten der Gruppen und der entsprechenden Einzeldurchbrüche im unverstärkten Zustand ermittelt und miteinander verglichen. Aus diesen Ergebnissen wurde für Gruppen von bis zu 3 Durchbrüchen und einer Durchbruchgröße $d/h \leq 0{,}30$ ein Abminderungsbeiwert in Abhängigkeit des lichten Abstandes abgeleitet. Wenngleich die Anwendungsgrenzen in den Versuchen nicht eingehalten wurden und als vergleichbarer Einzeldurchbruch nur der jeweils auflagernahe Durchbruch der Gruppe versuchstechnisch geprüft wurde, wären die verschiedenen Zustände über den vorgeschlagenen Abminderungsbeiwert abgedeckt. Das Mindestmaß $l_z = 1{,}5h$, ab dem gemäß DIN EN 1995-1-1/NA:2013 ein gegenseitiger Einfluss vernachlässigt werden darf, kann bis zur untersuchten Durchbruchgröße $d/h = 0{,}30$ bestätigt werden. Bei noch größeren Durchbrüchen ist zu erwarten, dass sich das Mindestmaß vergrößern wird.

Für Gruppenanordnungen in vertikaler Richtung wurde ein zur horizontalen Anordnung analoges Vorgehen gewählt. Aus geometrischen Randbedingungen wurden die Untersuchungen auf eine Durchbruchgröße $d/h \leq 0{,}15$ sowie eine Anzahl von bis zu 3 Durchbrüchen beschränkt. In Abhängigkeit des lichten Abstandes wurde ein Abminderungsbeiwert angegeben. Im Vergleich zu horizontalen Anordnungen äußert sich die gegenseitige Beeinflussung in einem geringeren Ausmaß. Ein Mindestabstand, ab dem eine gegenseitige Beeinflussung näherungsweise vernachlässigt werden kann, ergab sich aus den Untersuchungen ab etwa $l_z \geq 5d$, was praktisch jedoch nur bei großen Trägerhöhen in Kombination mit sehr kleinen Durchbrüchen möglich ist.

6 Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen

AICHER & DILL-LANGER (1997)

Aicher, S., Dill-Langer, G. (1997). *DOL effect in tension perpendicular to the grain of glulam depending on service classes and volume*. CIB-W18, Paper No. CIB-W18/30-9-1.Vancouver.

AICHER & HÖFFLIN (2006)

Aicher, S., Höfflin, L. (2006). *Tragfähigkeit und Bemessung von Brettschichtholzträgern mit runden Durchbrüchen – Sicherheitsrelevante Modifikationen der Bemessungsverfahren nach Eurocode 5 und DIN 1052*. (Forschungsbericht). MPA Stuttgart.

ARDALANY (2012)

Ardalany, M. (2012). *Analysis and design of laminated veneer lumber beams with holes*. (Dissertation). Department of Civil and Natural Resources Engineering. University of Canterbury, Christchurch.

APA REPORT T2009L-30 (2009)

APA Report T2009L-30 (2009). "*Allowable holes in LVL"*. The Engineered Wood Association (EWA). Washington, USA. 1 - 21.

BLAß & BEJTKA (2003)

Blaß, H.J., Bejtka, I. (2003). *Querzugverstärkungen in gefährdeten Bereichen mit selbstbohrenden Holzschrauben*. (Forschungsbericht). Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau. Universität Karlsruhe.

BLAß ET AL. (1998)

Blaß, H.J., Ehlbeck, J., Schmid, M. (1998). *Ermittlung der Querzugfestigkeit von Voll- und Brettschichtholz*. (Forschungsbericht). Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe.

BLAß ET AL. (2006)

BLAß, H.J., BEJTKA, I., UIBEL, T. (2006). *Tragfähigkeit von Verbindungen mit selbstbohrenden Holzschrauben mit Vollgewinde*. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau 4. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH).

BRANDNER ET AL. (2012)

Brandner, R., Gatternig, W., Schickhofer, G. (2012). *Determination of shear strength of structural and glued laminated timber*. CIB-W18, Paper No. CIB-W18/45-12-2.Växjö.

DANIELSSON (2006)

Danielsson, H. (2006). *The strength of glulam beams with holes – a survey of tests and calculation methods*. Department of Construction Sciences, Structural Mechanics. Lund University.

DRÖSCHER ET AL. (2016)

Dröscher, J., Schickhofer, G., Augustin, M. (2016). *Prüftechnische Untersuchungen unterschiedlicher Verstärkungsmethoden für BSH- und BSP-Träger mit großen runden Durchbrüchen.* Prüfbericht. Institut für Holzbau und Holztechnologie. TU Graz. holz.bau forschungs gmbh.

FALK ET AL. (2003)

Falk, R.H., DeVisser, D., Plume, G.R., Fridley, K.J. (2003). Effect of drilled holes on the bending strength of large dimension Douglas-fir lumber. *Forest products journal*, *53*(5), 55 - 60

GUSTAFSSON (1988)

Gustafsson, P.J. (1988). *A study of strength of notched beams*. CIB-W18, Paper No. CIB-W18/21-10-1.Vancouver.

HAASE (1997)

Haase, K. (1997). *Durchbrüche in Brettschichtholzträgern: Spannungstheoretische und bruchmechanische Untersuchungen*. (Dissertation). TU Berlin

HEMMER (1985)

Hemmer, K. (1985). *Versagensarten des Holzes der Weißtanne (Abies alba) unter mehrachsiger Beanspruchung*. (Dissertation). Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine. 4. Folge – Heft 11. Universität Fridericiana Karlsruhe.

HÖFFLIN (2005)

Höfflin, L. (2005). *Runde Durchbrüche in Brettschichtholzträgern – Experimentelle und theoretische Untersuchungen*. (Dissertation). Universität Stuttgart.

JOHANNESSON (1983)

Johannesson, B. (1983). *Design problems for glulam beams with holes*. (Dissertation). Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg.

KOLB & EPPLE (1985)

Kolb, H., Epple, A. (1985). *Verstärkung von durchbrochenen Brettschichtbindern*, (Schlussbericht Forschungsvorhaben I.4-34810). Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart.

KOLB & FRECH (1977)

Kolb, H., Frech, P. (1977). Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, *35*(4), 125 - 134

KRABBE & SCHOWE (1977)

Krabbe, E., Schowe, W. (1977). *Spannungstheoretische Untersuchungen an hohen, durchbrochenen Brettschichtträgern*. (Forschungsbericht Nr. B II 5 – 800175 – 34). Arbeitsgruppe Ing.-Holzbau und Baukonstruktionen. Ruhr-Universität Bochum

LARSEN & GUSTAFSSON (1989)

Larsen H.J., Gustafsson P.J. (1989). *Design of endnotched beams*. CIB-W18, Paper No. CIB-W18/22-10-1.Berlin.

MESTEK & WINTER (2011)

Mestek, P., Winter, S. (2011). *Konzentrierte Lasteinleitung in Brettsperrholzkonstruktionen – Verstärkungsmaßnahmen*. (Forschungsbericht AiF Forschungsvorhaben Nr. 15892). Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München.

NEUHAUS (1981)

Neuhaus, H. (1981). *Elastizitätszahlen von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit*. (Dissertation). In: Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, Mitteilung Nr. 81-8. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum.

SCHEER & HAASE (2000)

Scheer, C., Haase, K. (2000). Durchbrüche in Brettschichtholzträgern – Teil 1: Spannungstheoretische Untersuchungen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, *58*(3), 153 - 161

STRAHM (2013)

Strahm, T. (2013). *Lastpfad-Anordnung eingeklebter Stahl-Stangen bei Durchbrüchen im Holzbau*. 19. Internationales Holzbau-Forum IHF. Garmisch-Partenkirchen

TAPIA & AICHER (2016)

Tapia, C., Aicher, S. (2016). *Mehrfach-Durchbrüche in Brettschichtholz*. 3. Stuttgarter Holzbau-Symposium. 153 - 141

WEIBULL (1939)

Weibull, W. (1939). *A statistical theory of the strength of materials*. Proceedings of the Royal Swedish Institute of Engineering, No. 151. Stockholm.

WOLFTHALER (2015)

Wolfthaler, F. (2015). *Entwicklung einer Messschraube und Anwendung auf das Bauwerksmonitoring und die Prüftechnik*. (Masterarbeit M-4-08/2015). Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz.

Normen und Regelwerke

EN 1995-1-1:2010

DIN EN 1995-1-1:2010-12, Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008, DIN, Berlin

DIN EN 1995-1-1/NA:2013

DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, DIN, Berlin

DIN EN 14080:2013

DIN EN 14080: 2013-09, Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14080:2013, DIN, Berlin

DIN EN 14358:2016

DIN EN 14358: 2016-11, Holzbauwerke – Berechnung und Kontrolle charakteristischer Werte; Deutsche Fassung EN 14358:2016, DIN, Berlin

DIN EN 14545:2009

DIN EN 14545: 2009-02, Holzbauwerke – Nicht stiftförmige Verbindungselemente – Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14545:2008, DIN, Berlin

DIN EN 26891:1991

DIN EN 26891:1991-07, Holzbauwerke, Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln, Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens (ISO 6891:1983), Deutsche Fassung EN 26891:1991, DIN, Berlin, 1991

Z-9.1-519

Z-9.1-519 vom 27.01.2012, SPAX-S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmittel, SPAX International GmbH & Co. KG, DIBt, Berlin

Z-9.1-832

Z-9.1-832 vom 02.09.2011, SPAX-Gewindestangen als Holzverbindungsmittel, SPAX International GmbH & Co. KG, DIBt, Berlin

Software/Hardware

ANSYS

ANSYS, Release 14.5, ANSYS, Inc., Canonsburg/PA, 2012

ARAMIS

ARAMIS, Benutzerhandbuch – Software, GOM – Gesellschaft für Optische Messtechnik, Braunschweig, 2007

ARAMIS, Benutzerinformation – Hardware, GOM – Gesellschaft für Optische Messtechnik, Braunschweig, 2008

7 Anhang

Anhang A Versuchsdaten Kleinversuche

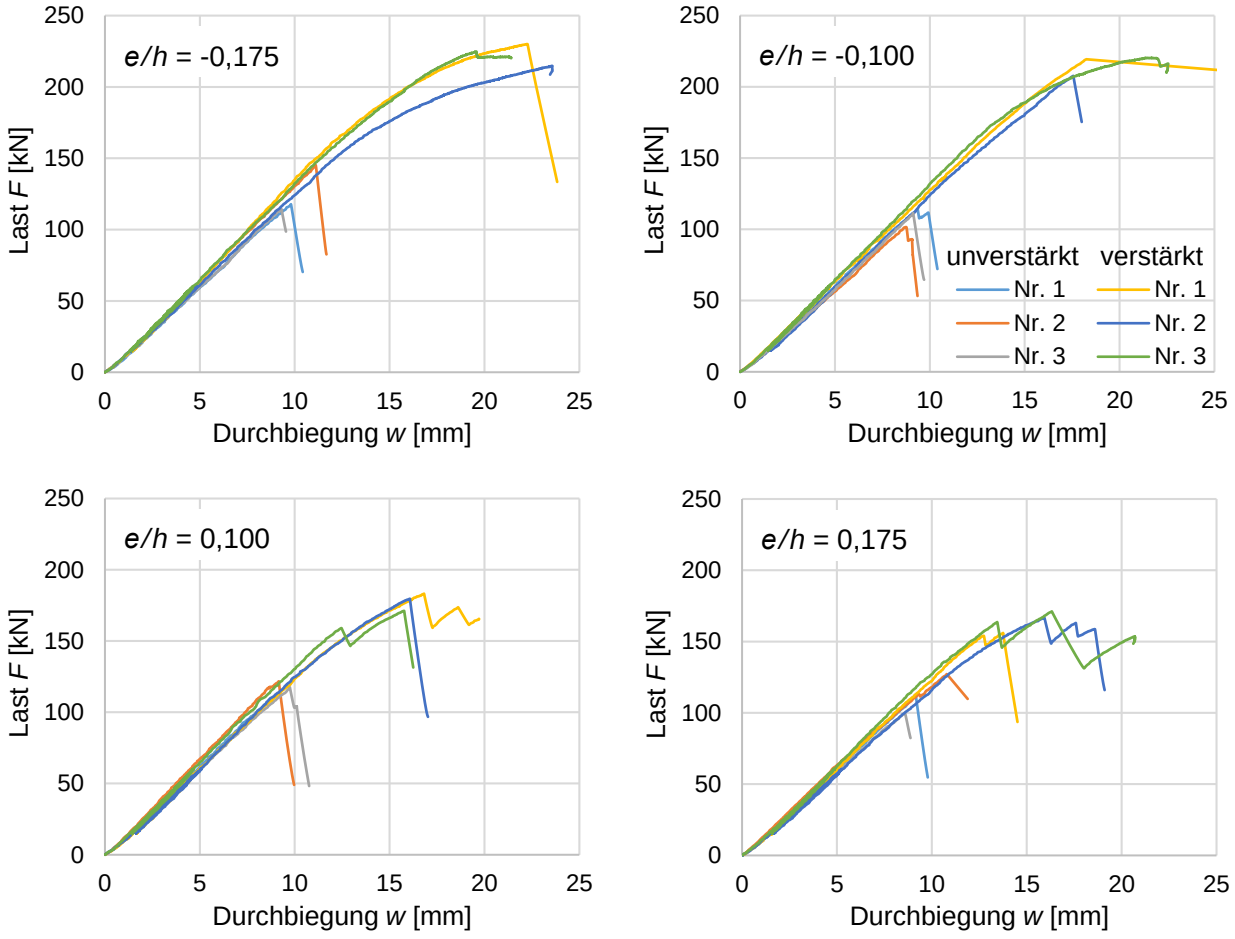


Abbildung A - 1: Last-Verformungsdiagramme exzentrischer Einzeldurchbrüche d/h = 0,35

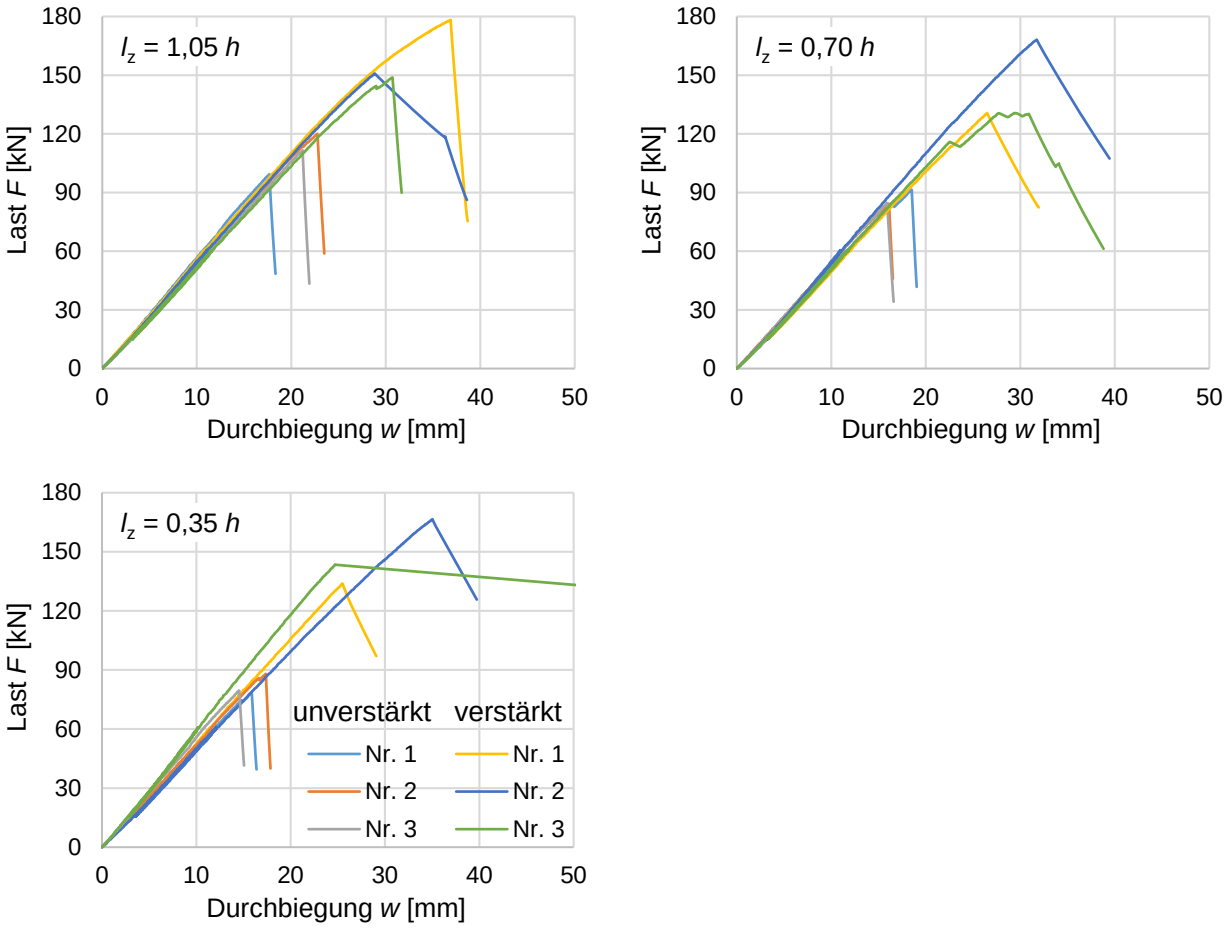


Abbildung A - 2: Last-Verformungsdiagramme horizontaler Gruppen

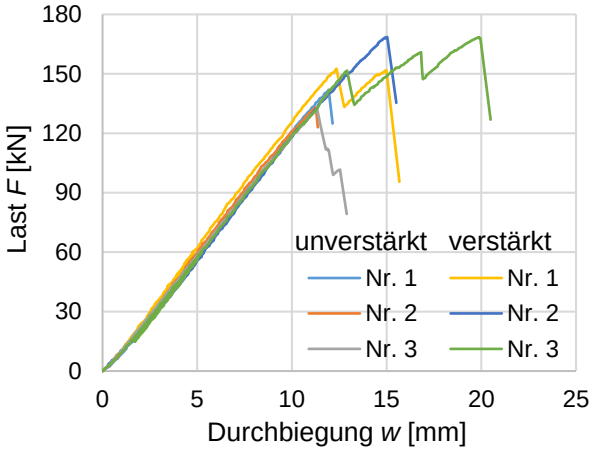


Abbildung A - 3: Last-Verformungsdiagramm vertikaler Gruppen

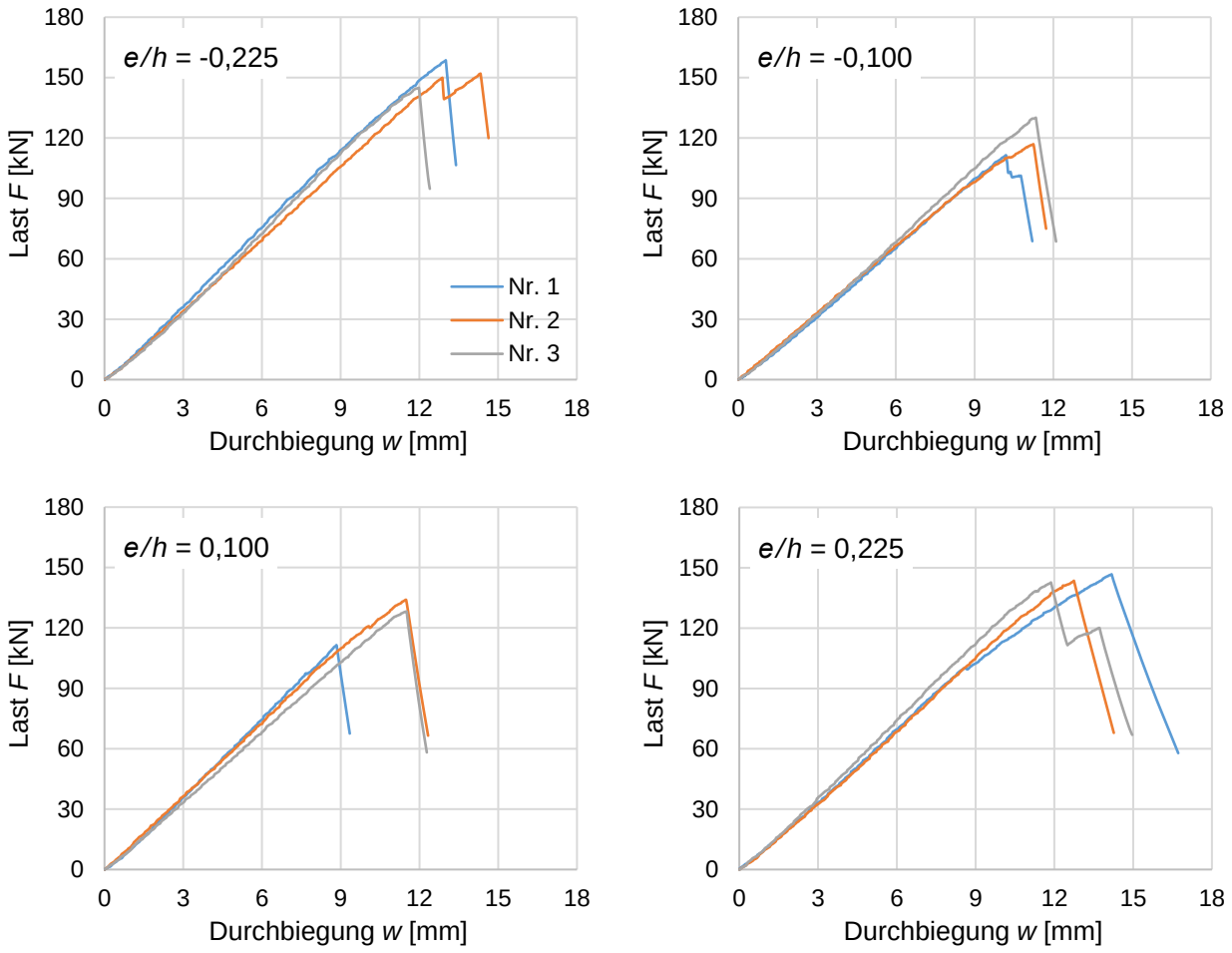


Abbildung A - 4: Last-Verformungsdiagramme exzentrischer Einzeldurchbrüche d/h = 0,25

Anhang B Versuchsdaten Großversuche

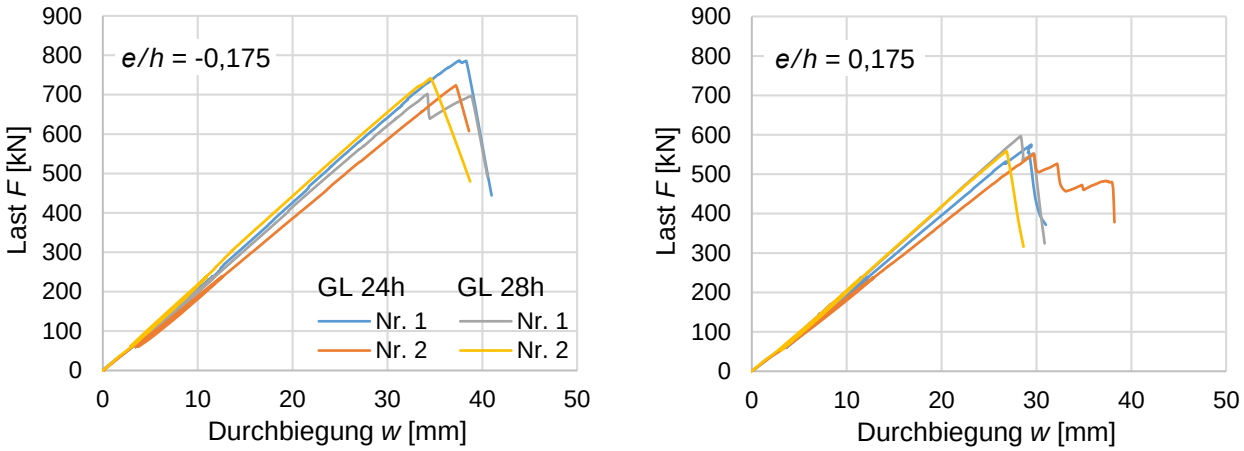


Abbildung B - 1: Last-Verformungsdiagramme exzentrischer Einzeldurchbrüche d/h = 0,35

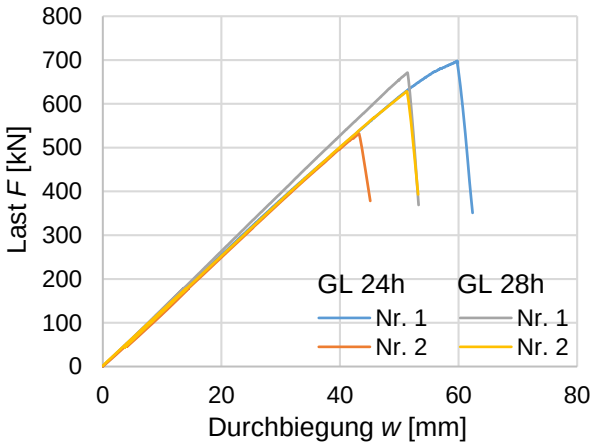


Abbildung B - 2: Last-Verformungsdiagramm horizontaler Gruppen

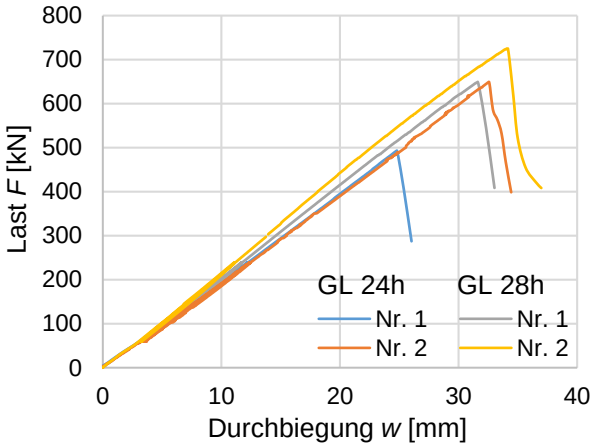


Abbildung B - 3: Last-Verformungsdiagramm vertikaler Gruppen

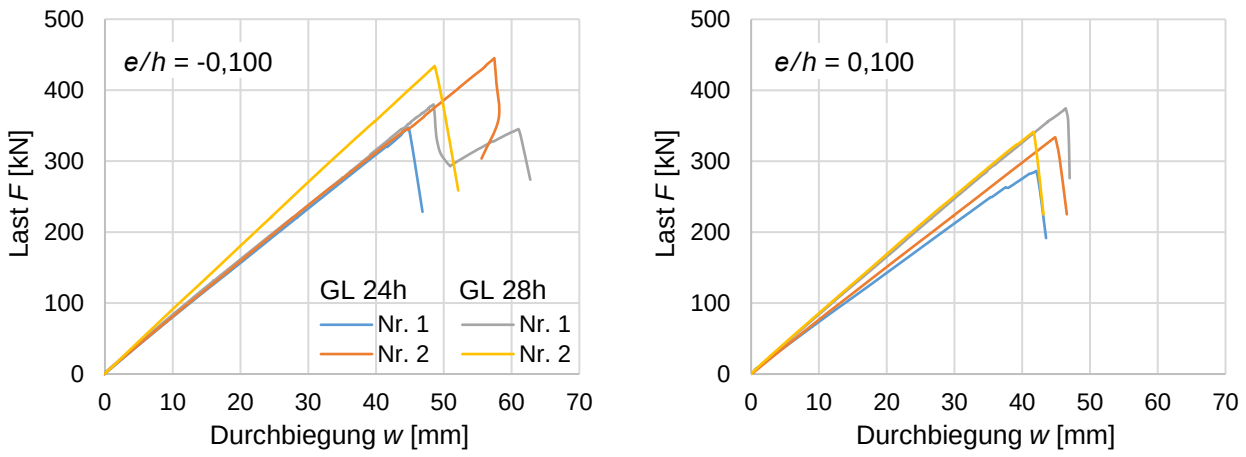


Abbildung B - 4: Last-Verformungsdiagramme exzentrischer Einzeldurchbrüche d/h = 0,40

Anhang C Versuchsdaten axiales Verbundverhalten Vollgewindeschrauben

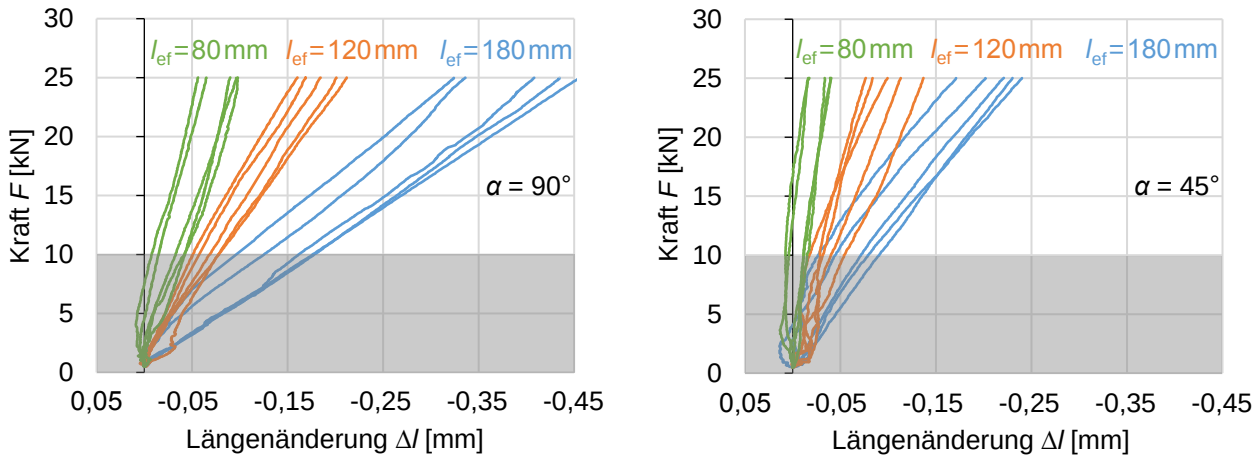


Abbildung C - 1: Last-Verformungsverhalten von Druckversuchen zum axialen Verbundverhalten

Anhang D Bewertung Sicherheitsniveau Bemessungskonzept

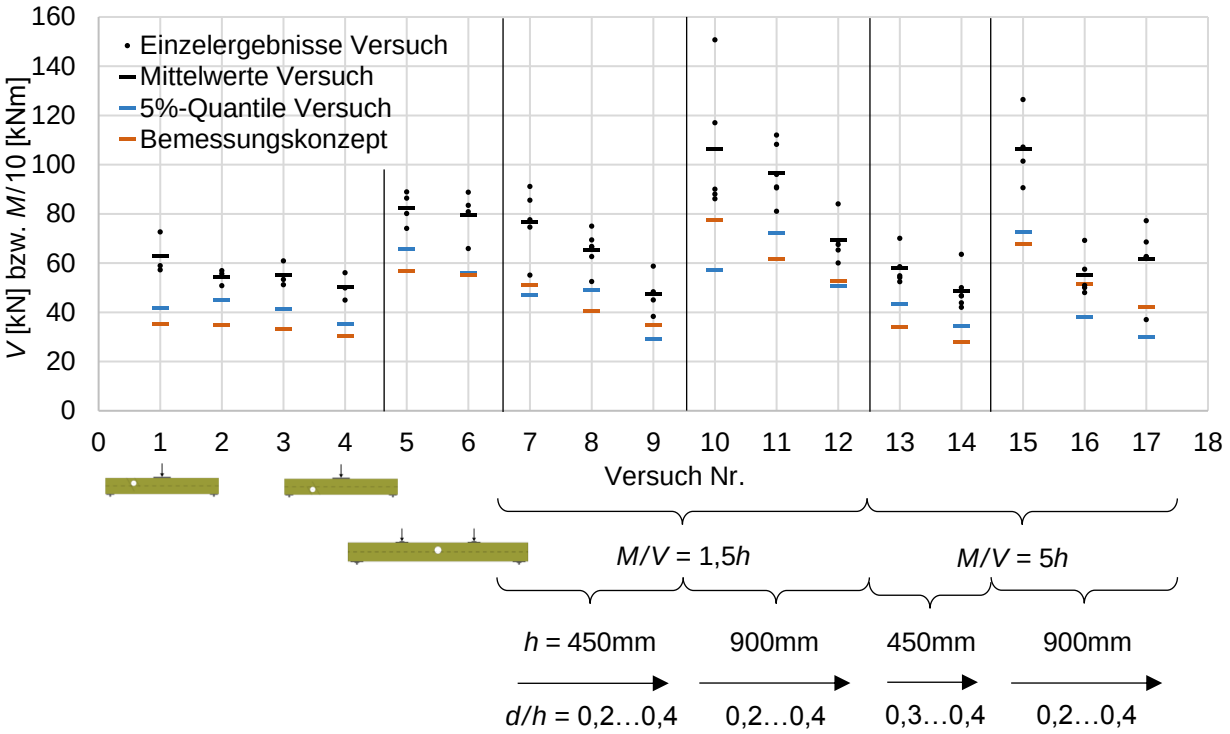


Abbildung D - 1: Vergleich Versuchsergebnisse – Bemessungskonzept auf Basis individueller Variationskoeffizienten